



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

“Ανάπτυξη δυναμικού θερμικού μοντέλου μετασχηματιστή  
διανομής για την ανάλυση της επίδρασης της φόρτισης  
των ηλεκτρικών οχημάτων στη διάρκεια ζωής τους”

Αικατερίνη - Ελένη Δραγάση

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Μάρτιος 2013





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

“Ανάπτυξη δυναμικού θερμικού μοντέλου μετασχηματιστή  
διανομής για την ανάλυση της επίδρασης της φόρτισης  
των ηλεκτρικών οχημάτων στη διάρκεια ζωής τους”

**Αικατερίνη - Ελένη Δραγάση**

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2012

.....  
Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παπαθανασίου Σταύρος

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεωργιάκης Παύλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.



.....  
Αικατερίνη - Ελένη Δραγάση

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © 2013 - All rights reserved

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



*Στη μητέρα μου*





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μετασχηματιστές αποτελούν ένα από τα βασικότερα στοιχεία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, αφού κατέχουν κυρίαρχο ρόλο τόσο στη μεταφορά όσο και στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνεχής ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών αναμένεται να αλλάξουν σημαντικά τη μορφή του τροφοδοτούμενου φορτίου. Τα δίκτυα διανομής πρέπει να ανταπεξέλθουν σε νέες απαιτήσεις ως προς τον έλεγχο του φορτίου, με την εφαρμογή ευέλικτων δομών και πρωτότυπων τεχνικών ελέγχου.

Η κλιματική αλλαγή, οι ανησυχίες για τις προμήθειες ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως, αλλά και οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην έντονη ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Με τη διείσδυση όμως των ηλεκτρικών οχημάτων η μορφή του φορτίου μπορεί να αλλάξει σημαντικά. Η αλλαγή αυτή μπορεί να επιφέρει πολύ αρνητικά αποτελέσματα στη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών του δικτύου διανομής. Είναι σημαντικό επομένως να αναπτυχθούν συστήματα ελέγχου της φόρτισης των οχημάτων. Για την επιλογή του βέλτιστου τρόπου φόρτισης των οχημάτων στο δίκτυο πρέπει να εξετασθεί, μεταξύ άλλων, και το πώς επιδρά η φόρτιση αυτή στη λειτουργία και στη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών.

Για την επιλογή του καταλληλότερου τρόπου φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, όσον αφορά στην επίδρασή του στους μετασχηματιστές του δικτύου διανομής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο υπολογισμού της θερμικής συμπεριφοράς του μετασχηματιστή. Το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή είναι ένα εργαλείο για την παρακολούθηση και αξιολόγηση των μετασχηματιστών του Δικτύου Διανομής, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει χρονοβόρες και δαπανηρές μετρήσεις.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός δυναμικού θερμικού μοντέλου του μετασχηματιστή. Από το μοντέλο αυτό υπολογίζουμε θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του μετασχηματιστή και επιδρούν άμεσα στη διάρκεια ζωής αυτού. Επίσης, με τη χρήση του θερμικού μοντέλου εξετάστηκε η θερμική συμπεριφορά μετασχηματιστών για τη λειτουργία τους υπό δεδομένη ζήτηση και θερμοκρασία περιβάλλοντος και αξιολογήθηκαν οι παράγοντες, που επιδρούν στη διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή. Τα φορτία, τα οποία εφαρμόστηκαν στο θερμικό μοντέλο και αξιολογήθηκαν μέσω του μοντέλου αυτού, προέκυψαν από έναν αλγόριθμο προγραμματισμού της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, με στόχο την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων φόρτισης αυτών. Με τον τρόπο αυτό, διερευνήθηκε η επίδραση διαφορετικών μεθόδων φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στους μετασχηματιστές. Για την ανάπτυξη του θερμικού μοντέλου του μετασχηματιστή χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

### ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Μετασχηματιστές, δίκτυο διανομής, ηλεκτρικά οχήματα, θερμικό μοντέλο, διάρκεια ζωής, βέλτιστο σενάριο φόρτισης.



## *ABSTRACT*

Transformers constitute one of the main elements of energy distribution systems, since they have predominant role in energy transmission and distribution. The continuous development of distributed generation and renewable energy resources, in order to cover energy needs, is expected to change drastically the load with the energy distribution systems have to serve. Distribution grids have to cope with new requirements, as far as load control is concerned, with the application of flexible structures and prototype control techniques.

Climate change, concerns over supplies of fossil fuels worldwide, as well as, increasing energy needs, have led in recent years, in strong development of electromobility. With the penetration of electric vehicles, however, the form of the load can be changed significantly. This change can lead to very negative results over the life of the distribution transformers. It is therefore important to develop control systems of the vehicles loading. In order to choose the optimal way of charging the vehicles from the network, it must be considered, among other aspects, the affect of the charging on the operation and on the length of life of the transformers.

In order to select the most suitable way of charging of the electric vehicles, as far as its impact on distribution transformers is concerned, a model which calculates the transformers thermal performance can be used. Transformer thermal model is a tool for condition monitoring and assessment of distribution transformers which can be used in order to replace expensive and time-consuming measurements.

The purpose of this thesis is the development of the transformer's dynamic thermal model. With the use of this model we can calculate temperatures developed inside the transformer, which directly affect the length of transformers life. In this way, the thermal performance of the transformer was tested, for operation under a given demand and ambient temperature. Also the factors affecting the life of a transformer were evaluated. The loads applied on the thermal model and which were evaluated, derived from an algorithm for schedule of electric vehicles loading in order to assess different scenarios of their charge. In this way, we examined the affect on the transformers from electric vehicles charging. For the development of the transformers thermal model MATLAB programming environment was used.

### *KEY WORDS:*

Transformers, distribution grid, electric vehicles, thermal model, length of life, optimal charging scenario.



## *ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ*

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή ΕΜΠ, της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την ανάθεση της διπλωματικής αυτής εργασίας, που εκπονήθηκε υπό την επίβλεψή του, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013.

Επίσης ένα θερμό ευχαριστώ οφείλω στον κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο, υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, για την ουσιαστική καθοδήγηση και τη συνεχή παρότρυνσή του, που συνέβαλαν τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω την οικογένειά μου, η οποία με στήριξε σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου για την υποστήριξη και τη βοήθειά της. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στους πολύ κοντικούς μου ανθρώπους, που ήταν δίπλα μου και με ενθάρρυναν για να επιτύχω τους στόχους μου.

Κατερίνα - Ελένη Δραγάση, Μάρτιος 2013



## Περιεχόμενα

<b>1 Δίκτυο διανομής και μετασχηματιστές.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....</b>	<b>21</b>
1.1.1 Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής.....	21
1.1.2 Χαρακτηριστικά Δικτύου Διανομής.....	22
1.1.3 Διεσπαρμένη παραγωγή.....	25
1.1.4 Ευφυή Δίκτυα.....	26
1.1.5 Μικροδίκτυα.....	28
1.1.6 Προγράμματα Η/Υ ανάπτυξης και ελέγχου ΔΔ.....	30
1.1.7 Αυτοματισμός των ΔΔ.....	32
1.1.8 Μετασχηματιστές στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής.....	33
<b>1.2 Μετασχηματιστές.....</b>	<b>34</b>
1.2.1 Γενικά για τους μετασχηματιστές.....	34
1.2.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών.....	36
1.2.2.1 Διαχωρισμός με βάση τον πυρήνα.....	38
1.2.2.2 Τυλίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών διανομής.....	41
1.2.3 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών.....	44
1.2.4 Ανάλυση μετασχηματιστή ως ηλεκτρικό κύκλωμα.....	47
1.2.4.1 Αυτεπαγωγή – Αλληλεπαγωγή.....	47
1.2.4.2 Συζευγμένα πηνία.....	48
1.2.4.3 Μετασχηματιστές σε τέλεια σύζευξη.....	50
1.2.4.4 Ιδανικός μετασχηματιστής.....	51
1.2.4.5 Μη ιδανικός – Πραγματικός μετασχηματιστής.....	52
1.2.5 Συνδεσμολογία τριφασικών μετασχηματιστών.....	54
1.2.6 Απώλειες μετασχηματιστή.....	55
1.2.6.1 Απώλειες κενού φορτίου.....	56
1.2.6.1.1 Απώλειες υστερήσεως.....	57
1.2.6.1.2 Απώλειες δινορευμάτων.....	58
1.2.6.2 Απώλειες φορτίου.....	59
1.2.6.3 Επιπρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών.....	64
1.2.6.4 Τυποποιημένες απώλειες μετασχηματιστών διανομής 50-2500kVA.....	67
<b>1.3 Ψύξη μετασχηματιστή διανομής.....</b>	<b>68</b>
1.3.1 Τύπου ελαίου.....	69
1.3.1.1 Μονωτικό χαρτί.....	73
1.3.1.2 Μονωτικά λάδια.....	74
1.3.1.2.1 Λειτουργίες του μονωτικού λαδιού.....	74

1.3.1.2.2	Ορυκτά και συνθετικά λάδια.....	74
1.3.1.2.3	Χαρακτηριστικά λαδιών.....	75
1.3.1.2.4	Ιξώδες.....	75
1.3.2	Ξηρού τύπου.....	77
1.3.3	Τύπου GIS.....	80
<b>1.4</b>	<b>Θερμική μελέτη μετασχηματιστών.....</b>	<b>81</b>
1.4.1	Θερμική μελέτη των τυλιγμάτων.....	82
1.4.2	Θερμική ροή στο εσωτερικό του μετασχηματιστή.....	89
1.4.2.1	Ροή θερμότητας από τις επιφάνειες των πηνίων και του πυρήνα προς το ψυκτικό μέσο.....	91
1.4.2.1.1	Ροή θερμότητας από τα πηνία σε υγρό με φυσική μεταγωγή.....	92
1.4.2.1.2	Ροή θερμότητας από τα πηνία σε υγρό με βεβιασμένη μεταγωγή.....	93
1.4.2.1.3	Επίδραση του ιξώδους του λαδιού.....	93
1.4.2.2	Μεταφορά θερμότητας από το υγρό στον αέρα στους μετασχηματιστές λαδιού.....	93
1.4.2.2.1	Η ροή του λαδιού και η σημαντική επίδρασή της στη θερμοκρασία.....	94
1.4.2.2.2	Σχέση, που συνδέει τη ροή θερμότητας, τη ροή λαδιού και τη θερμοκρασία.....	95
1.4.2.2.3	Ροή θερμοσίφωνα, διάγραμμα και εμπειρικά μέσα για τον προσδιορισμό της ροής του υγρού και της διανομής της θερμοκρασίας.....	95
1.4.2.2.4	Ροή λαδιού από ξεχωριστές αντλίες.....	98
1.4.2.3	Ροή θερμότητας από το λάδι στον αέρα – Κυκλοφορία θερμοσίφωνα.....	98
1.4.2.3.1	Απαγωγή της θερμότητας από σώματα, που εκπέμπουν θερμότητα και ψυκτικούς σωλήνες με ροή θερμοσίφωνα.....	99
1.4.2.3.2	Ακτινοβολία.....	100
1.4.2.3.3	Διαίρεση της δεξαμενής και των ψυκτών σε κάθετες ζώνες...100	
1.4.2.4	Ροή θερμότητας από το λάδι προς τον αέρα με εξαναγκασμένη ροή αέρα ή εξαναγκασμένη ροή λαδιού.....	101
1.4.3	Μεταβολές θερμοκρασίας, που ακολουθούν μεταβολές του φορτίου.103	
1.4.3.1	Θέρμανση των αγωγών.....	103
1.4.3.2	Απαγωγή της θερμότητας στο ψυκτικό μέσο.....	104
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>105</b>
<b>2</b>	<b>Μοντελοποίηση μετασχηματιστών.....</b>	<b>107</b>
2.1	<b>Παρακολούθηση και αξιολόγηση της κατάστασης του μετασχηματιστή.107</b>	



2.1.1 Βασικές πτυχές στην παρακολούθηση και αξιολόγηση των μετασχηματιστών.....	109
<b>2.2 Θερμικό μοντέλο μετασχηματιστή.....</b>	<b>110</b>
2.2.1 Hot-spot θερμοκρασία.....	111
2.2.2 Προσέγγιση hot-spot θερμοκρασίας και παρατηρήσεις.....	113
2.2.3 Σχηματικές αναπαραστάσεις μεταφοράς θερμότητας των μετασχηματιστών.....	115
2.2.4 Θερμικά μοντέλα top-oil και hot-spot.....	117
2.2.4.1 Αναλογία θερμικού – ηλεκτρικού κυκλώματος.....	117
2.2.4.2 Θερμικά χαρακτηριστικά μονωτικού λαδιού και προσομοίωσή τους.....	119
2.2.4.3 Σύστημα εξισώσεων θερμικού μοντέλου.....	122
<b>2.3 Θερμικό μοντέλο υπολογισμού top-oil θερμοκρασίας.....</b>	<b>125</b>
<b>2.4 Θερμικό μοντέλο υπολογισμού hot-spot θερμοκρασίας.....</b>	<b>129</b>
<b>2.5 Χρονική σταθερά top-oil για τα θερμικά μοντέλα.....</b>	<b>134</b>
<b>2.6 Χαρακτηριστικά Ζωής της Μόνωσης των Μετασχηματιστών.....</b>	<b>140</b>
2.6.1 Εξισώσεις γήρανσης της μόνωσης.....	141
<b>2.7 Συνοπτική παρουσίαση αλγορίθμου.....</b>	<b>147</b>
2.7.1 Σχέσεις – Διάγραμμα ροής.....	147
<b>2.8 Εφαρμογή θερμικού μοντέλου και σύγκριση αποτελεσμάτων με μετρούμενες τιμές.....</b>	<b>149</b>
2.8.1 Τριφασικός μετασχηματιστής 250MVA.....	150
2.8.1.1 Σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	151
2.8.1.2 Μεταβλητή θερμοκρασία περιβάλλοντος-Θερινή ημέρα.....	153
2.8.1.3 Μεταβλητή θερμοκρασία περιβάλλοντος-Χειμερινή ημέρα.....	155
2.8.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων χειμερινής και θερινής ημέρας.....	156
2.8.2 Τριφασικός μετασχηματιστής 400MVA.....	159
2.8.2.1 Σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.....	160
2.8.2.2 Δοκιμές για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.....	162
2.8.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων από εφαρμογή του ίδιου ανά μονάδα φορτίου σε διαφορετικούς μετασχηματιστές.....	164
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>166</b>

<b>3 Ηλεκτρικά οχήματα.....</b>	<b>167</b>
<b>3.1 Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.....</b>	<b>169</b>
3.1.1 Τμήματα του ηλεκτρικού οχήματος, που συνδέονται με τη διαδικασία ανεφοδιασμού.....	169
<b>3.2 Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων.....</b>	<b>171</b>
3.2.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	171
3.2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση το μέγεθος και τη χρήση.....	173
<b>3.3 Πηγές ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων.....</b>	<b>173</b>
3.3.1 Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές.....	173
3.3.1.1 Παράμετροι μπαταριών.....	176
3.3.2 Υπερπυκνωτές.....	179
3.3.3 Κυψέλες καυσίμου.....	179
<b>3.4 Περιοριστικοί παράγοντες - Δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και αυτονομία.....</b>	<b>180</b>
<b>3.5 Σύνδεση των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στο δίκτυο-V2G.....</b>	<b>181</b>
3.5.1 Επικοινωνία μεταξύ ηλεκτροκίνητων οχημάτων και δικτύου.....	184
<b>3.6 Έλεγχος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....</b>	<b>185</b>
3.6.1 Μοντέλο Ελέγχου Φόρτισης.....	185
3.6.2 Σενάρια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	190
<b>3.7 Καμπύλη Ζήτησης - Εφαρμογή Σεναρίων.....</b>	<b>191</b>
3.7.1 Θερινή Ημέρα.....	191
3.7.2 Χειμερινή Ημέρα.....	198
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>199</b>
<b>4 Εφαρμογή θερμικού μοντέλου σε μετασχηματιστή του δικτύου διανομής.....</b>	<b>201</b>
<b>4.1 Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζώης χωρίς φόρτιση PEV.....</b>	<b>203</b>

4.1.1	Θερινό Φορτίο .....	203
4.1.2	Χειμερινό Φορτίο.....	206
4.1.3	Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή.....	208
<b>4.2</b>	<b>Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής της μόνωσής του για Μη ελεγχόμενη Φόρτιση PEV (Dump Charging).....</b>	<b>209</b>
4.2.1	Θερινό Φορτίο.....	209
4.2.2	Χειμερινό Φορτίο.....	212
4.3.3	Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή.....	214
<b>4.3</b>	<b>Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής της μόνωσής του για Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV Διζωνικού τιμολογίου (Dual Tariff).....</b>	<b>216</b>
4.3.1	Θερινό Φορτίο.....	216
4.3.2	Χειμερινό Φορτίο.....	219
4.3.3	Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή.....	221
<b>4.4</b>	<b>Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής της μόνωσής του για Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV Ελαχιστοποίησης Κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης λειτουργίας του δικτύου (“Valley-Filling”).....</b>	<b>221</b>
4.4.1	Θερινό Φορτίο.....	221
4.4.2	Χειμερινό Φορτίο.....	225
4.4.3	Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή.....	228
<b>4.5</b>	<b>Σύνοψη αποτελεσμάτων και αξιολόγηση σεναρίων φόρτισης.....</b>	<b>228</b>
4.5.1	Θερινό Φορτίο.....	228
4.5.2	Χειμερινό Φορτίο.....	231
4.5.3	Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή.....	234
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>237</b>



# Κεφάλαιο 1

## Δίκτυο Διανομής και μετασχηματιστές

### 1.1 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 1.1.1 Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια καθαρή μορφή ενέργειας, η οποία έχει αλλάξει με ριζικό τρόπο τη ζωή των ανθρώπων και έχει ανοίξει νέους δρόμους στους τομείς των μεταφορών, της επιστήμης, και γενικότερα έχει παίξει πρωταρχικό ρόλο στην εξέλιξη και στην ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας στη σημερινή της μορφή. Στα τέλη του προηγούμενου αιώνα εμφανίστηκαν οι πρώτες εφαρμογές του ηλεκτρισμού.

Για να λυθεί το πρόβλημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ο William Stanley κατασκεύασε το πρώτο επαγωγικό πηνίο. Αυτό αποτέλεσε τον προάγγελο του σύγχρονου (ηλεκτρικού) μετασχηματιστή καθώς και το πρώτο πλήρες σύστημα υψηλής τάσης μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, (που αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές και υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς), το οποίο αποτέλεσε τη βάση της σύγχρονης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, όλη η ενέργεια, η οποία παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, αρχικά μεταφέρεται σε κοντινούς μετασχηματιστές, που μετατρέπουν τη χαμηλή τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή.

Το **Δίκτυο Μεταφοράς** μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής (400kV) για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές, που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (220/380V), αλλά φθάνουν μέχρι τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20 kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από τα σημεία αυτά, όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι **γραμμές διανομής**, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη χαμηλή τάση, την οποία χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.

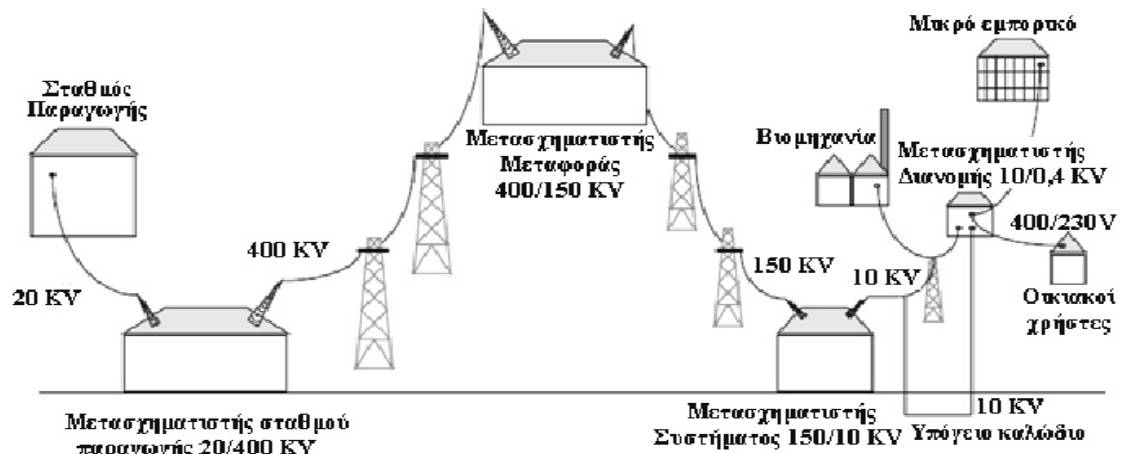
Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών.
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών.
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.

Το Δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει:

- Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV), που μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V), που μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.

Παρακάτω, στο σχήμα 1.1, παρατίθεται ένα αρκετά περιεκτικό σχήμα, στο οποίο απεικονίζεται ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.1 Τυπική διάταξη «παραδοσιακού» συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.1.2 Χαρακτηριστικά Δικτύου Διανομής

Με τον όρο *Δίκτυο Διανομής* εννοούμε τις εγκαταστάσεις, που είναι απαραίτητες για την τροφοδοσία των καταναλωτών από τους υποσταθμούς μεταφοράς. Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τις γραμμές διανομής ή γραμμές μέσης τάσης, που ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς και καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής, στους οποίους μετασχηματίζεται η μέση τάση σε χαμηλή τάση και τέλος τις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, που ξεκινούν από τους υποσταθμούς διανομής και καταλήγουν στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών.

Βασικό στοιχείο του δικτύου είναι οι καταναλωτές, που μπορεί να είναι σύνολο οικιακών, αγροτικών, εμπορικών (ή γενικής χρήσεως), αρδευτικών καταναλωτών, μικρών ή μεγάλων βιοτεχνιών και βιομηχανιών. Ανάλογα με τη μέγιστη απορροφούμενη ισχύ των καταναλωτών μεταβάλλεται η τάση και ο τρόπος τροφοδοσίας τους εξαιτίας τεchnοοικονομικών λόγων. Έτσι, οι καταναλωτές χωρίζονται σε καταναλωτές χαμηλής τάσης (230/400 V), μέσης τάσης (15 ή 20 KV) για ισχύ άνω των 200 kW (ή 100 kW σε κέντρα πόλεων) και υψηλής τάσης (150KV) για ισχύ άνω των 10MW. Οι τελευταίοι λέγονται και καταναλωτές του συστήματος μεταφοράς.

Τα δίκτυα διανομής έχουν κάποια στοιχεία, που τα διαχωρίζουν από τα δίκτυα μεταφοράς. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι ότι αποτελούνται από μεγάλο πλήθος στοιχείων, (έχουμε πολύ μεγαλύτερο πλήθος υποσταθμών ΜΤ/ΧΤ σε σχέση με τους

υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ), ενώ μία επίσης σημαντική διαφοροποίηση είναι το πλήθος των καταναλωτών, που συνδέεται στα δίκτυα διανομής, το οποίο είναι σαφώς μεγαλύτερο από αυτό, που συνδέεται στα δίκτυα μεταφοράς. Από τα γεγονότα αυτά πηγάζει η ανάγκη για «τυποποίηση» των επί μέρους κατασκευαστικών στοιχείων των ΔΔ και του υλικού, που χρησιμοποιείται σ' αυτά, δεδομένου ότι πρόκειται για επαναλαμβανόμενες κατασκευές από πολλά διεσπαρμένα σε όλη τη χώρα συνεργεία.

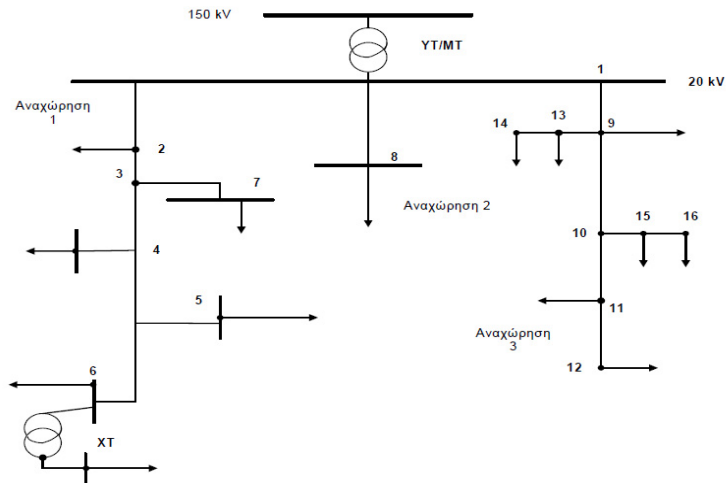
Παρακάτω, παρατίθενται κάποια βασικά μεγέθη του δικτύου διανομής της Ελλάδας για το έτος 2011 [1.9] :

- 107.500 χλμ. Δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ.).
- 121.400 χλμ. Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.).
- Συνολικά 228.900 χλμ. Δικτύου.
- 155.000 Υποσταθμοί Μέσης Τάσης προς Χαμηλή Τάση (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ).
- 949 χλμ. Δίκτυο Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.), εκ των οποίων 205 χλμ στην Αττική και 744 χλμ στα μη διασυνδεδεμένα νησιά.
- 224 Υποσταθμοί Υψηλής Τάσης προς Μέση Τάση (Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ), εκ των οποίων 20 κλειστού τύπου, κατανεμημένοι: 199 στο διασυνδεδεμένο σύστημα και 25 στα μη διασυνδεδεμένα νησιά.
- 7.503.265 Καταναλωτές (10.147 ΜΤ & 7.493.118 ΧΤ).
- 45.716 GWH Καταναλώσεις (11.587 GWH στη ΜΤ & 34.129 GWH στη ΧΤ).

Κύρια οικονομικά μεγέθη του δικτύου Διανομής:

- Επενδύσεις (Ετήσιες δαπάνες επενδύσεων) 300 εκ. €.
- Εκμετάλλευση (Ετήσιες λειτουργικές δαπάνες) 440 εκ. €.
- Ετήσια έσοδα από χρήση δικτύου της τάξης των 800 εκ. €.
- Πάγια Δικτύων Διανομής με αναπόσβεστη αξία 5 δις €.

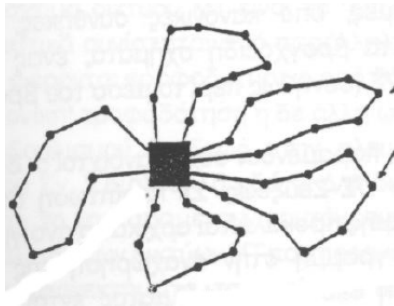
Τα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι υπόγεια ή εναέρια. Τα εναέρια δίκτυα έχουν τις περισσότερες φορές ακτινική μορφή (radial). Ένα τέτοιας μορφής δίκτυο φαίνεται στο σχήμα 1.2 . Όπως παρατηρούμε στο ακόλουθο σχήμα, στα ακτινικά δίκτυα όλες οι γραμμές του δικτύου τροφοδοτούνται από το ένα άκρο του. Κατασκευή τέτοιων δικτύων διανομής έχουμε κυρίως σε αγροτικές περιοχές.



Σχήμα 1.2 Ακτινικό δίκτυο διανομής [1.4]

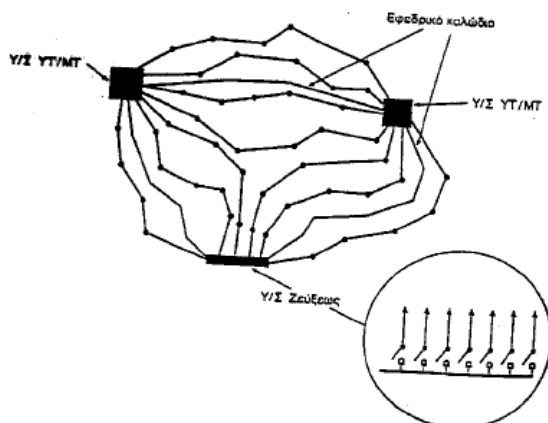
Τα υπόγεια δίκτυα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες :

- Τα βρογχοειδή δίκτυα, στα οποία οι γραμμές ΜΤ ή ΧΤ αρχίζουν και τελειώνουν στον ίδιο υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ ή ΜΤ/ΧΤ. Αυτός ο τρόπος ανάπτυξης του δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.3



Σχήμα 1.3 Βρογχοειδές δίκτυο διανομής [1.4]

- Ατρακτοειδή δίκτυα, στα οποία οι γραμμές ξεκινούν από ένα σταθμό και καταλήγουν σε έναν άλλο. Σ' αυτήν την κατηγορία δικτύων είναι πιο εύκολη η ύπαρξη εφεδρείας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 1.4



Σχήμα 1.4 Ατρακτοειδές δίκτυο διανομής [1.4]

- Δίκτυα διανομής διπλής τροφοδότησης, με τα οποία ο καταναλωτής τροφοδοτείται από δύο διαφορετικές αναχωρήσεις από τον ίδιο υποσταθμό.
- Δικτυωτά δίκτυα ( meshed ), των οποίων τα καλώδια αποτελούν ένα πλέγμα τροφοδοσίας.



### 1.1.3 Διεσπαρμένη παραγωγή

Η κλιματική αλλαγή, οι ανησυχίες για τις προμήθειες ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως, αλλά και η αυξημένη εξάρτηση του ενεργειακού εφοδιασμού της Ευρώπης από τις εισαγωγές, οδήγησαν την Ευρωπαϊκή Ένωση, με ανακοίνωση της Επιτροπής της 19ης Οκτωβρίου 2006, με τίτλο: «Σχέδιο δράσης για την ενεργειακή απόδοση: Αξιοποίηση του δυναμικού» [1.1], να θέσει ως στόχο την ένταση της διαδικασίας αξιοποίησης του εκτιμώμενου δυναμικού εξοικονόμησης πάνω από το 20% της ετήσιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στην ΕΕ έως το έτος 2020.

Μια τέτοια εξοικονόμηση, της τάξης των 20%, ισοδυναμεί με 390 Mtoe (εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου) και μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 780 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Η επίτευξη των στόχων αυτών απαιτεί βέβαια επενδύσεις σε πλέον αποδοτικές και καινοτόμες τεχνολογίες, δαπάνες οι οποίες όμως αναμένεται να αντισταθμιστούν κατά πολύ περισσότερο από την ετήσια εξοικονόμηση καυσίμων, η οποία θα υπερβεί τα 100 δις € ετησίως.

Τα μέτρα, που προτείνονται με βάση το σχέδιο δράσης, είναι αυτά, των οποίων το περιβαλλοντικό κόστος του κύκλου ζωής τους είναι το χαμηλότερο και συγχρόνως δεν υπερβαίνει τις επενδύσεις, που προβλέπονται στον τομέα της ενέργειας. Αφορούν στη βελτίωση των ενεργειακών επιδόσεων τόσο των ενεργειοβόρων συσκευών όσο του τεχνικού εξοπλισμού και των κτιρίων. Πολύ βασικός είναι ο περιορισμός του ενεργειακού κόστους των μεταφορών, αφού καταναλώνει το 20% σχεδόν της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και παρουσιάζει τον ταχύτερο βαθμό αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης.

Επίσης, σημαντική είναι η εξοικονόμηση, που μπορεί να επέλθει από τη βελτίωση της ενεργειακής μετατροπής.

Ο τομέας της μετατροπής της ενέργειας καταναλώνει περίπου το ένα τρίτο της πρωτογενούς ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις μετατροπής ενέργειας έχουν κατά μέσο όρο βαθμό ενεργειακής απόδοσης 40%. Η μεταφορά και η διανομή ηλεκτρισμού προκαλούν επίσης απώλειες, οι οποίες μπορούν να αντιμετωπιστούν. Τα δίκτυα διανομής της Ευρώπης έχουν δομηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξυπηρετούν τις ανάγκες μεγάλων και βασισμένων στον άνθρακα τεχνολογιών, που βρίσκονται μακριά από τα κέντρα ζήτησης. Με αυτό τον τρόπο κάνουν την ζωτικής σημασίας σύνδεση παραγωγής και κατανάλωσης μέχρι σήμερα.

Για τους παραπάνω λόγους, έχει κριθεί απαραίτητη η ανάπτυξη της τοπικής διεσπαρμένης παραγωγής κοντά στα κέντρα κατανάλωσης, παράλληλα με την κεντρική απομακρυσμένη παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διασύνδεση των πηγών πιο κοντά στους καταναλωτές επιδρά στον καταναλωτή και στο διαχειριστή του δικτύου διανομής. Για τον καταναλωτή μπορεί να σημαίνει αύξηση της αξιοπιστίας και ποιότητας της ισχύος της παρεχόμενης ενέργειας και επίσης μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών του αναγκών, υπό την προϋπόθεση ότι αναφερόμαστε σε μια πλήρως απελευθερωμένη αγορά, στην οποία ο καταναλωτής θα αναζητήσει ευέλικτους τρόπους διαχείρισης της τοπικής παραγωγής. Ο χειριστής του δικτύου διανομής ή η

Επιχείρηση Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας μπορεί να επωφεληθεί επίσης από την τοπική κάλυψη του φορτίου ή μέρους αυτού. Μπορούν, με αυτόν τον τρόπο, να αναβληθούν επενδύσεις κεφαλαίου για την κατασκευή ή ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς και διανομής και των κεντρικών σταθμών παραγωγής, να μειωθούν οι απώλειες μεταφοράς, να επιτευχθεί μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου και να διευκολυνθεί ιδιαίτερα ο χειρισμός των συμφορήσεων και η επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση.

Η τοπική παραγωγή μπορεί να συνεισφέρει με δύο βασικούς τρόπους στη μείωση του κόστους της παραδιδόμενης στους καταναλωτές ενέργειας. Με την παροχή βοηθητικών και άλλων υπηρεσιών και με τη μείωση της αιχμής της ζήτησης, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει καλύτερη αξιοποίηση κεφαλαίου και εξοπλισμού και μείωση της απαίτησης για επέκταση της παραγωγής και των έργων μεταφοράς και υποδομής.

Τα χαρακτηριστικά της δεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω στοιχεία:

- Δεν σχεδιάζεται ή αναπτύσσεται κεντρικά από την εταιρία παροχής ηλεκτρισμού ή κάποιο διαχειριστή του δικτύου.
- Οι μονάδες δεσπαρμένης παραγωγής δεν λειτουργούν με βάση κάποιον κεντρικό προγραμματισμό από το διαχειριστή του συστήματος.
- Η εγκατεστημένη ισχύς μίας μονάδας δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW, αλλά είναι συνήθως της τάξης των λίγων εκατοντάδων kW.
- Συνδέεται στο δίκτυο διανομής ανάλογα με το πώς ορίζεται για κάθε υπό μελέτη σύστημα.

Η αύξηση της διείσδυσης της δεσπαρμένης παραγωγής στα σύγχρονα δίκτυα διανομής δημιουργεί νέες απαιτήσεις ως προς την αντιμετώπιση του ελέγχου στα παθητικά δίκτυα, που ως τώρα είχαν στόχο τη μεταφορά της ισχύος από την κεντρική παραγωγή στους καταναλωτές. Επίσης, η δεσπαρμένη παραγωγή δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται πλέον σαν μείωση φορτίου ή εξοικονόμηση καυσίμου, διότι αυτό, σε περίπτωση που σημειωθεί μεγάλη διείσδυσή της, θα οδηγήσει σε λειτουργικά προβλήματα, θα επιβαρύνει τις αγορές εξισορρόπησης και θα οδηγήσει σε ανάσχεση της εγκατάστασης μονάδων δεσπαρμένης παραγωγής.

Η αύξηση της εγκατεστημένης δεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα MT και XT είναι πλέον πραγματικότητα και προκειμένου να επιτευχθούν περισσότερα οφέλη για τα ΣΗΕ, να επιτευχθεί μεγαλύτερη αξιοπιστία και καλύτερη ποιότητα ισχύος προς τους καταναλωτές, όπως και για να λειτουργήσει αποδοτικά το δίκτυο διανομής, πρέπει να εφαρμοσθούν ευέλικτες δομές και πρωτότυπες τεχνικές ελέγχου, εκμεταλλευόμενες τις δυνατότητες, που παρέχονται από τις μεθόδους διασύνδεσης των μικροπηγών.

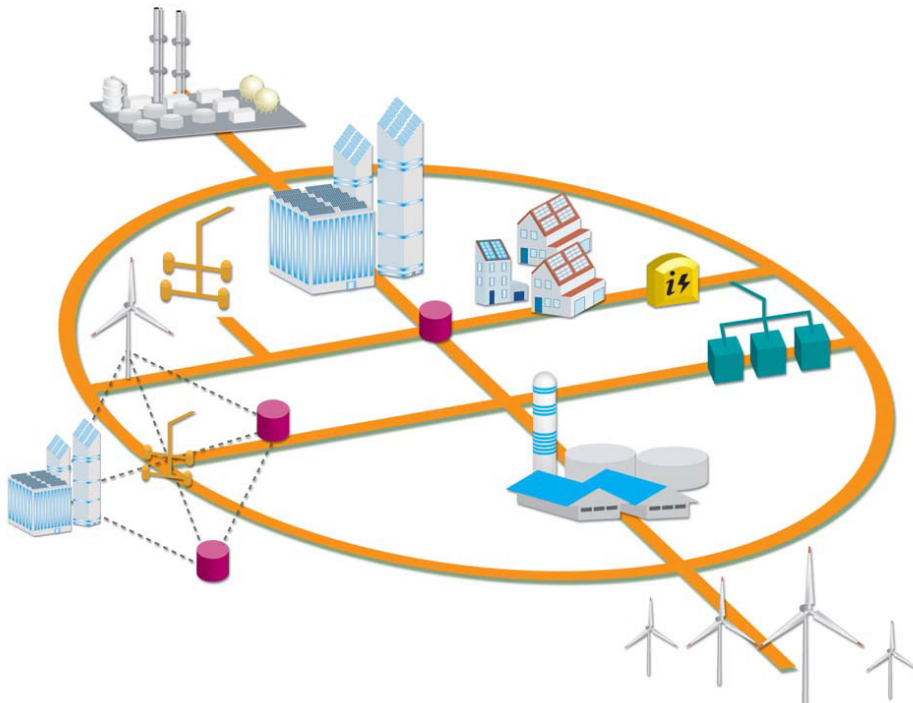
Η εξασφάλιση της εναρμονισμένης συνεργασίας ανάμεσα στην κεντρική και τη δεσπαρμένη παραγωγή σε μορφή ολοκληρωμένης διαχείρισης, είναι αρμοδιότητα της **πλατφόρμας «Ευφυών Δικτύων» (Smart Grids)** της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [1.2]. Η Ευρωπαϊκή πλατφόρμα τεχνολογίας Ευφυών Δικτύων ( European Technology Platform (ETP) SmartGrids) ιδρύθηκε το 2005 και περιλαμβάνει εκπροσώπους της βιομηχανίας, διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς και διανομής και ερευνητικά τμήματα.

### 1.1.4 Ευφυή Δίκτυα

Σύμφωνα με την SmartGrids, τα δίκτυα διανομής του ηλεκτρισμού πρέπει να μπορούν να εξυπηρετήσουν υπηρεσίες αποκεντρωμένης παραγωγής, στην οποία θα εμπλέκονται πολλοί φορείς στην παραγωγή, στη μεταφορά, στη διανομή της ενέργειας και στο χειρισμό του συστήματος. Επίσης, τα δίκτυα διανομής θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να διασφαλίσουν την ασφαλή και βιώσιμη παροχή στην Ευρώπη, αξιοποιώντας τις νέες τεχνολογίες και με συμμόρφωση στις επιταγές των νέων πολιτικών και το ευμετάβλητο επιχειρησιακό περιβάλλον για τη δομή των νέων δικτύων. Θα γίνουν ενεργά δίκτυα και θα εξυπηρετούν ροή ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Τα Ευρωπαϊκά ηλεκτρικά συστήματα έχουν προχωρήσει ήδη στη λειτουργία υπό το πλαίσιο ενός μοντέλου αγοράς, σύμφωνα με το οποίο οι παραγωγοί αποσυνδέονται ανάλογα με τις δυνάμεις της αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα συνολικό ρόλο επιβλέπων. Αντίθετα, έχουν σημειωθεί μικρές μόνο αλλαγές στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία τείνουν να είναι ακτινικά, δηλαδή να υποστηρίζουν την προς μία μόνο κατεύθυνση ροή της ισχύος.

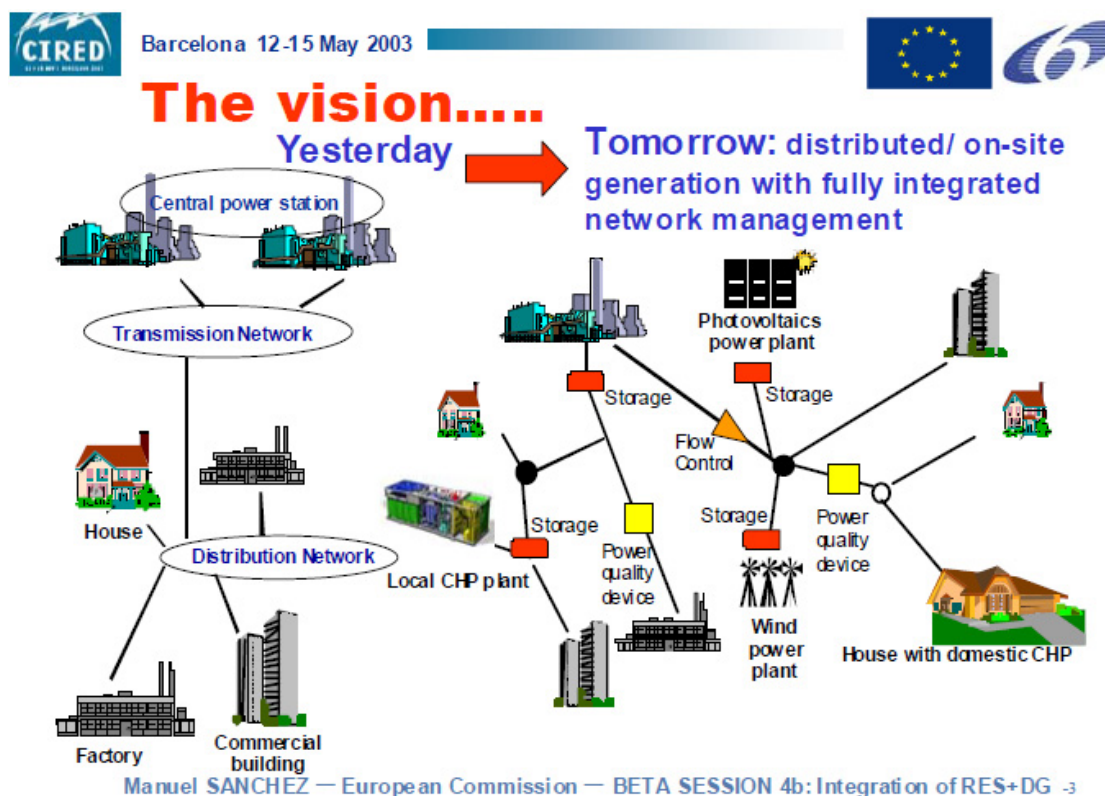
Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται δίκτυο με τη νέα δομή των δικτύων, που αναφέρεται παραπάνω.



Σχήμα 1.5 Το όραμα της Ευρωπαϊκής πλατφόρμας Ευφυών Δικτύων για τα δίκτυα του μέλλοντος.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα, θα εξακολουθούν να υπάρχουν μεγάλα συγκροτήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μεγάλα αιολικά πάρκα, όμως αυτές οι κεντρικές μονάδες παραγωγής θα λειτουργούν σε συνεργασία με τις τοπικές μονάδες παραγωγής, οι οποίες μπορούν να ικανοποιούν τη θερμική και ηλεκτρική ζήτηση είτε με την ανταλλαγή ενέργειας με το κεντρικό δίκτυο είτε με τη μεταφορά περίσσειας θερμικής ενέργειας με γειτονικούς καταναλωτές διαφορετικών τύπων. Επίσης, μερικές από τις μονάδες τοπικής παραγωγής μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους, ώστε να αποτελούν ένα ιδεατό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας - (virtual power plant).

Το όραμα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής αποτυπώνεται συνοπτικά στο παρακάτω σχήμα 1.6 .



Σχήμα 1.6 Το όραμα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την εξέλιξη του τομέα της ενέργειας.

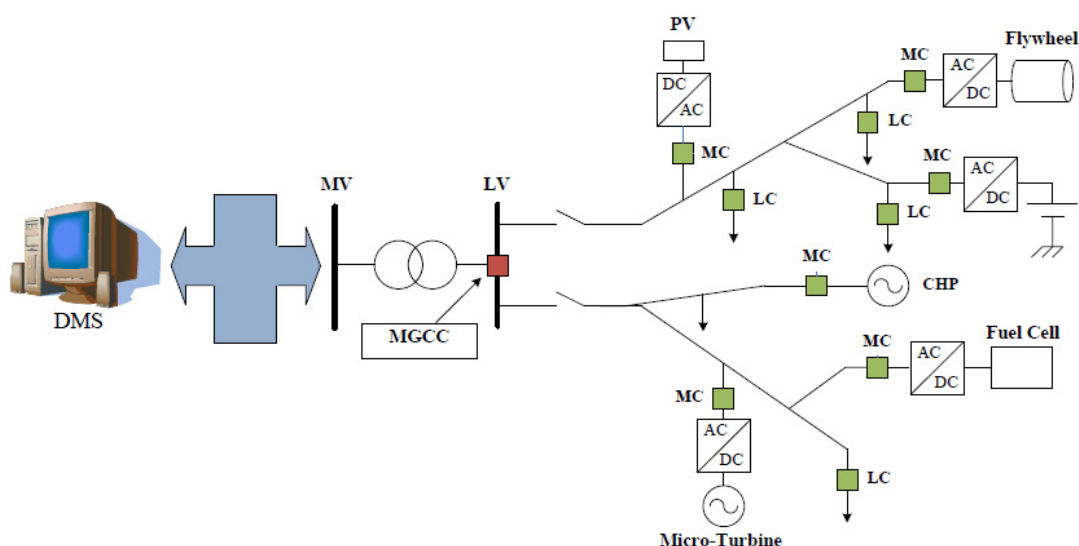
Τα πλεονεκτήματα της δεισπαρμένης παραγωγής μπορούν να μεγιστοποιηθούν με την οργάνωση των μονάδων αποκεντρωμένης παραγωγής σε μικροδίκτυα. Επίσης τα μικροδίκτυα μπορεί να είναι η απάντηση και η λύση για την επίτευξη των παραπάνω στόχων για διαμόρφωση «Ευφυών Δικτύων».

### 1.1.5 Μικροδίκτυα

Τα μικροδίκτυα (Microgrids) αποτελούν συστήματα διανομής ΧΤ, που περιλαμβάνουν διανεμημένες πηγές ενέργειας, όπως είναι οι μικροτουρμπίνες, οι κυψέλες καυσίμου, οι

ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά κ.α. Επίσης, περιλαμβάνουν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι οι συσσωρευτές, οι σφόνδυλοι, οι πυκνωτές ενέργειας κ.α.. Τα συστήματα αυτά είναι διασυνδεδεμένα με το υπόλοιπο δίκτυο MT στην κανονική τους λειτουργία, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν και απομονωμένα από το υπόλοιπο δίκτυο, σε περίπτωση, που προκύψει κάποια διακοπή της σύνδεσης με το κύριο δίκτυο. Ακόμα και όταν λειτουργούν αποκομμένα μπορούν να παράσχουν στους καταναλωτές, που είναι συνδεδεμένοι σε αυτά, αυξημένη αξιοπιστία και βελτιωμένα επίπεδα ποιότητας ελέγχου. Ένα μικροδίκτυο αντιμετωπίζεται από κάθε άποψη από το υπόλοιπο δίκτυο ως ένα ενιαίο φορτίο ή ως μία ενιαία παραγωγή, η οποία μπορεί να προσφέρει και βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο διανομής, ανάλογα βέβαια και με τα οικονομικά κίνητρα, που έχει [1.4].

Η γενική δομή για ένα μικροδίκτυο, το σύστημα ελέγχου, που εφαρμόζεται σε αυτό και η θέση του σε σχέση με το σύστημα διαχείρισης του δικτύου διανομής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7 Αρχιτεκτονική ελέγχου μικροδικτύου.[1.3]

Περιλαμβάνονται τρία διαφορετικά επίπεδα ελέγχου [1.3]:

- Τοπικός ελεγκτής μικρογεννήτριας (Microgenerator Controllers, MC) και ελεγκτές φορτίου (Load Controllers, LC).
- Σύστημα κεντρικού ελέγχου μικροδικτύου (MicroGrid System Central Controller, MGCC).
- Σύστημα διαχείρισης διανομής (Distribution Management System, DMS).

Τα μικροδίκτυα μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά τα οφέλη, που προκύπτουν από τη διεσπαρμένη παραγωγή, όπως είναι τα περιβαλλοντικά και τα λειτουργικά πλεονεκτήματα αυτής. Επίσης, μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα καθώς και να παρέχουν πρόσθετα οφέλη για το σύστημα, λόγω του ότι εκτός από τα φορτία, που περιλαμβάνονται στο καθένα, έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν και τα φορτία τους. Τα οφέλη αυτά μπορεί να είναι [1.4]:

- Η ενεργός διαχείριση των φορτίων, (απόρριψη φορτίου ), η οποία μπορεί να βοηθήσει στην ευστάθεια και στην οικονομική λειτουργία του φορτίου.
- Η εξασφάλιση στον καταναλωτή, που ανήκει στο μικροδίκτυο, αδιάλειπτης παροχής ενέργειας χάρη στη δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας.
- Δυνατότητα ταχύτερης αποκατάστασης της παροχής σε περίπτωση που σημειωθεί σβέση, εφ' όσον το σύστημα μπορεί να ξεκινήσει και απευθείας σε απομονωμένη λειτουργία.

Η γείωση των διανεμημένων πηγών ενέργειας του μικροδικτύου και των μετασχηματιστών, μέσω των οποίων συνδέονται στο κυρίως δίκτυο, πρέπει να αναλύεται προσεκτικά και επιβάλλεται να αναπτυχθούν οι κατάλληλοι κανόνες, έτσι ώστε το επίπεδο της ασφάλειας να είναι το ίδιο με αυτό των συμβατικών συστημάτων. Για την προστασία των μονάδων παραγωγής και των φορτίων του μικροδικτύου είναι απαραίτητο να μπορεί να απομονωθεί το μικροσύστημα από το κυρίως δίκτυο ακαριαία, κάτι το οποίο απαιτεί την ανάπτυξη και εγκατάσταση κατάλληλων ηλεκτρονικών στατικών διακοπών.

### **1.1.6 Προγράμματα Η/Υ ανάπτυξης και ελέγχου ΔΔ**

Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και η χρήση τους ως εργαλείο έχει μεταβάλει ριζικά την τεχνική της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και έχει δώσει νέες δυνατότητες για σωστότερη εκμετάλλευση του δικτύου [1.14]. Τα τελευταία χρόνια γίνεται έντονη προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας και ανεύρεση νέων τρόπων παραγωγής της απαιτούμενης ενέργειας για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών. Για την επίτευξη των στόχων αυτών έχει σημειωθεί εκτεταμένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εισαγωγή και ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων.

Επίσης, το μεγάλο πλήθος επιμέρους στοιχείων των ΔΔ και ο μεγάλος αριθμός καταναλωτών, που τροφοδοτούνται απ' αυτά, κάνει τη μελέτη της βέλτιστης λειτουργίας και ανάπτυξής τους πολύπλοκη. Σημαντικά εργαλεία στη βαθύτερη μελέτη των προβλημάτων των ΔΔ είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι μικροεπεξεργαστές και τα μέσα επικοινωνίας, που παρουσιάζουν έντονη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Με τα εργαλεία αυτά δίνονται νέες δυνατότητες και η μελέτη μπορεί να συμπεριλάβει και τις εγκαταστάσεις, που τροφοδοτούνται από τα ΔΔ, οπότε πλέον αναφερόμαστε στο «Σύστημα Διανομής». Οι δυνατότητες μπορούν να διακριθούν : α) Σ' εκείνες, που αφορούν απλώς στη χρήση του ΗΥ και β) Σ' εκείνες, που αφορούν στην αυτοματοποίηση και στον έλεγχο των ΔΔ.

Έχουν αναπτυχθεί αρκετά προγράμματα σε Η/Υ, τα οποία είτε αποτελούν προγράμματα «Υποδομής», είτε καλύπτουν δραστηριότητες του μηχανικού, οι οποίες χωρίς τη χρήση Η/Υ αναπτύσσονται κατά ένα ποσοστό εμπειρικά. Παρακάτω, αναφέρεται μία σειρά από τέτοια προγράμματα από τις κατηγορίες αυτές.

1. Βάσεις δεδομένων:
  - 1.1 Απεικόνιση ΔΔ.

- 1.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία.
2. Στοιχεία λειτουργίας:
  - 2.1 Καταγραφή-Επεξεργασία συμβάντων.
  - 2.2 Καταγραφή-Επεξεργασία φόρτισης δικτύου.
3. Φορτία:
  - 3.1 Ανάλυση φορτίων.
  - 3.2 Ανάπτυξη φορτίων.
4. Υπολογισμών δικτύου:
  - 4.1 Ροής φορτίων, τάσεων και απωλειών.
  - 4.2 Μεταβατικής συμπεριφοράς.
  - 4.3 Ροής σημάτων και αρμονικών.
  - 4.4 Δεικτών αξιοπιστίας.
  - 4.5 Επιλογής των προστασιών.
  - 4.6 Χάραξης, επιλογής στοιχείων γραμμών.
5. Βέλτιστης λειτουργίας.
  - 5.1 Επιλογή βέλτιστης συνδεσμολογίας, (για κανονική ή έκτακτη κατάσταση λειτουργίας).
  - 5.2 Επιλογή βέλτιστης θέσεως εγκαταστάσεως πυκνωτών ή και ρυθμιστών τάσης.
6. Βέλτιστης ανάπτυξης.
  - 6.1 Αναπτύξεως δικτύου ΧΤ-Επιλογή Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ.
  - 6.2 Αναπτύξεως δικτύου ΜΤ-Επιλογή Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ.

Οι τέσσερις πρώτες κατηγορίες αποτελούν τα προγράμματα υποδομής. Τα προγράμματα βάσεων δεδομένων, (κατ.1), αντικαθιστούν τη χαρτογραφική αποτύπωση των ΔΔ και δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης στον Η/Υ των χαρακτηριστικών μεγεθών και των διαφόρων στοιχείων του δικτύου, (π.χ. χαρακτηριστικών μετασχηματιστών). Τα προγράμματα της κατηγορίας στοιχείων λειτουργίας, (κατ. 2), είναι χρήσιμα στα κέντρα ελέγχου ΔΔ, όπου και συγκεντρώνονται όλες οι πληροφορίες, που αφορούν στη λειτουργία ενός ΔΔ και αντικαθιστούν εργασίες, όπως η καταγραφή του χρόνου απομονώσεως διαφόρων τμημάτων του ΔΔ για την αποκατάσταση βλαβών ή την εκτέλεση συντηρήσεων κ.ά. Τα προγράμματα της κατηγορίας φορτίων, (κατ.3), χρησιμεύουν στην ανάλυση και στη βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της συμπεριφοράς των φορτίων των διαφόρων κατηγοριών καταναλωτών υπό τις διάφορες συνθήκες και του τρόπου, με τον οποίο συμμετέχουν στις ακραίες φορτίσεις των διαφόρων τμημάτων του φορτίου κλπ.

Πολύ σημαντική είναι η τέταρτη κατηγορία (κατ.4) του *Υπολογισμού δικτύων*. Τα προγράμματα *Ροής φορτίων, τάσεων και απωλειών*, (κατ.4.1), υπολογίζουν τις ροές και τάσεις των γραμμών και Υ/Σ κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, καθώς και τις αντίστοιχες απώλειες για διάφορες περιπτώσεις φορτίων. - Τα προγράμματα *Μεταβατικής συμπεριφοράς*, (κατ.4.2), υπολογίζουν τις εντάσεις και τάσεις του δικτύου κατά τη διάρκεια

βραχυκυκλωμάτων σ' αυτό, λαμβάνοντας υπόψη την αντίδραση των φορτίων ανάλογα με το είδος τους, όπως επίσης και υπερεντάσεις κατά τη ζεύξη γραμμών του δικτύου μετά από παρατεταμένη διακοπή (ρεύμα εκκινήσεως κλπ). Τα προγράμματα *Ροών σημάτων και αρμονικών*, (κατ.4.3), υπολογίζουν τις αποσβέσεις, τις οποίες υφίστανται τα σήματα των κωδικοποιημένων εντολών, που διαβιβάζονται δια του ΔΔ, και αναλύουν τον τρόπο διάδοσης των αρμονικών. Τα προγράμματα *Δεικτών αξιοπιστίας*, (κατ.4.4), τα οποία, για δεδομένη συχνότητα βλαβών και χρόνους αποκατάστασης, υπολογίζουν τους δείκτες αξιοπιστίας της τροφοδότησης των καταναλωτών. Τέλος, οι κατηγορίες *Επιλογής προστασιών και στοιχείων γραμμής*, (κατ.4.5 και 4.6), αφορούν στην επιλογή των μέσων προστασίας γραμμών ΜΤ και των κύριων στοιχείων των γραμμών ΧΤ και ΜΤ, αντίστοιχα.

Οι κατηγορίες *Βέλτιστης λειτουργίας* και *Βέλτιστης ανάπτυξης* ανήκουν στην κατηγορία προγραμμάτων, τα οποία καλύπτουν δραστηριότητες του μηχανικού. Τα προγράμματα *Βέλτιστης λειτουργίας*, (κατ.5), χρησιμοποιούνται κατά τη λειτουργία των δικτύων, αλλά και ως βάση για την επιλογή της βέλτιστης ανάπτυξης αυτών. Τα προγράμματα *Βέλτιστης ανάπτυξης*, (κατ.6), εφαρμόζουν μεθόδους της επιχειρησιακής έρευνας για τον προσδιορισμό της βέλτιστης οικονομικοτεχνικά λύσης για την ανάπτυξη του ΔΔ. Κατά την εκπόνηση των μελετών βέλτιστης ανάπτυξης των ΔΔ χρησιμοποιείται σχεδόν το σύνολο των προγραμμάτων, που προαναφέρθηκαν.

### 1.1.7 Αυτοματισμός των ΔΔ

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι μικροεπεξεργαστές και γενικά οι επικοινωνίες έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια ενώ το κόστους τους έχει μειωθεί.

Αυτές οι εξελίξεις έχουν οδηγήσει σήμερα τις Ηλεκτρικές Επιχειρήσεις στον πλήρη «αυτοματισμό των ΔΔ» (Distribution Automation).

Στα κέντρα ελέγχου ΔΔ συγκεντρώνονται οι απαραίτητες πληροφορίες και οι κατάλληλες αποφάσεις για τη λειτουργία και εποπτεία του ΔΔ. Η ανάπτυξη των κέντρων αυτών, το πλήθος των στοιχείων, που ήταν δυνατόν να συγκεντρωθεί, όπως και η ακρίβεια και η ταχύτητα, με την οποία συγκεντρώνονται, είναι παράγοντες άμεσα συνδεδεμένοι με την ανάπτυξη της τεχνικής των τηλεπικοινωνιών.

Μέσα από την εξέλιξη των παραγόντων αυτών και με τη διάδοση των Η/Υ έχουμε οδηγηθεί στην αυτόματη καταγραφή ή και παρουσίαση των συγκεντρούμενων στοιχείων, ώστε να περιορίζεται το απαιτούμενο προσωπικό, αλλά και να δίδεται μια πλήρης και άμεση εικόνα του συστήματος σε περίπτωση μιας εκτεταμένης ανωμαλίας του δικτύου. Αυτό αποτελεί ένα «Κέντρο Ξένου Ελέγχου» .

Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών έχουν οδηγήσει στον «Αυτοματισμό της Διανομής» με τη συμβολή κυρίως του Η/Υ. Ο αυτοματισμός αυτός συνίσταται στη συγκέντρωση και παρουσίαση των πληροφοριών και στη λήψη των αποφάσεων. Αναλυτικότερα, οι λειτουργίες αυτές διακρίνονται στις εξής τρεις:



- Στον έλεγχο της Λειτουργίας του ΔΔ (Operational management).

Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται λειτουργίες, όπως είναι : α) η αναδιάταξη των φορτίων (Load reconfiguration), β) η ρύθμιση της τάσεως, γ) η διαχείριση φορτίου μετασχηματιστών, δ) η διαχείριση φορτίου γραμμών, ε) ο έλεγχος ροής αέργου ισχύος, στ) η ανίχνευση, εντοπισμός και απομόνωση των σφαλμάτων του δικτύου, ζ) η μελέτη φορτίου (load study), η) ο έλεγχος των διεσπαρμένων Μικρών Μονάδων Παραγωγής.

- Στη Διαχείριση του Φορτίου.

*Η επιλογική ζεύξη / απόζευξη φορτίων καταναλωτών (Load management)* εφαρμόζεται από πολλά χρόνια, συνίσταται κυρίως στον έλεγχο ορισμένων συσκευών (φορτίων) των καταναλωτών από ένα κεντρικό σημείο και αποβλέπει είτε στον περιορισμό της μέγιστης ζήτησης ολόκληρου του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε ενός μόνο τμήματος του δικτύου, (π.χ. ενός Υ/Σ ή και μίας γραμμής), για να αποφευχθεί η υπερφόρτισή του. Τα φορτία καταναλωτών, που ελέγχονται, είναι γενικά εκείνα, τα οποία δεν είναι απαραίτητο να λειτουργούν συνεχώς.

*Η απόρριψη φορτίου (Load Shedding)* είναι μία λειτουργία, που συνίσταται στη δυνατότητα του συστήματος διανομής να αποκόπτει μεγάλα σχετικά τμήματα φορτίου υπό ορισμένες συνθήκες και περιορισμούς σε περίπτωση ανάγκης.

- Στην τηλεανάγνωση των μετρήσεων ενέργειας.

Αναφερόμαστε εδώ στην πιο προχωρημένη λειτουργία αυτοματισμού των ΔΔ, η οποία συνίσταται στην αυτόματη ανάγνωση των μετρήσεων των καταναλωτών. Με τα συστήματα αυτά και σε συνδυασμό με τη μηχανογραφική έκδοση των λογαριασμών επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη εξοικονόμηση προσωπικού και βελτιώνεται η εξυπηρέτηση των καταναλωτών.

### **1.1.8 Μετασχηματιστές στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής**

Οι μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται σε όλες τις βαθμίδες μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς και διανομής εξαρτώνται από το επίπεδο της τάσης και ελαχιστοποιούνται με τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε όσο το δυνατό υψηλότερη τάση. Ο ρόλος των μετασχηματιστών είναι η αλλαγή του επιπέδου της τάσης στα διάφορα τμήματα του δικτύου. Εξάλλου, η ευκολία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα επίπεδο τάσεως σε ένα άλλο μέσω των μετασχηματιστών αποτελεί μία από τις βασικότερες αιτίες επικράτησης του εναλλασσόμενου ρεύματος. Στο συνεχές ρεύμα, τα τελευταία μόνο χρόνια, η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχει καταστήσει δυνατή την αλλαγή του επιπέδου της τάσεως με τη χρήση των μετατροπέων DC-DC.

Συγκεκριμένα, τα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου, στα οποία συναντάμε τους μετασχηματιστές είναι τα εξής :

- Σταθμοί παραγωγής ως μετασχηματιστές ανυψώσεως ΜΤ/ΥΤ ή ΜΤ/ΥΥΤ.
- Υποσταθμοί μετασχηματισμού ως μετασχηματιστές ΥΤ/ΥΤ ή ΥΥΤ/ΥΤ.
- Υποσταθμοί υποβιβασμού ως μετασχηματιστές υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ.
- Υποσταθμοί διανομής ως μετασχηματιστές διανομής ΜΤ/ΧΤ.

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τυποποιημένη για την Ελλάδα και την Ευρώπη και γίνεται με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα 50 Hz και τάση 220/380 V. Η ηλεκτρική ισχύς παράγεται συνήθως από σύγχρονες γεννήτριες σε μία τάση γύρω στα 15 έως 20 kV. Εν συνέχεια, μεταφέρεται προς τα καταναλωτικά κέντρα σε μία υψηλή ή υπερυψηλή τάση ώστε να μειωθούν οι απώλειες Joule κατά τη μεταφορά. Η υψηλή τάση υποβιβάζεται στους σταθμούς μεταφοράς, που βρίσκονται κοντά στα κέντρα φορτίου σε μέση τάση. Οι γραμμές μέσης τάσης λειτουργούν με τάση πολιική 20 kV αν και υπάρχουν ακόμα γραμμές 22, 11, 15 και 6,6 kV. Οι υποσταθμοί διανομής μετασχηματίζουν τη μέση τάση σε χαμηλή, παρέχουν μικρή ισχύ και είναι κατασκευασμένοι μέσα σε πόλεις, σε σημεία, που εξυπηρετούν καλύτερα τους καταναλωτές. Οι υποσταθμοί διανομής χαρακτηρίζονται από την ισχύ τους, που είναι το άθροισμα των ισχύων των μετασχηματιστών τους. Επίσης, διακρίνονται ανάλογα με τον τόπο εγκατάστασης, σε εναέριους, επίγειους και υπόγειους. Η θέση εγκατάστασης εξαρτάται από τις θέσεις και το μέγεθος των φορτίων, που θα εξυπηρετήσουν. Κάθε υποσταθμός χωρίζεται σε τρία τμήματα. Το τμήμα (ή κυψέλες) μέσης τάσης, τους μετασχηματιστές, και το τμήμα (ή κυψέλες ) χαμηλής τάσης.

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι οι μικρότεροι μετασχηματιστές σε ένα σύστημα μεταφοράς και διανομής, αφού έχουν ισχύ, που κυμαίνεται από 50 έως 2500kVA, ενώ αποτελούν το μεγαλύτερο πληθυσμιακά είδος μετασχηματιστών. Τα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται από το φορτίο, το οποίο πρέπει να εξυπηρετήσουν.

## **1.2 Μετασχηματιστές**

### **1.2.1 Γενικά για τους μετασχηματιστές**

Όπως προαναφέρθηκε, οι μετασχηματιστές είναι απαραίτητο κομμάτι τόσο του δικτύου διανομής όσο και του δικτύου μεταφοράς, όμως η χρήση τους δεν περιορίζεται εκεί. Για πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο να έχουμε τάση μικρότερη από τη φασική τάση των 220V, που διανέμεται για τελική κατανάλωση. Τέτοιες εφαρμογές μπορεί να είναι διάφορες συσκευές, τις οποίες χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας. Για παράδειγμα,

μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται στα ραδιόφωνα και σε άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, στα κουδούνια, σε συσκευές που φορτίζουν μπαταρίες κλπ.

Ο σκοπός, για τον οποίο προορίζεται ο κάθε μετασχηματιστής, υπαγορεύει τα χαρακτηριστικά του, αλλά και τον τρόπο κατασκευής του. Οι πλέον συνήθεις μετασχηματιστές είναι [1.5]:

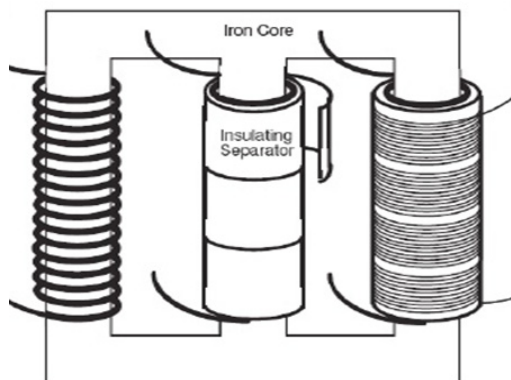
- Μετασχηματιστές διανομής: Χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής για να μετασχηματίζουν την ενέργεια από Μ.Τ. σε Χ.Τ. στους καταναλωτές. Η ισχύς τους είναι συνήθως από 50 έως 1600 kVA.
- Μετασχηματιστές ισχύος: Χρησιμοποιούνται συνήθως στους σταθμούς παραγωγής και στους σταθμούς μεταφοράς της ενέργειας. Στους σταθμούς παραγωγής είναι μετασχηματιστές ανόρθωσης τάσης και στους σταθμούς μεταφοράς είναι και ανόρθωσης και υποβιβασμού της τάσης. Η ισχύς τους είναι συνήθως μεγαλύτερη από 2 MVA.
- Αυτομετασχηματιστές: Χρησιμοποιούνται για μετασχηματισμό της τάσης σε σχετικά μικρά πλαίσια, για διασύνδεση ανάμεσα σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετικών τάσεων, για την εκκίνηση AC κινητήρων, κλπ.
- Μετασχηματιστές δοκιμών: Χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση δοκιμών απόδοσης σε υψηλή ή υπερ-υψηλή τάση.
- Ειδικοί μετασχηματιστές ισχύος, που χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές.
- Οργανικοί μετασχηματιστές: Χρησιμοποιούνται για ακριβή μέτρηση τάσης ή ρεύματος.
- Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών: Χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες, αποσκοπώντας στην αποτελεσματική αναπαραγωγή του σήματος σε διάφορες συχνότητες και τάσεις.

Όπως διαπιστώνουμε, οι μετασχηματιστές έχουν πολλές διαφορετικές χρήσεις σε εφαρμογές πολύ διαφορετικές μεταξύ τους. Επομένως, οι μετασχηματιστές, που χρησιμοποιούνται για κάθε μια από τις παραπάνω εφαρμογές, θα διαφέρουν εξαιρετικά μεταξύ τους τόσο σε μέγεθος όσο και σε τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η μόνωση ή η ψύξη του μετασχηματιστή. Αυτό όμως, που όλοι οι μετασχηματιστές έχουν κοινό, είναι η αρχή λειτουργίας τους.

Οι μετασχηματιστές είναι στατές συσκευές, όμως η σχεδίαση και κατασκευή τους είναι αρκετά σύνθετη. Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες, στους οποίους πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους, στη μόνωση και στην ψύξη των τυλιγμάτων. Η απαγωγή της θερμότητας των απωλειών επιβάλλει καλή κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου και κατάλληλες θέσεις και διατάξεις τυλιγμάτων. Επίσης, βασικοί παράμετροι, στους οποίους πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τη σχεδίαση των μετασχηματιστών, είναι η μαγνητική επαγωγή, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα και η ισορροπία σιδήρου και χαλκού.

Πρόκειται για ηλεκτρικές συσκευές, στις οποίες εισέρχεται εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε μία ορισμένη τάση και εξέρχεται πάλι εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια, αλλά σε μία διαφορετική τάση. Ένας μονοφασικός μετασχηματιστής αποτελείται από δύο τυλίγματα, συζευγμένα μέσω ενός κοινού μαγνητικού κυκλώματος. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από το σιδερένιο πυρήνα και ένα μέλος για κάθε φάση. Το ένα τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον και

θεωρείται η είσοδος της ηλεκτρικής ισχύος, ενώ το άλλο ονομάζεται δευτερεύον και από αυτό εξέρχεται η ηλεκτρική ισχύς. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον θεωρούνται τυλιγμένα γύρω από το σιδερένιο πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος, το οποίο διαρρέεται από μαγνητική ροή  $\Phi$  (σχήμα 1.8) . Σε μερικές ειδικές περιπτώσεις μετασχηματιστών μπορεί να υπάρχει και τριτεύον τύλιγμα.



Σχήμα 1.8 Πυρήνας και τυλίγματα μετασχηματιστή.

Οι μετασχηματιστές μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται στη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας τριφασικός μετασχηματιστής στην ουσία είναι τρεις μονοφασικοί μετασχηματιστές, στους οποίους συνδέουμε τα άκρα κατάλληλα. Κάθε ένας από τους μονοφασικούς μετασχηματιστές μπορεί να έχει δικό του πυρήνα ή εναλλακτικά μπορούν και οι τρεις να μοιράζονται τον ίδιο. Θα εξετάσουμε λίγο παρακάτω τους διάφορους τρόπους σύνδεσης και το συμβολισμό, που έχει επικρατήσει.

## 1.2.2 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου είναι σχετικά απλούστεροι στην κατασκευή τους από τους μετασχηματιστές ελαίου. Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου προστατεύονται από υπερθερμάνσεις, που μπορεί να προκληθούν από εκτεταμένη περίοδο υπερφόρτισης ή από ανεπαρκή εξαερισμό, με τη χρήση θερμικών αντιστάσεων σε κάθε τύλιγμα χαμηλής τάσης. Επίσης, εξοπλίζονται με ακροδέκτες ΥΤ σε σταθερό μονωτήρα, ενσωματωμένο με το τύλιγμα ΥΤ, ακροδέκτες ΧΤ με μπάρες, ακροδέκτες γείωσης και μεταγωγέα λήψης εκτός φορτίου. Εξωτερικά, διαθέτουν λαβές ανάρτησης, πινακίδα ονομαστικών μεγεθών, και πολλές φορές τροχούς για την κίνησή τους.

Τα παραπάνω είναι τα βασικά εξαρτήματα, τα οποία απαρτίζουν ένα μετασχηματιστή ξηρού τύπου. Υπάρχουν και άλλα προαιρετικά εξαρτήματα, όπως είναι τα προστατευτικά καλύμματα, που τοποθετούνται στους ακροδέκτες ΥΤ του μετασχηματιστή, για την προστασία του από τη σκόνη. Σε αυτήν την κατηγορία εξαρτημάτων ανήκουν επίσης οι γωνιακές

συνδέσεις (elbow connectors), τα καλύμματα λήψεων ΥΤ, οι αντικραδασμικοί τάπητες, τα συστήματα εξαερισμού με χρήση ανεμιστήρων, τα μεταλλικά περιβλήματα με υψηλότερους βαθμούς προστασίας και οι μονάδες ελέγχου και προστασίας με λειτουργίες συναγερμού, απόξεσης, ελέγχου συστήματος ψύξης και ψηφιακές ενδείξεις θερμοκρασίας.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των μετασχηματιστών λαδιού μπορεί να χωριστεί σε τρεις κατηγορίες : το δοχείο, τον πυρήνα και τα τυλίγματα. Ο σχεδιασμός κάθε ενός από αυτά τα συστατικά εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες. Η σχεδίαση των μετασχηματιστών είναι ένας τομέας, που απαιτεί εξειδίκευση και υψηλή τεχνική κατάρτιση και πείρα. Οι σχεδιαστές και κατασκευαστές των μετασχηματιστών έχουν τη δυνατότητα να επιλέξουν από μια μεγάλη ποικιλία σιδηρομαγνητικών υλικών για την κατασκευή του πυρήνα, όπως επίσης και από μία μεγάλη γκάμα τεχνικών για την κατασκευή τόσο του πυρήνα όσο και των τυλιγμάτων, της μόνωσης, και άλλων μερών του μετασχηματιστή.

#### ➤ Δοχείο Μετασχηματιστή

Το *δοχείο* του μετασχηματιστή αποτελείται από τον πυθμένα, τα πλευρικά τοιχώματα, και τη στεφάνη. Τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου είναι ελαστικά έτσι ώστε να αποτρέπουν τη μεγάλη αύξηση της πίεσης μέσα στο δοχείο, που μπορεί να προκληθεί από την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Επίσης, κατασκευάζονται από πτυχωτά πανέλα (ελάσματα), έτσι ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια ψύξης. Στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου, ( που δεν διαθέτουν δοχείο διαστολής), το δοχείο γεμίζει με λάδι και σφραγίζεται ερμητικά.

Επίσης, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές της ΔΕΗ, κοντά στο κάτω μέρος του δοχείου του μετασχηματιστή θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο σημεία γείωσης. Κατά το σχεδιασμό του δοχείου του μετασχηματιστή θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να σχεδιάζεται με τρόπο, που να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες από δημιουργία κυκλοφορούντων δινορευμάτων, και να αποφεύγεται η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια του κελύφους. Το κάλυμμα του δοχείου του Μ/Σ θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι, ώστε να μη λιμνάζει το νερό πάνω σε αυτό. Το δοχείο ενός μετασχηματιστή μπορεί να είναι τύπου καμπάνας (bell type) ή τύπου βιδωτού καλύμματος. Το δοχείο τύπου καμπάνας χρησιμοποιείται κυρίως για μετασχηματιστές μικρότερης ισχύος των 20MVA. Στο δοχείο πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες υποδοχές για την ανύψωση, όπως, επίσης, και ο Μ/Σ πρέπει να έχει υποδοχές έλξεως ή άλλη διάταξη για πρόσδεση συρματόσχοιου.

#### ➤ Μονωτήρες Διέλευσης

Οι μονωτήρες διελεύσεως του μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται για την ασφαλή έξοδο των αγωγών των τυλιγμάτων από το κυρίως δοχείο. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι μονωτήρων. Ο τύπος πυκνωτή με μόνωση χαρτιού εμποτισμένου με λάδι ή με μόνωση χαρτιού εμποτισμένου με ρητίνη και ο τύπος με μόνωση από στρώσεις στερεού και υγρού υλικού εναλλάξ ή με μόνωση αερίου ή με μόνωση στερεού υλικού.

Οι μονωτήρες διέλευσης υψηλής τάσης συνήθως είναι τύπου πυκνωτή. Στους μονωτήρες τύπου πυκνωτή το εσωτερικό του μονωτήρα αποτελείται από μονωτικό υλικό, συνήθως χαρτί, στο οποίο παρεμβάλλονται κύλινδροι από φύλλα κασσίτερου ή αλουμινίου.

Έτσι, ανάμεσα στον αγωγό διέλευσης και στο κυρίως σώμα του μετασχηματιστή μεσολαβούν μια σειρά από πυκνωτές ίσης χωρητικότητας, με σκοπό την ομαλή κατανομή της τάσης σε όλο το πάχος του μονωτικού. Στη μέση τάση χρησιμοποιούνται είτε μονωτήρες τύπου πυκνωτή είτε ο άλλος τύπος. Ο άλλος τύπος μονωτήρων κατασκευάζεται από πορσελάνη και είναι συνήθως γεμάτος με λάδι, που επικοινωνεί υδραυλικά με το λάδι ψύξης του μετασχηματιστή.

➤ Δοχείο διαστολής

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή η θερμοκρασία του λαδιού αυξάνεται και επομένως διαστέλλεται και αυξάνεται η πίεση μέσα στο δοχείο. Για την απόσβεση αυτής της διαστολής χρησιμοποιείται το δοχείο διαστολής, στο εσωτερικό του οποίου ένα διάφραγμα αποτρέπει την άμεση επαφή αέρα και λαδιού για την αποφυγή εισχώρησης υγρασίας και αέρα στο λάδι. Πάνω στο δοχείο διαστολής βρίσκεται ο αφυγραντής, μέσω του οποίου «αναπνέει» ο μετασχηματιστής, χωρίς να εισχωρεί στο εσωτερικό του υγρασία. Επίσης, στο δοχείο διαστολής υπάρχει ο δείκτης στάθμης λαδιού, ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε οπτικά την ποσότητα του λαδιού, που είναι μέσα σ' αυτόν.

➤ Ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων ( Buchholtz)

Η ασφαλιστική διάταξη Buchholtz τοποθετείται ανάμεσα στο σώμα του Μ/Σ και στο δοχείο διαστολής και η τοποθέτησή της αποσκοπεί στην προστασία ενός μετασχηματιστή από διαρροή λαδιού και υπερθέρμανση. Είναι μία διάταξη ευαίσθητη και αξιόπιστη, που διαθέτει έναν πλωτήρα οπτικής και ηχητικής σήμανσης, έναν πλωτήρα διακοπής, έναν εξαεριστικό κρουνό και έναν κρουνό αποστράγγισης.

Αν για κάποιο λόγο έχουμε μια διαρροή λαδιού και αδειάσει το δοχείο διαστολής σε επίπεδο κάτω από τον πλωτήρα κλείνουν οι επαφές της διάταξης και παράγεται ηχητική και οπτική ειδοποίηση. Αν η διαρροή συνεχιστεί, θα υπερθερμανθεί το λάδι του μετασχηματιστή και θα δημιουργηθούν φυσαλίδες στη μάζα του λαδιού, οι οποίες θα κινήσουν τον πλωτήρα διακοπής. Μόλις γίνει αυτό και κλείσουν οι επαφές του πλωτήρα, ενεργοποιείται το σύστημα αυτόματων διακοπών και ο μετασχηματιστής βγαίνει οριστικά εκτός λειτουργίας.

### 1.2.2.1 Διαχωρισμός με βάση τον πυρήνα

Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες μετασχηματιστών όσον αφορά στο υλικό, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο πυρήνας:

➤ Ελάσματα από πυριτιούχο χάλυβα.

Ο πυριτιούχος χάλυβας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα του μετασχηματιστή, είναι κράμα, που αποτελείται από 97% σίδηρο και 3% πυρίτιο. Το υλικό

αυτό έχει κρυσταλλική δομή. Τα ελάσματα έχουν πάχος από 0.18 έως 0.5 mm. Υπάρχουν επίσης ελάσματα για λειτουργία σε υψηλές μαγνητικές επαγωγές (Hi-B).

➤ Ελάσματα από άμορφο σίδηρο.

Ο άμορφος σίδηρος είναι κράμα, που αποτελείται από 92% σίδηρο, 5% πυρίτιο και 3% βόριο. Το υλικό αυτό δεν έχει κρυσταλλική δομή. Εμφανίζει περίπου 70% χαμηλότερες απώλειες κενού φορτίου σε σχέση με το πυριτιούχο χάλυβα. Το πάχος των ελασμάτων του άμορφου σιδήρου είναι 0.025 mm, δηλαδή είναι περίπου 10 φορές λεπτότερο από το τυπικό πάχος των ελασμάτων πυριτιούχου χάλυβα.

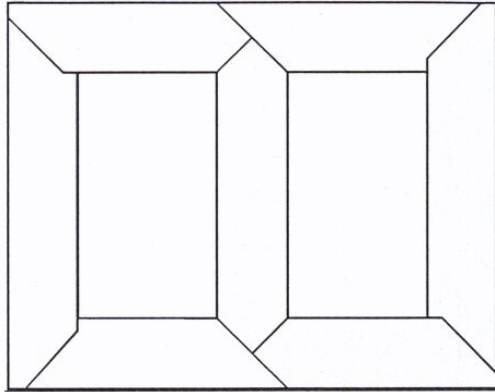
Επίσης, μια άλλη διαφοροποίηση ως προς την κατασκευή του πυρήνα προέρχεται από τις δυο διαφορετικές τεχνολογίες για τη σώρευση των φύλλων του μαγνητικού υλικού του πυρήνα. Όταν τα στρώματα των ελασμάτων τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και τα κάθετα και οριζόντια στρώματα επικαλύπτονται μεταξύ τους, ο πυρήνας ονομάζεται **στοιβαχτός πυρήνας**. Κατ' αυτόν τον τρόπο κατασκευής, τα κενά μεταξύ του τέλους των ελασμάτων του ενός στρώματος επικαλύπτονται από το έλασμα του επόμενου στρώματος. Όταν το έλασμα είναι τυλιχτό σε μορφή πυρήνα από κομμένα φύλλα μαγνητικού υλικού, τότε ο πυρήνας ονομάζεται **τυλιχτός πυρήνας**.

Οι μετασχηματιστές τυλιχτού πυρήνα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα έναντι των μετασχηματιστών στοιβαχτού πυρήνα :

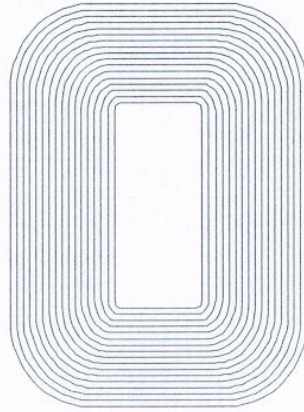
- Έχουν μικρότερο ρεύμα μαγνήτισης.
- Παράγουν μικρότερο θόρυβο, διότι αποτελούνται από μικρότερα φύλλα μαγνητικού υλικού.
- Υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της διατομής του πυρήνα.
- Μικρότερες απώλειες πυρήνα.
- Δεν απαιτείται σημαντική εργασία, διότι η τύλιξη γίνεται με κατάλληλη αυτόματη μηχανή.

Τα μειονεκτήματά τους έναντι των μετασχηματιστών τύπου στοιβαχτού πυρήνα είναι τα ακόλουθα:

- Τα κενά αέρος πιθανόν να διαφέρουν μεταξύ τους , λόγω των ανοχών της μηχανής περιέλιξης των πυρήνων και ένεκα των δυσκολιών στην επεξεργασία του μαγνητικού υλικού.
- Οι επιθυμητές διαστάσεις των τυλιχτών πυρήνων δεν μπορούν να επιτευχθούν με ακρίβεια.
- Η μηχανή περιέλιξης πυρήνων έχει συγκεκριμένες δυνατότητες. Μπορεί να τυλίξει πυρήνες έως ένα μέγιστο βάρος και μέχρι κάποια μέγιστη διάμετρο. Αντίθετα, οι στοιβαχτοί πυρήνες κατασκευάζονται για οποιαδήποτε επιθυμητή διάσταση.



Σχήμα 1.9 Στοιβαχτός πυρήνας.



Σχήμα 1.10 Τυλιχτός πυρήνας.

Σε τριφασικούς μετασχηματιστές η κατασκευή του μαγνητικού κυκλώματος μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους:

➤ Μετασχηματιστής με τρία πόδια (κάθετα σκέλη).

Η μαγνητική ροή ενός σκέλους πρέπει να κλείσει μέσω των δύο άλλων και διαρρέει και τα τυλίγματα των άλλων φάσεων, δηλαδή ο μετασχηματιστής δεν έχει ελεύθερη επιστροφή της ροής.

➤ Μετασχηματιστής με πέντε πόδια (κάθετα σκέλη).

Ελεύθερη επιστροφή της ροής από τα εξωτερικά ζυγώματα.

Τέλος, μια βασική διάκριση των μετασχηματιστών είναι ως προς τον τύπο του πυρήνα. Οι δύο κατηγορίες μετασχηματιστών είναι :

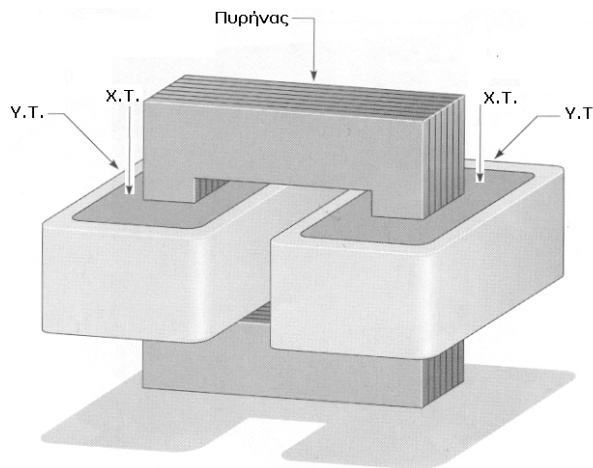
➤ Μετασχηματιστές τύπου πυρήνα.

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δύο πλευρές (σκέλη) ενός ορθογωνίου πυρήνα.

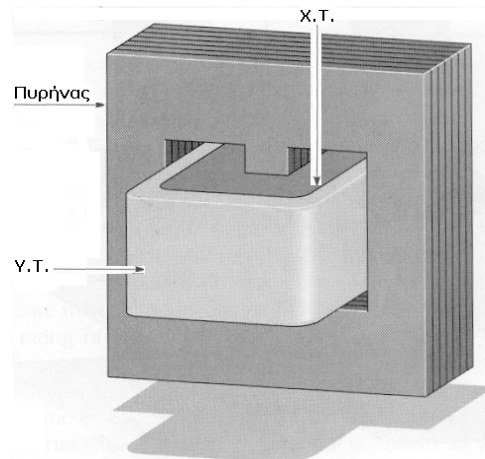
➤ Μετασχηματιστές τύπου κελύφους ή μανδύα.

Σε αυτού του τύπου τους μετασχηματιστές τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος και η ροή κλείνει κύκλωμα από τα ακριανά σκέλη και το ζυγώμα. Ο πυρήνας περιβάλλει τα τυλίγματα.





Σχήμα 1.11 Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα.



Σχήμα 1.12 Μετασχηματιστής τύπου μανδύα.

### 1.2.2.2 Τυλίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών διανομής

Κατασκευαστικά, τα δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή διακρίνονται στο τύλιγμα υψηλής τάσεως (Υ.Τ.) και στο τύλιγμα χαμηλής τάσεως (Χ.Τ.). Το τύλιγμα Υ.Τ. κατασκευάζεται από μεγάλο αριθμό σπειρών, ενώ το Χ.Τ. από μικρό αριθμό σπειρών.

Όσον αφορά στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, μπορούν να τοποθετηθούν με δύο τρόπους:

➤ Ομόκεντρα ή συγκεντρικά.

Σε αυτήν την περίπτωση το τύλιγμα χαμηλής τάσης τοποθετείται στο εσωτερικό του τυλίγματος υψηλής τάσης.

➤ Σε δίσκους.

Τα δύο τυλίγματα χωρίζονται σε υποπηγία (δίσκους), οι οποίοι τοποθετούνται εναλλάξ, ένας δίσκος χαμηλής τάσης ένας υψηλής τάσης κλπ. Οι δίσκοι χαμηλής τάσης συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους, ομοίως και οι δίσκοι υψηλής τάσης. Έτσι, έχουμε δύο άκρα για τη χαμηλή τάση και δύο για την υψηλή τάση.

Τα υλικά των αγωγών, που χρησιμοποιούνται στα τυλίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών, διατίθενται υπό μορφή σύρματος, στενής λωρίδας ή λεπτού ελάσματος. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει κάποια βήματα στην τεχνολογία των υλικών αυτών, τα οποία βελτίωσαν την αξιοπιστία των μετασχηματιστών.

Τα δύο βασικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής, είναι το αλουμίνιο και ο χαλκός. Όταν τα υλικά αυτά εφαρμόζονται με τον ίδιο τρόπο, ο χαλκός εμφανίζει καλύτερη αγωγιμότητα και 40% μειωμένες ωμικές απώλειες σε σχέση με το αλουμίνιο. Το πλεονέκτημα του αλουμινίου σε σχέση με το χαλκό είναι ότι μπορεί να μορφοποιηθεί ευκολότερα και είναι πιο φθηνό. Στους μετασχηματιστές διανομής, σε κάποιες σχεδιάσεις, ακολουθείται η τακτική να χρησιμοποιείται χαλκός για το πηνίο υψηλής τάσης και αλουμίνιο για το πηνίο χαμηλής τάσης. Η χρήση

αλουμινίου στο τυλίγμα χαμηλής τάσης μειώνει τις απώλειες από δινορεύματα. Στην περίπτωση αυτήν παρατηρείται ότι υπάρχει μία ισορροπία ανάμεσα στο κόστος του υλικού και στις απώλειες. Γενικά, οι αγωγοί του χαλκού προτιμώνται από τους αγωγούς αλουμινίου, λόγω της μικρότερης αντίστασης και της υψηλότερης αντοχής σε ελατότητα, που παρουσιάζουν. Στον παρακάτω πίνακα αντιπαρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά του χαλκού και του αλουμινίου.

Χαρακτηριστικά:	Χαλκός	Αλουμίνιο
Αντοχή σε εφελκυσμό (lb/in. <sup>2</sup> )	55,000	25,000
Αντοχή σε εφελκυσμό για την ίδια αγωγιμότητα (lb,λίβρες).	55,000	40,000
Βάρος για την ίδια αγωγιμότητα (lb,λίβρες).	100	48
Διατομή για την ίδια αγωγιμότητα (cm <sup>2</sup> ).	100	160
Ειδική αντίσταση (W/ εκ. ft).	10.6	17

Τα δύο υλικά είναι διαθέσιμα σήμερα σε μορφή φαρδιών φύλλων και λεπτών ελασμάτων με δυνατότητα διάθεσης σε μεγάλες διαστάσεις. Τα φύλλα έχουν αντικαταστήσει τις λωρίδες στην κατασκευή τυλιγμάτων χαμηλής τάσης των μετασχηματιστών διανομής. Οι δυνατότητες εξέλιξης στον τομέα των τυλιγμάτων περιλαμβάνουν και την κατασκευή των αγωγών με τέτοιο τρόπο, ώστε να βελτιωθεί η μηχανική αντοχή του κατασκευασμένου πηνίου και η συμπαγής κατασκευή του πηνίου. Η διαθεσιμότητα συρμάτων και ράβδων χαλκού και αλουμινίου, που παρασκευάζονται με τις διαδικασίες συνεχούς χύτευσης και έλασης (Continuous Casting and Rolling – CCR), σε συνδυασμό με μηχανοποιημένες τεχνικές χειρισμού, έδωσε τη δυνατότητα παρασκευής συρμάτων και λωρίδων σε πολύ μεγαλύτερα μήκη από εκείνα, που ήταν διαθέσιμα στο παρελθόν. Με αυτόν τον τρόπο αυξήθηκε η αξιοπιστία των μετασχηματιστών, καθώς τα σημεία συγκόλλησης (μάτισης) στη λωρίδα, τα οποία ήταν αναπόφευκτα παλιότερα, δημιουργούσαν αδύναμα σημεία στα πηνία, που κατασκευάζονταν.

Σημαντική εξέλιξη στη σχεδίαση των αγωγών συντελέστηκε με την εισαγωγή αγωγών, οι οποίοι κατασκευάζονται με συνεχή αντιμετάθεση των υποαγωγών, από τους οποίους αποτελούνται (Continuously Transposed Conductors). Η χρήση των αγωγών αυτών μειώνει τα δινορεύματα και επιτρέπει καλύτερη πυκνότητα συσκευασίας του τυλιγματος.

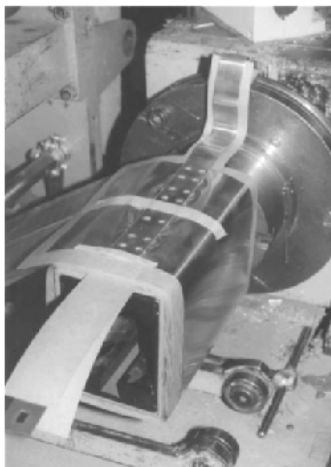


Σχήμα 1.13 Συνεχής αντιμετάθεση αγωγών (αριστερά) και εφαρμογή της συνεχούς αντιμετάθεσης αγωγών σε ένα μεγάλο μετασχηματιστή (δεξιά).

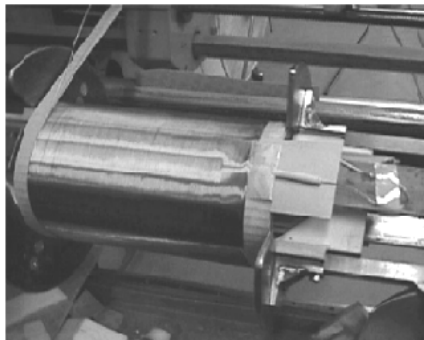
Οι διαδικασίες της τύλιξης των αγωγών για την κατασκευή του πηνίου και στη συνέχεια η προσαρμογή τους στο συναρμολογημένο πυρήνα επηρεάζει τη λειτουργία και την ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών διανομής. Οι μηχανοποιημένες διαδικασίες τύλιξης χρησιμοποιούνται πλέον ως επί το πλείστον στην κατασκευή των πηνίων, με συνέπεια οι περιελίξεις να αποκτούν αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις. Αυτή η μηχανική αντοχή έχει μεγάλη σημασία, διότι, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, οι περιελίξεις δέχονται μεγάλες ακτινικές απωθητικές δυνάμεις. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρία των τυλιγμάτων, δηλαδή είναι πολύ μικρές σε κυκλικά τυλίγματα και πολύ μεγαλύτερες σε ορθογώνιες περιελίξεις.

Οι κύριοι τύποι πηνίων, που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές διανομής, είναι τα *τυλίγματα ελικοειδούς φύλλου*, τα *πολυστρωματικά πηνία*, και τα *δισκοειδή πηνία*. Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιείται στα τυλίγματα χαμηλής τάσης, ενώ οι άλλοι δύο στα τυλίγματα υψηλής τάσης των μετασχηματιστών διανομής.

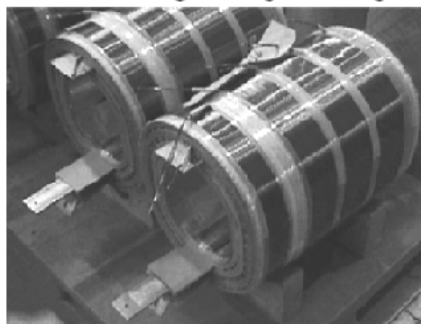
Spiral Sheet Low-voltage Winding



Multilayer Coil High-voltage Winding



Disc Coil High-voltage Winding



Σχήμα 1.14 Τύποι τυλιγμάτων.

Η χρήση αγωγών *τύπου ταινίας* (ribbon conductors) στα τυλιγμάτα αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα του σχεδιασμού των αγωγών. Οι αγωγοί αυτού του τύπου μειώνουν τις απώλειες φορτίου μέσω της μείωσης των απωλειών δινορευμάτων και επίσης επιτρέπουν την τοποθέτηση περισσότερου χαλκού σε μικρότερο χώρο. Η μείωση των απωλειών δινορευμάτων επιτυγχάνεται από τη μείωση του εμβαδού της διατομής, που προκύπτει από τη χρήση αγωγών τέτοιου τύπου. Σύμφωνα με μελέτες, κάθε ποσοστιαία μείωση στις διαστάσεις της διατομής του αγωγού προκαλεί αντίστοιχη μείωση των απωλειών λόγω δινορευμάτων ίση περίπου με 1.5%, όπως επίσης και μία βελτίωση του συντελεστή χώρου κατά 25%. Ο αγωγός τύπου ταινίας κατασκευάζεται από επτά επίπεδα τμήματα αγωγών, κολλημένα το ένα δίπλα στο άλλο, ενώ η αξονική ψύξη των αγωγών κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους μέσα στα επιτρεπτά όρια.

### 1.2.3 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών

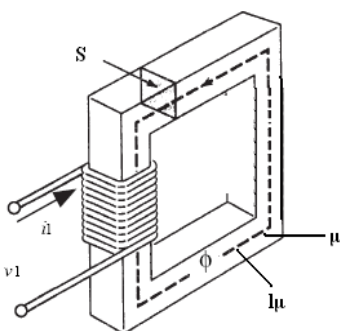
Η λειτουργία του μετασχηματιστή στηρίζεται στη μαγνητική αλληλεπαγωγή ανάμεσα στα δύο πηνία. Μία εναλλασσόμενη τάση, που εφαρμόζεται στο ένα πηνίο, δημιουργεί εναλλασσόμενη τάση ίδιας συχνότητας, αλλά διαφορετικού μέτρου. Η αναλογία των μέτρων των τάσεων στα δύο πηνία είναι ίδια με την αναλογία του αριθμού των σπειρών τους.

Ας εξετάσουμε όμως λίγο πιο αναλυτικά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Παρακάτω παρατίθενται βασικά μαγνητικά μεγέθη.

Σύμβολο		Μονάδες
H	Ένταση μαγνητικού πεδίου	A/m
B	Μαγνητική επαγωγή	T (Tesla)
Φ	Μαγνητική ροή	Wb (Weber)
M	Μαγνητική διαπερατότητα υλικού	H/m (Henry/m)
$\mu_r$	Σχετική μαγνητική διαπερατότητα	-
$\mu_0$	Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	H/m (Henry/m)

Η μαγνητική επαγωγή συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, στο οποίο εγκαθίσταται το μαγνητικό πεδίο, με τη σχέση  $B = \mu \cdot H$ . Επίσης, στο εσωτερικό ενός υλικού η μαγνητική διαπερατότητα υπολογίζεται από τη σχέση  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ , όπου  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \times 10^{-7}$  H/m. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι αυτή, που καθορίζει πόσο εύκολα μαγνητίζεται ένα υλικό.

Υποθέτοντας ότι έχουμε ένα πηνίο N σπειρών, τυλιγμένο γύρω από ένα δακτύλιο από σιδηρομαγνητικό υλικό με σταθερή μαγνητική διαπερατότητα διατομής S και επιλέγοντας μία κλειστή διαδρομή C, η οποία αποτελείται από τον αγωγό του τυλίγματος, ορίζεται επιφάνεια A, η οποία περιέχει N φορές τη διατομή του πυρήνα S. Η παραπάνω περιγραφή αντιστοιχεί σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, που φαίνεται και παρακάτω. Ορίζεται ως πεπλεγμένη μαγνητική ροή με το τύλιγμα C, το γινόμενο της μαγνητικής ροής φ, που διέρχεται από την S επί τον αριθμό των σπειρών του πηνίου.



$$\lambda = N \cdot \varphi \quad (1)$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), που επάγεται σε ένα ηλεκτρικό τύλιγμα, είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης με το τύλιγμα μαγνητικής ροής, σύμφωνα με το νόμο του Faraday στην κλασματική του μορφή :  $e = \frac{d \lambda}{d t}$ .

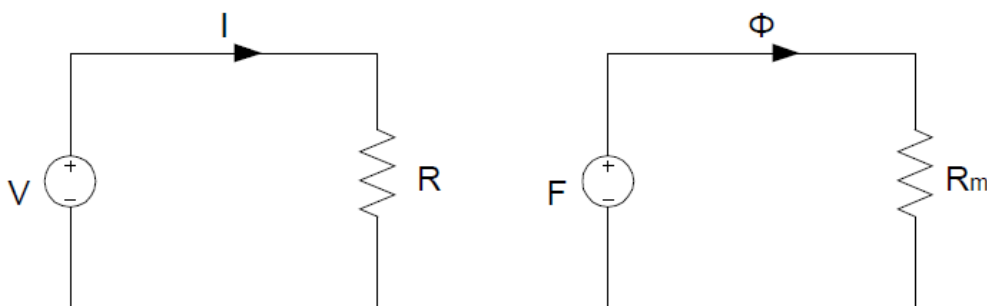
Υποθέτουμε ότι από το τύλιγμα περνάει συνεχές ρεύμα εντάσεως  $I$ . Αν και το τύλιγμα δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένο, η ένταση του μαγνητικού πεδίου θεωρείται κατά προσέγγιση σταθερή κατά μήκος της μέσης διαδρομής και ίση με τη μέση τιμή εντάσεως του μαγνητικού πεδίου. Επίσης, θεωρούμε ότι δεν υπάρχει ροή σκεδάσεως, ότι δηλαδή όλη η μαγνητική ροή περιορίζεται στο εσωτερικό του μαγνητικού κυκλώματος. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου δίνεται σύμφωνα με το νόμο του διαρρέυματος από τη σχέση  $F = N \cdot I$  (2), το μέγεθος  $N \cdot I$  ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ), συμβολίζεται με καλλιγραφικό  $F$  και μετριέται σε αμπερελίγματα A-ε. Ισχύει η σχέση  $\Phi = B \cdot S$ , όπου  $B$  η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα. Η σχέση, η οποία συνδέει τη μαγνητεγερτική δύναμη και τη μαγνητική ροή είναι η εξής:

$$F = R \cdot \Phi \quad (3)$$

όπου  $R$  η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος. Η μαγνητική αντίσταση μετριέται σε αμπερελίγματα ανά Weber ( $A\text{-}\epsilon / \text{Wb}$ ) και ορίζεται ως η αντίσταση, που προβάλλουν κάποια σώματα στη μαγνήτισή τους, δηλαδή στη δημιουργία μαγνητικής ροής  $\Phi$ .

Για να γίνει ευκολότερη η ανάλυση του παραπάνω μαγνητικού κυκλώματος μπορούμε να θεωρήσουμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό. Η αντίστοιχη ποσότητα της τάσης είναι η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ), ενώ η αντίστοιχη ποσότητα του ρεύματος είναι η αναπτυσσόμενη στο κύκλωμα μαγνητική ροή  $\Phi$ . Η μαγνητική αντίσταση συμβολίζεται με  $R_m$  για να γίνει ο διαχωρισμός της από την ωμική αντίσταση  $R$ . Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η σχέση, που συνδέει τα παραπάνω στοιχεία, είναι ο νόμος του Ohm  $V = R \cdot I$ . Αντίστοιχα, σε ένα μαγνητικό κύκλωμα είναι ο τύπος Hopkinson  $F = R_m \cdot \Phi$ .

Η αναλογία μαγνητικού και ηλεκτρικού κυκλώματος φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.15 Ηλεκτρικό κύκλωμα και το ανάλογο αυτού μαγνητικό κύκλωμα.

## 1.2.4 Ανάλυση μετασχηματιστή ως ηλεκτρικό κύκλωμα

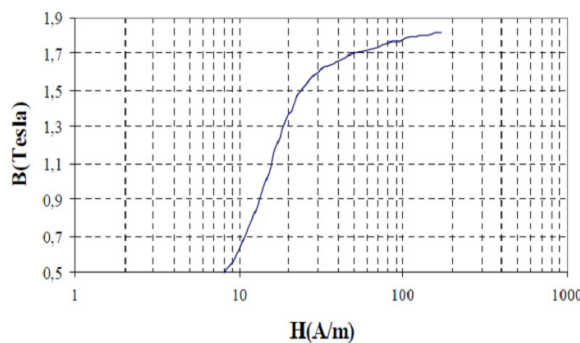
### 1.2.4.1 Αυτεπαγωγή- Αλληλεπαγωγή

Η πεπλεγμένη ροή συνδέεται με την ένταση του ρεύματος στο ηλεκτρικό κύκλωμα μέσω της αυτεπαγωγής  $L$  με τη σχέση  $\lambda = L \cdot i$ . Η μαγνητική αντίσταση και η αυτεπαγωγή είναι συνάρτηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, από το οποίο αποτελείται το μαγνητικό κύκλωμα. Η μονάδα της αυτεπαγωγής είναι το 1 Henry. Η αυτεπαγωγή μπορεί να ορισθεί με βάση τα μεγέθη, που ορίσαμε παραπάνω για ένα στοιχειώδες μαγνητικό κύκλωμα, ως εξής:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N \cdot \varphi}{i} = \frac{N \cdot F}{i \cdot R_m} = \frac{N^2}{R_m} \quad (4)$$

Όπως προαναφέρθηκε, η αυτεπαγωγή είναι συνάρτηση της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού. Για τα σιδηρομαγνητικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται και οι πυρήνες των μετασχηματιστών, η αυτεπαγωγή δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, συνεπώς και με την ένταση του ρεύματος και μπορεί να θεωρηθεί σταθερή μόνο κατά προσέγγιση.

Παρακάτω, βλέπουμε την καμπύλη μαγνήτισης ενός μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού, που αποτελεί πυρήνα για ένα στοιχειώδες μαγνητικό κύκλωμα, όπως αυτό του σχήματος. Ακριβώς την ίδια μορφή έχει και η αυτεπαγωγή του σιδηρομαγνητικού υλικού, αφού η πεπλεγμένη μαγνητική ροή είναι ανάλογη της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ανάλογη με τη μαγνητοεγερτική δύναμη και την ένταση του μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 1.16 Καμπύλη μαγνήτισης.

Αλληλεπαγωγή μεταξύ δύο τυλιγμάτων είναι ο λόγος της πεπλεγμένης ροής ενός τυλιγματος προς το ρεύμα του άλλου, όταν το ρεύμα του πρώτου είναι μηδέν.

$$L_{12} = \frac{\lambda_1}{i_2} \Big|_{i_1=0} \quad (5)$$

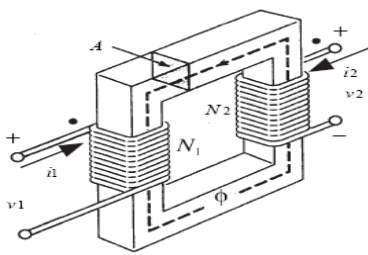
Επίσης, η αυτεπαγωγή μπορεί να ορισθεί συναρτήσει των μεγεθών ενός μαγνητικού κυκλώματος:

$$\text{και } L_{12} = \frac{N_1 \cdot N_2}{R} = L_{21} \quad (6)$$

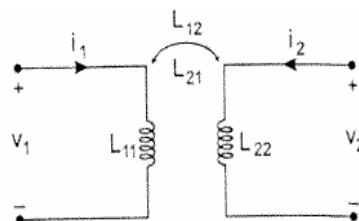
όπου R η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος, που συνδέει τα δύο τυλίγματα.

### 1.2.4.2 Συζευγμένα πηνία

Θεωρούμε δύο πηνία, τα οποία είναι τυλιγμένα στον ίδιο πυρήνα από σιδηρομαγνητικό υλικό, και τα οποία θεωρούνται ακίνητα τόσο μεταξύ τους όσο και ως προς τον πυρήνα τους [1.10].



Σχήμα 1.17 Υλοποίηση συζευγμένων πηνίων.



Σχήμα 1.18 Κυκλωματικό σύμβολο συζευγμένων πηνίων.

Οι μαγνητικές ροές, που διαρρέουν τα δύο πηνία, είναι συναρτήσεις των ρευμάτων των δύο πηνίων.

$$\Phi_1(t) = L_{11} \cdot i_1(t) + L_{12} \cdot i_2(t) \quad (7)$$

$$\Phi_2(t) = L_{21} \cdot i_1(t) + L_{22} \cdot i_2(t) \quad (8)$$

Οι συντελεστές  $L_{11}$ ,  $L_{12}$ ,  $L_{21}$ ,  $L_{22}$  είναι ανεξάρτητοι από το χρόνο και τα ρεύματα  $i_1(t)$  και  $i_2(t)$ . Οι συντελεστές  $L_{11}$  και  $L_{22}$  είναι οι αυτεπαγωγές των πηνίων και οι συντελεστές  $L_{12}$  και  $L_{21}$  λέγονται αμοιβαίες επαγωγές ή αλληλεπαγωγές.

Στις παραπάνω εξισώσεις, (7) και (8), αν θέσουμε  $i_1(t) = 0$  και  $i_2(t) = 0$ , αντίστοιχα, προκύπτουν οι σχέσεις :

$$\Phi_1(t) = L_{12} \cdot i_2(t), \text{ για } i_1(t) = 0 \quad (9)$$

$$\Phi_2(t) = L_{21} \cdot i_1(t), \text{ για } i_2(t) = 0 \quad (10)$$



Οι σχέσεις αυτές δηλώνουν ότι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής  $L_{12}(L_{21})$  εκφράζει τη μαγνητική ροή, που αναπτύσσεται στο πηνίο 1(2) ανά μονάδα του ρεύματος, που διαρρέει το πηνίο 2(1).

Από τις σχέσεις (7) και (8) και το νόμο του Faraday προκύπτουν οι i-v σχέσεις των δύο γραμμικών και χρονικά αμετάβλητων συζευγμένων πηνίων.

$$v_1(t) = \frac{d\varphi_1}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (11)$$

$$v_2(t) = \frac{d\varphi_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (12)$$

Για τους συντελεστές αμοιβαίας επαγωγής ισχύει  $L_{12} = L_{21} = M$ , δηλαδή είναι ίσοι. Επομένως, οι σχέσεις (11) και (12) γίνονται:

$$v_1(t) = L_{11} \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (13)$$

$$v_2(t) = M \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (14)$$

Η ενέργεια, που αποθηκεύεται σ' ένα ζεύγος συζευγμένων πηνίων, είναι:

$$w(t) = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} \int_0^t [v_1(\tau)i_1(\tau) + v_2(\tau)i_2(\tau)]d\tau \quad (15)$$

και αντικαθιστώντας από τις σχέσεις (13) και (14), η εξίσωση (15) γράφεται:

$$w(t) = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2(t) \pm M i_1(t)i_2(t) + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2(t) \quad (16)$$

Η ενέργεια αυτή πρέπει να είναι πάντα θετική, αφού τα συζευγμένα πηνία αποτελούν ένα παθητικό στοιχείο. Όταν  $M > 0$ , τότε πράγματι η ενέργεια είναι πάντα θετική. Όμως, αν  $M < 0$ , υπάρχει δυνατότητα να γίνει η ενέργεια αρνητική. Επομένως, ο παθητικός χαρακτήρας του στοιχείου πρέπει να θέτει έναν περιορισμό στο μέγεθος του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής. Γράφουμε την εξίσωση (16) στην παρακάτω μορφή:

$$w(t) = \frac{1}{2} [ \sqrt{L_{11}}i_1(t) - \sqrt{L_{22}}i_2(t) ]^2 + [ \sqrt{L_{11}L_{22}} - M ] i_1(t)i_2(t) \quad (17)$$

Στη χειρότερη περίπτωση, δηλαδή όταν :

$$\sqrt{L_{11}}i_1(t) - \sqrt{L_{22}}i_2(t) = 0 \quad (18)$$

η ενέργεια παραμένει θετική, αν  $\sqrt{L_{11}L_{22}} - M \geq 0$  (19) , οπότε καταλήγουμε στον περιορισμό:

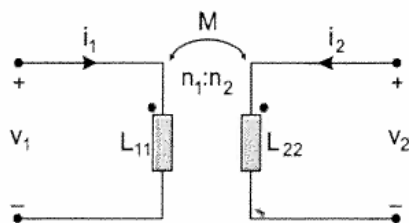
$$M \leq \sqrt{L_{11}L_{22}} \quad (20)$$

Ο λόγος του πραγματικού συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής δύο συζευγμένων πηνίων προς τη μέγιστη δυνατή τιμή του λέγεται *συντελεστής σύζευξης (coupling coefficient)* . Παίρνει τιμές, από το μηδέν, όταν δεν υπάρχει καθόλου μαγνητική σύζευξη ανάμεσα στα πηνία, μέχρι τη μονάδα, όταν υπάρχει τέλεια σύζευξη, δηλαδή όταν όλη η μαγνητική ροή, που προκαλείται από το ρεύμα του ενός πηνίου, διέρχεται και από το άλλο πηνίο. Ο συντελεστής σύζευξης συμβολίζεται k και δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} \quad (21)$$

### 1.2.4.3 Μετασχηματιστές σε τέλεια σύζευξη

Το μαγνητικό υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή θεωρείται ότι έχει πολύ μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, έτσι ώστε όλη η μαγνητική ροή να παραμένει μέσα στον πυρήνα και να μην υπάρχει μαγνητική ροή διαρροής. Υπό αυτές τις συνθήκες, η μαγνητική σύζευξη είναι πολύ ισχυρή και χαρακτηρίζεται με τον όρο *τέλεια σύζευξη*. Ο όρος τέλεια σύζευξη υποδηλώνει ότι ο συντελεστής σύζευξης των δύο πηνίων του μετασχηματιστή είναι  $k=1$ .



Σχήμα 1.19 Κυκλωματικό σύμβολο μετασχηματιστή.

Σε μετασχηματιστή με αριθμό σπειρών πρωτεύοντος  $n_1$  και δευτερεύοντος  $n_2$ , θεωρώντας αμελητέα την αντίσταση των τυλιγμάτων καθώς και τη χωρητικότητα ανάμεσα στις σπείρες κάθε πηνίου και ανάμεσα στα δύο πηνία, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις για την περιγραφή της λειτουργίας του κυκλώματος:

$$v_1(t) = L_{11} \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (22)$$

$$v_2(t) = M \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (23)$$

Επειδή θεωρήσαμε τέλεια σύζευξη ανάμεσα στα πηνία του μετασχηματιστή, ισχύει η σχέση :

$$L_{11}L_{22} = M^2 \quad (24)$$

Σ' ένα μετασχηματιστή με τέλεια ζεύξη, η τάση εισόδου (πρωτεύοντος) και η τάση εισόδου (δευτερεύοντος) συνδέονται με σχέση ανάλογη του λόγου των σπειρών των αντίστοιχων πηνίων του μετασχηματιστή. Αυτή η αναλογία εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{n_1}{n_2} \quad (25)$$

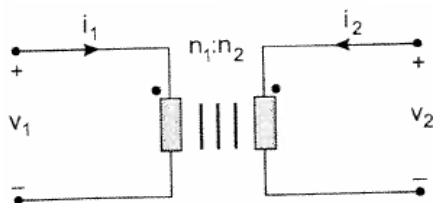
Οι σχέσεις, που συνδέουν τα ρεύματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή με τέλεια σύζευξη, είναι οι παρακάτω:

$$i_1(t) = \frac{1}{L_{11}} \int v_1(t) dt - \frac{n_2}{n_1} i_2(t) \quad (26)$$

$$i_2(t) = \frac{1}{L_{22}} \int v_2(t) dt - \frac{n_1}{n_2} i_1(t) \quad (27)$$

#### 1.2.4.4 Ιδανικός μετασχηματιστής

Ο ιδανικός μετασχηματιστής είναι μία εξιδανίκευση του πραγματικού μετασχηματιστή. Για τον ιδανικό μετασχηματιστή υποθέτουμε ότι η μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα του είναι άπειρη. Η υπόθεση αυτή, εκτός από την τέλεια σύζευξη, υποδηλώνει ότι η αυτεπαγωγή των πηνίων του μετασχηματιστή είναι άπειρη. ( $L_{11}, L_{22} \longrightarrow \infty$ ).



Σχήμα 1.20 Κυκλωματικό σύμβολο ιδανικού μετασχηματιστή.

Ως εκ τούτου, από τις εξισώσεις (26) και (27) προκύπτει ότι στον ιδανικό μετασχηματιστή τα ρεύματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος συνδέονται με τη σχέση:

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = -\frac{n_2}{n_1} \quad (28)$$

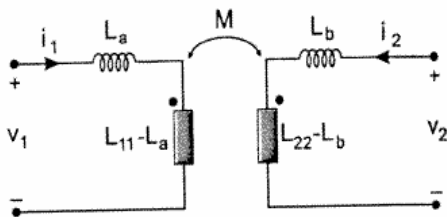
και επιπλέον ισχύει και η σχέση:

$$\frac{v_1(t)}{v_2(t)} = \frac{n_1}{n_2}$$

που συνδέει τις τάσεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

### 1.2.4.5 Μη ιδανικός - Πραγματικός μετασχηματιστής

Με τον όρο μη ιδανικός μετασχηματιστής εννοείται ένας μετασχηματιστής χωρίς τέλεια σύζευξη ( $L_{11}L_{22} > M^2$ ). Αυτό σημαίνει ότι μέρος της μαγνητικής ροής διαρρέει έξω από τον πυρήνα. Οι αυτεπαγωγές, που πλεονάζουν, λέγονται αυτεπαγωγές διαρροής (leakage inductance). Για να περιγράψουμε το φαινόμενο αυτό κυκλωματικά, πρώτα αφαιρούμε τις αυτεπαγωγές, που πλεονάζουν, ώστε να έχουμε τέλεια σύζευξη μετασχηματιστή και στη συνέχεια τις τοποθετούμε εν σειρά με τα πηνία του μετασχηματιστή σε τέλεια σύζευξη. Οι αυτεπαγωγές διαρροής δεν είναι μαγνητικά συζευγμένες μεταξύ τους, αλλά ούτε και με καμία άλλη αυτεπαγωγή του κυκλώματος.



Σχήμα 1.21 Μη ιδανικός μετασχηματιστής –ισοδύναμο με μετασχηματιστή με τέλεια σύζευξη.

Αφού  $L_{11}L_{22} > M^2$  αφαιρούμε από τις αυτεπαγωγές  $L_{11}$  και  $L_{22}$  τις αυτεπαγωγές  $L_a$  και  $L_b$ , αντίστοιχα, έτσι ώστε να ισχύει η σχέση:

$$(L_{11} - L_a)(L_{22} - L_b) = M^2 \quad (29)$$

ή αλλιώς :

$$\frac{M}{L_{22} - L_b} = \frac{L_{11} - L_a}{M} = \frac{n_1}{n_2} \quad (30)$$

Ο λόγος σπειρών, που έχουμε στην παραπάνω σχέση, δεν είναι ο πραγματικός λόγος του μετασχηματιστή, αλλά αναφέρεται στο μετασχηματιστή σε τέλεια σύζευξη. Στην πράξη, το λόγο μετασχηματισμού ενός μετασχηματιστή τον βρίσκουμε μετρώντας τις αυτεπαγωγές των πηνίων του και όχι τον αριθμό των σπειρών του. Επιλέγουμε έτσι ως λόγο μετασχηματισμού την τιμή:

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} \quad (31)$$

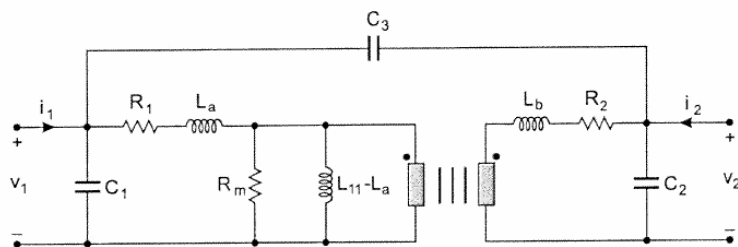
Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι οι αυτεπαγωγές διαρροής δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$L_a = L_{11} - \sqrt{\frac{L_{11}}{L_{22}}} M \quad (32)$$

$$L_b = L_{22} - \sqrt{\frac{L_{22}}{L_{11}}} M \quad (33)$$

Τα μοντέλα, που αναφέρθηκαν ως τώρα, δεν περιγράφουν τη λειτουργία του πραγματικού μετασχηματιστή με μεγάλη ακρίβεια, διότι αγνοούν τις απώλειες, που προέρχονται από τις αντιστάσεις των τυλιγμάτων των πηνίων, τα δινορεύματα, και την υστέρηση του μαγνητικού υλικού του πυρήνα. Επίσης, αγνοούνται οι χωρητικότητες, οι οποίες βρίσκονται κατανεμημένες ανάμεσα στις σπείρες των πηνίων και ανάμεσα στα δύο πηνία.

Για τον πραγματικό μετασχηματιστή, ένα πληρέστερο μοντέλο δίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.21). Οι ωμικές αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  εκφράζουν τις απώλειες των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή και η αντίσταση  $R_m$  εκφράζει τις μαγνητικές απώλειες πυρήνα. Οι χωρητικότητες  $C_1$  και  $C_2$  εκφράζουν τις κατανεμημένες χωρητικότητες στα τυλίγματα των πηνίων, ενώ η  $C_3$  εκφράζει την κατανεμημένη χωρητικότητα ανάμεσα στα δύο πηνία.



Σχήμα 1.21 Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή.

### 1.2.5 Συνδεσμολογία τριφασικών μετασχηματιστών

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής είναι ουσιαστικά τρεις μονοφασικοί μετασχηματιστές, τα άκρα των οποίων συνδέονται κατάλληλα. Κάθε μονοφασικός μετασχηματιστής μπορεί να έχει δικό του πυρήνα ή μπορεί και οι τρεις να μοιράζονται τον ίδιο. Τα τυλίγματα σε κάθε πλευρά του μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν σε:

➤ Αστέρα (Y).

Θετικά της σύνδεσης αυτής είναι ότι τα τυλίγματα έχουν μικρότερη τάση από αυτήν του δικτύου και ότι υπάρχει ουδέτερος άρα και δυνατότητα επιπλέον ασφάλειας.

➤ Τρίγωνο(D).

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι τα τυλίγματα τα διαρρέει μικρότερο ρεύμα και επίσης εμποδίζεται η διέλευση κάποιων παρασιτικών τάσεων και ρευμάτων, όπως είναι οι 3<sup>εξ</sup> αρμονικές και οι ομοπολικές συνιστώσες. Πρέπει να σημειωθεί, ότι στη σύνδεση κατά τρίγωνο δεν υπάρχει σύνδεση ουδετέρου, που είναι και το βασικό της μειονέκτημα.

➤ Τεθλασμένος Αστέρας (Ζιγκ-Ζαγκ) (Z).

Η συνδεσμολογία αυτή συνδυάζει κάποια από τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων. Διαθέτει ουδέτερο για μεγαλύτερη προστασία και δεν επιτρέπει τη διέλευση ορισμένων παρασιτικών τάσεων και ρευμάτων.

Τα τρία πρωτεύοντα και τα τρία δευτερεύοντα τυλίγματα ενός τριφασικού μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν με διάφορους τρόπους και έτσι να προκύψουν διάφορες ομάδες συνδεσμολογίας. Στην πράξη, μόνο μερικές από τις ομάδες αυτές εφαρμόζονται λόγω των πλεονεκτημάτων. Τα κεφαλαία γράμματα χρησιμοποιούνται για το συμβολισμό της υψηλής τάσης, ενώ τα μικρά για το συμβολισμό της χαμηλής τάσης. Για έναν πλήρη συμβολισμό γράφουμε πρώτα το κεφαλαίο γράμμα μετά το μικρό και στην τρίτη θέση έναν αριθμό (π.χ Dyn5), ο οποίος ονομάζεται χαρακτηριστικός αριθμός, και σημαίνει ένα πολλαπλάσιο της γωνίας των 30°, κατά το οποίο το διάνυσμα της χαμηλής ακολουθεί αυτό της ΥΤ, εννοώντας πάντα την ίδια φάση στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τύλιγμα. Οι ακροδέκτες, στους οποίους εμφανίζεται υψηλή τάση, χαρακτηρίζονται με κεφαλαία γράμματα Α,Β,С, ενώ οι ακροδέκτες της χαμηλής τάσης με τα γράμματα a,b,c.

Πιο αναλυτικά ο συμβολισμός έχει την εξής μορφή :

$$A(N)b(n)k$$

το κάθε γράμμα έχει τον εξής συμβολισμό:

**A:** Αναφέρεται στη σύνδεση των τυλιγμάτων στην πλευρά της ΥΤ.

Οι δυνατές περιπτώσεις είναι:

Y: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά αστέρα.

D: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά τρίγωνο.

**Z:** Σύνδεση τυλιγμάτων κατά ζιγκ-ζαγκ.

**N:** Υπάρχει όταν στην πλευρά της ΥΤ υπάρχει ουδέτερος.

**b:** Αναφέρεται στη σύνδεση των τυλιγμάτων στην πλευρά της ΥΤ.

Οι δυνατές περιπτώσεις είναι:

γ: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά αστέρα.

d: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά τρίγωνο.

z: Σύνδεση τυλιγμάτων κατά ζιγκ-ζαγκ.

**n:** Υπάρχει όταν στην πλευρά της ΧΤ υπάρχει ουδέτερος.

**k:** Λόγω της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων κάθε πλευράς των μετασχηματιστών, τα διανύσματα τάσης της ΧΤ ακολουθούν αυτά της ΥΤ κατά  $k \cdot 30^\circ\text{C}$ .

## 1.2.6 Απώλειες μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στο ενεργειακό σύστημα. Με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, ο αριθμός και η χωρητικότητα των εγκατεστημένων μετασχηματιστών μεταφοράς, αλλά κυρίως των μετασχηματιστών διανομής, έχει αυξηθεί. Παρ' όλα αυτά δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ποσότητα των απωλειών και στην απόδοση των μετασχηματιστών, διότι ένας μετασχηματιστής, ως στοιχείο του δικτύου, έχει αποδοτικότητα 97-99%. Το σύνολο όμως των μετασχηματιστών στη μεταφορά και στη διανομή παρουσιάζει υψηλές συνολικές απώλειες λόγω του μεγάλου πλήθους τους.

Επομένως, κάθε μείωση στις απώλειες των μετασχηματιστών θα μείωνε αισθητά τις συνολικές απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου.

Πολύ μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό των απωλειών των μετασχηματιστών του δικτύου έχει το είδος του φορτίου, το οποίο τροφοδοτείται. Με την πάροδο των χρόνων τα φορτία, που συνδέονται και τροφοδοτούνται από το δίκτυο, έχουν αλλάξει σημαντικά. Πολλοί από τους μετασχηματιστές, που είχαν εγκατασταθεί αρχικά για να τροφοδοτούν γραμμικά φορτία με πλήρως ημιτονοειδές ρεύμα, σταδιακά απέκτησαν ως κύριο φορτίο μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν ρεύματα με υψηλότερες αρμονικές. Αύξηση της περιεκτικότητας σε αρμονικές του ρεύματος φόρτισης δημιουργεί παραπάνω απώλειες και επομένως οδηγεί σε αύξηση στη θερμοκρασία hot-spot των μετασχηματιστών, άρα και στη μείωση της διάρκειας ζωής τους και στην επιδείνωση της μόνωσής τους.

Οι μετασχηματιστές συγκρινόμενοι με άλλες ηλεκτρικές μηχανές είναι αρκετά αποδοτικοί. Στο μετασχηματιστή παρατηρούνται οι εξής απώλειες :

- Απώλειες κενού φορτίου (σιδήρου ή πυρήνα).
- Απώλειες φορτίου (χαλκού ή τυλιγμάτων).
- Επιπρόσθετες απώλειες (στο σύστημα ψύξης κλπ).

Βέβαια οι δύο κυριότερες κατηγορίες απωλειών είναι οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου. Ως εκ τούτου, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$P_T = P_{NL} + P_{LL} \quad (34)$$

όπου :

$P_T$  : συνολικές απώλειες μετασχηματιστή (total losses).

$P_{NL}$  : απώλειες κενού φορτίου ( no-load losses).

$P_{LL}$  : απώλειες φορτίου (load losses).

Ας εξετάσουμε όμως κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες ξεχωριστά.

### 1.2.6.1 Απώλειες κενού φορτίου

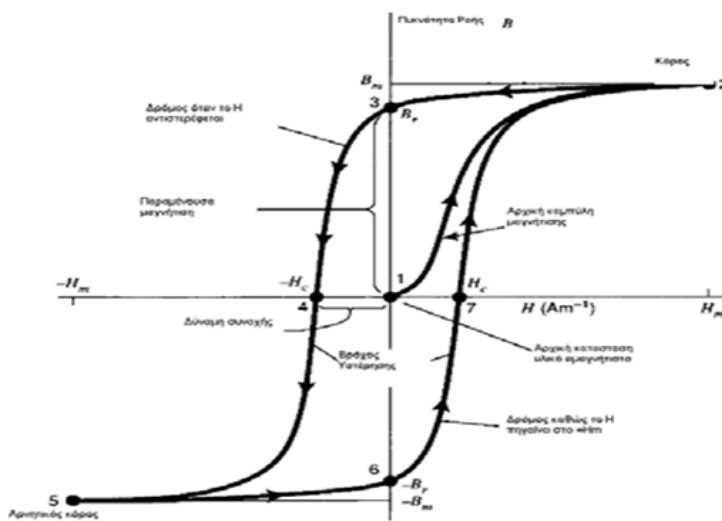
Ένας μετασχηματιστής από τη στιγμή, που είναι συνδεδεμένος υπό τάση, ακόμα κι αν είναι αφόρτιστος έχει απώλειες. Θεωρώντας ότι το πρωτεύον του μετασχηματιστή τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση και το δευτερεύον παραμένει ανοικτοκυκλωμένο ο μετασχηματιστής λειτουργεί εν κενώ. Κατά την εν κενώ λειτουργία, το πρωτεύον απορροφά ένα πολύ μικρό ρεύμα, το ρεύμα διεγέρσεως. Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Το *ρεύμα απωλειών πυρήνα*, το οποίο αντιστοιχεί στις *απώλειες πυρήνα*, που αναφέρθηκαν παραπάνω, και το *ρεύμα μαγνητίσεως*, το οποίο προκαλεί και τη μαγνητική ροή  $\Phi$ , που διαρρέει το σιδερένιο πυρήνα. Επομένως, όπως διαπιστώνουμε, οι απώλειες πυρήνα είναι ανεξάρτητες από το επίπεδο φόρτισης του μετασχηματιστή και εξαρτώνται από το τετράγωνο της τάσης.

Οι απώλειες πυρήνα προκύπτουν από την ενέργεια, που απαιτείται, προκειμένου να διατηρηθεί η συνεχώς μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στον πυρήνα. Αποτελούνται από τις *απώλειες υστερήσεως* και τις *απώλειες δινορευμάτων*. Οι εν λόγω απώλειες είναι σταθερές και συνεισφέρουν αρκετά στις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή, διότι εμφανίζονται όταν και όσο ο μετασχηματιστής είναι σε λειτουργία.



### 1.2.6.1.1 Απώλειες υστερήσεως

Όπως προαναφέρθηκε, ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι από σίδηρο, δεδομένου ότι η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται στις μαγνητικές ιδιότητές του. Είναι γνωστό ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν την ιδιότητα, όταν μαγνητίζονται, να διατηρούν για κάποιο χρονικό διάστημα έναν παραμένοντα μαγνητισμό. Η ιδιότητα αυτή προκαλεί το φαινόμενο της *μαγνητικής υστέρησης*. Ας θεωρήσουμε ένα αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο υφίσταται μία εναλλασσόμενη ένταση μαγνητικού πεδίου  $H$ . Παρακάτω παρατίθεται ένας πλήρης κύκλος της εναλλασσόμενης εντάσεως  $H$ . Αρχίζοντας από το μηδέν, αφού υποθέσαμε αμαγνήτιστο αρχικά υλικό, καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της πάνω στην καμπύλη 1-2, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής θα μεταβληθεί αντίστοιχα κατά μήκος της καμπύλης αυτής μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί ξανά ακολουθώντας τώρα την καμπύλη 2-3, αφού το υλικό είναι πλέον μαγνητισμένο, με αποτέλεσμα όταν μηδενίζεται η ένταση να εξακολουθεί να υπάρχει μαγνητική ροή. Στη συνέχεια, η ένταση του μαγνητικού πεδίου γίνεται αρνητική και η πυκνότητα μαγνητικής ροής εξακολουθεί να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί πάνω στην καμπύλη 3-4. Στην κατάσταση αυτή, η απαιτούμενη ένταση για να απομαγνητιστεί το μαγνητισμένο υλικό ονομάζεται ένταση επαναφοράς ( $H_c$ ). Μετά από το σημείο αυτό, η μαγνητική επαγωγή αρχίζει να παίρνει αρνητικές τιμές έως το αρνητικό της μέγιστο (καμπύλη 4-5) και αφού φτάσει στο σημείο αυτό, η εναλλασσόμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει πάλι να αυξάνεται αλγεβρικά κατά μήκος της καμπύλης 5-6 μέχρι που φτάνει στο σημείο όπου μηδενίζεται, ενώ υπάρχει και πάλι μία παραμένουσα αρνητική μαγνητική ροή. Καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να αυξάνεται παίρνοντας θετικές τιμές, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μηδενίζεται στο σημείο 7 και μεγιστοποιείται και πάλι στο σημείο 2, όπου και κλείνει ο πρώτος κύκλος και επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 1.22 Βρόχος υστέρησης.

Η καμπύλη 2-3-4-5-6-7-2 ονομάζεται *βρόχος υστέρησης* και κάθε κύκλος του εναλλασσόμενου ρεύματος διεγέρσεως αντιστοιχεί σε μία πλήρη αριστερόστροφη περιφορά

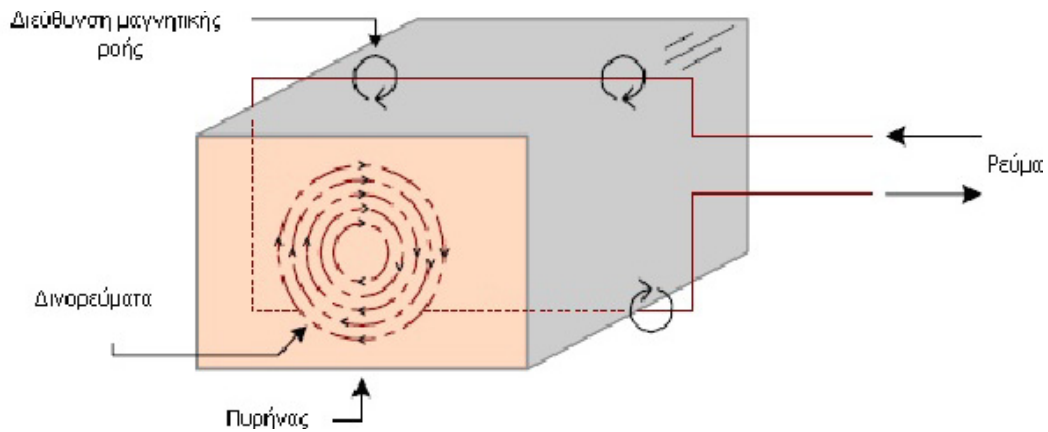
Επομένως, παρατηρώντας τα εμβαδά, που σχηματίζονται κατά έναν πλήρη κύκλο υστέρησης, διαπιστώνουμε ότι το μαγνητικό πεδίο απορροφά περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι αποδίδει. Δεδομένου ότι η τελική κατάσταση είναι ακριβώς η ίδια με την αρχική, αυτή η επιπλέον ενέργεια, η οποία ισούται με το εμβαδό του βρόχου υστερήσεως, πρέπει να χάνεται με τη μορφή απωλειών. Πρόκειται για ενέργεια, η οποία χάνεται σε μορφή θερμότητας από τη μεταβολή του προσανατολισμού των στοιχειωδών μαγνητών, που αποτελούν το σιδηρομαγνητικό υλικό, πότε προς τη θετική και πότε προς την αρνητική κατεύθυνση. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται *απώλειες υστέρησης* και αποτελούν το 50 έως 80% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου .

#### **1.2.6.1.2 Απώλειες δινορευμάτων**

Εκτός από απώλειες υστερήσεως στα μαγνητικά κυκλώματα, τα οποία διεγείρονται από εναλλασσόμενα ρεύματα, εμφανίζονται και οι απώλειες λόγω ανάπτυξης δινορευμάτων, δηλαδή λόγω εναλλασσόμενων ρευμάτων, που επάγονται στο εσωτερικό του σιδερένιου πυρήνα από την περιοδικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή  $\Phi$ . Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες δινορευμάτων και εξαρτώνται από το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του υλικού και από την ειδική αντίστασή του.

Γνωρίζουμε από το νόμο επαγωγής του Faraday, ότι όταν αγωγίμη μάζα βρεθεί μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε επάγεται σ' αυτή μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Η δύναμη αυτή αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της μάζας να κινηθούν σε τυρβώδεις τροχιές, σχηματίζοντας κλειστούς βρόχους ή δίνες και δημιουργώντας τα δινορεύματα (eddy currents) . Τα ρεύματα αυτά θερμαίνουν τη μάζα του σιδήρου μέσα στην οποία ρέουν, σύμφωνα με το νόμο του Joule ( $P = Ri^2$ ).

Οι απώλειες δινορευμάτων εκδηλώνονται με τη μορφή θερμότητας, ευθύνονται για περίπου 30 έως 50% των συνολικών απωλειών πυρήνα, και μαζί με τις απώλειες υστερήσεως αποτελούν τις απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.23 Αναπτυσσόμενα δινορεύματα στον πυρήνα.

### 1.2.6.2 Απώλειες φορτίου

Οι απώλειες φορτίου είναι σημαντικές σε μέγεθος και ισοδυναμούν ή είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες κενού φορτίου. Είναι το μέρος εκείνο των απωλειών, που παράγονται από το ρεύμα του φορτίου, είναι κυρίως απώλειες Joule στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος αυτού. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

1. Απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα των αγωγών (απώλειες χαλκού)-Ωμικές απώλειες.
2. Απώλειες δινορευμάτων (eddy currents) στα τυλίγματα των αγωγών.
3. Απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή - (δοχείο, τοιχώματα κ.τ.λ.).

Για τις απώλειες φορτίου ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$P_{LL} = P_{dc} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (35)$$

όπου:

$P_{LL}$  : Απώλειες Φορτίου.

$P_{dc}$  : Ωμικές απώλειες,

$P_{EC}$  : Απώλειες δινορευμάτων - (eddy currents) - στα τυλίγματα των αγωγών.

$P_{OSL}$  : Απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή.

Το άθροισμα των απωλειών δινορευμάτων στα τυλίγματα των αγωγών και στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή ονομάζονται συνολικές απώλειες δινορευμάτων.

Οι *απώλειες αντίστασης* συχνά αναφέρονται και ως *απώλειες χαλκού*, επειδή συμβαίνουν στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, τα οποία είναι συνήθως από χαλκό. Λαμβάνουν χώρα τόσο στο πρωτεύον τύλιγμα όσο και στο δευτερεύον και είναι αποτέλεσμα

της αντίστασης R του χάλκινου αγωγού κατά τη ροή του ρεύματος μέσα στον αγωγό αυτό. Οι απώλειες αντίστασης υπολογίζονται από τον τύπο :

$$P_{dc} = VA = (\text{volts}) \times (\text{amperes}) = V \times I = R \times I^2 \quad (36)$$

Αν η RMS τιμή του ρεύματος φορτίου αυξάνεται λόγω αρμονικών συνιστωσών, οι ωμικές απώλειες αυξάνονται με το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος φορτίου. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση, που έχουμε υψηλότερες αρμονικές ρεύματος, οι απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{dc} = R_{dc} \times I^2 = R_{dc} \times \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_{n,\max}^2 \quad (37)$$

Οι *απώλειες δινορευμάτων* σε έναν αγωγό είναι παρόμοιες με εκείνες, που συμβαίνουν στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Οφείλονται στη μαγνητική ροή, η οποία διαπερνά κάθετα τον αγωγό και προκαλεί τη ροή δινορευμάτων στο εσωτερικό του. Όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται υπό φορτίο, τότε προκαλείται ένα πρόσθετο πεδίο σκεδάσεως από τα ρεύματα φορτίου. Το πεδίο αυτό εξουδετερώνεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, όχι όμως και στο χώρο των τυλιγμάτων και στο μεταξύ τους χώρο. Αυτό το πεδίο σκεδάσεως ονομάζεται κύριο πεδίο σκεδάσεως, προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος της άεργης πτώσης τάσης και τα δινορεύματα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή.

Το μέγεθος της ανεπιθύμητης σκέδασης του πεδίου εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή. Το φαινόμενο της σκέδασης στα τυλίγματα έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ακατάπαυστων ακτινικών και αξονικών μεταβολών της ροής σε όλο το χώρο, που διατίθεται. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν τάσεις, που οδηγούν το ρεύμα να ρέει κάθετα στις ροές, και αυτό προκαλεί πρόσθετες απώλειες.

Οι *απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα των αγωγών* προκαλούνται από τη χρονικά μεταβαλλόμενη ηλεκτρομαγνητική ροή, που καλύπτει τα τυλίγματα. Το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και η επίδραση εγγύτητας (proximity effect) είναι τα πιο σημαντικά φαινόμενα, τα οποία δημιουργούν αυτές τις απώλειες. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών είναι στο τελευταίο στρώμα των αγωγών των τυλιγμάτων, διότι σ' αυτό το τμήμα έχουμε τη μεγαλύτερη πυκνότητα ακτινικής ροής. Οι απώλειες δινορευμάτων υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{EC} = \frac{\pi \tau^2 \mu^2}{\rho} f^2 \times H^2 \quad (38)$$

όπου:

$\rho$  = η αντίσταση του αγωγού.

$\tau$  = πλάτος του αγωγού σε τομή του κάθετη στις πεδιακές γραμμές.

Σύμφωνα με το πρότυπο του IEEE C56.110, η ποσότητα των ονομαστικών απωλειών δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή αποτελεί το 33% των συνολικών απωλειών δινορευμάτων στους μετασχηματιστές λαδιού και το 67% στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου.

Οι απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι συνάρτηση του τετραγώνου του ρεύματος και του τετραγώνου της αρμονικής συχνότητας στην περίπτωση που έχουμε ρεύμα με αρμονικές συνιστώσες. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται με τη σχέση:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \times \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} n^2 \left[ \frac{I_n}{I_R} \right]^2 \quad (39)$$

όπου:

$P_{EC-R}$  = ονομαστικές απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα.

$I_h$  = ονομαστικό ρεύμα στην n-οστή αρμονική.

$I_R$  = ονομαστικό ρεύμα φόρτισης.

n = τάξη της αρμονικής.

Ο *συντελεστής αρμονικών απωλειών* για τις απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα είναι:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} n^2 I_n^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} n^2 \left[ \frac{I_n}{I_R} \right]^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \left[ \frac{I_n}{I_R} \right]^2} \quad (40)$$

Οι ονομαστικές απώλειες λόγω δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή όταν το ρεύμα φόρτισης δεν είναι ημιτονοειδές πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το συντελεστή  $F_{HL}$  για να μας δώσουν τις σωστές απώλειες.

Σύμφωνα με αποτελέσματα από έρευνες και δοκιμές, που έχουν πραγματοποιηθεί, ο συντελεστής αρμονικών απωλειών, ο οποίος υπολογίζεται με την παραπάνω σχέση, είναι αποδεκτός μόνο για μετασχηματιστές, για τους οποίους οι διαστάσεις της ακολουθίας των αγωγών τους είναι μικρότερες των 3mm. Για αγωγούς με διαστάσεις μεγαλύτερες των 3 mm ο συντελεστής αρμονικών απωλειών πρέπει να υπολογιστεί διορθωμένος για να μην οδηγήσει σε ανακριβείς υπολογισμούς.

Λόγω του επιδερμικού φαινομένου στις ακολουθίες των αγωγών με διαστάσεις μεγαλύτερες από 3mm, η ηλεκτρομαγνητική ροή δεν μπορεί να διεισδύσει πλήρως στην ακολουθία των αγωγών των τυλιγμάτων σε υψηλή συχνότητα. Γι αυτό, η επιτρεπτότητα του πεδίου  $\delta$  μπορεί να προσδιοριστεί σε διαφορετική αρμονική συχνότητα, ως εξής:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f_n}} = \frac{\delta_R}{\sqrt{n}} \quad (41)$$

όπου:

$\delta_R$  : Βάθος διείσδυσης σε ονομαστική συχνότητα, το οποίο είναι περίπου 10mm για το χαλκό και περίπου 13mm για το αλουμίνιο σε συχνότητα 50Hz.

$\rho$  : αντίσταση του αγωγού.

$\mu$  : επιτρεπτικότητα.

$f$  : θεμελιώδης συχνότητα.

Υπό αυτές τις συνθήκες, οι απώλειες δινορευμάτων, διορθωμένες από τον αρμονικό συντελεστή, υπολογίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_{EC} = \mu_0 \omega \times H^2 \times F(\xi) \quad (42)$$

$$F(\xi) = \frac{1}{\xi} \times \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi - \cos \xi} \quad (43)$$

$$\xi = \frac{\tau}{\delta} \quad (44)$$

$$\xi_n = \xi_R \times \sqrt{n} \quad (45)$$

$$F'_{HL} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} n \left[ \frac{F(\xi_n)}{F(\xi_R)} \right] \left[ \frac{I_n}{I_R} \right]^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{\max}} \left[ \frac{I_n}{I_R} \right]^2} \quad (46)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις και υπό μη ημιτονοειδή ρεύματα, οι ονομαστικές απώλειες λόγω δινορευμάτων πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το συντελεστή  $F'_{HL}$ .

Όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, τα δινορεύματα προκαλούνται από την τάση, που αναπτύσσεται στους αγωγούς, λόγω των διαρροών της ηλεκτρομαγνητικής ροής του μετασχηματιστή προς αυτούς. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες και αυξάνουν τη θερμοκρασία. Ένα μέρος των απωλειών αυτών και συγκεκριμένα αυτό, που παράγεται στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή, και όχι στα τυλίγματα του ονομάζεται *απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη (Other Stray Loss)*.

Οι απώλειες αυτές αναπτύσσονται στα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή, όπως είναι το δοχείο, το περίβλημα, και οι σφικτήρες (clamps) και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το μέγεθος του πυρήνα, η τάξη της τάσης του μετασχηματιστή, και τα χαρακτηριστικά των υλικών, από τα οποία είναι κατασκευασμένη η δεξαμενή και τα clamps.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές διαφορετικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της επίδρασης της συχνότητας στις απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη. Σύμφωνα με αποτελέσματα κάποιων τέτοιων δοκιμών, η αντίσταση των απωλειών δινορευμάτων στα δομικά μέρη σε χαμηλές συχνότητες (0-360Hz) ισούται με:

$$R_{AC}^{hf} = 0.00129 \left( \frac{f_h}{f} \right)^{0.8} \quad (47)$$

Για συχνότητες στο εύρος των (420-1200Hz) η αντίσταση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_{AC}^{hf} = 0.33358 \left( \frac{f_h}{f} \right)^{-1.87} \quad (48)$$

Οι απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη αυξάνονται προς την καθορισμένη συχνότητα και μετά από αυτήν μειώνονται. Στο ενδιάμεσο, η καθορισμένη συχνότητα, στην οποία μεγιστοποιούνται οι απώλειες, εξαρτάται από το είδος των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για τα δομικά μέρη του μετασχηματιστή.

Σύμφωνα με το IEEE C57.110 πρότυπο, η ονομαστική τιμή των απωλειών δινορευμάτων στα δομικά μέρη (other stray loss,  $P_{OSL-R}$ ) είναι περίπου το 67% των συνολικών απωλειών δινορευμάτων στους μετασχηματιστές λαδιού και το 33% στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου.

Όταν έχουμε μη ημιτονοειδές ρεύμα η τιμή των απωλειών λόγω δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος και με την αρμονική συχνότητα, υψωμένη σε δύναμη 0.8 .

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \times \sum_{n=1}^{n=n_{max}} n^{0.8} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 \quad (49)$$

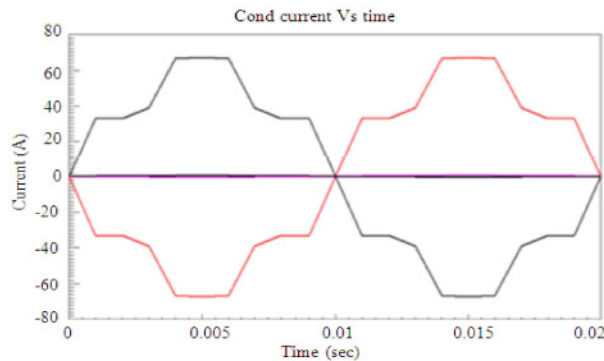
Ο συντελεστής αρμονικών απωλειών για τις απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-R}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} n^{0.8} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2}{\sum_{n=1}^{n=n_{max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2} \quad (50)$$

Επομένως, όταν έχουμε μη ημιτονοειδές ρεύμα αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τις ονομαστικές απώλειες λόγω δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή με το συντελεστή  $F_{HL-STR}$ .

### 1.2.6.3 Επιπρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δίκτυα σχεδιασμένα να λειτουργούν στη βασική συχνότητα των 50 Hz. Σχεδόν όλες οι βιομηχανίες έχουν μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν υψηλά επίπεδα αρμονικών ρευμάτων. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος, για τον οποίο οι μετασχηματιστές διανομής, που είναι εγκατεστημένοι στις βιομηχανίες, είναι διαφορετικοί από τους μετασχηματιστές διανομής της ΔΕΗ.



Σχήμα 1.24 Αρμονικά ρεύματα.

Όπως προαναφέρθηκε, οι απώλειες φορτίου είναι κυρίως απώλειες αντίστασης πάνω στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα και στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή. Και οι δύο αυτές κατηγορίες απωλειών αυξάνονται εξαιτίας των αρμονικών. Η αύξηση αυτή των απωλειών λόγω των αρμονικών ονομάζεται "extra losses".

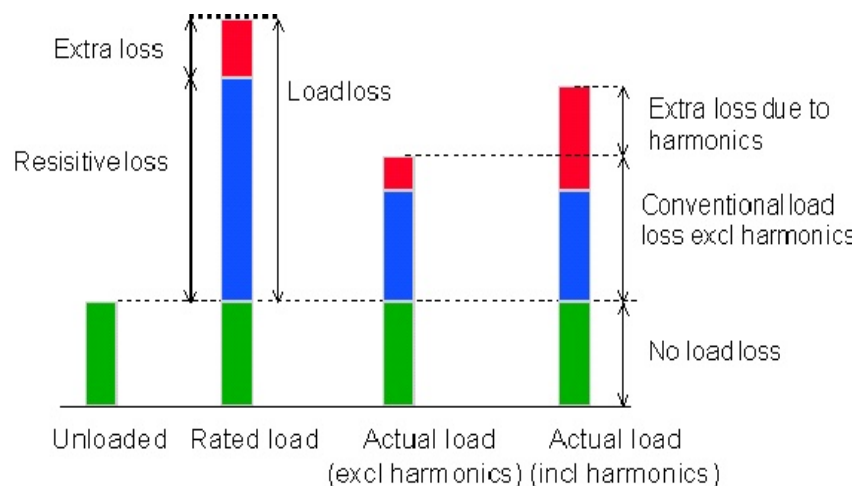
Τυπικά μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν αρμονικές στο σύστημα ηλεκτροδότησης, είναι :

- Ηλεκτρονικοί υπολογιστές.
- Συστήματα UPS, για την αδιάλειπτη παροχή ρεύματος.
- Variable Speed Drives (VSDs), για την ακριβή ρύθμιση των στροφών των κινητήρων.

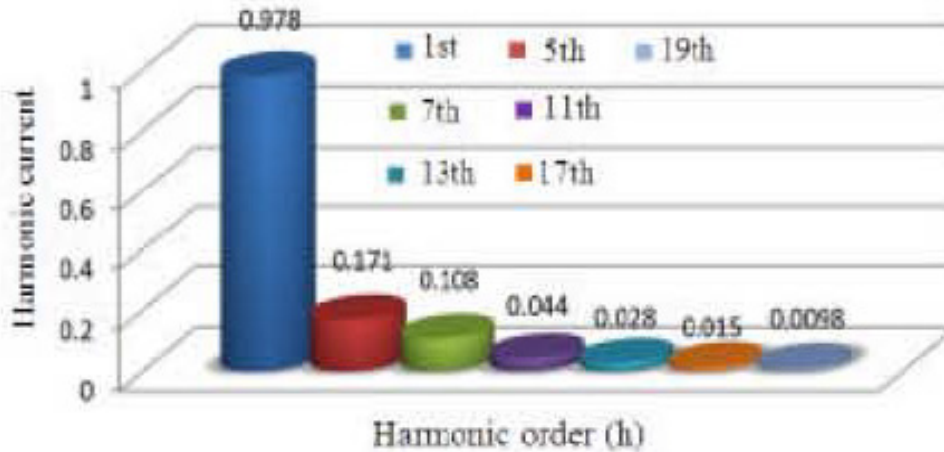


- Εναλλάκτες (Inverters).
- Ανορθωτές (Rectifiers).
- Συστήματα ηλεκτρονικού ελέγχου της φάσης (electronic phase control).
- PWM Drivers, για τη μεταβολή της ταχύτητας και της ισχύος των ηλεκτρικών DC κινητήρων.
- Cycloconverters (CCV), οι οποίοι μετατρέπουν μία AC κυματομορφή, σταθερής τάσης και σταθερής συχνότητας σε μία άλλη AC κυματομορφή, χαμηλότερης συχνότητας.
- Κλίβανοι.
- Adjustable speed drive (ASD), εξοπλισμός, που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας μηχανών.
- Ballast λαμπών φθορισμού.
- Μεγάλα συστήματα εξαερισμού σε εμπορικά κέντρα.

Τα αρμονικά ρεύματα οδηγούν σε υψηλότερες απώλειες στους μετασχηματιστές και συνεπώς σε μία υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία επηρεάζει και τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Τα υψηλότερης συχνότητας στοιχεία του ρεύματος του φορτίου δεν διαπερνούν πλήρως τον αγωγό, αλλά ταξιδεύουν στην περιφέρειά του, ένα φαινόμενο, που ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο (skin effect). Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ωφέλιμη περιοχή διατομής του αγωγού, άρα αυξάνονται οι απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα, (απώλειες φορτίου) και κατ' επέκταση αυξάνεται η θερμοκρασία του αγωγού και όλων των στοιχείων, που συνδέονται με αυτόν.



Σχήμα 1.25 Μεταβολή απωλειών λόγω της ύπαρξης ανώτερων αρμονικών.



Σχήμα 1.26 Επίπεδα, στα οποία κυμαίνονται τα αρμονικά ρεύματα ανάλογα με την αρμονική τάξη τους.

Αναφέρθηκε παραπάνω αναλυτικά, η προσαύξηση, που σημειώνεται σε επιμέρους κατηγορίες απωλειών, όταν έχουμε μη ημιτονοειδή ρεύματα με αρμονικές συνιστώσες. Συγκεκριμένα, παρατηρείται έντονη επίδραση στις απώλειες λόγω δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και στα δομικά του μέρη.

Όταν ένας μετασχηματιστής χρησιμοποιείται υπό μη ημιτονοειδή τάση και ρεύμα, λόγω της αύξησης των απωλειών και κατά συνέπεια της αύξησης της θερμοκρασίας, η ονομαστική του ισχύς πρέπει να μειώνεται. Αυτό είναι εφικτό, μειώνοντας τις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή υπό μη ημιτονοειδές ρεύμα στο επίπεδο των απωλειών, που θα παρουσιάζοντο στο μετασχηματιστή, αν λειτουργούσε υπό ημιτονοειδή τάση και ρεύμα.

Επομένως, το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα στο μετασχηματιστή υπό αρμονικό φορτίο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε οι απώλειες που δημιουργεί να είναι ίσες με αυτές, που θα είχαμε στο hot - spot υπό ημιτονοειδείς συνθήκες.

Οι απώλειες φορτίου όταν έχουμε γραμμικό φορτίο και ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας του μετασχηματιστή είναι ανά μονάδα ίσες με:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu) \quad (51)$$

όπου :

$P_{LL-R}$  = ονομαστικές απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή.

$P_{EC-R}$  = ονομαστικές απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή

$P_{OSL-R}$  = ονομαστικές απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή.

Το 1 ( στον τύπο 51 ) αντιπροσωπεύει τις ωμικές απώλειες, οι οποίες δεν επηρεάζονται από τις αρμονικές του ρεύματος και η ονομαστική τους τιμή είναι 1 ανά μονάδα.

Όταν έχουμε μη ημιτονοειδές ρεύμα και με βάση τους τρόπους υπολογισμού, που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι απώλειες φορτίου ανά μονάδα είναι ίσες με:

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) \times [1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)] \quad (52)$$

Επομένως, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης για τον προσδιορισμό της μείωσης της χωρητικότητας του μετασχηματιστή είναι:

$$I_{\max}(pu) = \left[ \frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)} \right]^{0.5} \quad (53)$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα φόρτισης του μετασχηματιστή και επίσης να προσδιορίσουμε τη μείωση της χωρητικότητάς του, όταν λειτουργεί υπό μη ημιτονοειδείς συνθήκες.

#### 1.2.6.4. Τυποποιημένες απώλειες μετασχηματιστών διανομής 50-2500kVA

Οι απώλειες των μετασχηματιστών διανομής δίνονται στο εναρμονισμένο πρότυπο HD 428.1 S1:1992.

Όνομαστική ισχύς kVA	Κατάλογος A P <sub>k</sub> W	Κατάλογος B P <sub>k</sub> W	Κατάλογος C P <sub>k</sub> W	Τάση βραχυκύκλωσης %
50	1100	1350	875	
100	1750	2150	1475	
160	2350	3100	2000	
250	3250	4200	2750	4
400	4600	6000	3850	
630	6500	8400	5400	
630	6750	8700	5600	
1000	10500	13000	9500	
1600	17000	20000	14000	6
2500	26500	32000	22000	

Παρακάτω, παρατίθενται οι απώλειες κενής λειτουργίας και η στάθμη θορύβου.

Ονομαστική ισχύς kVA	Κατάλογος A'		Κατάλογος A'		Κατάλογος A'		Τάση Βραχυκύκλωσης %
	P <sub>0</sub> W	L <sub>w</sub> dB(A)	P <sub>0</sub> W	L <sub>w</sub> dB(A)	P <sub>0</sub> W	L <sub>w</sub> dB(A)	
50	190	55	145	50	125	47	
100	320	59	260	54	210	49	
160	460	62	375	57	300	52	
250	650	65	530	60	425	55	4
400	930	68	750	63	610	58	
630	1300	70	1030	65	860	60	
630	1200	70	940	65	800	60	
1000	1700	73	1400	68	1100	63	
1600	2600	76	2200	71	1700	66	6
2500	3800	81	3200	76	2500	71	

Τα προτεινόμενα ζεύγη τιμών πρέπει να ανταποκρίνονται στους εξής συνδυασμούς :

*A-A', B-B', C-B', A-C', C-C'*

### 1.3 Ψύξη μετασχηματιστών διανομής

Αν και οι μετασχηματιστές είναι από τις ηλεκτρικές μηχανές, που έχουν τους καλύτερους βαθμούς απόδοσης, κατά τη λειτουργία τους θερμαίνονται όπως κάθε άλλη ηλεκτρική μηχανή από τη θερμότητα, που παράγεται από τις μαγνητικές και ηλεκτρικές απώλειες. Κατά την κατασκευή των μετασχηματιστών λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα, ώστε να διευκολύνεται η μετάδοση της θερμότητας των απωλειών στον περιβάλλοντα χώρο. Δηλαδή, λαμβάνονται μέτρα για την ψύξη των μετασχηματιστών, ώστε η θερμοκρασία τους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους να μην ανεβαίνει σε όρια επικίνδυνα για τις μονώσεις. Τα όρια αυτά έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια χάρη στη χρησιμοποίηση νέων μονωτικών υλικών.

Σύμφωνα με τα πρότυπα ANSI και IEEE, προκειμένου οι μετασχηματιστές διανομής να έχουν φυσιολογική λειτουργία και κατ' επέκταση φυσιολογική διάρκεια ζωής, πρέπει να έχουν μέση ανύψωση θερμοκρασίας στα τυλίγματα τέτοια, ώστε να μην ξεπερνάει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά περισσότερο από 65 °C. Ως εκ τούτου, η θερμότητα, που παράγεται στους μετασχηματιστές λόγω των απωλειών, πρέπει να απάγεται με κάποια μέθοδο ψύξης για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων. Ανάλογα με τη μέθοδο ψύξης, που χρησιμοποιείται, οι μετασχηματιστές διακρίνονται, σε ελαίου, (οι οποίοι είναι και πιο αποδοτικοί), σε ξηρού τύπου και σε μετασχηματιστές τύπου GIS.

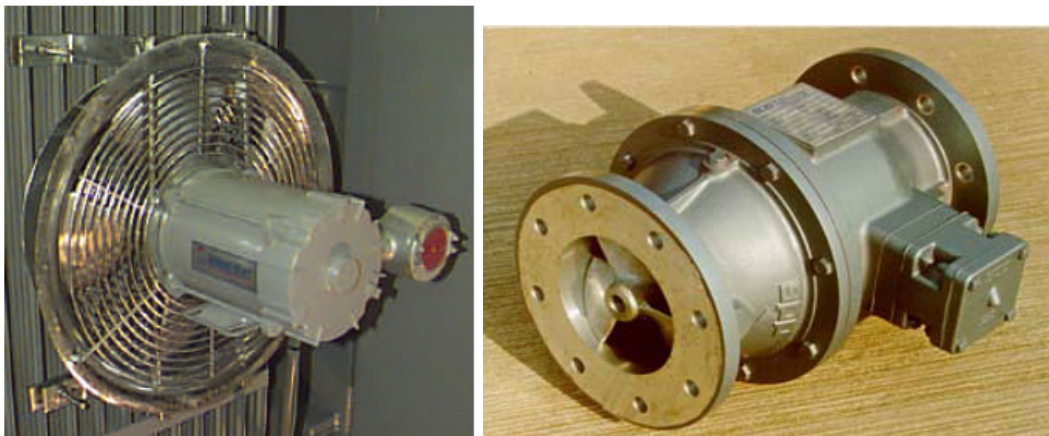
### 1.3.1 Τύπου ελαίου

Στους μετασχηματιστές *τύπου ελαίου* χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι για την ηλεκτρική μόνωση των τυλιγμάτων, (προστασία από βραχυκύκλωμα), και για την απαγωγή της θερμότητας, που αναπτύσσεται. Επιπρόσθετα στα πηνία του μετασχηματιστή τοποθετείται μονωτικό χαρτί με πάχος, το οποίο μπορεί να είναι από μικρότερο του χιλιοστού έως μερικά εκατοστά. Ο συνδυασμός λαδιού και χαρτιού έχει το πλεονέκτημα της ίδιας περίπου διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

#### Αντλίες λαδιού και ανεμιστήρες

Οι μετασχηματιστές διαθέτουν ανεμιστήρες και εναλλάκτες για τη βελτίωση της ψύξης τους. Τα ψυγεία χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της αναπτυσσόμενης θερμότητας από το λάδι προς το εξωτερικό περιβάλλον. Οι ανεμιστήρες τοποθετούνται πάνω στα ψυγεία ώστε να αυξήσουν το ποσό θερμότητας, που αποβάλλεται. Η ενεργοποίηση των ανεμιστήρων μπορεί να γίνεται κατά στάδια, με ενεργοποίηση μίας ή δύο βαθμίδων ανάλογα με τις ανάγκες ψύξης. Οι ανεμιστήρες και τα ψυγεία είναι συνήθως αποσπώμενα, επιτρέποντας έτσι την ευκολότερη επισκευή τους.

Οι αντλίες λαδιού χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία εξαναγκασμένης ροής λαδιού από το εσωτερικό της δεξαμενής προς τα ψυγεία (ή τους εναλλάκτες). Ενεργοποιούνται από το θερμομέτρο τυλιγμάτων μέσω των κατάλληλων επαφών. Οι αντλίες εφοδιάζονται με ροόμετρο ώστε να ελέγχεται αφενός μεν εάν λειτουργούν αφετέρου δε η φορά ροής του λαδιού. Η ορθή φορά περιστροφής της πτερωτής αναγράφεται με ένα βέλος πάνω στην αντλία.

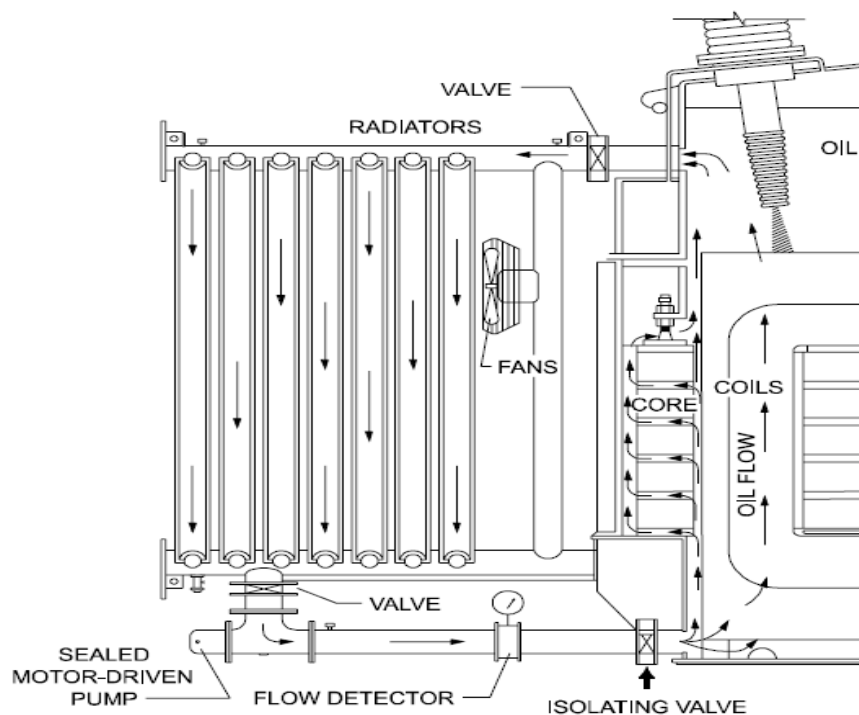


Σχήμα 1.27 Ανεμιστήρας ( αριστερά) και αντλία λαδιού ( δεξιά ).

Οι ελαιόψυκτοι μετασχηματιστές είναι οι πιο συνηθισμένοι και αποτελούν το 80% του συνολικού πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής στη βιομηχανία και 99% του

συνολικού πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής των εταιριών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Στο παρακάτω σχήμα 1.28 βλέπουμε τη σχηματική αναπαράσταση της ροής του λαδιού στο εσωτερικό ενός ελαιόψυκτου μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.28 Τυπική ροή λαδιού.

Οι μετασχηματιστές λαδιού είναι εμβαπτισμένοι σε λάδι, το οποίο ψύχει τα τυλίγματα και συγχρόνως λειτουργεί ως ηλεκτρική μόνωση. Οι κυριότερες πηγές θερμότητας είναι ο πυρήνας και τα τυλίγματα. Υπάρχουν βέβαια και εσωτερικά μεταλλικά μέρη, που θερμαίνονται εξίσου. Προκειμένου να γίνεται σωστή απαγωγή της θερμότητας του μετασχηματιστή πρέπει να υπάρχουν αγωγοί και περάσματα για το ψυκτικό μέσο, τα οποία να βρίσκονται πλησίον στις πηγές θερμότητας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ροή και η επαρκής κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, ώστε να απάγεται η παραγόμενη θερμότητα.

Κατά την κυκλοφορία του λαδιού, η θερμότητα μεταφέρεται στο δοχείο του λαδιού του μετασχηματιστή και τελικά απάγεται στο περιβάλλον. Επίσης έχουν επικρατήσει και ειδικές διατάξεις απαγωγής θερμότητας, οι οποίες τοποθετούνται στην επιφάνεια των μετασχηματιστών και μπορεί να είναι είτε σωλήνες, που ρέει το λάδι, είτε εξέχουσες μεταλλικές λωρίδες, οι οποίες οπτικά θυμίζουν σώμα καλοριφέρ, (σχήμα 1.29). Με αυτές τις τεχνικές αποφεύγεται ουσιαστικά η ανάγκη για περισσότερο μονωτικό λάδι και συνεπώς δεν είναι υποχρεωτική η αύξηση του μεγέθους του δοχείου του λαδιού.



Σχήμα 1.29 Εξωτερική όψη μετασχηματιστή ελαίου.

Επίσης, υπάρχει περίπτωση αν κριθεί απαραίτητο να έχουμε και εξωτερική ψύξη των μετασχηματιστών λαδιού με βεβαιωμένη κυκλοφορία αέρα με τη χρήση κάποιου ανεμιστήρα.

Όσον αφορά στην εσωτερική ψύξη του μετασχηματιστή ελαίου έχουμε τις εξής δύο κατηγορίες :

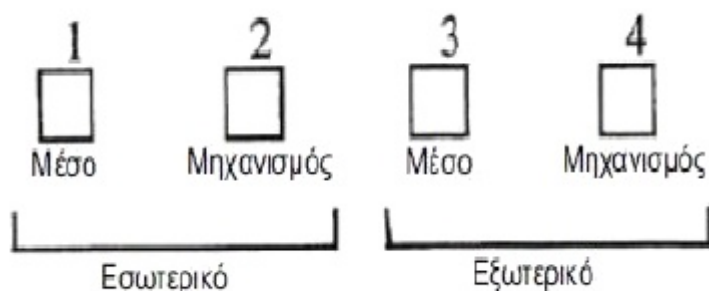
- Λαδιού με φυσική κυκλοφορία του λαδιού.

Στους μετασχηματιστές λαδιού, το λάδι, που βρίσκεται σε επαφή με τον πυρήνα και τα τυλίγματα του μετασχηματιστή, θερμαίνεται από τη θερμότητα των απωλειών, γίνεται αραιότερο και ανεβαίνει. Το λάδι, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τα τοιχώματα του λέβητα και που έχει μεταδώσει σε αυτά μέρος της θερμότητάς του, έχει μεγαλύτερη πυκνότητα, κατεβαίνει και παίρνει τη θέση του θερμού λαδιού. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα ρεύμα λαδιού, το οποίο παίρνει τη θερμότητα των απωλειών από το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή και τη μεταφέρει στα τοιχώματα του λέβητα, όπου από εκεί μεταφέρεται στον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα (κυκλοφορία θερμοσίφωνα) .

- Λαδιού με εξαναγκασμένη κυκλοφορία του λαδιού.

Σε αυτή τη μέθοδο ψύξεως, που εφαρμόζεται σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος, το λάδι οδηγείται με τη βοήθεια αντλίας και σωληνώσεων από το επάνω μέρος του μετασχηματιστή σε ιδιαίτερο ψυγείο, που βρίσκεται έξω από αυτόν. Στο ψυγείο το λάδι ψύχεται είτε με τον ατμοσφαιρικό αέρα με τη βοήθεια ανεμιστήρων, είτε με ψυχρό νερό, που κυκλοφορεί εξωτερικά των ψυγείων. Αφού το λάδι αποκτήσει την κατάλληλη θερμοκρασία επανέρχεται στο κάτω μέρος του μετασχηματιστή.

Οι μετασχηματιστές ελαίου κατατάσσονται σε κλάσεις ανάλογα με τη μέθοδο ψύξεώς τους. Η κάθε κλάση χαρακτηρίζεται από τέσσερα γράμματα και περιγράφεται στα πρότυπα IEC 60076-2 (1993) και ANSI/IEEE C57.12.00.



Πρώτο γράμμα: είδος εσωτερικού ψυκτικού μέσου, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με τα τυλίγματα.

O : ορυκτέλαιο ή συνθετικό μονωτικό υγρό με σημείο ανάφλεξης  $\leq 300^{\circ}\text{C}$ .

K : μονωτικό υγρό με σημείο ανάφλεξης  $\geq 300^{\circ}\text{C}$  .

L : μονωτικό υγρό με μη μετρήσιμο σημείο ανάφλεξης.

Δεύτερο γράμμα: Μηχανισμός κυκλοφορίας του εσωτερικού ψυκτικού μέσου.

N : φυσική ροή μετάδοσης θερμότητας διαμέσου των τυλιγμάτων και του ψυκτικού εξοπλισμού, χωρίς τη χρήση αντλιών λαδιού ( ροή θερμοσίφωνα ).

F : εξαναγκασμένη κυκλοφορία διαμέσου του ψυκτικού εξοπλισμού (αντλίες λαδιού), με φυσική ροή στα τυλίγματα ( όχι κατευθυνόμενη ).

D : εξαναγκασμένη κυκλοφορία διαμέσου του ψυκτικού εξοπλισμού (αντλίες λαδιού), με κατευθυνόμενη ροή, (τουλάχιστον στα κυρίως τυλίγματα).

Τρίτο γράμμα: είδος εξωτερικού ψυκτικού μέσου.

A : αέρας .

W : νερό.

Τέταρτο γράμμα: Μηχανισμός κυκλοφορίας του εξωτερικού ψυκτικού μέσου.

N : φυσική ροή μετάδοσης θερμότητας.

F : εξαναγκασμένη κυκλοφορία διαμέσου του ψυκτικού εξοπλισμού (αντλίες λαδιού, ανεμιστήρες) .

Ο παραπάνω τρόπος συμβολισμού επικρατεί στις Ευρωπαϊκές χώρες. Στην Αμερική γίνεται χρήση των ίδιων γραμμάτων, αλλά παρατίθενται διαδοχικά, με καθέτους και όχι συνεχόμενα [1.6].

Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι ψύξης των μετασχηματιστών ελαίου είναι:

➤ *Μετασχηματιστές λαδιού με φυσική κυκλοφορία λαδιού και αέρα (ONAN)*, στους οποίους η φυσική κυκλοφορία του λαδιού στο λέβητα, απομακρύνει μέρος της αναπτυσσόμενης θερμότητας (ροή θερμοσίφωνα) από τα πηνία του μετασχηματιστή προς τα τοιχώματα του λέβητα και από εκεί στον εξωτερικό αέρα. Αυτό το είδος είναι και το πιο διαδεδομένο, αφού χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές ισχύος μέχρι 3000kVA.

➤ *Μετασχηματιστές λαδιού με φυσική κυκλοφορία λαδιού και βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα (ONAF)*. Στους μετασχηματιστές ελαίου μεγάλης ισχύος η ψύξη του λαδιού



➤ *Μετασχηματιστές λαδιού με βεβιασμένη κυκλοφορία λαδιού και αέρα (OFAF)*, στους οποίους η κίνηση του λαδιού ψύξης γίνεται μέσω αντλιών και σωληνώσεων προς το ψυγείο, όπου το λάδι ψύχεται και κυκλοφορεί προς τα τοιχώματα του πυρήνα. Χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος πάνω από 10 MVA. Σε μετασχηματιστές ίδιας τάξης μεγέθους ισχύος χρησιμοποιείται επίσης και η ψύξη με νερό (OFWF), κατά την οποία το θερμό λάδι τίθεται σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία μέσω ψυγείου νερού, το οποίο τοποθετείται εκτός του κιβωτίου λαδιού.

Πολλοί από τους μετασχηματιστές ισχύος διαθέτουν μία βαθμίδα ψύξης με φυσική ροή λαδιού-αέρα και μία ή δύο επιπρόσθετες βαθμίδες εξαναγκασμένης ψύξης. Κάθε μία από τις πρόσθετες βαθμίδες μπορεί να περιλαμβάνει αντλίες λαδιού ή ανεμιστήρες ή και τα δύο ταυτόχρονα.

Οι χαρακτηρισμοί, που έχουν οριστεί από το ANSI/IEEE, έχουν σταδιακά εξελιχθεί ώστε να είναι συμβατοί με αυτούς από το IEC. Η πλειοψηφία από τους εγκατεστημένους μετασχηματιστές αναγράφουν την αρχική ονοματολογία στην πινακίδα τους.

### **1.3.1.1 Μονωτικό χαρτί**

Το μονωτικό χαρτί αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη, η οποία έχει διηλεκτρική αντοχή σημαντικά μεγαλύτερη της μονάδας και άρα το καθιστά πολύ καλό μονωτικό μέσο. Επίσης σημαντικός παράγοντας, που κατέστησε το χαρτί τόσο διαδεδομένο στη χρήση του, είναι το φθινό κόστος του, αφού η πρώτη ύλη για την παρασκευή του είναι το ξύλο. Η κυτταρίνη αποτελεί σημαντικό συστατικό του ξύλου. Το ξύλο όμως περιέχει επίσης λιγνίτη και ημιγλυκόζη. Με την επεξεργασία Kraft απομακρύνονται κατά το μέγιστο δυνατό τόσο ο λιγνίτης όσο και η ημιγλυκόζη και το τελικό προϊόν είναι χαρτί, που αποτελείται σε ποσοστό περίπου 90% από κυτταρίνη, 6-7% λιγνίτη, 3-4% ημιγλυκόζη και ίχνη μεταλλικών κατιόντων. Το χαρτί, που έχει υποστεί επεξεργασία Kraft, έχει μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, η οποία αποδίδεται στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα ινών κυτταρίνης.

Για την επιβράδυνση της γήρανσης του χαρτιού έχει αναπτυχθεί το θερμικά αναβαθμισμένο χαρτί (thermal upgraded paper), το οποίο περιέχει ουσίες, που εξαλείφουν την υγρασία, αντιδρώντας χημικά με αυτήν, και οργανικές βάσεις, οι οποίες εν μέρει εξουδετερώνουν τα οξέα. Το χαρτί αυτό έχει διάρκεια ζωής τριπλάσια του χαρτιού Kraft, παράγει όμως μεγαλύτερες ποσότητες οξέων από αυτό.

### **1.3.1.2 Μονωτικά λάδια**

#### **1.3.1.2.1 Λειτουργίες του μονωτικού λαδιού**

##### **A) Ηλεκτρική μόνωση**

Το λάδι παρεμβάλλεται ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία του μετασχηματιστή, που έχουν διαφορετικά δυναμικά, εμποδίζει την ηλεκτρική υπερπήδηση και ενισχύει τις μονωτικές ιδιότητες, που έχουν οι μονώσεις των τυλιγμάτων, εμποδίζοντας έτσι την εισχώρηση υγρασίας. Όπως είναι γνωστό, οι μονώσεις των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών έχουν ως βάση την κυτταρίνη, (χαρτί, χαρτόνι), και έτσι έχουν την τάση να απορροφούν υγρασία όταν έρθουν σε επαφή με αυτήν, με αποτέλεσμα τη μείωση των μονωτικών χαρακτηριστικών τους. Το μονωτικό λάδι επίσης λειτουργεί ως προστατευτικό κάλυμμα των μεταλλικών επιφανειών του μετασχηματιστή. Επίσης, παρεμποδίζει τη δημιουργία μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα και αερίων στις μονώσεις των τυλιγμάτων. Τέλος, το μονωτικό λάδι χρησιμεύει για την απομάκρυνση των μικρών, αλλά σημαντικών σε πλήθος ιχνών ξένων σωμάτων και υγρασίας, που είναι δυνατό να βρίσκονται μέσα σε κάθε καινούργιο μετασχηματιστή.

##### **B)Θερμική μόνωση**

Οι απώλειες, οι οποίες εμφανίζονται στους μετασχηματιστές υπό μορφή θερμότητας, θερμαίνουν τόσο τα τυλίγματα όσο και τον πυρήνα και πρέπει να απαχθούν εκτός του μετασχηματιστή στον περιβάλλοντα χώρο. Το μονωτικό λάδι λειτουργεί ως μέσο για την απαγωγή της θερμότητας στους μετασχηματιστές. Για το καλύτερο αποτέλεσμα στην απαγωγή, το λάδι πρέπει να έχει χαμηλό ιξώδες και μεγάλη θερμοχωρητικότητα.

#### **1.3.1.2.2 Ορυκτά και συνθετικά λάδια**

Τα μονωτικά λάδια διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες :

- α- Τα ορυκτά μονωτικά λάδια, που προέρχονται από επεξεργασία του αργού πετρελαίου.
- β- Τα συνθετικά μονωτικά λάδια, που είναι συνήθως χλωριωμένα παράγωγα του διφαινύλιου και πολυφαινύλιου και είναι γνωστά με τις εμπορικές ονομασίες Clophene, Ascarel, Pyranol, Aroclor, Dielectrol κ.α.

Τα συνθετικά λάδια υπερτερούν έναντι των ορυκτών ως προς το ότι αναφλέγονται δύσκολα, όταν αναφλεγούν καίγονται με αργούς ρυθμούς, έχουν υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά και παρουσιάζουν καλές ψυκτικές ιδιότητες, λόγω της σημαντικής μεταβολής του ιξώδους τους με την αύξηση της θερμοκρασίας και παράλληλης αύξησης της ειδικής τους θερμότητας. Όμως, παρουσιάζουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα, που περιορίζουν έτσι την χρήση τους, όπως ότι είναι ισχυρά τοξικά και ότι μερικά από αυτά είναι ισχυρά διαλυτικά και είναι πιθανό να διαλύσουν και να προκαλέσουν φθορές σε άλλα μονωτικά υλικά, όπως βερνίκια και πλαστικά.

### 1.3.1.2.3 Χαρακτηριστικά λαδιών

Οι προδιαγραφές για τα μονωτικά λάδια διαφέρουν ανάλογα με τη συγκεκριμένη κάθε φορά χρήση τους. Τα λάδια των μετασχηματιστών πρέπει να έχουν καλά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, (π.χ. μεγάλη διηλεκτρική σταθερά, μεγάλη διηλεκτρική αντοχή), αλλά και καλές ψυκτικές ιδιότητες, (καλή θερμοαγωγιμότητα, μικρό ιξώδες για ευκολότερη κυκλοφορία μέσα στο σύστημα ψύξης).

Διακρίνουμε γενικά δύο κατηγορίες χαρακτηριστικών των μονωτικών λαδιών :

- Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά . Τέτοια χαρακτηριστικά είναι το χρώμα, η πυκνότητα, η πτητικότητα, το ιξώδες, το σημείο ανάφλεξης, η θερμική αγωγιμότητα, η περιεκτικότητα σε υγρασία, η οξύτητα, η χημική σταθερότητα, η χημική δραστηριότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής κ.α.
- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά , όπως ο συντελεστής απωλειών (tgδ), η ειδική αγωγιμότητα (σ), η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ), η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ε<sub>r</sub>), η διηλεκτρική επιδεκτικότητα, η διηλεκτρική αντοχή (E<sub>d</sub>) κ.α.

### 1.3.1.2.4 Ιξώδες

Το ιξώδες είναι ένα μέγεθος, που χαρακτηρίζει τη ρευστότητα των υγρών ή τη λεγόμενη «εσωτερική τριβή». Διακρίνουμε, το *δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες (η)*, του οποίου οι μονάδες είναι το poise (p) ή συνήθως το cp (1cp=0.01p) και το *κινηματικό ιξώδες (ν)* με μονάδα το stoke (st) το cst (1cst=0.01<sup>st</sup>), όπου 1st=1cm<sup>2</sup>/sec.

Το δυναμικό και κινηματικό ιξώδες συνδέονται με τη σχέση:

$$\nu = \eta / d \quad (54)$$

όπου  $d$  η πυκνότητα του υγρού σε  $\text{g/cm}^3$ .

Μεγάλες τιμές ιξώδους χαρακτηρίζουν τα παχύρευστα υγρά ενώ μικρές τα λεπτόρευστα. Το ιξώδες μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και συγκεκριμένα μειώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Για την ποσοτική εκτίμηση της αλλαγής του κινηματικού ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται ο δείκτης ιξώδους VI (Viscosity Index), ο οποίος, σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM D-2270, δίδεται από τη σχέση:

$$VI = \frac{L-U}{L-H} 100 \quad \text{εάν } VI < 100 \quad (55)$$

όπου U: το ιξώδες ορυκτελαίου στους  $40^\circ\text{C}$ .

L: το ιξώδες ορυκτελαίου στους  $40^\circ\text{C}$  αν  $VI=0$ .

H: το ιξώδες ορυκτελαίου στους  $40^\circ\text{C}$  αν  $VI=100$ .

Ένας μεγάλος δείκτης ιξώδους υποδηλώνει μια σχετικά μικρή μεταβολή του κινηματικού ιξώδους με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην κατασκευή της κλίμακας του VI χρησιμοποιήθηκαν ορυκτέλαια του Μεξικανικού κόλπου, που παρουσιάζουν μεγάλη μεταβολή του ιξώδους με τη θερμοκρασία και για τα οποία δόθηκε τιμή  $VI=0$ , όπως και ορυκτέλαια Πενσυλβάνιας, τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα του ιξώδους και στα οποία δόθηκε η τιμή  $VI=100$ . Οι δύο αυτές κατηγορίες περιέκλειαν όλα τα αρχικά ορυκτέλαια. Σήμερα η πλειοψηφία των λιπαντικών ελαίων έχουν  $VI > 100$ , ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις όπου  $VI < 0$ .

Για τον προσδιορισμό του δείκτη ιξώδους (VI) ενός οποιουδήποτε ορυκτελαίου προσδιορίζεται το κινηματικό ιξώδες στους  $100^\circ\text{C}$  (Y) και στους  $40^\circ\text{C}$  (U) διαδοχικά, ενώ από πίνακες προσδιορίζονται τα L και H. Με τα στοιχεία αυτά και με την παραπάνω σχέση υπολογίζεται ο δείκτης ιξώδους. Η σχέση αυτή ισχύει μόνο όταν  $VI < 100$ , δηλαδή  $U > H$ . Αν  $VI > 100$ , δηλαδή  $U < H$ , τότε χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του VI:

$$VI = \frac{100 + (10^N - 1)}{0.00715} \quad \text{όπου } N = \frac{(\log H - \log U)}{\log Y} \quad \text{εάν } VI > 100 \quad (56)$$

Η μεταβολή του κινηματικού ιξώδους με τη θερμοκρασία δίνεται από τη σχέση:

$$\log[\log(v + 0.7)] = A + B \log T \quad (57)$$

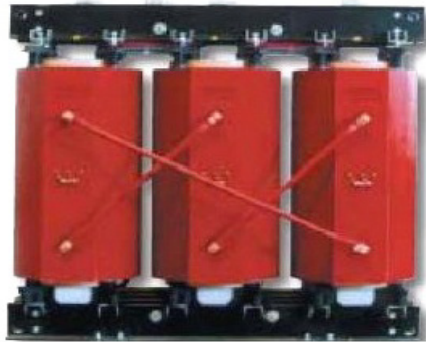
όπου v: κινηματικό ιξώδες (st)

T: απόλυτη θερμοκρασία (K).

A, B : σταθερές χαρακτηριστικές κάθε λαδιού.

### 1.3.2 Ξηρού τύπου

Οι μετασχηματιστές *ξηρού τύπου* χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, στις οποίες η χρήση των μετασχηματιστών λαδιού θεωρείται επισφαλής λόγω κινδύνου πυρκαγιάς ή όταν υπάρχουν απαιτήσεις για αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος. Συναντώνται για παράδειγμα σε χαρτοβιομηχανίες, αποθήκες καυσίμων, και εργοστάσια τροφίμων. Στους μετασχηματιστές αυτούς το ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας, ενώ χρησιμοποιούνται επιπλέον για ηλεκτρική μόνωση, εποξειδική ρητίνη ή χαρτιά, διαποτισμένα με κατάλληλες ουσίες.



Σχήμα 1.30 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου.

Ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου είναι ο μετασχηματιστής ρητίνης, τα τυλίγματα του οποίου εμποτίζονται με μια εποξειδική ρητίνη υπό κενό. Η ρητίνη αυτή δεν είναι τοξική. Είναι διηλεκτρικό υλικό και αποτελεί πηγή υψηλού ηλεκτρικού δυναμικού. Επίσης, στο μετασχηματιστή αναπτύσσονται χωρητικά φορτία. Για τους λόγους αυτούς, είναι αναγκαίο να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας, που προδιαγράφονται από τα διεθνή πρότυπα, ως αποστάσεις από ενεργά και εκτεθειμένα τμήματα. Όταν προκύψει βραχυκύκλωμα η θερμοκρασία δεν μεταδίδεται μακριά από το σφάλμα. Εκτός από την εποξική ρητίνη, χρησιμοποιούνται και άλλα στερεά μονωτικά, (π.χ. μίκα), για τη μόνωση των τυλιγμάτων, τα οποία είναι συνήθως κλάσης H ή F. Η κλάση ενός μονωτικού υλικού προσδιορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία, στην οποία είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κλάσεις, σύμφωνα με το πρότυπο της IEEE.

Κλάση μόνωσης	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)
O	90
A	105
B	130
F	155
H	180
C	220

Το κόστος ενός τέτοιου μετασχηματιστή ξηρού τύπου είναι σχεδόν διπλάσιο από το κόστος ενός συμβατικού με πλήρωση λαδιού. Αλλά και το κόστος συντήρησης των μετασχηματιστών αυτών είναι αρκετά υψηλό. Επίσης, λόγω του ότι ψύχονται με τον αέρα, παρουσιάζουν το μειονέκτημα του μεγάλου όγκου και γι αυτό χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρά μεγέθη και μάλιστα για μικρές τάσεις.

Αν ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου είναι εγκατεστημένος σε κλειστό χώρο, η θερμότητα, που αποδίδει στο περιβάλλον, πρέπει να απάγεται είτε με φυσική κυκλοφορία αέρα είτε, όταν αυτή δεν επαρκεί, με βεβαιωμένη κίνηση αέρα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ανεμιστήρας, ο οποίος τοποθετείται στο υψηλότερο σημείο του χώρου.

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου δεν έχουν δοχείο και διάφορα άλλα εξαρτήματα. Η τήρηση αρκετού ελεύθερου χώρου γύρω από το μετασχηματιστή συνιστάται για να εξασφαλιστεί ότι ο περιβάλλον αέρας ανανεώνεται τακτικά. Η ψύξη των ξηρών μετασχηματιστών γίνεται απ' ευθείας από τον αέρα, που τους περιβάλλει, και ανάλογα με τις ανάγκες. Με βάση την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία, έχουμε τις εξής δύο κατηγορίες μετασχηματιστών ξηρού τύπου:

➤ Ξηρούς με φυσική ψύξη.

Στους μετασχηματιστές αυτούς η εξωτερική επιφάνεια του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, με την οποία έρχονται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος, είναι αρκετή για την εξασφάλιση ικανοποιητικής ψύξεως. Ο τρόπος αυτός είναι ο πιο οικονομικός, δεν μπορεί όμως να εφαρμοστεί παρά μόνο σε μετασχηματιστές μικρής ισχύος μέχρι 25kVA.

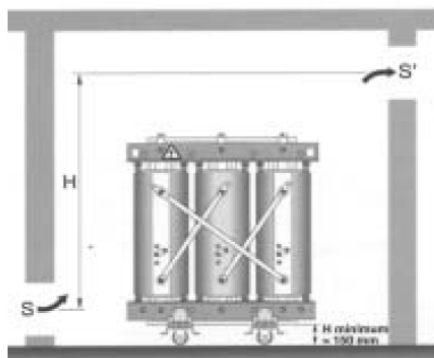
➤ Ξηρούς με εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα ψύξεως.

Στους μετασχηματιστές αυτής της κατηγορίας ένας ανεμιστήρας επιταχύνει τη μετάδοση της θερμότητας των απωλειών από το μετασχηματιστή στον περιβάλλοντα χώρο. Ο μετασχηματιστής έχει κανάλια για την κυκλοφορία του αέρα στον πυρήνα και στα τυλίγματα και είναι κλεισμένος μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Στους μετασχηματιστές αυτούς πρέπει να παίρνουμε μέτρα προστασίας, δηλαδή να σταματά η λειτουργία του μετασχηματιστή αν για οποιοδήποτε λόγο σταματήσει να λειτουργεί ο ανεμιστήρας, που κυκλοφορεί τον αέρα ψύξης.

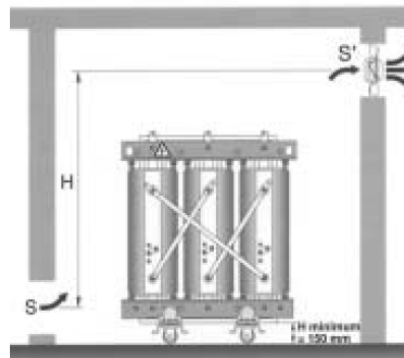
Για την αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας πρέπει να εξασφαλίζεται η επαρκής και σωστή ροή του αέρα. Τόσο η λανθασμένη κατεύθυνση όσο και η ανεπαρκής ποσότητα της

ροής αέρα ψύξης μπορούν να προκαλέσουν υπερθέρμανση ακόμα και σε μετασχηματιστές, που λειτουργούν υπό μερικό φορτίο και να οδηγήσουν σε πρόωρη γήρανση των μονωτικών υλικών.

Τα σημεία εισόδου του αέρα πρέπει να βρίσκονται στο κάτω μέρος του χώρου στέγασης του μετασχηματιστή και τα σημεία εξόδου στο πάνω μέρος αυτού. Η κυκλοφορία του αέρα στο χώρο στέγασης μπορεί να γίνεται με φυσική κυκλοφορία ή με εξαναγκασμένη κυκλοφορία.



Σχήμα 1.31 Φυσική κυκλοφορία του αέρα.



Σχήμα 1.32 Εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα.

Η επιφάνεια εισόδου του αέρα συμβολίζεται  $S$  ( $m^2$ ) και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$S = \frac{0.18P}{\sqrt{H}} \quad (58)$$

όπου:  $P$ : Το άθροισμα των συνολικών απωλειών (κενού και φορτίου) σε kW στους  $120^\circ C$ .

$H$ : Η απόσταση μεταξύ του μετασχηματιστή και του σημείου εξόδου του αέρα (m).

Επίσης, η επιφάνεια εξόδου του αέρα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S' = 1.1 \times S \quad (59)$$

Όταν έχουμε εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα πρέπει να ισχύει η σχέση :

$$Ροή\ αέρα(m^3 / sec) = 0.1P \quad (60)$$

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου, ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους, χωρίζονται στις εξής κλάσεις, σύμφωνα με τις προδιαγραφές από το ANSI/IEEE :

- **Κλάση AA** : Μετασχηματιστές αεριζόμενοι και αυτοψυχόμενοι. Δηλαδή υπάρχουν θύρες εξαερισμού στα εξωτερικά τοιχώματα του περιβλήματος του μετασχηματιστή. Δεν υπάρχουν ανεμιστήρες για να δημιουργήσουν εξαναγκασμένη ροή του αέρα από τις θύρες εξαερισμού ούτε πτυχές στο εξωτερικό του μετασχηματιστή. Από τις χαμηλότερες θύρες μπαίνει ο ψυχρός αέρας, ο οποίος θερμαίνεται καθώς περνάει από τα τυλίγματα του μετασχηματιστή και τέλος εξέρχεται από την πάνω θύρα του μετασχηματιστή.

- Κλάση AFA : Μετασχηματιστές αυτοψυχόμενοι, οι οποίοι επιπρόσθετα ψύχονται με βεβιασμένη κυκλοφορία του αέρα. Αυτό σημαίνει, ότι διαθέτουν θύρες εξαερισμού ανεμιστήρα στην είσοδο ή ανεμιστήρα στην έξοδο. Συνήθως δεν υπάρχουν και επιπρόσθετες θύρες για φυσική κυκλοφορία του αέρα.
- Κλάση AA/FA : Μετασχηματιστές αεριζόμενοι και αυτοψυχόμενοι, οι οποίοι επιπρόσθετα διαθέτουν έναν ή περισσότερους ανεμιστήρες, που προκαλούν τη βεβιασμένη κίνηση του αέρα.
- Κλάση ANV : Μετασχηματιστές αυτοψυχόμενοι (A) , μη-αεριζόμενοι (NV). Το περίβλημα δεν έχει καθόλου θύρες εξαερισμού ή ανεμιστήρες, αλλά ούτε και είναι σφραγισμένο για να κρατάει μακριά από τον Μ/Σ τον εξωτερικό αέρα. Δηλαδή, δεν διαθέτει τις απαραίτητες διατάξεις, που θα εξυπηρετούσαν τη σκόπιμη είσοδο του εξωτερικού αέρα. Η ψύξη γίνεται με τη φυσική κυκλοφορία του αέρα γύρω από το εξωτερικό του περιβλήματος του μετασχηματιστή. Ο τύπος αυτός μετασχηματιστή μπορεί να διαθέτει ορισμένες πτυχές στο εξωτερικό του περίβλημα, ώστε να αυξάνεται η ψυχόμενη επιφάνεια.
- Κλάση GA : Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι σφραγισμένοι και στο εσωτερικό τους περιέχουν αέριο (G) και είναι αυτοψυχόμενοι (A). Το περίβλημα είναι ερμητικά κλειστό για την αποφυγή διαρροών του αερίου, το οποίο είναι συνήθως άζωτο ή φρέον. Η ψύξη τους επιτυγχάνεται με τη φυσική κυκλοφορία του αέρα στο εξωτερικό του περιβλήματος του μετασχηματιστή. Δεν διαθέτουν ανεμιστήρες, ενώ μπορεί να διαθέτουν εξωτερικές πτυχές για την αύξηση της ψυχόμενης επιφάνειας.

### 1.3.3 Τύπου GIS

Οι μετασχηματιστές τύπου GIS ( Gas Insulation System), χρησιμοποιούν ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο κάποιο αέριο σε υψηλή πίεση σε στεγανοποιημένο περιβάλλον. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο (  $SF_6$  ), το οποίο είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό.

Η διηλεκτρική αντοχή του  $SF_6$  στην ατμοσφαιρική πίεση είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Υπό τις ίδιες συνθήκες είναι μισή από αυτή των ελαίων, αλλά σε υψηλότερη πίεση υπερέρχει αυτής. Το  $SF_6$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μόνωση μετασχηματιστών ισχύος μέχρι αρκετές εκατοντάδες MVA.

Το πλεονέκτημα των παραπάνω μετασχηματιστών είναι ότι είναι άφλεκτοι, εύκολοι στην εγκατάσταση και τοποθέτησή τους, ενώ καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι το  $SF_6$  θεωρείται μη οικολογικό, διότι συμβάλλει στη δημιουργία της τρύπας του όζοντος.





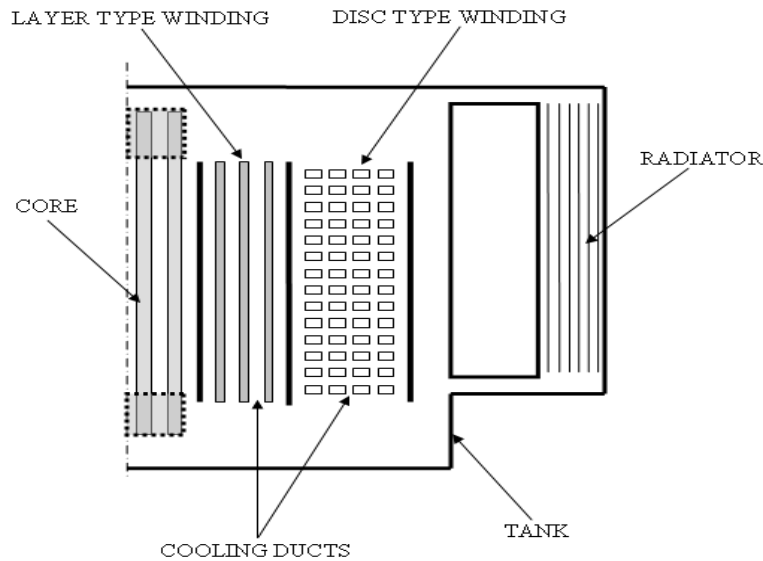
Σχήμα 1.33 Μετασχηματιστής τύπου GIS.

## 1.4 Θερμική μελέτη μετασχηματιστών

Στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών δύο είναι τα κυρίαρχα προβλήματα, το πρόβλημα της τάσεως και το πρόβλημα της ψύξεως. Και τα δύο πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά βέλτιστο τρόπο για να προκύψουν οικονομικές λύσεις.

Οι ενεργειακές απώλειες ενός μετασχηματιστή εμφανίζονται ως θερμότητα στον πυρήνα και στα τυλίγματα. Αυτή η θερμότητα πρέπει να απάγεται χωρίς να επιτρέψει να αναπτυχθεί στα τυλίγματα θερμοκρασία, η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει έντονη επιδείνωση της μόνωσης του μετασχηματιστή.

Κατά τη χρήση ενός μετασχηματιστή είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στα διάφορα τμήματά του. Μπορούμε έτσι να προσδιορίσουμε το ύψος της υπερφόρτισης και το μήκος του χρονικού διαστήματος, που η υπερφόρτιση αυτή εφαρμόστηκε πάνω στο μετασχηματιστή, όπως, επίσης, και το πόση «ζωή» του μετασχηματιστή έχει ή πρόκειται να απωλεσθεί από τη λειτουργία του σε διάφορες θερμοκρασίες. Ο σχεδιαστής πρέπει να είναι σε θέση να προβλέψει τη θερμοκρασία σε κάθε τμήμα του μετασχηματιστή, προκειμένου: 1<sup>ov</sup>.) Να προσδιορίσει: α.) την ποσότητα του χαλκού, που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των τυλιγμάτων, των leads του μετασχηματιστή και των δακτυλίων εξόδου, β.) τον τύπο των ψυκτικών δομών και τις δομές μόνωσης, που είναι απαραίτητες για την αποφυγή εκτεταμένων θερμών σημείων και γ.) τον τύπο και τις διατάξεις εσωτερικής και εξωτερικής ψύξης και 2<sup>ov</sup>.) Να σχεδιάσει και να ρυθμίσει τον εξοπλισμό ελέγχου. Ο προσδιορισμός και υπολογισμός της θερμοκρασίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε όλα τα στάδια της ζωής του μετασχηματιστή. Παρακάτω, στο σχήμα 1.34, παρατίθεται η τομή ενός μετασχηματιστή λαδιού.



Σχήμα 1.34 Τομή μετασχηματιστή λαδιού.

### 1.4.1 Θερμική μελέτη των τυλιγμάτων

Γνωρίζουμε, ότι τα τυλιγμάτα του μετασχηματιστή αποτελούν πηγές θερμότητας, η οποία πρέπει να απάγεται, για να μη συσσωρεύεται και αυξηθεί η θερμοκρασία τους.

Η μέγιστη μέση επιτρεπόμενη θερμοκρασία των τυλιγμάτων, η οποία δημιουργείται από τις απώλειες, δίδεται στις απαιτήσεις, που προδιαγράφονται στην τυποποίηση (IEC 76/93, HD 428/1992) και είναι 105 °C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40 °C. Έτσι, η μέγιστη υπερύψωση της θερμοκρασίας του χαλκού πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι 65 K. Η θερμοκρασία όμως αυτή είναι υπερυψωμένη και σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία του λαδιού. Η διαφορά αυτή ονομάζεται μέσο άλμα θερμοκρασίας  $\Theta_{wo}$ , ενώ  $\Theta_{womax}$  είναι το μέγιστο άλμα θερμοκρασίας στο εσωτερικό του τυλιγματος ή τμήματος αυτού, που είναι η θερμοκρασία του θερμότερου σημείου (hot - spot) προς τη μέση υπερύψωση θερμοκρασίας του λαδιού. Το μέσο άλμα θερμοκρασίας ελέγχεται έμμεσα, μέσω της μέτρησης δια της μεθόδου των αντιστάσεων, το δε μέγιστο άλμα θερμοκρασίας προσδιορίζεται μόνο υπολογιστικά. Το άλμα θερμοκρασίας προκύπτει από το γινόμενο της επιφανειακής θερμικής φόρτισης επί τη συνισταμένη θερμική αντίσταση. Θερμική επιφανειακή φόρτιση ή πυκνότητα ροής θερμότητας ονομάζεται η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του τυλιγματος. Εκφράζεται με το λόγο της παραγόμενης θερμικής ροής  $W$  σε Watt και επιφάνειας σε  $m^2$ .

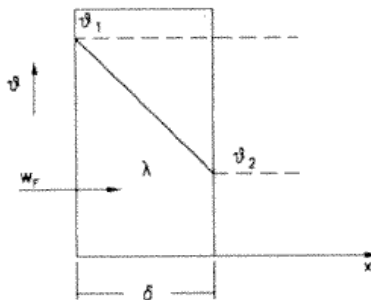
$$w_F = \frac{dW}{dF} \quad (61)$$

Αν η ροή  $W$  έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία της επιφάνειας  $F$ , τότε για  $w_F$  ισχύει:

$$w_F = \frac{W}{F} \quad (62)$$

Γνωρίζουμε, ότι μεταξύ δύο γειτονικών σημείων διαφορετικών θερμοκρασιών η θερμική ενέργεια ρέει πάντοτε από το σημείο υψηλότερης προς το σημείο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Όταν τα σημεία ενός σώματος έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες, η ροή μπορεί να εκφραστεί από την πυκνότητα ροής θερμότητας  $w_F$ , η οποία δεν προσδιορίζεται μόνο από το μέγεθος, αλλά και από τη διεύθυνσή της. Γενικά σε μόνιμη κατάσταση, δηλαδή σε κατάσταση ανεξάρτητη από το χρόνο, η συνάρτηση  $w = f(x,y,z)$  προσδιορίζει ένα διανυσματικό πεδίο. Η σχέση μεταξύ αυτού του πεδίου και του διανυσματικού πεδίου της θερμοκρασίας είναι:  $w = -\lambda \cdot grad\theta$ , όπου  $\lambda$  μια σταθερά, η οποία προσδιορίζει τη θερμοαγωγιμότητα του υλικού και ονομάζεται συντελεστής θερμοαγωγιμότητας.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση σε επίπεδη πλάκα πάχους  $\delta$  και συντελεστή θερμοαγωγιμότητας  $\lambda$  έχουμε σε μονοδιάστατο πεδίο για σταθερή πυκνότητα ροής, τις παρακάτω σχέσεις:



Σχήμα 1.35 Πτώση θερμοκρασίας σε πλάκα πάχους  $\delta$ .

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = -\frac{w_F}{\lambda} = const. \quad (63)$$

δηλαδή  $\theta = \theta(x)$  μια ευθεία,

$$\text{οπότε } \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\delta} = -\frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta} \quad (64)$$

όπου η διαφορά θερμοκρασιών  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$  αποτελεί την πτώση της θερμοκρασίας και είναι:

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = \frac{\delta}{\lambda} \cdot w_F \quad (65)$$

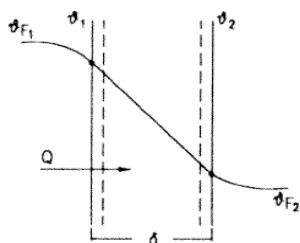
και αν θέσουμε  $\frac{\delta}{\lambda} = R$  τότε η πτώση της θερμοκρασίας γίνεται  $\Delta\theta = R \cdot w_F$  (66), όπου  $R$  η θερμική αντίσταση, η οποία δίνεται σε  $[m^2 \cdot K/W]$ .

Η παραπάνω σχέση (66) χαρακτηρίζεται ως ο **"Νόμος του Ohm της θερμοαγωγιμότητας"**.

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασιακής κατανομής ενός σώματος με εσωτερικές πηγές περιγράφεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση διαχύσεως, η λύση της οποίας απαιτεί οριακές συνθήκες, αλλά δεν είναι πάντα εφικτή.

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + q = 0 \quad (67)$$

Έστω τώρα ότι έχουμε τοίχωμα πάχους  $\delta$  και συντελεστή θερμοαγωγιμότητας  $\lambda$ . Στις επίπεδες οριακές επιφάνειες του τοιχώματος με θερμοκρασίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  εφαρμόζεται ο νόμος του Ohm της θερμοαγωγιμότητας, όπου η ροή θερμότητας στις οριακές επιφάνειες είναι ίση με τη ροή θερμότητας στο τοίχωμα.



Σχήμα 1.36 Αγωγή και συναλλαγή θερμότητας σε ένα τοίχωμα.

$$Q = \alpha_1 \cdot F \cdot (\theta_{f_1} - \theta_1) = \lambda \cdot \frac{F}{\delta} \cdot (\theta_1 - \theta_2) = \alpha_2 \cdot F \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (68)$$

όπου  $\alpha$  ο συντελεστής συναγωγιμότητας θερμότητας, ο οποίος προκύπτει εμπειρικά και εξαρτάται από το είδος της ψύξης, φυσικής ή βεβιασμένης.

Εάν λύσουμε τις τρεις αυτές σχέσεις ως προς την εκάστοτε θερμοκρασιακή διαφορά και τις προσθέσουμε προκύπτει η σχέση:

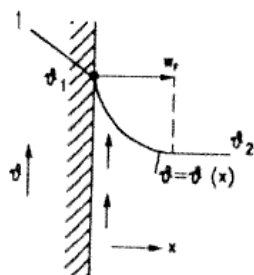
$$Q = \frac{F \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot F \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (69)$$

$$\text{όπου } \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

και  **$k$  ο συντελεστής θερμικής διαπερατότητας.**

Όταν ένα σώμα έρχεται σε επαφή μέσω της επιφάνειάς του με ένα αέριο ή ένα υγρό, το οποίο παρουσιάζει μια διαφορά θερμοκρασίας έναντι της επιφάνειας του σώματος,

παρουσιάζεται ανταλλαγή θερμότητας, η οποία ονομάζεται **συναλλαγή θερμότητας δια συναγωγής**.



Σχήμα 1.37 Θερμοκρασιακό πεδίο ρευστού σε επαφή με θερμό στερεό σώμα.

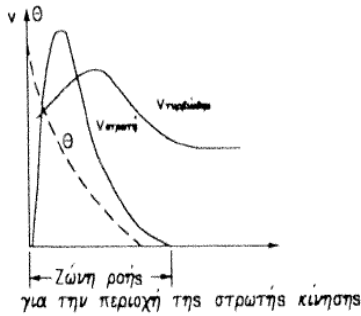
Στο ανωτέρω σχήμα 1.37,  $\theta_1$  είναι η θερμοκρασία του θερμού τοιχώματος και  $\theta_2$  η θερμοκρασία του ρευστού, η οποία μετράται στην κάθετη ευθεία στο σημείο 1 και μάλιστα σε τέτοια απόσταση από το σημείο αυτό, που δεν παρουσιάζεται καμία επίδραση του θερμού τοιχώματος. Εμφανίζεται εν προκειμένω μία ροή θερμότητας από το τοίχωμα στο ρευστό, η οποία περιγράφεται με την πυκνότητα ροής  $w_F$ , η οποία είναι κάθετη στο τοίχωμα.

Μεταξύ της θερμής επιφάνειας και του ψυχρού ρευστού εμφανίζεται η διαφορά θερμοκρασίας  $\Theta = \theta_1 - \theta_2$ . Η πυκνότητα ροής θερμότητας δίδεται τότε από τη σχέση:

$$w_F = a \cdot (\theta_1 - \theta_2) = a \cdot \Theta \quad (70)$$

όπου  $a$  ο συντελεστής συναγωγιμότητας θερμότητας, ο οποίος προκύπτει εμπειρικά και εξαρτάται από το είδος της ψύξης, φυσικής ή βεβιασμένης.

Η **φυσική ή ελεύθερη συναγωγή θερμότητας** έχει μεγάλη σημασία για τη συναλλαγή θερμότητας σε μία επιφάνεια σώματος, η οποία συνορεύει με ένα ρευστό, αέριο ή υγρό μέσο. Είναι απαραίτητο να υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στις επιφάνειες του σώματος και του ρευστού για να παρουσιαστεί το φαινόμενο της συναγωγής. Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά προκαλεί ανταλλαγή της θερμοκρασίας μεταξύ των δύο μερών, η οποία επεκτείνεται σε μία λεπτή στρώση του ρευστού κατά μήκος της επιφάνειας του σώματος. Αυτή η στρώση θερμαίνεται ή ψύχεται ανάλογα με τη διεύθυνση της ροής της θερμότητας, οπότε και αυξάνεται ή μειώνεται η πυκνότητα του ρευστού, το οποίο ρέει κατά μήκος της επιφάνειας του σώματος προς τα πάνω ή προς τα κάτω, αντίστοιχα. Επειδή, η ροή συνεχώς οδηγεί νέα μόρια ρευστού μέσου στην επιφάνεια του σώματος, η ζώνη της στρωτής κίνησης της ροής, στη μόνιμη κατάσταση, για τον αέρα είναι μόλις 12 έως 15 mm και για το μονωτικό λάδι περίπου 3mm.



Σχήμα 1.38 Κατανομή της υπερύψωσης της θερμοκρασίας και της ταχύτητας.

Μέσα στη ζώνη ροής η ταχύτητα στην επιφάνεια του σώματος είναι μηδέν, διότι λόγω τριβής το ρευστό συγκρατείται. Η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι κάποιο εσωτερικό σημείο της ζώνης ροής και μετά αποσβέννυται αργά μέχρι το όριο της ζώνης (σχήμα 1.38).

Η αποδιδόμενη ή αναλαμβανόμενη ποσότητα θερμότητας  $W_k[W]$  από μια επιφάνεια  $F[m^2]$  με φυσική συναγωγή δίδεται από τη σχέση:

$$W_k = \alpha_k \cdot \Theta \cdot F \quad (71)$$

όπου  $\alpha_k [W/m^2 \cdot K]$  ο συντελεστής συναγωγιμότητας και  $\Theta$  η υπερύψωση θερμοκρασίας του σώματος έναντι του ρευστού.

Ως θερμοκρασία αναφοράς για τον προσδιορισμό της υπερύψωσης θερμοκρασίας  $\Theta$  λαμβάνεται η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου εάν αυτό διατίθεται σε άπειρη ποσότητα. Εάν πρόκειται για ένα μέσο περιορισμένης ποσότητας, όπως το λάδι του μετασχηματιστή, τότε ως θερμοκρασία αναφοράς λαμβάνεται η μέση θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου έξω από τη ζώνη ροής θερμότητας.

Η μέση επιφανειακή φόρτιση  $w_F$  προσδιορίζεται ξεχωριστά για κάθε τμήμα ενός τυλίγματος, το οποίο περιορίζεται από διαύλους λαδιού. Ένα τέτοιο τμήμα τυλίγματος μπορεί να αποτελείται από πολλές ή άνισες στρώσεις αγωγών, από τις οποίες κάθε μεμονωμένη στρώση μπορεί να αποτελείται από έναν αγωγό ή από πολλούς ίσους επί μέρους αγωγούς. Η επιφανειακή φόρτιση  $w_F$  υπολογίζεται για κάθε στρώση.

Για την  $k$ -στη στρώση ισχύει:

$$w_{Fk} = \frac{I^2 \cdot R \cdot (l+z)}{2 \cdot h \cdot l} = \frac{J^2 \cdot q_{cu}^2 \cdot l}{2 \cdot \kappa \cdot q_{cu} \cdot h \cdot l} = \frac{J^2 \cdot q_{cu} \cdot (l+z)}{2 \cdot \kappa \cdot h} \cdot 10^{-3} [W/mm^2] \quad (72)$$

Για περισσότερες άνισες στρώσεις αγωγών:

$$w_F = \sum_k w_{Fk} \quad (73)$$

Ενώ όταν έχουμε  $k$  ίσες στρώσεις αγωγών:

$$w_F = k \cdot w_{Fk} \quad (74)$$

όπου:

$z$  : το ποσοστό της αύξησης των απωλειών λόγω δινορευμάτων.

$h$  [mm] : το ύψος αξονικά του μονωμένου αγωγού.

$J$  [A/mm<sup>2</sup>] : η πυκνότητα ρεύματος.

$q_{cu}$  [mm<sup>2</sup>] : η διατομή του αγωγού. Σε συνεστραμμένο αγωγό, η διατομή του συνόλου των επί μέρους αγωγών.

$\kappa$  [S·m/mm<sup>2</sup>] : η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Για μονοκόμματα τυλίγματα ο **συντελεστής συναγωγιμότητας θερμότητας  $\alpha$  [W/mm<sup>2</sup>K]** λαμβάνει τις εξής τιμές, ανάλογα με τον τρόπο ψύξης:

Τρόπος ψύξης	ONAN	ONAF	OFAF	ODAN,ODAF
A [W/mm <sup>2</sup> K]	$1.1 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$

Για αερόψυκτους μετασχηματιστές  $\alpha = 0.1 \times 10^{-4}$  W/mm<sup>2</sup>K

Για μετασχηματιστές διανομής, οι τιμές του παραπάνω πίνακα πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή  $\lambda = 0.45 \times 10^{-3} \cdot h + 0.55$ , όπου  $h$  το ύψος του τυλίγματος.

Για μονοκόμματα τυλίγματα με επίπεδους αγωγούς, για το κάθε κυλινδρικό τμήμα τυλίγματος, που περιορίζεται από διαύλους λαδιού, γίνεται ξεχωριστά υπολογισμός της θερμικής αντίστασης.

Για το εσωτερικό του κυλινδρικού τμήματος του τυλίγματος ισχύει:

$$R_1 = \frac{1}{K_A} \cdot \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{z}{2 \cdot \lambda_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} \right) \quad (75)$$

Για μια εσωτερική στρώση :

$$R_2 = \frac{z_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} \quad (76)$$

Για το περίβλημα του κυλινδρικού τυλίγματος ισχύει η σχέση:

$$R_3 = \frac{1}{K_A} \cdot \left( \frac{1}{a} + \frac{z_1}{2 \cdot \lambda_1} + \frac{s_3}{\lambda_3} \right) \quad (77)$$

όπου

$K_A$  : συντελεστής επικάλυψης λαμβάνεται ίσος με 0,75.

$s_1$  : πάχος μονώσεως της εσωτερικής στρώσεως μαζί με το πάχος του μονωτικού κυλίνδρου όταν υπάρχει.

$s_2, s_3$  : πάχη μονώσεως των στρώσεων.

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  : συντελεστές θερμοαγωγιμότητας των μονώσεων των στρώσεων.

$z_1$  : πάχος μόνωσης αγωγού.

Το μέσο άλμα θερμοκρασίας  $\Theta_{TO}$  μεταξύ δύο διαύλων λαδιού σε κυλινδρικά τυλίγματα με πολλούς αγωγούς, τοποθετημένους ακτινικά ο ένας δίπλα στον άλλον, προσδιορίζεται ως εξής:

Όταν έχουμε κυλινδρικό τύλιγμα με έναν αγωγό με διαφορετικές θερμικές αντιστάσεις το άλμα θερμοκρασίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Theta_{TO} = w_F \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (78)$$

Ενώ όταν έχουμε κυλινδρικό τύλιγμα με δύο ίδιους αγωγούς, ακτινικά τοποθετημένους ο ένας δίπλα στον άλλον, με διαφορετικές θερμικές αντιστάσεις υπολογίζουμε χωριστά σε κάθε αγωγό το άλμα θερμοκρασίας, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Στον εσωτερικό αγωγό 1 :} \quad \Theta_{TO1} = w_F \frac{R_2 + 2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot R_1 \quad (79)$$

$$\text{Στον εξωτερικό αγωγό 2 :} \quad \Theta_{TO2} = w_F \frac{R_1 + 2 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot R_3 \quad (80)$$

Η συνισταμένη θερμοκρασία των δύο αγωγών θα είναι:

$$\Theta_{TO} = w_F \cdot \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_3 + (R_1 + R_2) \cdot R_2 / 2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (81)$$

Τέλος, όταν έχουμε κυλινδρικό τύλιγμα με  $n$  στρώσεις επίπεδων αγωγών, το άλμα θερμοκρασίας υπολογίζεται ως εξής:



$$\Theta_{TO} = w_F \cdot \left( R_1 + \frac{(n-1) \cdot (n-2)}{6 \cdot n} \cdot R_2 \right) \quad (82)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των στρώσεων του τυλίγματος.

Στην περίπτωση κυλινδρικού τυλίγματος με  $n$  στρώσεις στρογγυλών αγωγών το άλμα θερμοκρασίας υπολογίζεται όπως και ανωτέρω, με τη διαφορά ότι κατά τον υπολογισμό της θερμικής επιφανειακής φόρτισης αντί του ύψους  $h$  του αγωγού χρησιμοποιείται η διάμετρος του μονωμένου αγωγού. Αντί της μονώσεως  $z_1$  χρησιμοποιείται η σχέση  $1,84 \cdot z_1 + 0,04 \cdot d$ , όπου  $d$  η διάμετρος του γυμνού αγωγού.

### 1.4.2 Θερμική ροή στο εσωτερικό του μετασχηματιστή

Η ροή της θερμότητας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή είναι τόσο περίπλοκη, που ο ακριβής υπολογισμός της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στα διάφορα τμήματα του μετασχηματιστή δεν είναι πρακτικός. Όπως επίσης, μεγάλη δυσκολία παρουσιάζεται και αν θέλουμε να μετρήσουμε με ακρίβεια τις θερμοκρασίες αυτές κατά τη διάρκεια της φόρτισης του μετασχηματιστή. Παρ' όλα αυτά, η θερμοκρασία είναι πρωταρχικός παράγοντας για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή και ειδικότερα της μόνωσής του. Γι αυτό είναι απαραίτητο να γίνεται η μεγαλύτερη δυνατή προσπάθεια για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας και για την εύρεση οικονομικών τρόπων για τη διατήρησή της σε χαμηλά επίπεδα.

### Γενική μέθοδος υπολογισμού της θερμοκρασίας

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας στο θερμότερο σημείο του τυλίγματος πραγματοποιείται με την παρακάτω ακολουθία βημάτων.

- Υπολογισμός της πτώσης της θερμοκρασίας διαμέσου της μόνωσης στο χαλκό.
- Υπολογισμός της πτώσης της θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια του πηνίου και στο ψυκτικό μέσο.
- Υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας στο ψυκτικό μέσο.

### Ροή θερμότητας από το χαλκό διαμέσου της μόνωσης

Όλοι οι μετασχηματιστές είναι απαραίτητα εμβαπτισμένοι είτε σε νερό είτε σε αέριο και η θερμότητα ρέει από τα τυλίγματα και τον πυρήνα μέσα σε αυτά. Από τον πυρήνα μπορεί να ρέει κατευθείαν, αλλά από τα πηνία συνήθως ρέει διαμέσου μερικών συμπυκνωμένων στρωμάτων μόνωσης. Οι μεγαλύτεροι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι έτσι, ώστε τουλάχιστον η μία πλευρά κάθε αγωγού να είναι εκτεθειμένη στο ψυκτικό μέσο,

προκειμένου η θερμότητα να διέρχεται μόνο διαμέσου ενός λεπτού στρώματος μόνωσης. Αντίθετα, σε πολλούς μικρότερους μετασχηματιστές η θερμότητα πρέπει να διαδοθεί διαμέσου πολλών στρωμάτων μόνωσης μέχρι να φτάσει στο ψυκτικό μέσο.

Όταν η ροή της θερμότητας γίνεται διαμέσου μόνωσης, γνωστής πυκνότητας και διαστάσεων, ο υπολογισμός της πτώσης της θερμοκρασίας είναι απλός. Η πτώση της θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί από το βασικό θερμικό νόμο:

$$\text{Άλμα θερμοκρασίας } ^\circ\text{C} = P \times R_T \quad (83)$$

όπου  $P$  = η τιμή της ροής θερμότητας, (W).

$R_T$  = θερμική αντίσταση,  $^\circ\text{C}$  ανά Watt.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, παρατηρήσαμε αναλυτικά για διάφορους τύπους τυλιγμάτων τον τρόπο υπολογισμού της θερμικής αντίστασης. Ο γενικός τύπος υπολογισμού της θερμικής αντίστασης είναι ο εξής :

$$R_T = \frac{l}{KA} \quad (84)$$

όπου:

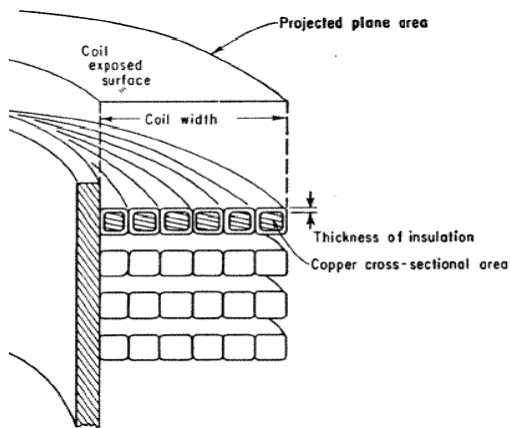
$K$  = θερμική αγωγιμότητα του υλικού,  $\text{W}/(\text{in.}^2) (^\circ\text{C})/(\text{in.})$

$l$  = μήκος του δρόμου, που διανύει η θερμότητα, in.

$A$  = η διατομή του δρόμου, που διανύει η θερμότητα,  $\text{in.}^2$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, για το τύλιγμα του παρακάτω σχήματος 1.39 το θερμοκρασιακό άλμα θα είναι ίσο με:

$$\text{Άλμα θερμοκρασίας } ^\circ\text{C} = \left( \frac{\text{Watts μέσα στον χαλκό}}{\text{θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης}} \right) \left( \frac{\text{πάχος της μόνωσης}}{\text{εκτεθειμένη επιφάνεια πηνίου}} \right)$$



Σχήμα 1.39 Ροή θερμότητας από τα τυλίγματα του μετασχηματιστή λαδιού.

Η εκτεθειμένη επιφάνεια του πηνίου είναι ίση με την αναμενόμενη επίπεδη επιφάνεια του πηνίου ( $2 \times$  μέση στροφή  $\times$  ακτινικό πλάτος), αν αφαιρέσουμε από αυτή οποιαδήποτε υποστηρικτικά διαχωριστικά τμήματα.

Οι δρόμοι, τους οποίους ακολουθεί η ροή της θερμότητας στο εσωτερικό ενός πολυστρωματικού πηνίου, είναι πολύ περίπλοκοι ώστε να μπορέσουν να αναλυθούν. Συνήθως, ακολουθούνται κάποιες απλουστευμένες μέθοδοι, όπως η υπόθεση ότι η θερμοκρασιακή διαφορά από το εσωτερικό έως το εξωτερικό του πηνίου υπολογίζεται από το σύνολο της θερμότητας, που ρέει διαμέσου του μισού πάχους του πηνίου. Με τις εν λόγω μεθόδους μπορούν να γίνουν προκαταρκτικοί υπολογισμοί, που θα ελεγχθούν στη συνέχεια με κάποιο μοντέλο ή δοκιμή. Αρκετές φορές, είναι πιο οικονομική η ανάπτυξη μοντέλων για την απόκτηση εμπειρικών δεδομένων, προκειμένου να προσδιοριστεί αν χρειάζεται να προστεθούν αγωγοί εξαερισμού στους μετασχηματιστές, σε σύγκριση με τη διεξαγωγή περίτεχνων υπολογισμών για το σκοπό αυτό.

#### 1.4.2.1 Ροή θερμότητας από τις επιφάνειες των πηνίων και του πυρήνα προς το ψυκτικό μέσο

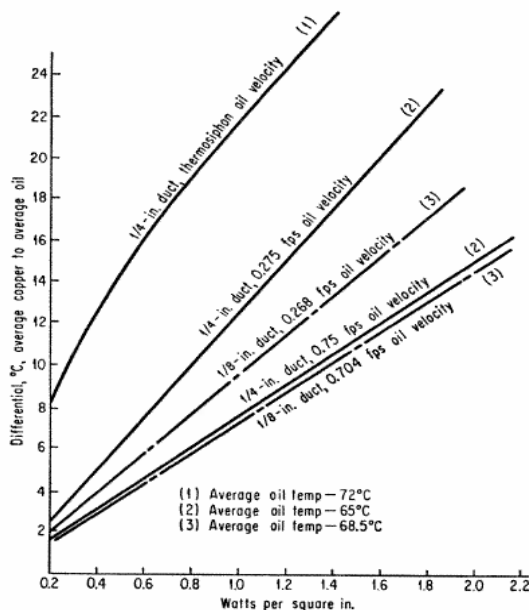
Όταν η θερμότητα φτάνει στην επιφάνεια του πηνίου ή του πυρήνα πρέπει να μεταφερθεί στο ψυκτικό μέσο. Αυτό το μέσο μπορεί να είναι αέριο ή υγρό, το οποίο μπορεί να κυκλοφορεί από βεβαιασμένη ροή ή με ροή θερμοσίφωνα, μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα. Οι υπολογισμοί για τη ροή της θερμότητας είναι διαφορετικοί για κάθε διαφορετικό τρόπο ψύξης, αλλά τους διέπουν οι ίδιες αρχές.

Η μεταφορά της θερμότητας από τα τυλίγματα σε υγρό γίνεται είτε με φυσική μεταγωγή (θερμοσίφωνα) είτε με βεβαιασμένη μεταγωγή (βεβαιασμένη ροή - με τη χρήση αντλιών).

### 1.4.2.1.1 Ροή θερμότητας από το πηνίο σε υγρό με φυσική μεταγωγή

Με τη χρήση εγχειριδίων μπορούμε να έχουμε τους τύπους για τον υπολογισμό της μεταγωγής της θερμότητας από λεία κάθετη ή οριζόντια επιφάνεια, αλλά τα πηνία των μετασχηματιστών πρέπει να κατασκευάζονται με ορισμένες ασυνέχειες, οι οποίες αποκλείουν τους τύπους αυτούς. Επίσης, οι σχεδιαστές των μετασχηματιστών πραγματοποιούν μετρήσεις της μεταφοράς της θερμότητας από μοντέλα πηνίων, αλλά τα αποτελέσματα, που προκύπτουν από πραγματικούς μετασχηματιστές, υποδηλώνουν ότι η μεταφορά της θερμότητας δεν είναι τόσο ακριβής στους πραγματικούς μετασχηματιστές όπως είναι σε μία δομή μοντελοποιημένων πηνίων, ώστε να μπορούμε να έχουμε αξιόπιστα δεδομένα. Αυτό ίσως να οφείλεται, στο ότι η πραγματική διάταξη των διαχωριστικών τμημάτων και εμποδίων γύρω από το πηνίο μεταβάλλουν δραστικά τα χαρακτηριστικά της μεταφοράς της θερμότητας, όπως επίσης και στο ότι το λάδι δεν είναι εντελώς ελεύθερο να κινηθεί και γι αυτό αναπτύσσει ελαφρώς υψηλότερες θερμοκρασίες σε ορισμένες περιοχές. Ορισμένες κατασκευές κάνουν πολύ δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό των περιοχών αυτών.

Επομένως, φαίνεται μάταιο το να σκιαγραφήσουμε οποιαδήποτε θεωρία μεταγωγής. Οι καμπύλες, που παρατίθενται στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 1.40), μας δίνουν ορισμένα χρήσιμα αποτελέσματα. Σύμφωνα με το σχήμα, η μεταγωγή είναι στην ουσία ανεξάρτητη του μεγέθους των αγωγών του πηνίου όταν βρισκόμαστε μέσα στα συνήθη όρια 1/2 έως 1/8 in. Παρ' όλα αυτά, το μέγεθος του αγωγού επηρεάζει την κυκλοφορία του λαδιού, όπως θα δούμε στη συνέχεια.



Σχήμα 1.40 Μεταγωγή θερμότητας από τα

τυλίγματα μετασχηματιστή λαδιού – Ροή θερμοσίφωνα και εξαναγκασμένη κίνηση του λαδιού.

#### **1.4.2.1.2 Ροή θερμότητας από το πηνίο σε υγρό με βεβιασμένη μεταγωγή**

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε πως όταν τα Watts ανά in.<sup>2</sup> (ταχύτητα λαδιού με ροή θερμοσίφωνα) ξεπερνάει τα 0,9, το θερμοκρασιακό άλμα της επιφάνειας ξεπερνά τους 20°C και γίνεται ένα πραγματικά σημαντικό εμπόδιο για τη ροή της θερμότητας, διότι καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό της συνήθους επιτρεπτότητας των 55 °C. Αυτό το θερμοκρασιακό άλμα στην επιφάνεια μπορεί να μειωθεί με τη χρήση αντλιών, ώστε να επιτευχθεί εξαναγκασμένη ροή λαδιού πάνω στις επιφάνειες των πηνίων με υψηλότερες ταχύτητες, (συνήθως από 0,3 έως 1 fps πόδια ανά δευτερόλεπτο). Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το αποτέλεσμα, που έχει η υψηλότερη ταχύτητα του λαδιού, όταν ρέει γύρω από τα πηνία με κλιμακωτά ορθογωνικά διαχωριστικά τμήματα στην επιφάνειά τους. Η ταχύτητα του λαδιού, που φαίνεται στις καμπύλες, είναι η μέση τιμή κατά μήκος του αγωγού, αλλά μεταβάλλεται σε ένα εύρος 2:1 καθώς περνά από τα διαχωριστικά τμήματα.

#### **1.4.2.1.3 Επίδραση του ιξώδους του λαδιού**

Όταν το μονωτικό λάδι θερμαίνεται, το ιξώδες του μειώνεται. Ρέει με μεγαλύτερη ευκολία και γενικότερα η μεταφορά της θερμότητας αυξάνεται. Το θερμοκρασιακό άλμα ανάμεσα στην επιφάνεια του πηνίου και στο λάδι και μεταξύ του λαδιού και της επιφάνειας του δοχείου μειώνεται. Και καθώς το λάδι ρέει με μεγαλύτερη ευκολία, η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην κορυφή και στον πυθμένα του δοχείου γίνεται μικρότερη.

#### **1.4.2.2 Μεταφορά θερμότητας από το υγρό στον αέρα στους μετασχηματιστές λαδιού**

Η θερμότητα από το λάδι στους μετασχηματιστές λαδιού πρέπει να μεταφερθεί στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα. Σε μικρούς μετασχηματιστές η επιφάνεια του δοχείου είναι συνήθως επαρκής για τη διάχυση της θερμότητας, ειδικά αν αυξήσουμε την επιφάνειά του, κάνοντάς τη μεγαλύτερη από ό,τι είναι απαραίτητο για να περικλείει το μετασχηματιστή. Σε μεσαίου μεγέθους μετασχηματιστές η εκτεθειμένη στον αέρα επιφάνεια μπορεί να αυξηθεί με τη συγκόλληση πάνω στο δοχείο πτερυγίων εκπομπής θερμότητας. Σε μεγαλύτερους μετασχηματιστές, στους οποίους ακόμα μεγαλύτερη επιφάνεια είναι απαραίτητη, προστίθενται ψυκτικοί σωλήνες. Πολύ μεγάλοι μετασχηματιστές έχουν αποσπώμενους εκπομείς θερμότητας, οι οποίοι μπορούν να αφαιρούνται κατά τη μεταφορά. Επίσης, σε περιπτώσεις,

που η ανάγκη για απαγωγή της θερμότητας είναι μεγάλη, τοποθετούνται ανεμιστήρες πάνω ή κοντά στους εκπομπείς θερμότητας και επιταχύνουν την ψύξη.

Η αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού θα είναι μικρότερη όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια εκπομπής της θερμότητας, αλλά ούτε η αύξηση της top-oil θερμοκρασίας ούτε η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του λαδιού καθορίζονται αποκλειστικά από την ποσότητα της θερμότητας και το μέγεθος της εκπέμπουσας επιφάνειας. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του δοχείου μεταβάλλεται από την κορυφή ως τον πυθμένα, ανάλογα με το πού εντοπίζονται τα στοιχεία, που εκπέμπουν θερμότητα, δηλαδή ο πυρήνας και τα τυλίγματα μέσα στο δοχείο. Αν ο πυρήνας και τα τυλίγματα βρίσκονται στον πυθμένα του δοχείου, τότε το δοχείο στο σύνολό του θα είναι πιο ζεστό και περισσότερη θερμότητα θα διαχέεται για δεδομένη μέγιστη θερμοκρασιακή αύξηση, σε σχέση με το να ήταν ο πυρήνας και τα πηνία τοποθετημένα κοντά στην κορυφή του λαδιού.

#### **1.4.2.2.1 Η ροή του λαδιού και η σημαντική επίδρασή της στη θερμοκρασία**

Οι διάφοροι τύποι ψύξης εξαρτώνται από την κίνηση ή τη ροή του υγρού από την επιφάνεια του πηνίου και προς τα πάνω και προς τα έξω με κατεύθυνση προς το δοχείο, δηλαδή προς την ψυχόμενη επιφάνεια. Το λάδι σε αυτοψυχόμενους μετασχηματιστές ανέρχεται, επειδή θερμαίνεται από τα τυλίγματα και βυθίζεται ξανά όταν ψύχεται από το τείχος του δοχείου ή από την ψυχόμενη επιφάνεια. Αυτό ονομάζεται και ροή θερμοσίφωνα και η ανάλυσή της είναι πολύ δύσκολη. Οι θερμοκρασίες του λαδιού σε διάφορα σημεία είναι σίγουρα ένας σημαντικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της ροής. Όμως και η ροή του λαδιού με τη σειρά της επιδρά σημαντικά στη θερμοκρασία στα διάφορα σημεία του μετασχηματιστή. Είναι επιθυμητή η καλή ροή του λαδιού, ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση πολύ ζεστού λαδιού στην κορυφή και πολύ κρύου λαδιού στον πυθμένα του δοχείου. Εμπειρικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό της ροής του θερμοσίφωνα του λαδιού δείχνουν να είναι οι πιο πρακτικές, διότι αποφεύγουν την πολύ περίπλοκη μαθηματική μελέτη της ροής του λαδιού και δίνουν λογικά και ακριβή αποτελέσματα.

#### 1.4.2.2.2 Σχέση, που συνδέει τη ροή θερμότητας, τη ροή λαδιού και τη θερμοκρασία

Παρόλο που συχνά δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη της ροής του λαδιού με μεγάλη ακρίβεια, (εκτός από όταν το λάδι αντλείται διαμέσου του ψυγείου και του μετασχηματιστή) , συχνά είναι χρήσιμο το να μπορούμε να κάνουμε μία εκτίμηση της ροής του λαδιού από μετρήσεις της θερμοκρασίας, λαμβάνοντας ως δεδομένο εισόδου τη θερμότητα.

Για παράδειγμα, η αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού καθώς κινείται προς τα πάνω κατά μήκος των πηνίων μπορεί να προσδιοριστεί από τη μέτρηση της θερμοκρασίας του υγρού στην κορυφή και στον πυθμένα. Από τη στιγμή, που είναι γνωστές οι απώλειες (W) στα πηνία, η συνολική ροή του λαδιού από τον πυθμένα προς της κορυφή μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση σε γαλόνια ανά λεπτό. Με τη σχέση αυτή συνδέονται η θερμότητα (σε kW), η αύξηση της θερμοκρασίας (T, σε °C ) και η ροή του λαδιού του μετασχηματιστή (σε gpm).

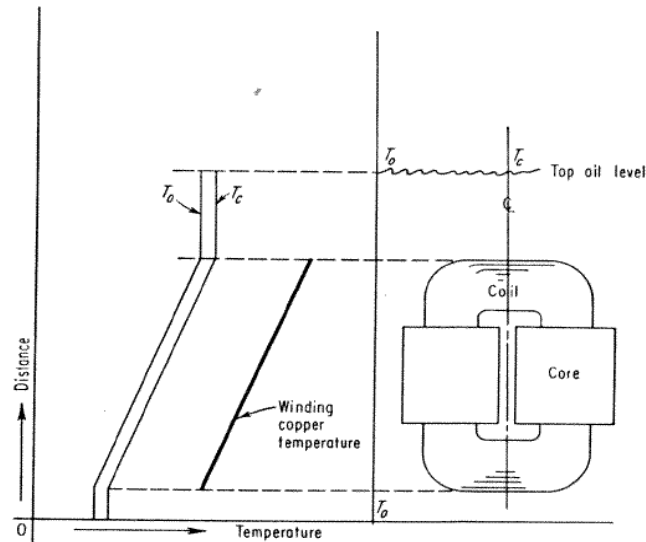
$$T = \frac{kw}{gpm} \quad (85)$$

Αυτή η λύση δεν δείχνει πού ρέει το λάδι, αλλά υποδεικνύει πόση ποσότητα λαδιού πρέπει να ρέει.

Το λάδι ρέει σε ένα πολύ λεπτό στρώμα πάνω στις επιφάνειες των πηνίων και η μεγαλύτερη μάζα του λαδιού στους αγωγούς ψύξης είναι πρακτικά στάσιμη στους μετασχηματιστές, που η ψύξη τους γίνεται με τη ροή θερμοσίφωνα.

#### 1.4.2.2.3 Ροή θερμοσίφωνα, διάγραμμα και εμπειρικά μέσα για τον προσδιορισμό της ροής του υγρού και της διανομής της θερμοκρασίας

Οι θερμοκρασίες σε διάφορα επίπεδα του ψυκτικού υγρού μπορούν να απεικονιστούν σε μία καμπύλη, όπως αυτή του σχήματος 1.41 .



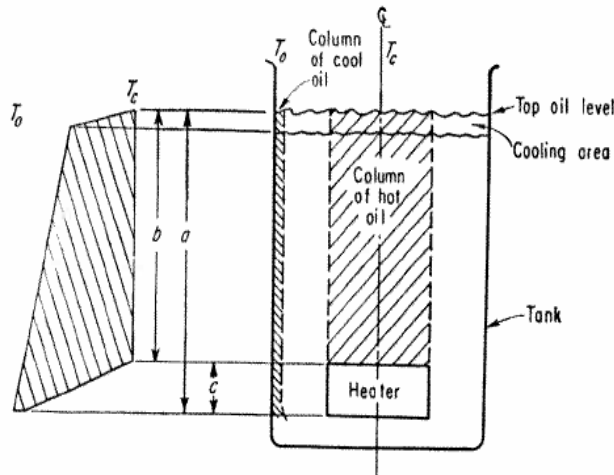
Σχήμα 1.41 Διάγραμμα της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του ψυκτικού υγρού του μετασχηματιστή.

Το στρώμα λαδιού, που εφάπτεται της επιφάνειας του δοχείου, έχει θερμοκρασία ( $T_o$ ) και το στρώμα, που βρίσκεται στο κέντρο του δοχείου ( $T_c$ ). Οι θερμοκρασίες αυτές είναι σχεδόν ίσες. Πρέπει όμως να υπάρχει μία μικρή θερμοκρασιακή διαφορά, η οποία θα προκαλεί την κίνηση του λαδιού προς τα πάνω διαμέσου των πηνίων και προς τα κάτω κατά μήκος του τείχους του δοχείου. Το βάρος της στήλης του λαδιού στο κέντρο πρέπει να είναι μικρότερο από το βάρος της στήλης του λαδιού στο τείχος του δοχείου, προκειμένου να έχουμε άνοδο του λαδιού στο κέντρο και πτώση του λαδιού στο τείχος. Η διαφορά βάρους μπορεί να προκληθεί μόνο από διαφορά στη θερμοκρασία.

Οι διαφορές στη θερμοκρασία, οι οποίες έχουν υπολογιστεί πειραματικά, είναι τόσο μικρές, που η ακριβής μέτρησή τους είναι δύσκολη. Επομένως, οι δυνάμεις πίσω από τη ροή θερμοσίφωνα είναι πολύ μικρές. Παρά την αδυναμία ακριβούς μέτρησης, υπάρχουν κάποια εμφανή γεγονότα, τα οποία επιτρέπουν μερική ανάλυση:

- Οι δυνάμεις πρέπει να οφείλονται σε διαφοροποίηση του ιξώδους του λαδιού, η οποία διαφοροποίηση οφείλεται με τη σειρά της στη θερμοκρασιακή διαφορά.
- Η στήλη του ζεστού λαδιού ξεκινάει από το κάτω μέρος του πηνίου και εκτείνεται ως την κορυφή του λαδιού. Το λάδι θερμαίνεται στο μέγιστο ενώ ανέρχεται διαμέσου του πηνίου, αλλά και παραμένει στη μέγιστη αυτή θερμοκρασία όσο βρίσκεται στην κορυφή του δοχείου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.42.
- Η στήλη του ψυχρότερου λαδιού ξεκινά από την κορυφή της ψυχόμενης επιφάνειας και εκτείνεται ως τον πυθμένα.

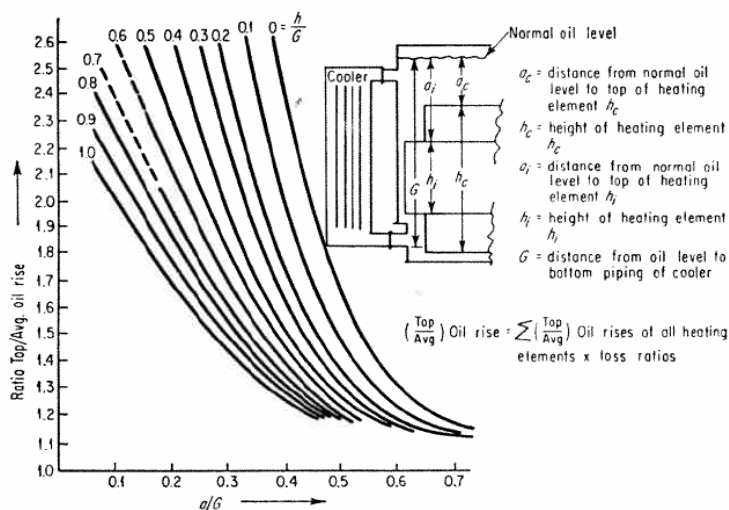




Σχήμα 1.42 Θερμοκρασιακό διάγραμμα – Θέρμανση στον πυθμένα, ψύξη στην κορυφή.

Αυτά τα ζητήματα οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι η στήλη ζεστού λαδιού θα έχει το μικρότερο δυνατό βάρος αν η περιοχή, που θερμαίνεται, εντοπίζεται στο κατώτατο σημείο του δοχείου, έτσι ώστε η στήλη του ζεστού λαδιού να εκτείνεται προς τα πάνω από το κατώτατο σημείο ως την κορυφή. Παρομοίως, η στήλη του κρύου λαδιού θα έχει το μεγαλύτερο δυνατό βάρος αν η ψυχόμενη περιοχή μπορεί να εντοπίζεται στην κορυφή του λαδιού, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.42 .

Είναι εμφανές, ότι η μέγιστη κυκλοφορία του λαδιού θα σημειωθεί αν η θέρμανσή του συγκεντρωθεί στον πυθμένα και η ψύξη του στην κορυφή του. Επομένως, καταλήγουμε στο σημαντικό συμπέρασμα, ότι η κυκλοφορία του λαδιού θα είναι συνάρτηση των διαστάσεων  $a, b$  και  $c$  , που φαίνονται στο σχήμα 1.42 , τα οποία είναι μεγέθη ουσιαστικά ανάλογα των μεγεθών  $G, a$  και  $h$  , που απεικονίζονται στο σχήμα 1.43 . Αυτό μας οδηγεί στη διαπίστωση, ότι οι τιμές των διαστάσεων αυτών είναι πρωταρχικός παράγοντας, ο οποίος καθορίζει την κυκλοφορία του λαδιού.



Σχήμα 1.43 Καμπύλες αναλογίας διαστάσεων απεικόνισης της μέγιστης/μέσης αύξησης της θερμοκρασίας .

Το πρωτογενές αποτέλεσμα της αυξημένης ταχύτητας της κυκλοφορίας του λαδιού είναι ότι η θερμοκρασία του λαδιού κορυφής και του λαδιού πυθμένα πλησιάζουν πιο πολύ μεταξύ τους. Αν ο πρωτογενής παράγοντας, που προκαλεί την κυκλοφορία του λαδιού, μπορεί να εκφραστεί από τις τιμές των διαστάσεων, όπως οι  $G$ ,  $a$  και  $h$  στο παραπάνω σχήμα 1.43, και εφόσον η άνοδος της θερμοκρασίας του λαδιού κορυφής και η μέση θερμοκρασία του λαδιού συνδέονται άμεσα με την ταχύτητα του λαδιού, πρέπει να υπάρχει κάποιος συσχετισμός ανάμεσα στις τιμές αυτές. Ο εν λόγω συσχετισμός εκφράζεται με καμπύλες στο πιο πάνω σχήμα.

#### 1.4.2.2.4 Ροή λαδιού από ξεχωριστές αντλίες

Προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην επιφάνεια των πηνίων και στο λάδι, το λάδι μπορεί να κυκλοφορεί διαμέσου των τυλιγμάτων και ενός εξωτερικού ψύκτη λαδιού σε πολύ υψηλότερη ταχύτητα από αυτή, που μπορεί να επιτευχθεί με τη ροή θερμοσίφωνα. Αυτό γίνεται με τη χρήση αντλιών. Αυτή η βεβαιωμένη κυκλοφορία έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι μειώνει τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο λάδι, που βρίσκεται στην κορυφή και στον πυθμένα του μετασχηματιστή και αυξάνει την απόδοση της εξωτερικής ψύξης του λαδιού. Από το είδος των πηνίων του μετασχηματιστή εξαρτάται κατά πόσο είναι απαραίτητη η χρήση αντλιών καθώς και η δομή υποστήριξης αυτών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή κυκλοφορία του λαδιού.

#### 1.4.2.3 Ροή θερμότητας από το λάδι στον αέρα – Κυκλοφορία θερμοσίφωνα

Η θερμότητα, που διαχέεται με μεταγωγή, είναι θεωρητικά:

$$W/(in.)^2 = 0.00099 T^{1.33} \quad \text{στη θερμοκρασία των } 40^{\circ}\text{C} \quad (86)$$

όπου  $T$  = άνοδος θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια και στον περιβάλλοντα αέρα.

Όταν έχουμε άνοδο θερμοκρασίας επιφάνειας  $40^{\circ}\text{C}$ , η παραπάνω εξίσωση δίνει  $0.134 W/(in.)^2$ . Σε υψηλότερες θερμοκρασίες θα ήταν καλύτερα να χρησιμοποιήσουμε έναν εκθέτη κατά λίγο μικρότερο από τη θεωρητική τιμή, που είναι περίπου 1.33, ώστε να αφήσουμε ένα μικρό περιθώριο. Μέσα σε κάποια πρακτικά όρια, (περίπου μέχρι  $50^{\circ}\text{C}$  άνοδο θερμοκρασίας επιφάνειας), αυτός ο εκθέτης θα μπορούσε να γίνει 1.25. Ο συντελεστής του  $T$  πρέπει ανάλογα να μεταβληθεί ώστε να αποδοθεί η παραπάνω εξίσωση.

$$W/(\text{in.})^2 = 0.00134 T^{1.25} \quad (87)$$

Η παραπάνω εξίσωση μας δίνει το ίδιο αποτέλεσμα στους 40°C αύξηση θερμοκρασίας επιφάνειας με την προηγούμενη εξίσωση.

Η αποτελεσματική ακτινοβολία από μία μαύρη επιφάνεια σε θερμοκρασία  $T_b$  προς μία περιβάλλουσα επιφάνεια με θερμοκρασία  $T_a$  είναι:

$$W / \text{in.}^2 = 3.49 \times 10^{-11} (T_b^4 - T_a^4) \quad (88)$$

όπου  $T_b$  και  $T_a$  απόλυτες θερμοκρασίες σε °C.

Ένας ανάλογος τύπος, που υπολογίζει σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα και είναι ευκολότερος στη χρήση, είναι:

$$W/(\text{in.})^2 = 0.0019 T^{1.25} \quad (89)$$

όπου  $T$  είναι η άνοδος της θερμοκρασίας επιφάνειας σε °C.

Αυτή η σχέση μας δίνει αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια για θερμοκρασίες περιβάλλοντος από 20 έως 30 °C και θερμοκρασιακές ανόδους επιφάνειας από 25 έως 45 °C.

#### **1.4.2.3.1 Απαγωγή της θερμότητας από σώματα, που εκπέμπουν θερμότητα και ψυκτικούς σωλήνες με ροή θερμοσίφωνα**

Έχει διαπιστωθεί, ότι η κατανομή της θερμοκρασίας του λαδιού στα σώματα, που εκπέμπουν θερμότητα, και στους ψυκτικούς σωλήνες δεν είναι η ίδια με αυτή, που υφίσταται στο δοχείο του μετασχηματιστή. Δοκιμές έχουν δείξει, ότι η θερμοκρασία του λαδιού στα ψυγεία μεταβάλλεται σχεδόν ομοιόμορφα από την κορυφή ως τον πυθμένα και οι υπολογισμοί, που βασίζονται στην ομοιόμορφη μεταβολή, έχουν ικανοποιητική ακρίβεια για πρακτικούς σκοπούς. Στην πραγματικότητα, η διακύμανση δεν είναι ακριβώς ομοιόμορφη, αλλά οι υπολογισμοί, οι οποίοι βασίζονται στην ομοιόμορφη διακύμανση, είναι ικανοποιητικά ακριβείς για όλους τους πρακτικούς σκοπούς και είναι πολύ απλούστεροι από υπολογισμούς, που βασίζονται στη μη ομοιόμορφη κατανομή. Αν λάβουμε υπόψη μας, ότι η μέση ταχύτητα της στήλης λαδιού πρέπει να είναι ίδια σε όλο το μήκος του ψυκτικού σωλήνα, η ομοιόμορφη πτώση της θερμοκρασίας κατά μήκος του σωλήνα σημαίνει ότι μία ίση ποσότητα θερμότητας πρέπει να απάγεται από κάθε τμήμα του σωλήνα ανεξάρτητα με το αν βρίσκεται στην κορυφή ή στο κάτω μέρος του. Αυτό είναι δύσκολο να εξηγηθεί, παρά μόνο εκτιμώντας ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι επίσης υψηλότερη κοντά στην κορυφή των ψυκτικών σωλήνων, λόγω της φύσης των ρευμάτων μεταφοράς θερμότητας.

Η απαγωγή της θερμότητας είναι μεγαλύτερη όταν οι ψυκτικοί σωλήνες έχουν περισσότερη απόσταση μεταξύ τους, διότι οι μικρές αποστάσεις προκαλούν μεγαλύτερη αντίσταση στη ροή του αέρα σε σχέση με την ύπαρξη απεριόριστων διαδρομών ροής του αέρα.

Οι σχέσεις, που αναφέρθηκαν παραπάνω, για τη διάχυση της θερμότητας, αναφέρονται μόνο σε μία μεγάλη απλή επίπεδη επιφάνεια, όπως είναι το δοχείο του μετασχηματιστή. Για ψυκτικούς σωλήνες, τοποθετημένους κοντά μεταξύ τους και για πτερύγια, οι σωστές σταθερές για την κάθε διάταξη πρέπει να υπολογίζονται εμπειρικά. Καλά αποτελέσματα συνήθως προκύπτουν από κάποια σχέση της μορφής:

$$W/(in.)^2 = KT^{1.25} \quad (90)$$

### 1.4.2.3.2 Ακτινοβολία

Παρότι η απαγωγή της θερμότητας δια της μεταγωγής εξαρτάται από τη συνολική επιφάνεια, η απαγωγή δια της ακτινοβολίας εξαρτάται μόνο από την προβαλλόμενη επιφάνεια. Επαρκώς ακριβείς υπολογισμοί της ακτινοβολίας λαμβάνονται συνήθως με τη χρήση του περιβλήματος του δοχείου, (σε μικρή απόσταση γύρω από το εξωτερικό), για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικής επιφάνειας ακτινοβολίας.

### 1.4.2.3.3 Διαίρεση της δεξαμενής και των ψυκτών σε κάθετες ζώνες

Με δεδομένο, ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του δοχείου μεταβάλλεται από πάνω προς τα κάτω, προκειμένου να κάνουμε ακριβείς υπολογισμούς, θα έπρεπε να ολοκληρώσουμε την απαγωγή της θερμότητας σε όλα τα στοιχειώδη τμήματα του δοχείου από την κορυφή ως τον πυθμένα. Ως εκ τούτου, για να αποφευχθεί η διαδικασία αυτή, η οποία πέραν του κόστους της απαιτεί περίπλοκους υπολογισμούς, των οποίων μάλιστα δεν εξασφαλίζονται τα ακριβή αποτελέσματα, η θερμοκρασία υπολογίζεται συνήθως με ικανοποιητική ακρίβεια αν τα τοιχώματα της δεξαμενής χωριστούν κάθετα στις ακόλουθες ζώνες:

- Από τον πυθμένα της δεξαμενής ως την κορυφή του πυρήνα και των πηνίων.
- Από την κορυφή του πυρήνα και των πηνίων ως την κορυφή του λαδιού
- Από την κορυφή του λαδιού ως το κάλυμμα.
- Το κάλυμμα.

Η άνοδος της θερμοκρασίας κάθε μίας από αυτές τις επιφάνειες μπορεί να παρασταθεί ως ένα κλάσμα της αύξησης της θερμοκρασίας του λαδιού κορυφής,  $T_0$ . Αναλύσεις δοκιμών ορισμένων τυπικών μετασχηματιστών υποδηλώνουν, ότι οι διάφορες επιφάνειες μεταγωγής ή ακτινοβολίας θερμότητας θα παρουσιάζουν περίπου τις ακόλουθες αυξήσεις στη θερμοκρασία τους :

Επιφάνειες μεταγωγής θερμότητας	Μέση αύξηση θερμοκρασίας
Τοίχωμα δεξαμενής, από τον πυθμένα ως την κορυφή πυρήνα και πηνίων.	$K_1 T_0$
Τοίχωμα δεξαμενής, από πυρήνα και πηνία ως κορυφή λαδιού.	$0.850 T_0$
Τοίχωμα δεξαμενής, κορυφή του λαδιού ως κάλυμμα.	$0.500 T_0$
Κάλυμμα δεξαμενής.	$0.333 T_0$
Εξωτερικές γρίλιες στην επιφάνεια της δεξαμενής (ψύκτρες).	$K_1 T_0$
<hr/>	
Επιφάνειες, που ακτινοβολούν θερμότητα.	
<hr/>	
Περίβλημα, πλευρές με ψύκτρες κάτω από επίπεδο λαδιού.	$K_1 T_0$
Περίβλημα, πλευρές χωρίς ψύκτρες.	
α. Από τον πυθμένα ως την κορυφή του πυρήνα και πηνίων.	$K_1 T_0$
β. Κορυφή πυρήνα και πηνίων ως την κορυφή του λαδιού.	$0.850 T_0$
Περίβλημα, κορυφή του λαδιού ως την κορυφή δεξαμενής.	$0.500 T_0$
Κάλυμμα.	$0.333 T_0$
Κορυφή και πυθμένας ψυκτρών.	$K_1 T_0$

#### 1.4.2.4 Ροή θερμότητας από το λάδι προς τον αέρα με εξαναγκασμένη ροή αέρα ή εξαναγκασμένη ροή λαδιού

Μεγάλη αύξηση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να σημειωθεί αν ο αέρας κατευθύνεται πάνω στις επιφάνειες με ανεμιστήρες ψύξης. Η εφαρμογή αυτών των ανεμιστήρων γίνεται συνήθως σε εμπειρική βάση. Λόγω του ότι υπάρχει μεγάλη ποικιλία στη φύση της επιφάνειας της δεξαμενής, των ψυκτικών σωλήνων, των ψυκτρών, ακόμα και των

ιδίων των ανεμιστήρων, δεν υπάρχει συγκεκριμένη βασική φόρμουλα, που να μας καθοδηγεί, σχετικά με την εφαρμογή των ανεμιστήρων. Είναι γνωστό, ότι με τη χρήση των ανεμιστήρων μπορεί να αυξηθεί κατά περίπου 100% η μεταγωγή της θερμότητας, χωρίς υπερβολική κατανάλωση ισχύος από τους ανεμιστήρες ή ιδιαίτερο θόρυβο. Αυτό σημαίνει, ότι η συνολική ποσότητα θερμότητας, η οποία διαχέεται από ένα μετασχηματιστή και προέρχεται από μεταγωγή και από ακτινοβολία είναι λίγο μικρότερη από αυτό το ποσοστό.

Σε μικρούς μετασχηματιστές χωρίς ψυκτικούς σωλήνες ή εξωτερικές γρίλιες, το ποσοστό της απώλειας θερμότητας από ακτινοβολία είναι πολύ υψηλότερο και οι ανεμιστήρες, που αυξάνουν μόνο τη μεταγωγή θερμότητας, δεν είναι τόσο αποδοτικοί όσο είναι σε μεγαλύτερους μετασχηματιστές, όπου η περισσότερη θερμότητα απομακρύνεται από τα θερμαινόμενα σώματα διαμέσου της μεταγωγής της θερμότητας. Σε μετασχηματιστές μεγαλύτερους από 2.000 kVA, η απαγωγή της θερμότητας μπορεί να αυξηθεί κατά 50%, χωρίς υπερβολικό θόρυβο από τους ανεμιστήρες ή υπερβολική κατανάλωση από αυτούς, επιτρέποντας αύξηση του φορτίου στους περισσότερους μετασχηματιστές κατά το ένα τρίτο. Με πιο προσεκτικό σχεδιασμό των ανεμιστήρων και των διατάξεών τους, η απαγωγή της θερμότητας από μονάδες μεγαλύτερες των 15.000kVA μπορεί να αυξηθεί περισσότερο από το 100%, αλλά με το κόστος ότι θα έχουμε αισθητά περισσότερο θόρυβο από τους ανεμιστήρες και περισσότερη κατανάλωση ισχύος. Αυτό επιτρέπει μια αύξηση κατά δύο τρίτα πάνω από την αρχική τιμή. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ χαλκού και λαδιού, η οποία μπορεί να είναι μόνο 10 °C υπό πλήρες φορτίο, θα αυξηθεί και αν η άνοδος θερμοκρασίας θερμού σημείου (hot-spot) ήταν ακόμα μεγαλύτερη η θερμοκρασία θερμού σημείου μπορεί και να φτάσει να είναι 50 °C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του λαδιού. Η συνήθης αβεβαιότητα, σχετικά με την ακριβή τιμή της διαφοράς ανάμεσα σε θερμοκρασία θερμού-σημείου και στη θερμοκρασία κορυφής του λαδιού, δεν είναι τόσο σημαντική αν είναι ευλόγως μικρή, αλλά η αβεβαιότητα για μεγάλες τιμές είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη.

Υπάρχουν πολλές διαφορές στις διάφορες διατάξεις μεταφοράς θερμότητας από το λάδι στον αέρα με εξαναγκασμένη κίνηση του λαδιού.

- Χρήση σωληνοειδών ή τύπου γρίλιας ψυκτών, οι οποίες επιτρέπουν επαρκή ροή λαδιού όταν οι αντλίες σταματούν, έτσι ώστε ο μετασχηματιστής να μπορεί να βαθμονομηθεί στο 100% του φορτίου χωρίς ανεμιστήρες ή αντλίες και στο 167% του φορτίου με αντλίες και ανεμιστήρες.
- Χρήση ενός ψυκτικού σωλήνα με πτερύγια, μέσα στον οποίον η ροή του λαδιού και του αέρα είναι τόσο περιορισμένη, που πολύ λίγη θερμότητα μπορεί να απαχθεί αν οι αντλίες και οι ανεμιστήρες δεν είναι σε λειτουργία. Τυπικές ψύκτρες θα απάγουν μόνο το 5 % περίπου της κανονικής τιμής κάτω από αυτές τις συνθήκες, κάτι το οποίο σημαίνει πως οι μεγάλοι μετασχηματιστές θα υπερθερμαίνοντο τόσο γρήγορα σαν να μην είχαν καθόλου ψύξη.

### 1.4.3 Μεταβολές θερμοκρασίας, που ακολουθούν μεταβολές του φορτίου

Ο πιο σημαντικός παράγοντας, ο οποίος προσδιορίζει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή, είναι η μέγιστη θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στα τυλίγματα του, (θερμότερο σημείο). Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναπτυχθεί ανωτέρω, θεωρείται ότι όλες οι θερμοκρασίες γίνονται σταθερές ( συνθήκες σταθερής κατάστασης). Η θερμοκρασία θερμού σημείου μπορεί παρ' όλα αυτά να υπολογιστεί όπως και η απώλεια "ζωής" του μετασχηματιστή. Όταν έχουμε μεταβατικές συνθήκες, για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών πρέπει να λάβουμε περισσότερους παράγοντες υπόψη μας, δεδομένου ότι συνθήκες απόλυτα σταθερής κατάστασης μπορεί να μην προκύψουν ποτέ.

Οι μεταβατικές θερμοκρασίες εξαρτώνται από την ικανότητα των συστατικών μερών του μετασχηματιστή να απορροφούν τη θερμότητα. Η κύρια πηγή αυτής της θερμότητας είναι οι ρευματοφόροι αγωγοί.

#### 1.4.3.1 Θέρμανση των αγωγών

Όταν το ρεύμα φόρτισης αυξάνεται, οι απώλειες στο χαλκό αυξάνονται ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος. Κατά το αρχικό διάστημα της αύξησης του ρεύματος, όλη η προσαύξηση των απωλειών εκδηλώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του χαλκού, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Αύξηση θερμοκρασίας, } ^\circ\text{C} = \frac{(\text{προσαύξηση Watt})(\text{χρόνος σε sec})}{(\text{lb χαλκού})(180)}$$

όπου 180 είναι η θερμική χωρητικότητα του χαλκού σε μονάδες W·s/lb·(°C)

Όταν η θερμοκρασία του χαλκού αυξάνεται, η θερμότητα αρχίζει να ρέει μέσα στη μόνωση επί του αγωγού. Μπορεί να φαίνεται ότι η μόνωση έχει μία αμελητέα θερμική χωρητικότητα, αλλά κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Η θερμική χωρητικότητα του λαδιού είναι πέντε φορές μεγαλύτερη της θερμικής χωρητικότητας του χαλκού ανά pound (1lb = 0kg 453.59g), και περίπου 0.5 φορές ανά κυβική ίντσα. Για τον λόγο αυτό και ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας απορροφάται από ένα πολύ λεπτό στρώμα χαρτιού, εμποτισμένου σε λάδι, που είναι πάνω στο χαλκό.

### 1.4.3.2 Απαγωγή της θερμότητας στο ψυκτικό μέσο

Η θερμοκρασία θα εξακολουθούσε να αυξάνεται αν ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας δεν απήγετο στο ψυκτικό μέσο. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, η θερμοκρασία που απάγεται μεταβάλλεται ανάλογα με τη 1.25στη δύναμη της θερμοκρασίας όταν έχουμε ελεύθερη μεταγωγή και με την 1<sup>η</sup> δύναμη της θερμοκρασίας για εξαναγκασμένη μεταγωγή.



[1.1] Ανακοίνωση της Επιτροπής – Σχέδιο δράσης για την ενεργειακή απόδοση : Αξιοποίηση του δυναμικού {SEC(2006)1173} {SEC(2006)1174} {SEC(2006)1175}[ COM (2006) 545 ]  
at: [http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga\\_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=el&type\\_doc=COMfinal&an\\_doc=2006&nu\\_doc=545](http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=el&type_doc=COMfinal&an_doc=2006&nu_doc=545)

[1.2] European Commission, European SmartGrids Technology Platform , “ Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future” ,EUR 22040  
at : [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids_en.pdf)

[1.3] MICROGRIDS- Large Scale Integration of Micro-Generatio to Low Voltage Grids, Nikos Hatzigiorgiou, National Technical University of Athens  
at: <http://www.microgrids.eu/micro2000/presentations/19.pdf>

[1.4] Αντώνιος Γ. Τσικαλάκης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, «Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης»

[1.5] ELVIM Oil-immersed Distribution Transformers

[1.6] Facilities Instructions, Standards , and Techniques (FIST) 3-30 Transformer Maintenance.

[1.7] Μετασχηματιστές διανομής ελαίου at :<http://www.elfa.gr>

[1.8] Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης Μετασχηματιστών Διανομής. Γιώργος Σ. Παναγιώτου, Φραγκίσκος Τοπαλής, ΕΜΠ

[1.9] Βασικά μεγέθη του δικτύου ηλεκτρισμού <http://www.deddie.gr>

[1.10] ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ, Τόμος Α, Νίκος Ι. Μάργαρης

[1.11] Viscosity index tables for Celsius temperatures, DS 39B, American Society For Testing And Materials ASTM,  
at:[http://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/MNL/SOURCE\\_PAGES/DS39B\\_foreword.pdf](http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/MNL/SOURCE_PAGES/DS39B_foreword.pdf)

[1.12] ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ, ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΤΡΙΒΗ (ΙΞΩΔΕΣ) ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ, Δρ. Σ. Καλογεροπούλου

[1.13] Υψηλές Τάσεις Ι., Σταθόπουλος Ι.Α., καθ Ε.Μ.Π.

[1.14] Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος 1, Αθήνα 1994, Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, καθ. Ε.Μ.Π.



## Κεφάλαιο 2

### Μοντελοποίηση μετασχηματιστών

Η βιομηχανία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζεται σε τρία λειτουργικά τμήματα, τα οποία είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή. Οι μετασχηματιστές ισχύος, οι δείκτες μετατροπής υπό φορτίο, οι μετασχηματιστές ρεύματος, οι διακόπτες κυκλώματος και οι συσκευές διακοπής είναι οι βασικές συσκευές μιας υποδομής μετάδοσης και διανομής, μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής ως τα σπίτια και τους επαγγελματικούς καταναλωτές. Οι ανωτέρω συσκευές αποτελούν κρίσιμα στοιχεία και αν αποτύγχαναν στον σκοπό τους αυτό θα οδηγούσε σε διακοπές ρεύματος, προσωπικούς και περιβαλλοντικούς κινδύνους και δαπανηρή αναδρομολόγηση ή αγορά ενέργειας από άλλους προμηθευτές ενέργειας. Για το λόγο αυτό, τα κρίσιμα αυτά στοιχεία πρέπει να παρακολουθούνται προσεκτικά και συνεχώς, προκειμένου να εξασφαλιστεί η λειτουργία τους στις κατάλληλες συνθήκες και η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής τους.

Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος λαδιού είναι από τα ακριβότερα στοιχεία στη διανομή της ενέργειας. Ένας μετασχηματιστής μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει το ρεύμα σε ένα AC κύκλωμα, να απομονώσει κυκλώματα και να μειώσει ή να αυξήσει τη φαινόμενη τιμή ενός πυκνωτή, ενός επαγωγέα ή ενός αντιστάτη. Ένας μετασχηματιστής μπορεί να αποτύχει λόγω οποιουδήποτε συνδυασμού ηλεκτρικής, μηχανικής ή θερμικής καταπόνησης. Τέτοιες αποτυχίες είναι ορισμένες φορές καταστροφικές και σχεδόν πάντα προκαλούν ανεπανόρθωτη εσωτερική ζημιά. Ορισμένες αποτυχίες μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλό κόστους αντικαταστάσεις ή επιδιορθώσεις ή ακόμα και σε κάποια απρογραμμάτιστη διακοπή ρεύματος.

### 2.1 Παρακολούθηση και αξιολόγηση της κατάστασης του μετασχηματιστή

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχίες των μετασχηματιστών κατά τη λειτουργία τους, όπως είναι οι ηλεκτρικές παρεμβολές, γήρανση της μόνωσης, κεραυνοί, ακατάλληλη συντήρηση, χαλαρές συνδέσεις, υγρασία και υπερφόρτιση. Πολλοί από αυτούς τους παράγοντες βέβαια είναι πολύ πιο πιθανό να εμφανιστούν με την πάροδο του χρόνου και τη γήρανση του μετασχηματιστή. Είναι αναπόφευκτο, ότι κάποια σφάλματα θα συμβούν, γι αυτό είναι απαραίτητη η στενή παρακολούθηση των συμπεριφορών των μετασχηματιστών όταν είναι συνδεδεμένοι, αλλά και όταν δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Τυπικά προγράμματα διατήρησης μετασχηματιστών περιλαμβάνουν συνεχή τεστ αξιολόγησης, συχνές αναλύσεις του διαλυμένου αερίου και τεστ της ποιότητας του λαδιού, θερμογραφική σάρωση του μετασχηματιστή και των ηλεκτρικών

συνδέσεων και παρακολούθηση κατά τη λειτουργία μονάδων, για τις οποίες υπάρχουν αμφιβολίες ως προς τη σωστή λειτουργία τους. Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί τρεις στρατηγικές παρακολούθησης για τον εντοπισμό και διάγνωση αστοχιών των μετασχηματιστών:

- 1) Έχει αναπτυχθεί μια ποικιλία relays, ώστε να ανταποκρίνεται σε πολύ απότομη αστοχία ισχύος, η οποία απαιτεί άμεση απομάκρυνση του ελαττωματικού μετασχηματιστή από τη λειτουργία. Σε αυτήν την περίπτωση όμως οι διακοπές είναι αναπόφευκτες. Με τον τρόπο αυτό δεν μπορούν να ανιχνευθούν αρχόμενα σφάλματα.
- 2) Ποικίλες δοκιμές εκτός σύνδεσης μπορούν να εφαρμοστούν για να εντοπίσουν αρχόμενες δυσλειτουργίες και αυτές οι δοκιμές συνήθως εκτελούνται με σεβασμό προς το κανονικό χρονικό διάστημα. Παρ' όλα αυτά, μια τέτοια στρατηγική, βασισμένη στο χρόνο, απαιτεί έντονη εργασία και όχι μεγάλο κόστος. Είναι βέβαια αναποτελεσματική στον εντοπισμό προβλημάτων, που αναπτύσσονται μεταξύ των προγραμματισμένων ελέγχων.
- 3) Στην βιομηχανία ισχύος υπάρχει η τάση απομάκρυνσης από την παρακολούθηση των μονάδων των μετασχηματιστών με βάση το χρόνο και τα καθορισμένα χρονικά διαστήματα και η προσέγγιση της παρακολούθησης των μετασχηματιστών ανάλογα με τις συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε προηγμένες τεχνικές διάγνωσης βλαβών για τον εντοπισμό αρχόμενων βλαβών. Ένα πρόγραμμα παρακολούθησης, βασισμένο στις συνθήκες, μπορεί να αποδώσει πληροφορίες για την κατάσταση του μετασχηματιστή σε πραγματικό χρόνο, να επεξεργαστεί τις πληροφορίες αυτές και εν συνεχεία να προσδιορίσει πότε πρέπει να γίνει η συντήρηση της συγκεκριμένης μονάδας.

Αυτές οι τρεις στρατηγικές έχουν διερευνηθεί για αρκετά χρόνια. Η στρατηγική παρακολούθησης με βάση τις συνθήκες συνδέεται με ένα μεγάλο εύρος τεχνικών παρακολούθησης, οι οποίες περιλαμβάνουν τον εντοπισμό μερικών αποφορτίσεων και της γήρανσης της μόνωσης του μετασχηματιστή, τη διάγνωση παραμόρφωσης των τυλιγμάτων, την παρακολούθηση της εξέλιξης του διαλυμένου αερίου, την ταξινόμηση των κινδύνων και την αξιολόγηση των θερμικών συνθηκών.

Τα τελευταία χρόνια, ραγδαίες εξελίξεις και αλλαγές έχουν παρατηρηθεί στον τομέα της παρακολούθησης και αξιολόγησης της κατάστασης των μετασχηματιστών. Η απόδοση και η αξιοπιστία των μετασχηματιστών μπορεί να βελτιωθεί εξαιρετικά, χρησιμοποιώντας προηγμένα συστήματα εντοπισμού βλαβών. Πολλά ερευνητικά ιδρύματα και κοινωφελείς εταιρίες έχουν αναπτύξει τα δικά τους συστήματα παρακολούθησης και αξιολόγησης των μετασχηματιστών. Για παράδειγμα, το 1995 το Massachusetts Institute of Technology (MIT) ανέπτυξε ένα προσαρμοστικό ευφυές σύστημα παρακολούθησης για μεγάλους μετασχηματιστές.

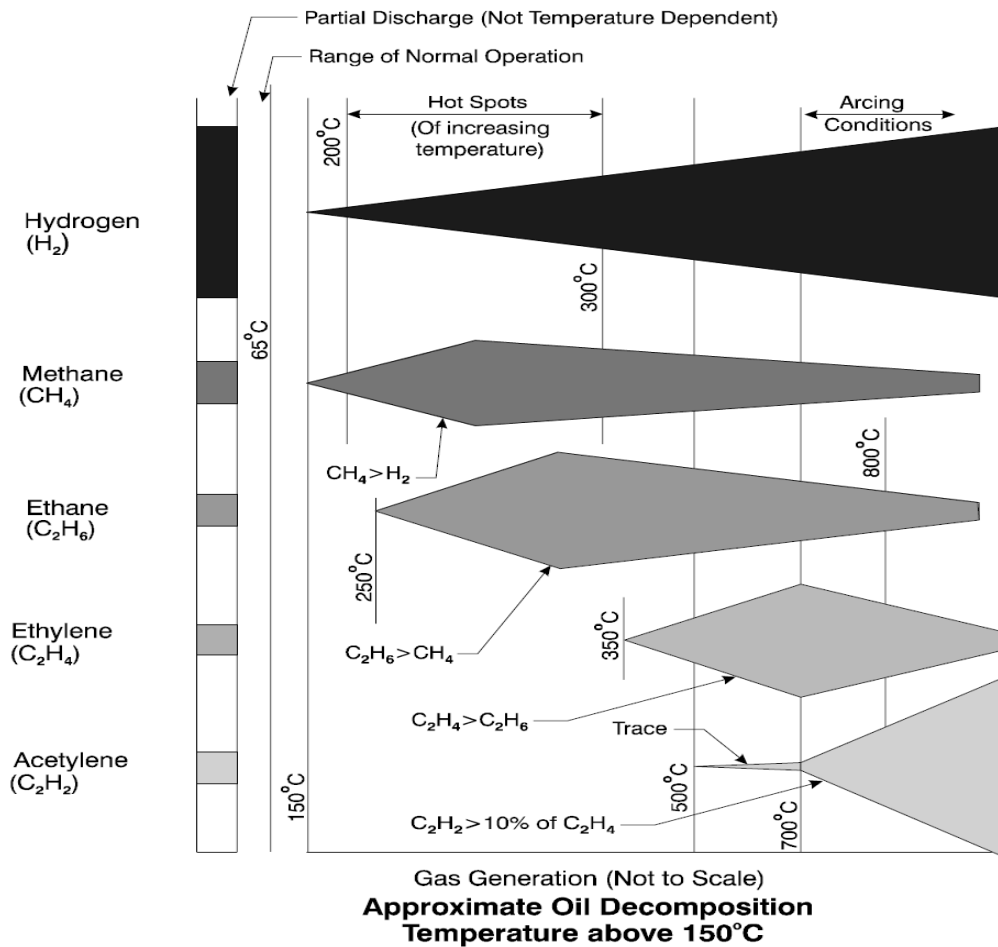
## 2.1.1 Βασικές πτυχές στην παρακολούθηση και αξιολόγηση των μετασχηματιστών

Η παρακολούθηση και αξιολόγηση της κατάστασης του μετασχηματιστή αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία [2.1]:

- Τη *θερμική μοντελοποίηση* του μετασχηματιστή ( TM, thermal modeling ).
- Την ανάλυση του διαλυμένου αερίου ( DGA, dissolved gas analysis ).
- Την ανάλυση της απόκρισης συχνότητας των τυλιγμάτων ( FRA, winding frequency response analysis ).
- Την ανάλυση μερικής εκφόρτισης ( PDA, partial discharge analysis ).

Πολύ σημαντικό εργαλείο για τον προσδιορισμό της υγείας του μετασχηματιστή είναι η ανάλυση του διαλυμένου αερίου DGA [1.6]. Τα κύρια αέρια, που παράγονται από τη φθορά του λαδιού και του χαρτιού της μόνωσης, είναι το υδρογόνο ( $H_2$ ), το μεθάνιο ( $CH_4$ ), το αιθάνιο ( $C_2H_6$ ), το αιθυλένιο ( $C_2H_4$ ), το ακετυλένιο ( $C_2H_2$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ) και το οξυγόνο ( $O_2$ ). Εκτός από το μονοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο, όλα τα άλλα αέρια παράγονται από τη φθορά του λαδιού. Το μονοξείδιο, το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο παράγονται από τη φθορά της μόνωσης του χαρτιού. Αν υπάρχει κάποια διαρροή στο δοχείο του μετασχηματιστή ή αν υπάρχει κάποια επαφή ανάμεσα στο λάδι και στον αέρα, τότε μπορεί να απορροφηθούν από το περιβάλλον διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο και άζωτο ( $N_2$ ).

Η ποσότητα και ο τύπος των αερίων, που παράγονται, εξαρτώνται από το σημείο του μετασχηματιστή, στο οποίο προκύπτει το σφάλμα, καθώς και από τη δριμύτητα και ενέργεια του περιστατικού. Τα περιστατικά μπορεί να ποικίλουν, από περιστατικά χαμηλής ενέργειας, όπως είναι μια αποφόρτιση του Μ/Σ, έως περιστατικά πολύ υψηλής ενέργειας, όπως είναι η παρατεταμένη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου στο μετασχηματιστή, που μπορεί να παράγει όλα τα παραπάνω αέρια.



Σχήμα 2.1 Παραγωγή εύφλεκτων αερίων στο Μ/Σ σε σχέση με τη θερμοκρασία Hot-spot.

Στο παραπάνω σχήμα, βλέπουμε πώς η θερμοκρασία επιδρά στην παραγωγή αερίων στο μετασχηματιστή. Οι τιμές βέβαια, που φαίνονται για τη θερμοκρασία, είναι προσεγγιστικές.

## 2.2 Θερμικό μοντέλο μετασχηματιστή

Η ζωή του μετασχηματιστή υπό κανονική λειτουργία είναι μερικώς συνδεδεμένη με την επιδείνωση της κατάστασης της μόνωσης του μετασχηματιστή λόγω της θερμικής γήρανσής της, η οποία προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από την ημερήσια κυκλική φόρτισή του. Η ανάπτυξη ενός ακριβούς θερμικού μοντέλου θεωρείται πάντα ως ένα από τα πιο απαραίτητα ζητήματα για την παρακολούθηση της κατάστασης, στην οποία βρίσκεται ο μετασχηματιστής.

Η χρήσιμη ζωή ενός μετασχηματιστή προσδιορίζεται μερικώς από την ικανότητά του να απάγει τη θερμότητα, που παράγεται στο εσωτερικό του, προς το περιβάλλον του. Όλοι οι μετασχηματιστές λαδιού είναι σχεδιασμένοι έτσι, ώστε να ικανοποιούν κάποια συγκεκριμένα

κριτήρια όσον αφορά στη θερμοκρασία. Η θερμική χωρητικότητα του λαδιού και των τυλιγμάτων επιτρέπει την λειτουργία σε φορτία πάνω από το ονομαστικό για σύντομα χρονικά διαστήματα. Για τους μετασχηματιστές υπάρχουν θερμικά ονομαστικά χαρακτηριστικά, όπως είναι για παράδειγμα τα παρακάτω:

- Μέση αύξηση θερμοκρασίας τυλιγμάτων ( πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ) <math><65\text{ }^\circ\text{C}</math> σε ονομαστικό φορτίο.
- Αύξηση θερμοκρασίας top-oil <math><60\text{ }^\circ\text{C}</math> σε ονομαστικό φορτίο.
- Η θερμοκρασία hot-spot δεν μπορεί να υπερβεί τους <math>125\text{ }^\circ\text{C}</math>, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι <math>20\text{ }^\circ\text{C}</math>.

Η ανάπτυξη αξιόπιστων θερμικών μοντέλων θεωρείται πάντα ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της παρακολούθησης της κατάστασης των μετασχηματιστών. Η σύγκριση των πραγματικών και των προβλεπόμενων θερμοκρασιών λειτουργίας μπορεί να μας δώσει μια διάγνωση της κατάστασης, στην οποία βρίσκεται ο μετασχηματιστής, η οποία κατάσταση μπορεί να υποδηλώνει κάποια βλάβη.

Για να προσομοιώσουμε τη συμπεριφορά ενός μετασχηματιστή και κατ' επέκταση των μετασχηματιστών του δικτύου διανομής χρησιμοποιούμε το δυναμικό θερμικό μοντέλο μετασχηματιστή. Το μοντέλο αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε με μεγάλη ακρίβεια την αυξομείωση της θερμοκρασίας hot spot του λαδιού ανάλογα με το φορτίο, που εφαρμόζεται στον εκάστοτε μετασχηματιστή. Τα δυναμικά θερμικά μοντέλα, τα οποία αναπτύσσονται και εξετάζονται παρακάτω, είναι το μοντέλο top-oil θερμοκρασίας και το μοντέλο hot-spot θερμοκρασίας. Η ανάπτυξη των μοντέλων αυτών βασίζεται στην αναλογία ανάμεσα σε θερμικά και ηλεκτρικά στοιχεία. Σκοπός, είναι να αναπτυχθεί μια μέθοδος, με την οποία να μπορούμε να υπολογίσουμε τον αντίκτυπο, που έχει η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στη θερμοκρασία θερμού σημείου του μετασχηματιστή και στην απώλεια ζωής του.

Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών στις διάφορες θερμοκρασίες χειρισμού είναι γνωστή με ακρίβεια. Η γήρανση ή η φθορά της μόνωσης είναι μία συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας. Εφόσον στις περισσότερες συσκευές η διανομή της θερμοκρασίας δεν είναι ομοιόμορφη, το τμήμα, το οποίο λειτουργεί με την υψηλότερη θερμοκρασία, θα υποστεί και τη μεγαλύτερη φθορά. Γι αυτό, συνηθίζεται να θεωρούμε τις φθορές, που προέρχονται από την υψηλότερη θερμοκρασία, ως "hottest spot".

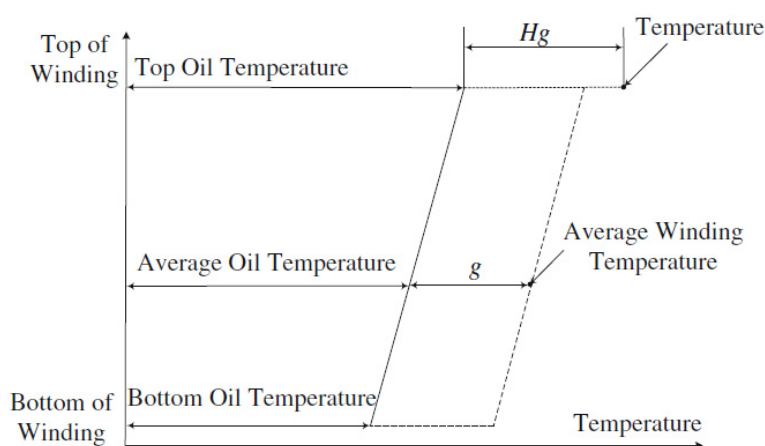
### **2.2.1 Hot-spot θερμοκρασία**

Η hottest-spot θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής, λόγω της φόρτισης [2.2]. Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή δεν μπορεί να μετρηθεί κατευθείαν, λόγω της δυσκολίας της τοποθέτησης ενός μετρητή στο κατάλληλο σημείο, εξαιτίας της τάσης. Παρ' όλα αυτά, έχει δοθεί κάποια δυνατότητα μέτρησης με εργαστηριακές δοκιμές. Η hottest-spot θερμοκρασία

του χαλκού είναι ένα άθροισμα της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου, της μέσης θερμοκρασιακής αύξησης του χαλκού και της hottest-spot επιτρεπτότητας.

Ο οδηγός φόρτισης IEC 354 για μετασχηματιστές λαδιού και ο οδηγός του IEEE για τη φόρτιση μετασχηματιστών ορυκτελαίου υποδεικνύουν το πώς οι μετασχηματιστές λαδιού μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και επίπεδα φόρτισης, χωρίς η επιδείνωση της μόνωσης από την επίδραση της θερμοκρασίας να υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια. Σύμφωνα με τους οδηγούς φόρτισης, η hot-spot θερμοκρασία στο τυλίγμα του μετασχηματιστή συνίσταται σε τρεις παράγοντες: Την άνοδο της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, την άνοδο της θερμοκρασίας top-oil και την άνοδο της θερμοκρασίας hot-spot πάνω από τη θερμοκρασία top-oil, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.2.

Θεωρείται, ότι κατά μια μεταβατική περίοδο, η άνοδος της θερμοκρασίας hot-spot πάνω από τη θερμοκρασία top-oil μεταβάλλεται στιγμιαία με τη μεταβολή της φόρτισης του μετασχηματιστή ανεξάρτητα από το χρόνο. Η μεταβολή της θερμοκρασίας top-oil περιγράφεται από μια εκθετική εξίσωση, που βασίζεται στη χρονική σταθερά ( χρονική σταθερά του λαδιού) .



Σχήμα 2.2 Θερμικό διάγραμμα μετασχηματιστή, το οποίο απεικονίζει την κύρια κατανομή της θερμότητας κατά μήκος του τυλίγματος, όπως επίσης και την κατανομή της θερμότητας στο εσωτερικό της δεξαμενής του μετασχηματιστή.[2.4]

Το παραπάνω διάγραμμα του σχήματος 2.2 αποτελεί απλοποίηση της αρκετά πιο περίπλοκης διανομής της θερμότητας [2.1]. Οι υποθέσεις, που έγιναν σε αυτήν την απλοποίηση, είναι οι ακόλουθες:

- Η θερμοκρασία του λαδιού στο εσωτερικό ενός τυλίγματος αυξάνεται γραμμικά από τον πυθμένα ως την κορυφή, όποια κι αν είναι η ψυκτική μέθοδος.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγίμων τμημάτων του τυλίγματος σε οποιαδήποτε κάθετη τομή αυτού αυξάνεται γραμμικά, παράλληλα με την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού. Ανάμεσα στις δύο αυτές παράλληλες αυξήσεις της θερμοκρασίας υπάρχει πάντα μια σταθερή διαφορά  $g$ , ( το  $g$  είναι η διαφορά ανάμεσα στη μέση θερμοκρασιακή αύξηση, λόγω αντίστασης και τη μέση θερμοκρασιακή αύξηση του λαδιού).



- Η αύξηση της hot-spot θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού στην κορυφή του τυλίγματος, διότι έχουμε και τη θερμότητα, που προκαλείται από τις απώλειες λόγω δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή, οι οποίες επίσης αυξάνουν τη θερμοκρασία hot-spot. Για να λάβουμε υπόψη μας αυτές τις μη γραμμικές απώλειες, η διαφορά στη θερμοκρασία ανάμεσα στο hot-spot και στο λάδι, που βρίσκεται στην κορυφή του τυλίγματος, θεωρούμε ότι είναι ίσες προς **Hg**. Ο παράγοντας hot-spot **H** μπορεί να ποικίλει από 1.1 έως 1.5 ανάλογα σε διάφορους παράγοντες, όπως είναι το μέγεθος του μετασχηματιστή και ο σχεδιασμός του τυλίγματος.

## 2.2.2 Προσέγγιση hot-spot θερμοκρασίας και παρατηρήσεις

Πιο παλαιοί μετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με μετρητές top-oil θερμοκρασίας, οι οποίοι όμως δεν υποδεικνύουν θερμοκρασίες hot-spot. Οι σύγχρονοι μετασχηματιστές έχουν ενσωματωμένες συσκευές hottest-spot θερμοκρασίας, οι οποίες υποδεικνύουν ή καταγράφουν τις δοκιμαστικές θερμοκρασίες hot-spot. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν ένα θερμαντή, που τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή ρεύματος σε ένα τύλιγμα του μετασχηματιστή και μια αντίσταση χαλκού ανίχνευσης θερμοκρασίας. Η αντίσταση είναι βαθμονομημένη, ώστε να προσομοιώνει τη μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, που μπορεί να προκύψει σε ένα τύλιγμα για οποιαδήποτε θέση του δείκτη. Επιπροσθέτως, μεγάλοι σύγχρονοι μετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με ένα relay θερμοκρασίας τυλίγματος με ένα θερμαντή, συνδεδεμένο στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή ρεύματος. Αυτό το relay είναι συνήθως εξοπλισμένο με μια ακολουθία τριών επαφών, ηλεκτρικά και ξεχωριστά ρυθμιζόμενες, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τη hot-spot θερμοκρασία του τυλίγματος. Το relay είναι κανονικά καλωδιωμένο έτσι ώστε να ξεκινάει τους ανεμιστήρες ή τις αντλίες λαδιού ή και τα δύο μαζί σε χαμηλές θερμοκρασίες, να ειδοποιεί στην ενδιάμεση θερμοκρασία και να πυροδοτήσει διακοπές, ώστε όταν αναπτύσσεται υψηλή θερμοκρασία ο μετασχηματιστής να τίθεται εκτός λειτουργίας.

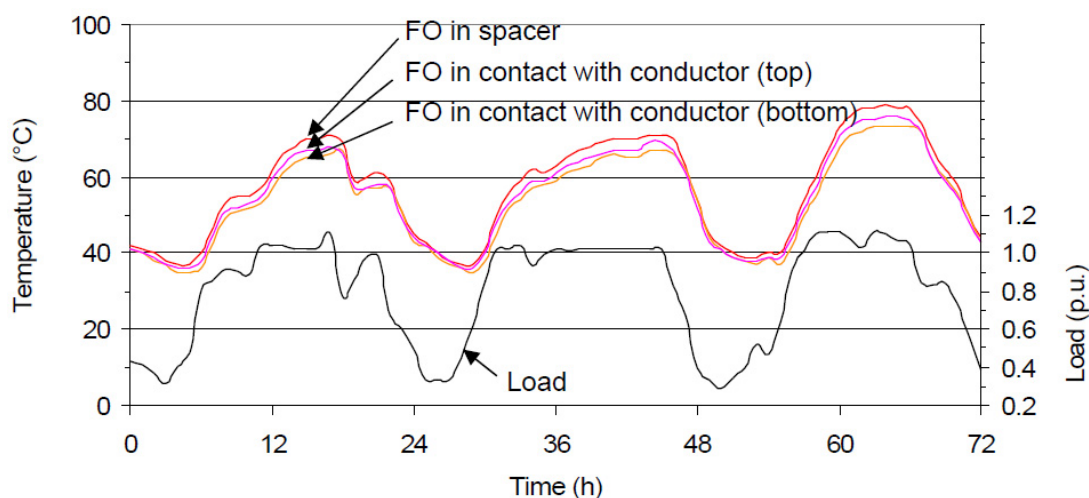
Μετασχηματιστές, οι οποίοι υπερβαίνουν τις θερμοκρασίες ειδοποίησης (συναγερμού) πρέπει να επιθεωρούνται, προκειμένου να προσδιορισθεί η αιτία της ανάπτυξης της υψηλής αυτής θερμοκρασίας.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, πολλοί μελετητές έχουν χρησιμοποιήσει ανιχνευτές οπτινών ινών, προκειμένου να λάβουν όσο πιο ακριβείς γίνεται τιμές των θερμοκρασιών. Αρχικά οι μονάδες αυτές ήταν πολύ ευαίσθητες και απαιτούσαν λεπτό χειρισμό κατά την κατασκευή. Προκειμένου να μετρηθεί η θερμοκρασία του τυλίγματος, ο αισθητήρας μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα διαχωριστικό ή να προσκολληθεί κατευθείαν πάνω στον αγωγό. Στην περίπτωση αυτή, η μόνωση πρέπει να αφαιρεθεί τοπικά και να επανατοποθετηθεί μετά την τοποθέτηση του αισθητήρα.

Πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η τοποθέτηση του αισθητήρα στο διαχωριστικό ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς δίσκους των τυλιγμάτων. Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγουμε τη λεπτή

δουλειά, που απαιτείται για την αφαίρεση και επανατοποθέτηση της μόνωσης του τυλίγματος. Ο αισθητήρας εμποδίζει την κυκλοφορία του λαδιού από το συγκεκριμένο σημείο, στο οποίο προσκολλάται. Επομένως, η θερμοκρασία στο διαχωριστικό είναι πολύ μικρή και ο αισθητήρας μετράει θερμοκρασία, που είναι ο μέσος όρος των δύο δίσκων, στους οποίους παρεμβάλλεται.

Στο παρακάτω σχήμα 2.3 παριστάνεται η θερμοκρασία, που μετράται από δύο αισθητήρες, τοποθετημένους σε επαφή με το τύλιγμα, και έναν αισθητήρα, τοποθετημένο στο κενό κάτω από το ίδιο τύλιγμα. Παρατηρούμε, ότι η μετρούμενη θερμοκρασία στο κενό είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή, που μετράται πάνω από τον αγωγό.

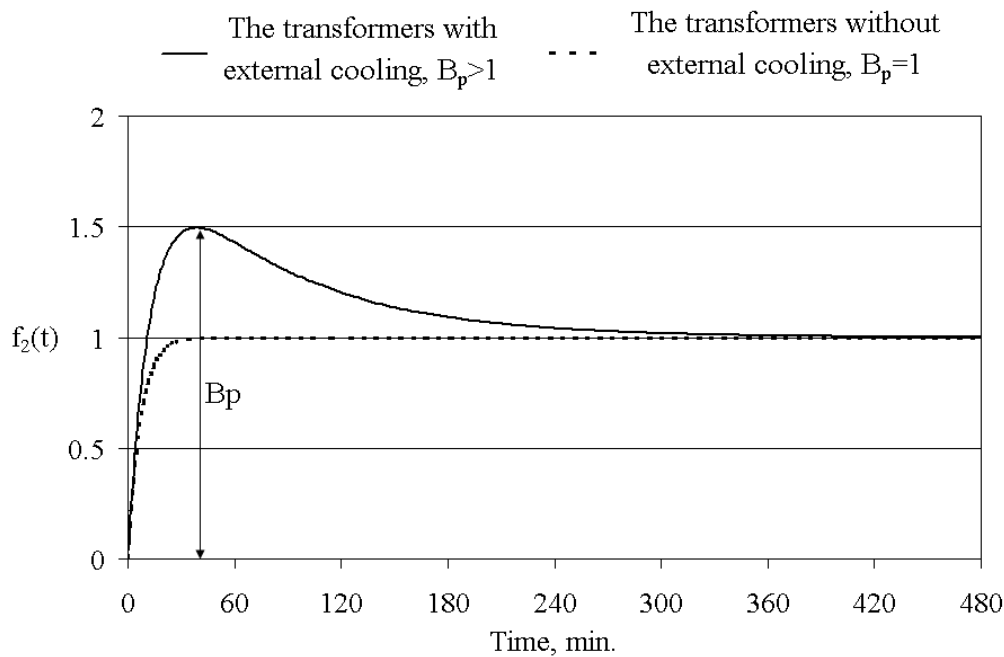


Σχήμα 2.3 Θερμοκρασία, μετρούμενη από τρεις αισθητήρες, τοποθετημένους πάνω στο τύλιγμα και στο κενό.

Έχει καταγραφεί, ότι παρουσιάζεται μία καθυστέρηση χρονική ανάμεσα στην αύξηση της θερμοκρασίας top-oil μέσα στη δεξαμενή και στην αύξηση της hot-spot θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία hot-spot αυξάνεται απότομα σε μια χρονική σταθερά ίση προς τη χρονική σταθερά των τυλιγμάτων. Κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία hottest spot των τυλιγμάτων να λαμβάνει υψηλότερες τιμές από αυτές, που προβλέπονται στον παρόντα IEC οδηγό φόρτισης για τους μετασχηματιστές λαδιού.

Μετά από ανάλυση των μετρούμενων τιμών από τους μετασχηματιστηματιστές, στους οποίους έγιναν οι δοκιμές, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της hot-spot θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία top-oil με τις μεταβολές του φορτίου είναι συνάρτηση, εξαρτώμενη από το χρόνο και τη φόρτιση του μετασχηματιστή ( συνάρτηση εξαρτώμενη από το χρόνο υπερύψωσης της φόρτισης ) .

Το φαινόμενο της υπερύψωσης της θερμοκρασίας φαίνεται στο σχήμα 2.4. Βλέπουμε την κανονικοποιημένη μεταβολή της αύξησης της hot-spot θερμοκρασίας πάνω από την top-oil θερμοκρασία, (στη δεξαμενή), για μια βηματική αύξηση του ρεύματος φόρτισης.



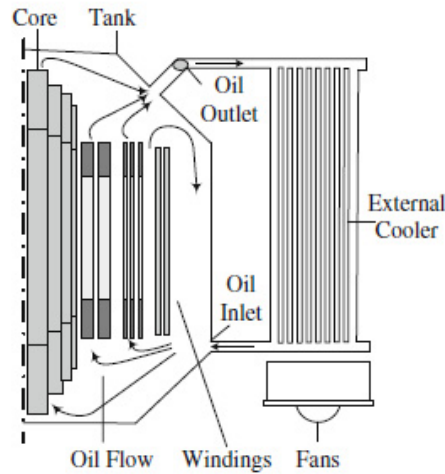
Σχήμα 2.4 Κανονικοποιημένη χρονική μεταβολή της αύξησης της θερμοκρασίας hot-spot πάνω από τη θερμοκρασία top-oil μέσα στη δεξαμενή για μία βηματική αύξηση στο ρεύμα φόρτισης [2.3]

### 2.2.3 Σχηματικές αναπαραστάσεις μεταφοράς θερμότητας των μετασχηματιστών

Ένας μετασχηματιστής ισχύος λαδιού κανονικά αποτελείται από ένα ζευγάρι τυλίγματα, το πρωτεύον και το δευτερεύον, συνδεδεμένα από ένα μαγνητικό κύκλωμα ή έναν πυρήνα [2.1]. Αυτή η διάταξη είναι βυθισμένη σε λάδι μετασχηματιστή, το οποίο ψύχει και μονώνει τα τυλίγματα. Παρότι ο χαλκός, από τον οποίο είναι κατασκευασμένα τα τυλίγματα, διατηρεί τη μηχανική του αντοχή ακόμα και σε θερμοκρασίες πολλών εκτοντάδων βαθμών κελσίου, το λάδι του μετασχηματιστή φθείρεται σημαντικά σε θερμοκρασίες πάνω από τους 140 ° C και η μόνωση από χαρτί επίσης φθείρεται έντονα για θερμοκρασίες πάνω από 90 ° C.

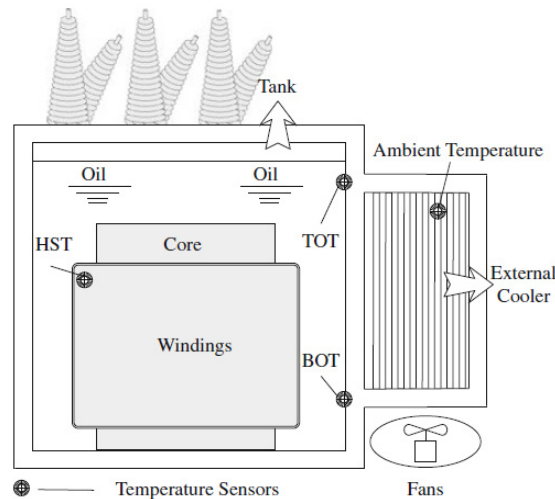
Επομένως, η κυκλοφορία του ψυκτικού λαδιού πρέπει να διασφαλίζει ότι η θερμοκρασία της μόνωσης θα διατηρείται σε όσο το δυνατό χαμηλότερα από τα παραπάνω επίπεδα.

Στο σχήμα 2.5 βλέπουμε τα βασικά τμήματα ενός μετασχηματιστή λαδιού, τα οποία περιλαμβάνουν τον πυρήνα, τα τυλίγματα, το μονωτικό λάδι, την είσοδο του λαδιού, την έξοδο του λαδιού, τη δεξαμενή και τις εξωτερικές πτυχές ψύξης του λαδιού.



Σχήμα 2.5 Σχηματική αναπαράσταση των ενεργών μερών ενός μετασχηματιστή λαδιού [2.1]

Προκειμένου να διερευνηθεί η θερμική δυναμική του μετασχηματιστή, στο σχήμα 2.6, έχουμε την απεικόνιση ενός μετασχηματιστή λαδιού με μια πιο αφαιρετική λογική σε σχέση με το σχήμα 2.5, στο οποίο έχουμε σαφή απεικόνιση των μερών, τα οποία αποτελούν το μετασχηματιστή. Μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι στο σχήμα 2.6 εμφανίζονται τέσσερις τύποι θερμοκρασιών, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θερμοκρασία λαδιού πυθμένα (BOT), η θερμοκρασία λαδιού κορυφής (TOT) και η θερμοκρασία θερμού σημείου (HST).



Σχήμα 2.6 Αφαιρετική απεικόνιση μετασχηματιστή και ονοματολογία [2.1]

Η θερμότητα, η οποία παράγεται από τις απώλειες, που εμφανίζονται στο μετασχηματιστή, μεταφέρεται διαμέσου του λαδιού του μετασχηματιστή και απομακρύνεται από το μετασχηματιστή διαμέσου των τοιχωμάτων της δεξαμενής του λαδιού και των ψυκτών με τρεις διαφορετικούς τρόπους, την αγωγή, τη μεταγωγή και την ακτινοβολία, όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

## 2.2.4 Θερμικά μοντέλα top-oil και hot-spot

### 2.2.4.1 Αναλογία θερμικού – ηλεκτρικού κυκλώματος

Για την κατανόηση του θερμικού μοντέλου, που αναπτύσσουμε, είναι απαραίτητο να εισάγουμε τους όρους της θερμικής αντίστασης και της θερμικής χωρητικότητας του λαδιού του μετασχηματιστή. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν στην ικανότητα του λαδιού να αντιστέκεται στη ροή της θερμότητας και να αποθηκεύει τη θερμότητα, αντίστοιχα [2.4].

Η θερμική διαδικασία μπορεί να προσομοιωθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$q \times dt = C_{th} \times d\theta + \frac{(\theta - \theta_{amb})}{R_{th}} \times dt \quad (1)$$

Αντιστοιχίζοντας τη θερμική διαδικασία, που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό του μετασχηματιστή με κάποια ηλεκτρική διεργασία, παρατηρούμε ότι υπάρχει η παρακάτω αντιστοιχία μεγεθών, σύμφωνα με την αναλογία θερμικών και ηλεκτρικών μεγεθών.

Θερμικά χαρακτηριστικά		Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	
Q	Παραγόμενη θερμότητα	I	Ρεύμα
Θ	θερμοκρασία	U	Τάση
R <sub>th</sub>	αντίσταση	R	Αντίσταση
C <sub>th</sub>	χωρητικότητα	C	Χωρητικότητα

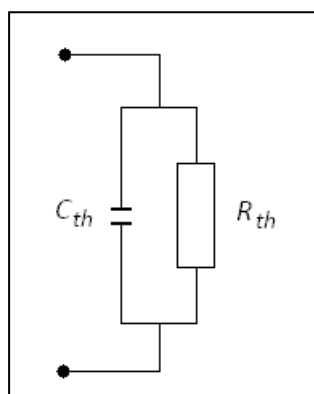
Πίνακας 2.1 Αναλογία θερμικών – ηλεκτρικών χαρακτηριστικών.

Κάνοντας χρήση των παραπάνω αναλογιών, μπορούμε να προχωρήσουμε στη μοντελοποίηση ενός θερμικού συστήματος μέσω ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μελετηθεί και η στατική, αλλά και η δυναμική συμπεριφορά ενός θερμικού συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση, που είναι και η απλούστερη, το θεωρούμενο σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Έχει δηλαδή παρέλθει αρκετός χρόνος από την επιβολή της διέγερσης και το αντίστοιχο ηλεκτρικό κύκλωμα, που προκύπτει, θα αποτελείται αποκλειστικά από ωμικές αντιστάσεις.

Στη δεύτερη περίπτωση, που παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αφού κατά μία έννοια συμπεριλαμβάνει και την πρώτη, το σύστημα εξετάζεται στον τομέα του χρόνου ή

της συχνότητας. Οι θερμικές του παράμετροι, μπορεί να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου και συνηθίζεται να λαμβάνουν και να διατηρούν μια σταθερή τιμή από την επίτευξη θερμικής ισορροπίας κι έπειτα. Ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία προκύπτουν από τη μοντελοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς θερμικών συστημάτων, αποτελούνται πλέον όχι από καθαρά ωμικές αντιστάσεις, αλλά από σύνθετες αντιστάσεις και αγωγιμότητες. Η φυσική σημασία των σύνθετων αυτών αντιστάσεων είναι η εξής : Το πραγματικό τους μέρος, που αντιστοιχίζεται στη θερμική αντίσταση, είναι μια ένδειξη του ρυθμού μεταφοράς θερμικής ενέργειας μέσω του υλικού, ενώ το φανταστικό τους μέρος, που πρακτικά προσομοιώνει τη θερμοχωρητικότητα του υλικού, είναι ένα μέτρο της ιδιότητάς του να αποθηκεύει θερμική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνεται υπόψη εξίσου η ικανότητα ενός υλικού να άγει θερμότητα και η ιδιότητά του να την απορροφά προς αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας.

Παρακάτω, φαίνεται ένα στοιχειώδες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα θερμικού συστήματος.



Η θερμική αντίσταση θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \frac{l}{S} [K / W] \quad (2)$$

όπου :

$\lambda$ : η θερμική αγωγιμότητα του υλικού [W/mK]

$l$ : η απόσταση κατά την οποία διαχέεται η θερμότητα [m]

$S$ : η διατομή της επιφάνειας, μέσω της οποίας διαχέεται η θερμότητα [m<sup>2</sup>]

Η θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται από τη σχέση :

$$C_{th} = \rho C_p V [J / K] \quad (3)$$

όπου:

$C_p$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού [J/kgK].

$\rho$  : η πυκνότητα του υλικού [kg/m<sup>3</sup>].

$V$  : ο θεωρούμενος όγκος του υλικού [m<sup>3</sup>].

Το παραπάνω, σχετικά απλό, ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα έχει νόημα μόνο υπό την παραδοχή ότι η θερμοκρασία είναι ίδια σε όλα τα σημεία του υλικού και σε κάθε χρονική στιγμή του μεταβατικού φαινομένου. Η υπόθεση αυτή, που συναντάται στη βιβλιογραφία ως « μέθοδος συγκεντρωμένης χωρητικότητας » (lumped heat capacity method), δεν ισχύει για ετερογενείς ή σχετικά μεγάλες διατάξεις.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπως είναι ένας μετασχηματιστής, που πρόκειται να προσομοιωθεί εν προκειμένω, καταστρώνεται ένα κύκλωμα, που αποτελείται από το συνδυασμό περισσότερων αντιστάσεων και πυκνωτών, όπως επίσης και πηγών.

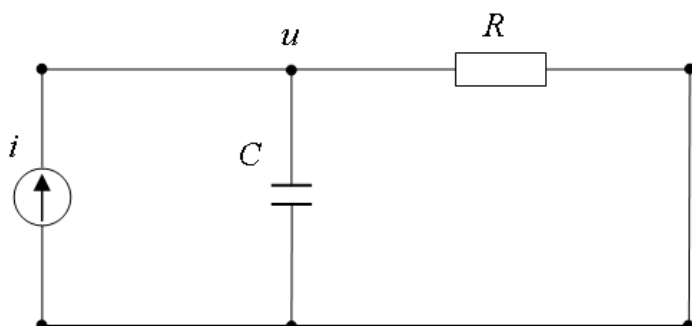
Σύμφωνα με αναλογίες μεταξύ ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών, η εξίσωση, που δόθηκε παραπάνω (1), μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$q = C_{th} \times \frac{d\theta}{dt} + \frac{(\theta - \theta_{amb})}{R_{th}} \quad (4)$$

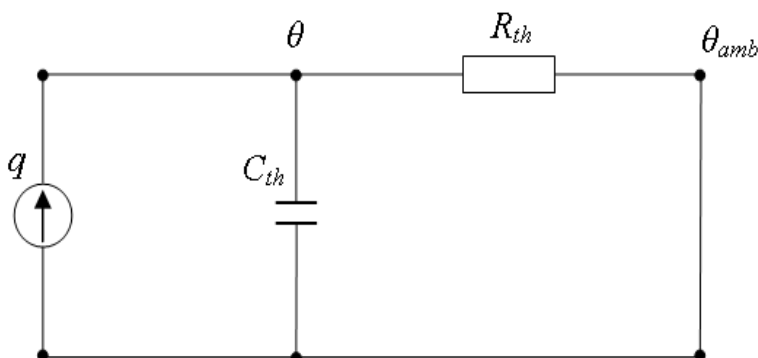
μπορεί να αντιστοιχιστεί με την εξίσωση ενός κυκλώματος RC

$$i = C_{th} \times \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_{th}} \quad (5)$$

το οποίο παριστάνεται από το παρακάτω κύκλωμα:



Το ανάλογο θερμικό κύκλωμα για το παραπάνω ηλεκτρικό είναι το ακόλουθο, από το οποίο μπορούμε να εξάγουμε και τα όποια αποτελέσματα για τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $\theta$  στα πλαίσια του κάθε θερμικού μοντέλου.



#### 2.2.4.2 Θερμικά χαρακτηριστικά μονωτικού λαδιού και προσομοίωσή τους

Το μονωτικό λάδι των μετασχηματιστών έχει χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζουν έντονη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Το χαρακτηριστικό, που μας ενδιαφέρει κυρίως κατά

την ανάπτυξη του θερμικού μοντέλου, είναι το ιξώδες του λαδιού, διότι παρουσιάζει την πιο έντονη εξάρτηση από τη θερμοκρασία σε σχέση με όλα τα άλλα χαρακτηριστικά.

Στον παρακάτω πίνακα, καταγράφονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του λαδιού του μετασχηματιστή:

$\theta, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$c_p, \text{W}_s/(\text{kg}^\circ\text{C})$	$K, \text{W}/(\text{m}^\circ\text{C})$	$\beta, 1/^\circ\text{C}$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$
-15	902	1700	0.1341	$6.2 \times 10^{-4}$	$450 \times 10^{-6}$
-5	896	1740	0.1333	$6.4 \times 10^{-4}$	$180 \times 10^{-6}$
5	890	1785	0.1326	$6.7 \times 10^{-4}$	$85 \times 10^{-6}$
15	884	1825	0.1318	$6.9 \times 10^{-4}$	$45 \times 10^{-6}$
25	879	1870	0.1310	$7.15 \times 10^{-4}$	$27 \times 10^{-6}$
35	873	1910	0.1303	$7.40 \times 10^{-4}$	$17 \times 10^{-6}$
45	867	1950	0.1295	$7.65 \times 10^{-4}$	$11.5 \times 10^{-6}$
55	861	1995	0.1287	$7.8 \times 10^{-4}$	$8.2 \times 10^{-6}$
65	855	2040	0.1280	$7.9 \times 10^{-4}$	$6.1 \times 10^{-6}$
75	849	2080	0.1272	$7.95 \times 10^{-4}$	$4.7 \times 10^{-6}$
85	844	2120	0.1264	$8.00 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-6}$
100	835	2180	0.1253	$8.00 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-6}$

Πίνακας 2.2 Μεταβολή χαρακτηριστικών λαδιού με τη θερμοκρασία.

όπου:

$\theta$ : θερμοκρασία

$\rho$ : πυκνότητα

$c_p$ : ειδική θερμότητα

$k$ : θερμική αγωγιμότητα

$\beta$ : συντελεστής θερμικής κυβικής διαστολής

$\nu$ : κινηματικό ιξώδες

Η εξάρτηση των παραπάνω χαρακτηριστικών του λαδιού από τη θερμοκρασία περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\mu = A_1 \times e^{\left[ \frac{A_2}{\theta_{oil} + 273} \right]} \quad (6)$$

$$c_{oil} = A_3 + A_4 \theta_{oil} \quad (7)$$



$$\rho_{oil} = A_5 + A_6\theta_{oil} \quad (8)$$

$$k = A_7 + A_8\theta_{oil} \quad (9)$$

$$\beta = A_9 \quad (10)$$

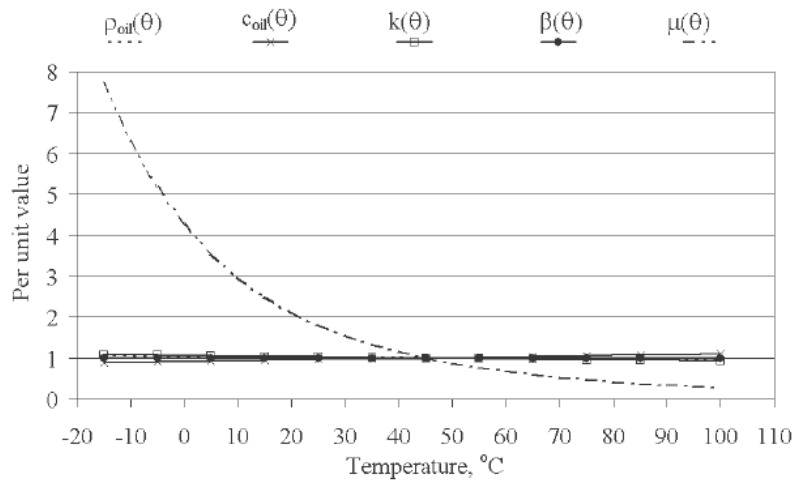
Στον παρακάτω πίνακα, βλέπουμε τις εννέα σταθερές των εξισώσεων αυτών για τα δύο βασικά μονωτικά λάδια :

Σταθερά	Λάδι μετασχηματιστή	Σιλικόνη
A <sub>1</sub>	0.13573×10 <sup>-5</sup>	0.12127 ×10 <sup>-5</sup>
A <sub>2</sub>	2797.3	1782.3
A <sub>3</sub>	1960	1424.
A <sub>4</sub>	4.005	2.513
A <sub>5</sub>	887	989
A <sub>6</sub>	-0.659	-0.870
A <sub>7</sub>	0.124	0.138
A <sub>8</sub>	-1.525×10 <sup>-4</sup>	-9.621×10 <sup>-4</sup>
A <sub>9</sub>	8.6 ×10 <sup>-4</sup>	9.5 ×10 <sup>-4</sup>

Πίνακας 2.3 Σταθερές υπολογισμού χαρακτηριστικών λαδιού.

Κατά κανόνα ισχύει, ότι για όλα τα λάδια μόνωσης μετασχηματιστή η μεταβολή του ιξώδους του μετασχηματιστή με τη θερμοκρασία είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη μεταβολή των άλλων χαρακτηριστικών του λαδιού. Για το λόγο αυτό, όλες οι φυσικές παράμετροι του λαδιού, εκτός από το ιξώδες, μπορούν να αντικατασταθούν από μία σταθερά.

Ένα παράδειγμα της μεταβολής του ιξώδους του λαδιού με τη θερμοκρασία, σε σύγκριση με τις άλλες φυσικές ιδιότητες του λαδιού του μετασχηματιστή, φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



Σχλημα 2.7 Μεταβολή χαρακτηριστικών λαδιού με τη θερμοκρασία.

Για να μπορέσουμε να κάνουμε την ανάλυσή μας, με βάση την παραπάνω αναλογία θερμικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε ότι τα θερμικά χαρακτηριστικά του υλικού είναι σταθερά και δεν μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Η θερμική μη γραμμικότητα των παραμέτρων του μετασχηματιστή περιγράφεται ορίζοντας τις αντίστοιχες μη γραμμικές αντιστάσεις στο εκάστοτε μοντέλο.

### 2.2.4.3 Σύστημα εξισώσεων θερμικού μοντέλου

#### Μη γραμμική θερμική αντίσταση

Η μη γραμμική θερμική αντίσταση του λαδιού του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τη θεωρία μεταφοράς της θερμότητας, δίνεται από τη σχέση:

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h \times A} = \frac{\Delta \theta_{oil}}{q} \quad (11)$$

όπου:

$h$  : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

$A$  : περιοχή

$\Delta \theta_{oil}$  : κλίση τη θερμοκρασίας του λαδιού

$q$ : θερμότητα παραγόμενη από τις αντίστοιχες απώλειες

Σύμφωνα με τη θεωρία μεταφοράς της θερμότητας, η συναγωγή της ροής του λαδιού γύρω από κάθετες κεκλιμένες και οριζόντιες πλάκες υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο :

$$N_u = C \times [G_r \times P_r]^n \quad (12)$$

όπου **C** και **n** είναι εμπειρικές σταθερές, οι οποίες εξαρτώνται από τον τρόπο της ανάδευσης του μονωτικού λαδιού. Συγκεκριμένα οι τιμές, που παίρνουν, είναι :

Τρόπος ανάδευσης λαδιού	C	N
Φυσική κυκλοφορία	0.59	0.25
Εξαναγκασμένη κυκλοφορία	0.10	0.33

Ο αριθμός *Nusselt* ( $N_u$ ) είναι η αναλογία της μεταφερόμενης θερμότητας με συναγωγή, ως προς τη μεταφερόμενη ενέργεια με αγωγή, κατά μήκος μιας διαχωριστικής επιφάνειας στο εσωτερικό ενός υγρού. Περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_u = \frac{h \times L}{k} \quad (13)$$

όπου:

L: η χαρακτηριστική διάσταση, (μήκος, πλάτος ή διάμετρος)

k: θερμική αγωγιμότητα του λαδιού

h : συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής

Ο αριθμός *Prandtl* ( $P_r$ ) είναι ο λόγος του κινηματικού ιξώδους του λαδιού, (της ορμής διάχυσης του λαδιού), προς τη θερμική διάχυση. Ορίζεται ως :

$$P_r = \frac{c_p \times \mu}{k} \quad (14)$$

όπου:

$c_p$ : ειδική θερμότητα λαδιού

$\mu$ : δυναμικό ιξώδες λαδιού

Τέλος, ο αριθμός *Grashof* ( $G_r$ ) είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, που σχετίζεται με τη δυναμική των ρευστών και τη μεταφορά της θερμότητας και προσεγγίζει το λόγο της πλευστότητας ως προς την ιξώδη δύναμη, που ασκείται σε ένα ρευστό.

$$G_r = \frac{L^3 \times \rho_{oil}^2 \times g \times \beta \times (\Delta \theta_{oil})}{\mu^2} \quad (15)$$

όπου:

g: σταθερά βαρύτητας

$\rho_{oil}$ : πυκνότητα λαδιού

$\beta$ : συντελεστής θερμικής επέκτασης

$\Delta \theta_{oil}$ : κλίση θερμοκρασίας λαδιού (K)

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (5) τις παραπάνω τρεις εξισώσεις, καταλήγουμε στη σχέση :

$$\frac{h \times L}{k} = C \times \left[ \left( \frac{c_{oil} \times \mu}{k} \right) \times \left( \frac{L^3 \times \rho_{oil}^2 \times g \times \beta \times (\Delta \theta_{oil})}{\mu^2} \right) \right]^n \quad (16)$$

Όπως προαναφέρθηκε, εκτός από το ιξώδες, όλα τα άλλα χαρακτηριστικά του λαδιού, που συμπεριλαμβάνονται στους παραπάνω τύπους, παρουσιάζουν μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία και επομένως μπορούν να αντικατασταθούν από μία σταθερά  $C_1$ . Επομένως, λύνοντας την (9) ως προς h, καταλήγουμε πλέον στην παρακάτω σχέση:

$$h = C_1 \times \left( \frac{\Delta \theta_{oil}}{\mu} \right)^n \quad (17)$$

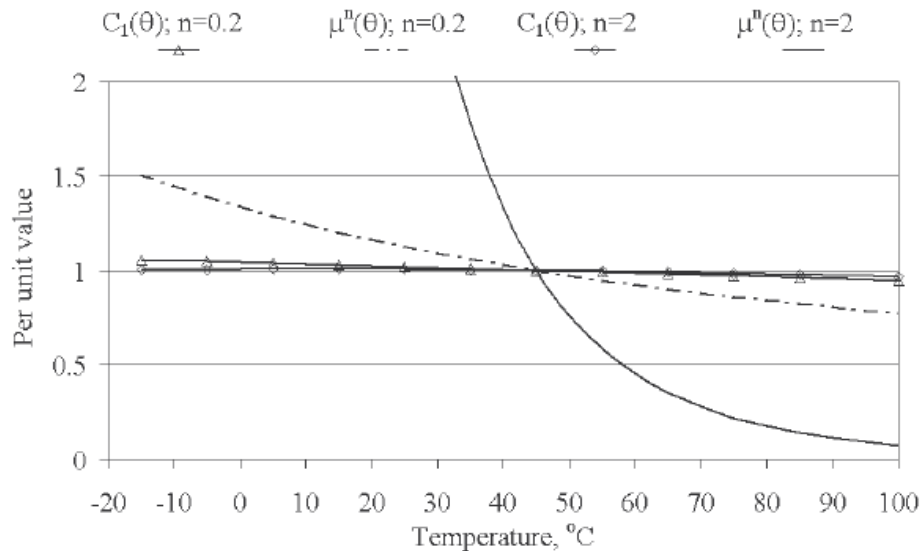
Το ιξώδες του λαδιού υπολογίζεται από τον τύπο  $\mu = A_1 \times e^{\left[ \frac{A_2}{\theta_{oil} + 273} \right]}$  (18)

όπου  $A_1 = 0.13573 \times 10^{-5}$  και  $A_2 = 2797.3$ .

Η θερμοκρασία, στην οποία υπολογίζεται το ιξώδες του λαδιού, είναι η θερμοκρασία κορυφής του λαδιού τόσο στο τμήμα του θερμικού μοντέλου, που υπολογίζει τη θερμοκρασία *top-oil*, όσο και στο τμήμα, που υπολογίζει τη θερμοκρασία *hot-spot*. Αντίθετα, με την έντονη εξάρτηση του ιξώδους  $\mu$  του λαδιού από τη θερμοκρασία, η σταθερά  $C_1$  της σχέσης (10) παρουσιάζει πολύ μικρή εξάρτηση από αυτή. Η σχέση, από την οποία παριστάνεται η  $C_1$ , δίνεται παρακάτω. Ενδεικτικά αναφέρουμε, ότι για θερμοκρασίες κανονικής λειτουργίας του μετασχηματιστή, από 40°C έως 100°C και για  $n=0.2$  και  $n=2$ , το διάστημα, στο οποίο μεταβάλλεται η σταθερά  $C_1$ , είναι από 1 έως 0,944 και από 1 έως 0,964 ανά μονάδα, αντίστοιχα.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση φαίνεται καθαρά η διαφορετική επίδραση, που έχει η θερμοκρασία στα δύο μεγέθη.

$$C_1 = C \times \left[ \rho_{oil}^2 \times g \times \beta \times k^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \times L^{\left(\frac{3n-1}{n}\right)} \times c_{oil} \right]^{(n)} \quad (19)$$



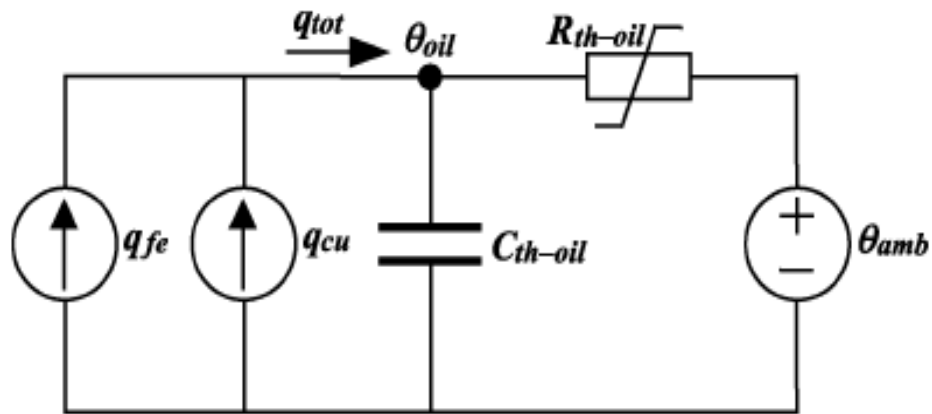
Σχήμα 2.8 Μεταβολή ιξώδους και σταθεράς C με τη θερμοκρασία.

Το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή αποτελείται από δύο επιμέρους μοντέλα:

α.) Το μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας top-oil και β.) το μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας hot-spot, το οποίο κάνει χρήση των στοιχείων, που υπολογίζονται από το προηγούμενο, ( top – oil μοντέλο ). Για την ανάπτυξη και των δύο επιμέρους μοντέλων κάνουμε χρήση της θεωρίας μεταφοράς θερμότητας και της αναλογίας, που παρατηρείται ανάμεσα στα θερμικά και στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε σε δύο θερμικά κυκλώματα, με βάση τα οποία υπολογίζουμε τις θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται και επηρεάζουν τη ζωή του μετασχηματιστή.

### 2.3 Θερμικό μοντέλο υπολογισμού top-oil θερμοκρασίας

Το μοντέλο υπολογισμού της top-oil θερμοκρασίας δίνεται από το ακόλουθο θερμικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.9 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα υπολογισμού της top-oil θερμοκρασίας.

Τα στοιχεία, που αποτελούν το κύκλωμα αυτό, είναι:

$q_{fe}$ :θερμότητα παραγόμενη από απώλειες κενού φορτίου.

$q_{cu}$ :θερμότητα παραγόμενη από απώλειες σε ονομαστικό φορτίο.

$q_{tot}$ :θερμότητα παραγόμενη από συνολικές απώλειες.

$\theta_{amb}$ :θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$R_{th-oil}$ :μη-γραμμική θερμική αντίσταση του λαδιού του μετασχηματιστή.

$C_{th-oil}$ :ισοδύναμη θερμική χωρητικότητα του λαδιού του μετασχηματιστή.

$\theta_{oil}$ :θερμοκρασία top-oil.

Από το θερμικό αυτό κύκλωμα προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$q_{fe} + q_{cu} = C_{th-oil} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{R_{th-oil}} \quad (20)$$

Αντικαθιστούμε στη σχέση (20), τη μη γραμμική θερμική αντίσταση από τη σχέση (4) και προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$q_{fe} + q_{cu} = C_{th-oil} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{\frac{1}{h \times A}} \quad (21)$$

και στη συνέχεια, αντικαθιστώντας στην εξίσωση αυτή το  $h$  από τη σχέση (10), καταλήγουμε στη μορφή:

$$(q_{fe} + q_{cu}) \times \left( \frac{\mu^n}{C_1 \times A} \right) = \left( \frac{\mu^n}{C_1 \times A} \right) \times C_{th-oil} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n} \quad (22)$$

Το  $\mu$  του μετασχηματιστή, το οποίο συμβολίζουμε στην ανάλυσή μας με την μεταβλητή  $\mu$ , μπορούμε να το εκφράσουμε ως:

$$\mu = \mu_{pu} \times \mu_{rated} \quad (23)$$

και εν συνεχεία να ορίσουμε τα ακόλουθα σταθερά μεγέθη, με βάση στοιχεία, που έχουν ήδη οριστεί:

$$R_{th-oil,rated} = \frac{1}{C_1 \times A} \times \left( \frac{\mu_{rated}}{\Delta\theta_{oil,rated}} \right)^n \quad (24)$$

$$\Delta\theta_{oil,rated} = (q_{fe} + q_{cu})_{rated} \times R_{th-oil,rated} \quad (25)$$

$$\tau_{oil,rated} = R_{th-oil,rated} \times C_{th-oil,rated} \quad (26)$$

$$R = \frac{q_{cu}}{q_{fe}} \quad (27)$$

$$K = \frac{I}{I_{rated}} \quad (28)$$

Τα παραπάνω μεγέθη, συμβολίζουν τα εξής:

$R_{th-oil,rated}$ : ονομαστική μη-γραμμική θερμική αντίσταση.

$\Delta\theta_{oil,rated}$ : ονομαστική αύξηση της θερμοκρασίας top-oil πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$\tau_{oil,rated}$ : ονομαστική χρονικά σταθερά top-oil.

R: λόγος απωλειών φορτίου σε ονομαστικό φορτίο προς απώλειες κενού φορτίου.

K: συντελεστής φόρτισης, όπου I το ρεύμα φορτίου και  $I_{rated}$  το ονομαστικό ρεύμα.

Ο υπολογισμός της χρονικής σταθεράς  $\tau_{oil,rated}$  βασίζεται στην υπολογιστική μέθοδο, που προτείνεται από τον οδηγό φόρτισης των μετασχηματιστών ορυκτού λαδιού από το IEEE.

Σε ονομαστική φόρτιση η χρονική σταθερά top-oil υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\tau_{oil,rated} = \frac{C_{th-oil} \cdot \Delta\theta_{oil,rated}}{P} \cdot 60 \quad (29)$$

όπου:

$\tau_{oil,rated}$  : ονομαστική χρονική σταθερά top-oil (σε λεπτά,min).

$\Delta\theta_{oil,rated}$  : ονομαστική αύξηση της θερμοκρασίας top-oil πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε Κέλβιν,K).

P : συνολικές απώλειες (σε watts,W).

$C_{th-oil}$  : θερμική χωρητικότητα μετασχηματιστή (Wh/°C).

Η θερμική χωρητικότητα για μετασχηματιστές με τύπο ψύξης ONAN, ONAF και OFAF δίνεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση με βάση τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση:

$$C_{th-oil} = 0.48 \cdot M_{FLUID} \quad (30)$$

όπου  $M_{FLUID}$  είναι το βάρος του λαδιού σε χιλιόγραμμα (kg)

Με βάση τις σταθερές, που ορίστηκαν παραπάνω, η διαφορική εξίσωση (15) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{1 + R \times K^2}{1 + R} \times \mu_{pu}^n \times \Delta\theta_{oil,rated} = \mu_{pu}^n \times \tau_{oil,rated} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n}}{\Delta\theta_{oil,rated}^n} \quad (31)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτυπώνει το θερμικό μοντέλο για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας top-oil. Τα μεγέθη, που εμφανίζονται σε αυτήν, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ως εξής:

- Σταθερές :  $R, n, \tau_{oil,rated}, \Delta\theta_{oil,rated}$
- Μεταβλητές εισόδου :  $K, \mu_{pu}, \theta_{amb}$
- Μεταβλητές εξόδου :  $\theta_{oil}$
- Ανεξάρτητες μεταβλητές :  $t$

Η σταθερά  $n$ , όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, εξαρτάται από τον τρόπο ανάδευσης του λαδιού του μετασχηματιστή και θεωρώντας στην ανάλυσή μας ότι έχουμε ελασματώδη ανάδευση  $n=0.25$  του λαδιού. Η εκτίμηση της σταθεράς αυτής είναι καθαρά εμπειρική. Για να κάνουμε μία σωστή εκτίμηση της σταθεράς αυτής, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε επίσης αν η θερμότητα, που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, διαχέεται με ελεύθερη ή βεβιασμένη μεταγωγή. Τόσο οι μετασχηματιστές χωρίς εξωτερική ψύξη, όσο και οι μετασχηματιστές με εξωτερική ψύξη με μη βεβιασμένη κίνηση του αέρα (air natural, AN), υποθέτουμε ότι λειτουργούν με ελεύθερη διάχυση της θερμότητας και επομένως η σταθερά  $n$  παίρνει την τιμή 0,25. Ειδικότερα, μετασχηματιστές με εξωτερική ψύξη, που γίνεται με βεβιασμένη κυκλοφορία του αέρα μέσω ανεμιστήρων, μοντελοποιούνται καλύτερα με τη βεβιασμένη μεταγωγή της θερμότητας και σε αυτήν την περίπτωση έχουμε χαμηλότερες τιμές για τη σταθερά  $n$ , που βέβαια ισοσταθμίζεται από την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας. Για cold start μετασχηματιστή ή για μηδενική ταχύτητα λαδιού στο εσωτερικό της δεξαμενής του μετασχηματιστή, η σταθερά  $n$  παίρνει διαφορετικές εμπειρικές τιμές, ανάλογα με τον τρόπο ψύξης του μετασχηματιστή.



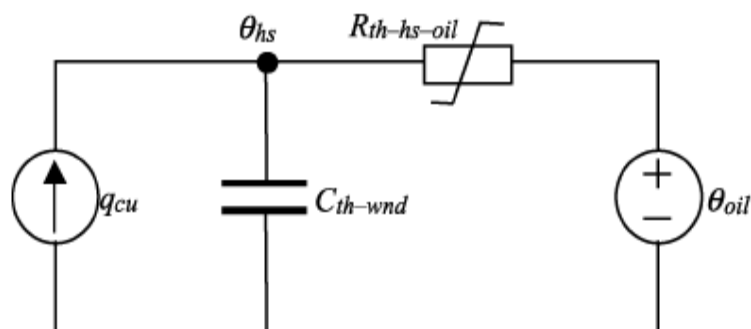
Τρόπος ανάδευσης	N		
	Μετασχηματιστής με εξωτερική ψύξη		Μετασχηματιστής χωρίς εξωτερική ψύξη
	ONAF/OFAF	ONAN	ONAN
μηδενική αρχική ταχύτητα λαδιού cold start	0.5	0	0.25
αρχική ταχύτητα λαδιού > 0 μετασχηματιστή σε φόρτιση	0.2	0.25	0.25

Πίνακας 2.4 Σταθερά  $n$  για διάφορους τύπους ψύξης μετασχηματιστή για τον υπολογισμό της top-oil θερμοκρασίας.

## 2.4 Θερμικό μοντέλο υπολογισμού hot-spot θερμοκρασίας

Στο τμήμα αυτό, αναπτύσσουμε το θερμικό μοντέλο υπολογισμού της hot-spot θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με βάση τη θερμοκρασία top-oil, την οποία έχουμε ήδη υπολογίσει, σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση.

Το θερμικό κύκλωμα, που προσομοιώνει το μοντέλο hot-spot, είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 2.10 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα υπολογισμού της hot-spot θερμοκρασίας.

Στο κύκλωμα αυτό παριστάνονται ως ιδανική πηγή θερμότητας οι απώλειες πλήρους φορτίου, ενώ ως ιδανική πηγή τάσης παριστάνεται η θερμοκρασία top-oil. Τα στοιχεία, που απαρτίζουν το παραπάνω κύκλωμα, είναι τα εξής:

$q_{cu}$  :θερμότητα, παραγόμενη από απώλειες πλήρους φορτίου.

$\theta_{oil}$ :θερμοκρασία top-oil.

$R_{th-hs-oil}$ :μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ τυλίγματος και λαδιού.

$C_{th-oil}$ :θερμική χωρητικότητα τυλίγματος.

$\theta_{hs}$ :θερμοκρασία hot-spot

Η διαφορική εξίσωση για το παραπάνω θερμικό κύκλωμα είναι η εξής:

$$q_{wdn} = C_{th-wdn} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{R_{th-hs-oil}} \quad (32)$$

Η μη γραμμική θερμική αντίσταση  $R_{th-hs-oil}$  προκύπτει από τη θεωρία μεταφοράς της θερμότητας. Υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$R_{th-hs-oil} = R_{th-wdn} + R_{th-insul} + R_{th-insul-oil} \quad (33)$$

όπου:

$R_{th-wdn}$ :θερμική αντίσταση του τυλίγματος.

$R_{th-insul}$ :θερμική αντίσταση μόνωσης τυλίγματος.

$R_{th-insul-oil}$ :μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ μόνωσης τυλίγματος και λαδιού.

Αν συγκρίνουμε τις τρεις παραπάνω αντιστάσεις, καταλήγουμε στο ότι συνδέονται από τις παρακάτω σχέσεις, όταν η μέτρηση της hot-spot θερμοκρασίας γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια της μόνωσης, που περιβάλλει τους αγωγούς:

$$R_{th-insul-oil} \gg R_{th-wdn} \quad (34)$$

$$R_{th-insul-oil} \gg R_{th-insul} \quad (35)$$

Η σχέση υπολογισμού της μη γραμμικής αντίστασης μεταξύ τυλίγματος και λαδιού (18) , σύμφωνα με τις παραπάνω ανισότητες, γίνεται :

$$R_{th-hs-oil} = \frac{1}{h \times A} \quad (36)$$

Η σχέση υπολογισμού επομένως της  $R_{th-hs-oil}$  είναι όμοια με τη σχέση υπολογισμού της μη γραμμικής θερμικής αντίστασης του λαδιού, που υπολογίσαμε προηγουμένως από τη σχέση (4). Επομένως, ο συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας για το μοντέλο υπολογισμού της hot-spot θερμοκρασίας είναι απολύτως ανάλογος του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για το μοντέλο top-oil. Συνεπώς, κατ' αναλογία με τη σχέση (10), έχουμε:

$$h = C_1 \times \left( \frac{\Delta\theta_{hs}}{\mu} \right)^n \quad (37)$$

Η σταθερά  $C_1$  είναι η ίδια όπως και το  $\mu$ , αφού υπολογίζεται με βάση τη θερμοκρασία  $\theta_{oil}$ , ενώ το  $\Delta\theta_{hs}$  είναι η κλίση της hot-spot προς την top-oil θερμοκρασία.

Αντικαθιστώντας την  $R_{th-hs-oil}$  από τη σχέση (36) στη διαφορική, που προκύπτει από το θερμικό κύκλωμα, έχουμε την ακόλουθη μορφή:

$$q_{wdn} = C_{th-wdn} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{\frac{1}{h \times A}} \quad (38)$$

Εν συνεχεία, αντικαθιστούμε και πάλι στην παραπάνω σχέση το συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας από τη σχέση (37) και έχουμε πλέον την παρακάτω διαφορική :

$$q_{wdn} \times \left( \frac{\mu^n}{C_1 \times A} \right) = \left( \frac{\mu^n}{C_1 \times A} \right) \times C_{th-wdn} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + (\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1} \quad (39)$$

Στο μοντέλο hot-spot , όπως και στο μοντέλο top-oil, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας τον τρόπο, με τον οποίο επιδρά η μεταβολή του ιξώδους του λαδιού στα θερμικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή.

Ορίζουμε το ιξώδες μ ως:

$$\mu = \mu_{pu} \times \mu_{rated} \quad (40)$$

και κάποιες απαραίτητες σταθερές για την ανάλυση μας, όπως στη συνέχεια:

$$R_{th-hs-oil,rated} = \frac{1}{C_1 \times A} \times \left( \frac{\mu_{rated}}{\Delta\theta_{hs,rated}} \right)^n \quad (41)$$

$$\Delta\theta_{hs,rated} = q_{wdn,rated} \times R_{th-hs-oil,rated} = H \times g_r \quad (42)$$

$$\tau_{wdn,rated} = R_{th-hs-oil,rated} \times C_{th-wdn,rated} \quad (43)$$

Τα μεγέθη, που ορίζονται παραπάνω, είναι τα εξής:

$R_{th-hs-oil,rated}$  :ονομαστική μη-γραμμική αντίσταση μεταξύ hot-spot και top-oil.

$\Delta\theta_{hs,rated}$  :ονομαστική αύξηση της hot-spot θερμοκρασίας πάνω από την top-oil θερμοκρασία.

$\tau_{wdn,rated}$  :ονομαστική χρονική σταθερά τυλίγματος.

Στη σχέση (42) εισάγουμε το συντελεστή hot-spot **H** και την κλίση της ονομαστικής μέσης θερμοκρασίας τυλίγματος προς τη μέση θερμοκρασία λαδιού **g<sub>r</sub>**.

Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και την εξάρτηση των απωλειών στα τυλίγματα του μετασχηματιστή από τη θερμοκρασία. Αυτή η εξάρτηση εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{wdn,pu}(\theta_{hs}) = P_{dc,pu} \times \left( \frac{\theta_{hs} + \theta_k}{\theta_{hs,rated} + \theta_k} \right) + P_{eddy,pu} \times \left( \frac{\theta_{hs,rated} + \theta_k}{\theta_{hs} + \theta_k} \right) \quad (44)$$

όπου :

$P_{dc,pu}$  :ανά μονάδα DC απώλειες (απώλειες πυρήνα).

$P_{eddy,pu}$  :ανά μονάδα απώλειες δινореυμάτων.

$\theta_k$  :συντελεστής θερμοκρασίας για τη διόρθωση των απωλειών.

225 για αλουμίνιο και 235 για χαλκό.

Όπως παρατηρούμε, οι ανά μονάδα DC απώλειες μεταβάλλονται ανάλογα, ενώ οι απώλειες δινореυμάτων αντιστρόφως ανάλογα με τη θερμοκρασία.

Σύμφωνα με τα όσα ορίσαμε παραπάνω, καταλήγουμε στην εξίσωση, που αποτυπώνει το θερμικό μοντέλο για τη hot-spot θερμοκρασία.

$$\left\{ K^2 \times P_{wdn,pu}(\theta_{hs}) \right\} \times \mu_{pu}^n \times \Delta\theta_{hs,rated} = \mu_{pu}^n \times \tau_{wdn,rated} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1}}{\Delta\theta_{hs,rated}^n} \quad (45)$$

Τα μεγέθη, που εμφανίζονται στην παραπάνω διαφορική εξίσωση, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Σταθερές :  $n, \tau_{wdn,rated}, \Delta\theta_{hs,rated} (=H \cdot g_r), P_{dc,pu}, P_{eddy,pu}$
- Μεταβλητές εισόδου :  $K, \mu_{pu}, \theta_{oil}$
- Μεταβλητές εξόδου :  $\theta_{hs}$
- Ανεξάρτητες μεταβλητές :  $t$

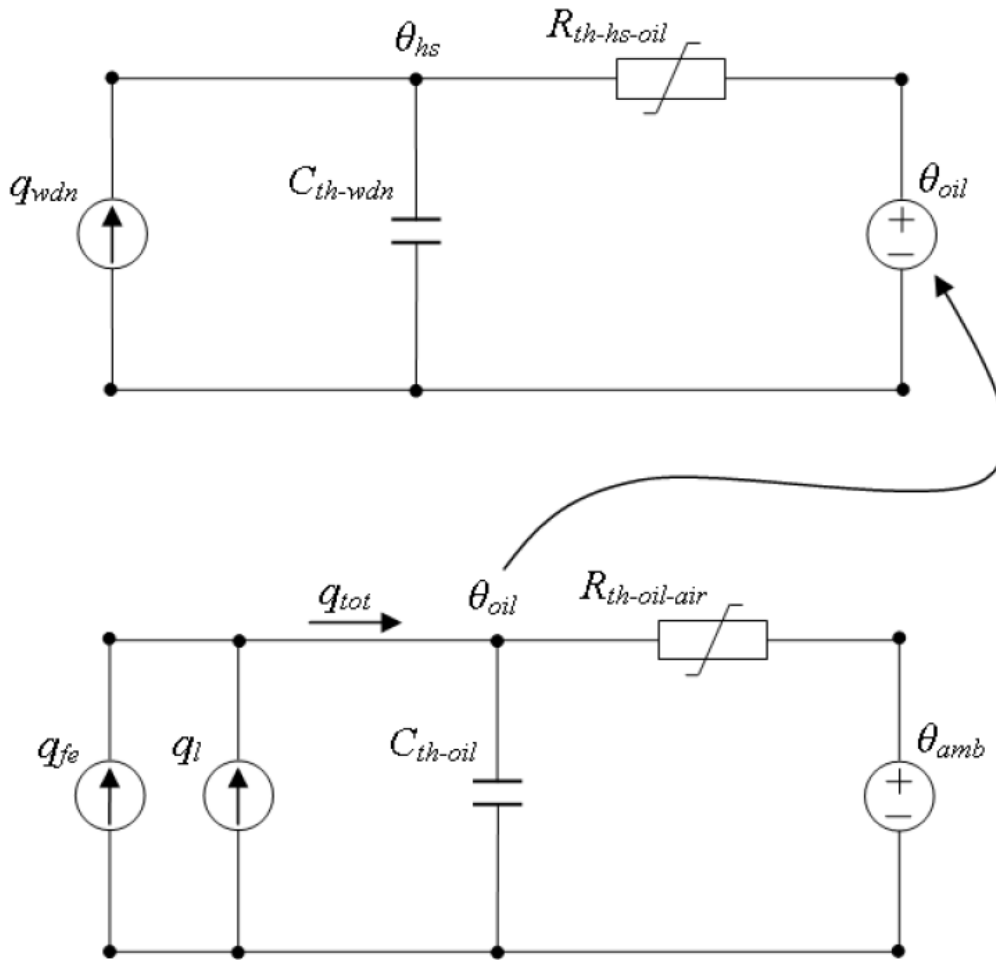
Όσον αφορά στη σταθερά  $\eta$  όπως και στο θερμικό μοντέλο tor-oil, θεωρούμε ότι έχει την τιμή 0,25. Η υπόθεση αυτή στηρίζεται στο ότι θεωρούμε ότι έχουμε ελασματώδη ανάδευση του λαδιού στο εσωτερικό του μετασχηματιστή. Πρέπει όμως να λάβουμε υπόψη μας και τον τρόπο ψύξης των επιφανειών των ελιγμάτων του μετασχηματιστή και το αν ο μετασχηματιστής, που εξετάζουμε, έχει ή όχι εξωτερική ψύξη. Την περίπτωση μετασχηματιστή με εξωτερική ψύξη και εσωτερική ψύξη των ελιγμάτων με φυσική κυκλοφορία του λαδιού (oil natural, ON) μπορούμε να τη μοντελοποιήσουμε, υποθέτοντας ελεύθερη μεταγωγή της θερμότητας, οπότε η τιμή της σταθεράς  $\eta$  είναι ίση με 0,25, όπως όταν έχουμε ελασματώδη ανάδευση του λαδιού. Αντίθετα, οι περιπτώσεις μετασχηματιστών με εξωτερική ψύξη, είτε η κυκλοφορία του λαδιού γίνεται βεβιασμένα είτε με φυσικό τρόπο, μοντελοποιούνται με τον ίδιο τρόπο και η τιμή της σταθεράς  $\eta$  εξαρτάται από την επίδραση της πλευστότητας και τη διαφορά ανάμεσα στο ύψος των τυλιγμάτων και των κέντρων εκπομπής της θερμότητας.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι εμπειρικές τιμές του  $\eta$  για τους διαφορετικούς τρόπους εσωτερικής και εξωτερικής ψύξης του μετασχηματιστή στο μοντέλο hot-spot.

Τρόπος ανάδευσης	N	
	Με εξωτερική ψύξη	Χωρίς εξωτερική ψύξη
	ONAF/ANAN/OFAF	ONAN
Μηδενική αρχική ταχύτητα λαδιού cold start	2	0,25
αρχική ταχύτητα λαδιού > 0 μετασχηματιστή σε φόρτιση	0.2	0.25

Πίνακας 2.5 Σταθερά  $\eta$  για διάφορους τύπους ψύξης μετασχηματιστή για τον υπολογισμό της hot-spot θερμοκρασίας.

Τελικά, το συνολικό θερμικό κύκλωμα για το υψηλότερο επίπεδο του μετασχηματιστή ή για τη διαδοχική σύνδεση του θερμικού υψηλότερου επιπέδου του μετασχηματιστή φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.11 Σύνδεση θερμικού μοντέλου υπολογισμού top-oil θερμοκρασίας και θερμικού μοντέλου υπολογισμού hot-spot θερμοκρασίας.

## 2.5 Χρονική σταθερά top-oil για τα θερμικά μοντέλα

Σύμφωνα με τη θεωρία ηλεκτρικών κυκλωμάτων, για ένα RC κύκλωμα η χρονική σταθερά ορίζεται ως το χρονικό διάστημα, που απαιτείται για τη φόρτιση ενός πυκνωτή κατά το 63.2 % της πλήρους φόρτισης, ή για την εκφόρτισή του έως το 36.8 % της αρχικής τιμής της φόρτισης. Η τιμή της χρονικής σταθεράς είναι ίση προς το γινόμενο της αντίστασης του κυκλώματος  $R_{el}$  επί τη χωρητικότητα του  $C_{el}$ . Έτσι, εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{el} = R_{el} \cdot C_{el} \quad (46)$$

Η χρονική σταθερά συνήθως μετράται προσδιορίζοντας το μήκος του χρονικού διαστήματος, που απαιτείται για ένα συγκεκριμένο κλάσμα της μεταβολής της θερμοκρασίας, από την αρχική τιμή της έως την τελική τιμή, που λαμβάνει. Γενικά, το 63 % της μεταβολής της θερμοκρασίας συμβαίνει σε ένα χρονικό διάστημα ίσο προς τη χρονική σταθερά, ανεξαρτήτως της σχέσης ανάμεσα στην αρχική και στην τελική θερμοκρασία.

Με βάση λοιπόν την αναλογία ηλεκτρικών και θερμικών κυκλωμάτων, που έχουμε αναλύσει και παραπάνω, για ένα θερμικό κύκλωμα η **θερμική σταθερά χρόνου** ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th} \quad (47)$$

όπου :

$\tau_{th}$  : θερμική χρονική σταθερά ( λεπτά, min.)

$R_{th}$  : θερμική αντίσταση (K/W)

$C_{th}$  : θερμική χωρητικότητα (W·min /°C)

Επιπρόσθετα, για ονομαστικές συνθήκες, όταν η θερμοκρασία φτάνει στην τελική της τιμή, η θερμική αντίσταση  $R_{th}$  είναι :

$$R_{th,rated} = \frac{\Delta\theta_{rated}}{q_{rated}} \quad (48)$$

όπου :

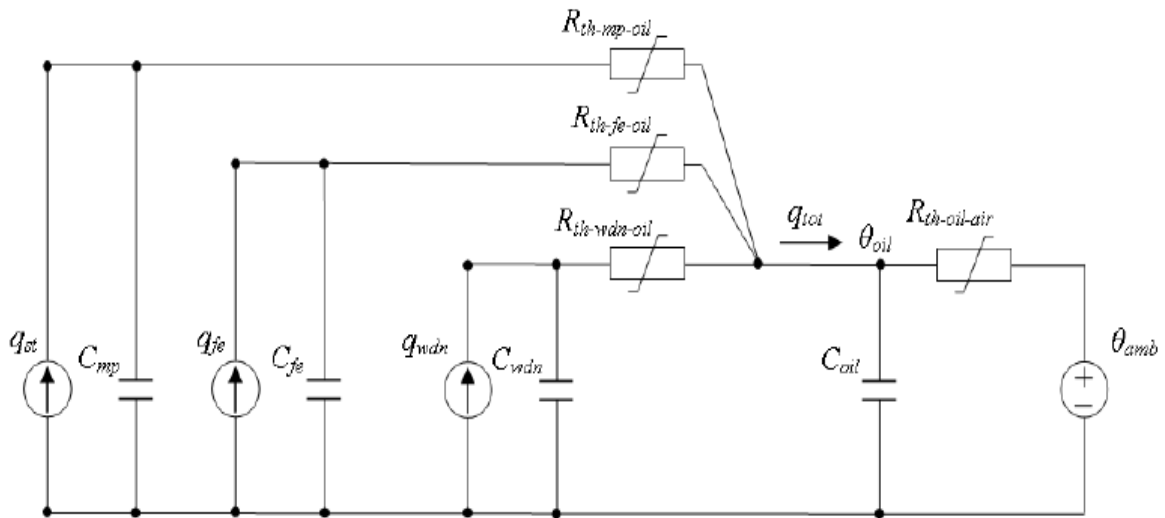
$\Delta\theta_{rated}$  : ονομαστική άνοδος της θερμοκρασίας.

$q_{rated}$  : απώλειες υπό ονομαστική φόρτιση.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (48) στην (47), ο γενικός τύπος της θερμικής σταθεράς χρόνου είναι :

$$\tau_{th,rated} = C_{th,rated} \frac{\Delta\theta_{rated}}{q_{rated}} \quad (49)$$

Προκειμένου να κάνουμε χρήση της σχέσης (49) για τον υπολογισμό της θερμικής σταθεράς χρόνου για το top-oil μοντέλο, είναι απαραίτητο να ορίσουμε την ισοδύναμη θερμική χωρητικότητα του λαδιού του μετασχηματιστή. Παρακάτω, παρατίθεται ένα πληρέστερο ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.12 Πληρέστερο ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα του μετασχηματιστή.

όπου :

$q_{st}$  : θερμότητα, παραγόμενη από απώλειες δινορευμάτων.

$q_{fe}$  : θερμότητα, παραγόμενη από απώλειες πυρήνα.

$q_{wdn}$  : θερμότητα, παραγόμενη από απώλειες στα τυλίγματα.

$C_{wdn}$  : θερμική χωρητικότητα του χαλκού.

$C_{fe}$  : θερμική χωρητικότητα του πυρήνα.

$C_{oil}$  : θερμική χωρητικότητα της δεξαμενής και των άλλων μεταλλικών τμημάτων.

$C_{mp}$  : θερμική χωρητικότητα της δεξαμενής και των άλλων μεταλλικών τμημάτων του μετασχηματιστή.

$R_{th-oil-air}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ λαδιού και αέρα.

$R_{th-wnd-oil}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ τυλιγμάτων και λαδιού.

$R_{th-fe-oil}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ πυρήνα και λαδιού.

$R_{th-mp-oil}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ της δεξαμενής και των άλλων μεταλλικών τμημάτων του μετασχηματιστή και του λαδιού.

$\theta_{oil}$  : θερμοκρασία λαδιού.

$\theta_{amb}$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Το κύκλωμα αυτό είναι αναπαράσταση του top-oil θερμικού κυκλώματος, το οποίο, ενώ είναι πολύ πληρέστερο από το κύκλωμα, που χρησιμοποιήθηκε για τη μέχρι τώρα ανάλυση, είναι απλοποιημένο. Η απλοποίηση αυτή συνίσταται στο ότι η απευθείας μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στα τυλίγματα και στα άλλα τμήματα του μετασχηματιστή, όπως η δεξαμενή και ο πυρήνας, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, λόγω των μονωτικών κυλίνδρων, που τοποθετούνται ανάμεσά τους. Κατά την ίδια έννοια, θεωρείται αμελητέα η απευθείας μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στη δεξαμενή και στον πυρήνα.



Οι απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή είναι ίσες προς το άθροισμα των απωλειών, που παρουσιάζονται πάνω στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και των απωλειών, που εμφανίζονται από τα αναπτυσσόμενα στο μετασχηματιστή δινορεύματα στα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή. Οι συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή είναι :

$$q_{tot} = q_{fe} + q_{wdn} + q_{st} = \frac{q_{fe}}{q_{tot}} \times q_{tot} + \frac{q_{wdn}}{q_{tot}} \times q_{tot} + \frac{q_{st}}{q_{tot}} \times q_{tot} \quad (50)$$

Τα παραπάνω κλάσματα μπορούμε να τα συμβολίσουμε, ως εξής :

$$\frac{q_{fe}}{q_{tot}} = Y_{fe} \quad (51)$$

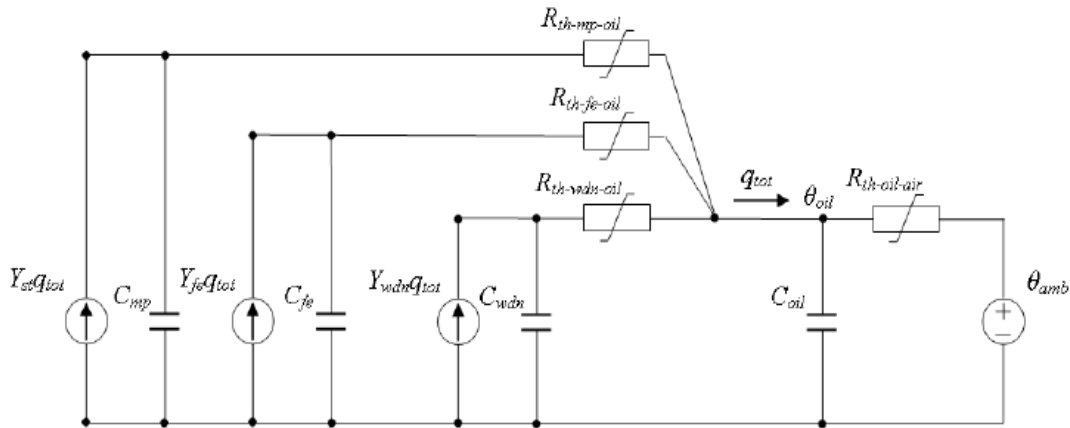
$$\frac{q_{wdn}}{q_{tot}} = Y_{wdn} \quad (52)$$

$$\frac{q_{st}}{q_{tot}} = Y_{st} \quad (53)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (51), (52), και (53) στη σχέση (50), η εξίσωση των συνολικών απωλειών γίνεται :

$$q_{tot} = Y_{fe} \times q_{tot} + Y_{wdn} \times q_{tot} + Y_{st} \times q_{tot} \quad (54)$$

Με τις σχέσεις αυτές το παραπάνω κύκλωμα παίρνει τη μορφή:



Σχήμα 2.13 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή μετά από απλοποιήσεις.

όπου :

$q_{tot}$  : θερμότητα παραγόμενη από συνολικές απώλειες.

$Y_{fe}$  : ποσοστό απωλειών πυρήνα στις συνολικές απώλειες.

$Y_{wnd}$  : ποσοστό απωλειών στα τυλίγματα του μετασχηματιστή στις συνολικές απώλειες.

$Y_{st}$  : ποσοστό απωλειών δινορευμάτων στις συνολικές απώλειες.

$C_{wnd}$  : θερμική χωρητικότητα του χαλκού.

$C_{fe}$  : θερμική χωρητικότητα του πυρήνα.

$C_{oil}$  : θερμική χωρητικότητα της δεξαμενής και των άλλων μεταλλικών τμημάτων.

$C_{mp}$  : θερμική χωρητικότητα της δεξαμενής και των άλλων μεταλλικών τμημάτων του μετασχηματιστή.

$R_{th-oil-air}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ λαδιού και αέρα.

$R_{th-wnd-oil}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ τυλιγμάτων και λαδιού.

$R_{th-fe-oil}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ πυρήνα και λαδιού.

$R_{th-mp-oil}$  : μη γραμμική θερμική αντίσταση μεταξύ της δεξαμενής και των άλλων μεταλλικών τμημάτων του μετασχηματιστή και λαδιού.

$\theta_{oil}$  : θερμοκρασία λαδιού.

$\theta_{amb}$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος.

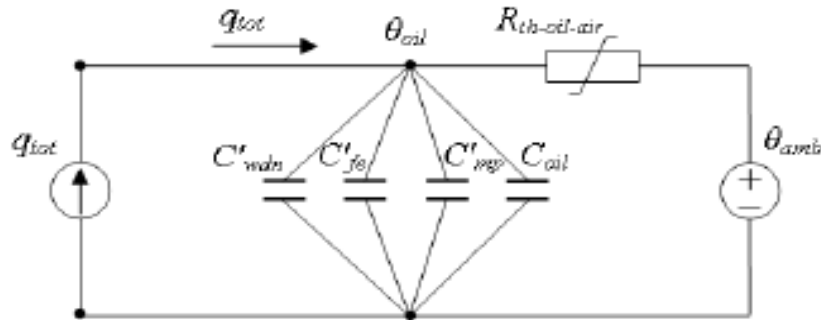
Με βάση τις μετρούμενες αυξήσεις της θερμοκρασίας και τις προκαλούμενες απώλειες για διάφορες μονάδες μετασχηματιστή, το θερμικό κύκλωμα μπορεί να απλοποιηθεί επιπλέον, κάνοντας την παρατήρηση, ότι οι θερμικές αντιστάσεις  $R_{th-wnd-oil}$ ,  $R_{th-fe-oil}$  και  $R_{th-mp-oil}$  παίρνουν πολύ χαμηλές τιμές, της τάξεως των  $5 \times 10^{-5}$  K/W, και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες στη συγκεκριμένη ανάλυση. Επίσης, οι θερμικές χωρητικότητες του κάθε κλάδου μπορούν να συμβολισθούν:

$$C_{wnd}' = Y_{wnd} C_{wnd}$$

$$C_{fe}' = Y_{fe} C_{fe}$$

$$C_{mp}' = Y_{mp} C_{mp}$$

Μετά από αυτές τις απλοποιήσεις, προκύπτει το παρακάτω θερμικό κύκλωμα:



Σχήμα 2.14 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή μετά από απλοποιήσεις

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από το παραπάνω κύκλωμα, οι τέσσερις χωρητικότητες  $C_{wdn}'$ ,  $C_{fe}'$ ,  $C_{mp}'$  και  $C_{oil}$ , μπορούν να αντικατασταθούν από την ισοδύναμή τους χωρητικότητα,  $C_{th-oil}$  με την παρακάτω σχέση:

$$C_{th-oil} = C_{wdn}' + C_{fe}' + C_{mp}' + C_{oil} \quad (55)$$

Με αυτήν την αλληλουχία απλοποιήσεων, φτάνουμε τελικά στο ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα του μετασχηματιστή, στο οποίο βασίζεται η ανάπτυξη του θερμικού μοντέλου.

Σε περίπτωση, που έχουμε μετασχηματιστή με εξωτερική ψύξη και ζγκ-ζαγκ ροή του λαδιού ανάμεσα στα τυλίγματα, η θερμική χωρητικότητα υπολογίζεται ως εξής.

$$C_{th-oil} = Y_{wdn} \times m_{wdn} \times c_{wdn} + Y_{fe} \times m_{fe} \times c_{fe} + Y_{mp} \times m_{mp} \times c_{mp} + O_{oil} \times m_{oil} \times c_{oil} \quad (56)$$

όπου :

$m_{wdn}$  : βάρος των τυλιγμάτων (σε κιλά, kg).

$m_{fe}$  : το βάρος του πυρήνα (σε κιλά, kg).

$m_{mp}$  : το βάρος της δεξαμενής και των μεταλλικών μερών του μετασχηματιστή (σε κιλά, kg).

$m_{oil}$  : το βάρος του λαδιού (σε κιλά, kg).

$c_{wdn}$  :ειδική θερμική χωρητικότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα τυλίγματα ( $c_{cu} = 0.11$  και  $c_{al} = 0.25$ ) (σε Wh/kg°C).

$c_{fe}$  : ειδική θερμική χωρητικότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο πυρήνας ( $= 0.13$ ) (σε Wh/kg°C).

$c_{mp}$  : ειδική θερμική χωρητικότητα του υλικού, από το οποίο είναι κατασκευασμένη η δεξαμενή και τα μεταλλικά μέρη του μετασχηματιστή ( $= 0.13$ ) (σε Wh/kg°C).

$c_{oil}$  : ειδική θερμική χωρητικότητα του λαδιού του μετασχηματιστή ( $= 0.51$ ) (σε Wh/kg°C).

$O_{oil} = 0.86$  ο συντελεστής διόρθωσης για το λάδι, όταν έχουμε ONAF, ONAN, OFAF τύπους ψύξης του λαδιού.

$O_{oil} = 0.86$  ο συντελεστής διόρθωσης για το λάδι, όταν έχουμε ODAF τύπο ψύξης του λαδιού.

Οι τιμές του συντελεστή διόρθωσης  $O_{oil}$  προκύπτουν με βάση παρατηρήσεις, που έχουν γίνει σε κάποιον αριθμό θερμικών δοκιμών, όπως αυτές προκύπτουν και από τη σχετική βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία τα καλύτερα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς ελαμβάνοντο όταν η αποθήκευση της θερμότητας βασιζόταν στα δύο τρίτα του βάρους της δεξαμενής και στο 85 % του λαδιού, διότι το κατώτερο τμήμα του μετασχηματιστή παρέμενε σχετικά κρύο.

Η ισοδύναμη θερμική χωρητικότητα του λαδιού του μετασχηματιστή χωρίς εξωτερική ψύξη και η οδηγούμενη οριζόντια ροή του λαδιού διαμέσου των τυλιγμάτων, ( η έλλειψη ψυκτών και οριζόντιας ροής του λαδιού επηρεάζει κατευθείαν τη ροή του λαδιού μέσα στη δεξαμενή και επιβραδύνει την ψυκτική διαδικασία), υπολογίζεται σύμφωνα με τον IEEE Loading Guide :

$$C_{th-oil} = c_{wdn} \times m_{wdn} + c_{fe} \times m_{fe} + c_{mp} \times m_{mp} + c_{oil} \times m_{oil} \quad (57)$$

Η χρονική σταθερά της κορυφής του λαδιού ( top-oil) για το φορτίο, που εφαρμόζεται στο θερμικό κύκλωμα, μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση :

$$\tau_{oil, rated} = C_{th-oil, rated} \frac{\Delta\theta_{oil, rated}}{q_{tot, rated}} \times 60 \quad (58)$$

όπου :

$\tau_{oil, rated}$  : είναι η ονομαστική τιμή της χρονικής σταθεράς top-oil.

$q_{tot, rated}$  : συνολικές απώλειες σε ονομαστικό φορτίο, διορθωμένες για την επιπρόσθετη θερμότητα, που παράγεται στην ονομαστική μέση hot-spot θερμοκρασία  $\theta_{e, rated}$ .

$C_{th-oil, rated}$  : ισοδύναμη θερμική χωρητικότητα του λαδιού του μετασχηματιστή, υπολογισμένη στην ονομαστική μέση hot-spot θερμοκρασία  $\theta_{e, rated}$ .

$\Delta\theta_{oil, rated}$  : ονομαστική άνοδος θερμοκρασίας λαδιού κορυφής (top-oil).

## 2.6 Χαρακτηριστικά Ζωής της Μόνωσης των Μετασχηματιστών

Η γήρανση ή η φθορά της μόνωσης του μετασχηματιστή είναι μία χρονική συνάρτηση της θερμοκρασίας, της περιεχόμενης υγρασίας και του περιεχόμενου οξυγόνου [2.6] . Για τα σύγχρονα συστήματα διατήρησης του λαδιού, η συνεισφορά της υγρασίας και του οξυγόνου στη φθορά της μόνωσης μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, αφήνοντας τη θερμοκρασία της μόνωσης ως ρυθμιστικό παράγοντα. Στις μελέτες, που αφορούν στη γήρανση του μετασχηματιστή, συνηθίζεται να θεωρούμε τη γήρανση αποτέλεσμα της υψηλότερης θερμοκρασίας (hot-spot temperature), που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του μετασχηματιστή.

Όπως στις περισσότερες συσκευές, έτσι και στους μετασχηματιστές η διανομή της θερμότητας δεν είναι ομοιόμορφη. Το τμήμα, το οποίο κατά τη λειτουργία αναπτύσσει την υψηλότερη θερμοκρασία, είναι αναμενόμενο να υποστεί και τη μεγαλύτερη φθορά. Για το λόγο αυτό, στις μελέτες γήρανσης είναι σύνηθες να θεωρείται ότι οι επιπτώσεις της γήρανσης προκαλούνται από τη hot-spot θερμοκρασία.

Αυτή η θερμοκρασία hot spot είναι αναμενόμενο να αναπτύσσεται πάνω στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, όπου και έχουμε τις μεγαλύτερες απώλειες. Το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών προέρχεται από τις απώλειες αντίστασης, που προκαλούνται από τη ροή του ρεύματος στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Το τύλιγμα υψηλής τάσης διαρρέεται από χαμηλότερο ρεύμα σε σύγκριση με το τύλιγμα χαμηλής τάσης. Επομένως, αναμένουμε στο τύλιγμα χαμηλής τάσης να αναπτύσσεται και η hot spot θερμοκρασία του μετασχηματιστή.

## 2.6.1 Εξισώσεις γήρανσης της μόνωσης

Πειραματικά στοιχεία έχουν δείξει ότι η σχέση, που συνδέει τη γήρανση της μόνωσης του μετασχηματιστή και τη θερμοκρασία, ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

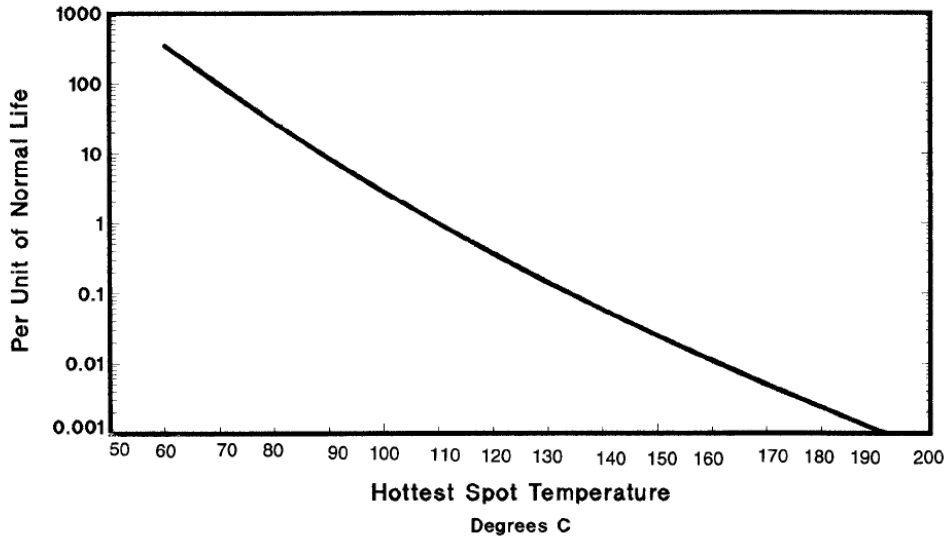
$$\text{per unit life} = A \cdot \text{EXP}^{\left[ \frac{B}{\Theta_H + 273} \right]} \quad (59)$$

όπου :

$\Theta_H$  : η hottest-spot θερμοκρασία του τυλίγματος σε °C.

A,B : σταθερές.

Στην παρακάτω καμπύλη του σχήματος 2.15 συσχετίζεται η ανά μονάδα ζωή της μόνωσης του μετασχηματιστή με τη hottest-spot θερμοκρασία τόσο για τους μετασχηματιστές διανομής όσο και για τους μετασχηματιστές ισχύος.



Σχήμα 2.15 Ζωή μόνωσης μετασχηματιστή συναρτήσει θερμοκρασίας.

Η παραπάνω καμπύλη υποδηλώνει το βαθμό, στον οποίον η γήρανση επιταχύνεται πέραν του κανονικού για θερμοκρασίες πέραν των 110°C και επιβραδύνεται πέραν του κανονικού για θερμοκρασίες κάτω από τους 110°C. Η εξίσωση της παραπάνω καμπύλης είναι η εξής:

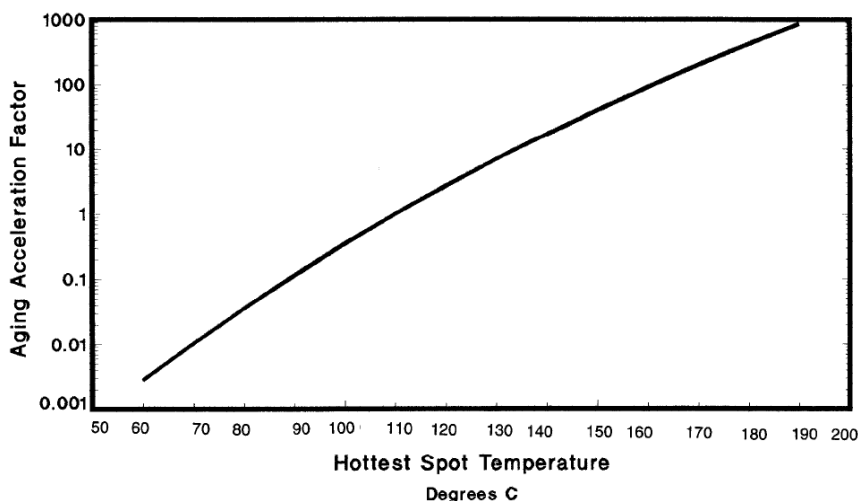
$$\text{Per unit life} = 9.80 \times 10^{-18} \text{ EXP}^{\left[ \frac{1500}{\Theta_H + 273} \right]} \quad (60)$$

Με βάση την καμπύλη του σχήματος 2.16, μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή επιτάχυνσης της γήρανσης ( $F_{AA}$ ) για ένα δεδομένο φορτίο και θερμοκρασία ή για ένα μεταβαλλόμενο φορτίο και θερμοκρασία για μία περίοδο 24 ωρών.

Ο συντελεστής επιτάχυνσης της γήρανσης ( $F_{AA}$ ) εκφράζεται ως εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας hot-spot  $\theta_{hs}$ .

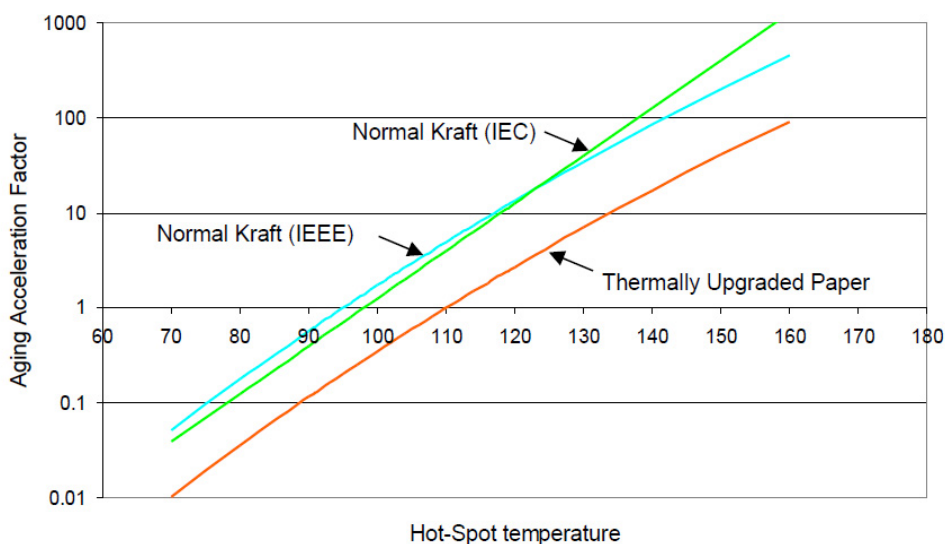
$$F_{AA} = \exp\left( \frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_{hs} + 273} \right) \quad (61)$$

Στο σχήμα 2.16, που ακολουθεί, βλέπουμε την καμπύλη, η οποία παριστά το συντελεστή επιτάχυνσης της γήρανσης συναρτήσει της θερμοκρασίας hot-spot για θερμοκρασίες από 50 έως 200 °C.



Σχήμα 2.16 Συντελεστής επιτάχυνσης της γήρανσης (θερμοκρασία αναφοράς 110°C)

Επίσης, στο παρακάτω σχήμα 2.17 βλέπουμε πώς επηρεάζει η hot-spot θερμοκρασία τη διάρκεια ζωής του μονωτικού χαρτιού.



Σχήμα 2.17 Επίδραση της θερμοκρασίας στο ρυθμό γήρανσης του χαρτιού της μόνωσης.

Οι σύγχρονοι μετασχηματιστές κάνουν χρήση θερμικά αναβαθμισμένου χαρτιού, στο οποίο έχει γίνει χημική επεξεργασία, με σκοπό τη βελτίωση της σταθερότητας της κυτταρικής δομής του. Για το χαρτί αυτού του είδους, η ονομαστική hot-spot θερμοκρασία είναι 110 °C και έχει παρατηρηθεί ότι σε μια αύξηση 7 °C διπλασιάζεται ο συντελεστής γήρανσης. Για πιο παλιούς μετασχηματιστές, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από απλό Kraft χαρτί, η ονομαστική hot-spot θερμοκρασία είναι σύμφωνα με το IEEE 95 °C ή σύμφωνα με το IEC 97°C. Το απλό αυτό χαρτί είναι επίσης πολύ ευαίσθητο στη θερμοκρασία και σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, (αν υποθέσουμε θερμοκρασία hot-spot 140 °C), ο συντελεστής επιτάχυνσης της γήρανσης αγγίζει τα 100, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η λειτουργία του

μετασχηματιστή για μια ώρα στη θερμοκρασία αυτή προκαλεί φθορές ίδιες με αυτές, που θα είχαμε αν λειτουργούσε ο μετασχηματιστής 100 ώρες στην ονομαστική θερμοκρασία.

Σε περίπτωση, που το χαρτί της μόνωσης εμπεριέχει νερό, υπάρχει ακόμα μεγαλύτερη επικινδυνότητα, διότι το νερό με την υψηλή θερμοκρασία μπορεί να διαφύγει από το χαρτί υπό μορφή φυσαλίδων αέρα. Αυτές οι φυσαλίδες μπορεί να κινηθούν με τη ροή του λαδιού ή να παγιδευτούν στο τύλιγμα. Και οι δύο αυτές περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσουν καταστροφή της μόνωσης.

Στον παρακάτω πίνακα 2.6 παρατίθενται ενδεικτικά συντελεστές επιτάχυνσης της γήρανσης για ορισμένες θερμοκρασίες hot-spot, που εμφανίζονται κατά την εφαρμογή του μοντέλου.

HST (°C)	F <sub>AA</sub>	HST (°C)	F <sub>AA</sub>
70	0.0104	120	2.7089
80	0.0358	130	6.9842
90	0.1156	140	17.1995
100	0.3499	150	40.5890
110	1.0	160	92.0617

Πίνακας 2.6 Συντελεστής επιτάχυνσης της γήρανσης για διάφορες τιμές της hot-spot θερμοκρασίας.

Η ισοδύναμη διάρκεια ζωής στη θερμοκρασία αναφοράς, που πρόκειται να καταναλωθεί σε μια δοσμένη χρονική περίοδο για έναν πραγματικό κύκλο θερμοκρασιών, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση :

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (62)$$

όπου :

F<sub>EQA</sub> : ισοδύναμος συντελεστής γήρανσης για το σύνολο της χρονικής περιόδου.

n : δείκτης του χρονικού διαστήματος t.

N : συνολικός αριθμός χρονικών διαστημάτων.

Δt<sub>n</sub> : χρονικό διάστημα.

F<sub>AA<sub>n</sub></sub> : συντελεστής επιτάχυνσης της γήρανσης για ένα χρονικό διάστημα Δt<sub>n</sub>.

Η καμπύλη της ανά μονάδα ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για να υπολογίσουμε την ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή επί της συνολικής ζωής της μόνωσης. Για να το κάνουμε αυτό, είναι



απαραίτητο να προσδιορίσουμε την κανονική διάρκεια ζωής της μόνωσης ενός μετασχηματιστή σε χρόνια ή σε ώρες, στη θερμοκρασία αναφοράς, έστω κι αν αυτός ο προσδιορισμός γίνει με τρόπο σχετικά αυθαίρετο. Οι τιμές αναφοράς για την κανονική διάρκεια ζωής για ένα μετασχηματιστή, από τον οποίο έχει απομακρυνθεί η υγρασία και το οξυγόνο, μπορούν να επιλεγούν από τον παρακάτω πίνακα.

Βάση	Κανονική ζωή μετασχηματιστή	
	Ώρες	Χρόνια
50% διατήρηση αντοχής σε ευελκισμό της μόνωσης	65000	7.42
25% διατήρηση αντοχής σε ευελκισμό της μόνωσης	135000	15.41
200 βαθμοί πολυμερισμού διατηρούνται στη μόνωση	150000	17.12
Ερμηνεία των δεδομένων από το test για τη λειτουργική ζωή των μετασχηματιστών διανομής	180000	20.55

#### ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ:

Οι τιμές της αντοχής εφελκισμού ή του βαθμού πολυμερισμού (degree of polymerization, D.P) προσδιορίστηκαν από τη γήρανση, που επήλθε σε δείγματα μόνωσης, εγκλεισμένα σε σφραγισμένο σωλήνα, από τα οποία έχει απομακρυνθεί οποιαδήποτε υγρασία και είναι βυθισμένα σε λάδι, χωρίς οξυγόνο.

Πίνακας 2.7 Κανονική ζωή της μόνωσης σε θερμοκρασία αναφοράς 110 °C, 65°C μέση άνοδος θερμοκρασίας τυλίγματος. Περίπτωση μόνωσης, από την οποία έχει απομακρυνθεί η υγρασία και το οξυγόνο.

Αν προσδιορίσουμε ποιά είναι η κανονική διάρκεια ζωής της μόνωσης για ένα μετασχηματιστή, από τον οποίο έχει απομακρυνθεί καλά η υγρασία και το οξυγόνο, μπορούμε με την παρακάτω σχέση να υπολογίσουμε το ποσοστό επί τοις εκατό της απώλειας ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Επιλέγουμε η κανονική διάρκεια ζωής να είναι 180.000 ώρες (20,55 χρόνια).

$$\% \text{Loss of life} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal insulation life}} \quad (63)$$

Στον πίνακα 2.8 παρατίθενται χρονικές διάρκειες για διάφορες απώλειες ζωής, θεωρώντας κανονική ζωή της μόνωσης τις 180.000 ώρες. Η κανονική ποσοστιαία απώλεια ζωής για λειτουργία στην ονομαστική hot-spot θερμοκρασία των 110°C για 24 ώρες είναι

0,0133%. Στον παρακάτω πίνακα οι χρονικές διάρκειες, που δεν φαίνονται, είναι πάνω από 24 ώρες.

Hot-spot °C	F <sub>AA</sub>	Ποσοστιαία απώλεια ζωής						
		0.0133	0.02	0.05	1	2	3	4
<b>110</b>	<b>1.00</b>	24	-	-	-	-	-	-
<b>120</b>	<b>2.71</b>	8.86	13.3	-	-	-	-	-
<b>130</b>	<b>6.98</b>	3.44	5.1	12.9	-	-	-	-
<b>140</b>	<b>17.2</b>	1.39	2.1	5.2	10.5	20.9	-	-
<b>150</b>	<b>40.6</b>	0.56	0.89	2.2	4.4	8.8	13.3	17.7
<b>160</b>	<b>92.1</b>	0.26	0.39	0.98	1.98	3.9	5.9	7.8
<b>170</b>	<b>201.2</b>	0.12	0.18	0.45	0.89	1.8	2.7	3.6
<b>180</b>	<b>424.9</b>	0.06	0.08	0.21	0.42	0.84	1.27	1.7
<b>190</b>	<b>868.8</b>	0.028	0.04	0.10	0.21	0.41	0.83	1.66
<b>200</b>	<b>1723</b>	0.014	0.02	0.05	0.10	0.21	0.31	0.42

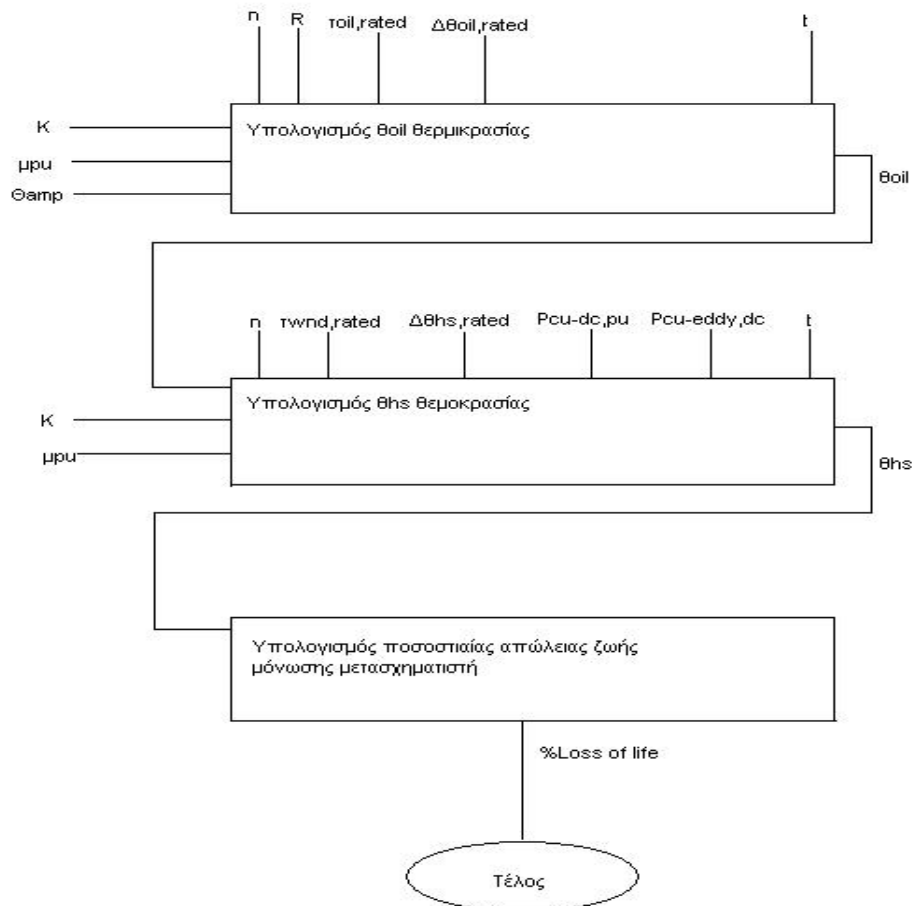
Πίνακας 2.8 Χρονικές διάρκειες σε ώρες για συνεχή λειτουργία σε θερμοκρασία, που υπερβαίνει την ονομαστική hot-spot θερμοκρασία για διαφορετικές τιμές της απώλειας ζωής.

Από το μοντέλο γήρανσης μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή είναι πολύ ευαίσθητη στη μεταβολή της hot-spot θερμοκρασίας και συνδέεται με αυτή με μία εκθετική σχέση. Η θερμοκρασία αναφοράς είναι οι 110 ° C. Εάν η hot-spot θερμοκρασία κυμαίνεται σε τιμές πολύ χαμηλότερες από την τιμή αυτή, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, ενώ αν εντοπίζεται σε υψηλότερα επίπεδα, μπορεί η αναμενόμενη ζωή να είναι πολύ μικρή.

## 2.7 Συνοπτική παρουσίαση αλγορίθμου

### 2.7.1 Σχέσεις – Διάγραμμα ροής

Στο παρακάτω σχήμα 2.18 φαίνεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου, που έχει αναπτυχθεί. Χωρίζεται σε τρία διαδοχικά στάδια. Από το πρώτο τμήμα υπολογίζουμε τη θερμοκρασία  $t_{\text{or-oil}}$ , που αναπτύσσεται στο μετασχηματιστή. Το δεύτερο τμήμα του αλγορίθμου μας δίνει τη θερμοκρασία  $t_{\text{hot-spot}}$  του μετασχηματιστή, που υπολογίζεται για το τύλιγμα χαμηλής τάσης. Το τελευταίο τμήμα του αλγορίθμου είναι αυτό, κατά το οποίο υπολογίζεται η ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.18 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου.

Ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των τελικών σχέσεων, στις οποίες βασίστηκε η ανάπτυξη τόσο του θερμικού μοντέλου του μετασχηματιστή όσο και του μοντέλου γήρανσης της μόνωσης, μέσω του παραπάνω αλγορίθμου.

➤ Υπολογισμός top-oil θερμοκρασίας

$$R = \frac{q_{cu}}{q_{fe}}$$

$$C_{th-oil} = 0.48 \cdot M_{FLUID}$$

$$\tau_{oil,rated} = \frac{C_{th-oil} \cdot \Delta\theta_{oil,rated}}{P} \cdot 60$$

$$\mu = A_1 \times e^{\left[ \frac{A_2}{\theta_{oil} + 273} \right]}$$

$$\frac{1 + R \times K^2}{1 + R} \times \mu_{pu}^n \times \Delta\theta_{oil,rated} = \mu_{pu}^n \times \tau_{oil,rated} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n}}{\Delta\theta_{oil,rated}^n}$$

➤ Υπολογισμός hot-spot θερμοκρασίας

$$P_{wdn,pu}(\theta_{hs}) = P_{dc,pu} \times \left( \frac{\theta_{hs} + \theta_k}{\theta_{hs,rated} + \theta_k} \right) + P_{eddy,pu} \times \left( \frac{\theta_{hs,rated} + \theta_k}{\theta_{hs} + \theta_k} \right)$$

$$\begin{aligned} \{K^2 \times P_{wdn,pu}(\theta_{hs})\} \times \mu_{pu}^n \times \Delta\theta_{hs,rated} \\ = \mu_{pu}^n \times \tau_{wdn,rated} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})^{n+1}}{\Delta\theta_{hs,rated}^n} \end{aligned}$$

➤ Υπολογισμός ποσοστιαίας απώλειας ζωής μόνωσης μετασχηματιστή

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_{hs} + 273}\right)$$

$$F_{EQA} = \sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n / \sum_{n=1}^N \Delta t_n$$

$$\% \text{Loss of life} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal insulation life}}$$

Η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται για μετασχηματιστή με δεδομένα ονομαστικά στοιχεία. Οι **σταθερές** του αλγορίθμου εξαρτώνται στα δύο πρώτα στάδια, που αποτελούν το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή, από τα ονομαστικά στοιχεία και τα κατασκευαστικά του εκάστοτε μετασχηματιστή. Για το τρίτο τμήμα, που αφορά στο μοντέλο γήρανσης της μόνωσης, οι σταθερές είναι ανεξάρτητες από το μετασχηματιστή, στον οποίον εφαρμόζεται το μοντέλο, και αφορούν παραδοχές που γίνονται, όπως είναι το διάστημα κανονικής ζωής της μόνωσής του.

Οι **μεταβλητές**, που δέχεται ο αλγόριθμος ως είσοδο, είναι το φορτίο, που εφαρμόζεται πάνω στο μετασχηματιστή, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ιξώδες του λαδιού, το οποίο μεταβάλλεται συναρτησί της θερμοκρασίας top-oil για κάθε χρονική στιγμή. Είσοδο του θερμικού μοντέλου υπολογισμού της hot-spot θερμοκρασίας αποτελεί και η top-oil θερμοκρασία, που υπολογίζεται στο πρώτο τμήμα. Η hot-spot θερμοκρασία αποτελεί την είσοδο του τρίτου τμήματος υπολογισμού της ποσοστιαίας απώλειας ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή.

Το **χρονικό διάστημα**, για το οποίο υπολογίζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του φορτίου στο μετασχηματιστή, επιλέγεται ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Η ανάλυση γίνεται σε λεπτά. Θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια ενός λεπτού, το φορτίο, που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και το ιξώδες του λαδιού παραμένουν αμετάβλητα. Η παραδοχή αυτή μπορεί να γίνει χωρίς να οδηγηθούμε σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

## 2.8 Εφαρμογή θερμικού μοντέλου και σύγκριση αποτελεσμάτων με μετρούμενες τιμές

Με βάση το μοντέλο, που αναπτύχθηκε παραπάνω, πραγματοποιούμε δοκιμές για μετασχηματιστές με διαφορετικά ονομαστικά στοιχεία, αλλά και για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

### 2.8.1 Τριφασικός μετασχηματιστής 250MVA

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή αναπτύσσουμε το θερμικό μοντέλο για ένα τριφασικό μετασχηματιστή διανομής, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Στοιχεία μετασχηματιστή:	
Ονομαστική ισχύς	250/250/75 MVA
Ονομαστική τάση	230±8×1,5% / 118 /21 kV
Σύνδεση	YN0ynd11-connected
Τύπος ψύξης	ONAF

Πίνακας 2.9 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστή 250 MVA

Τα δεδομένα εισόδου, που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου, είναι αυτά, που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.10. Τα στοιχεία αυτά είναι οι σταθερές του αλγορίθμου, που αναπτύσσεται.

Ποσότητα	Μετασχηματιστής/Τυλίγματα
	250/118
kVA βάσης	250000
Θερμοκρασία βάσης	75
$P_{W/W}$	411780
$P_{E/W}$	29469
$P_{S/W}$	43391
$P_u$ kVA	250000
$\Delta\theta_{hs, rated}/K$	58.6
$\Delta\theta_{oil, rated}/K$	38.3
$g_r/K$	14.5
H	1.4
$T_{wdn, rated}/min.$	6.0
$M_{FLUID}/^{\circ}C$	73887
$\theta_{hs, i}/^{\circ}C$	38.3
$\theta_{oil, i}/^{\circ}C$	38.3

Πίνακας 2.10 Στοιχεία μετασχηματιστή διανομής 250MVA για το τυλίγμα 118 kV.

Το φορτίο, το οποίο θα εφαρμοσθεί στο συγκεκριμένο μετασχηματιστή είναι το παρακάτω, (πίνακας 2.11).

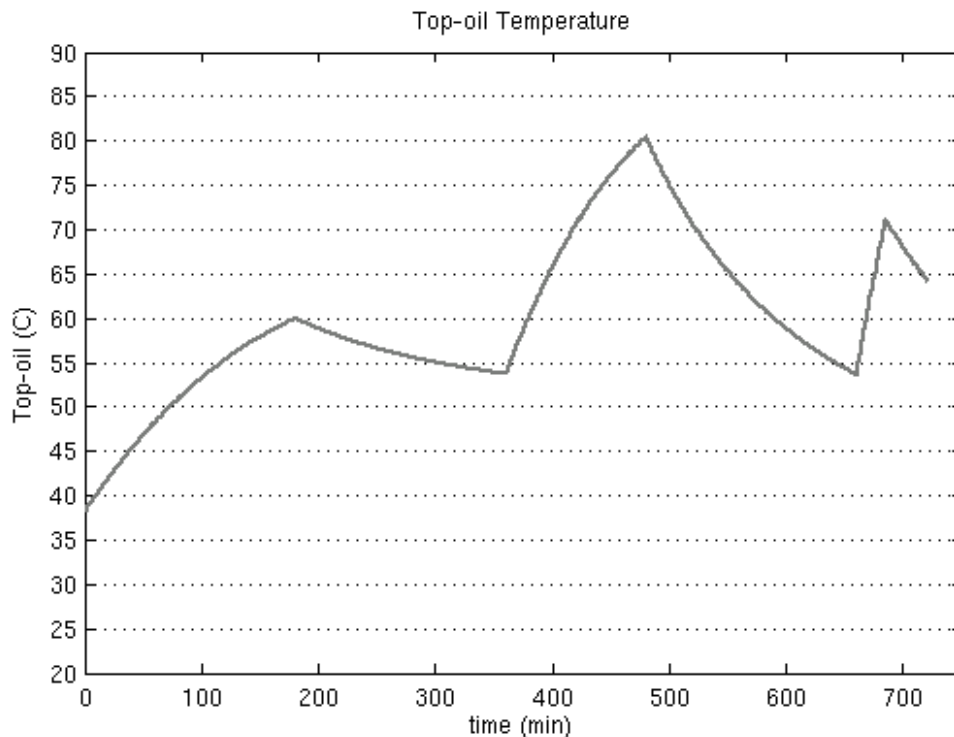
Διάρκεια(min)	Φόρτιση(ρμ)
180	1.00
180	0.60
120	1.50
180	0.30
25	2.10

Πίνακας 2.11 Φορτίο, που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή 250 MVA.

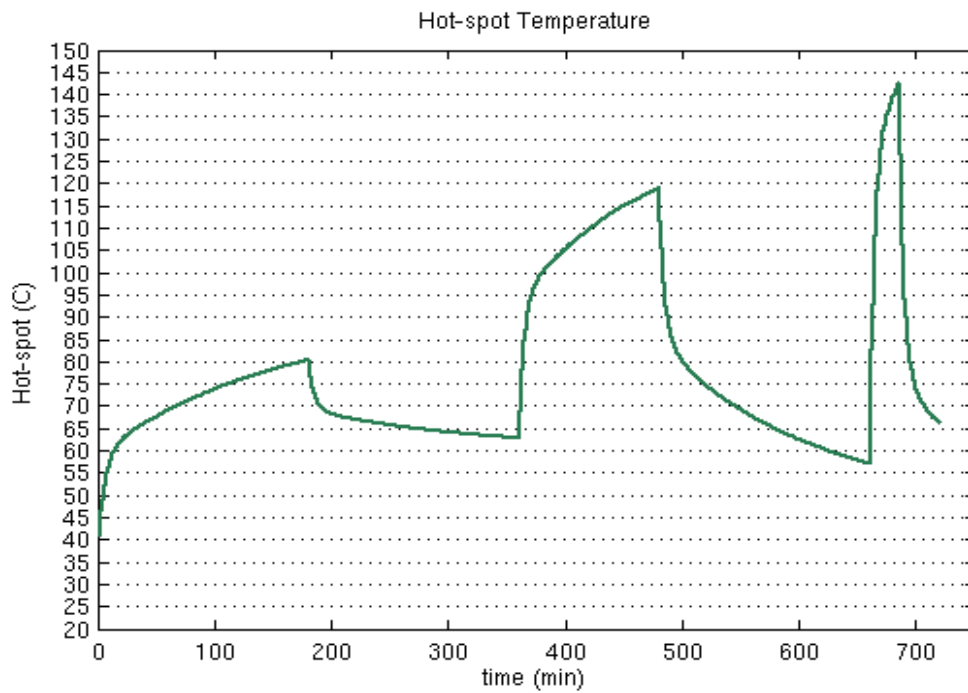
### 2.8.1.1 Σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος

Για το μετασχηματιστή με τα παραπάνω στοιχεία, θεωρούμε αρχικά θερμοκρασία περιβάλλοντος σταθερή και ίση προς  $\theta_{amp} = 28^{\circ}\text{C}$ .

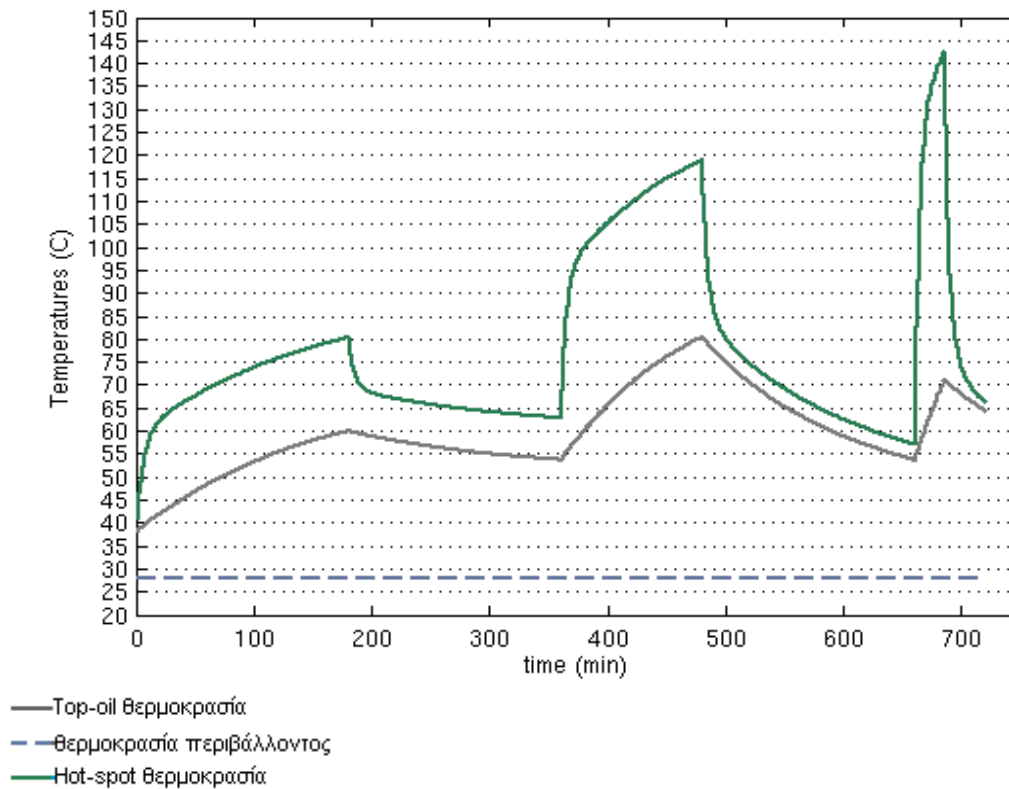
Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, αναπτύσσουμε στο μαθηματικό περιβάλλον Matlab το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή και εν συνεχεία το μοντέλο διάρκειας ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Από τον αλγόριθμο αυτόν προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις για την top-oil και την hot-spot θερμοκρασία του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.19 Top oil θερμοκρασία μετασχηματιστή 250MVA με θερμοκρασία περιβάλλοντος 28 °C.



Σχήμα 2.20 Hot-spot θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στο τυλίγμα χαμηλής τάσης 118 kV σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 28 °C.



Σχήμα 2.21 Hot-spot θερμοκρασία τυλίγματος 118 kV, top-oil θερμοκρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος



Εν συνεχεία, μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή για το φορτίο, που εφαρμόσαμε πάνω του. Η μέγιστη θερμοκρασία top-oil, που αναπτύσσεται στην κορυφή του λαδιού του μετασχηματιστή είναι 80,49 °C, ενώ η μέγιστη hot-spot θερμοκρασία ανέρχεται στους  $\theta_{hs,max} = 142,49$  °C. Με βάση τη μέγιστη αυτή θερμοκρασία, υπολογίζεται η ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή.

**Loss of life %= 0,1425%**

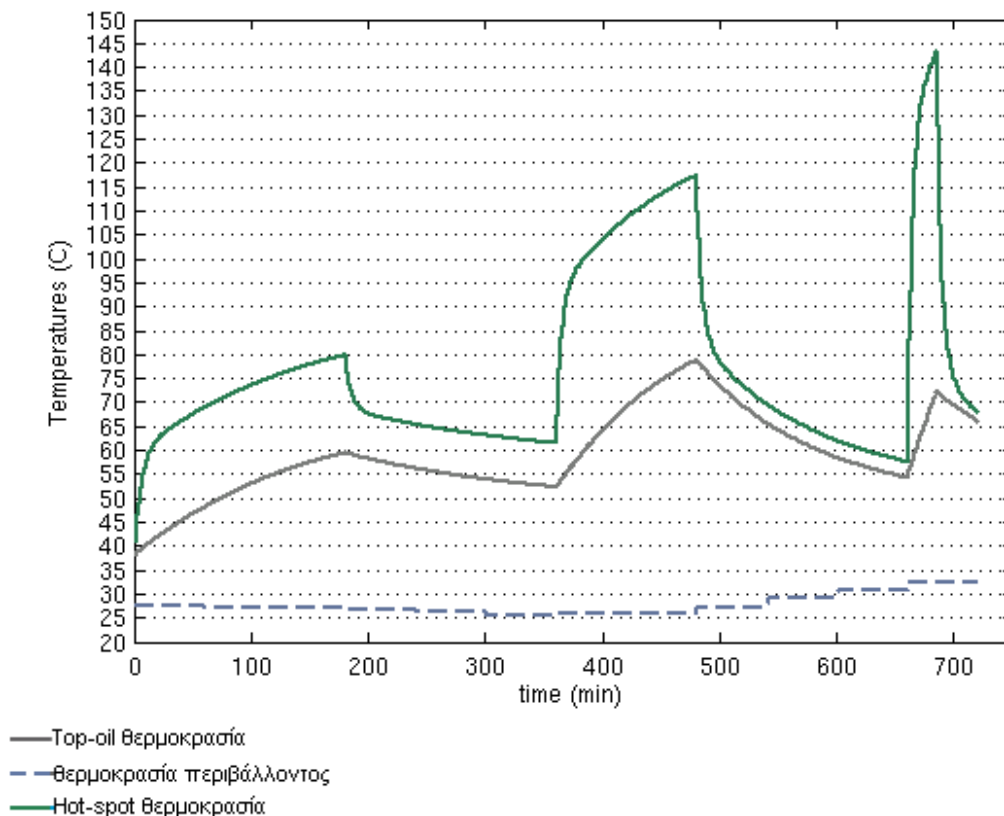
### 2.8.1.2 Μεταβλητή θερμοκρασία περιβάλλοντος-Θερινή ημέρα

Εξετάζουμε την πιο ρεαλιστική περίπτωση, κατά την οποία η θερμοκρασία μέσα στο χρονικό διάστημα, που εξετάζουμε, μεταβάλλεται με την ώρα. Εδώ κάνουμε την υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια μίας ώρας η θερμοκρασία παραμένει σταθερή. Οι τιμές της θερμοκρασίας λαμβάνονται από στοιχεία του μηνός Ιουλίου του 2008. Στον παρακάτω πίνακα 2.12 βλέπουμε τις ώρες από 1π.μ. έως τις 12 το μεσημέρι.

T (min)	$\theta_{amp}$
60	27,424
120	27,242
180	26,964
240	26,608
300	26,101
360	25,65
420	26,006
480	25,768
540	27,212
600	29,038
660	30,823
25	32,462

Πίνακας 2.12 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος – Θερινή ημέρα.

Παρακάτω παρατίθενται οι καμπύλες, οι οποίες αναπαριστούν τη μεταβολή της θερμοκρασίας top-oil και hot-spot υπό την ανωτέρω θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.22 Hot-spot θερμοκρασία τυλίγματος 118 kV, top-oil θερμοκρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Οι μέγιστες θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταβάλλεται σύμφωνα με τον πίνακα 2.12 είναι 78,84 °C στην κορυφή του λαδιού (top-oil) και 143.31 °C στο θερμότερο σημείο του τυλίγματος χαμηλής τάσης (hot-spot). Για τη θερμοκρασία  $\theta_{hs,max} = 143.31$  °C υπολογίζεται η ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή για τη λειτουργία του τις 12 ώρες, που εξετάζουμε.

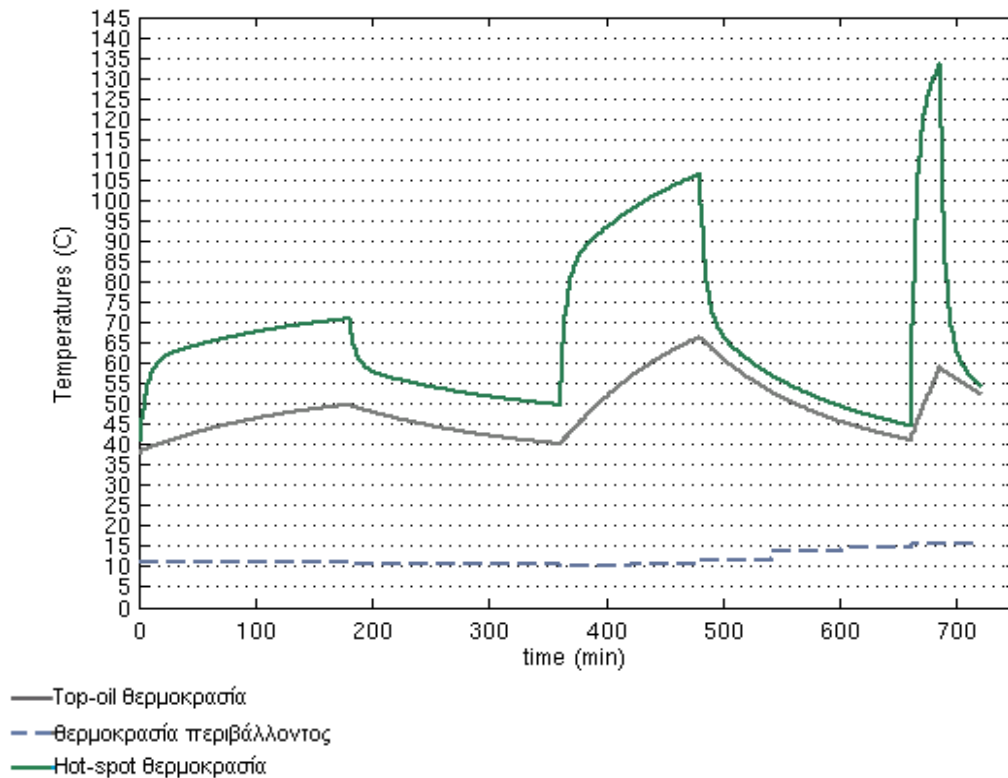
**Loss of life %=0,153 %**

### 2.8.1.3 Μεταβλητή θερμοκρασία περιβάλλοντος-Χειμερινή ημέρα

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις μεταβολές των θερμοκρασιών, που αναπτύσσονται στο μετασχηματιστή, κατά τη διάρκεια των ωρών από 1 π.μ. έως τις 12 το μεσημέρι για μία μέση ημέρα του Φεβρουαρίου του 2008. Το φορτίο παραμένει ίδιο με αυτό, που θεωρήθηκε αρχικά. Στον πίνακα 2.13 παρατίθενται οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

T (min)	$\theta_{amp}$
60	11.063
120	10.988
180	11.005
240	10.843
300	10.731
360	10.604
420	10.42
480	10.532
540	11.361
600	13.684
660	14.901
25	15.736

Πίνακας 2.13 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος – Χειμερινή ημέρα.



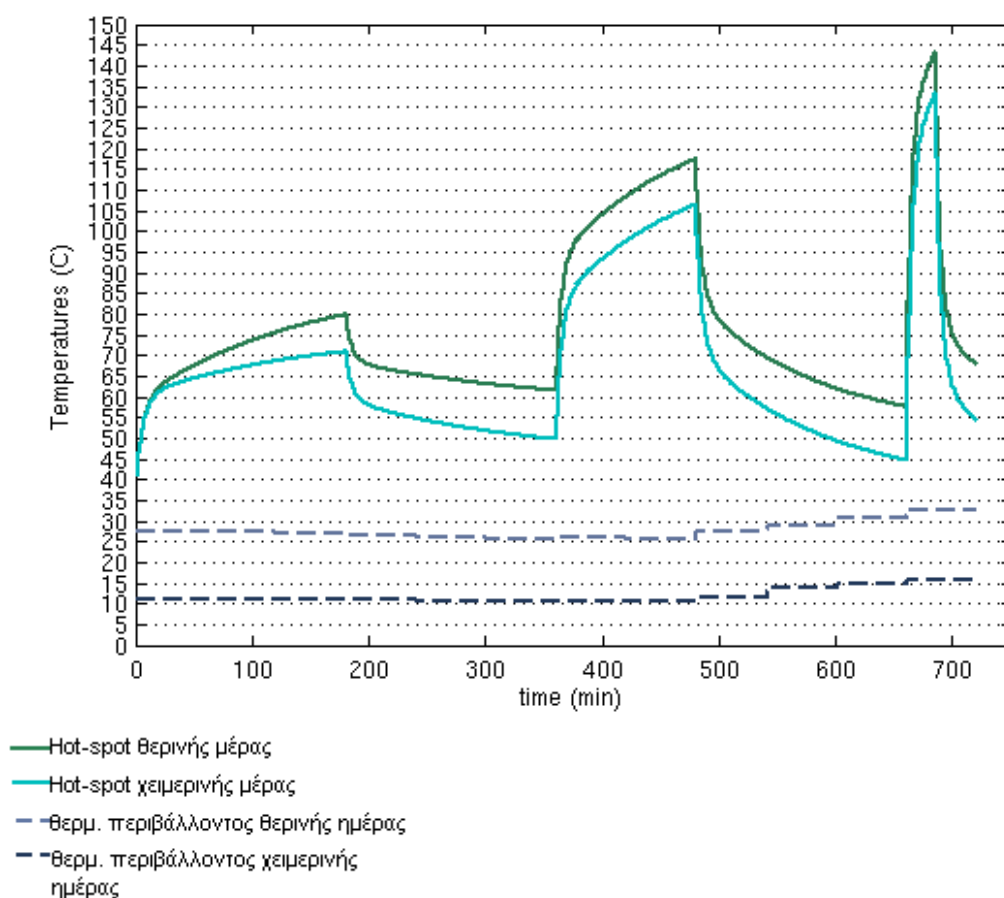
Σχήμα 2.23 Hot-spot θερμοκρασία τυλιγματος 118 kV, top-oil θερμοκρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η μέγιστη θερμοκρασία top-oil είναι 66,44 °C και η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot  $\theta_{hs,max} = 133.26$  °C. Η ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή είναι μικρότερη από αυτή της θερινής ημέρας.

**Loss of life %= 0,0627 %**

### 2.8.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων χειμερινής και θερινής ημέρας

Στο διάγραμμα, που ακολουθεί, βλέπουμε τη μεταβολή της hot-spot θερμοκρασίας για τις δύο διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Παρατηρούμε, ότι για τη θερινή ημέρα η θερμοκρασία hot-spot παρουσιάζεται αυξημένη σχεδόν σε όλο το χρονικό διάστημα. Οι δύο θερμοκρασίες συμπίπτουν σε σημεία όπου έχουμε είτε απότομη μείωση είτε απότομη αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot.

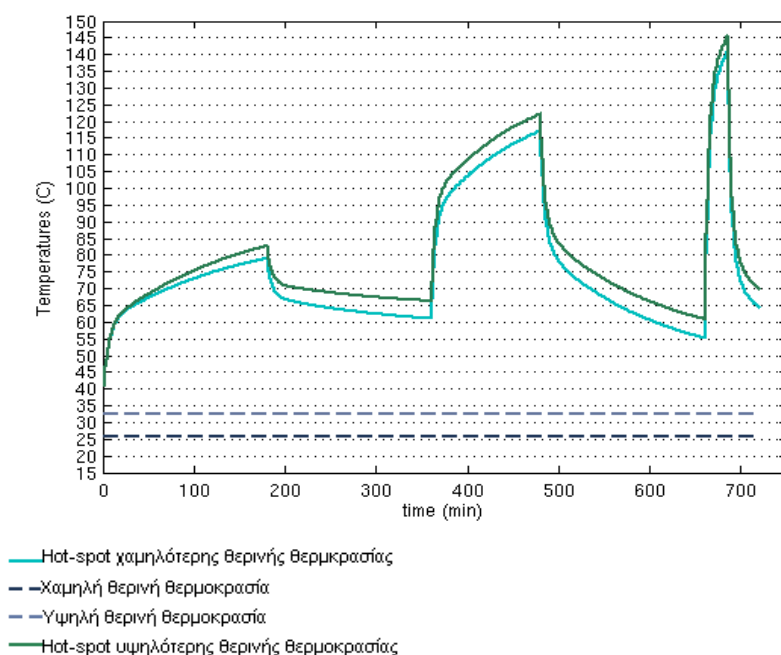


Σχήμα 2.24 Θερμοκρασίες hot-spot για χειμερινή και για θερινή ημέρα.

Οι μέγιστες τιμές hot-spot είναι 143.31 °C για τη θερινή ημέρα και 133.26 °C για τη χειμερινή ημέρα και εμφανίζονται κατά την 11<sup>η</sup> ώρα λειτουργίας, (συγκεκριμένα μετά από 11 ώρες και 25 λεπτά). Δηλαδή, τη θερινή ημέρα έχουμε κατά **7,54 %** αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot σε σχέση με τη χειμερινή ημέρα. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος της χειμερινής και της θερινής ημέρας κατά την 11<sup>η</sup> ώρα παραμένει σταθερή. Για τη θερινή ημέρα η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 30,823 °C και για τη χειμερινή ημέρα είναι 14,901 °C. Δηλαδή, τη θερινή ημέρα έχουμε κατά **106,85 %** αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σε σχέση με τη χειμερινή ημέρα.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας στη χώρα μας είναι μικρές. Δεν είναι ικανές να μεταβάλλουν αισθητά τη μορφή της καμπύλης hot-spot. Επομένως, η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει κυρίως το επίπεδο των τιμών, που καταλαμβάνει η θερμοκρασία hot-spot, και όχι τον τρόπο, με τον οποίο μεταβάλλεται.

Η θερμοκρασία για μία θερινή ημέρα τις 12 ώρες, που εξετάσαμε, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή 32,462 °C και την ελάχιστη τιμή 25,65 °C. Στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 2.25 βλέπουμε τη θερμοκρασία hot-spot και τη μεταβολή της, κατά την εφαρμογή του υποθετικού σεναρίου να έχουμε επί δώδεκα ώρες την ελάχιστη ή τη μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό μας χρησιμεύει, για να διαπιστώσουμε με ποιο τρόπο επιδρά η θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θερμοκρασία hot-spot. Η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, που σημειώνεται, είναι 145,43 °C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 32,46 °C και 140,96 °C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 25,65 °C. Συνεπώς, μία αύξηση της θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά **26,55%** προκαλεί μία αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot κατά **3,17 %**. Η αναμενόμενη ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή για λειτουργία 12 ωρών υπό τη μέγιστη θερινή θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0,1837%, ενώ για λειτουργία επίσης 12 ωρών υπό την ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0,1247%.

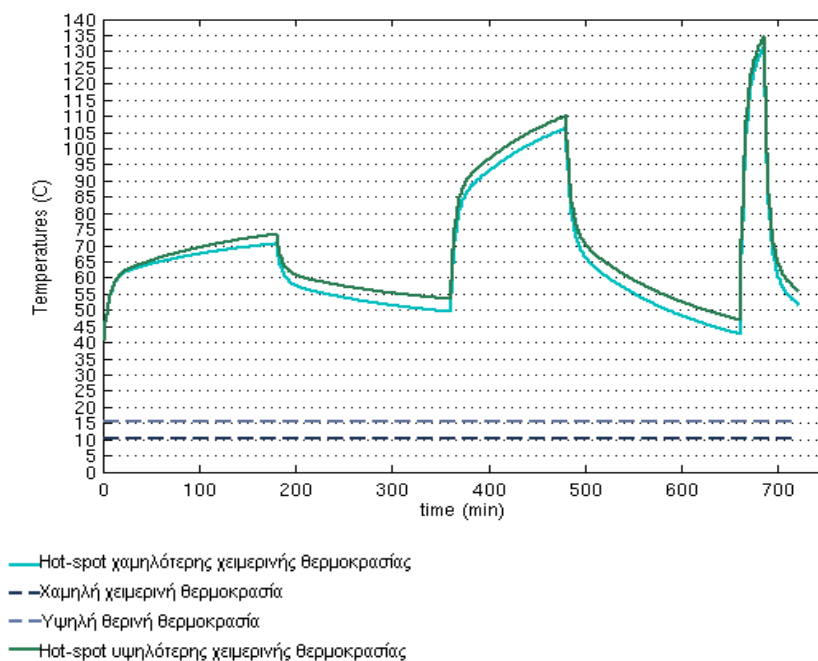


Σχήμα 2.25 Hot-spot θερμοκρασία για χαμηλότερη και υψηλότερη θερινή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ποσοστιαίες αυξήσεις μεγεθών με μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος θερινής ημέρας από την ελάχιστη ως τη μέγιστη.		
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	Hot-spot θερμοκρασία	Ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή
<b>26,55%</b>	<b>3,17 %</b>	<b>47,31%</b>

Πίνακας 2.14 Ποσοστιαίες μεταβολές με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος 25,65 °C.

Η θερμοκρασία για μία χειμερινή ημέρα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή 15.736°C και την ελάχιστη τιμή 10.42 °C. Στο παρακάτω διάγραμμα του σχήματος 2.26 βλέπουμε τη θερμοκρασία hot-spot και τη μεταβολή της, κατά την εφαρμογή του υποθετικού σεναρίου να έχουμε επί δώδεκα ώρες την ελάχιστη ή τη μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.26 Hot-spot θερμοκρασία για χαμηλότερη και υψηλότερη χειμερινή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, που σημειώνεται, είναι 134.7 °C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 15.736°C και 131.48 °C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 10.42 °C. Ως εκ τούτου, μία αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά **51,02%** προκαλεί μία αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot κατά **2,45 %**. Η αναμενόμενη ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή για λειτουργία 12 ωρών υπό τη μέγιστη θερινή θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0,0715 %, ενώ για λειτουργία τις ίδιες ώρες στην ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 0,0534%.

Ποσοστιαίες αυξήσεις μεγεθών με μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος χειμερινής ημέρας από την ελάχιστη ως τη μέγιστη.		
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	Hot-spot θερμοκρασία	Ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή
<b>51,02%</b>	<b>2,45 %</b>	<b>33,9%</b>

Πίνακας 2.15 Ποσοστιαίες μεταβολές με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αρχική θερμοκρασία περιβάλλοντος 10.42 °C.

Με βάση τα αποτελέσματα των πινάκων 2.14 και 2.15, διαπιστώνουμε ότι κατά τη χειμερινή ημέρα η ποσοστιαία αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι διπλάσια από την ποσοστιαία αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη θερινή ημέρα. Η ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας hot-spot είναι μικρότερη κατά τη χειμερινή ημέρα σε σύγκριση με τη θερινή ημέρα. Αυτό προφανώς οφείλεται στο γεγονός, ότι κατά τη θερινή ημέρα οι θερμοκρασίες κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με τη χειμερινή. Συμπεραίνουμε επομένως, ότι όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος τόσο εντονότερη επίδραση έχει στη hot-spot θερμοκρασία. Το ίδιο ισχύει και για τις μεταβολές της ποσοστιαίας απώλειας ζωής, που προκαλούνται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

## 2.8.2 Τριφασικός μετασχηματιστής 400MVA

Ο επόμενος μετασχηματιστής, που θα εξετάσουμε, έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Στοιχεία μετασχηματιστή:	
Ονομαστική ισχύς	400/400/125 MVA
Ονομαστική τάση	410±6×1,33% / 120 / 21 kV
Σύνδεση	YN0ynd11-connected
Τύπος ψύξης	ONAF

Πίνακας 2.16 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστή 400 MVA.

Ποσότητα	Μετασχηματιστής/Τυλίγματα
	400/120
kVA βάσης	400000
Θερμοκρασία βάσης	75
$P_{W/W}$	637100
$P_{E/W}$	59778
$P_{S/W}$	65772
$\rho_{\mu}$ kVA	400000
$\Delta\theta_{hs, rated}/K$	58.3
$\Delta\theta_{oil, rated}/K$	38.0
$g_r/K$	15.6
H	1.3
$T_{wdn, rated}/min.$	5.3
$M_{FLUID}/^{\circ}C$	91397
$\theta_{hs, i}/^{\circ}C$	34.6
$\theta_{oil, i}/^{\circ}C$	30.9

Πίνακας 2.17 Στοιχεία μετασχηματιστή διανομής 250MVA για το τύλιγμα 118 kV.

Τα στοιχεία του πίνακα 2.17 είναι τα απαραίτητα για την υλοποίηση του θερμικού μοντέλου του μετασχηματιστή.

Το φορτίο, που θα εφαρμοσθεί στο συγκεκριμένο μετασχηματιστή, είναι αυτό του πίνακα 2.18.

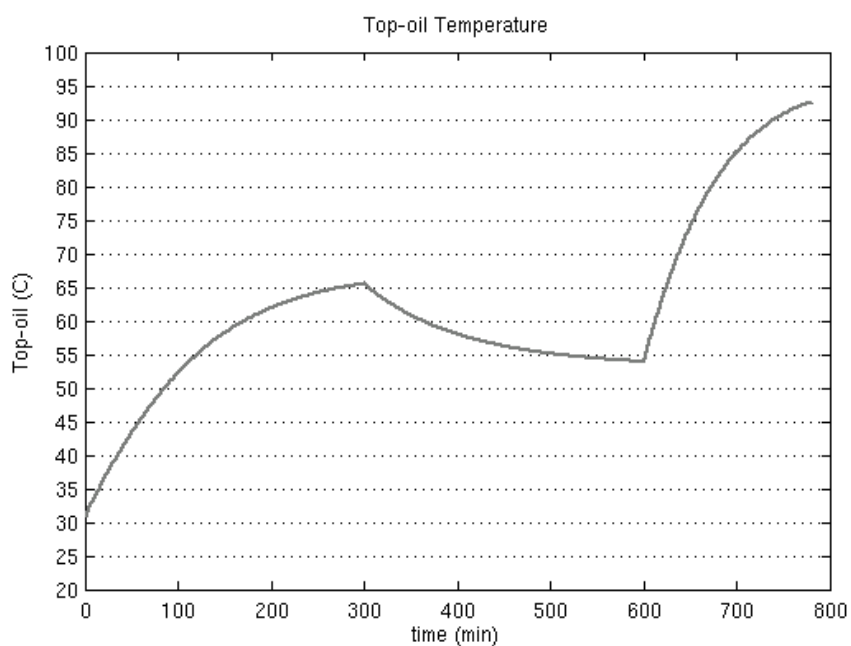
Διάρκεια (min)	Φόρτιση ( $\rho_{\mu}$ )
300	1.00
300	0.65
180	1.6

Πίνακας 2.18 Φορτίο, που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή 400 MVA.



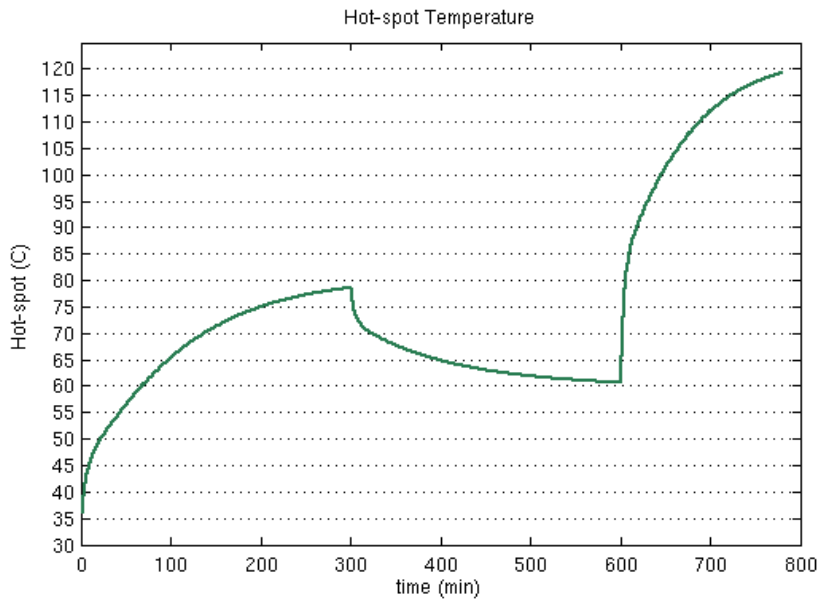
### 2.8.2.1 Σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος

Αρχικά θεωρούμε σταθερή θερμοκρασία στους 28°C και λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Στο σχήμα 2.27 βλέπουμε τη μεταβολή της top-oil θερμοκρασίας κατά την εφαρμογή του φορτίου του πίνακα 2.18 .



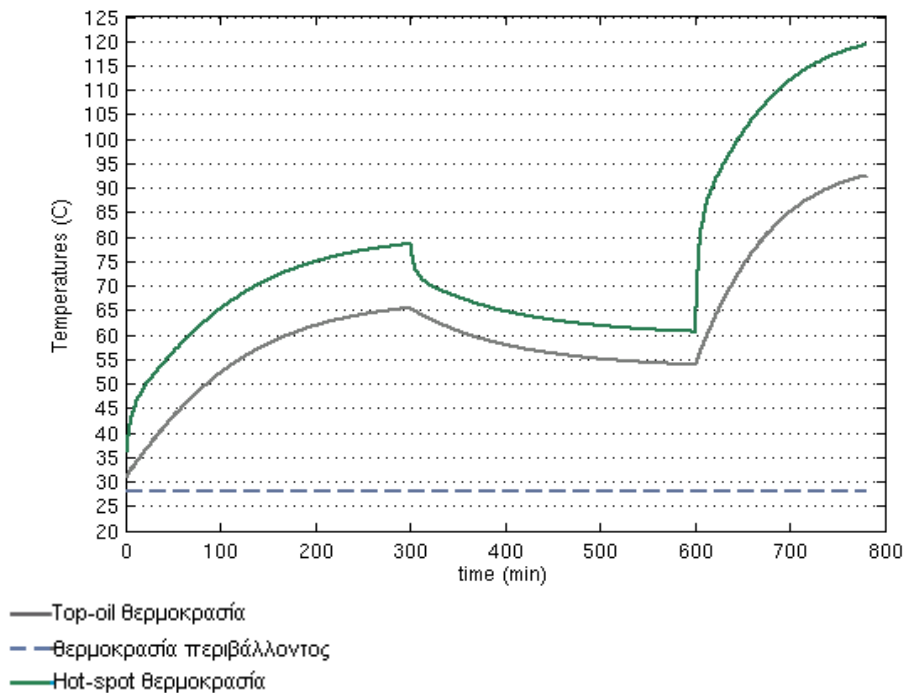
Σχήμα 2.27 Top-oil θερμοκρασία μετασχηματιστή 400 MVA .

Η μέγιστη top-oil θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στην κορυφή του λαδιού του μετασχηματιστή, είναι 92,59 °C και σημειώνεται κατά το πέρας της 13<sup>ης</sup> ώρας , κατά την οποία έχουμε και το υψηλότερο φορτίο. Στο ακόλουθο σχήμα βλέπουμε τη μεταβολή της hot-spot θερμοκρασίας για το διάστημα, που εξετάζουμε.



Σχήμα 2.28 Hot-spot θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης 120 kV σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 28 °C.

Η μέγιστη hot-spot θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή, είναι  $\theta_{hs,max} = 119.29$  °C.



Σχήμα 2.29 Hot-spot θερμοκρασία τυλιγματος 120 kV, top-oil θερμοκρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος.

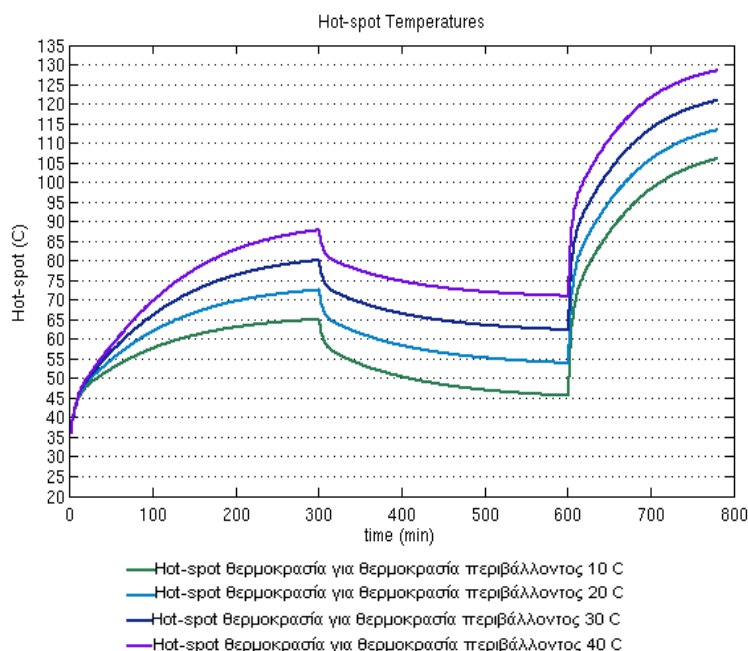
Η ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή για τη λειτουργία του τις ώρες, που εξετάσαμε, υπολογίζεται:

Loss of life %= 0.0183%

## 2.8.2.2 Δοκιμές για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος

Για το μετασχηματιστή 400 MVA θα εξετάσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος στις κρίσιμες για τη ζωή της μόνωσης θερμοκρασίες.

Εξετάζοντας στοιχεία του έτους 2008, παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του έτους κυμαίνεται κυρίως ανάμεσα στις θερμοκρασίες 10 °C έως 35 °C.



Σχήμα 2.30 Θερμοκρασίες hot-spot τυλιγματος χαμηλής τάσης 120 kV για θερμοκρασίες περιβάλλοντος από 10-40 °C.

Παρατηρούμε, ότι για μία σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος με βήμα 10 °C έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot βήματος  $\sim 7,5$  °C. Διαπιστώνουμε, ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος, για κάθε επιπλέον αύξησή της κατά 10° C προκαλείται αύξηση της hot-spot θερμοκρασίας μεγαλύτερη κατά 0,15 °C σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη.

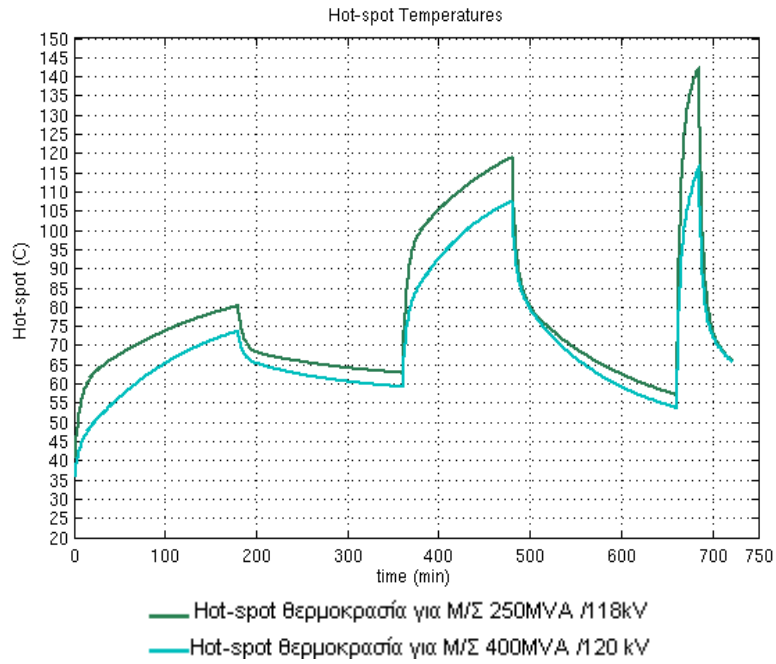
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C)	$\theta_{hs,max}$ (°C)	%Loss of Life (%)	$\Delta\theta_{hs,max}$ (°C)	Μεταβολή % Loss of Life (%)
10	105.97	0.0048		
20	113.31	0.0101	7.35	0.0053
30	120.81	0.0212	7.5	0.0111
40	128.46	0.0437	7.65	0.0225

Πίνακας 2.19 Μεταβολές μέγιστης θερμοκρασίας hot-spot και ποσοστιαίας απώλειας ζωής του μετασχηματιστή για βηματική αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

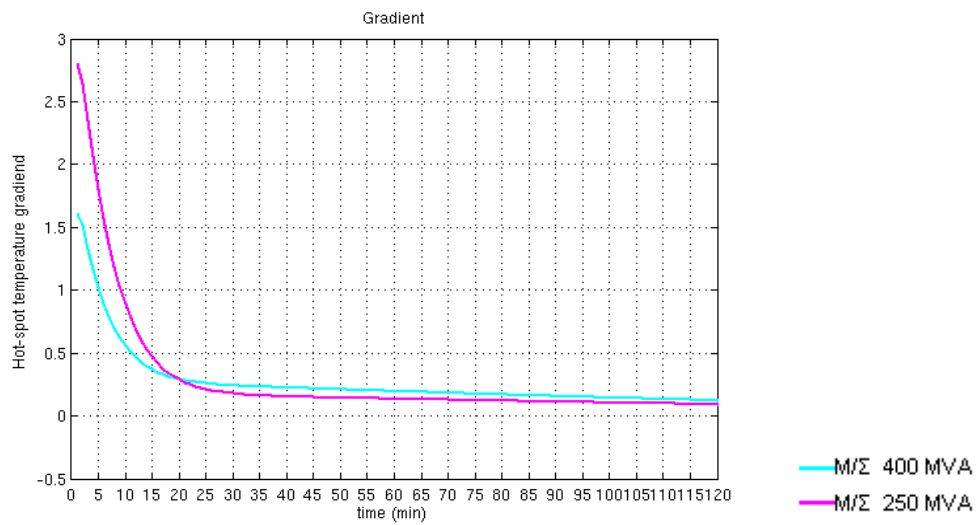
Παρατηρούμε από τον πίνακα 2.19, ότι για κάθε διαδοχική αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 10 °C, η αύξηση της ποσοστιαίας απώλειας ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή διπλασιάζεται.

### 2.8.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων από εφαρμογή του ίδιου ανά μονάδα φορτίου σε διαφορετικούς μετασχηματιστές

Τέλος, θα εξεταστεί η επίδραση, που θα έχει η εφαρμογή του ανά μονάδα φορτίου (p.u.), που θεωρήσαμε για το μετασχηματιστή 250 MVA (πίνακας 2.11), στο μετασχηματιστή 400 MVA, ώστε να διαπιστώσουμε αν υπάρχει έντονη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ανάλογα με το μέγεθος του μετασχηματιστή. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε πώς κυμαίνεται η θερμοκρασία hot-spot για τους μετασχηματιστές 250 MVA και 400 MVA. Όπως ήταν αναμενόμενο, η θερμοκρασία hot-spot, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή 400 MVA, είναι μικρότερη από αυτή, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του μετασχηματιστή 250 MVA. Επίσης, εξετάζοντας τις καμπύλες του κατωτέρω σχήματος 2.31, παρατηρούμε ότι η hot-spot θερμοκρασία του μετασχηματιστή 250 MVA αυξάνεται πιο απότομα με την κάθε αύξηση του φορτίου. Η καμπύλη hot-spot αυξάνεται με μεγαλύτερη κλίση στην αρχή μίας αύξησης του φορτίου και με την πάροδο του χρόνου η άνοδος της θερμοκρασίας συνεχίζεται με μικρότερη κλίση (σχήμα 2.32). Η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, που αναπτύσσεται για μετασχηματιστή 250MVA είναι 142,49°C, ενώ για μετασχηματιστή 400 MVA είναι 116,58°C. Αν συνδέσουμε το συγκεκριμένο φορτίο, που εξετάζουμε, στο μετασχηματιστή 250 MVA θα σημειωθεί ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης 0,1425%, ενώ αν το συνδέσουμε στο μετασχηματιστή 400 MVA θα σημειωθεί ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης 0,0129%.



Σχήμα 2.31 Hot-spot θερμοκρασίες τυλίγματος χαμηλής τάσης Μ/Σ 400 και 250 MVA για σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.32 Μεταβολή της κλίσης των καμπυλών hot-spot του τυλίγματος χαμηλής τάσης κατά τις πρώτες 2 ώρες.

[2.1] W.H. Tang, Q.H. Wu "Condition monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence"

[2.2] Facilities Engineering Branch, Denver Office, Colorado, "Permissible Loadings of Oil-immersed Transformers and Regulators", "Facilities instructions, standards and techniques", Volume 1-5.

[2.3] Dejan Susa, Matti Lahtonen, Hasse Nordman, "Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers" , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005.

[2.4] Dejan Susa, "Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers", Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Department of Electrical and Communications Engineering, Power Systems and High Voltage Engineering (August, 2005).

[2.5] Διπλωματική εργασία «ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PSPICE», Αλέξη Κυδωνόπουλου

[2.6] (IEEE, 1995) "IEEE Std C57.91-1995 IEEE guide for loading mineral-oilimmersed transformers"

[2.7] (Tang, 2002) Tang W.H.,Wu Q.H., and Richardson Z.J., "Equivalent heat circuit based power transformer thermal model", Electric Power Applications, IEE Proceedings, Vol.149, Iss. 2, March 2002, pp. 87-92

[2.8] (Tang, 2002) Tang W.H.,Wu Q.H., and Richardson Z.J., "A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, Iss. 3, July 2004, pp. 1112-1119

[2.9] (Pierce, 1992) Pierce L.W., "An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, Iss.3, July 1992, pp.1347-1358

[2.10] (Pierce, 1992) Pierce L.W. , "Predicting liquid filled transformer loading capability", IEEE Transactions of Industry Applications, Vol. 30 , Iss. 1, Jan-Feb. 1994, pp.170-178

[2.11] (Nordman, 1990) Nordman H., and Lahtinen M., "Thermal overload tests on a 400 MVA power transformer with a special 2.5 p.u. Short time loading capability", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18 , Iss. 1 , Jan 2003 , pp.107 - 112

[2.12] (Nordman, 1990) Nordman H., Rafsback N., and Susa, D., "Temperature responses to step changes in the load current of power transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18 , Iss. 4 , Oct. 2003 , pp.1110 – 1117

[2.13] (Rafsback, 2001) Rafsback N. T., "Short-time emergency overloading of power transformers", Power transformer company, ABB, Vaasa, 2001

## Κεφάλαιο 3

### Ηλεκτρικά οχήματα

Ένα ζήτημα, που προκαλεί έντονο προβληματισμό στις μέρες μας, είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η κλιματική αλλαγή, που αυτό συνεπάγεται. Το φαινόμενο αυτό έχει προκύψει από τα αέρια απόβλητα των καύσεων. Τα κυριότερα αέρια, που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες, και συμμετέχουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα, που θεωρείται υπεύθυνο για το 50% της υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας, το μεθάνιο, το οποίο ευθύνεται για το 18%, οι χλωροφθοράνθρακες, που συμβάλλουν κατά 14-16%, τα οξειδία του αζώτου κατά 8% και το όζον κατά 12%.

Οι μεταφορές είναι ένας κυρίαρχος τομέας της ανθρώπινης ζωής, στον οποίο χρησιμοποιείται η καύση. Σύμφωνα με την Ε.Ε., το 33% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προέρχεται από τις μεταφορές. Η συντριπτική πλειοψηφία των οχημάτων χρησιμοποιεί θερμικούς κινητήρες (καύση πετρελαίου ή βενζίνης). Η αυτοκινητοβιομηχανία, ανταποκρινόμενη στις ανάγκες των καιρών, στρέφεται σε φιλικότερα προς το περιβάλλον οχήματα, τα οποία κατά τη λειτουργία τους αποβάλλουν πολύ μικρές ή και μηδενικές ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου και για την κίνησή τους καταναλώνουν όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια. Ένας φιλόδοξος στόχος, που έχει τεθεί, είναι η κατά 50% επικράτηση των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές των ελαφρών οχημάτων μέχρι το 2050.

Κατά τα τελευταία χρόνια έχουν δαπανηθεί σημαντικοί πόροι και έχει συμπράξει ένα αξιόλογο επιστημονικό δυναμικό για να προσδιορισθούν και να αποτυπωθούν οι ενδεδειγμένες ενέργειες, προκειμένου να καταγραφούν οι διαχρονικοί στόχοι και να αναλυθούν οι μέθοδοι, που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, για τη μέγιστη αξιοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα πρώτα προϊόντα της νέας τεχνολογίας, που αναπτύχθηκε, βρίσκονται ήδη στη διάθεση των καταναλωτών και με πολύ γρήγορο ρυθμό μπαίνουν κι άλλα στην παραγωγή. Στο στάδιο αυτό, για να βοηθηθεί η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν διοικητικά μέτρα και να θεσπιστούν κίνητρα, που να κατευθύνουν το αγοραστικό κοινό στην αποδοχή τους. Επίσης, θα πρέπει να υπάρξει έγκαιρος σχεδιασμός για τη δημιουργία δικτύων υποστήριξης και ανεφοδιασμού των οχημάτων με ηλεκτρική ενέργεια, όπως συμβαίνει σήμερα με τα δίκτυα των σταθμών εξυπηρέτησης των συμβατικών οχημάτων και τα πρατήρια καυσίμων, τα οποία μάλιστα θα μπορούσαν να ενταχθούν στα δίκτυα αυτά.

### 3.1 Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους :

- **Φόρτιση με επαφή.** Τρόπος φόρτισης παραπλήσιος με αυτόν, με τον οποίο συνδέεται οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή στην μπρίζα. Η ισχύς μεταδίδεται μέσω ηλεκτρικών επαφών, που ενώνονται μεταξύ τους.
- **Φόρτιση με επαγωγή.** Στη μέθοδο αυτή έχουμε μεταφορά ισχύος με επαγωγή ανάμεσα σε δύο τυλίγματα. Το πρωτεύον τυλίγμα είναι από την πλευρά της τροφοδοσίας και το δευτερεύον στην πλευρά του οχήματος. Το δευτερεύον ακολουθείται από την κατάλληλη ανορθωτική διάταξη, η οποία μετατρέπει το AC ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος σε DC ρεύμα, προκειμένου να φορτιστεί ο DC συσσωρευτής.

Στον παρακάτω πίνακα αντιπαρατίθενται κάποια βασικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων.

	Φόρτιση με Επαγωγή	Φόρτιση με επαφή
Κόστος	Πιο ακριβή	Πιο οικονομική
Περιπλοκότητα	Αρκετά σύνθετη	Απλούστερη
Ασφάλεια	Καλύτερη από τη φόρτιση με επαφή. Καλύτερη ηλεκτρική απομόνωση του οχήματος με την τροφοδοσία	Αρκετά καλή. Εφαρμογή αποδοτικών τεχνικών ανίχνευσης σφάλματος
Ενεργειακή Απόδοση	Όχι τόσο αποδοτική λόγω απωλειών μαγνητικού κυκλώματος	Πιο αποδοτική σε σχέση με τη φόρτιση με επαγωγή

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά μεθόδων φόρτισης.

Αρχικά και τα δύο είδη φορτιστών ήταν διαδεδομένα, αλλά σταδιακά επικράτησαν οι συμβατικοί φορτιστές ( φόρτιση με επαφή ), λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους τους. Οι συμβατικοί φορτιστές είναι αυτοί, που χρησιμοποιούνται σήμερα, και υπάρχουν ελπίδες διατήρησής τους στην αγορά και περαιτέρω εξέλιξής τους.

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνεται ανάλογα με το επίπεδο ισχύος φόρτισης σε κατηγορίες. Υπάρχουν τρία επίπεδα φόρτισης [3.1].

- **Μονοφασική AC φόρτιση.** Συνήθως εφαρμόζεται στις απλές οικιακές παροχές και παρέχει χαμηλά επίπεδα ισχύος σε σχέση με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Επίσης, εφαρμόζεται και 1-Φ φόρτιση σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος, η οποία όμως δεν μπορεί να εφαρμοσθεί με τη χρήση των συνήθων οικιακών παροχών. Αυτά τα δύο επίπεδα φόρτισης αναφέρονται ως **Level 1** και **Level 2** φόρτιση, αντίστοιχα.
- **Τριφασική AC φόρτιση.** Απαιτεί πρόσβαση σε 3-Φ παροχή ισχύος και μπορεί να αποδώσει υψηλότερα επίπεδα ισχύος σε σχέση με τη 1-Φ φόρτιση. Αυτό οφείλεται στο



- **DC φόρτιση.** Αυτή η μέθοδος φόρτισης μπορεί να παρέχει υψηλά επίπεδα φόρτισης σε δημόσιες τοποθεσίες.

Τόσο η 3-Φ AC φόρτιση όσο και η DC υψηλής ισχύος φόρτιση απαιτούν σύντομο χρονικό διάστημα φόρτισης. Αποτελούν την **Level 3** φόρτιση, δηλαδή σε υψηλή ισχύ γρήγορη φόρτιση.

Προς το παρόν στην Ευρώπη δεν έχουν επίσημα προσδιορισθεί τα διαφορετικά επίπεδα φόρτισης. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά του κάθε επιπέδου φόρτισης.

Επίπεδο Φόρτισης	Απαιτήσεις	Τυπική Ισχύς Φόρτισης	Διάρκεια Φόρτισης για μπαταρία 35kWh (κατά προσέγγιση)
Level 1	Κοινή οικιακή παροχή	3-4 kW (3.6 kW στην περίπτωση των 230V)	12 ώρες
Level 2	Απαιτείται ειδική παροχή και καλωδίωση	10 – 20 kW (11kW στην περίπτωση των 3× 230V/16A)	2-4 ώρες
Level 3	Ειδική παροχή και καλωδίωση/ Για την DC γρήγορη φόρτιση απαιτείται ειδική υποδομή με εξωτερικό φορτιστή	40kW και πάνω	45 λεπτά ή και λιγότερο

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά επιπέδων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

### 3.1.1 Τμήματα του ηλεκτρικού οχήματος, που συνδέονται με τη διαδικασία ανεφοδιασμού

Υπάρχουν μέρη ενός ηλεκτρικού οχήματος, τα οποία συνδέονται άμεσα με τον ανεφοδιασμό του, δηλαδή είτε χρησιμεύουν για την αποθήκευση της ενέργειας είτε για τη

μεταφορά της από την εξωτερική πηγή στο όχημα. Παρακάτω αναφερόμαστε συνοπτικά σε αυτά τα μέρη:

- Η **συστοιχία συσσωρευτών** ή όποιο άλλο σύστημα χρησιμοποιείται για την επί του οχήματος αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας έχουν στο ηλεκτρικό ή υβριδικό όχημα ρόλο ανάλογο αυτού της δεξαμενής καυσίμου για το συμβατικό.
- Η φόρτιση των συσσωρευτών, όπως αναφέρθηκε, γίνεται από το δίκτυο ή από εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η ύπαρξη στην εξωτερική επιφάνεια του οχήματος ενός **ακροδέκτη σύνδεσης**. Αν θέλουμε και πάλι να δώσουμε μία αναλογία με τα συμβατικά οχήματα, ο ακροδέκτης σύνδεσης είναι αντίστοιχο εξάρτημα με το στόμιο πλήρωσης με καύσιμο στα συμβατικά οχήματα.
- Ανάμεσα στον εξωτερικό ηλεκτρικό ακροδέκτη σύνδεσης και στη συστοιχία συσσωρευτών του οχήματος μπορεί να μεσολαβούν άλλες **ηλεκτρικές διατάξεις**. Αυτές οι διατάξεις μπορεί να αποσκοπούν στο μετασχηματισμό των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της ενέργειας, που παρέχεται από το δίκτυο ή από την εξωτερική πηγή ενέργειας. Επίσης, μπορεί να αποσκοπούν στη διαχείριση της διαδικασίας φόρτισης, ώστε να γίνεται με ασφάλεια για το χρήστη, με τον πλέον ενδεδειγμένο τρόπο για την προστασία των συσσωρευτών και με σωστή προσαρμογή και συνεργασία με το δίκτυο παροχής.
- Η σύνδεση του εξωτερικού ακροδέκτη με το δίκτυο διανομής γίνεται με το **καλώδιο σύνδεσης**, το οποίο μπορεί να είναι, στη φορητή του έκδοση, εξάρτημα του αυτοκινήτου, παρεχόμενο από τον κατασκευαστή ή να διατίθεται από την επιχείρηση του δικτύου φόρτισης, ενώ στη μόνιμη έκδοση έχει τη μορφή μόνιμης προέκτασης του σημείου φόρτισης. Η φορητή μορφή χρησιμοποιείται για την ασφαλή σύνδεση του οχήματος στην ηλεκτρική παροχή του δικτύου ή της εξωτερικής πηγής ενέργειας. Και τα δυο άκρα του διαθέτουν κατάλληλους ακροδέκτες για ασφαλή σύνδεση. Στη μόνιμη μορφή το ένα άκρο είναι μόνιμα συνδεδεμένο εσωτερικά στη συσκευή του σημείου φόρτισης και το άλλο διαθέτει ακροδέκτη ασφαλούς ηλεκτρικής σύνδεσης με τον εξωτερικό ακροδέκτη του αυτοκινήτου. Η μόνιμη μορφή μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχη με τις μάνικες παροχής καυσίμου για τα συμβατικά αυτοκίνητα.
- Τα **σημεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας φόρτισης** από το δίκτυο μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία όπου υπάρχει ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό συνεπάγεται ότι εκτός από τους σταθμούς ανεφοδιασμού των ηλεκτρικών οχημάτων η φόρτιση μπορεί να γίνει εύκολα και με ασφάλεια ακόμα και από το σπίτι και κατά τη διάρκεια της νύχτας, που το όχημα είναι σταθμευμένο. Επίσης, μπορεί να γίνει και σε απομακρυσμένες περιοχές με την ενέργεια, που θα προέρχεται από κάποια διερχόμενη γραμμή δικτύου ή ακόμα και από τοπικά συστήματα διεσπαρμένης ηλεκτροπαραγωγής. Η παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας στα οχήματα μπορεί να γίνει με δυο διαφορετικούς τρόπους και αυτό αποτελεί και βασικό διαχωρισμό των σημείων παροχής. Η μια κατηγορία περιλαμβάνει σημεία, που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια με τα χαρακτηριστικά του δικτύου διανομής. Σε αυτήν την περίπτωση, για τη φόρτιση των συσσωρευτών χρησιμοποιείται η συσκευή φόρτισης και διαχείρισης, η οποία βρίσκεται επί του

## **3.2 Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων**

### **3.2.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Τα ηλεκτρικά οχήματα, που διατίθενται σήμερα στην αγορά, μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες [3.2]:

- Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας, - (Battery Electric Vehicles – BEV's)-.
- Ηλεκτρικά οχήματα με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους, - ( Battery Electric Vehicles with Range Extender) -.
- Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα,- (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV) -.

#### ***Ηλεκτρικά Οχήματα Μπαταρίας***

Τα οχήματα αυτά αναφέρονται ως BEV's (Battery Electric Vehicles) και κινούνται με την ενέργεια, που αντλούν από συσσωρευτές, οι οποίοι βρίσκονται στο εσωτερικό του οχήματος. Αποθηκεύουν ηλεκτροχημική ενέργεια στις μπαταρίες και εκπέμπουν μηδενικούς

ρύπους. Η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται με σύνδεση στο δίκτυο ή σε κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης, με το « αναπαραγωγικό φρενάρισμα », κατά το οποίο η κινητική ενέργεια του οχήματος, ( ηλεκτρική μηχανή σε λειτουργία γεννήτριας ), εναποτίθεται πίσω στις μπαταρίες, σε αντίθεση με ό,τι συμβαίνει στο συμβατικό φρενάρισμα, κατά το οποίο η θερμότητα στην οποία μετατρέπεται η κινητική ενέργεια χάνεται στο περιβάλλον.

### ***Ηλεκτρικά Οχήματα με Μονάδα Επέκτασης της Αυτονομίας τους (Battery Electric Vehicles with Range Extender-BEV/RE)***

Τα ηλεκτρικά οχήματα, που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, έχουν και πάλι συσσωρευτές, από τους οποίους αντλούν την ενέργεια, που καταναλώνουν. Για να αυξηθεί όμως η αυτονομία τους έχουν επιπλέον μία συμβατική γεννήτρια, (καύσης βενζίνης, πετρελαίου ή φυσικού αερίου), η οποία ενεργοποιείται όταν η μπαταρία φτάσει στο ελάχιστο επίπεδο φόρτισης και χρησιμοποιείται είτε για τη φόρτιση των συσσωρευτών είτε για την απευθείας τροφοδότηση των ηλεκτροκινητήρων. Τα εν λόγω οχήματα ανεφοδιάζονται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, όπως ακριβώς τα BEVs, αλλά επιπλέον εφοδιάζονται με το καύσιμο, το οποίο καίει η συμβατική γεννήτρια, που διαθέτουν.

### ***Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα ( Plug-in Hybrid Electric Vehicles-PHEV)***

Στην κατηγορία αυτήν ανήκουν οχήματα, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήρα και συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τα οχήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν τους συσσωρευτές τους κατευθείαν από το δίκτυο ή από κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Επίσης, πρέπει να ανεφοδιάζονται με το καύσιμο, που καταναλώνει ο θερμικός κινητήρας. Όταν ο κινητήρας εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται για τη μετάδοση κίνησης στο όχημα έχουμε παράλληλη σχεδίαση του κινητήρα. Όταν ο θερμικός κινητήρας κινεί μια γεννήτρια, της οποίας η παραγόμενη ενέργεια τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα, έχουμε σειριακή σχεδίαση.

## **3.2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση το μέγεθος και τη χρήση**

Η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται επίσης με βάση το μέγεθος, αλλά και τη χρήση τους στις παρακάτω κατηγορίες [3.1]:

- **L7e** : Πολύ μικρά αυτοκίνητα μέγιστου καθαρού βάρους 550kg, ( χωρίς να υπολογίζεται το βάρος του καυσίμου ή των συσσωρευτών), και μέγιστης ισχύος 15 kW ανεξαρτήτως του κινητήρα.
- **M1** : Επιβατικά οχήματα με έως 8 θέσεις επιπλέον από τον οδηγό.
- **N1** : Επαγγελματικά οχήματα με μέγιστο βάρος φορτίου τα 3.500 kg.
- **N2** : Επαγγελματικά οχήματα με βάρος φορτίου μεταξύ 3.500 kg και 12.000 kg.

### 3.3 Πηγές ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων

Στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα ως πηγές ενέργειας ορίζονται οι συσκευές, που αποθηκεύουν ενέργεια, παρέχουν ενέργεια ( εκφορτίζονται, discharge ) και δέχονται ενέργεια από εξωτερική πηγή ( φορτίζονται, charge ). Έχουν προταθεί διαφόρων τύπων συσκευές αποθήκευσης ενέργειας για τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα. Οι πιο σημαντικές είναι οι **ηλεκτροχημικοί μετατροπείς** (συσσωρευτές ή μπαταρίες), **οι υπερπυκνωτές** ( ultracapacitors, supercapacitors ) και οι **σφόνδυλοι υπερυψηλών ταχυτήτων** ( flywheels, μηχανικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ). Επίσης, υπάρχει και η τεχνολογία των **κυψελών καυσίμου** ( fuel cell ), που είναι ένας τύπος μετατροπέα ενέργειας.

#### 3.3.1 Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές

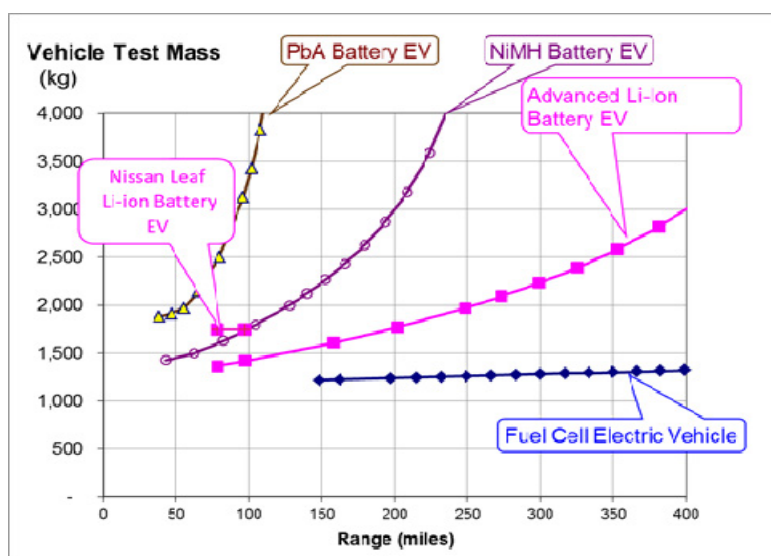
Τα τελευταία χρόνια διεξάγεται παγκοσμίως εντατική επιστημονική έρευνα και επενδύονται σημαντικά κεφάλαια για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών διαφόρων γνωστών τύπων συσσωρευτών, αλλά και για την επινόηση νέων τύπων συσσωρευτών, με τελικό στόχο την ευρεία παραγωγή μικρότερου κόστους συσσωρευτών, με μεγαλύτερες δυνατότητες συσώρευσης ενέργειας κατά μονάδα όγκου και βάρους, με μεγάλη απόδοση σε ισχύ και τέλος με μεγάλη διάρκεια ζωής [3.6].

Στο κλασσικό ηλεκτρικό όχημα η μπαταρία είναι η μόνη πηγή ενέργειας και το συστατικό με το μεγαλύτερο κόστος, βάρος και όγκο. Στα υβριδικά οχήματα είναι επίσης βασικό συστατικό, το οποίο συνεχώς λαμβάνει και παρέχει ηλεκτρική ενέργεια [3.2].

Μια μπαταρία αποτελείται από δύο ή περισσότερα **ηλεκτρικά στοιχεία**, συνδεδεμένα σε σειρά, που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε DC ηλεκτρική ενέργεια. Τα στοιχεία αυτά τοποθετούνται σε μια κατάλληλη θήκη για να δημιουργήσουν μια **μονάδα μπαταρίας**. Οι μονάδες συνδυάζονται παράλληλα ή σε σειρά, έτσι ώστε να παρέχεται η κατάλληλη τάση, ένταση και ενέργεια στο ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος και αποτελούν την μπαταρία.

Το βάρος και ο όγκος της συστοιχίας των συσσωρευτών, που θα εξασφαλίζει τις επιθυμητές επιδόσεις του οχήματος και την αναγκαία αυτονομία του, αποτελούν πολύ σημαντικούς παράγοντες. Στην κατασκευή οποιουδήποτε οχήματος τόσο ο όγκος όσο και η μάζα αποτελούν παράγοντες, που ελέγχονται αυστηρά, και επιδιώκεται η βέλτιστη αξιοποίησή τους.

Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε για πέντε επιβατικά BEV's οχήματα τη μάζα τους ως συνάρτηση με την αυτονομία τους, για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες συσσωρευτών, ( η μια κατηγορία είναι οι κυψέλες καυσίμου)-.



Σχήμα 3.1 Μάζα οχημάτων σε σχέση με την αυτονομία τους για διαφορετικές τεχνολογίες συσσωρευτών.[3.7]

Το μέγεθος και το βάρος των διαφόρων τύπων συσσωρευτών μπορεί να μετρηθεί και να συγκριθεί με τη χρήση των παρακάτω τυποποιημένων μεγεθών:

- Ογκομετρική Πυκνότητα Ισχύος (Volumetric Power Density) (W/l)
- Ογκομετρική Πυκνότητα ενέργειας (Volumetric Energy Density) (Wh/l)
- Βαρυμετρική Πυκνότητα Ενέργειας (Gravimetric Energy Density) (Wh/kg)
- Βαρυμετρική Πυκνότητα Ενέργειας (Gravimetric Power Density) (W/kg)

Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών, προκειμένου να έχουν συγκριτική αξία, εκτελούνται σε προκαθορισμένο περιβάλλον και με προκαθορισμένο τρόπο. Για παράδειγμα, η μέτρηση της ογκομετρικής και βαρυμετρικής πυκνότητας ενέργειας συνήθως γίνεται σε βάθος εκφόρτισης (DOD) 80% και σε ρυθμό εκφόρτισης C/3, (δηλαδή σε διάρκεια τριών ωρών).

Ο προσδιορισμός της αναμενόμενης διάρκειας ζωής γίνεται θεωρητικά από τον αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης σε βάθος (DOD) 80% , μετά τη συμπλήρωση του οποίου η χωρητικότητα των στοιχείων θα μειωθεί κατά ποσοστό 20% επί της αρχικής τιμής της. Η απομένουσα χωρητικότητα των στοιχείων, που θα ανέρχεται στο υπόλοιπο 80% επί της

αρχικής τιμής της, θα επαρκεί για τη συνέχιση της λειτουργίας του συστήματος για τις περισσότερες εφαρμογές. Επομένως, το γεγονός ότι το τέλος της θεωρητικής διάρκειας ζωής έχει ήδη επέλθει, στην πράξη μικρές μόνο επιπτώσεις θα επιφέρει, και ο συσσωρευτής θα συνεχίσει να προσφέρει τις υπηρεσίες του για μια ή και περισσότερες ακόμα τέτοιες θεωρητικές διάρκειες ζωής, πριν τεθεί οριστικά εκτός λειτουργίας. Ένας κύκλος με βάθος εκφόρτισης 80% ισοδυναμεί στην πράξη με δύο κύκλους εκφόρτισης 40% ή με δέκα κύκλους με βάθος εκφόρτισης 8%.

Επίσης, το κόστος αγοράς σε συνδυασμό με τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών αποτελεί ένα άλλο πολύ βασικό ζήτημα για την αξιολόγησή τους.

Οι πιο σημαντικοί τύποι μπαταριών, που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά οχήματα, είναι :

- Μολύβδου οξέος ( lead acid ).
- Νικελίου σιδήρου ( nickel iron ).
- Νικελίου καδμίου ( nickel cadmium ).
- Νικελίου μετάλλου υβριδίου ( nickel metal hydride ).
- Λιθίου πολυμερούς ( lithium polymer ).
- Ιόντων λιθίου ( lithium ion ).
- Θειούχου νατρίου ( sodium sulphur ).

Η μπαταρία σε ένα ηλεκτρικό όχημα εξυπηρετεί διαφορετικό σκοπό από την μπαταρία του συμβατικού οχήματος, της οποίας ο πρωταρχικός σκοπός είναι να παρέχει μεγάλο ηλεκτρικό ρεύμα για ένα σύντομο χρονικό διάστημα προς τον εκκινητή (μίζα). Στα ηλεκτροκίνητα οχήματα οι μπαταρίες παρέχουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα προς τον/τους ηλεκτροκίνητηρα/ες για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα και ως εκ τούτου πρέπει να είναι πολύ ισχυρότερες από κάθε άποψη. Επίσης, οι μπαταρίες των ηλεκτροκίνητων οχημάτων πρέπει να έχουν τη δυνατότητα συχνής πλήρους εκφόρτισης ή πλήρους φόρτισης, απαίτηση, που ονομάζεται βαθιά εκφόρτιση ( deep cycling ), και μία μπαταρία με αυτό το χαρακτηριστικό ονομάζεται **μπαταρία βαθιάς εκφόρτισης**. Οι μπαταρίες αυτές έχουν μικρότερη στιγμιαία ισχύ από μία μπαταρία εκκίνησης, αλλά μπορούν να προσδώσουν ηλεκτρική ενέργεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα καθώς και να υποστούν περισσότερες βαθιές εκφορτίσεις.

### 3.3.1.1 Παράμετροι μπαταριών

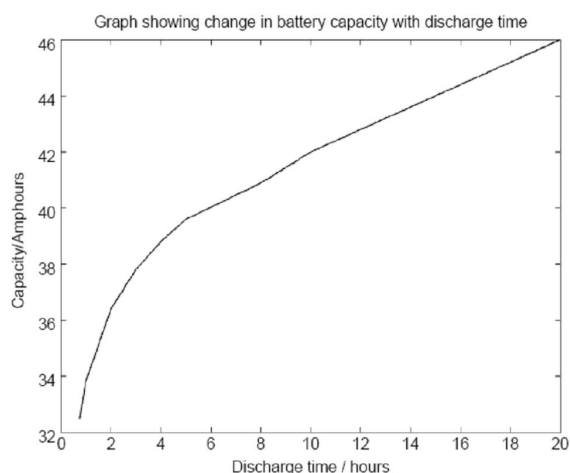
#### Τάσεις στοιχείων μπαταρίας

Η μπαταρία, όπως έχει αναφερθεί, απαρτίζεται από στοιχεία. Η ονομαστική τάση της μπαταρίας είναι η τάση, που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ονομαστικής τάσης ενός στοιχείου με τον αριθμό των στοιχείων, που απαρτίζουν την μπαταρία. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου έχει οριστεί στα 2 V.

### Χωρητικότητα μπαταρίας

Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Coulomb ( $1C=1\text{Ampere} \times 1\text{sec}$ ), αλλά επειδή η μονάδα αυτή είναι ακατάλληλα μικρή, αντ' αυτού χρησιμοποιείται το Ah ( $1\text{Ah} = 3600\text{C}$ ), φορτίο, που μεταφέρεται από ρεύμα έντασης 1 A σε μια ώρα.

Αν η χωρητικότητα μιας μπαταρίας είναι για παράδειγμα 10 Ah μπορεί να παρέχει ρεύμα έντασης 1A για 10h ή 2A για 5h ή στη θεωρία 10A για 1h. Στην πράξη, ενώ μια μπαταρία μπορεί να είναι σε θέση να παρέχει ρεύμα έντασης 1A για 10h, εάν απορροφώνται από αυτήν 10A θα διαρκέσει λιγότερο από μία ώρα. Η χωρητικότητα των μεγάλων μπαταριών, που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα, αναφέρεται συνήθως σε εκφόρτιση 5 ωρών. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρούμε πώς επηρεάζεται η χωρητικότητα αν η εκφόρτιση της μπαταρίας είναι αργή ή γρήγορη. Το διάγραμμα αναφέρεται σε μια μπαταρία με ονομαστική τιμή 100Ah.



Σχήμα 3.2 Χωρητικότητα μπαταρίας ανάλογα με την ταχύτητα εκφόρτισης.

### Ρυθμός εκφόρτισης ( discharge rate )

Ο ρυθμός εκφόρτισης είναι το ηλεκτρικό ρεύμα, με το οποίο εκφορτίζεται μια μπαταρία και εκφράζεται ως ρυθμός  $Q/h$ , όπου  $Q(\text{Ah})$  η χωρητικότητα της μπαταρίας και  $h$  ο χρόνος εκφόρτισης σε ώρες.

### Κατάσταση φόρτισης ( State of Charge )

Η κατάσταση φόρτισης ( SoC ) είναι η ποσότητα φορτίου, που απομένει μετά την εκφόρτιση από την πλήρη φόρτιση. Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί από ένα απλό κύκλωμα μπαταρίας με φορτίο. Το ηλεκτρικό ρεύμα ορίζεται ως ο ρυθμός μεταβολής των ηλεκτρικών φορτίων διαμέσου μίας διατομής  $i(t) = \frac{dq}{dt}$ .

Η στιγμιαία θεωρητική κατάσταση φορτίου  $\text{SoC}(t)$  είναι η ποσότητα του ισοδύναμου θετικού φορτίου στο θετικό ηλεκτρόδιο. Αν η κατάσταση φορτίου είναι ίση με τη χωρητικότητα  $Q$ , τη χρονική στιγμή  $t_0$ , έναρξης της εκφόρτισης, τότε  $\text{SoC}(t_0) = Q$ . Για ένα στοιχειώδες χρονικό



διάστημα  $dt$ , ισχύει  $d(\text{SoC}) = -dq = -i(t)dt$ . Ολοκληρώνοντας από την αρχική τιμή  $t_0$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $t$  η στιγμιαία κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας δίνεται από τη σχέση:

$$\text{SoC}(t) = Q_T - \int_0^t i(t)dt \quad (1)$$

#### Κατάσταση εκφόρτισης ( State of Discharge )

Η κατάσταση εκφόρτισης ( SoD ) είναι ένα μέτρο του φορτίου, που απομακρύνεται από την μπαταρία.

$$\text{SoD}(t) = \int_0^t i(t)dt = Q_T - \text{SoC}(t) \quad \text{SoD}(t) = \int_0^t i(t)dt = Q_T - \text{SoC}(t) \quad (2)$$

#### Βάθος εκφόρτισης ( Depth of Discharge )

Το βάθος εκφόρτισης ( DoD ) είναι το ποσοστό χωρητικότητας της μπαταρίας, το οποίο έχει εκφορτιστεί κατά τη χρήση της. Το βάθος εκφόρτισης δίνεται από τη σχέση:

$$\text{DoD}(t) = \frac{Q_T - \text{SoC}(t)}{Q_T} 100\% = \frac{\int_0^t i(t)dt}{Q_T} 100\% \quad (3)$$

Εκφόρτιση μιας μπαταρίας σε ποσοστό μεγαλύτερο από 80% της χωρητικότητας ονομάζεται βαθιά εκφόρτιση - ( deep discharge ).

#### Ειδική ενέργεια ( Specific Energy )

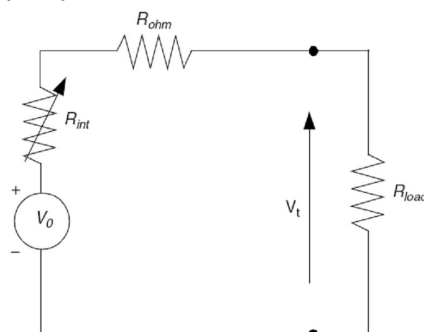
Η ειδική ενέργεια μιας μπαταρίας είναι η ενεργειακή χωρητικότητα ανά μονάδα βάρους της μπαταρίας (Wh/kg). Η θεωρητική ειδική ενέργεια είναι η μέγιστη ενέργεια, που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα μάζας του ενεργού υλικού. Οι πρακτικές τιμές όμως της ειδικής ενέργειας είναι αρκετά χαμηλότερες από τα θεωρητικά μέγιστα. Αυτό συμβαίνει, διότι εκτός από τους διάφορους περιορισμούς, που τείνουν να μειώσουν την τάση του στοιχείου και εμποδίζουν την πλήρη χρήση του ενεργού υλικού, οι κατασκευαστικές ανάγκες της μπαταρίας προσθέτουν στο βάρος της χωρίς όμως να προσφέρουν τίποτα στην παραγόμενη ενέργεια.

#### Ειδική ισχύς ( Specific Power )

Η ειδική ισχύς μιας μπαταρίας ορίζεται ως η μέγιστη ισχύς ανά μονάδα βάρους της μπαταρίας, που μπορεί να παραχθεί σε ένα μικρό χρονικό διάστημα και εξαρτάται κυρίως από την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Με βάση το κυκλωματικό μοντέλο μπαταρίας του παρακάτω σχήματος, η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να προσδώσει η μπαταρία στο φορτίο είναι:

$$P_{peak} = \frac{V_0^2}{4(R_{ohm} + R_{int})} \quad (4)$$

όπου  $R_{ohm}$  είναι η ωμική αντίσταση του αγωγού και  $R_{int}$  είναι η εσωτερική αντίσταση, που προκαλείται από χημική αντίδραση.



Σχήμα 3.3 Κυκλωματικό μοντέλο μπαταρίας.

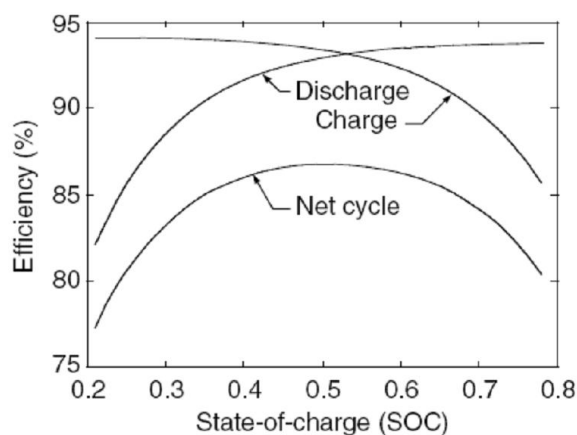
### Ενεργειακή απόδοση

Οι απώλειες ενέργειας και ισχύος κατά την εκφόρτιση ή τη φόρτιση εμφανίζονται με τη μορφή απώλειας τάσης. Έτσι, η απόδοση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της τάσης λειτουργίας του κελιού προς τη θερμοδυναμική τάση, δηλαδή:

$$\text{εκφόρτιση: } n = \frac{V}{V_0} \quad (5)$$

$$\text{φόρτιση: } n = \frac{V_0}{V} \quad (6)$$

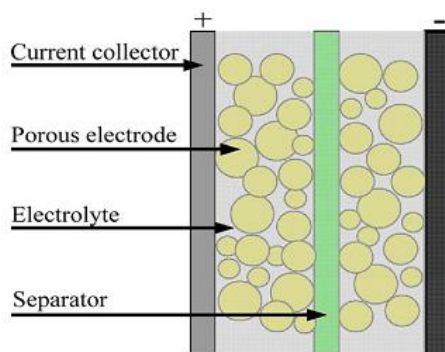
Η τάση των πόλων ως συνάρτηση του ρεύματος και της ενέργειας, που αποθηκεύεται στην μπαταρία, ή της κατάστασης φόρτισης είναι χαμηλότερη στην εκφόρτιση και υψηλότερη στην φόρτιση από το ηλεκτρικό δυναμικό, που αναπτύσσεται από μια χημική αντίδραση. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η απόδοση της μπαταρίας μολύβδου οξέος κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και της φόρτισης ως συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης ( SoC ). Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω διάγραμμα, η απόδοση του συνολικού κύκλου της μπαταρίας ( Efficiency ) παρουσιάζει μέγιστο στη μέση της περιοχής της κατάστασης φόρτισης. Επομένως, η μονάδα ελέγχου λειτουργίας της μπαταρίας ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος θα πρέπει να ελέγχει την κατάσταση φόρτισής της, ώστε να βρίσκεται στο μέσο του εύρους τιμών του SoC, έτσι ώστε να βελτιώνει την απόδοση λειτουργίας και να περιορίζει την αύξηση της θερμοκρασίας, που προκαλείται από τις απώλειες ενέργειας. Υψηλή θερμοκρασία θα μπορούσε να προκαλέσει φθορές στην μπαταρία.



Σχήμα 3.4 Ενεργειακή απόδοση ως συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης

### 3.3.2 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν μια σχετικά νέα τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας [3.3]. Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται με το φυσικό διαχωρισμό θετικού και αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου. Τα εν λόγω φορτία αποθηκεύονται σε δύο παράλληλους οπλισμούς, χωρισμένους με μονωτικό υλικό. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής, αλλά χαμηλή πυκνότητα ενέργειας και μεγάλο κόστος. Για το λόγο αυτό η χρήση τους είναι κυρίως βοηθητική.

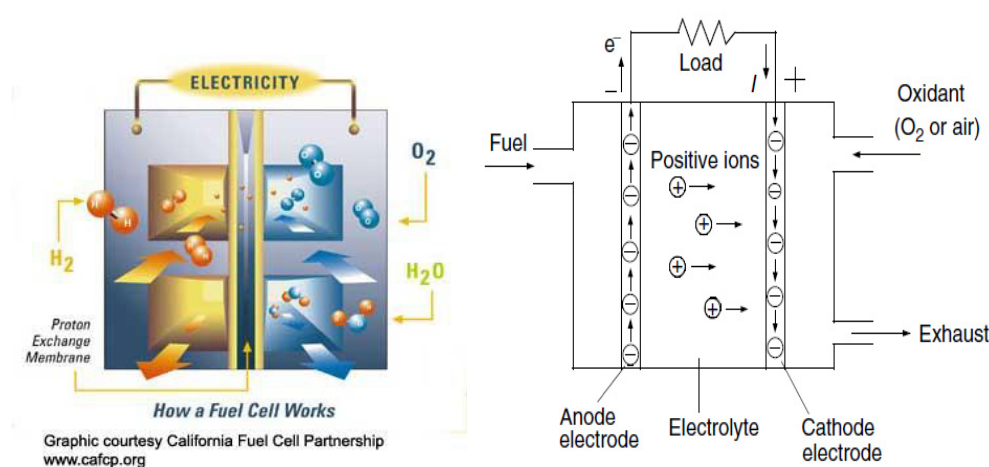


Σχήμα 3.5 Υπερπυκνωτής

### 3.3.3 Κυψέλες καυσίμου

Η διαφορά μεταξύ των κυψελών καυσίμου και των μπαταριών είναι ότι ενώ οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια, οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης, χωρίς να μεσολαβήσει οποιαδήποτε

θερμική ή μηχανική διαδικασία [3.4]. Το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο παρέχονται συνεχώς και χωριστά στα δύο ηλεκτρόδια της κυψέλης, όπου και πραγματοποιείται η αντίδραση. Επίσης, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ηλεκτρολύτη για να άγει τα ιόντα από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο. Το καύσιμο παρέχεται στην άνοδο, δηλαδή στο θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο, όπου και παράγονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά, υπό την επίδραση της διαφοράς τάσης ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια, ρέουν διαμέσου του εξωτερικού κυκλώματος μέχρι το ηλεκτρόδιο της καθόδου, δηλαδή το αρνητικό ηλεκτρόδιο (σχήμα 3.5). Εκεί πραγματοποιείται χημική αντίδραση με τα θετικά ιόντα και το οξυγόνο, παρόμοια με αυτή, που λαμβάνει χώρα σε μία μπαταρία. Τα αέρια πρέπει να υγροποιούνται και η θερμοκρασία του ψυκτικού μέσου πρέπει να ελέγχεται. Η κυψέλη καυσίμου δεν εκφορτίζεται ούτε εξαντλείται η ενέργειά της, όπως συμβαίνει με τις μπαταρίες.



Σχήμα 3.5 Βασική λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου.

### 3.4 Περιοριστικοί παράγοντες - Δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και αυτονομία

Ένα βασικό μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά είναι ο βαθμός αυτονομίας, που μπορεί να επιτευχθεί. Στα ηλεκτρικά οχήματα η επί του αυτοκινήτου αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, σε ικανοποιητική ποσότητα για την εξυπηρέτηση των αναγκών του κατόχου, παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες και απαιτεί υψηλό κόστος. Όλα τα δομικά και λειτουργικά στοιχεία ενός ηλεκτρικού οχήματος πλεονεκτούν συντριπτικά σε απόδοση σε σχέση με αυτά ενός συμβατικού οχήματος, με εξαίρεση τη δεξαμενή καυσίμου.

Η δεξαμενή υπερτερεί πολλαπλασίως σε ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας σε σύγκριση με τις διατάξεις αποθήκευσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός, ότι τα υγρά καύσιμα διαθέτουν πολύ μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα τόσο κατά όγκο όσο και κατά βάρος. Η δεξαμενή καυσίμου έχει απλή κατασκευή, καταλαμβάνει μικρό

όγκο και είναι σχετικά ελαφριά. Οι συστοιχίες συσσωρευτών έχουν πολύ μεγαλύτερο βάρος και η κατά όγκο και βάρος πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, που προσφέρουν είναι πολύ μικρή [3.6].

Ο ανεφοδιασμός των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μια διαδικασία, η οποία παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τον ανεφοδιασμό των συμβατικών, όπως είναι η δυνατότητα φόρτισης και στο σπίτι ή σε κάποια απομακρυσμένη περιοχή, αλλά παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα. Ο χρόνος, που απαιτεί η πλήρης φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος, είναι αισθητά μεγαλύτερος από αυτόν του πλήρους ανεφοδιασμού ενός συμβατικού οχήματος. Ο ανεφοδιασμός με καύσιμο μπορεί να διαρκέσει λίγα λεπτά της ώρας, ενώ ο ανεφοδιασμός με ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διαρκέσει 2 έως 12 ώρες για τα επίπεδα φόρτισης Level 1 και Level 2 και 20 έως 60 λεπτά για φόρτιση Level 3. Η φόρτιση στο τρίτο επίπεδο απαιτεί αγορά και εγκατάσταση συσκευών ταχείας φόρτισης, το κόστος των οποίων είναι σημαντικό.

Τέλος, ένα εμπόδιο διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, που πρέπει μελλοντικά να υπερνικηθεί, είναι το υψηλό αρχικό κόστος των συσσωρευτών και ο κύκλος ζωής τους. Ο κύκλος ζωής τους δεν είναι μεν μικρός, μπορεί να πλησιάσει τα 10 χρόνια, αλλά για να κάνουμε μία πλήρη ανάλυση κόστους πρέπει να συνυπολογιστεί η αξία αντικατάστασης του συσσωρευτή στο κόστους χρήσης τη ηλεκτρικού οχήματος.

### **3.5 Σύνδεση των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στο δίκτυο -V2G**

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα σύνθετων και κρίσιμων υποδομών, αλλά στερείται αποθηκευτικής ικανότητας και ως εκ τούτου η ενέργεια πρέπει συγχρόνως να παράγεται και να καταναλώνεται. Τα οχήματα διαθέτουν αποθηκευμένη ενέργεια, η οποία μέχρι και σήμερα είναι στο μεγαλύτερο μέρος της σε μορφή υγρού καυσίμου. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί, ότι τόσο το ενεργειακό σύστημα όσο και τα οχήματα είναι σχεδιασμένα έτσι, ώστε να μπορούν να καλύψουν ζήτηση αιχμής. Δηλαδή, το ενεργειακό σύστημα σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να καλύψει τη ζήτηση αιχμής, αλλά τις περισσότερες ώρες μέσα σε ένα 24ωρο χρειάζεται να αποδώσει αρκετά μικρότερο φορτίο, το φορτίο βάσης. Επίσης, τα οχήματα έχουν την ισχύ να επιταχύνουν έως την τελική ταχύτητα, αλλά σπάνια κινούνται με αυτήν, ειδικά τα οχήματα, που χρησιμοποιούνται για τοπική μετακίνηση αστικών οικογενειών.

Το δίκτυο μπορεί να εκμεταλλευτεί τα οχήματα, που είναι συνδεδεμένα με αυτό, όταν είναι σταθμευμένα, σύμφωνα με τη διαδικασία V2G ( Vehicle to Grid), κατά την οποία έχουμε μεταφορά ενέργειας από τα οχήματα προς το σύστημα ενέργειας. Τα οχήματα, που συνδέονται στο δίκτυο για την τροφοδοσία τους, ονομάζονται Plug-in οχήματα και μπορεί να είναι είτε ηλεκτρικά οχήματα είτε υβριδικά. Έτσι, ένας στόλος ηλεκτρικών οχημάτων τόσο μεγάλος ώστε να συγκεντρώνει ένα σημαντικό ποσό ισχύος μπορεί να αποτελέσει εφεδρεία για τις αιφνίδιες αιχμές της ζήτησης. Βασικό πλεονέκτημα της εφεδρείας αυτής είναι η ταχεία

απόκριση των μπαταριών. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτίζονται από το δίκτυο όταν η ζήτηση είναι χαμηλή και να εκφορτίζονται όταν η ζήτηση αυξάνεται. Με αυτή την, κατά μια έννοια, αποθήκευση γίνεται εφικτή ισοστάθμιση ανάμεσα στην ισχύ, που παράγεται, και σε αυτή, που ζητείται κάθε χρονική στιγμή και επομένως επιτυγχάνεται σταθερότητα στις τιμές τάσης και συχνότητας, που με τη σειρά τους καθορίζουν την ποιότητα της προσφερόμενης ισχύος.

Επιδίωξη της ανάπτυξης του V2G συστήματος λειτουργίας είναι τα ηλεκτροκίνητα οχήματα να έχουν συμμετοχή στην αγορά ενέργειας. Με την ανακατασκευή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ορισμένες λειτουργίες εξισορρόπησης έχουν μετατραπεί σε αγορές. Υπάρχουν κάποιες συγκεκριμένες αγορές ενέργειας, που πρέπει να εξεταστούν, για να προσδιορισθεί η δυνατότητα συμμετοχής της λειτουργίας V2G στη συνολική αγορά ενέργειας:

#### ➤ **Αγορά φορτίου βάσης**

Σύμφωνα με μελέτες [3.8], τα ηλεκτροκίνητα οχήματα δεν μπορούν να αποδώσουν ισχύ για την κάλυψη του φορτίου βάσης σε ανταγωνιστική τιμή. Το φορτίο βάσης πρέπει να παρέχεται σε 24ωρη βάση και κατά κύριο λόγο προέρχεται από μεγάλες ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες, που παράγουν ενέργεια με χαμηλό κόστος ανά kWh, αλλά στερούνται ικανότητας να συνδέονται και να αποσυνδέονται ακαριαία.

#### ➤ **Αγορά φορτίου αιχμής**

Το φορτίο αιχμής του συστήματος καλύπτεται από μονάδες, που έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται και να αποσυνδέονται πολύ γρήγορα από αυτό. Η χρήση των μονάδων αυτών, οι οποίες έχουν μικρότερο κεφαλαιακό κόστος, ακόμα και αν παράγουν ενέργεια με υψηλότερο κόστος ανά kWh, συμφέρει αφού το φορτίο αιχμής απαιτείται μόνο για μερικές εκατοντάδες ώρες το χρόνο. Στην αγορά ενέργειας δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην ισχύ βάσης και στην ισχύ αιχμής. Ο παράγοντας, που διαχωρίζει το φορτίο βάσης από το φορτίο αιχμής, είναι το μέγεθος της ζήτησης και η ώρα της ημέρας, που αυτό ζητείται. Τα χαρακτηριστικά των μονάδων, που καλύπτουν κατά κύριο λόγο τις αιχμές της ζήτησης, ταιριάζουν απόλυτα στα χαρακτηριστικά των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, κυρίως ως προς την ταχεία απόκριση. Η αυξημένη τιμή της ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής επιτρέπει την κερδοφόρα λειτουργία V2G, παρέχοντας έτσι κίνητρα για την ανάπτυξή της.

#### ➤ **Επικουρικές υπηρεσίες και εφεδρεία**

Εάν η παραγόμενη και η ζητούμενη ενέργεια συνέπιπταν ανά πάσα στιγμή δεν θα υπήρχε ανάγκη από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες παραγωγής ή από ηλεκτροκίνητα οχήματα.

Οι επικουρικές υπηρεσίες, που μπορεί να παρασχεθούν από μία μονάδα στο δίκτυο, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Ρύθμιση συχνότητας.
- Στρεφόμενη εφεδρεία.
- Έλεγχος τάσης .
- Επανεκκίνηση του συστήματος.

Οι δύο επικουρικές υπηρεσίες, που σχετίζονται πιο άμεσα με την ενέργεια V2G, είναι η ρύθμιση της συχνότητας και η στρεφόμενη εφεδρεία.

Υπάρχει πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα **στρεφόμενη εφεδρεία**. Πρωτεύουσα εφεδρεία είναι η δυνατότητα της αύξησης της παραγόμενης ενεργού ισχύος μονάδας, μέσα σε χρονικό διάστημα μεταξύ πέντε και δεκαπέντε δευτερολέπτων μετά από σημαντικό συμβάν. Η δευτερεύουσα εφεδρεία είναι η ίδια λειτουργία με την πρωτεύουσα, αλλά ανάμεσα σε διαστήματα μεταξύ 15 και 90 δευτερολέπτων και η τριτεύουσα μεταξύ 90 δευτερολέπτων και 20 λεπτών. Οι στρεφόμενες εφεδρείες πληρώνονται, σύμφωνα με την ποσότητα ενέργειας, τις χρονικές στιγμές χρήσης τους και το χρονικό διάστημα, που ήταν διαθέσιμες και σε ετοιμότητα. Ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, ο οποίος λειτουργεί χωρίς να εξαντλεί τη δυναμικότητά του, μπορεί να πουλήσει τη δυναμικότητα, που δεν χρησιμοποιεί, ως στρεφόμενη εφεδρεία. Η τιμολόγηση είναι υπέρ των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, αφού πληρώνονται ως στρεφόμενες εφεδρείες μόνο για να είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, παρά το ότι μέσα στο διάστημα, που είναι συνδεδεμένα, μπορεί λειτουργήσουν σαν πηγές ενέργειας πολύ μικρά διαστήματα. Αυτό ισχύει για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα μπαταρίας, τα οποία ούτως ή άλλως είναι plug-in οχήματα, αλλά και για τα υβριδικά καθώς και τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου, τα οποία μπορούν εύκολα να αρχίσουν να παράγουν ενέργεια μέσα στα 10 λεπτά, που είναι απαραίτητο να έχουν ανταποκριθεί.

Οι υπηρεσίες ρύθμισης αφορούν στην παροχή ενέργειας υπό τον άμεσο και σε πραγματικό χρόνο έλεγχο του ISO (ανεξάρτητο χειριστή του συστήματος, Independent System Operator). Η μονάδα παραγωγής πρέπει να μπορεί να λάβει σήματα από το υπολογιστικό σύστημα διαχείρισης της ενέργειας του ISO και να ανταποκρίνεται στα σήματα αυτά, αυξάνοντας ή μειώνοντας αντίστοιχα την παραγόμενη ενέργεια. Σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι να διατηρείται η συχνότητα του συστήματος όσο πιο κοντά γίνεται στα 50 Hz (ή στα 60 Hz για την Αμερική), μέσω της εξισορρόπησης παραγωγής και ζήτησης. Αν το φορτίο υπερβεί την παραγωγή, οι ήδη διασυνδεδεμένες γεννήτριες στο δίκτυο θα επιβραδύνουν, υποδηλώνοντας το ότι απαιτείται περισσότερη ενέργεια. Επομένως, όταν παρατηρείται μια μικρή μεταβολή, είναι δυνατόν, προσθέτοντας ή αφαιρώντας ενέργεια, να διατηρηθεί η συχνότητα στο ιδανικό επίπεδο. Η συχνότητα ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε σε κάθε μια ώρα να έχουμε τον ίδιο αριθμό περιόδων ισχύος, ακόμα και αν εμφανίζονται μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ώρας.

Οι υπηρεσίες ρύθμισης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Την αύξηση της παραγόμενης ισχύος από ένα βασικό επίπεδο και τη μείωση της παραγόμενης ισχύος από ένα βασικό επίπεδο επίσης. Τα ηλεκτροκίνητα οχήματα μπαταρίας μπορούν να ενταχθούν εύκολα σε αυτήν την αγορά ενέργειας, διότι έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

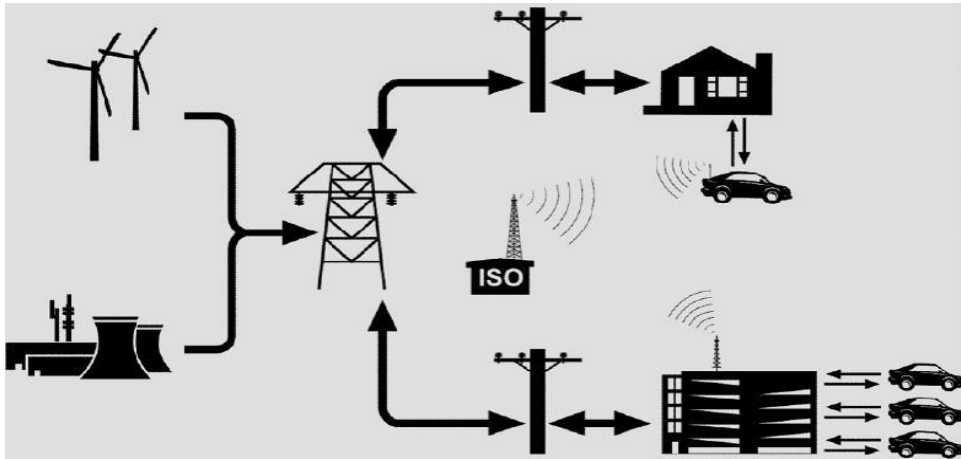
- Μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε σήματα ρύθμισης.
- Μπορούν να λειτουργήσουν και για την αύξηση της διαθέσιμης ισχύος (V2G), αλλά και για τη μείωσή της ( φόρτιση συσσωρευτών ).
- Η συνεισφορά τους στην αύξηση και στη μείωση της ισχύος, (σε συνδυασμό), προκαλεί πολύ μικρή και καθαρή εκφόρτιση των μπαταριών.

### 3.5.1 Επικοινωνία μεταξύ ηλεκτροκίνητων οχημάτων και δικτύου

Είναι απαραίτητο να γίνουν δύο συνδέσεις ανάμεσα στα ηλεκτροκίνητα οχήματα και στο δίκτυο. Η μία είναι η σύνδεση για τη μεταφορά της ισχύος με τους τρόπους, που έχουμε αναφέρει, και η δεύτερη είναι η σύνδεση ελέγχου, μέσω της οποίας γίνεται η ανάλυση του σήματος, που λαμβάνει το όχημα από το διαχειριστή του συστήματος, και η καταγραφή της ποσότητας της V2G ενέργειας. Η σύνδεση ελέγχου μπορεί να είναι εγκατεστημένη πάνω στο όχημα σε on board σύστημα, μπορεί να είναι εγκατεστημένη σε ένα δημόσιο σταθμό φόρτισης ή επίσης να είναι έργο ενός διαχειριστή στόλου ηλεκτρικών οχημάτων (aggregator). Η V2G ενέργεια κοστολογείται με υψηλές τιμές, επομένως είναι απαραίτητο να υπάρχει ακριβής καταγραφή της συνολικής ποσότητας και του χρονικού διαστήματος, που αυτή προσφέρεται.

Ο διαχειριστής του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί το διαμεσολαβητή ανάμεσα στο στόλο και στον κεντρικό διαχειριστή του ηλεκτρικού συστήματος (ΔΕΣΜΗΕ στην Ελλάδα). Η επικοινωνία ανάμεσα στον κεντρικό διαχειριστή και στο διαμεσολαβητή γίνεται μέσω σημάτων, τα οποία εν συνεχεία μεταφέρονται και σε κάθε μεμονωμένο όχημα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο. Κάθε όχημα έχει ένα τμήμα, το οποίο καλείται "telematics", το οποίο πραγματοποιεί τη δήλωση του ηλεκτροκίνητου οχήματος σε ηλεκτρονική βάση δεδομένων με τη χρήση ειδικής ταυτότητας. Μέσω της ειδικής ταυτότητας μπορεί να καταγραφεί το σύνολο της συναλλαγής ενέργειας με το δίκτυο και επομένως να γίνει η ανάλογη χρέωση. Για να καταγραφεί η ενέργεια φόρτισης, όταν ένα ηλεκτρικό όχημα συνδεθεί σε κάποιο σταθμό φόρτισης, αποστέλλεται μέσω των καλωδίων ο κωδικός αριθμός του σταθμού φόρτισης στο σύστημα ελέγχου του αυτοκινήτου, το οποίο με τη σειρά του καταγράφει το ποσό ενέργειας, που απαιτήθηκε κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ( σχήμα 3.6 ). Συγχρόνως, το τμήμα telematics εντοπίζει τη θέση, στην οποία βρίσκεται το όχημα, είτε με το Παγκόσμιο Σύστημα Θεσπιθεσίας (GPS) είτε μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο διαχειριστής του στόλου γνωρίζει τη θέση, τη διαθεσιμότητα και τη στάθμη φόρτισης (SOC) των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, που ελέγχει. Επίσης, έχει αναπτυχθεί ειδικό λογισμικό για τη διευκόλυνση της επικοινωνίας ανάμεσα στο διαχειριστή του στόλου και στο κάθε όχημα. Στο σύστημα αυτό κάθε όχημα, που συμμετέχει στη V2G λειτουργία, έχει μια σελίδα στο διαδίκτυο, που ελέγχεται από το διαχειριστή, στην οποία ο οδηγός μπορεί να καθορίσει διάφορες παραμέτρους σχετικά με την κατάσταση του οχήματος [3.9].





Σχήμα 3.6 Απεικόνιση μεμονωμένης και ομαδικής διασύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων.

## 3.6 Έλεγχος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

### 3.6.1 Μοντέλο Ελέγχου Φόρτισης

Είναι πολύ χρήσιμο να μπορούμε να προγραμματίσουμε την απαιτούμενη προς αγορά ενέργεια για την κάλυψη του φορτίου της επόμενης ημέρας ( day ahead scheduling ). Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε, με βάση την πρόβλεψη, που έχει γίνει την προηγούμενη ημέρα ( dispatch ), να διαχειριστούμε το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων [3.5]. Για την επίτευξη των παραπάνω, έχει αναπτυχθεί ο κατάλληλος αλγόριθμος και περιγράφεται παρακάτω.

Ο αλγόριθμος, που περιγράφουμε, χρησιμοποιεί ντετερμινιστικές και στοχαστικές μεταβλητές για να προβλέψει τις ενεργειακές ανάγκες του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων την επόμενη ημέρα ( day-ahead ):

#### ➤ **Ντετερμινιστικές Μεταβλητές**

- Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων.
- Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (Level 1, 2 ή 3 ).
- Απώλειες φόρτισης.
- Είδος φόρτισης ( ελεγχόμενη ή μη ).

#### ➤ **Στοχαστικές Μεταβλητές**

- Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων ( PHEV, BEV, L7e, M1, N1, N2 ).
- Επιλογή τεχνολογιών σταθμών φόρτισης ανά τύπο οχήματος.
- Διανυόμενη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών φορτίσεων.

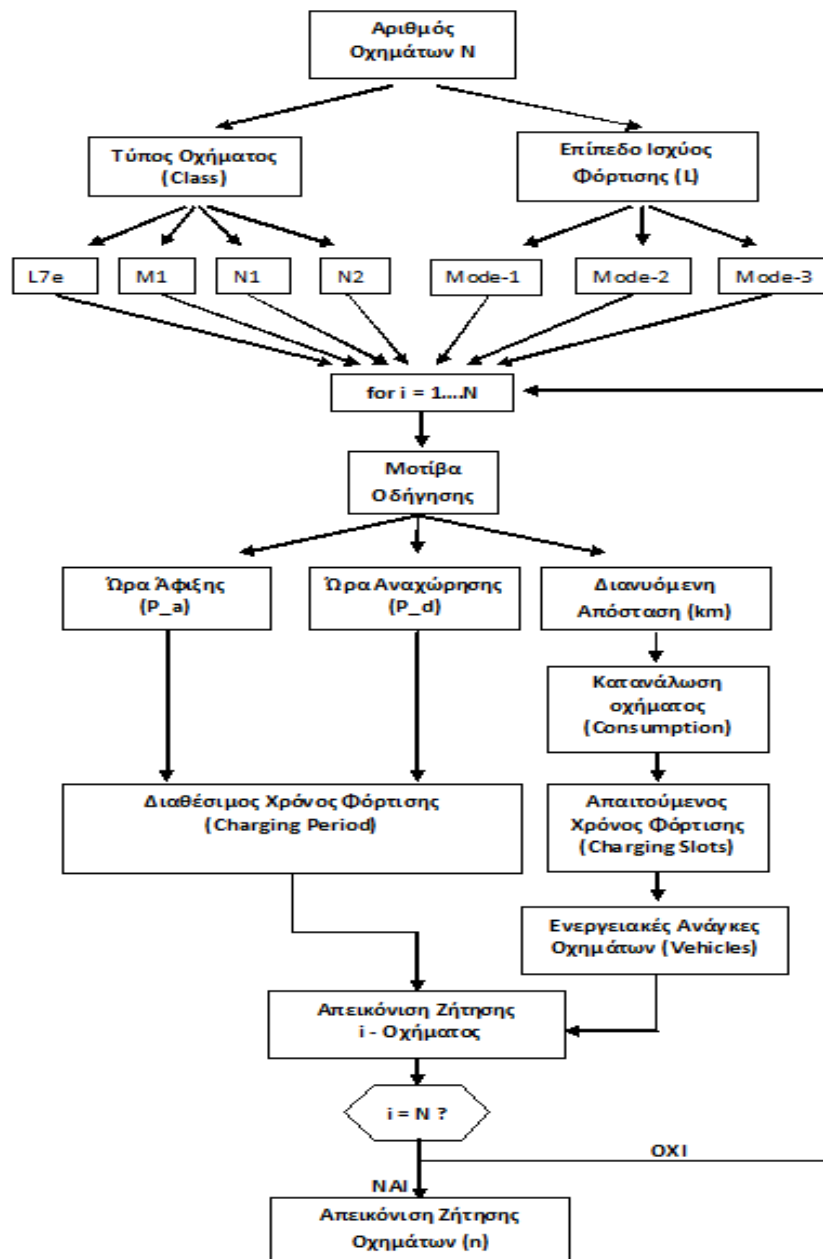
- Συνδεσιμότητα ηλεκτρικών οχημάτων, ( ώρα και διάρκεια σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ).

Στόχος του αλγορίθμου δεν είναι μόνο η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του στόλου, αλλά και η ελαχιστοποίηση του κόστους. Γι αυτό πρέπει να γνωρίζουμε ή να μπορούμε να προβλέψουμε τις τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της επόμενης ημέρας και βάσει της χρονοσειράς των τιμών αγοράς ενέργειας να κατανέμουμε τη ζητούμενη ισχύ στις ώρες με το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος.

Για τις στοχαστικές μεταβλητές απαιτείται επιλογή τυχαίων τιμών από την κατανομή της κάθε στοχαστικής μεταβλητής και επομένως η εξαγόμενη κατανομή της ζήτησης στηρίζεται σε ένα σύνολο τυχαίων επιλογών, κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Προκειμένου να αποφευχθούν οι ανωτέρω τυχαίες επιλογές, έχει εφαρμοσθεί η μέθοδος **Monte Carlo**, με την οποία προσομοιώνονται διαφορετικά σενάρια δεδομένων, αναθέτοντας τυχαίες τιμές κάθε φορά στις στοχαστικές μεταβλητές. Η τελική κατανομή προκύπτει από το μέσο όρο των επιμέρους κατανομών κάθε σεναρίου. Η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo διερευνά την ευαισθησία ενός σύνθετου συστήματος, μεταβάλλοντας παραμέτρους με βάση πάντα τους στατιστικούς περιορισμούς. Τα συστήματα, στα οποία μπορεί να εφαρμοσθεί η μέθοδος, μπορεί να είναι οικονομικά, φυσικά, και μαθηματικά.

Ο αλγόριθμος σε συνδυασμό με την μέθοδο Monte Carlo μας δίνει έναν πίνακα, ο οποίος δείχνει την ισχύ, που πρέπει να αγορασθεί από την day-ahead αγορά ενέργειας, για την κάλυψη της προβλεπόμενης ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Παρακάτω φαίνεται το Διάγραμμα Μπλοκ λειτουργίας του πρώτου τμήματος του αλγορίθμου, κατά το οποίο γίνεται η πρόβλεψη του στόλου.



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα μπλοκ λειτουργίας αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος αυτός μας δίνει μια πρόβλεψη για τη ζήτηση φορτίου της επόμενης ημέρας με βάση χαρακτηριστικά του στόλου των οχημάτων, την οδηγική συμπεριφορά των καταναλωτών, αλλά και το σενάριο φόρτισης, το οποίο θα θεωρήσουμε ότι ακολουθείται.

Τα στοιχεία που βλέπουμε στο διάγραμμα είναι τα παρακάτω:

- **N** : Ο συνολικός αριθμός των οχημάτων, που αναμένεται να προσέλθουν την επόμενη ημέρα για φόρτιση. Η τιμή, που θα λάβει το N, εξαρτάται από το σενάριο διείσδυσης, το οποίο θα εφαρμόσουμε.
- **ts** : Το time slot είναι μια μονάδα μέτρησης χρόνου και αποτελεί το μικρότερο χρονικό διάστημα, μέσα στο οποίο το εξωτερικό περιβάλλον θεωρείται αμετάβλητο. Μια

- **Arrival Period** : Το χρονικό διάστημα, μέσα στο οποίο μπορεί να προσέλθει ένα όχημα προς φόρτιση. Μετριέται σε ώρες (h).
- **P<sub>a</sub>** : Πίνακας απεικόνισης της πιθανότητας κάποιο όχημα να έρθει προς φόρτιση το time slot a. Τα time slot άφιξης δεν έχουν όλα την ίδια πιθανότητα, αλλά η προσέλευση των οχημάτων ακολουθεί μια καμπύλη, η οποία θυμίζει κανονική κατανομή, με κεντρική τιμή t. Άρα, η μεταβλητή a μπορεί να θεωρηθεί πως ακολουθεί κατανομή Gauss και συνεπώς το P<sub>a</sub> είναι το σύνολο τιμών της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gauss με κεντρική τιμή την t. Οι τιμές του πίνακα P<sub>a</sub> εξαρτώνται βέβαια από το σενάριο προσέλευσης, το οποίο έχει επιλεγεί.
- **Departure Period** : Το διάστημα, μέσα στο οποίο θεωρείται ότι ένα όχημα μπορεί να διακόψει τη φόρτισή του και να αναχωρήσει. Μετριέται σε ώρες (h).
- **P<sub>d</sub>** : Πίνακας απεικόνισης της πιθανότητας κάποιο όχημα να αναχωρήσει κατά το time slot d, (για την ακρίβεια, αμέσως μετά από αυτό). Η αναχώρηση, όπως και η προσέλευση, ακολουθεί κι αυτή μια κανονική κατανομή με κεντρική τιμή t.
- **L(j)** : Έχουμε τρία διαφορετικά επίπεδα φόρτισης, όπως έχει αναφερθεί εκτενώς προηγουμένως. Το Level 1, που αναφέρεται στη 1-Φ φόρτιση, το Level 2, που αναφέρεται στην 3-Φ φόρτιση, και το Level 3, που αναφέρεται στη DC φόρτιση. Ο πίνακας L(j), ο οποίος αποτελείται από τα στοιχεία L(1), L(2) και L(3), εκφράζει αυτά τα επίπεδα ισχύος.
- **Class** : Η παράμετρος αυτή δείχνει την τάξη των οχημάτων. Είναι δείκτης της κάθε τάξης και παίρνει τιμές από 1 έως 4, αφού οι τάξεις αυτοκινήτων είναι 4 (L7e, M1, N1, N2).
- **P** : Συμβολίζει την ποσοστιαία κατανομή των οχημάτων στις 4 προαναφερθείσες κατηγορίες. Είναι πίνακας 4 επί 1, όπου κάθε γραμμή δείχνει το ποσοστό της κάθε τάξης επί του συνόλου των ηλεκτρικών οχημάτων.
- **P<sub>L</sub>** : Πίνακας 2 διαστάσεων, που δείχνει την ποσοστιαία κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων ως προς την τάξη τους, αλλά και ως προς το επίπεδο της ισχύος φόρτισής τους. Οι γραμμές είναι τα επίπεδα ισχύος και οι στήλες οι διάφορες τάξεις.
- **km** (Travel Distance) : Μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση του κάθε οχήματος, η οποία ακολουθεί μια κανονική κατανομή, τα χαρακτηριστικά της οποίας διαφέρουν ανάλογα με την τάξη του οχήματος και την ημέρα.
- **AverCo** : Πίνακας των μέσων όρων των καταναλώσεων των διαφόρων τάξεων των ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος δείχνει τις καταναλισκόμενες kWh ανά km. Χρησιμεύει στον υπολογισμό της ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας των οχημάτων.

- **Consumption** : Μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά όχημα. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Consumption (kWh)} = \text{AverCon (kWh/km)} \times \text{km (km)}$$

- **CP ( Charging Period )** : Το διάστημα φόρτισης είναι η συνολική χρονική περίοδος, μέσα στην οποία πρέπει όλα τα οχήματα να έχουν φορτιστεί με τον βέλτιστο οικονομικά τρόπο και μετρείται σε (h). Κανένα όχημα δεν μπορεί να φορτιστεί εκτός αυτής της περιόδου ακόμα κι αν είναι συνδεδεμένο με τη συσκευή φόρτισης. Η επιλογή του διαστήματος αυτού γίνεται με βάση στατιστικά στοιχεία των ωρών, κατά τις οποίες ένα όχημα είναι σταθμευμένο στο σπίτι και της καμπύλης του κόστους, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα οικονομικότερα time slots για τη φόρτιση.
- **Charging Time** : Ο χρόνος φόρτισης του κάθε οχήματος, ο υπολογισμός του οποίου γίνεται διαιρώντας την κατανάλωσή του με την ισχύ φόρτισής του ανάλογα με την τάξη του.
- **Charging Slots** : Γνωρίζοντας την απαιτούμενη ώρα φόρτισης του κάθε οχήματος, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των time slots, που είναι απαραίτητος για τη φόρτισή του, απλά διαιρώντας την ώρα φόρτισης (Charging Time) με τη διάρκεια του time slot. Το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται για να είναι ακέραιος αριθμός.
- **Vehicles** : Είναι ένας πίνακας, ο οποίος δείχνει ακριβώς τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων, που θα ζητήσουν ισχύ σε ένα από τα τρία προκαθορισμένα επίπεδα (Level 1, Level 2, Level 3), και για πόσο χρόνο θα το κάνουν αυτό. Ο πίνακας αυτός (πίνακας 3.3) έχει την παρακάτω μορφή:

Time Slots	Vehicles		
	Level 1	Level 2	Level 3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
9	.	.	.
10		5	
11	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Πίνακας 3.3 Μεταβλητή Vehicles

Στον πίνακα 3.3 βλέπουμε ότι για 10 time slots, 5 οχήματα θα ζητήσουν να φορτίσουν σε Level 2 κάποια στιγμή μέσα στο συνολικό διάστημα φόρτισης. Αυτό δεν σημαίνει ότι αυτά τα 5 οχήματα θα έλθουν ταυτόχρονα και θα ζητήσουν την ισχύ αυτή. Επομένως, ο αριθμός της γραμμής είναι ο αριθμός των time slots, που θα ζητηθεί η εκάστοτε ισχύς (στήλες).

- **n** : Συνάρτηση τεσσάρων μεταβλητών **n(j,l,a,d)**, όπου j το επίπεδο ισχύος φόρτισης, l η διάρκεια φόρτισης, a και d τα αντίστοιχα time slots άφιξης και αναχώρισης. Η τιμή της συνάρτησης παριστά πόσα οχήματα θα φορτιστούν σε ισχύ L(j), για l time slots, θα συνδεθούν στο a time slot και θα αποσυνδεθούν στο d time slot. Για να προλάβει το όχημα να φορτισθεί πλήρως, θα πρέπει  $l \leq (d-a)$ . Αυτός είναι και ο ζητούμενος πίνακας του αλγορίθμου και αποτελεί την πρόβλεψη φορτίου της επόμενης ημέρας, συνεπώς διαφοροποιείται από ημέρα σε ημέρα.

### 3.6.2 Σενάρια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Εξετάζονται τρεις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης, που ακολουθούνται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο:

- **Μη ελεγχόμενη φόρτιση (*Dump Charging*)**

Κατά τη μη ελεγχόμενη φόρτιση δεν γίνεται κάποιος έλεγχος κόστους προκειμένου να καθοριστεί ο τρόπος φόρτισης. Η φόρτιση των οχημάτων εξαρτάται από την ώρα άφιξης του οχήματος. Επομένως, η φόρτιση των οχημάτων συμπίπτει σε αυτό το σενάριο με την αύξηση κατανάλωσης του συστήματος, με αποτέλεσμα να έχουμε ακόμα μεγαλύτερη ζήτηση τις ώρες αιχμής του συστήματος. Αυτό, όπως είναι αναμενόμενο, μπορεί να καταπονήσει ιδιαίτερα τα στοιχεία του δικτύου και ειδικά τους μετασχηματιστές, προκαλώντας μεγάλη άνοδο της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης περιορίζει αρκετά τη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, αφού μειώνει τη χωρητική ικανότητα του συστήματος.

- **Ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (*Dual Tariff*)**

Με τη μέθοδο αυτή τα οχήματα και πάλι επιστρέφοντας στο σπίτι συνδέονται στο δίκτυο. Σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο πραγματοποιείται έλεγχος για την επίτευξη του χαμηλότερου κόστους. Αυτός είναι ο ρόλος του **Κεντρικού Ελεγκτή**, ο οποίος μετατοπίζει τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες, κατά τις οποίες μπορούν να φορτισθούν με το ελάχιστο ενεργειακό κόστος. Με αυτόν τον τρόπο βέβαια υπάρχει ο κίνδυνος να συσσωρευθεί μεγάλο φορτίο τις ώρες με το χαμηλότερο κόστος ενέργειας και να δημιουργηθεί μια αιχμή στις ώρες, που υπάρχει χαμηλή ζήτηση. Η αιχμή αυτή μπορεί ακόμα και να ξεπερνάει την αιχμή του συστήματος και να φτάσει σε μη αποδεκτά επίπεδα, ανάλογα

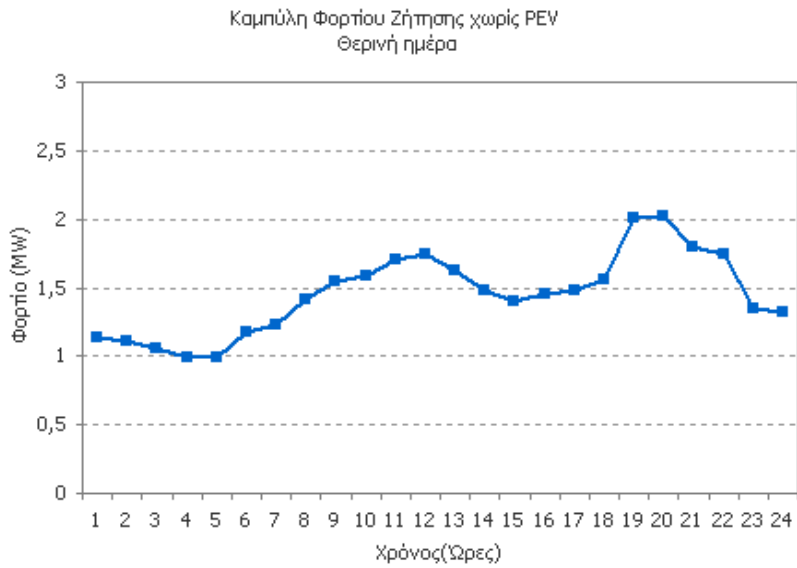
πάντα με τον αριθμό των οχημάτων, που συνδέονται. Επομένως, παρά τον έλεγχο της φόρτισης και τη μείωση του κόστους της καταναλισκόμενης ενέργειας, που μπορεί να επιτευχθεί, δεν αποφεύγουμε πλήρως τα μειονεκτήματα της προηγούμενης μεθόδου ως προς τα προβλήματα, τις γραμμές, τους ζυγούς, και τα στοιχεία του δικτύου.

➤ **Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου ("Valley Filling")**

Η μέθοδος αυτή τοποθετεί τα οχήματα στις κοιλάδες της καμπύλης ζήτησης έτσι ώστε η μειωμένη ζήτηση να αυξηθεί ομοιόμορφα. Έτσι, εξομαλύνεται η καμπύλη φορτίου και δεν σημειώνονται σωρεύσεις φορτίου για μικρό χρονικό διάστημα, κάτι που έχει πολλά οφέλη για το σύστημα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τη θέσπιση του κατώτατου δυνατού ορίου, κάτω από το οποίο τα οχήματα του στόλου δεν φορτίζονται πλήρως. Με αυτό το σενάριο φόρτισης επιδιώκουμε όχι μόνο την ελαχιστοποίηση του κόστους, αλλά και τη φόρτιση των οχημάτων με τον βέλτιστο για το δίκτυο τρόπο και τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του συστήματος σε ηλεκτρικά οχήματα.

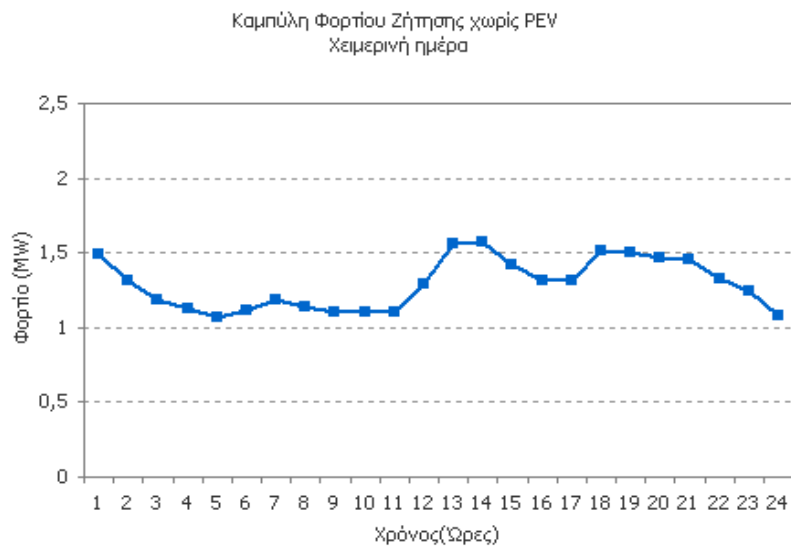
### **3.7 Καμπύλη Ζήτησης - Εφαρμογή Σεναρίων**

Η καμπύλη ζήτησης του συστήματος για τη διάρκεια ενός 24 ώρου θεωρούμε ότι είναι η παρακάτω για μία θερινή ημέρα (σχήμα 3.8). Η αιχμή της καμπύλης ζήτησης εμφανίζεται στις 7:00 μ.μ., κάτι αναμενόμενο, αφού αναφερόμαστε σε οικιακό φορτίο. Επίσης, εμφανίζεται μια μικρότερη αιχμή στις 1:00 μ.μ..



Σχήμα 3.8 Αρχικό φορτίο ζήτησης χωρίς PEV's – θερινή ημέρα.

Επίσης, στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη ζήτησης του συστήματος για τη διάρκεια ενός 24 ώρου για μία χειμερινή ημέρα (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9 Αρχικό φορτίο ζήτησης χωρίς PEV's – χειμερινή ημέρα.

Κατά τη χειμερινή ημέρα, η αιχμή του συστήματος παρουσιάζεται στις 2 μ.μ., ενώ υψηλές τιμές του φορτίου παρουσιάζονται και κατά τις απογευματινές ώρες κατά τις 6 μ.μ..

Θεωρούμε στόλο **N=150** ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία συνδέονται στο δίκτυο για φόρτιση. Ο στόλος αυτός αποτελείται από τις 4 διαφορετικές τάξεις οχημάτων κατά τα εξής ποσοστά :



- Οχήματα τύπου L7e κατά 1%,
- Οχήματα τύπου M1 κατά 88%,
- Οχήματα τύπου N2 κατά 10% και
- Οχήματα τύπου N2 κατά 1%.

Τα ανωτέρω ποσοστά εμπεριέχονται στον πίνακα **P**, ο οποίος συμβολίζει την ποσοστιαία κατανομή των οχημάτων ανάλογα με την τάξη, στην οποία ανήκουν.

Ο μέσος όρος των καταναλώσεων των διαφόρων τάξεων EV's συμβολίζεται με τη μεταβλητή **AverCo**. Οι τιμές, που παίρνει η μεταβλητή αυτή στην συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι οι παρακάτω:

- 0,13 kWh/km για οχήματα της τάξης L7e,
- 0.016 kWh/km για οχήματα της τάξης M1,
- 0.24 kWh/km για οχήματα της τάξης N1 και
- 0,8 kWh/km για οχήματα της τάξης N2.

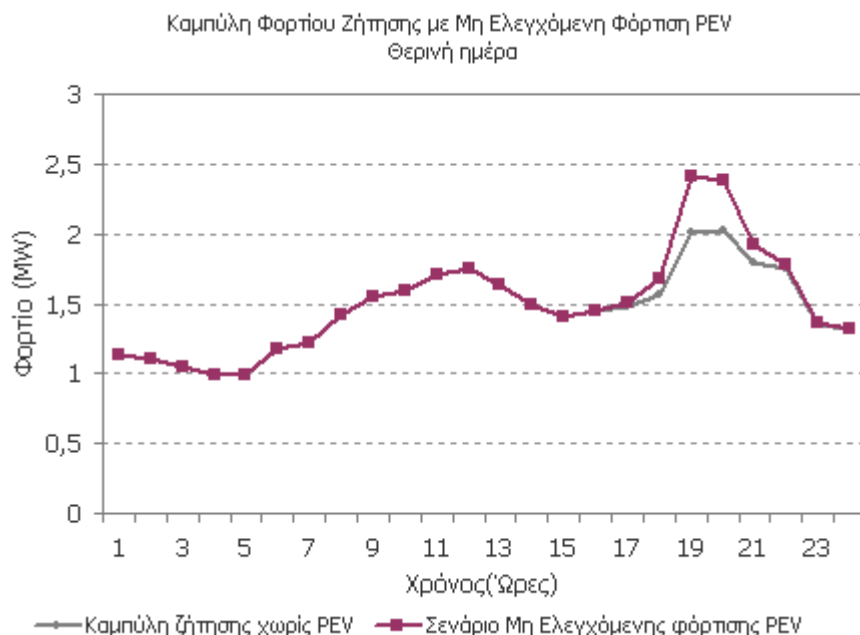
Για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ανά όχημα (**Consumption**), πολλαπλασιάζεται η μεταβλητή AverCo της τάξης, στην οποία ανήκει το όχημα, επί τη μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση του κάθε οχήματος **km** (Travel Distance). Η μεταβλητή της μέσης ημερήσιας διανυόμενης απόστασης ακολουθεί κανονική κατανομή (normal distribution), ( $km \sim N(35km,10)$ ), με μέση τιμή  $\mu=42 km$  και διασπορά  $\sigma^2=10$ . Θεωρούμε, ότι η μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση ακολουθεί κατανομή με τα ίδια χαρακτηριστικά για όλες τις τάξεις EV's κατά τη διάρκεια των ημερών, που εξετάζονται. Η σχέση υπολογισμού της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ανά όχημα γίνεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Consumption (kWh)} = \text{AverCon (kWh/km)} \times \text{km (km)}$$

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο συγκεκριμένα γεγονότα σχετικά με την οδηγική συμπεριφορά των οδηγών των οχημάτων. Αυτά είναι ο χρόνος άφιξης και ο χρόνος αναχώρισης ενός οχήματος. Το χρονικό διάστημα, μέσα στο οποίο μπορεί να προσέλθει ένα όχημα προς φόρτιση, ονομάζεται **Arrival Period** και το χρονικό διάστημα, μέσα στο οποίο θεωρείται ότι ένα όχημα μπορεί να διακόψει τη φόρτισή του και να αναχωρήσει, ονομάζεται **Departure Period**. Η πιθανότητα ένα όχημα να συνδεθεί προς φόρτιση κατά το time slot a απεικονίζεται στον πίνακα **P\_a**. Η προσέλευση των οχημάτων ακολουθεί κανονική κατανομή ( $\text{Arrival} \sim N(20:00,1)$ ), με κεντρική τιμή  $\mu=20:00$  και διασπορά  $\sigma^2=1$ . Η πιθανότητα ένα όχημα να αναχωρήσει κατά το time slot d απεικονίζεται στον πίνακα **P\_d**. Η αναχώριση των οχημάτων ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή ( $\text{Departure} \sim N(7:00,1)$ ), με κεντρική τιμή  $\mu=7:00$  και διασπορά  $\sigma^2=1$ .

### 3.7.1 Θερινή Ημέρα

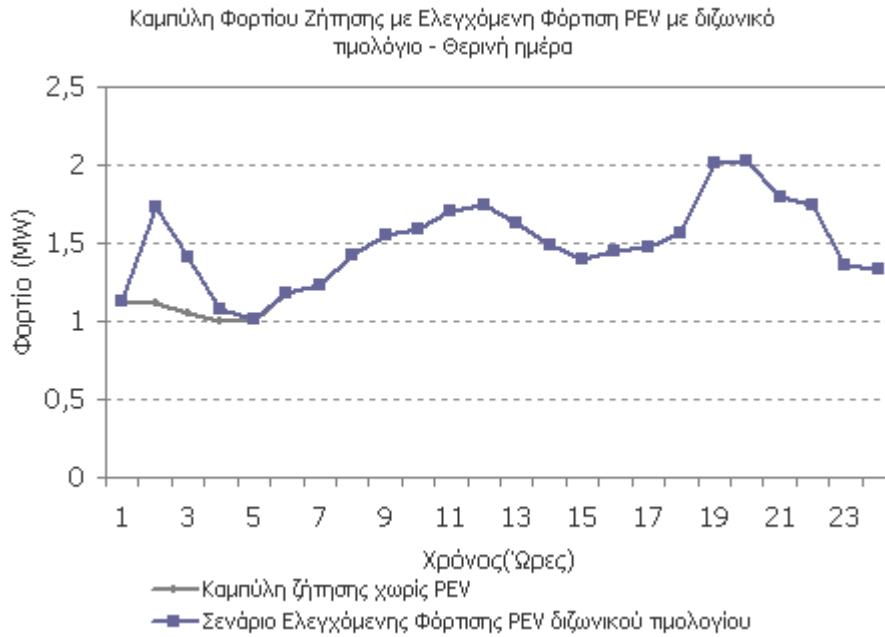
Αρχικά εξετάζουμε το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα, που λαμβάνουμε, είναι η παρακάτω καμπύλη ζήτησης.



Σχήμα 3.10 Φορτίο ζήτησης, όπως διαμορφώνεται με το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's – Θερινή ημέρα.

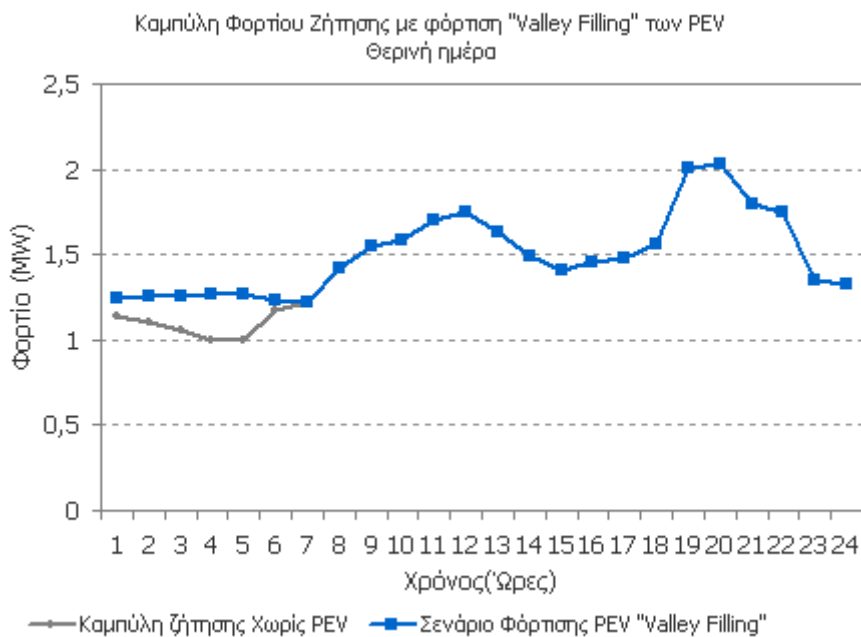
Όπως ήταν αναμενόμενο, αυτό, που βλέπουμε στην καμπύλη ζήτησης, με τον τρόπο, που αυτή διαμορφώνεται μετά τη μη ελεγχόμενη σύνδεση στο δίκτυο των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι η ακόμα μεγαλύτερη ζήτηση την ώρα αιχμής του συστήματος.

Εν συνεχεία, υπολογίζουμε τον τρόπο, με τον οποίο θα μεταβληθεί η καμπύλη ζήτησης, όταν ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων θα συνδεθεί κατά το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο. Η καμπύλη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τις ώρες με το χαμηλότερο κόστος, (που είναι οι ώρες με τη χαμηλότερη ζήτηση), παρουσιάζεται μία νέα αιχμή ζήτησης, λόγω της μαζικής σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Η αιχμή, που εμφανίζεται, δεν υπερβαίνει την αιχμή του συστήματος ώστε να είναι απαραίτητο να γίνει από το διαχειριστή του συστήματος διανομής περιορισμός της αιχμής φόρτισης. Το ύψος της αιχμής φόρτισης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εξαρτάται από το πλήθος των οχημάτων, που απαρτίζουν το στόλο.



Σχήμα 3.11 Φορτίο ζήτησης, όπως διαμορφώνεται με το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's διζωνικού τιμολογίου – Θερινή ημέρα.

Το τελευταίο σενάριο φόρτισης, που θα εξετάσουμε, είναι αυτό, κατά το οποίο γίνεται ταυτόχρονος έλεγχος για την ελαχιστοποίηση του κόστους και για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος. Κατά το σενάριο αυτό τα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να γεμίζουν οι κοιλάδες της καμπύλης ζήτησης και με αυτόν τον τρόπο η καμπύλη να γίνεται πιο ομοιόμορφη ("Valley Filling"). Στην παρακάτω καμπύλη βλέπουμε το αποτέλεσμα της φόρτισης αυτής.

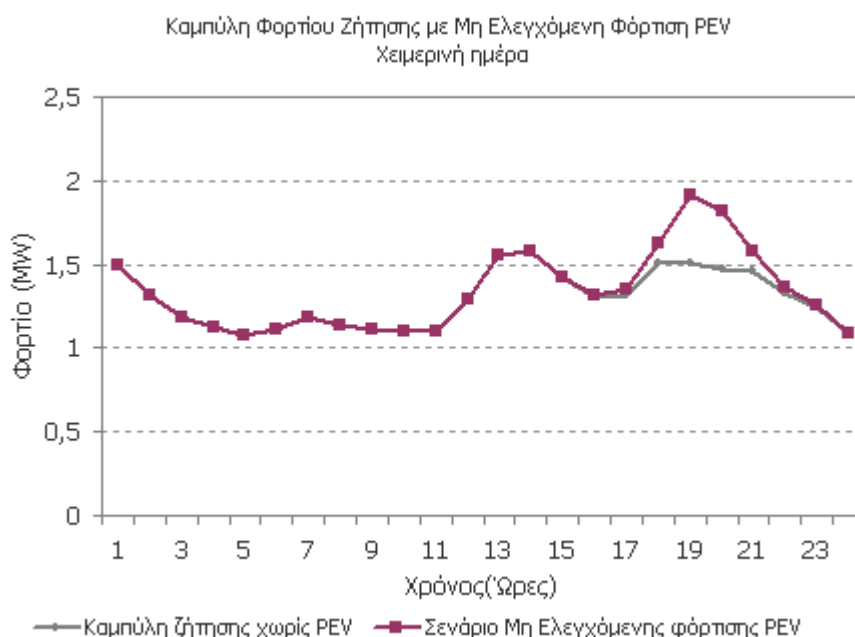


Σχήμα 3.12 Φορτίο ζήτησης, όπως διαμορφώνεται με το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος– Θερινή ημέρα.

### 3.7.2 Χειμερινή Ημέρα

Εν συνεχεία εφαρμόζουμε την καμπύλη φορτίου μίας χειμερινής ημέρας. Η καμπύλη ζήτησης παριστάνεται στο σχήμα 3.9.

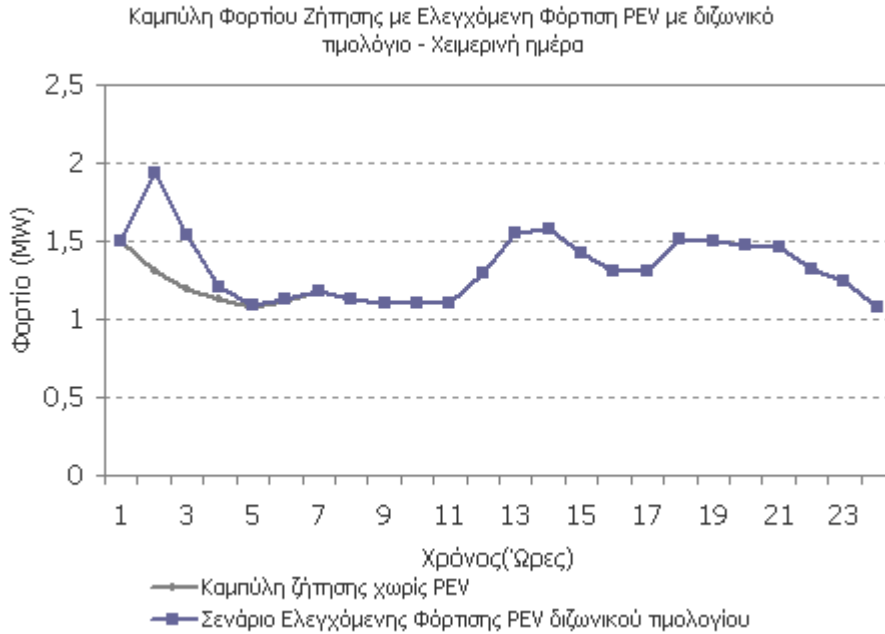
Πρώτα εξετάζεται το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 3.13) βλέπουμε πώς διαμορφώνεται η καμπύλη ζήτησης του συστήματος, μετά από τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με τον ανωτέρω τρόπο:



Σχήμα 3.13 Φορτίο ζήτησης, όπως διαμορφώνεται με το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's – Χειμερινή ημέρα.

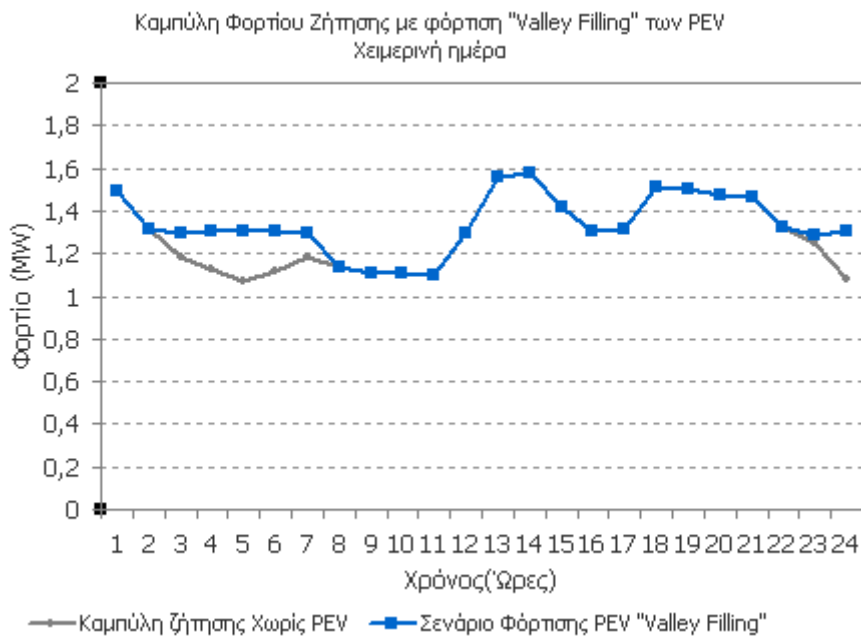
Όπως έχει διαπιστωθεί και για τη θερινή ημέρα, που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, η φόρτιση των PEV πραγματοποιείται κατά το χρονικό διάστημα, που εμφανίζεται η απογευματινή αιχμή του συστήματος. Επομένως, κατά τη συγκεκριμένη ημέρα τα οχήματα δεν συνδέονται κατά την αιχμή του συστήματος, (που εμφανίζεται κατά τις μεσημβρινές ώρες), αλλά κατά τη δεύτερη σε μέγεθος αιχμή, (κατά τις απογευματινές ώρες).

Εν συνεχεία, εξετάζεται το σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο. Εξετάζοντας την καμπύλη του σχήματος 3.14 διαπιστώνουμε, ότι ενώ τα PEV's συνδέονται με όμοιο τρόπο όπως και κατά τη θερινή ημέρα, η σύνδεση κατά τη χειμερινή ημέρα προκαλεί διαφορετικές επιπτώσεις στη μορφή της καμπύλης ζήτησης. Η νέα αιχμή, που δημιουργείται από τη σύνδεση των οχημάτων στο δίκτυο, ξεπερνάει την αιχμή του συστήματος. Αυτό οφείλεται στο πλήθος των οχημάτων και στο αρχικό ύψος του φορτίου. Επομένως, η αιχμή ζήτησης εμφανίζεται πλέον κατά τις 2 π.μ..



Σχήμα 3.14 Φορτίο ζήτησης, όπως διαμορφώνεται με το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's με διζωνικό τιμολόγιο – Χειμερινή ημέρα.

Τέλος, εξετάζεται η επίδραση, που επιφέρει η φόρτιση την ηλεκτρικών οχημάτων, σύμφωνα με το σενάριο ελαχιστοποίησης κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος. Όπως διακρίνουμε στο σχήμα 3.15, το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων συνδέεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, που έχουμε το χαμηλότερο φορτίο ζήτησης. Δεν παρατηρείται σε αυτήν την περίπτωση κάποια διαφορετική επίδραση σε σχέση με τη θερινή ημέρα.



Σχήμα 3.15 Φορτίο ζήτησης, όπως διαμορφώνεται με το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης των PEV's ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος– Χειμερινή ημέρα.

- [3.1] S.Bending, M.Ferdowsi, S.Channon, K.Strunz, Project "MERGE", Deliverable 1.1 "Specification for an Enabling Smart Technology", 3/8/2010, Available at :  
[http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE\\_WP1\\_D1.1.pdf](http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP1_D1.1.pdf)
- [3.2] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design (Power Electronics and Applications Series).
- [3.3] Κοσμάνης Θεόδωρος, "Ηλεκτρικά Οχήματα, Πηγές ενέργειας" Available at :  
[http://www.vt.teithe.gr/t/tkosmanis/files/EVs/CHAPTER\\_3\\_energy\\_sources.pdf](http://www.vt.teithe.gr/t/tkosmanis/files/EVs/CHAPTER_3_energy_sources.pdf)
- [3.4] A.Khaligh, Zhihao Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.59, Issue 6, pp 2806-2814, Ιούλιος 2010
- [3.4] California Energy Commission, Fuel Cell Vehicles , Available at :  
<http://www.consumerenergycenter.org/transportation/fuelcell/index.html>
- [3.5] Di Wu, Dionysios C. Aliprantis, Lei Ying, "Load Scheduling and Dispatch for Aggregators of Plug-In Electric Vehicles", IEEE Transactions on Smart Grids, Vol. 3, Issue 1, pp. 368-376, 2012
- [3.6] Τα Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα και ο ανεφοδιασμός τους με Ηλεκτρική Ενέργεια ,ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο-Σεπτέμβριος 2011. Available at : [http://www.heliev.gr/filesd/refuel\\_ev.pdf](http://www.heliev.gr/filesd/refuel_ev.pdf)
- [3.7] Battery Electric Vehicles, Available at : <http://cleancaroptions.com/index.html>
- [3.8] Electric-drive vehicles for peak power in Japan, Willett Kempton, Toru Kubo, 2000
- [3.9] V2G : Τα ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά ενέργειας, Κ.Βελιτσικάκης, Δ. Καπαρός-Τσάφος, Α.Π.Θ, 2010



## Κεφάλαιο 4

### Εφαρμογή θερμικού μοντέλου σε μετασχηματιστή του δικτύου διανομής

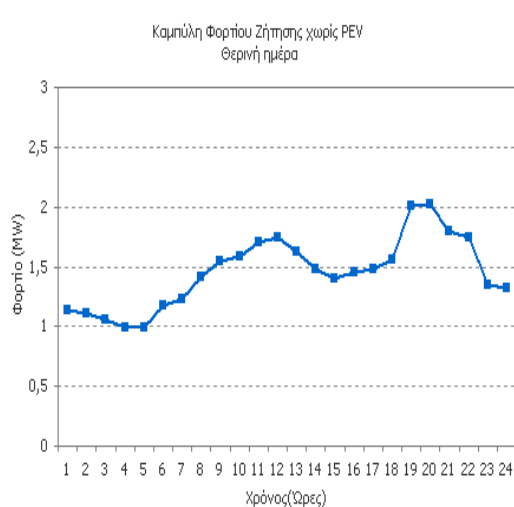
Στο δεύτερο κεφάλαιο έχει αναπτυχθεί εκτενώς το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή και το μοντέλο υπολογισμού απώλειας ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Σκοπός μας είναι να διαπιστώσουμε τι επίπτωση μπορεί να έχει η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στους μετασχηματιστές του δικτύου διανομής, στο οποίο συνδέονται.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο επίσης, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια φόρτισης των ηλεκτρικών PEV στο δίκτυο για ένα χειμερινό και ένα θερινό φορτίο. Στόχος είναι με τη χρήση του θερμικού μοντέλου να αξιολογήσουμε τα τρία αυτά διαφορετικά σενάρια και να τα συγκρίνουμε ως προς τις επιπτώσεις, που μπορεί να επιφέρουν στους μετασχηματιστές του δικτύου διανομής. Γι αυτό και σε αυτή την ενότητα θα εξετασθεί η διακύμανση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών σε ένα μετασχηματιστή διανομής MT/XT 2,5 MVA.

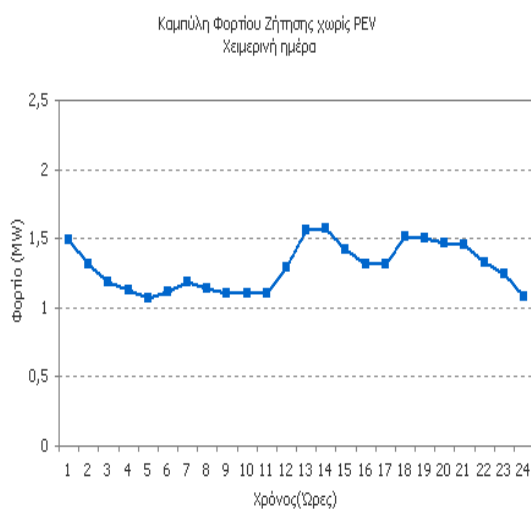
### Ημερήσιες Καμπύλες Ζήτησης Φορτίου

Λόγω της περιοδικότητας, που παρουσιάζει το ημερήσιο φορτίο ζήτησης για δύο ημέρες της ίδιας εποχής του χρόνου, θεωρούμε ότι μπορούν να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα, υπολογίζοντας την απώλεια ζωής της μόνωσης για μία χειμερινή και μία θερινή ημέρα και ανάγοντας τα αποτελέσματα αυτά σε ετήσια βάση.

Παρατίθενται παρακάτω οι ημερήσιες καμπύλες ζήτησης για δύο ενδεικτικά 24ωρα.



Σχήμα 4.1 Ημερήσια ζήτηση συστήματος θερινή ημέρα



Σχήμα 4.2 Ημερήσια ζήτηση συστήματος χειμερινή ημέρα



Οι ημερήσιες καμπύλες ζήτησης για τα διάφορα σενάρια φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αυτές, που λάβαμε από το προηγούμενο κεφάλαιο με τη χρήση του αλγορίθμου.

## Εφαρμογή θερμικού μοντέλου για μετασχηματιστή 2,5MVA

Εφαρμόζουμε το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή, για ένα μετασχηματιστή με ονομαστικά χαρακτηριστικά τα εξής:

Στοιχεία μετασχηματιστή:	
Ονομαστική ισχύς	2.5 MVA
Ονομαστική τάση	20.5±2×2.5% / 0.71 kV
Σύνδεση	Dy11
Τύπος ψύξης	Χωρίς εξωτερική ψύξη

Πίνακας 4.1 Βασικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή.

Όπως έχει αναφερθεί, οι σταθερές του μοντέλου μεταβάλλονται ανάλογα με το μετασχηματιστή, για τον οποίο εφαρμόζεται. Στον παρακάτω πίνακα 4.2 βλέπουμε τις σταθερές του μοντέλου για το μετασχηματιστή 2,5 MVA.

Ποσότητα	Μετασχηματιστής/Τυλίγματα
	2.5/0.71
kVA βάσης	2500
Θερμοκρασία βάσης	75 ° C
$P_{W/W}$	16028
$P_{E/W}$	1170
$P_{S/W}$	1040
ρμ kVA	2500
$\Delta\theta_{hs, rated}/K$	24.5
$\Delta\theta_{oil, rated}/K$	48
H	1.19
$T_{wdn, rated}/min.$	7.5
$M_{FLUID}/^{\circ}C$	1090
$\theta_{hs, i}/^{\circ}C$	24.4
$\theta_{oil, i}/^{\circ}C$	24.35

Πίνακας 4.2 Στοιχεία απαραίτητα για την υλοποίηση του θερμικού μοντέλου στο μετασχηματιστή 2,5 MVA.

#### 4.1 Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής χωρίς φόρτιση PEV

Εφαρμόζονται ως είσοδος στο θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή οι δύο καμπύλες ζήτησης, που παρατίθενται στα σχήματα 4.1 και 4.2, και λαμβάνονται για την κάθε μία οι ανάλογες θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στο μετασχηματιστή και η αντίστοιχη ποσοστιαία απώλεια ζωής για μία θερινή και μία χειμερινή ημέρα.

##### 4.1.1 Θερινό Φορτίο

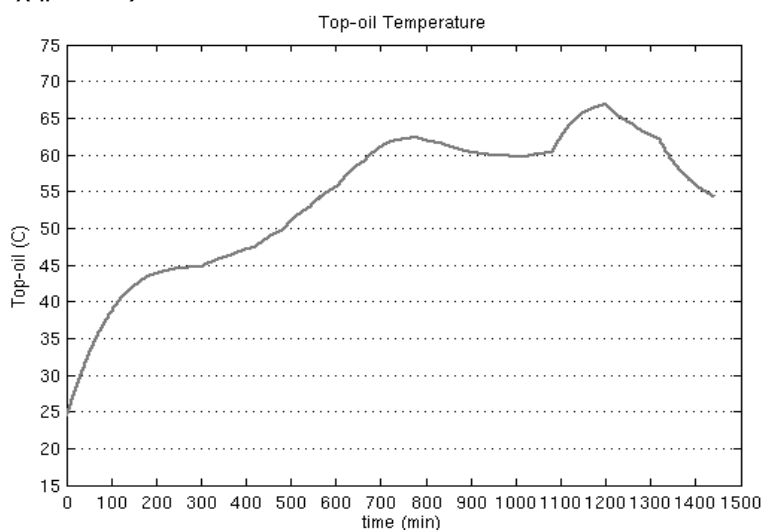
Το φορτίο ζήτησης του συστήματος παρουσιάζει αιχμή στις 8μ.μ. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος για μία θερινή ημέρα λαμβάνεται από τιμές του 2008 και είναι ο μέσος όρος

των θερμοκρασιών του μηνός Ιουλίου. Θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια μιας ώρας η θερμοκρασία παραμένει σταθερή.

1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00
27,424°C	27,242°C	26,964°C	26,608°C	26,101°C	25,65°C	26,006°C	25,768°C
9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
27,212°C	29,038°C	30,823°C	32,462°C	33,755°C	34,489°C	34,658°C	33,779°C
17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
33,447°C	32,923°C	31,949°C	30,566°C	29,667°C	28,862°C	28,324°C	28,031°C

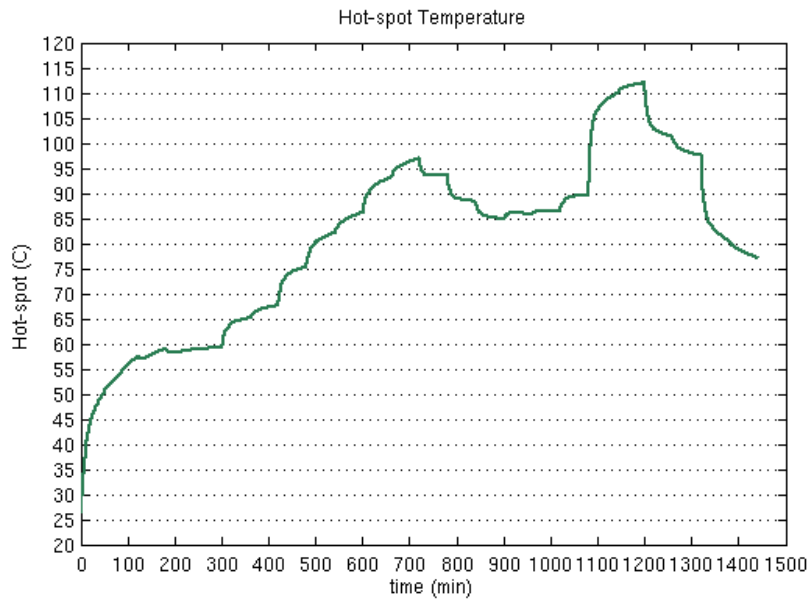
Πίνακας 4.3 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος για μία μέση θερινή ημέρα.

Η θερμοκρασία του πάνω τμήματος του λαδιού top-oil ακολουθεί τις διακυμάνσεις του φορτίου. Η μέγιστη τιμή, που λαμβάνει, είναι οι 66,89°C στις 8 μ.μ , όταν και εμφανίζεται η αιχμή του φορτίου ζήτησης. Η καμπύλη της θερμοκρασίας top-oil παρατίθεται στο παρακάτω διάγραμμα, ( σχήμα 4.3 ).



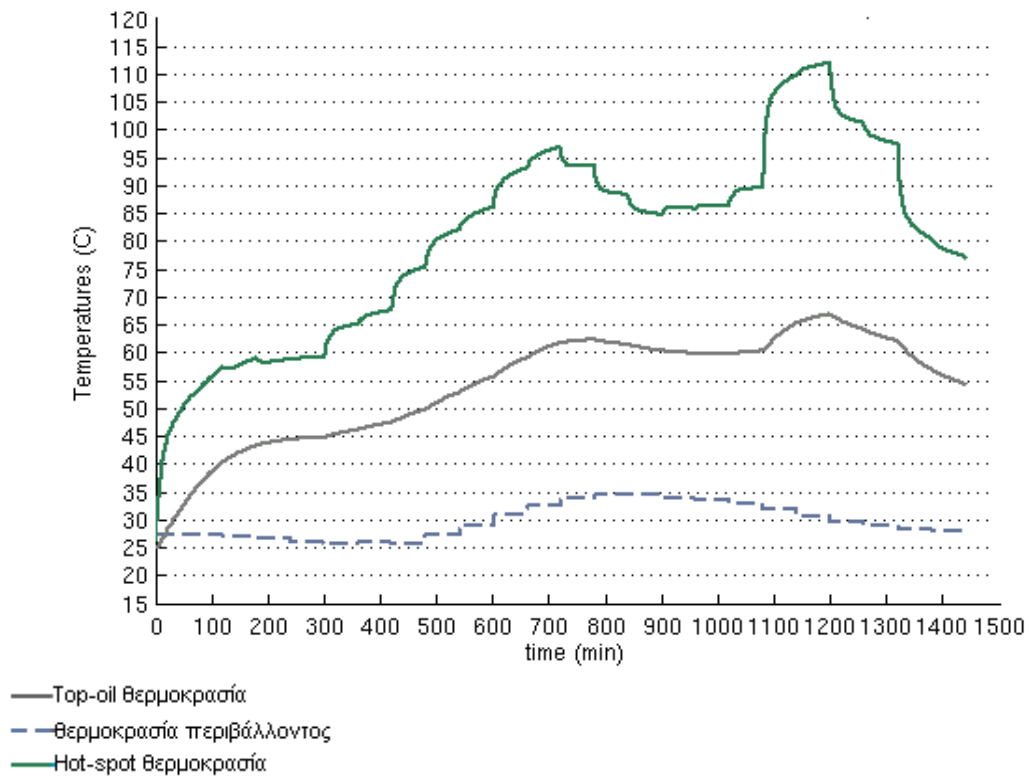
Σχήμα 4.3 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα.

Εν συνεχεία, υπολογίζεται η θερμοκρασία hot-spot για το τύλιγμα χαμηλής τάσης 0,71 kV του μετασχηματιστή. Κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα από αυτά της θερμοκρασίας top-oil, ενώ παρουσιάζει τις ίδιες ώρες της ημέρας μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Σχηματικά, η μεταβολή της θερμοκρασίας hot-spot φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, (σχήμα 4.4 ). Η μέγιστη τιμή, που λαμβάνει η θερμοκρασία hot-spot, είναι 111,99 °C. Η τιμή αυτή είναι εκείνη, που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ποσοστιαίας απώλειας ζωής του μετασχηματιστή.



Σχήμα 4.4 Θερμοκρασία hot-spot του τυλιγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή όλων των θερμοκρασιών, που εξετάζονται. Είναι εμφανής, η παράλληλη μεταβολή της θερμοκρασίας top-oil και hot-spot του λαδιού.



Σχήμα 4.5 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλιγματος 0,71 kV.

Θεωρείται, ότι κατά τη λειτουργία του Μ/Σ για 24 ώρες αναπτύσσεται η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot,  $\theta_{hs, \max} = 111,99 \text{ }^\circ\text{C}$ . Με βάση την παρακάτω σχέση υπολογίζεται ο συντελεστής επιτάχυνσης της γήρανσης της μόνωσης του Μ/Σ.

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_{hs, \max} + 273}\right)$$

Θεωρείται, ότι η κανονική ζωή του μετασχηματιστή είναι 180.000 ώρες (20,55 χρόνια) και με βάση αυτό υπολογίζεται ότι το ποσοστό της ζωής της μόνωσης, που χάνεται κατά αυτήν την ημέρα λειτουργίας του μετασχηματιστή, είναι:

**%Loss of Life = 0.0163%**

#### 4.1.2 Χειμερινό Φορτίο

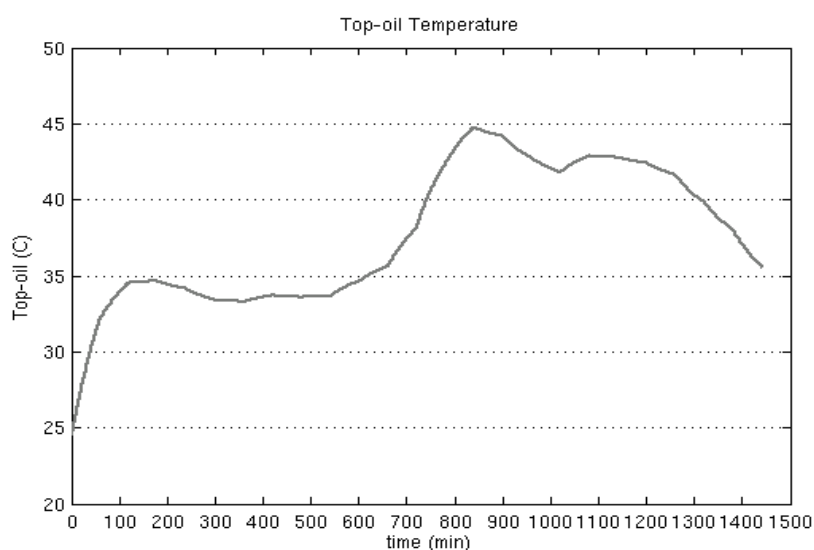
Το φορτίο ζήτησης μίας χειμερινής ημέρας είναι αισθητά χαμηλότερο σε σχέση με μίας θερινής, (σχήμα 4.2). Η αιχμή του φορτίου ζήτησης εμφανίζεται στις 2μ.μ. . Εφαρμόζουμε το φορτίο αυτό ως είσοδο στο θερμικό μοντέλο του Μ/Σ. Για τη θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνουμε τιμές του 2008 και υπολογίζουμε το μέσο όρο των θερμοκρασιών του μηνός Φεβρουαρίου. Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια μίας ώρας. Οι τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, που λαμβάνει το θερμικό μοντέλο ως είσοδο, είναι οι παρακάτω. Παρατηρούμε ότι η ώρα, που επικρατεί η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, συμπίπτει με την αιχμή του φορτίου.

1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00
11,036°C	10,988°C	11,005°C	10,843°C	10,731°C	10,604°C	10,42°C	10,532°C
9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
11,361°C	13,684°C	14,901°C	15,736°C	16,315°C	16,568°C	16,373°C	16,174°C
17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
15,505°C	14,514°C	13,409°C	13,436°C	12,393°C	12,115°C	11,568°C	11,118°C

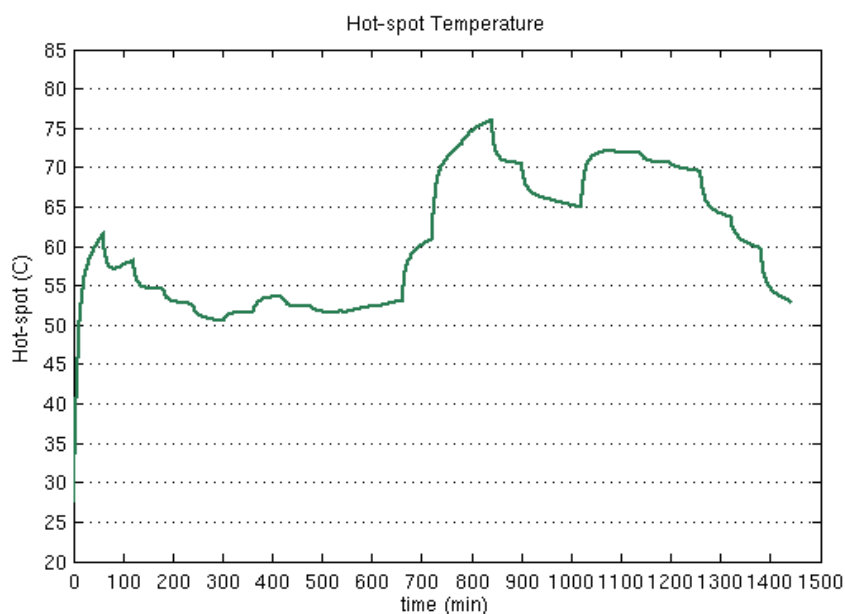
Πίνακας 4.4 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος για μία μέση χειμερινή ημέρα.

Η θερμοκρασία top-oil, που αναπτύσσεται στην κορυφή του λαδιού του μετασχηματιστή, παρατίθεται παρακάτω στο σχήμα 4.6. Η μέγιστη τιμή, που λαμβάνει η θερμοκρασία top-oil, είναι 44,77 °C.

Η θερμοκρασία top-oil εν συνεχεία θα αποτελέσει είσοδο για τον αλγόριθμο υπολογισμού της hot-spot θερμοκρασίας. Από τον υπολογισμό αυτό λαμβάνουμε την ημερήσια μεταβολή της hot-spot θερμοκρασίας, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή, (σχήμα 4.7). Η θερμοκρασία hot-spot λαμβάνει τη μέγιστη τιμή 76,03 °C. Είναι αναμενόμενο, για τη μέγιστη αυτή τιμή, η ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή να είναι πολύ μικρή, αφού είναι γνωστό ότι για τιμές κάτω του 110 °C ο συντελεστής γήρανσης του μετασχηματιστή παρουσιάζει έντονη μείωση.

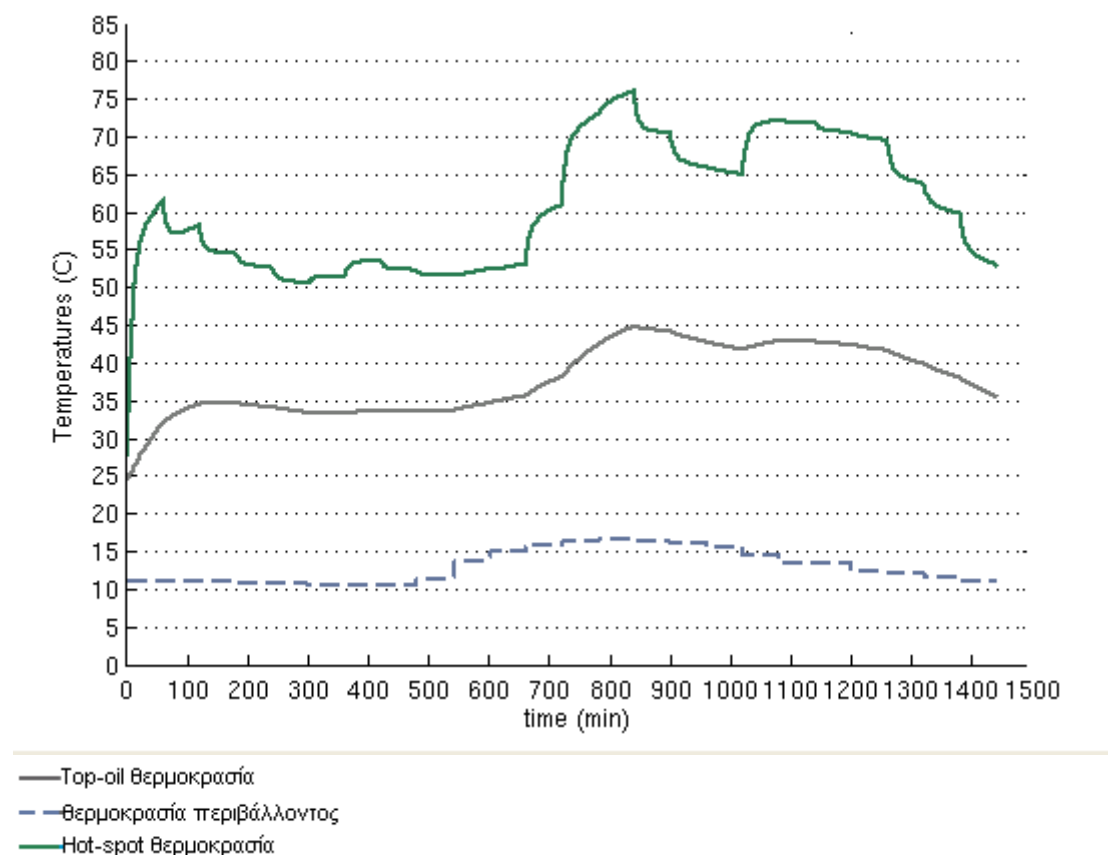


Σχήμα 4.6 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα.



Σχήμα 4.7 Θερμοκρασία hot-spot του τυλιγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα.

Όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα, για μία μικρή αύξηση της θερμοκρασίας top-oil έχουμε μία απότομη αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot. Οι δύο αυτές θερμοκρασίες παρουσιάζουν μέγιστη τιμή την ίδια ώρα της ημέρας, όταν και το φορτίο παρουσιάζει την αιχμή του.



Σχήμα 4.8 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

Η ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή για μέγιστη θερμοκρασία  $\theta_{hs,max} = 76.03 \text{ } ^\circ\text{C}$  υπολογίζεται:

$$\% \text{Loss of Life} = 0,0002947\%$$

#### 4.1.3 Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου και του μοντέλου γήρανσης του μετασχηματιστή, μπορούμε να υπολογίσουμε για το συγκεκριμένο φορτίο ζήτησης του συστήματος ποιά είναι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Πρέπει να σημειωθεί, ότι δεν είναι απαραίτητο η διάρκεια ζωής της μόνωσης

να καθορίσει τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή και αυτό συμβαίνει όταν γίνεται φόρτιση σε επίπεδα αρκετά χαμηλότερα από τα ονομαστικά του στοιχεία.

Με αναγωγή των ποσοστιαίων απωλειών ζωής της μόνωσης για μία χειμερινή και μία θερινή ημέρα σε ολόκληρη τη χειμερινή περίοδο ( 273 ημέρες) και σε ολόκληρη τη θερινή περίοδο ( 92 ημέρες ), αντίστοιχα, υπολογίζεται η απώλεια ζωής για τις περιόδους αυτές.

**Θερινή περίοδος : %Loss of Life = 92 × 0.0163% = 1,4996 %**

**Χειμερινή περίοδος : %Loss of Life = 273 × 0.0002947% = 0,08045 %**

**Συνολική %Loss of Life για ένα έτος = 1, 4996 % + 0, 08045 % =1,5801 %**

Η διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή υπολογίζεται στα **63,3 χρόνια**.

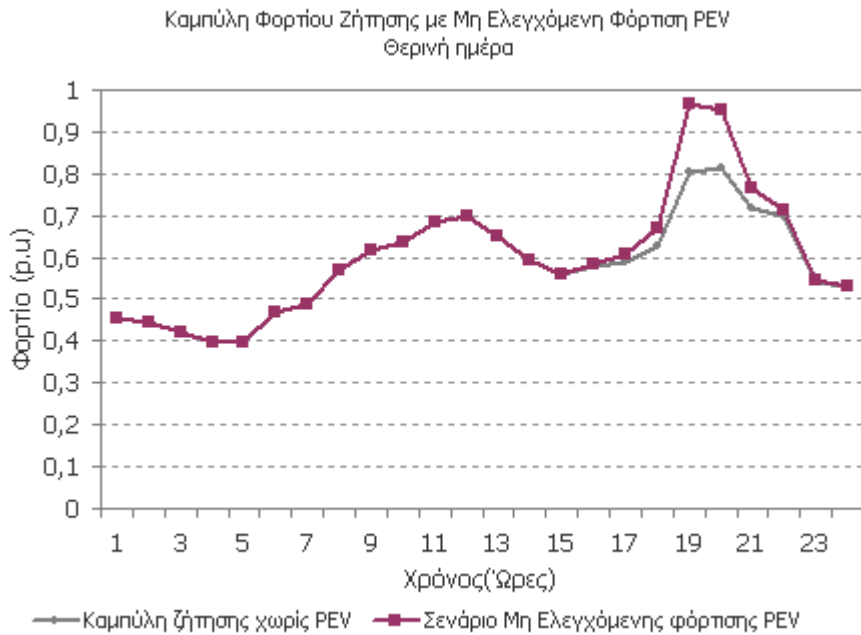
## **4.2 Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής της μόνωσής του για Μη ελεγχόμενη Φόρτιση PEV (Dump Charging)**

Κατά τη μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, το φορτίο των οχημάτων προστίθεται στις ώρες αιχμής του φορτίου ζήτησης του συστήματος. Είναι επόμενο να συμβεί κάτι τέτοιο, αφού αναφερόμαστε σε οικιακά φορτία και η αναμενόμενη συμπεριφορά του χρήστη του οχήματος είναι να το συνδέσει προς φόρτιση όταν επιστρέψει στο σπίτι του, δηλαδή τη στιγμή, που παρουσιάζεται η αιχμή ζήτησης του συστήματος.

### **4.2.1 Θερινό Φορτίο**

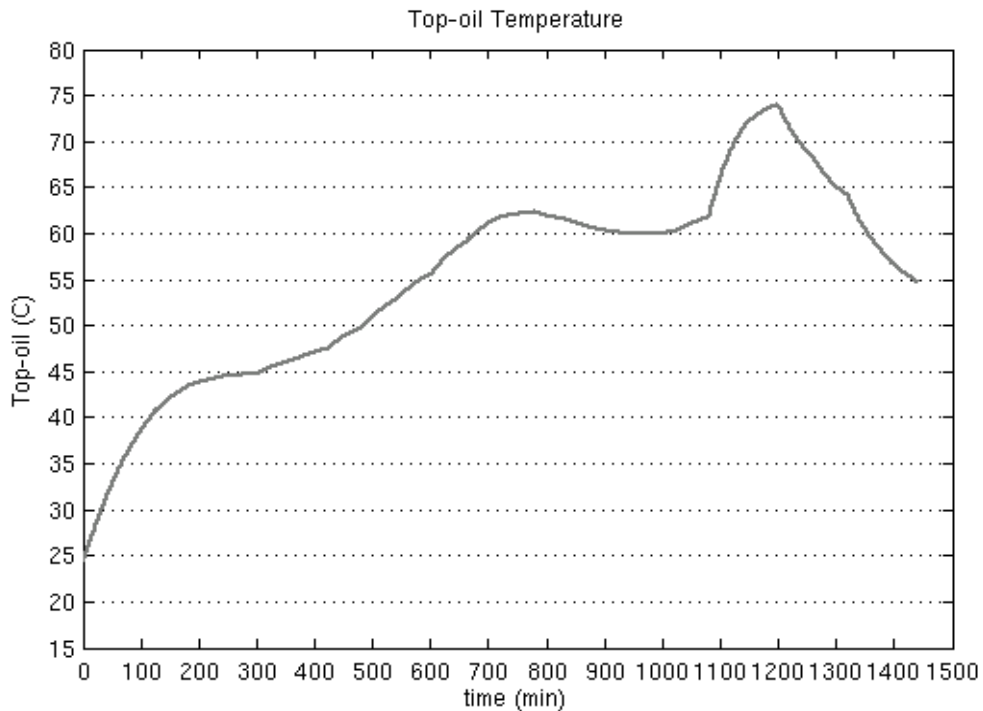
Για τη θερινή ημέρα του σχήματος 4.1, την οποία εξετάζουμε πρώτα, η συνολική ζήτηση του συστήματος μετά τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων και τη μη ελεγχόμενη φόρτισή τους διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Το φορτίο εκφράζεται σε ανά μονάδα τιμές του μετασχηματιστή. Όπως είναι εμφανές, η αιχμή, που το φορτίο παρουσίασε στις 8 μ.μ., έχει μεταφερθεί στις 7 μ.μ., χωρίς αυτό να αποτελεί κάποια έντονη μεταβολή, αφού και πριν και μετά τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων οι δύο αυτές ώρες παρουσίαζαν πολύ κοντινά φορτία. Με τη σύνδεση των PEV και τη μη ελεγχόμενη φόρτισή του, ο μετασχηματιστής λειτουργεί για μία ώρα υπό φορτίο πολύ κοντά στα ονομαστικά του στοιχεία.



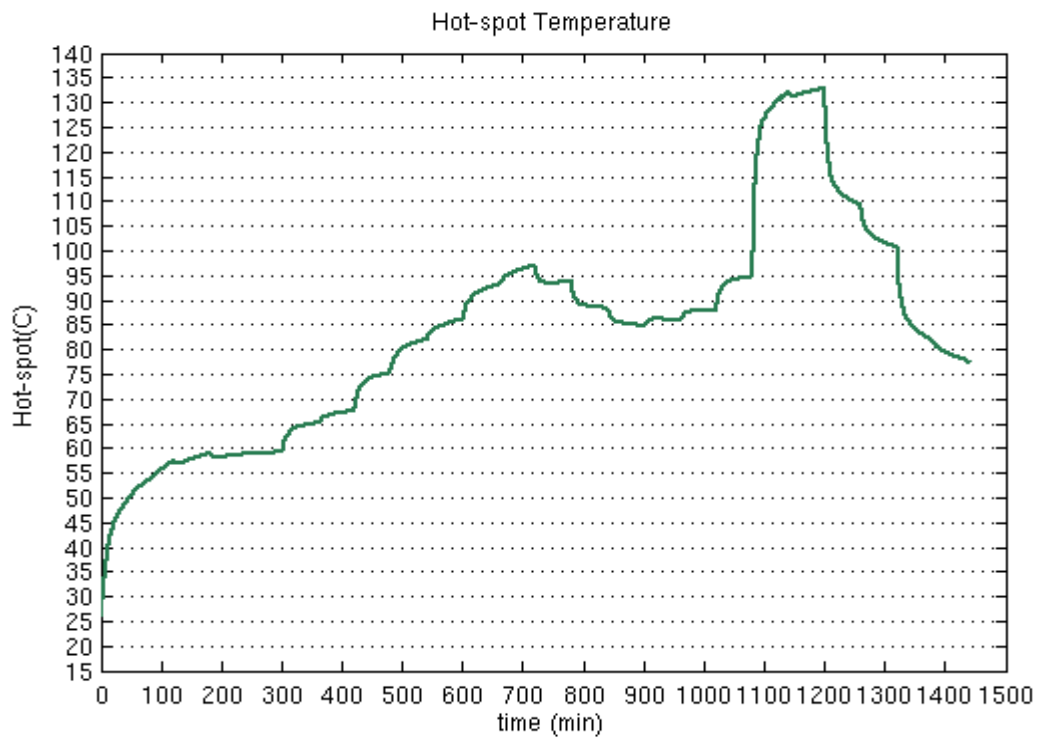


Σχήμα 4.9 Ημερήσια καμπύλη ζήτησης του συστήματος με Μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

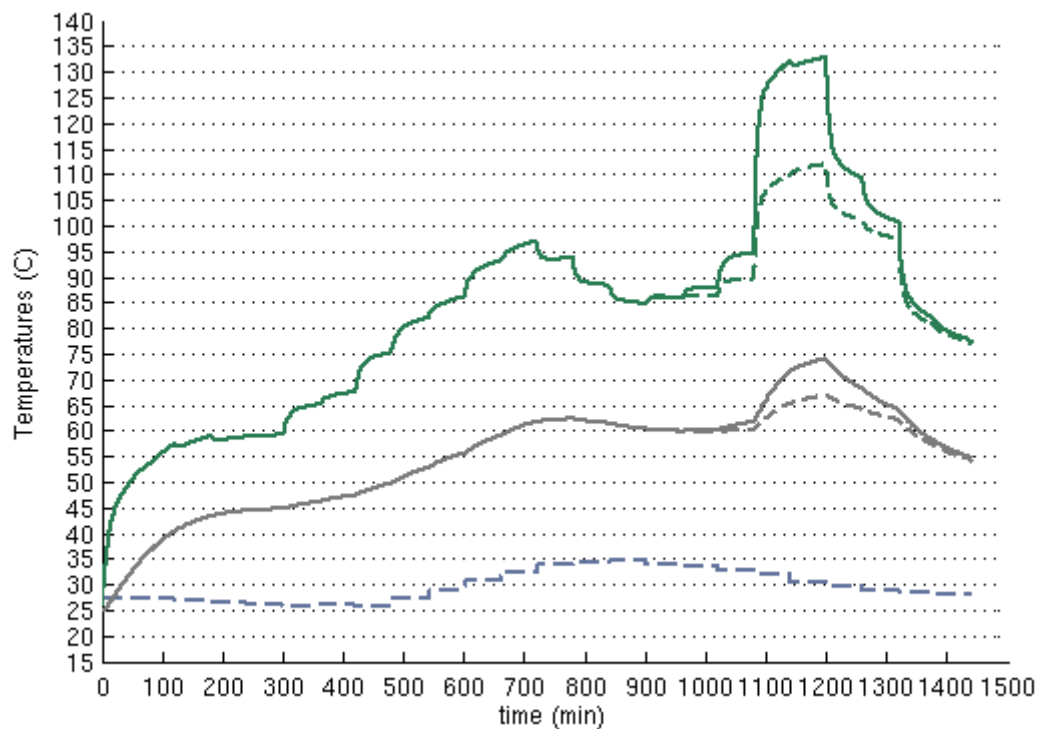
Εφαρμόζοντας την καμπύλη φόρτισης του σχήματος 4.9 στο θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή, υπολογίζουμε την top-oil και την hot-spot θερμοκρασία, που αναπτύσσονται σε αυτόν. Στα παρακάτω διαγράμματα, (σχήμα 4.10 , 4.11 και 4.12), βλέπουμε τη μεταβολή των κρίσιμων αυτών θερμοκρασιών. Η θερμοκρασία λαμβάνει και πάλι τις ίδιες τιμές, που θεωρήσαμε στον πίνακα 4.1 .



Σχήμα 4.10 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα- Μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV



Σχήμα 4.11 Θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα. Μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV.



— Top-oil θερμοκρασία  
 - - - - Top-oil θερμοκρασία χωρίς PEV  
 - - - - θερμοκρασία περιβάλλοντος  
 - - - - Hot-spot θερμοκρασία χωρίς PEV  
 — Hot-spot θερμοκρασία

Σχήμα 4.12 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

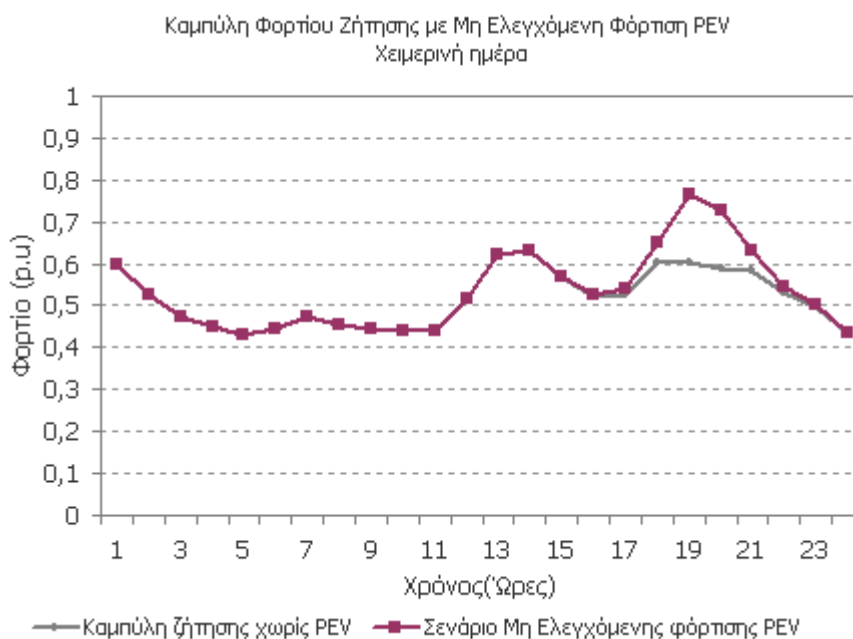
Από τα διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι το μέγιστο των δύο θερμοκρασιών σημειώνεται στις 8 μ.μ. Η μέγιστη θερμοκρασία top-oil, που σημειώνεται, είναι 74,05 °C, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot,  $\theta_{hs,max} = 132,8^{\circ}\text{C}$ .

Υπολογίζουμε την ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή, αν για 24 ώρες εφαρμόζεται σε αυτόν φορτίο, για το οποίο αναπτύσσει μέγιστη θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα του μοντέλου γήρανσης της μόνωσης είναι ένα ποσοστό αρκετά μεγάλο. Η θερμοκρασία 132,8°C είναι μεγαλύτερη από τους 110 °C , συνεπώς ήταν αναμενόμενο το μεγάλο αυτό ποσοστό.

**%Loss of Life = 0,1204%**

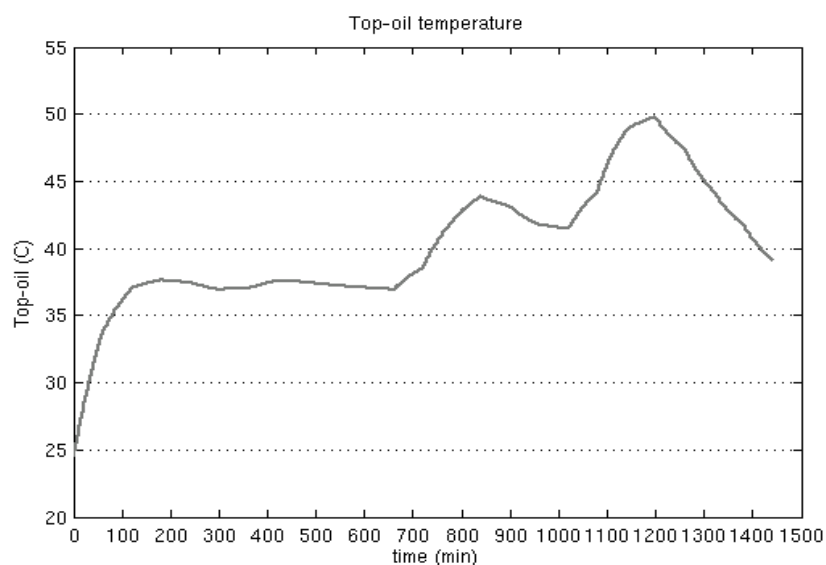
#### 4.2.2 Χειμερινό Φορτίο

Για μια χειμερινή ημέρα με ζήτηση φορτίου συστήματος όπως του σχήματος 4.2 και για μη ελεγχόμενη φόρτιση των PEV στο δίκτυο η τελική καμπύλη φορτίου ζήτησης διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13. Ισχύουν οι ίδιες αρχές, που ισχύουν και για τη θερινή ημέρα. Το φορτίο από τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων προστίθεται στην αρχική ζήτηση του συστήματος κατά τις ώρες αιχμής του φορτίου. Η ζήτηση φορτίου είναι χαμηλότερη από αυτήν της θερινής ημέρας.



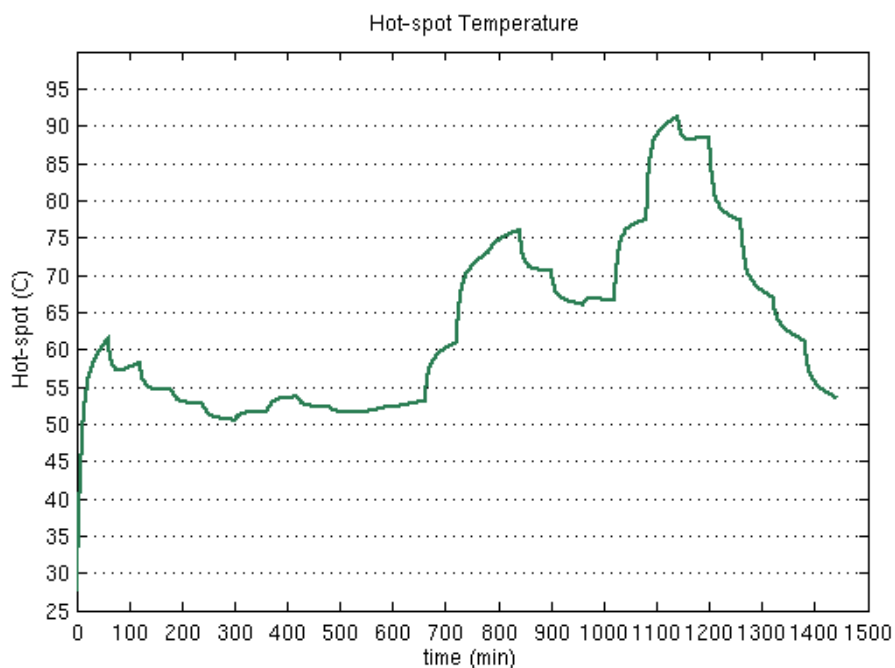
Σχήμα 4.13 Ημερήσια καμπύλη ζήτησης του συστήματος με μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Εφαρμόζουμε την ημερήσια καμπύλη ζήτησης στο θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή και υπολογίζουμε τις κρίσιμες για τη διάρκεια ζωής της μόνωσης θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνει τις τιμές του πίνακα 4.2.



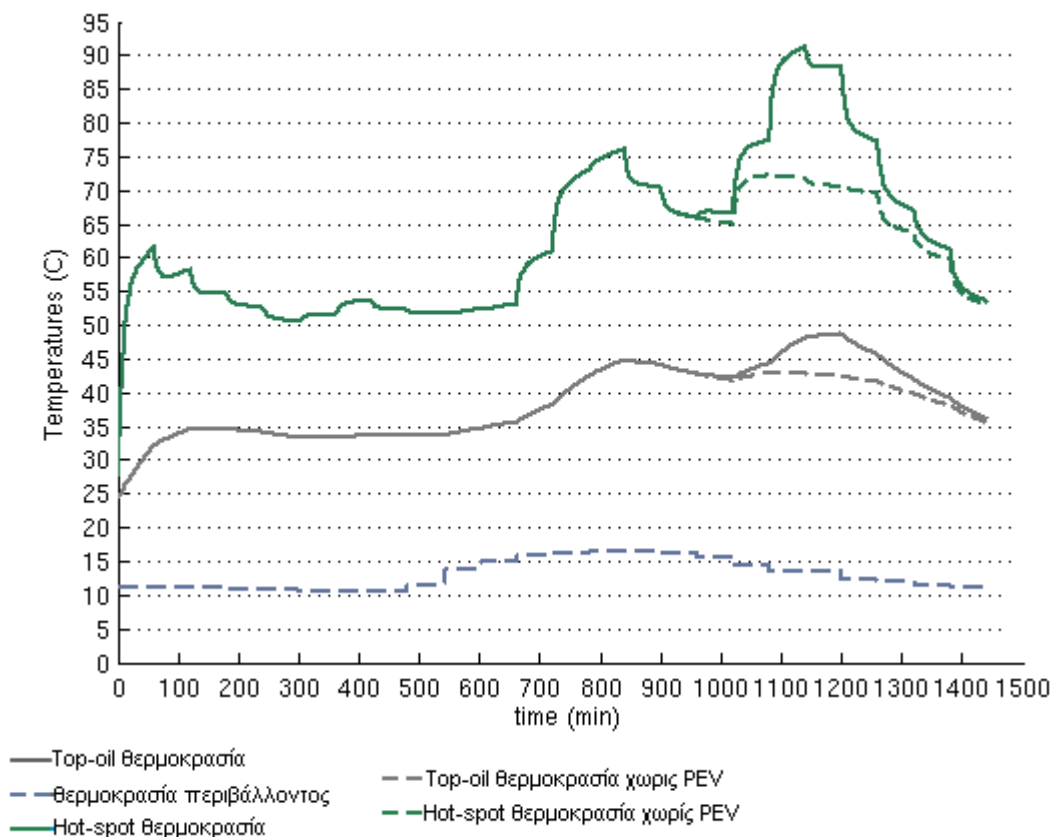
Σχήμα 4.14 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα- Μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV.

Η top-oil θερμοκρασία παρουσιάζει μέγιστη τιμή 48,72 °C στις 8 μ.μ., όταν και εμφανίζεται η αιχμή του συστήματος.



Σχήμα 4.15 Θερμοκρασία hot-spot του τυλιγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα-Μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV.

Στο σχήμα 4.15 βλέπουμε τη θερμοκρασία hot-spot και πώς κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέγιστη τιμή, που παίρνει η θερμοκρασία hot-spot, είναι  $\theta_{hs,max}=91,32^{\circ}\text{C}$  και για την τιμή αυτή υπολογίζουμε την ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή.



Σχήμα 4.16 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

Η απώλεια ζωής υπολογίζεται μέσω του μοντέλου ζωής της μόνωσης.

$$\% \text{ Loss of Life} = 0.0018 \%$$

### 4.2.3 Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή

Η συνολική απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή για ένα έτος υπολογίζεται με βάση τις ποσοστιαίες απώλειες ζωής της μόνωσης για μία χειμερινή και θερινή ημέρα.

$$\text{Θερινή περίοδος : } \% \text{Loss of Life} = 92 \times 0.1204\% = 11,0768 \%$$

**Χειμερινή περίοδος : %Loss of Life =  $273 \times 0.0018\% = 0,4914 \%$**

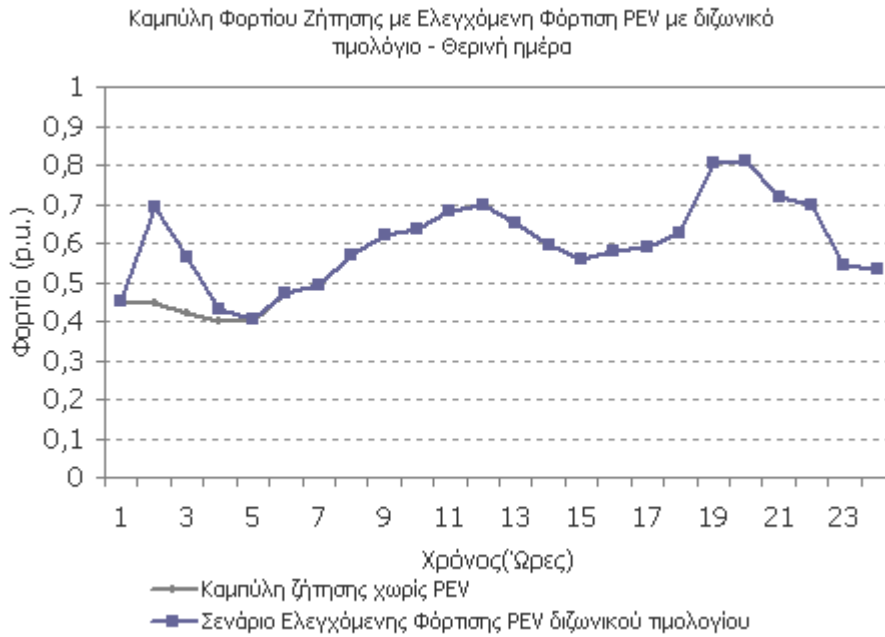
**Συνολική %Loss of Life για ένα έτος =  $11,0768 \% + 0,4914 \% = 11,5682 \%$**

Με βάση τους υπολογισμούς αυτούς, η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, αν ακολουθηθεί αυτό το σενάριο φόρτισης, θα είναι **8,6 χρόνια**.

### **4.3 Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής της μόνωσής του για Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV Διζωνικού τιμολογίου (Dual Tariff)**

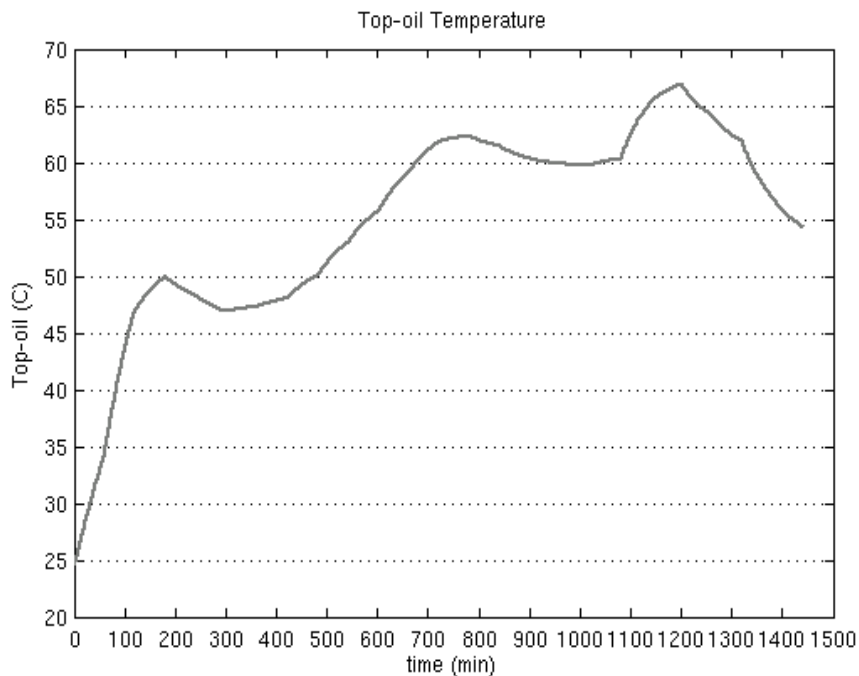
#### **4.3.1 Θερινό Φορτίο**

Όταν ακολουθείται το σενάριο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με διζωνικό τιμολόγιο τα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται κατά τις ώρες με το χαμηλότερο κόστος ενέργειας. Δημιουργείται επομένως μία αιχμή φορτίου από τη σύνδεση των οχημάτων, το ύψος της οποίας εξαρτάται από το πλήθος και τα χαρακτηριστικά τους. Παρακάτω παρατίθεται η καμπύλη ζήτησης του συστήματος, (σχήμα 4.17), όπως διαμορφώνεται μετά από τη σύνδεση των PEV. Η αιχμή του φορτίου παρουσιάζεται στις 8 μ.μ. και δεν επηρεάζεται από τη σύνδεση των PEV. Εμφανίζεται μία νέα αιχμή στις 2 π.μ. από τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία είναι μικρότερης ισχύος.



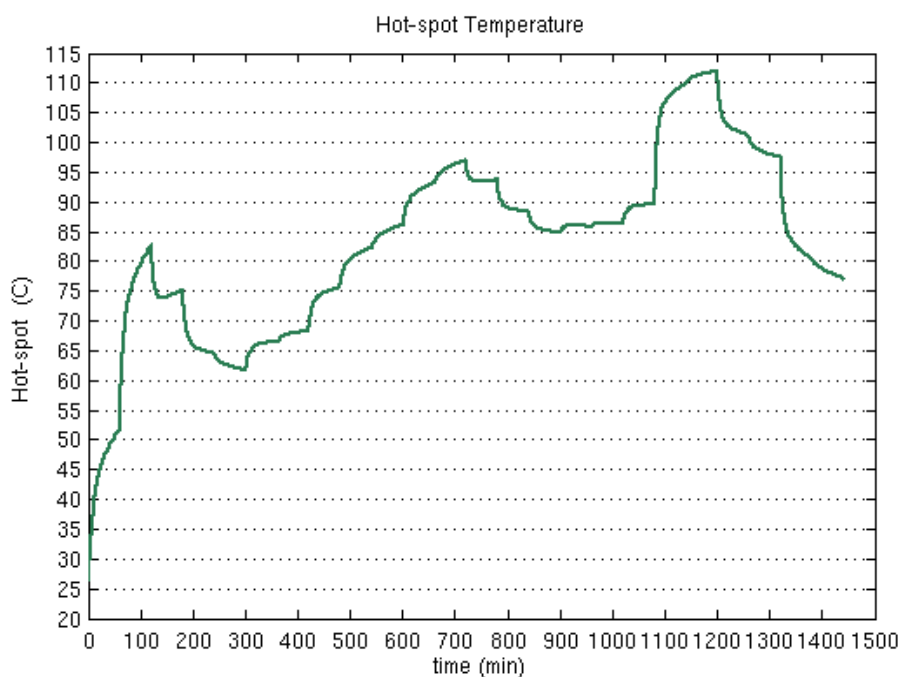
Σχήμα 4.17 Ημερήσια Καμπύλη ζήτησης συστήματος με Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι η ίδια, που θεωρήθηκε στον πίνακα 4.1, για μια καλοκαιρινή ημέρα. Παρακάτω, παρατίθενται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των κρίσιμων θερμοκρασιών για τη ζωή του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του μηνός Ιουλίου. Η θερμοκρασία top-oil φτάνει τη μέγιστη τιμή των 66.89 ° C , η οποία εμφανίζεται στην αιχμή του φορτίου, (σχήμα 4.18) .



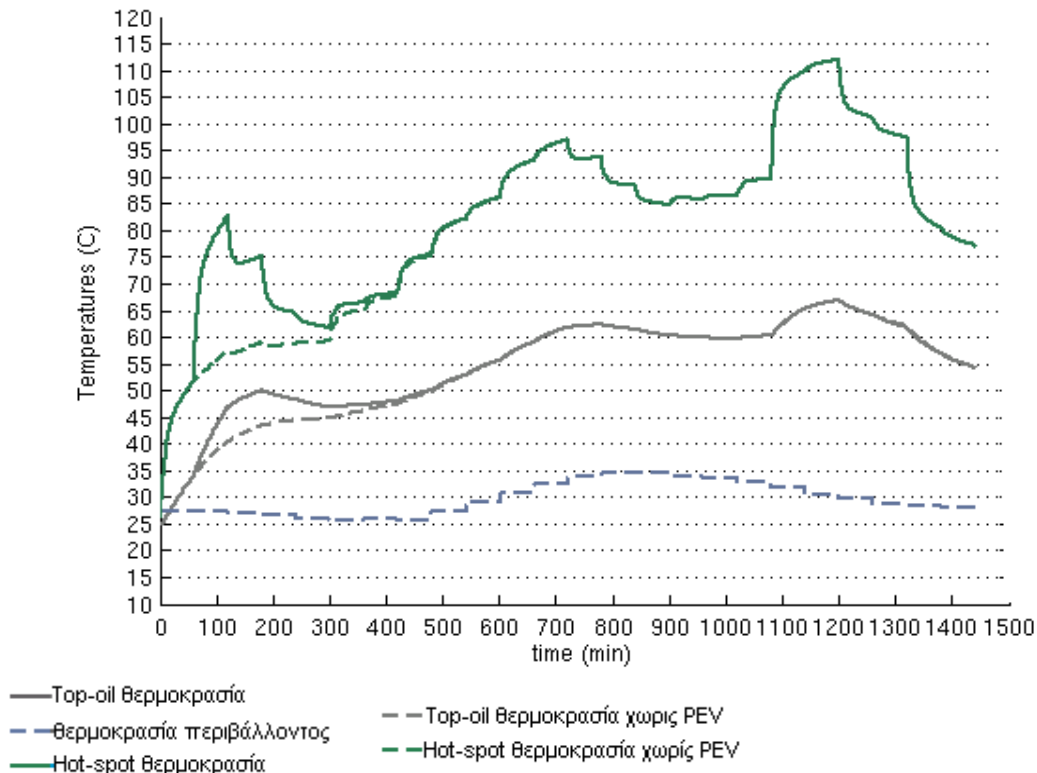
Σχήμα 4.18 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα- Ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο.

Η θερμοκρασία hot-spot, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή, φτάνει στη μέγιστη τιμή των  $\theta_{hs,max} = 111,99 \text{ } ^\circ \text{C}$  κατά την αιχμή του φορτίου ζήτησης και σ' αυτήν την περίπτωση. Παρατηρούμε, ότι κατά την έναρξη της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζεται μία απότομη άνοδος της θερμοκρασίας hot-spot. Κατά την άνοδο αυτήν της θερμοκρασίας δεν παρουσιάζεται υπέρβαση της μέγιστης τιμής, εξαιτίας του αρχικού φορτίου του συστήματος. Επομένως, ενώ επηρεάζει αρνητικά τη ζωή της μόνωσης του μετασχηματιστή, αυτό δεν αποτυπώνεται στην ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό εκτός από τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας hot-spot να έχουμε και μία πληρέστερη εικόνα για το πώς μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας.



Σχήμα 4.19 Θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα- Ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο.





Σχήμα 4.20 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

Η ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή είναι **%Loss of Life = 0.0163 %** με υπολογισμούς, βασισμένους στη μέγιστη αναπτυσσόμενη hot-spot θερμοκρασία.

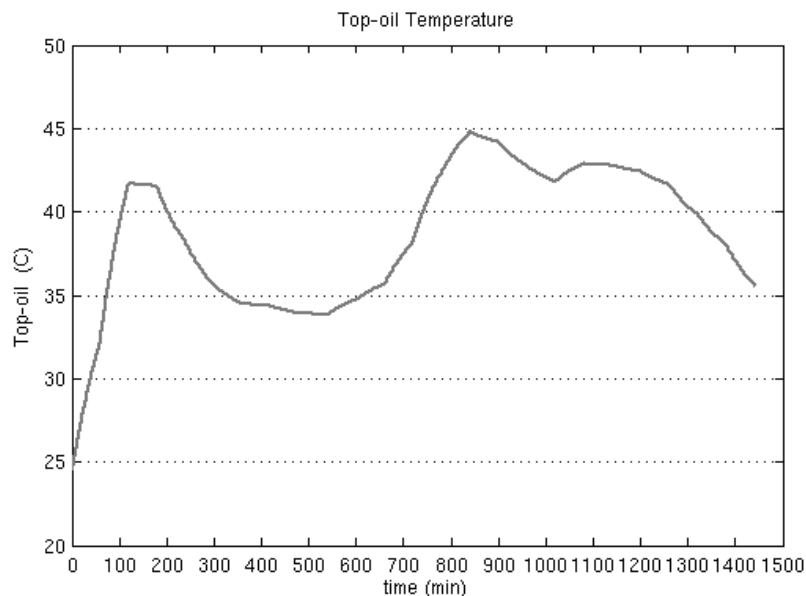
### 4.3.2 Χειμερινό Φορτίο

Εάν κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας του Φεβρουαρίου συνδεθούν προς φόρτιση στο σύστημα που εξετάζουμε 150 PEV, σύμφωνα με το σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης PEV με διζωνικό τιμολόγιο, το φορτίο ζήτησης του συστήματος επηρεάζεται με έντονο τρόπο. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, (σχήμα 4.21), δημιουργείται μία νέα αιχμή ζήτησης κατά πολύ υψηλότερη από αυτή, που το σύστημα είχε αρχικά. Εδώ αποδεικνύεται, ότι αν δεν πραγματοποιηθεί έλεγχος ως προς τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με κριτήριο τη σωστή λειτουργία του συστήματος, μπορεί μακροπρόθεσμα να έχουμε αντίθετα αποτελέσματα από τα επιθυμητά. Δηλαδή αντί για εξοικονόμηση να έχουμε δαπάνη χρηματικών ποσών για την αντικατάσταση των μετασχηματιστών. Αυτό όμως μπορεί να αποφευχθεί, ακολουθώντας το σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης με ελαχιστοποίηση κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης, ώστε η συνολική ζήτηση του συστήματος να μην ξεπερνά την αιχμή της οικιακής ζήτησης.



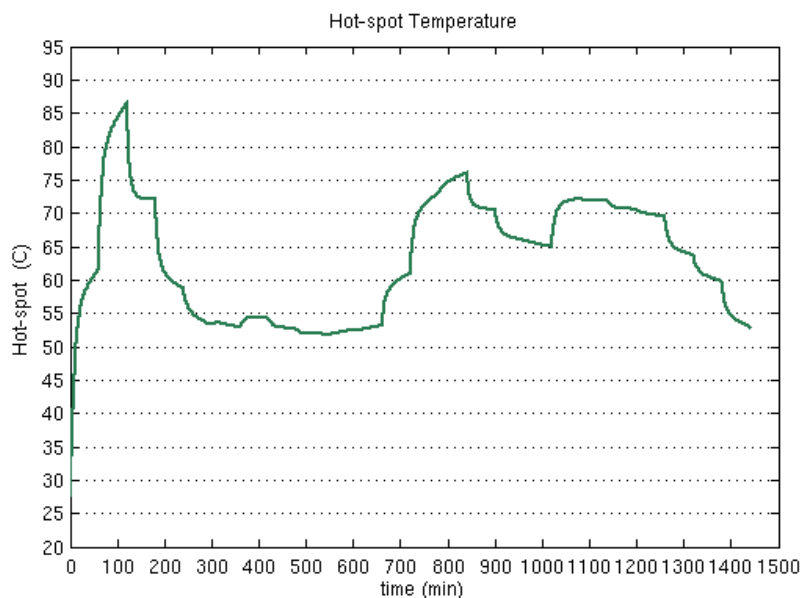
Σχήμα 4.21 Ημερήσια καμπύλη ζήτησης συστήματος με ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο.

Η θερμοκρασία top-oil παρουσιάζει αύξηση κατά τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά εξακολουθεί να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στην αιχμή του συστήματος, προ της σύνδεσης των PEV. Σε γενικές γραμμές, η θερμοκρασία του λαδιού παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα στις μεταβολές του φορτίου και μεταβάλλεται πιο ομαλά σε σχέση με την hot-spot θερμοκρασία. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας top-oil είναι 44,79 °C.



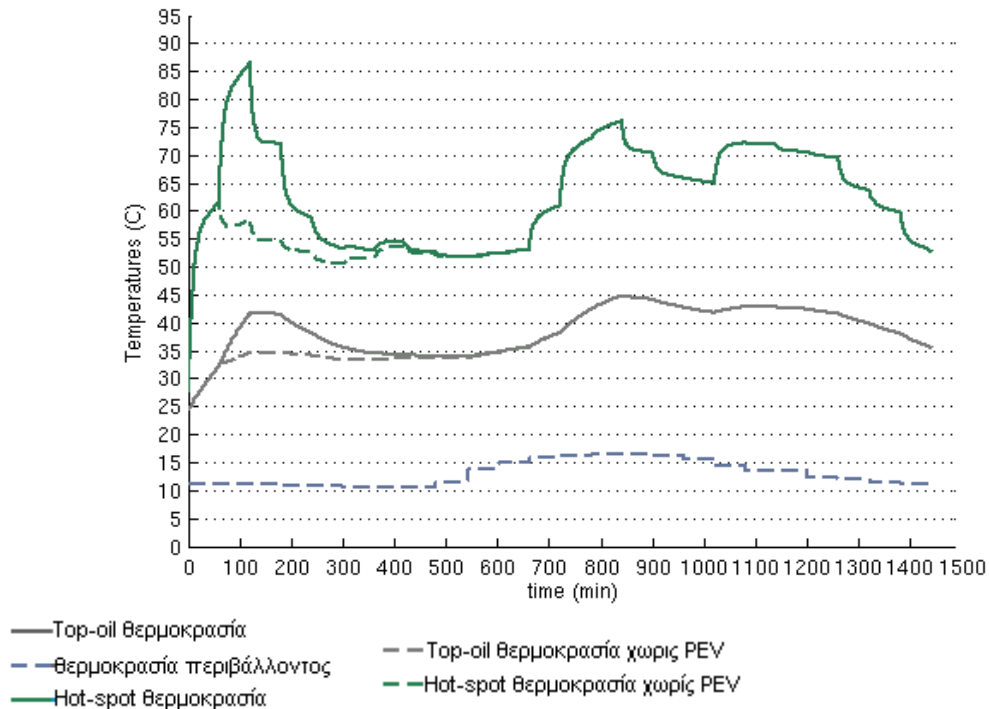
Σχήμα 4.22 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα- ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο.

Η hot-spot θερμοκρασία παρουσιάζει μία πολύ απότομη αύξηση με τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Η μέγιστη τιμή, που λαμβάνει κατά τη διάρκεια της ημέρας, εμφανίζεται κατά τη φόρτιση των οχημάτων και ξεπερνάει κατά πολύ τη μέγιστη τιμή, που ελάμβανε πριν από αυτή.



Σχήμα 4.23 Θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα- ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο.

Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας hot-spot είναι  $\theta_{hs,max} = 86,57$  °C. Είναι υψηλότερη από αυτή, που αναπτύσσεται όταν τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, αλλά είναι χαμηλότερη από αυτήν, που παρουσιάζεται για τη μη ελεγχόμενη φόρτιση. Στο παρακάτω διάγραμμα, ( σχήμα 4.24 ), παρατηρούμε την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot πάνω από το προηγούμενο επίπεδο, στο οποίο βρισκόταν πριν τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.



Σχήμα 4.24 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

Η ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή με βάση τη μέγιστη hot-spot θερμοκρασία, λαμβάνει την τιμή **%Loss of Life = 0.001 %**.

### 4.3.3 Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή

Με βάση τα αποτελέσματα, που λαμβάνονται από το θερμικό μοντέλο και το μοντέλο γήρανσης του μετασχηματιστή, υπολογίζεται η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή για το συγκεκριμένο σενάριο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων (Dual Tariff).

Με αναγωγή των ποσοστιαίων απωλειών ζωής της μόνωσης για μία χειμερινή και μία θερινή ημέρα, σε ολόκληρη τη χειμερινή περίοδο ( 273 ημέρες) και σε ολόκληρη τη θερινή περίοδο ( 92 ημέρες ), αντίστοιχα, υπολογίζεται η απώλεια ζωής για τις περιόδους αυτές.

**Θερινή περίοδος : %Loss of Life = 92 × 0.0163 % = 1.4996 %**

**Χειμερινή περίοδος : %Loss of Life = 273 × 0.001% = 0.273 %**

**Συνολική %Loss of Life για ένα έτος = 1. 4996 % + 0. 08045 % =1.7726 %**

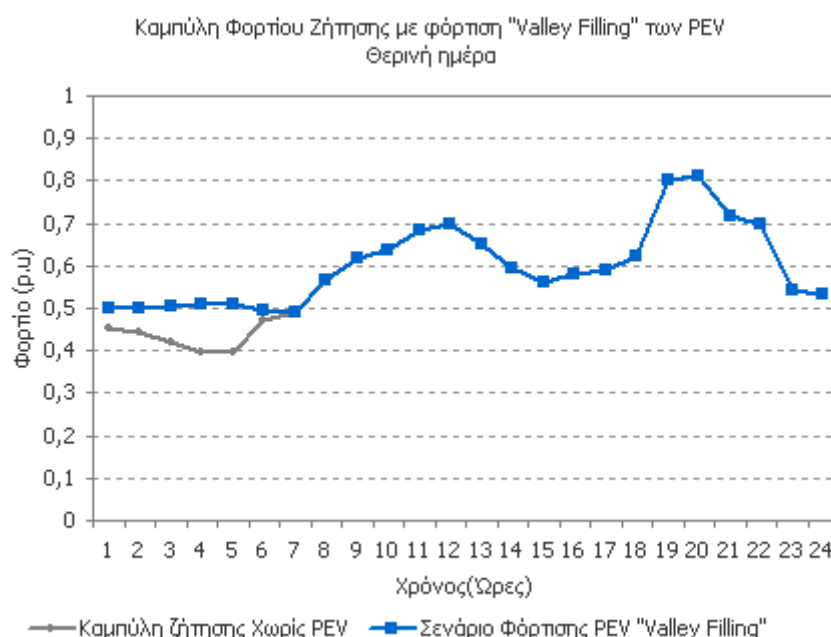
Η διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή υπολογίζεται στα **56,4 χρόνια**.

Είναι χρήσιμο να σημειωθεί, ότι η απώλεια ζωής, που υπολογίζεται για του θερινούς μήνες με αυτό το σενάριο φόρτισης, είναι ίση με αυτήν, που υπολογίζεται όταν στο σύστημα δεν συνδέονται PEV. Η μεταβολή στα χρόνια ζωής του μετασχηματιστή προέρχεται από τους χειμερινούς μήνες.

#### 4.4 Υπολογισμός θερμικής συμπεριφοράς μετασχηματιστή και απώλεια ζωής της μόνωσής του για Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV Ελαχιστοποίησης Κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης λειτουργίας του δικτύου (“Valley-Filling”)

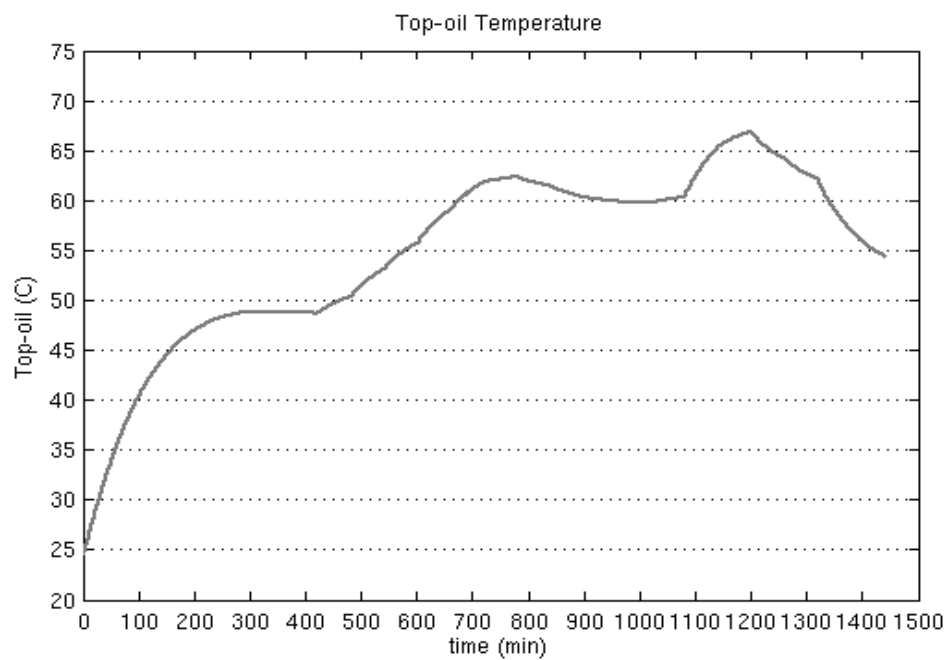
##### 4.4.1 Θερινό Φορτίο

Το σενάριο φόρτισης, κατά το οποίο γίνεται ελεγχόμενη φόρτιση των PEV με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους και την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του συστήματος, οδηγεί στη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων με τον τρόπο, που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, (σχήμα 4.25) .

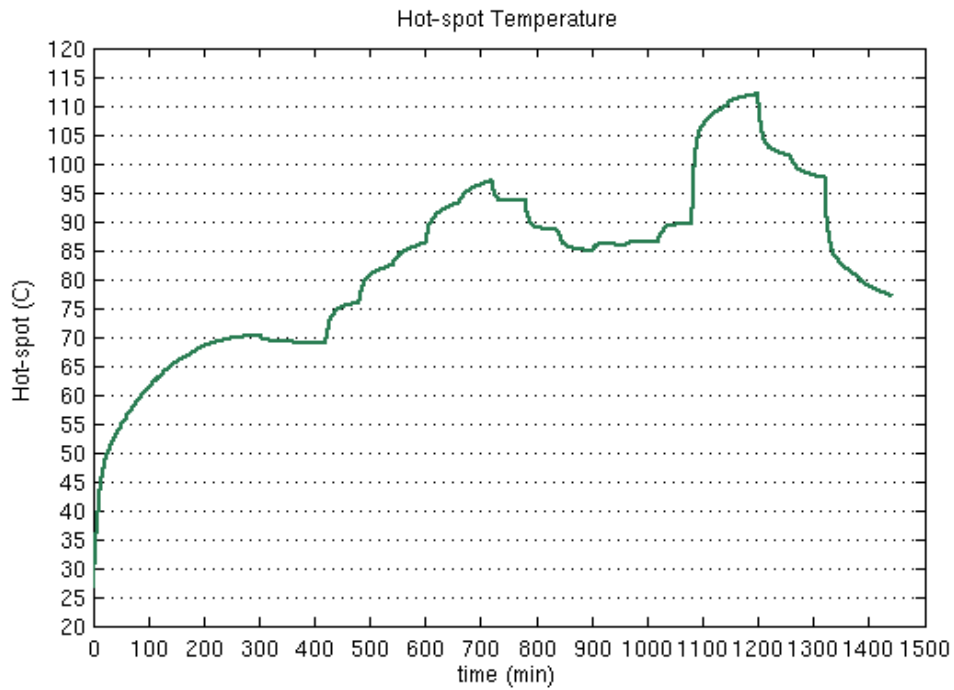


Σχήμα 4.25 Ημερήσια καμπύλη ζήτησης συστήματος - ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης λειτουργίας του δικτύου.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνεται από τον πίνακα 4.1 . Αυτό το σενάριο φόρτισης θεωρητικά πρέπει να έχει τη μικρότερη επίδραση στους μετασχηματιστές του δικτύου, αφού όχι μόνο δεν δημιουργεί νέες αιχμές στο φορτίο ζήτησης, αλλά συμβάλλει και στην ομαλοποίηση του φορτίου. Βέβαια, το γεγονός ότι το πιο πάνω σενάριο δεν επιδρά στις αιχμές του φορτίου μας προϋποθέτει για το ότι η ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή θα υπολογίζεται στα ίδια ακριβώς επίπεδα με αυτά, που θα προέκυπταν αν δεν είχαμε συνδέσει προς φόρτιση τα ηλεκτρικά οχήματα. Για το λόγο αυτό, παρατίθενται και οι θερμοκρασιακές καμπύλες παρακάτω.

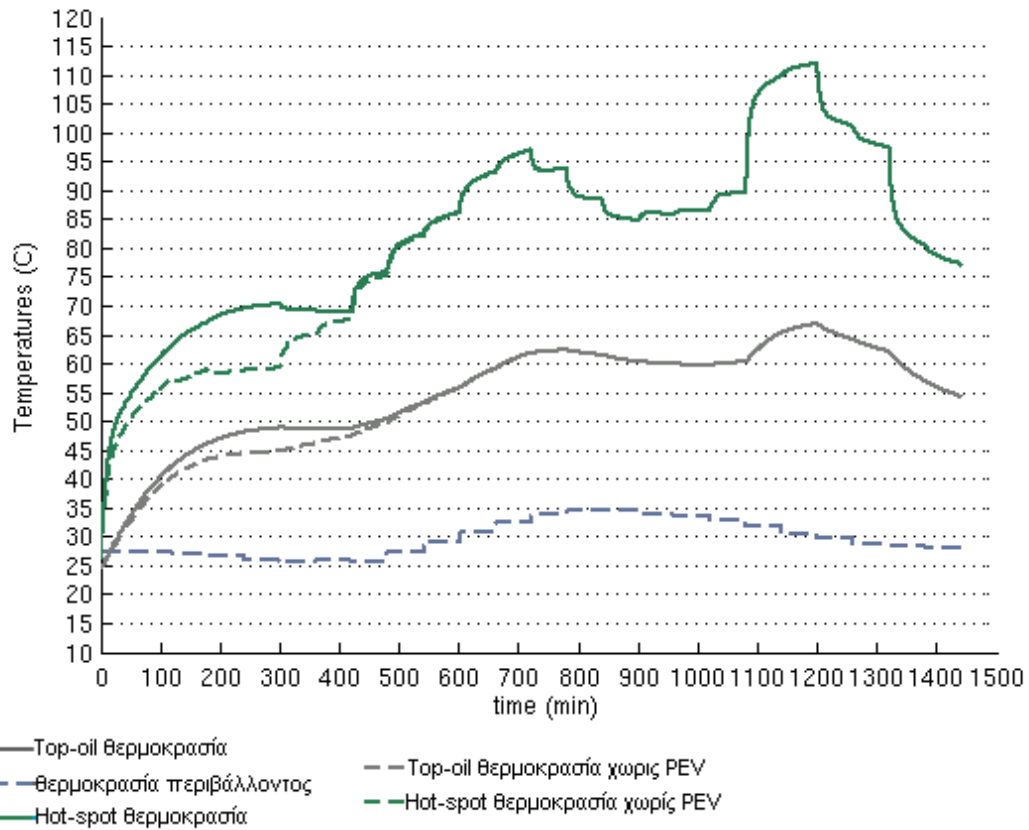


Σχήμα 4.26 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα- ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστους με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση λειτουργίας του δικτύου.



Σχήμα 4.27 Θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα- ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.

Η θερμοκρασία top-oil λαμβάνει τη μέγιστη τιμή των 66,89°C και η hot-spot θερμοκρασία τη μέγιστη τιμή  $\theta_{hs,max}=111,99^{\circ}\text{C}$  , τιμές ίδιες με αυτές, που έχουμε όταν δεν πραγματοποιείται φόρτιση PEV στο δίκτυο. Στο σχήμα 4.28 φαίνεται πώς επιδρά η φόρτιση, με βάση το συγκεκριμένο σενάριο, στις κρίσιμες για τη ζωή της μόνωσης θερμοκρασίες. Σημειώνεται μία ομαλή και σε χαμηλά επίπεδα αύξηση της θερμοκρασίας τις ώρες της ημέρας, που πριν τη φόρτιση των PEV σημειώνοντο οι χαμηλότερες τιμές της θερμοκρασίας.



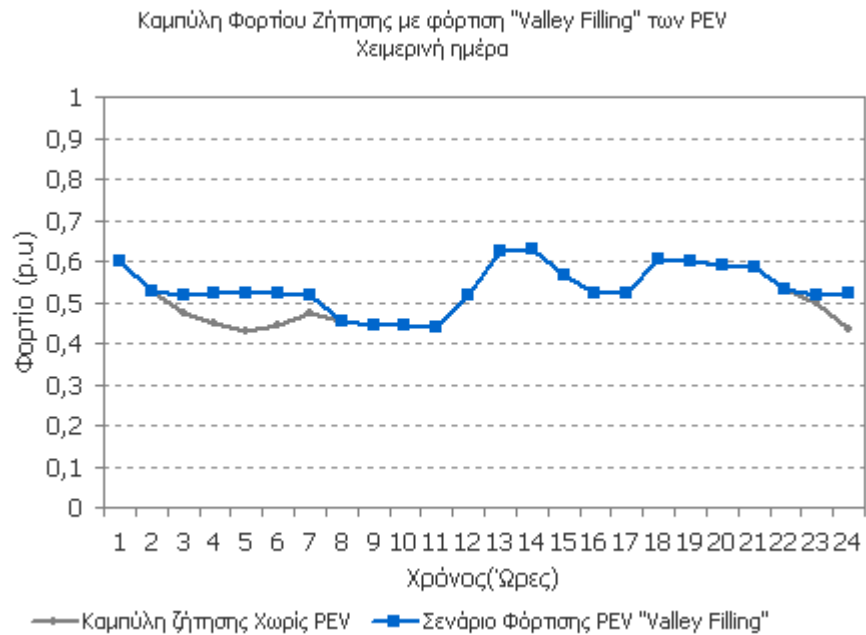
Σχήμα 4.28 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ποσοστιαία απώλεια ζωής του μετασχηματιστή υπολογίζεται στα **%Loss of Life = 0.0163 %**.

#### 4.4.2. Χειμερινό Φορτίο

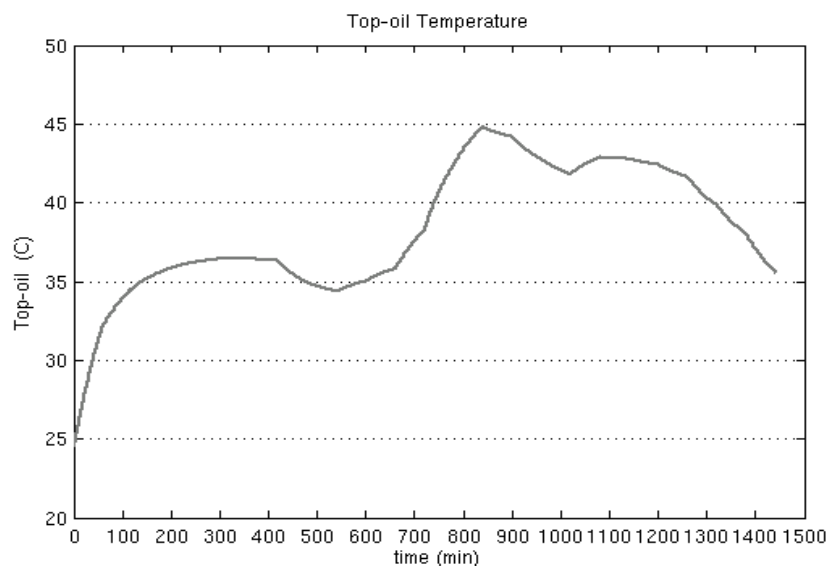
Για μία ημέρα του μηνός Φεβρουαρίου η θερμοκρασία περιβάλλοντος θα διαμορφώνεται σύμφωνα με τον πίνακα 4.2 . Το φορτίο, όπως διαμορφώνεται με το "Valley Filling" σενάριο φόρτισης των 150 PEV, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, (σχήμα 4.28) .





Σχήμα 4.28 Ημερήσια καμπύλη ζήτησης συστήματος με ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης λειτουργίας του δικτύου.

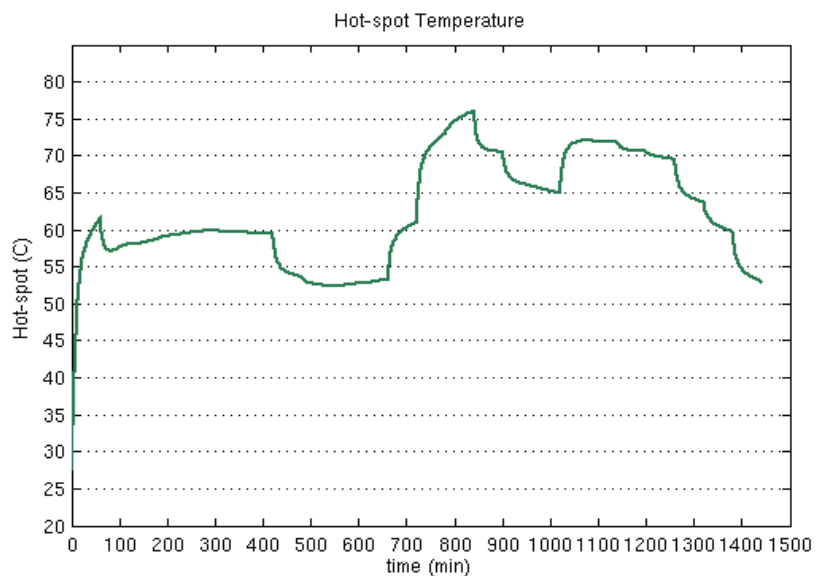
Τα PEV φορτίζονται από το δίκτυο κατά τα χρονικά διαστήματα, στα οποία το κόστος της ενέργειας είναι χαμηλό και η ζήτηση του φορτίου είναι μειωμένη. Η ισχύς, που απαιτείται για τη φόρτισή τους, διανέμεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να σταθεροποιείται ως ένα βαθμό το φορτίο ζήτησης.



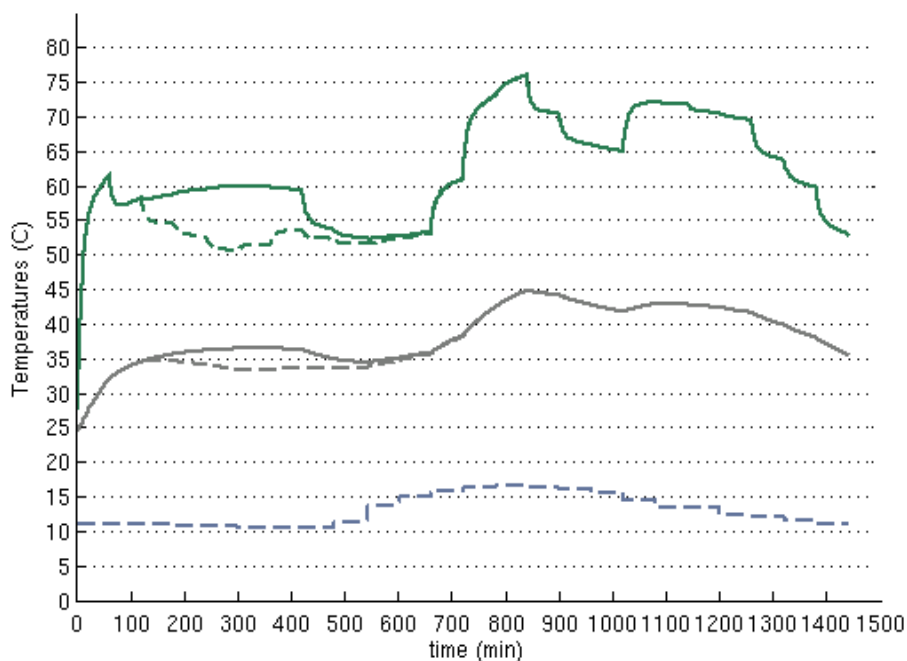
Σχήμα 4.29 Θερμοκρασία top-oil του λαδιού του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα- ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση λειτουργίας του δικτύου.

Στο παραπάνω σχήμα 4.29 βλέπουμε τη θερμοκρασία top-oil, που αναπτύσσεται στην κορυφή του λαδιού του μετασχηματιστή. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας top-oil είναι

44,8°C. Στο παρακάτω σχήμα 4.30 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας hot-spot κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας hot-spot είναι  $\theta_{hs,max}=76,05^{\circ}\text{C}$ .



4.30 Θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV του μετασχηματιστή για μία χειμερινή ημέρα- ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.



- Top-oil θερμοκρασία
- — Top-oil θερμοκρασία χωρίς PEV
- — — θερμοκρασία περιβάλλοντος
- — — Hot-spot θερμοκρασία χωρίς PEV
- Hot-spot θερμοκρασία

Σχήμα 4.31 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, θερμοκρασία top-oil και θερμοκρασία hot-spot του τυλίγματος 0,71 kV.

Με βάση την παραπάνω μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, η ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή υπολογίζεται **%Loss of Life = 0.0002955 %**.

#### 4.4.3 Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου και του μοντέλου γήρανσης του μετασχηματιστή, υπολογίζουμε για το μοντέλο φόρτισης “Valley Filling” την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή.

Με αναγωγή των ποσοστιαίων απωλειών ζωής της μόνωσης για μία χειμερινή και μία θερινή ημέρα, σε ολόκληρη τη χειμερινή περίοδο ( 273 ημέρες) και σε ολόκληρη τη θερινή περίοδο ( 92 ημέρες ), αντίστοιχα, υπολογίζεται η απώλεια ζωής για τις περιόδους αυτές.

**Θερινή περίοδος : %Loss of Life = 92 × 0,0163% = 1,4996 %**

**Χειμερινή περίοδος : %Loss of Life = 273 × 0.0002955% = 0,08067 %**

**Συνολική %Loss of Life για ένα έτος = 1, 4996 % + 0, 08045 % = 1,5803 %**

Η διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή υπολογίζεται στα **63,3 χρόνια**.

### 4.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων και αξιολόγηση σεναρίων φόρτισης

#### 4.5.1 Θερινό Φορτίο

	$\theta_{to,max}$ (°C)	$\theta_{hs,max}$ (°C)	% Loss of Life
Αρχική ζήτηση συστήματος	66,89	111,99	0,0163
Ζήτηση με μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV	74,05	132,8	0,1204
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο	66,89	111,99	0,0163
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος	66,89	111,99	0,0163

Πίνακας 4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα τρία σενάρια φόρτισης - θερινή περίοδος.

Από τα συγκεντρωτικά στοιχεία, που βλέπουμε στον πίνακα 4.5, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων (Dump Charge) έχει αρνητική επίπτωση στη ζωή της μόνωσης του μετασχηματιστή. Αυτό αποτυπώνεται στην ποσοστιαία απώλεια ζωής, η οποία είναι κατά πολύ μεγαλύτερη στη μη ελεγχόμενη φόρτιση σε σχέση με όλα τα άλλα σενάρια φόρτισης των PEV.

Εκτός όμως από αυτό το ευδιάκριτο συμπέρασμα, τα άλλα σενάρια φόρτισης παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα σαν να μην προκαλούν καμιά απολύτως επίδραση στο μετασχηματιστή. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν είναι αληθές, αφού δεν είναι δυνατόν ο μετασχηματιστής να παραμένει ανεπηρέαστος από ένα επιπρόσθετο φορτίο, το οποίο μάλιστα δημιουργεί νέες αιχμές ζήτησης.

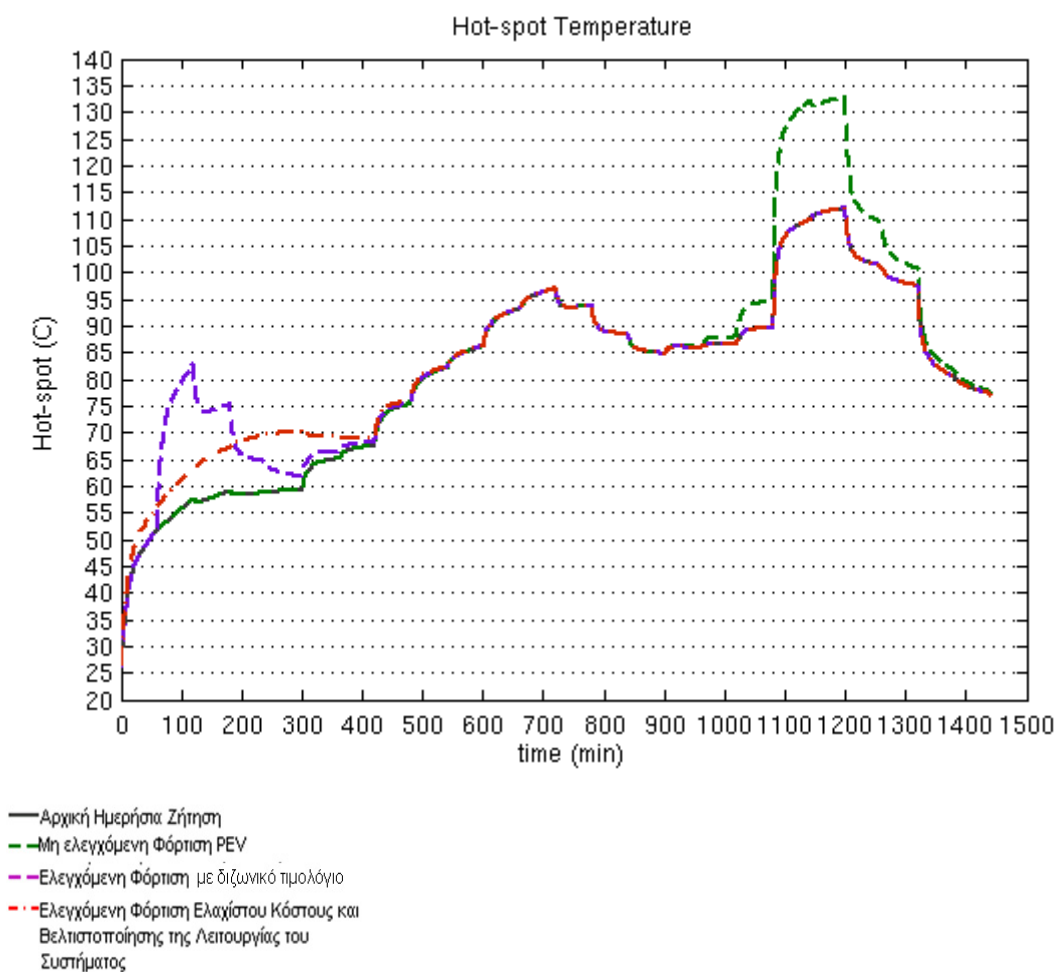
Το σενάριο φόρτισης των PEV με διζωνικό τιμολόγιο δημιουργεί μία νέα αιχμή ζήτησης κατά το διάστημα της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Λόγω του ύψους της αιχμής ζήτησης του αρχικού φορτίου του συστήματος και του πλήθους των οχημάτων, τα οποία θεωρούμε ότι συνδέονται, η νέα αιχμή δεν ξεπερνάει την αιχμή του συστήματος. Επομένως, η επίδραση της νέας αιχμής δεν αποτυπώνεται και σε μεγέθη, όπως είναι η μέγιστη top-oil και hot-spot θερμοκρασία, που παραμένουν ίδιες, άρα ούτε και στην ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή, που εξαρτάται από τη  $\theta_{hs,max}$ . Στο παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνονται οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες hot-spot για κάθε διαφορετικό σενάριο φόρτισης. Διακρίνεται, η απότομη άνοδος της θερμοκρασίας hot-spot κατά την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο. Η αιχμή ζήτησης, που εκδηλώνεται στις 2π.μ., προκαλεί άνοδο της θερμοκρασίας hot-spot στους 82,78 °C από 57,7 °C, που ήταν αρχικά. Επομένως, έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κατά **43,47%** στις 2π.μ. .

Εξετάζοντας την περίπτωση του σεναρίου ελεγχόμενης φόρτισης των PEVs ελαχιστοποίησης κόστους και ταυτόχρονης βέλτιστης λειτουργίας του συστήματος, διαπιστώνουμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση τα στοιχεία του πίνακα 4.3 δεν είναι κατάλληλα για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων. Αυτό συμβαίνει, διότι κατά τη φόρτιση των οχημάτων, σύμφωνα με αυτό το σενάριο, δεν παρουσιάζεται κάποια νέα αιχμή ζήτησης. Το συνολικό φορτίο ζήτησης παρουσιάζει πιο ομαλές μεταβολές και το ίδιο συμβαίνει και με τη θερμοκρασία hot-spot. Βέβαια, κατά τις ώρες 1π.μ - 7 π.μ παρατηρείται μία αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot του Μ/Σ, με μέγιστη θερμοκρασιακή απόκλιση να σημειώνεται στις 5 π.μ., με άνοδο της θερμοκρασίας κατά 11,12 °C, που αποτελεί αύξηση κατά **18,78%** .

Πρέπει να σημειωθεί, ότι με το σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο, που εξετάστηκε, είχαμε τη δημιουργία νέας αιχμής, η οποία, λόγω των στοιχείων, που θεωρήθηκαν στην ανάλυση, δεν ήταν τόσο μεγάλη ώστε να ξεπεράσει την αιχμή του συστήματος.

Στο διάγραμμα του σχήματος 4.32 παριστάνονται οι hot-spot θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή, όταν δεν έχουμε σύνδεση PEV και για τα τρία διαφορετικά σενάρια φόρτισης, τα οποία εξετάζουμε. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση είναι η μόνη, που ενισχύει την υπάρχουσα αιχμή του φορτίου και επομένως αυξάνει τη μέγιστη hot-spot θερμοκρασία, η οποία αναπτύσσεται μέσα στην ημέρα. Σύμφωνα και με

τα τρία σενάρια φόρτισης, κατά το διάστημα από 7π.μ. έως 3 μ.μ. δεν συνδέονται ηλεκτρικά οχήματα προς φόρτιση, συνεπώς η θερμοκρασία hot-spot κατά το ανωτέρω χρονικό διάστημα είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις. Οι διαφορές ανάμεσα στην Dual Tariff και στην Valley Filling φόρτιση των PEV παρουσιάζονται κατά το χρονικό διάστημα από 1 π.μ. έως 7 π.μ. Κατά την Dual Tariff παρουσιάζεται μεγαλύτερη άνοδος της θερμοκρασίας και πιο απότομη σε σχέση με τη Valley Filling, κατά την οποία η αύξηση της θερμοκρασίας γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε δημιουργεί μία πιο ομαλή μεταβολή.



Σχήμα 4.32 Θερμοκρασία hot-spot στο τύλιγμα 0,71 για τα τρία σενάρια φόρτισης PEV για θερινή ημέρα.

	Μέσος όρος Hot-spot θερμοκρασίας (°C)
Αρχική ζήτηση συστήματος	81
Ζήτηση με μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV	83,62
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο	83,18
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος	82,94

Πίνακας 4.6 Μέση Hot-spot θερμοκρασία για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια φόρτισης για θερινή ημέρα.

Στον παραπάνω πίνακα 4.6 παρατίθενται οι τιμές της μέσης θερμοκρασίας hot-spot, που αναπτύσσεται στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή. Στον πίνακα αυτό διαφαίνεται η διαφορά ανάμεσα στα σενάρια Dual Tariff και Valley Filling, η οποία δεν μπορούσε να γίνει διακριτή από τις τιμές του πίνακα 4.5 .

#### 4.5.2 Χειμερινό Φορτίο

	$\theta_{to,max}$ (°C)	$\theta_{hs,max}$ (°C)	% Loss of Life
Αρχική ζήτηση συστήματος	44,77	76,03	0,0002947
Ζήτηση με μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV	48,72	91,32	0,0018
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο	44,78	86,57	0,001
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος	44,8	76,05	0,0002955

Πίνακας 4.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα τρία σενάρια φόρτισης χειμερινής περιόδου.

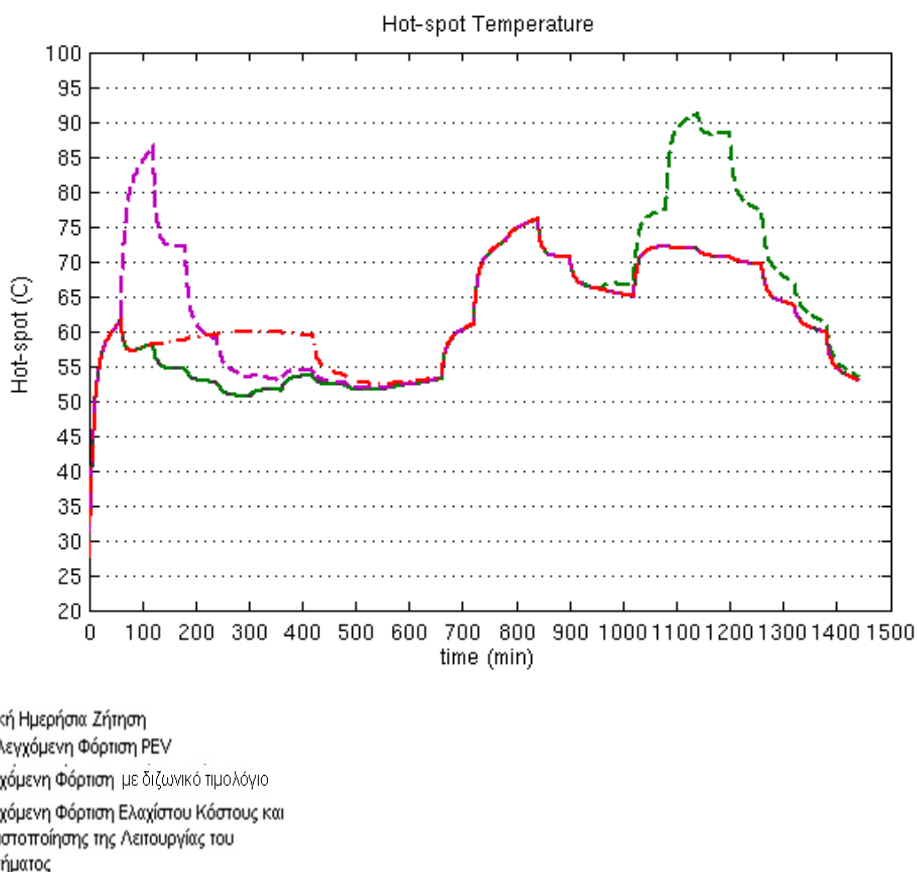
Από τα στοιχεία του πίνακα 4.7 μπορούμε να έχουμε μια πιο σαφή εικόνα των επιπτώσεων των τριών σεναρίων φόρτισης στη ζωή της μόνωσης του μετασχηματιστή. Όπως ήταν αναμενόμενο, την υψηλότερη θερμοκρασία hot-spot έχουμε για τη μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η θερμοκρασία αυτή είναι 91,32 °C κατά τη διάρκεια των

απογευματινών ωρών, κατά τις οποίες και αρχικά εμφανιζόταν αυξημένο φορτίο ζήτησης από το σύστημα. Πρέπει εδώ να σημειωθεί, ότι σε αντίθεση με το τι συνέβη κατά τη θερινή ημέρα, που εξετάσαμε, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν φορτίζονται σε αυτό το σενάριο φόρτισης στην αιχμή του φορτίου ζήτησης, αλλά κατά τις απογευματινές ώρες, κατά τις οποίες και πάλι είχαμε αρκετά αυξημένη hot-spot θερμοκρασία, αλλά όχι τη μέγιστη της ημέρας. Βέβαια, και υπό αυτές τις συνθήκες, η φόρτιση των PEV με μη ελεγχόμενο τρόπο δημιουργεί μία νέα υψηλή αιχμή και προκαλεί την ανάπτυξη hot-spot θερμοκρασίας, αρκετά υψηλής για τα δεδομένα της χειμερινής ημέρας. Έτσι, από τις τιμές της hot-spot θερμοκρασίας, αλλά και από το διάγραμμα, (σχήμα 4.32), καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση έχει τη χειρότερη επίπτωση στη μόνωση του μετασχηματιστή.

Η ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο κατά τη χειμερινή περίοδο έχει πολύ πιο αρνητικά αποτελέσματα για το μετασχηματιστή σε σχέση με αυτά της θερινής. Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι η αιχμή, που δημιουργείται από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, ξεπερνάει κατά πολύ την αιχμή του συστήματος. Σαν αποτέλεσμα, η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, η οποία αναπτύσσεται κατά το διάστημα 1 π.μ. έως 7 π.μ., είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, που έχουμε χωρίς τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, κατά 13%, δηλαδή κατά 10,54°C. Κατά το χρονικό διάστημα από 1 π.μ. έως 7 π.μ. το αρχικό σύστημα εμφάνιζε μέγιστη θερμοκρασία hot-spot 61,65 °C. Μετά τη σύνδεση των PEV η θερμοκρασία κατά το χρονικό διάστημα αυτό αυξάνεται κατά 40,42 % . Επίσης, σημασία έχει το γεγονός, ότι αυτή η υψηλή θερμοκρασία δεν προκύπτει από μία αύξηση μιας ήδη υψηλής τιμής, αλλά εμφανίζεται κατά το διάστημα, που είχαμε χαμηλό φορτίο ζήτησης. Έχουμε επομένως τη δημιουργία μιας τρίτης αιχμής στο σύστημα και πολύ έντονες συνεχόμενες μεταβολές της θερμοκρασίας hot-spot κατά το διάστημα της ημέρας.

Η διάκριση και η επιλογή ανάμεσα στη μη ελεγχόμενη φόρτιση και στην ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο είναι δύσκολη, διότι κατά την πρώτη εμφανίζεται μεγαλύτερη κατά 4,75 °C θερμοκρασία hot-spot, αλλά κατά τη δεύτερη η hot-spot θερμοκρασία εμφανίζει περισσότερες και πιο απότομες μεταβολές.

Η ελεγχόμενη φόρτιση ελαχιστοποίησης κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος και σε αυτήν την περίπτωση αποδεικνύεται η λιγότερο επιβλαβής για τη μόνωση του μετασχηματιστή. Δεν προκαλεί αύξηση της μέγιστης hot-spot θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των ωρών 1 π.μ. έως 7 π.μ. προκαλεί και αυτή κάποια αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά πολύ πιο ομαλή και σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με την Dual Tariff, που επιδρά τις ίδιες ώρες της ημέρας. Η αιχμή του φορτίου ζήτησης παραμένει η ίδια με αυτή, που είχαμε χωρίς τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, συνεπώς τα στοιχεία του πίνακα 4.7 μας δίνουν τα ίδια αποτελέσματα για τις δύο αυτές περιπτώσεις. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμιά επιβάρυνση στους μετασχηματιστές από τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων. Από μόνη της, η αυξημένη hot-spot θερμοκρασία λειτουργίας του Μ/Σ αποτελεί έναν επιβαρυντικό παράγοντα και ας μη μεταφράζεται με τις τιμές του πίνακα. Μπορούμε να διακρίνουμε και στο διάγραμμα του σχήματος 4.32 την αύξηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.32 Θερμοκρασία hot-spot στο τύλιγμα 0,71 για τα τρία σενάρια φόρτισης PEV για χειμερινή ημέρα.

Στον παρακάτω πίνακα 4.8 παρατίθενται οι μέσες θερμοκρασίες hot-spot για κάθε σενάριο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

	Μέσος όρος Hot-spot θερμοκρασίας (°C)
Αρχική ζήτηση συστήματος	60,73
Ζήτηση με μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV	63,1
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο	63,13
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος	62,68

Πίνακας 4.8 Μέση Hot-spot θερμοκρασία για τα τρία εξεταζόμενα σενάρια φόρτισης για χειμερινή ημέρα.



Στον πίνακα 4.8 φαίνεται ότι η μέση hot-spot θερμοκρασία του σεναρίου φόρτισης “Valley Filling” είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του αρχικού συστήματος και μικρότερη από αυτές των δύο άλλων σεναρίων.

### 4.5.3 Διάρκεια Ζωής μετασχηματιστή

	Συνολική ετήσια %Loss of Life	Αναμενόμενα έτη Ζωής
Αρχική ζήτηση συστήματος	1,5801	63,3
Ζήτηση με μη ελεγχόμενη φόρτιση PEV	11,5682	8,6
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο	1,7726	56,4
Ζήτηση με ελεγχόμενη φόρτιση PEV ελαχίστου κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος	1,5803	63,3

Πίνακας 4.9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα, αναγόμενα σε ετήσιο επίπεδο και αναμενόμενη διάρκεια ζωής για τα τρία σενάρια φόρτισης.

Εξετάζοντας τον πίνακα 4.9 μπορούμε να καταλήξουμε σε μία σαφή διάκριση ανάμεσα στα σενάρια φόρτισης των PEV.

#### ➤ Μη ελεγχόμενη φόρτιση PEVs

- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή : 8,6 χρόνια
- Ετήσια ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης : 11,5682 %
- Ποσοστιαία απώλεια ζωής θερινής ημέρας : 0,1204 %
- Ποσοστιαία απώλεια ζωής χειμερινής ημέρας : 0,0018 %
- Μέγιστη hot-spot θερμοκρασία θερινής ημέρας : 132,8 ° C
- Μέγιστη hot-spot θερμοκρασία χειμερινής ημέρας : 91,32° C
- Μέσος όρος θερμοκρασίας hot-spot θερινής ημέρας : 83,62 ° C
- Μέσος όρος θερμοκρασίας hot-spot χειμερινής ημέρας : 63,1 ° C

Η μη ελεγχόμενη φόρτιση έχει τη χειρότερη επίδραση και κατά τη χειμερινή και κατά τη θερινή ημέρα, που εξετάσαμε. Κατά τη θερινή ημέρα προκάλεσε αύξηση της αιχμής του συστήματος, συνεπώς και αύξηση της μέγιστης hot-spot θερμοκρασίας, ενώ κατά τη χειμερινή

ημέρα το φορτίο των οχημάτων προστέθηκε στην απογευματινή αιχμή του συστήματος, που πριν τη σύνδεση ήταν δεύτερη σε μέγεθος. Μετά τη σύνδεση, η αιχμή της συνολικής ζήτησης μεταφέρθηκε από τις μεσημβρινές στις απογευματινές ώρες και έφτασε σε υψηλότερα επίπεδα.

➤ **Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV με διζωνικό τιμολόγιο (Dual Tariff)**

- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή : 56,4 χρόνια
- Ετήσια ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης : 1,7726 %
- Ποσοστιαία απώλεια ζωής θερινής ημέρας : 0,0163 %
- Ποσοστιαία απώλεια ζωής χειμερινής ημέρας : 0,001 %
- Μέγιστη hot-spot θερμοκρασία θερινής ημέρας : 111,99 ° C
- Μέγιστη hot-spot θερμοκρασία χειμερινής ημέρας : 86,57° C
- Μέσος όρος θερμοκρασίας hot-spot θερινής ημέρας : 83,18 ° C
- Μέσος όρος θερμοκρασίας hot-spot χειμερινής ημέρας : 63,13° C

Αυτό το σενάριο φόρτισης οδηγεί στη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τις ώρες, που εμφανίζεται η χαμηλότερη ζήτηση του συστήματος και ως εκ τούτου το κόστος της ενέργειας είναι πιο χαμηλό. Κατά τη θερινή ημέρα, η αιχμή, που δημιουργείται στο φορτίο από τα ηλεκτρικά οχήματα, είναι μικρότερη από αυτή του συστήματος, επομένως η μέγιστη θερμοκρασία hot-spot δεν επηρεάζεται. Κατά τη χειμερινή ημέρα η αιχμή από τη φόρτιση των οχημάτων αποτελεί τη νέα αιχμή του φορτίου, αφού ξεπερνάει την αιχμή του συστήματος και διαμορφώνει τη μέγιστη θερμοκρασία hot-spot. Αυτό, που χαρακτηρίζει το σενάριο αυτό, είναι ότι δημιουργεί νέα αιχμή στο φορτίο και στη θερμοκρασία και επιδρά αρνητικά στην ομαλότητα των δύο αυτών μεγεθών, που είναι επιθυμητή σε κάθε περίπτωση.

➤ **Ελεγχόμενη Φόρτιση PEV Ελαχιστοποίησης Κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης λειτουργίας του δικτύου (“Valley-Filling”)**

- Αναμενόμενη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή : 63,3 χρόνια
- Ετήσια ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης : 1,5803 %
- Ποσοστιαία απώλεια ζωής θερινής ημέρας : 0,0163 %
- Ποσοστιαία απώλεια ζωής χειμερινής ημέρας : 0,0002955 %
- Μέγιστη hot-spot θερμοκρασία θερινής ημέρας : 111,99 ° C
- Μέγιστη hot-spot θερμοκρασία χειμερινής ημέρας : 76,05 ° C
- Μέσος όρος θερμοκρασίας hot-spot θερινής ημέρας : 82,94 ° C
- Μέσος όρος θερμοκρασίας hot-spot χειμερινής ημέρας : 62,68 ° C

Αυτό το σενάριο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το ιδανικό για τη ζωή του μετασχηματιστή. Κατά τη θερινή ημέρα οδηγεί στην ίδια μέγιστη hot-spot θερμοκρασία, που θα είχαμε χωρίς τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, συνεπώς και στην ελάχιστη δυνατή ποσοστιαία απώλεια ζωής, που θα μπορούσαμε να έχουμε με τα δεδομένα μας. Κατά τη χειμερινή ημέρα η μέγιστη hot-spot θερμοκρασία συμπίπτει με αυτή, που θα είχαμε από το αρχικό σύστημα, αλλά και με αυτή, που λαμβάνουμε από την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο. Αυτό, που διαφοροποιεί το σενάριο αυτό από το προηγούμενο, είναι το γεγονός ότι συμβάλλει στην ομαλοποίηση τόσο του φορτίου όσο και της θερμοκρασίας hot-spot κατά τη διάρκεια της ημέρας και παρουσιάζει χαμηλότερη μέση θερμοκρασία hot-spot, που συνιστά σημαντικό παράγοντα. Βασική παρατήρηση σχετικά με τα αποτελέσματα, που έχουμε υπολογίσει από το θερμικό μοντέλο, είναι ότι ενώ οι τιμές της μέγιστης hot-spot θερμοκρασίας και της αναμενόμενης διάρκειας ζωής της μόνωσης δίνουν την εικόνα ότι με το μοντέλο αυτό φόρτισης δεν παρατηρείται καμία επίδραση στη ζωή του μετασχηματιστή, αυτό δεν ισχύει. Η επίδραση, την οποία έχει η σύμφωνα με αυτό το σενάριο φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων αποδεικνύεται από τις καμπύλες, που υπολογίζονται για τη hot-spot θερμοκρασία και το δείκτη του μέσου όρου της θερμοκρασίας hot-spot.

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα

Οι μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται σε όλες τις βαθμίδες μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας και αποτελούν ένα από τα ακριβότερα στοιχεία του δικτύου διανομής και μεταφοράς. Είναι σημαντικό επομένως να δίνεται προσοχή στην επίδραση, που έχει στους μετασχηματιστές το φορτίο, το οποίο τροφοδοτείται. Αν και οι μετασχηματιστές είναι από τις ηλεκτρικές μηχανές, που έχουν τους καλύτερους βαθμούς απόδοσης, κατά τη λειτουργία τους θερμαίνονται από τη θερμότητα, που παράγεται από τις μαγνητικές και ηλεκτρικές απώλειες. Ο βασικός παράγοντας, από τον οποίον εξαρτάται η «διάρκεια ζωής» του μετασχηματιστή, είναι η θερμική καταπόνησή του, γι αυτό είναι απαραίτητη η καλή ψύξη του.

Η μοντελοποίηση των μετασχηματιστών του ΔΔ σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να αποδειχθεί ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μελέτης και παρακολούθησης της αναπτυσσόμενης σε αυτούς θερμοκρασίας. Στη διπλωματική αυτή εργασία έγινε προσπάθεια να προσεγγισθεί με τον καλύτερο και ακριβέστερο δυνατό τρόπο η θερμική συμπεριφορά των μετασχηματιστών και να υπολογισθεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η αναπτυσσόμενη σε αυτούς θερμοκρασία.

Τα δίκτυα εξελίσσονται για να καλύψουν τις σύγχρονες ανάγκες. Πλέον παρέχονται στο διαχειριστή των ΔΔ δυνατότητες απομακρυσμένου ελέγχου των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και σύνδεσης ή αποσύνδεσης φορτίων. Είναι επομένως χρήσιμο να υπάρχουν τα κατάλληλα εργαλεία, μέσω των οποίων να μπορεί να γίνει η σύγκριση και η επιλογή ανάμεσα σε διάφορα σενάρια, που διαμορφώνουν την τελική καμπύλη ζήτησης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν μία τεχνολογία συνεχώς αναπτυσσόμενη. Σταδιακά έχουν διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό στην αγορά οχημάτων και αυτό οδηγεί στην ανάγκη να εξετασθεί η επίδραση, που θα έχει στο δίκτυο η προσθήκη του φορτίου, το οποίο προέρχεται από τη φόρτισή τους. Συγκεκριμένα, θα πρέπει να προβλεφθεί το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων και να αναπτυχθούν τρόποι για τη σωστή διαχείρισή του. Επίσης, είναι σημαντικό να εξετασθεί το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων, διότι αν ο στόλος αποτελείται από μεγάλο πλήθος EV's τότε η ισχύς, που θα απαιτείται για τη φόρτισή τους, θα είναι μεγάλη. Αν η φόρτιση των οχημάτων δεν ελεγχθεί από το διαχειριστή του συστήματος διανομής παρουσιάζεται ενίσχυση των αιχμών της ζήτησης και επιδείνωση της μόνωσης των μετασχηματιστών. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν από το δίκτυο διανομής ως αποθήκες ενέργειας για την κάλυψη αιχμών του φορτίου ή ως στρεφόμενη εφεδρεία (λειτουργία V2G). Αυτός είναι ένας άλλος λόγος, για τον οποίο τα ηλεκτρικά

οχήματα χρήζουν προσοχής και επιπλέον μελέτης. Η επιλογή ανάμεσα σε διάφορα σενάρια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολύ σημαντικό εργαλείο για το διαχειριστή του ΔΔ. Εξίσου σημαντική επομένως είναι η ανάπτυξη κατάλληλων εργαλείων για τη σωστή αξιολόγηση των σεναρίων φόρτισης.

Το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή, που αναπτύσσεται, αποτελείται από δύο υπομοντέλα. Το πρώτο είναι το μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας, η οποία αναπτύσσεται στο λάδι, που βρίσκεται στην κορυφή της δεξαμενής. Για τους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του ιξώδους του μονωτικού λαδιού λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας του λαδιού. Βασικός παράγοντας είναι επίσης η θερμοκρασία περιβάλλοντος, υπό την οποία λειτουργεί ο μετασχηματιστής και το φορτίο ζήτησης. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος, το ιξώδες και το φορτίο, το οποίο εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή, αποτελούν την είσοδο του πρώτου υπομοντέλου. Το θερμικό μοντέλο, που ακολουθεί, είναι αυτό, από το οποίο υπολογίζεται η θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στο θερμότερο σημείο του μετασχηματιστή. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας στο σημείο αυτό βασίζεται στη θερμοκρασία, που αναπτύσσεται στην κορυφή του λαδιού, η οποία έχει υπολογισθεί στο αμέσως προηγούμενο θερμικό μοντέλο. Κατά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου, που αναπτύσσεται, υπολογίζουμε την ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή. Τις θερμοκρασίες, που υπολογίζονται από το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή, τις χρησιμοποιούμε για να προσδιορίσουμε και να εξετάσουμε την αναμενόμενη «διάρκεια ζωής» του μετασχηματιστή.

Εξετάστηκαν με βάση τη μοντελοποίηση αυτή μετασχηματιστές με διαφορετικά ονομαστικά χαρακτηριστικά. Διαπιστώθηκαν αρκετά κοινά στη θερμική συμπεριφορά των μονάδων αυτών. Παρατηρήθηκε, ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του μετασχηματιστή μεταβάλλεται άμεσα με μία αύξηση του φορτίου ζήτησης. Η θερμοκρασία του λαδιού, που βρίσκεται στην κορυφή του δοχείου, μεταβάλλεται πιο ομαλά ενώ η θερμοκρασία στο θερμότερο σημείο στο εσωτερικό του μετασχηματιστή παρουσιάζει πιο απότομες μεταβολές. Η θερμοκρασία του θερμότερου σημείου κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα από αυτή του λαδιού κορυφής και όσο αυξάνονται οι θερμοκρασίες τόσο μεγαλώνει και η διαφορά ανάμεσά τους.

Με το θερμικό μοντέλο υπολογίζεται η θερμοκρασία hot-spot (θερμότερου σημείου) για κάθε χρονική στιγμή μέσα στη χρονική περίοδο, που εξετάζουμε. Για τους υπολογισμούς, που διεξήχθησαν, θεωρήσαμε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σταθερή κατά τη διάρκεια μίας ώρας. Το θερμικό μοντέλο, που αναπτύχθηκε, μας παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της hot-spot θερμοκρασίας, θεωρώντας θερμοκρασία περιβάλλοντος σταθερή ανά λεπτό. Κατά τη μοντελοποίηση των δύο αυτών μετασχηματιστών θεωρήσαμε επίσης ότι το φορτίο είναι σταθερό κατά τη διάρκεια ενός λεπτού. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης hot-spot θερμοκρασίας.

Διαπιστώθηκε, ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τη μέγιστη ως την ελάχιστη τιμή, που μπορεί να λάβει κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, δεν είναι ικανή να επηρεάσει έντονα τη hot-spot θερμοκρασία. Σε ένα μετασχηματιστή 250 MVA διαπιστώθηκε ότι μία αύξηση κατά 51,02% (5,3 °C) της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μίας χειμερινής ημέρας προκαλεί αύξηση κατά 2,45% (3,32 °C) της θερμοκρασίας hot-spot. Στον ίδιο

μετασχηματιστή για μία θερινή ημέρα η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά 26,55% (6,8°C) προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot κατά 3,17 % (4,47 °C). Τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή ημέρα για μία μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος σημειώνεται μία μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά απόλυτη τιμή, τόσο εντονότερη είναι η επίδραση μιας μεταβολής της στη θερμοκρασίας hot-spot.

Εφαρμόζοντας σε δύο μετασχηματιστές, διαφορετικής ονομαστικής ισχύος, το ίδιο ανά μονάδα φορτίο διαπιστώθηκε ότι πλησίον του τυλίγματος χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή με τη μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ αναπτύχθηκε υψηλότερη hot-spot θερμοκρασία απ' ό,τι αναπτύχθηκε στο τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή μεγαλύτερης ισχύος. Επίσης, παρατηρούμε ότι η hot-spot θερμοκρασία ενός μετασχηματιστή μικρότερης ισχύος αυξάνεται πιο απότομα με την κάθε αύξηση του φορτίου. Σε όλους τους μετασχηματιστές η καμπύλη hot-spot αυξάνεται με μεγαλύτερη κλίση στην αρχή μιας αύξησης του φορτίου και με την πάροδο του χρόνου η άνοδος της θερμοκρασίας συνεχίζεται με μικρότερη κλίση. Αυτό διαπιστώνεται και από τη μοντελοποίηση του μετασχηματιστή 2,5 MVA, στον οποίο σημειώνεται αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot με μεγαλύτερη κλίση κατά την αύξηση του φορτίου σε σχέση με την κλίση της αύξησης της θερμοκρασίας hot-spot στο μετασχηματιστή 250 MVA, που εξετάστηκε. Συμπεραίνουμε, ότι όσο μεγαλύτερης ισχύος είναι ο μετασχηματιστής τόσο πιο ομαλή είναι η αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot, που σημειώνεται με μία απότομη αύξηση του φορτίου. Έντονη διαφορά διαπιστώνεται και στην ποσοστιαία απώλεια ζωής των μετασχηματιστών. Το ίδιο φορτίο εφαρμοσμένο σε δύο μετασχηματιστές διαφορετικής ισχύος προκαλεί μεγαλύτερη ποσοστιαία απώλεια ζωής της μόνωση του μετασχηματιστή με τη μικρότερη ισχύ.

Εφαρμόζοντας στο θερμικό μοντέλο θερμοκρασία περιβάλλοντος αυξανόμενη με βήμα 10 ° C διαπιστώθηκε ότι η αύξηση, που σημειώθηκε στη θερμοκρασία hot-spot για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ήταν σχεδόν σταθερή. Όσο αυξανόταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά απόλυτη τιμή παρουσιαζόταν μία μικρή αύξηση του βήματος, με το οποίο αυξανόταν η θερμοκρασία hot-spot. Με βάση τις δοκιμές, που έγιναν για διαφορετικούς μετασχηματιστές, διαπιστώνουμε ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας δεν επηρεάζουν έντονα τη μορφή της καμπύλης hot-spot. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει έντονα το επίπεδο, στο οποίο θα κυμανθεί η θερμοκρασία hot-spot, και τις τιμές, που θα λάβει, αλλά δεν μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο, με τον οποίο θα μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της ημέρας, δηλαδή τη διακύμανση της θερμοκρασίας hot-spot.

Η ποσοστιαία απώλεια ζωής, που υπολογίζεται από το μοντέλο γήρανσης, αποτελεί την απώλεια ζωής της μόνωσης, η οποία θα προκαλείτο από τη συνεχόμενη λειτουργία του μετασχηματιστή υπό τη μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, που αναπτύσσεται κατά το διάστημα που εξετάζουμε. Η ποσοστιαία αυτή απώλεια υπολογίζεται επομένως λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη μέγιστη θερμοκρασία, στοιχείο, που μας οδηγεί σε σωστά συμπεράσματα, αφού η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πολύ εντονότερη για μεγάλες τιμές αυτής. Η μόνη αδυναμία, που παρουσιάζεται σε αυτήν την περίπτωση, είναι ότι δεν μπορούμε να συγκρίνουμε μεταξύ τους, με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου γήρανσης, δύο διαφορετικές καμπύλες ζήτησης, οι οποίες οδηγούν όμως στην ανάπτυξη της ίδια μέγιστης θερμοκρασίας hot-spot. Σε

αυτήν την περίπτωση το μοντέλο γήρανσης της μόνωσης μας δίνει ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα. Είναι βέβαια κατανοητό ότι όσο και αν ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία hot-spot δεν παύει η θερμοκρασία καθ' όλο το χρονικό διάστημα, που εξετάζουμε, να επιδρά διαφορετικά στη μόνωση του μετασχηματιστή.

Στον μετασχηματιστή 2,5 MVA έγινε η εφαρμογή των καμπυλών ζήτησης, όπως διαμορφώθηκαν από τον αλγόριθμο υπολογισμού της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Εφαρμόστηκαν φορτία 24 ωρών για μία θερινή και μία χειμερινή ημέρα και ελήφθησαν τα ανάλογα αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε η ίδια θερμική συμπεριφορά με τους δύο μετασχηματιστές μεγαλύτερης ισχύος.

Εφαρμόζουμε ως είσοδο του θερμικού μοντέλου, που αναπτύχθηκε, καμπύλες φορτίου, οι οποίες προκύπτουν από διαφορετικά σενάρια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν από ένα πρόγραμμα, το οποίο δέχεται στην είσοδό του παραμέτρους, που χαρακτηρίζουν το πλήθος του στόλου οχημάτων, το είδος των οχημάτων, τα οποία τον αποτελούν, και την οδηγική συμπεριφορά του οδηγού του οχήματος. Εξετάζουμε συγκεκριμένα τις περιπτώσεις: Μη ελεγχόμενης φόρτισης, ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο, και ελεγχόμενης φόρτισης με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος.

Από το θερμικό μοντέλο του μετασχηματιστή και από το μοντέλο γήρανσης της μόνωσης μπορούμε να συγκρίνουμε τα τρία αυτά σενάρια ως προς την επίδρασή τους στη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών του δικτύου. Ιδιαίτερη σημασία έχει η μορφή της αρχικής καμπύλης ζήτησης του συστήματος. Επομένως έχει εξετασθεί μία χειμερινή και μία θερινή ημέρα, έτσι ώστε να εξετάσουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις καμπυλών με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Σε τελικό στάδιο έγινε αναγωγή των υπολογισμών για τις δύο αυτές ημέρες σε ετήσιο επίπεδο, ώστε να υπολογισθεί η απώλεια ζωής της μόνωσης για λειτουργία ενός έτους υπό τα συγκεκριμένα φορτία.

Από το μοντέλο, που αναπτύχθηκε, τα χειρότερα αποτελέσματα ελήφθησαν κατά την εφαρμογή σε αυτό της καμπύλης ζήτησης, η οποία προέκυψε από το σενάριο μη ελεγχόμενης φόρτισης. Αυτό ήταν αναμενόμενο, λόγω του τυχαίου τρόπου με τον οποίο γίνεται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά το σενάριο αυτό. Η καμπύλη ζήτησης εξαρτάται καθαρά από τη συμπεριφορά του οδηγού, αφού το όχημα αμέσως μόλις συνδεθεί στο δίκτυο θα αρχίσει να φορτίζει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση των ήδη υπάρχουσών αιχμών της καμπύλης ζήτησης τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή ημέρα.

Το σενάριο φόρτισης, το οποίο προκαλεί αμφιλεγόμενα αποτελέσματα, είναι αυτό της ελεγχόμενης φόρτισης διζωνικού τιμολογίου. Η φόρτιση των οχημάτων σύμφωνα με αυτό το σενάριο έχει ως άμεσο στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους της ενέργειας, με την οποία φορτίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα. Οδηγεί επομένως στη μαζική σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τις ώρες της ημέρας με το χαμηλότερο κόστος ενέργειας. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να μην έχουμε ενίσχυση της αιχμής της καμπύλης ζήτησης, αλλά τη δημιουργία νέας αιχμής φόρτισης. Αυτή η νέα αιχμή μπορεί ακόμη και να ξεπερνά την προηγούμενη αιχμή του φορτίου, ανάλογα με την ποσότητα της ισχύος, που ζητείται από τα ηλεκτρικά οχήματα. Καταλήγουμε στο ότι αυτό το σενάριο φόρτισης μπορεί να επιφέρει μετρήσιμα από το μοντέλο αρνητικά αποτελέσματα, όταν η φόρτιση των οχημάτων δημιουργεί μία αιχμή

μεγαλύτερη από την αρχική. Σε περίπτωση κατά την οποία η αιχμή που δημιουργείται δεν ξεπερνά την αρχική τότε το μοντέλο γήρανσης του μετασχηματιστή δεν μας βοηθά στην αξιολόγηση του σεναρίου, αφού λαμβάνει υπόψη μόνο τη μέγιστη θερμοκρασία hot-spot, η οποία προκύπτει από το μέγιστο φορτίο της ημέρας. Τότε είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα αποτελέσματα του θερμικού μοντέλου του μετασχηματιστή, από τα οποία διαπιστώνουμε ότι στο εσωτερικό του μετασχηματιστή η θερμοκρασία top-oil και hot-spot παρουσιάζουν έντονη και απότομη αύξηση κατά τη σύνδεση των οχημάτων.

Το σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης ελαχιστοποίησης κόστους και ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος είναι αυτό με τα καλύτερα αποτελέσματα για τους μετασχηματιστές του ΔΔ. Τα οχήματα συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να φορτίζονται κατά τη διάρκεια, που το φορτίο ζήτησης λαμβάνει ελάχιστες τιμές. Το κόστος της ενέργειας αυτές τις ώρες είναι χαμηλό. Το σενάριο αυτό δεν δημιουργεί νέες αιχμές. Αντιθέτως εξισορροπεί το φορτίο ζήτησης. Το μοντέλο γήρανσης της μόνωσης παρουσιάζει το σενάριο αυτό σαν να μην έχει καμία επίδραση στους μετασχηματιστές. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι δεν επιδρά καθόλου στις μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Σίγουρα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας hot-spot κατά τη διάρκεια των ωρών, που αυτή ήταν αρχικά χαμηλή, αλλά η αύξηση αυτή δεν επιδρά έντονα στη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Επίσης, τα παραπάνω σενάρια φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων εφαρμόστηκαν και στο μετασχηματιστή 250 MVA, για τον οποίο δεν διαπιστώθηκε κάποια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα.