



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Εκπόνηση διπλωματικής εργασίας με θέμα:

«Διερεύνηση θεμάτων κάλυψης ενεργειακών αναγκών σε άεργο ισχύ (θεμελιώδους και ανωτέρων αρμονικών) από το κύκλωμα διέγερσης ηλεκτρογεννητριών και τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης τους»

Ονοματεπώνυμο σπουδαστή: Ζερβός Αλέξιος – Μιχαήλ

Επιβλέπων καθηγητής: Προυσαλίδης Ιωάννης

Αθήνα, Ιούνιος 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 ^ο : Η έννοια της ισχύος.....	1
Περίληψη του κεφαλαίου.....	1
1.1. Στιγμαία Ισχύς.....	1
1.2. Ενεργός ή Μέση ή Πραγματική Ισχύς.....	3
1.3. Άεργος ή Φανταστική Ισχύς.....	5
1.4. Μιγαδική και Φαινόμενη Ισχύς.....	7
1.5. Συντελεστής Ισχύος.....	9
Κεφάλαιο 2 ^ο : Η έννοια της αρμονικής ισχύος.....	14
Περίληψη του κεφαλαίου.....	14
2.1. Εισαγωγή.....	14
2.2. Αρμονική παραμόρφωση.....	15
2.3. Μονοφασικά συστήματα.....	18
2.3.1. Ημιτονοειδή.....	18
2.3.2. Μη ημιτονοειδή.....	18
2.3.2.1. Δείκτης συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD).....	19
2.3.2.2. Ενεργός ισχύς.....	20
2.3.2.3. Φαινόμενη ισχύς.....	20
2.3.2.4. Άεργος ισχύς.....	22
2.3.2.5. Μη ενεργός ισχύς.....	23
2.3.2.6. Συντελεστής ισχύος.....	23
2.4. Τριφασικά συστήματα.....	24

2.4.1. Ημιτονοειδή και συμμετρικά.....	27
2.4.1.1. Ενεργός ισχύς.....	27
2.4.1.2. Άεργος ισχύς.....	28
2.4.1.3. Φαινόμενη ισχύς.....	28
2.4.1.4. Συντελεστής ισχύος.....	28
2.4.2. Ημιτονοειδή και ασύμμετρα.....	28
2.4.2.1. Ενεργός ισχύς.....	29
2.4.2.2. Άεργος ισχύς.....	30
2.4.2.3. Φαινόμενη ισχύς.....	31
2.4.2.4. Συντελεστής ισχύος.....	34
2.4.3. Μη ημιτονοειδή και ασύμμετρα.....	34
Κεφάλαιο 3 ^ο : Η έννοια της διεγέρτριας και του ρυθμιστή τάσης.....	38
Περίληψη του κεφαλαίου.....	38
3.1. Εισαγωγή.....	38
3.2. Το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.....	43
3.2.1. Μέθοδοι διέγερσης.....	43
3.2.2. Αυτόματη ρύθμιση της τάσης.....	48
3.2.3. Δομικό διάγραμμα συστήματος διέγερσης σύγχρονης μηχανής.....	52
3.2.4. Μοντελοποίηση διάταξης μέτρησης τάσης και αντισταθμιστή φορτίου σύγχρονης γεννήτριας.....	55
3.3. Μοντελοποίηση συστημάτων διέγερσης τύπου AC.....	59
3.3.1. Βασικά στοιχεία αναφορικά με τη μοντελοποίηση συστημάτων διέγερσης (τύπου AC).....	60

3.3.1.1. Το σύστημα ανά μονάδα.....	60
3.3.1.2. Κορεσμός της διεγέρτριας και επίδραση του φορτίου.....	61
3.3.1.3. Μοντέλο διεγέρτριας τύπου AC (χωρίς την ανορθωτική διάταξη).....	64
3.3.1.4. Ρύθμιση ανορθωτή.....	65
3.3.1.5. Αναπαράσταση των οριακών τιμών ενός συστήματος διέγερσης στο δομικό διάγραμμα του μοντέλου του.....	68
3.3.1.6. Συναρτήσεις πύλης.....	71
3.3.1.7. Ενισχυτής μοντέλου αυτόματου ρυθμιστή τάσης.....	72
3.3.2. Παρουσίαση των μοντέλων των συστημάτων διέγερσης τύπου AC κατά το πρότυπο του IEEE Std 421.5 (2005).....	72
3.3.2.1. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC1A.....	73
3.3.2.2. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC2A.....	74
3.3.2.3. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC3A.....	76
3.3.2.4. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC4A.....	77
3.3.2.5. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC5A.....	78
3.3.2.6. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC6A.....	79
3.3.2.7. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC7B.....	79

3.3.2.8. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC8B.....	80
3.3.3. Ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων των μοντέλων των συστημάτων διέγερσης τύπου AC.....	81
3.3.3.1. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC1A.....	82
3.3.3.2. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC2A.....	83
3.3.3.3. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC3A.....	84
3.3.3.4. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC4A.....	85
3.3.3.5. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC5A.....	86
3.3.3.6. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC6A.....	86
3.3.3.7. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC7B.....	88
3.3.3.8. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC8B.....	89
Κεφάλαιο 4 ^ο : Τρόποι λειτουργίας του AVR.....	91
Περίληψη του κεφαλαίου.....	91
4.1. Εισαγωγή.....	91
4.2. Δυνατότητες ρύθμισης με χρήση του AVR.....	92
4.2.1. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας.....	92
4.2.1.1. Μαθηματική έκφραση $V - Q$ και στατισμός ρυθμιστή τάσης (voltage droop).....	92

4.2.1.2. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας κατά τον συγχρονισμό της με το δίκτυο.....	96
4.2.1.3. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας παραλληλισμένης με το ηλεκτρικό δίκτυο.....	98
4.2.1.4. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας παραλληλισμένης με άλλες σύγχρονες γεννήτριες.....	101
4.2.2. Ρύθμιση συντελεστή ισχύος / αέργου ισχύος σύγχρονης γεννήτριας.....	104
4.2.3. Ρύθμιση ρεύματος διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας.....	110
Κεφάλαιο 5 ^ο : Προβληματική λειτουργία και βλάβες του AVR.....	112
Περίληψη του κεφαλαίου.....	112
5.1. Εισαγωγή.....	112
5.2. Βασικές αιτίες της προβληματικής λειτουργίας και των βλαβών του AVR.....	113
5.3. Συνήθη ηλεκτρικά σφάλματα κατά τη λειτουργία του AVR.....	115
Κεφάλαιο 6 ^ο : Ανακεφαλαίωση και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	119
Παράρτημα I: Προσομοίωση συστημάτων διέγερσης με χρήση Matlab [®]	123
Παράρτημα II: Βιβλιογραφία.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Περίληψη του κεφαλαίου

Προκειμένου ο αναγνώστης να μπορέσει να παρακολουθήσει τα επόμενα κεφάλαια, τα οποία πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι απαραίτητο να αποσαφηνιστούν αρχικά κάποιες έννοιες που αφορούν το μέγεθος της *ηλεκτρικής ισχύος*.

Συγκεκριμένα, στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι έννοιες που αφορούν τη *στιγμιαία*, την *ενεργό*, την *άεργο* και τη *φαινόμενη ισχύ*, καθώς και τον *συντελεστή ισχύος*.

1.1. Στιγμιαία Ισχύς

Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, η στιγμιαία ισχύς (instantaneous power) που απορροφάται από τη σύνθετη αντίσταση ενός κλάδου του κυκλώματος τη χρονική στιγμή t , δίνεται, στο πεδίο του χρόνου, από τη σχέση:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (1.1)$$

όπου

$p(t)$: η στιγμιαία τιμή της ισχύος σε Watt [W]

$v(t)$: η στιγμιαία τιμή της τάσης στα άκρα του κλάδου σε Volt [V]

$i(t)$: η στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον κλάδο σε Ampere [A]

Με βάση τον παραπάνω ορισμό και το θεώρημα μέσης τιμής του ολοκληρωτικού λογισμού, η μέση τιμή της ισχύος (average power) P σε χρονικό διάστημα μίας περιόδου T προκύπτει ως:

$$P = \frac{\int_T p(t) dt}{T} = \frac{\int_T v(t) \cdot i(t) dt}{T} \quad (1.2)$$

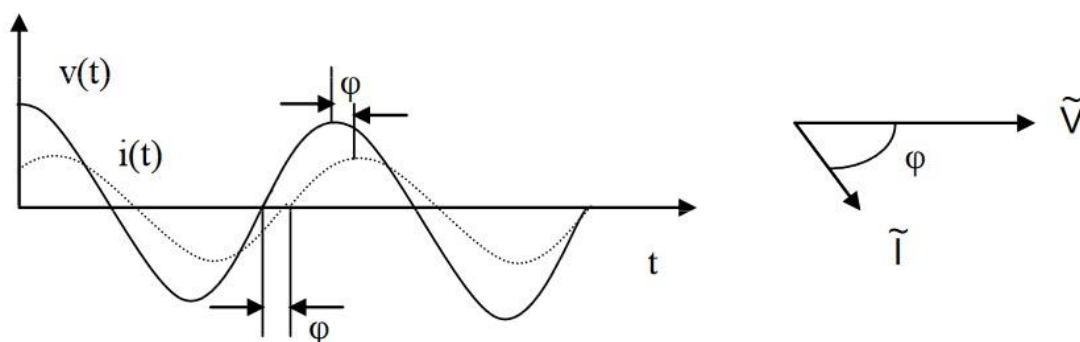
Στην ειδικότερη περίπτωση που το δίκτυο λειτουργεί σε συνθήκες **Ημιτονικής Μόνιμης Κατάστασης** (ΗΜΚ), δηλαδή όλο το δίκτυο είναι γραμμικό και οι πηγές τάσης και έντασης (συνεπώς και οι αναπτυσσόμενες τάσεις και τα αναπτυσσόμενα ρεύματα στα διάφορα στοιχεία του δικτύου) είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου t , μίας συγκεκριμένης και σταθερής συχνότητας ω (Προυσαλίδης, 2014), τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι:

$$v(t) = V\sqrt{2} \cos(\omega t) \quad \text{ή} \quad \tilde{V} = V\angle 0 \quad (1.3)$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{ή} \quad \tilde{I} = I\angle -\varphi \quad (1.4)$$

Για τις παραπάνω σχέσεις, σημειώνονται:

- i) Τα μεγέθη V , I εκφράζουν την ενεργό τιμή (Root Mean Square ή RMS value) της τάσης και της έντασης του ρεύματος αντίστοιχα.
- ii) Τα μεγέθη \tilde{V} , \tilde{I} εκφράζουν τον στρεφόμενο μιγάδα (phasor) της τάσης και της έντασης του ρεύματος αντίστοιχα, δηλαδή την αναπαράσταση των μεγεθών αυτών στο πεδίο της συχνότητας (μιγαδικό επίπεδο).
- iii) Το μέγεθος φ καλείται γωνία ή όρισμα ή φασική απόκλιση του \tilde{I} ως προς το μέγεθος αναφοράς, εν προκειμένω το διάνυσμα της τάσης \tilde{V} .



Σχήμα 1.1.: Αναπαράσταση της γωνίας φ στο πεδίο του χρόνου (αριστερά) και στο πεδίο συχνοτήτων (δεξιά) (πηγή: Προυσαλίδης, 2014, σελ. 107)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1., η γωνία φ αντιστοιχεί στη χρονική διαφορά μεταξύ ενός σημείου μηδενισμού της τάσης και του αντίστοιχου σημείου μηδενισμού του ρεύματος ή στη χρονική διαφορά μεταξύ δύο στιγμών όπου τα μεγέθη τάσης και έντασης λαμβάνουν τις μέγιστες ή τις ελάχιστες τιμές τους. Παράλληλα, όμως, στο πεδίο της συχνότητας, η γωνία φ δείχνει την καθυστέρηση ή επιπορεία (lagging) (ή σε άλλη

περίπτωση την προπορεία (leading)) του phasor του ρεύματος σε σχέση με το phasor της τάσης.

Αντικαθιστώντας στην έκφραση της στιγμιαίας ισχύος και εφαρμόζοντας μία σειρά από τριγωνομετρικές ιδιότητες, προκύπτει:

$$p(t) = VI \cos\phi(1 + \cos(2\omega t)) + VI \sin\phi \sin(2\omega t) \quad (1.5)$$

Η παραπάνω έκφραση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς εισάγει κάποιες θεμελιώδεις έννοιες για την ηλεκτρική ισχύ, όπως είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς, οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου.

1.2. Ενεργός ή Μέση ή Πραγματική Ισχύς

Όπως αποδείχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η έκφραση για τη στιγμιαία ισχύ στο πεδίο του χρόνου για συνθήκες ΗΜΚ είναι:

$$p(t) = VI \cos\phi(1 + \cos(2\omega t)) + VI \sin\phi \sin(2\omega t)$$

Ένα σημαντικό πόρισμα της παραπάνω έκφρασης για τη στιγμιαία ισχύ, είναι ότι εάν η τάση και η ένταση είναι ημιτονοειδή μεγέθη κυκλικής συχνότητας ω , τότε η αντίστοιχη στιγμιαία ισχύς που προκύπτει από το γινόμενο τους αποτελείται από δύο χρονικά μεταβαλλόμενους όρους που εμπεριέχουν την κυκλική συχνότητα 2ω και έναν σταθερό όρο $VI \cos\phi$.

Ο σταθερός αυτός όρος καλείται μέση ή ενεργός ή πραγματική ισχύς (true or active or real power) σε ΗΜΚ (Προυσαλίδης, 2014) και συμβολίζεται ως:

$$P = VI \cos\phi \quad (1.6)$$

Η ενεργός ισχύς αντιστοιχεί, επί της ουσίας, στην ωφέλιμη ισχύ, δηλαδή στο ποσοστό της συνολικής ισχύος που παράγεται από τις πηγές τάσης και έντασης του δικτύου (π.χ. ηλεκτρικές γεννήτριες) και καταναλίσκεται από τους λεγόμενους «καταναλωτές» ή «φορτία» του δικτύου (π.χ. επαγωγικοί κινητήρες, μετασχηματιστές, κλπ.), προκειμένου να παραχθεί έργο. Η μονάδα μέτρησης της ενεργού ισχύος είναι τα Watt [W], ενώ συχνά χρησιμοποιούνται τα πολλαπλάσια (kW, MW) ή υποπολλαπλάσιά της (mW).

Η ισχύς αυτή καταναλίσκεται σε αμιγώς **ωμικά** φορτία (resistance), όπως είναι για παράδειγμα ο φωτισμός, η θέρμανση, κλπ. Στην περίπτωση αυτή, ισχύει $\cos\varphi=1$, δηλαδή η τάση στα άκρα της αντίστασης και το ρεύμα που τη διαρρέει λέγεται ότι βρίσκονται σε φάση ($\varphi=0$) και η ενεργός ισχύς ισούται με:

$$P = VI = I^2R \quad (1.7)$$

Αντιθέτως, στις επαγωγικές ή χωρητικές αντιστάσεις (reactance), **δεν** καταναλίσκεται ενεργός ισχύς (εφόσον αυτές θεωρηθούν ιδανικές), δηλαδή ισχύει:

$$P = 0 \quad (1.8)$$

Τέτοια φορτία συναντώνται σε διατάξεις που περιέχουν πηνία ή πυκνωτές και αναλύονται περαιτέρω στην επόμενη παράγραφο, όπου περιγράφεται η έννοια της αέργου ισχύος.

Τέλος, στην περίπτωση της σύνθετης αντίστασης (impedance), πρέπει να συνυπολογιστεί η επίδραση της διαφοράς φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος και η ενεργός ισχύς προκύπτει από την εξίσωση (1.6).

Για τριφασικό δίκτυο, η ενεργός ισχύς ισούται με:

$$P = 3V_{\varphi}I_{\varphi}\cos\varphi = \sqrt{3}V_{\pi}I_{\gamma}\cos\varphi \quad (1.9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση οι δείκτες π , φ , γ δηλώνουν πολική, φασική και γραμμής αντίστοιχα. Η γωνία φ αντιστοιχεί στη γωνιακή απόκλιση μεταξύ της τάσης που επικρατεί στα άκρα ενός μονοφασικού καταναλωτή και της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον ίδιο καταναλωτή. Σημειώνεται ότι η (1.9) ισχύει είτε σε συνδεσμολογία αστέρα είτε σε συνδεσμολογία τριγώνου, υπό την προϋπόθεση ότι τα φορτία ισομοιράζονται μεταξύ των τριών φάσεων (Προυσαλίδης, 2019).

Στη γενικότερη περίπτωση που δεν ισχύουν οι συνθήκες ΗΜΚ, η μέση ισχύς προκύπτει από τον ορισμό που δόθηκε στην εξίσωση (1.2).

1.3. Άεργος ή Φανταστική Ισχύς

Κατ' αντιστοιχία με την ενεργό ισχύ, ορίζεται η άεργος ισχύς (reactive power) ως ακολούθως (Προυσαλίδης, 2014):

$$Q = VI\sin\varphi \quad (1.10)$$

Σαν συνάρτηση του χρόνου, η άεργος ισχύς γράφεται:

$$q(t) = VI\sin\varphi\sin(2\omega t) \quad (1.11)$$

Από την (1.11) είναι σαφές ότι η άεργος ισχύς είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου με συχνότητα διπλάσια από εκείνη της τάσης και της έντασης. Επίσης, αποδεικνύεται εύκολα ότι η μέση τιμή της ισούται με μηδέν.

Μονάδα μέτρησης της αέργου ισχύος είναι το το VAr (VoltAmpere reactive), ενώ σε συνήθεις εφαρμογές χρησιμοποιούνται τα πολλαπλάσια του (kVAr, MVAr) ή τα υποπολλαπλάσια του (mVAr).

Σε αντίθεση με την ενεργό ισχύ, η άεργος ισχύς είναι μηδενική στα ωμικά φορτία ($\sin\varphi=0$), ενώ λαμβάνει τη μέγιστη (απόλυτη) τιμή της στα αμιγώς επαγωγικά ή χωρητικά φορτία.

Αυτό εξηγείται μαθηματικά, από το γεγονός ότι στα μεν επαγωγικά φορτία (πηνία, επαγωγικοί κινητήρες κοκ) το ρεύμα επιπορεύεται (καθυστερεί) της τάσης κατά 90° , στα δε χωρητικά φορτία (πυκνωτές) προπορεύεται κατά 90° , επομένως στη σχέση (1.10) το $\sin\varphi$ λαμβάνει τη μέγιστη κατ' απόλυτο τιμή του.

Στα πηνία η άεργος ισχύς λαμβάνει θετικό πρόσημο, διότι στα επαγωγικά στοιχεία καταναλίσκεται άεργος ισχύς, ενώ στους πυκνωτές το πρόσημό της είναι αρνητικό, επειδή τα χωρητικά στοιχεία παράγουν την άεργο ισχύ (Προυσαλίδης, 2014).

Για να γίνει κατανοητή η έννοια της αέργου ισχύος, εξετάζεται το παράδειγμα ενός από τα πιο συνήθη φορτία ενός ηλεκτρικού δικτύου: ο επαγωγικός κινητήρας. Για να αποδώσει ένας τέτοιος κινητήρας το έργο που απαιτείται με τη μορφή μηχανικής περιστροφικής ή γραμμικής κίνησης, απαιτούνται μεγάλες διατάξεις πηνίων. Από τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας από το δίκτυο, ένα μέρος της αποθηκεύεται ως ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού

πεδίου στα τυλίγματα των πηνίων. Η ενέργεια αυτή περιγράφεται από τη σχέση:

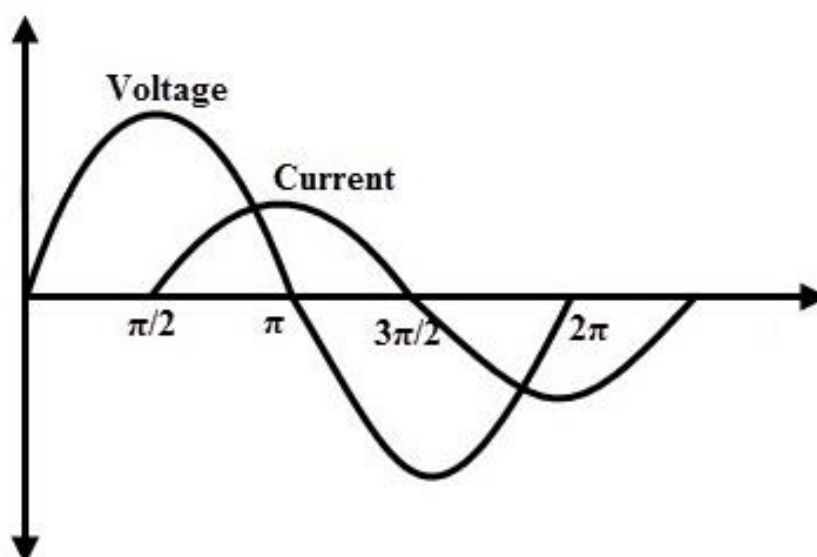
$$E = 1/2LI^2 \quad (1.12)$$

όπου

L : ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου

I : η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο

Εφόσον το δίκτυο λειτουργεί με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), η τάση και η ένταση στο πηνίο μεταβάλλονται με το χρόνο σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2.: Κυματομορφές τάσης και έντασης πηνίου (πηγή: electronicshub.org)

Σύμφωνα με τη σχέση (1.12) και το σχήμα 1.2., στα διαστήματα $[0, T/4]$ και $[T/2, 3T/4]$ το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια στο ηλεκτρομαγνητικό του πεδίο (αύξηση του παράγοντα I^2), ενώ στα διαστήματα $[T/4, T/2]$ και $[3T/4, T]$ την αποδίδει πίσω στο δίκτυο με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι, επομένως, προφανές, ότι μετά το πέρας μίας περιόδου λειτουργίας αυτή η ροή ενέργειας εντός του ηλεκτρικού δικτύου **δεν παράγει κάποιο ωφέλιμο έργο**, είτε με τη μορφή θερμότητας είτε με τη μορφή μηχανικής κίνησης, αλλά απλώς εναλλάσσεται μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του πηνίου και του ηλεκτρικού κυκλώματος. Αυτή ακριβώς είναι και η έννοια της αέργου ισχύος.

Παρόμοια συμπεριφορά με τα πηνία έχουν και οι πυκνωτές σε ένα κύκλωμα, μόνο που στην περίπτωση των χωρητικών στοιχείων η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται ως ενέργεια ηλεκτροστατικού πεδίου. Στην πράξη, σπάνια συναντάται χωρητική φόρτιση, γι' αυτό και δεν αναλύεται περαιτέρω στο σημείο αυτό.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, γίνεται κατανοητό ότι το ισοζύγιο της αέργου ισχύος παραμένει εντός του ηλεκτρικού δικτύου (όση ποσότητα παράγεται από το δίκτυο καταναλίσκεται εξ ολοκλήρου εντός αυτού) και κυκλοφορεί στο δίκτυο πρωτίστως για την κάλυψη των αναγκών παραγωγής κίνησης (ηλεκτρικοί κινητήρες).

Προβλήματα που σχετίζονται με την παρουσία της αέργου ισχύος στο δίκτυο θα αναφερθούν στη συνέχεια, καθώς είναι χρήσιμο πρώτα να έχει εισαχθεί η έννοια του συντελεστή ισχύος.

1.4. Μιγαδική και Φαινόμενη Ισχύς

Έστω ότι:

$$\tilde{V} = V\angle 0 = V(\cos 0 + j \cdot \sin 0) = V \quad (1.13)$$

$$\tilde{I} = I\angle -\varphi = I(\cos \varphi - j \cdot \sin \varphi) \quad (1.14)$$

Ο συζυγής μιγαδικός του \tilde{I} συμβολίζεται με \tilde{I}^* και σύμφωνα με τη σχέση (1.14) είναι ίσος με:

$$\tilde{I}^* = I(\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) \quad (1.15)$$

Ορίζεται η μιγαδική ποσότητα (Προυσαλίδης, 2014):

$$\tilde{S} = \tilde{V} \cdot \tilde{I}^* = VI(\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) = P + jQ \quad (1.16)$$

Το μέγεθος \tilde{S} καλείται μιγαδική ισχύς (complex power) και όπως φαίνεται από τον ορισμό της περιέχει όλη την πληροφορία για την ισχύ ενός φορτίου, καθώς το πραγματικό της μέρος αποτελείται από την ενεργό ισχύ P και το φανταστικό της μέρος από την άεργο ισχύ Q .

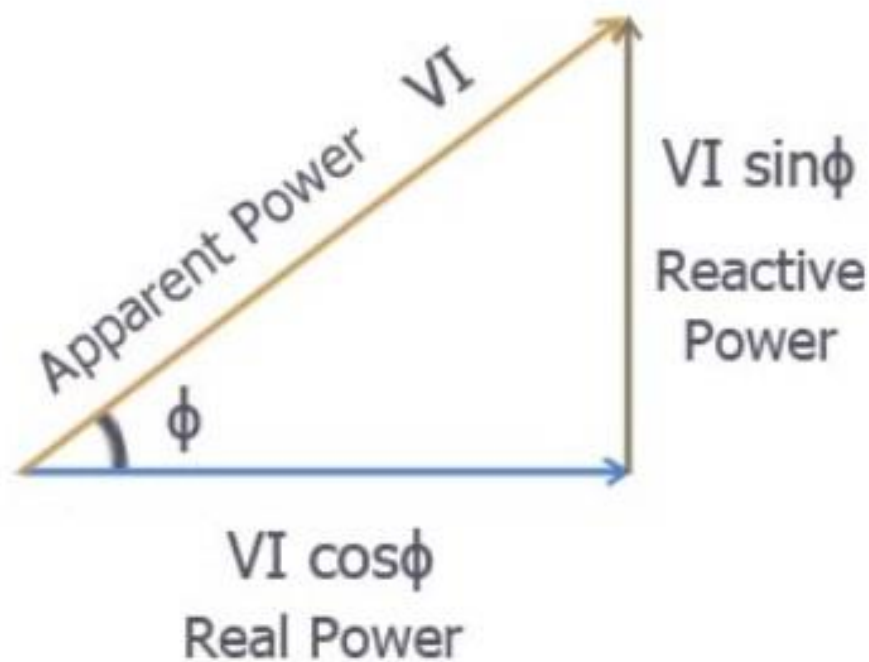
Η μιγαδική ισχύς είναι και αυτή ένας στρεφόμενος μιγάδας (phasor), ο οποίος περιστρέφεται στο μιγαδικό επίπεδο με συχνότητα 2ω .

Το μέτρο της μιγαδικής ισχύος ονομάζεται φαινόμενη ισχύς (apparent power) (Προυσαλίδης, 2014):

$$|\tilde{S}| = S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.17)$$

Η φαινόμενη ισχύς έχει μονάδα μέτρησης το VA (VoltAmpere). Συνήθη χρησιμοποιούμενα πολλαπλάσια του είναι το kVA και το MVA, ενώ υποπολλαπλάσια του το mVA.

Τα παραπάνω συνοψίζονται στο ακόλουθο διανυσματικό διάγραμμα, που ονομάζεται **τρίγωνο ισχύος**:



Σχήμα 1.3.: Τρίγωνο ισχύος (πηγή: electricaleasy.com)

Όταν ένα φορτίο έχει και ωμική και επαγωγική/χωρητική συνιστώσα, η κυματομορφή του ρεύματος μπορεί επίσης να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες:

- μία συνιστώσα που βρίσκεται σε φάση με την κυματομορφή της τάσης, που σχετίζεται με την ωμική αντίσταση και υπεισέρχεται στον υπολογισμό της ενεργού ισχύος
- μία δεύτερη συνιστώσα με γωνιακή απόκλιση $\pm 90^\circ$ σε σχέση με την τάση, που σχετίζεται με την επαγωγική/χωρητική αντίσταση και συνεπώς με το μέγεθος της αέργου ισχύος.

Η γωνία ϕ τότε θα έχει τιμή ανάμεσα σε 0° και $\pm 90^\circ$ (το πρόσημο καθορίζεται ανάλογα με τη φύση του φορτίου).

Η φαινόμενη ισχύς έρχεται για να εκφράσει ουσιαστικά την ισχύ της συνισταμένης του ρεύματος (γωνία φ σε σχέση με την τάση), όπως φαίνεται κι από το σχήμα 1.3.

1.5. Συντελεστής Ισχύος

Σε οποιαδήποτε ηλεκτρολογική εγκατάσταση χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα, αμέσως τίθεται το ζήτημα του συντελεστή ισχύος (power factor – pf). Ο συντελεστής ισχύος ορίζεται ως ο λόγος της ενεργού προς την φαινόμενη ισχύ (Προυσαλίδης, 2014), δηλαδή:

$$pf = \frac{P}{S} \quad (1.18)$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι εξ ορισμού αδιάστατο μέγεθος, ωστόσο μπορεί να ορισθεί ως μονάδα μέτρησης του το W/VA.

Ο ορισμός που δίνεται στην εξίσωση (1.18) αφορά την πλέον γενική περίπτωση. Στην ειδικότερη περίπτωση που επικρατούν συνθήκες ΗΜΚ, ο συντελεστής ισχύος ισούται με το συνημίτονο της γωνίας φ (Προυσαλίδης, 2014), δηλαδή:

$$pf = \cos\varphi \quad (1.19)$$

Εύκολα γίνεται εμφανές, ότι επιπλέον θα ισχύει:

$$-1 \leq pf \leq 1 \quad (1.20)$$

Σημειώνεται, ότι η (1.20) ισχύει ανεξαρτήτως του εάν ισχύουν οι προϋποθέσεις ΗΜΚ ή όχι.

Στην ιδανική περίπτωση, θα ήταν επιθυμητό ο συντελεστής ισχύος να έχει πάντοτε τιμή ίση με τη μονάδα, δηλαδή όλα τα φορτία να συμπεριφέρονται όπως τα ωμικά, για τα οποία όπως έχει αναφερθεί και στις προηγούμενες παραγράφους ισχύει $\cos\varphi=1$ ($=pf$). Εάν ίσχυε κάτι τέτοιο, τότε σύμφωνα και με τον ορισμό (1.18) όλη η ηλεκτρική ισχύς που θα τροφοδοτούνταν προς το φορτίο από το δίκτυο, θα μεταφραζόταν σε ενεργό ισχύ, δηλαδή σε ωφέλιμη, άμεσα εκμεταλλεύσιμη ισχύ για τους καταναλωτές.

Στην πραγματικότητα, όμως, σε όλα τα φορτία που αποτελούνται και από επαγωγικά/χωρητικά μέρη, η παραπάνω απαίτηση είναι αδύνατον να ικανοποιηθεί, καθώς το ρεύμα βρίσκεται σε διαφορά φάσης με την τάση

και συνεπώς ο συντελεστής ισχύος θα είναι αναγκαστικά μικρότερος της μονάδας.

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις για τον συντελεστή ισχύος ενός υπο-δικτύου (Προυσαλίδης, 2014):

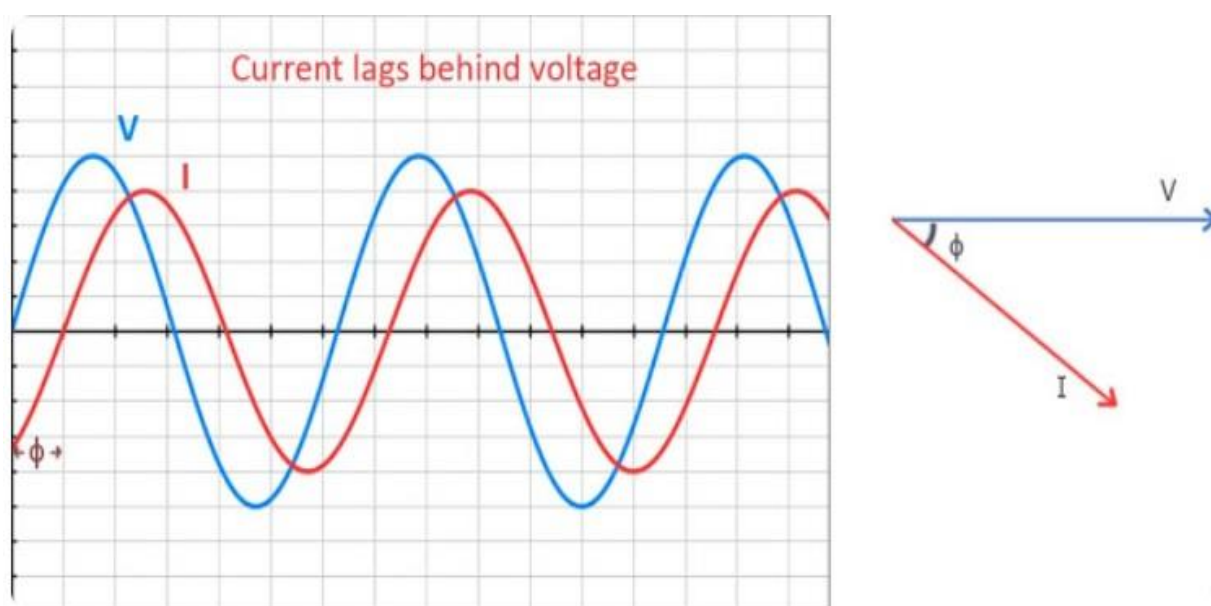
i) Εάν στο υπο-δίκτυο **καταναλίσκεται** άεργος ισχύς, τότε λέγεται ότι στο μέρος αυτό του δικτύου ο συντελεστής ισχύος είναι **επαγωγικός**.

ii) Εάν στο υπο-δίκτυο **παράγεται** άεργος ισχύς, τότε λέγεται ότι στο μέρος αυτό του δικτύου ο συντελεστής ισχύος είναι **χωρητικός**.

Για να είναι αποδοτική η λειτουργία ενός δικτύου, ο συντελεστής ισχύος πρέπει να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στη μονάδα και συγκεκριμένα να βρίσκεται εντός των ορίων:

$$0.8 \text{ χωρ.} \leq pf \leq 0.8 \text{ επαγ.} \quad (1.21)$$

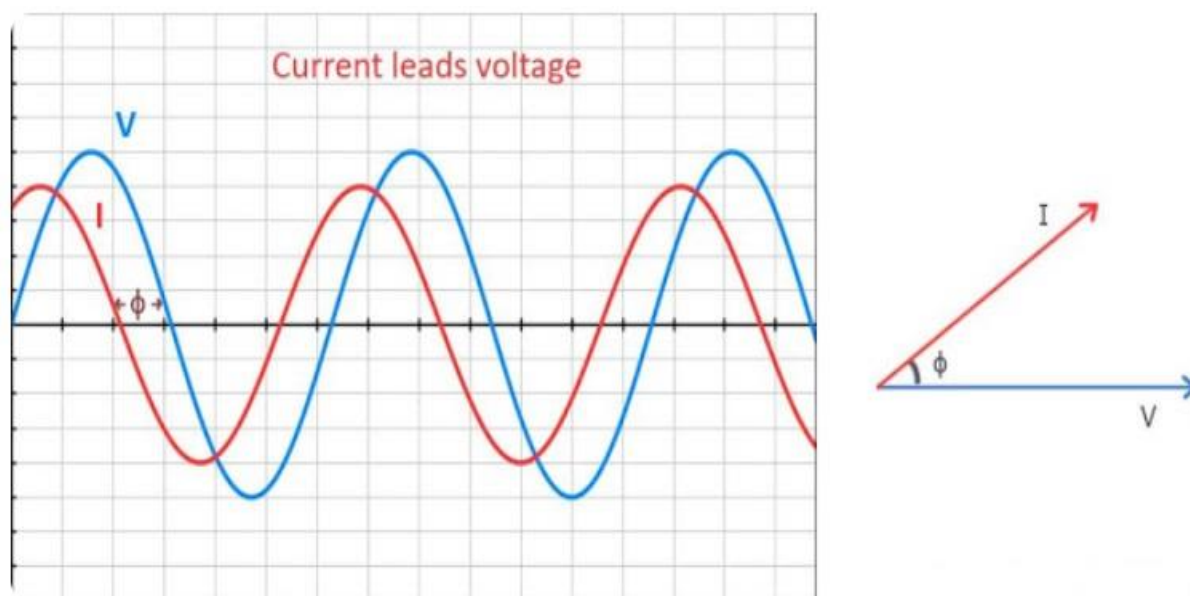
- **Επαγωγικός** συντελεστής ισχύος (lagging power factor):



Σχήμα 1.4.: Κυματομορφές και phasors τάσης και έντασης για επαγωγικό συντελεστή ισχύος (πηγή: electricaleasy.com)

- Το ρεύμα επιπορεύεται (καθυστερεί) της τάσης κατά γωνία ϕ .
- Παρατηρείται στην περίπτωση επαγωγικών φορτίων, όπως ηλεκτρικών κινητήρων, πηνίων κοκ.

- Χωρητικός συντελεστής ισχύος (leading power factor):



Σχήμα 1.5.: Κυματομορφές και phasors τάσης και έντασης για χωρητικό συντελεστή ισχύος (πηγή: electricaleasy.com)

- Το ρεύμα προπορεύεται (προηγείται) της τάσης κατά γωνία ϕ .
- Παρατηρείται στην περίπτωση χωρητικών φορτίων, δηλαδή όπου εμπεριέχονται διατάξεις πυκνωτών.

Όταν ο συντελεστής ισχύος είναι αρκετά μικρότερος από την μονάδα, εγείρεται μία σειρά προβλημάτων που σχετίζονται με το σημαντικό ποσοστό αέργου ισχύος που ρέει στο δίκτυο.

Τα σημαντικότερα από αυτά τα προβλήματα παρουσιάζονται με συντομία στη συνέχεια:

1) Αύξηση απαιτούμενου ρεύματος (φορτίου)

Για την ωφέλιμη ισχύ είναι γνωστό ότι:

$$P = VI \cos \phi \rightarrow I \sim 1/\cos \phi \quad (1.22)$$

Δηλαδή, το ρεύμα (φορτίο) είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον συντελεστή ισχύος. Αυτό συνεπάγεται ότι μειωμένος συντελεστής ισχύος οδηγεί σε αναγκαστική αύξηση της έντασης του ρεύματος, προκειμένου να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενεργού ισχύος, διατηρώντας την τάση

λειτουργίας σταθερή. Η σχέση (1.22) αποδεικνύεται και στην περίπτωση τριφασικού κυκλώματος.

2) Μειωμένη μεταφορά ενεργού ισχύος δια των αγωγών

Μικρός συντελεστής ισχύος μεταφράζεται ως αυξημένο ποσοστό αέργου ισχύος στο δίκτυο. Όμως, η ενεργός και η άεργος ισχύς μεταφέρονται δια μέσου των ίδιων αγωγών. Συνεπώς, η αύξηση της μεταφερόμενης αέργου ισχύος δρα εις βάρος της ενεργού ισχύος, η οποία αποτελεί και το ζητούμενο μέγεθος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς μόνο αυτή παράγει ωφέλιμο έργο. Οι συνθήκες αυτές συνιστούν μη αποδοτικές συνθήκες λειτουργίας.

3) Αύξηση θερμικών απωλειών από τους αγωγούς

Η αύξηση του ρεύματος που μεταφέρεται μέσω των αγωγών οδηγεί σε αυξημένες θερμικές απώλειες, μειώνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Οι αγωγοί δεν έχουν ιδανική συμπεριφορά, δηλαδή εμφανίζουν κι αυτοί σύνθετη αντίσταση και φορτίζονται θερμικά. Ενδεχόμενη υπερθέρμανση τους λόγω υψηλής έντασης ρεύματος μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε αστοχία τους.

4) Αυξημένη πτώση τάσης στα επαγωγικά φορτία

Όσον αφορά στην επαγωγική φόρτιση, η οποία είναι και η συνηθέστερη στην πράξη, όσο πιο επαγωγικό είναι το φορτίο (δηλαδή όσο μικρότερος είναι ο επαγωγικός συντελεστής ισχύος), τόσο πιο μεγάλη πτώση τάσης παρατηρείται στον εναλλακτήρα με αύξηση της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος (φορτίο). Για τον λόγο αυτό, τιμές του επαγωγικού συντελεστή ισχύος μικρότερες από 0.8 είναι ανεπιθύμητες (Προυσαλίδης, 2019).

Για να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία ενός δικτύου, ο συντελεστής ισχύος διορθώνεται χρησιμοποιώντας ειδικό εξοπλισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Περίληψη του κεφαλαίου

Έχοντας ορίσει τα βασικά μεγέθη που περιγράφουν τη ροή ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα υπό συνθήκες ΗΜΚ, μπορούν, πλέον, να εισαχθούν επιπλέον έννοιες σχετικές με την *αρμονική ισχύ*, όρο άμεσα συνυφασμένο με την *ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος* στα σύγχρονα δίκτυα.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται, συγκεκριμένα, οι έννοιες της *αρμονικής παραμόρφωσης*, της *θεμελιώδους* και της *αρμονικής ενεργού, άεργου και φαινόμενης ισχύος* και του *πραγματικού συντελεστή ισχύος*, τόσο για τα ισοδύναμα μονοφασικά όσο και για τα τριφασικά συστήματα.

2.1. Εισαγωγή

Οι ορισμοί που δόθηκαν στο 1^ο κεφάλαιο για την ενεργό, την άεργο και τη φαινόμενη ισχύ περιγράφουν με πολύ καλή ακρίβεια τη ροή ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, όταν οι κυματομορφές τάσης και έντασης είναι ημιτονοειδείς (ή πολύ κοντά στην ημιτονοειδή μορφή) (IEEE Std 1459, 2010).

Τις τελευταίες δεκαετίες, με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας και τον έντονο εξηλεκτρισμό του σύγχρονου τρόπου ζωής, εξαπλώνεται όλο και περισσότερο η χρήση συγκεκριμένων ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία συνιστούν **μη γραμμικά** φορτία (nonlinear loads), όπως είναι για παράδειγμα οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι ανορθωτές κ.ά. Τέτοιου είδους φορτία δημιουργούν μία σειρά προβλημάτων, που ονομάζονται παραμορφώσεις. Ως **παραμόρφωση** (distortion), ορίζεται οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί απόκλιση από την ιδανική ημιτονοειδή μορφή **μίας** συχνότητας των μεγεθών της τάσης και του ρεύματος (Προυσαλίδης, 2014).

Οι εξελίξεις αυτές επέβαλαν την εισαγωγή νέων ορισμών σχετικών με την ισχύ στα ηλεκτρικά κυκλώματα, ώστε να μπορέσει να περιγραφθεί

και να γίνει κατανοητή η ροή ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από μη ημιτονοειδείς συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, χρειάστηκε η κατασκευή νέων οργάνων μέτρησης για την ποσοτικοποίηση των διαταραχών αυτών, προκειμένου να γίνει εφικτή η εκτίμηση του οικονομικού κόστους που απαιτείται για τη διατήρηση της ποιότητας της ισχύος στα επιθυμητά επίπεδα (IEEE Std 1459, 2010).

Όπως είναι λογικό, η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στα πλοία δεν θα μπορούσε να μείνει ανεπηρέαστη, ιδιαίτερα με τον έντονο εξηλεκτρισμό που γνωρίζουν σήμερα λόγω των απαιτήσεων των διεθνών οργανισμών (IMO) για πιο οικολογικό τρόπο λειτουργίας και μείωση των εκπομπών ρύπων. Οι νέες ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα πλαίσια στη ναυσιπλοΐα, αποτελούν κατά κόρον μη γραμμικά φορτία που διαταράσσουν την ομαλή λειτουργία της ηλεκτρικής εγκατάστασης εντός του πλοίου.

Στη συνέχεια, μελετάται η έννοια των αρμονικών παραμορφώσεων και των επιδράσεων που αυτές έχουν στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος.

2.2. Αρμονική παραμόρφωση (harmonic distortion)

Όπως ορίστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε συνθήκες ΗΜΚ η τάση και το ρεύμα αποτελούν ημιτονοειδείς συναρτήσεις **μίας και μόνον** συχνότητας ω :

$$v(t) = V\sqrt{2} \cos(\omega t) \quad \text{ή} \quad \tilde{V} = V\angle 0 \quad (2.1)$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi) \quad \text{ή} \quad \tilde{I} = I\angle -\varphi \quad (2.2)$$

Επιπλέον, απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να εξασφαλίζονται οι συνθήκες ΗΜΚ, είναι όλα τα φορτία του δικτύου να είναι **γραμμικά**. Η ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων οδηγεί σε παραμορφωμένες κυματομορφές τάσης ή/και έντασης ρεύματος, δηλαδή οι μορφές τους δεν είναι αμιγώς ημιτονοειδείς. Μία παραμορφωμένη κυματομορφή, είναι δυνατόν να εκφραστεί με βάση την μαθηματική ανάλυση Fourier, ως σειρά δηλαδή ημιτονοειδών συναρτήσεων διαφορετικών συχνοτήτων, όπου κάθε συχνότητα αποτελεί ακέραιο πολλαπλάσιο μίας πρώτης βασικής συχνότητας, η οποία καλείται **θεμελιώδης συχνότητα** (fundamental frequency). Όλες οι υπόλοιπες συχνότητες αντιστοιχούν στις **ανώτερες αρμονικές** συνιστώσες (high-order harmonics), που είναι υπεύθυνες για

την παραμόρφωση της θεμελιώδους συνιστώσας. Η παραμορφωμένη κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος, εκφράζονται μαθηματικά, σύμφωνα με όσα ειπώθηκαν παραπάνω, από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \cos(\omega_n t + \theta_{v,n}) \quad (2.3)$$

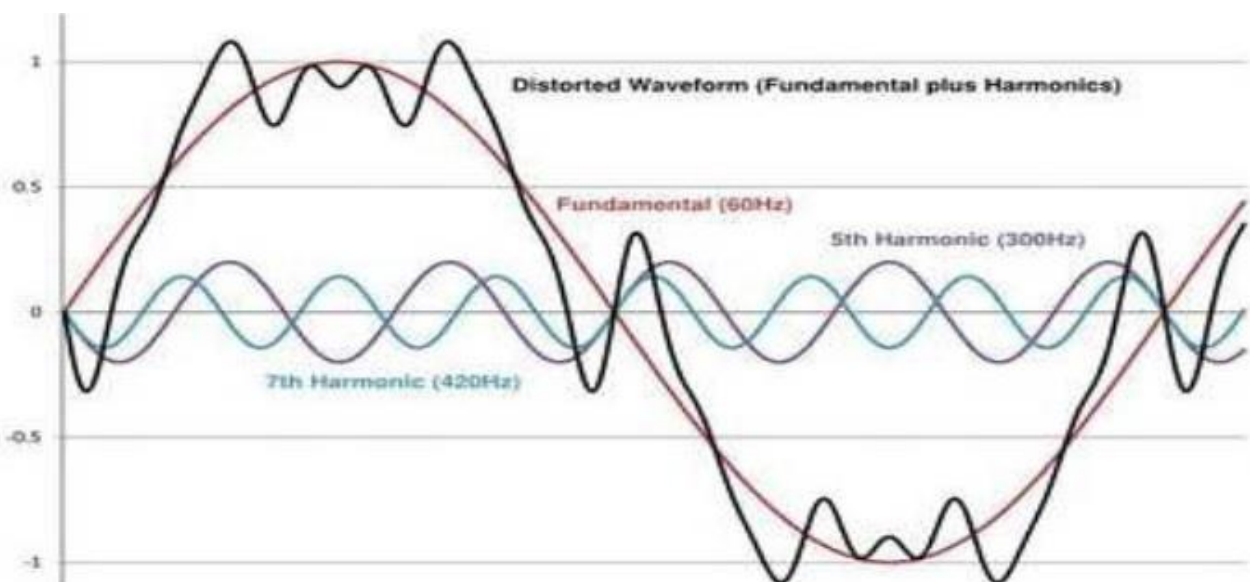
$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \cos(\omega_n t + \theta_{i,n}) \quad (2.4)$$

Προκειμένου να γίνει εμφανής η διάκριση μεταξύ θεμελιώδους και αρμονικών συνιστωσών, οι σχέσεις (2.3) και (2.4) μπορούν ισοδύναμα να γραφτούν ως:

$$v(t) = V_1 \sqrt{2} \cos(\omega_1 t + \theta_{v,1}) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{v,h}) \quad (2.5)$$

$$i(t) = I_1 \sqrt{2} \cos(\omega_1 t + \theta_{i,1}) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{i,h}) \quad (2.6)$$

Στο σχήμα 2.1. απεικονίζεται μία παραμορφωμένη κυματομορφή, ως υπέρθεση της θεμελιώδους συχνότητας (60 Hz) με την 5^η και 7^η αρμονική συχνότητα (300 Hz και 420 Hz αντίστοιχα). Παρατηρείται ότι, ενώ τα πλάτη των αρμονικών συνιστωσών είναι αρκετά μικρότερα από το αντίστοιχο της θεμελιώδους, η τελική κυματομορφή είναι έντονα παραμορφωμένη και έχει σχεδόν τετραγωνική μορφή:



Σχήμα 2.1.: Παραμορφωμένη κυματομορφή λόγω αρμονικών διαταραχών (πηγή: ElSebaay, 2017, σελ. 549)

Ως ιδανική κυματομορφή θεωρείται η ημιτονοειδής στη θεμελιώδη συχνότητα (Προυσαλίδης, 2014) και αυτό διότι οι ανώτερες αρμονικές συχνότητες προκαλούν μία σειρά από ανεπιθύμητες παρενέργειες στα συστήματα ηλεκτρονικής ισχύος, όπως (Manias, 2002):

i) Επιπλέον θέρμανση των επαγωγικών κινητήρων και των σύγχρονων γεννητριών, εξαιτίας της ύπαρξης ανωτέρων αρμονικών τάσης.

ii) Εξασθένιση της μονωτικής ικανότητας των καλωδίων, των τυλιγμάτων των πηνίων και των πυκνωτών, λόγω ανωτέρων αρμονικών τάσης μεγάλου πλάτους.

iii) Δυσλειτουργία διαφόρων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούν την κυματομορφή της τάσης για συγχρονισμό ή χρονομέτρηση.

iv) Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference – EMI), όταν τα τυλίγματα των ηλεκτροκινητήρων διαρρέονται από ρεύματα ανωτέρων αρμονικών.

v) Υπερθέρμανση των καλωδίων και των μετασχηματιστών, λόγω της ύπαρξης ανωτέρων αρμονικών ρεύματος.

vi) Αύξηση των θερμικών απωλειών από την κυκλοφορία ρευμάτων ανωτέρων αρμονικών.

vii) Υπερφορτίσεις των διακοπών και των ασφαλειών του συστήματος, με αποτέλεσμα ανεπιθύμητες διακοπές και αστοχίες.

viii) Αύξηση της πιθανότητας έγερσης φαινομένου συντονισμού, λόγω της πιθανής ταύτισης κάποιας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας με την ιδιοσυχνότητα κάποιου κυκλώματος.

Ένα ζήτημα που τίθεται, αμέσως, είναι το πώς μετρούνται ποσοτικά και ποιοτικά οι αρμονικές παραμορφώσεις. Για τον σκοπό αυτό έχουν καθιερωθεί από τους κανονισμούς διάφοροι δείκτες παραμόρφωσης, με πιο διαδεδομένο τον **δείκτη συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης** (Total Harmonic Distortion factor – THD), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού τιμής όλων των ανωτέρων αρμονικών συνιστωσών προς την ενεργό τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας (Προυσαλίδης, 2014):

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.8)$$

Με βάση τους ορισμούς και τις σχέσεις που εισήχθησαν σε αυτή την παράγραφο, μπορεί να μελετηθεί η επίδραση των ανωτέρων αρμονικών συνιστωσών τάσης και ρεύματος στην ηλεκτρική ισχύ των ισοδύναμων μονοφασικών και στη συνέχεια των τριφασικών κυκλωμάτων.

2.3. Μονοφασικά συστήματα (single phase systems)

2.3.1. Ημιτονοειδή (sinusoidal)

Τα μεγέθη και οι εξισώσεις που διέπουν αυτήν την περίπτωση λειτουργίας έχουν αναλυθεί εκτενώς στο 1^ο κεφάλαιο, όπου περιγράφεται, μεταξύ άλλων, η λειτουργία σε συνθήκες ΗΜΚ και στο οποίο μπορεί να ανατρέξει ο αναγνώστης για να αντλήσει πληροφορίες.

2.3.2. Μη ημιτονοειδή (nonsinusoidal)

Για λόγους συντομίας, οι σχέσεις (2.5) και (2.6) μπορούν να γραφτούν αντίστοιχα και στη μορφή:

$$v(t) = v_1(t) + v_H(t) \quad (2.9)$$

$$i(t) = i_1(t) + i_H(t) \quad (2.10)$$

όπου

$v_1(t) = V_1\sqrt{2} \cos(\omega_1 t + \theta_{v,1})$, $i_1(t) = I_1\sqrt{2} \cos(\omega_1 t + \theta_{i,1})$: οι θεμελιώδεις συνιστώσες των κυματομορφών τάσης και ρεύματος αντίστοιχα και

$v_H(t) = \sum_{h=2}^{\infty} V_h\sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{v,h})$, $i_H(t) = \sum_{h=2}^{\infty} I_h\sqrt{2} \cos(h\omega_1 t + \theta_{i,h})$: οι αρμονικές συνιστώσες των κυματομορφών τάσης και ρεύματος αντίστοιχα

Η ενεργός τιμή της τάσης $v(t)$ και της έντασης $i(t)$, δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{V_1^2 + V_H^2} \quad (2.11)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} \quad (2.12)$$

όπου

$V_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \sqrt{V_{RMS}^2 - V_1^2}$: η συνολική ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών $v_H(t)$ της τάσης

$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}$: η συνολική ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών $i_H(t)$ του ρεύματος

Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι:

- Σύμφωνα με τους κανονισμούς, στα μεγέθη V_H και I_H πρέπει να συνυπολογιστούν και οι όροι V_0 , I_0 , οι οποίοι αποτελούν όρους συνεχούς τάσης και ρεύματος αντίστοιχα, διότι είναι σύνηθες να υπάρχουν **ίχνη** συνεχούς ρεύματος (dc) στα συστήματα ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος (ac) (IEEE Std 1459, 2010). Ωστόσο, στην παρούσα ανάλυση γίνεται η απλοποιητική παραδοχή ότι οι όροι αυτοί είναι μηδενικοί.

- Οι παραμορφωμένες κυματομορφές, συχνά περιέχουν συνιστώσες συχνότητας που καλούνται **διαρμονικές** (interharmonics). Μία ομάδα διαρμονικών χαρακτηρίζεται από $h < 1$, δηλαδή από περίοδο μεγαλύτερη από την περίοδο T της θεμελιώδους συχνότητας (60/50 Hz) (IEEE Std 1459, 2010). Τέτοιες συνιστώσες δεν λαμβάνονται υπόψη στα πλαίσια της παρούσης ανάλυσης.

2.3.2.1. Δείκτης συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD)

Από τους ορισμούς (2.7) και (2.8) για τους δείκτες THD_V και THD_I αντίστοιχα, προκύπτει:

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V_{RMS}}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (2.13)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (2.14)$$

2.3.2.2. Ενεργός ισχύς (active power)

Η συνολική ενεργός ισχύς, σε ένα τέτοιο σύστημα, περιγράφεται από τη σχέση (IEEE Std 1459, 2010):

$$P_{\text{tot}} = P_1 + P_H \quad (2.15)$$

όπου

$P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_{v,1} - \theta_{i,1})$: η θεμελιώδης συνιστώσα της ενεργού ισχύος

$P_H = \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_{v,h} - \theta_{i,h})$: η συνολική αρμονική συνιστώσα της ενεργού ισχύος

Σχετικά με τα ανωτέρω, σημειώνονται (IEEE Std 1459, 2010):

i) Μονάδα μέτρησης των P_{tot} , P_1 και P_H παραμένει το Watt [W].

ii) Για ηλεκτρικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίοι συνιστούν τη συνηθέστερη μορφή φορτίου, η αρμονική ενεργός ισχύς δεν είναι ωφέλιμη ισχύς, καθώς δεν συμβάλλει στη θετική ακολουθία (positive sequence) της ροπής. Ως εκ τούτου, έχει μεγάλη σημασία να γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ της θεμελιώδους ενεργού ισχύος P_1 και της αρμονικής ενεργού ισχύος P_H .

iii) Η αρμονική ενεργός ισχύς συχνά αναφέρεται σε σχέση με τη θεμελιώδη συχνότητα, δηλαδή σε ένα σύστημα ισχύος 60 Hz μπορεί να αναφερθεί ως “non-60 Hz active power”.

2.3.2.3. Φαινόμενη ισχύς (apparent power)

Η συνολική φαινόμενη ισχύς, σύμφωνα και με τον ορισμό που δόθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, θα είναι:

$$S_{\text{tot}} = V_{RMS} I_{RMS} \quad (2.16)$$

Υψώνοντας και τα δύο μέλη της (2.16) στο τετράγωνο και αντικαθιστώντας τα μεγέθη V_{RMS} και I_{RMS} από τις εκφράσεις τους στις σχέσεις (2.11) και (2.12) αντίστοιχα, προκύπτει:

$$S_{\text{tot}}^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = [(V_1 I_1)^2] + [(V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2] \quad (2.17)$$

Η σχέση (2.17) μπορεί να γραφθεί και ως:

$$S_{\text{tot}} = \sqrt{S_1^2 + S_N^2} \quad (2.18)$$

όπου

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}: \text{ η θεμελιώδης φαινόμενη ισχύς}$$

$$S_N = \sqrt{(V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2}: \text{ η μη-θεμελιώδης φαινόμενη ισχύς}$$

Q_1 : η θεμελιώδης συνιστώσα της αέργου ισχύος (βλ. παράγραφο 2.3.2.4. παρακάτω)

Σημειώνεται, ότι τα μεγέθη φαινόμενης ισχύος S_{tot} , S_1 και S_N εξακολουθούν, κατά το 1^ο κεφάλαιο, να έχουν ως μονάδα μέτρησής τους το [VA].

Από την έκφραση της μη-θεμελιώδους φαινόμενης ισχύος S_N , οι όροι του υπόρριζου του δεξιού μέλους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (IEEE Std 1459, 2010):

i) Ισχύς λόγω παραμόρφωσης του ρεύματος (current distortion power):

$$D_I = V_1 I_H \quad (2.19)$$

και από τον ορισμό του THD_I (2.14), η D_I αναλύεται περαιτέρω:

$$D_I = V_1 I_1 THD_I = S_1 THD_I \quad (2.20)$$

ii) Ισχύς λόγω παραμόρφωσης της τάσης (voltage distortion power):

$$D_V = V_H I_1 \quad (2.21)$$

και από τον ορισμό του THD_V (2.13), η D_V αναλύεται περαιτέρω:

$$D_V = V_1 I_1 THD_V = S_1 THD_V \quad (2.22)$$

iii) Αρμονική φαινόμενη ισχύς (harmonic apparent power):

$$S_H = V_H I_H \quad (2.23)$$

και από τους ορισμούς των THD_V (2.13) και THD_I (2.14), η S_H αναλύεται περαιτέρω:

$$S_H = V_1 I_1 THD_V THD_I = S_1 THD_V THD_I \quad (2.24)$$

Επιπλέον, ορίζεται η αρμονική ισχύς παραμόρφωσης D_H (harmonic distortion power) ως εξής:

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (2.25)$$

που οδηγεί αντίστοιχα στην ακόλουθη εναλλακτική έκφραση για την S_H :

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (2.26)$$

Σχετικά με τα παραπάνω μεγέθη, σημειώνεται ότι (IEEE Std 1459, 2010):

- i) Τα μεγέθη ισχύος D_V , D_I και D_H έχουν μονάδες αέργου ισχύος [VAr], ενώ η ισχύς S_H μονάδες φαινόμενης ισχύος [VA].
- ii) Η ισχύς D_I αποτελεί συνήθως τον κυρίαρχο όρο της μη-θεμελιώδους φαινόμενης ισχύος S_N .
- iii) Στην πράξη, στα συστήματα ισχύος ισχύει $THD_V < THD_I$ και η S_N μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω έκφραση:

$$S_N \approx S_1 \sqrt{(THD_V)^2 + (THD_I)^2} \quad (2.27)$$

Όταν $THD_V \leq 5\%$, η (2.27) οδηγεί σε σφάλμα μικρότερο του 0.15%, για οποιαδήποτε τιμή του THD_I .

Επιπλέον, όταν $THD_V < 5\%$ και $THD_I > 40\%$, για τον υπολογισμό της S_N μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη έκφραση με σφάλμα μικρότερο του 1%:

$$S_N \approx S_1 THD_I \quad (2.28)$$

- iv) Σε συνήθειες μη ημιτονοειδείς συνθήκες ισχύει: $D_I > D_V > S_H > P_H$.

2.3.2.4. Άεργος ισχύς (reactive power)

Κατ' αντιστοιχία με την ενεργό ισχύ, η θεμελιώδης άεργος ισχύς περιγράφεται από την εξίσωση:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_{v,1} - \theta_{i,1}) \quad (2.29)$$

Η αρμονική άεργος ισχύς δεν ορίζεται άμεσα, καθώς συνιστώσες της περιλαμβάνονται και στις τρεις εκ των D_I , D_V και D_H .

2.3.2.5. Μη ενεργός ισχύς (nonactive power)

Στα μη ημιτονοειδή συστήματα ισχύος, υπεισέρχεται μία ακόμη έννοια ισχύος, η λεγόμενη μη ενεργός ισχύς, η οποία ορίζεται ως ακολούθως (IEEE Std 1459, 2010):

$$N = \sqrt{S_{\text{tot}}^2 - P_{\text{tot}}^2} \quad (2.30)$$

Η ισχύς αυτή έχει μονάδες αέργου ισχύος [VA_r] και περιλαμβάνει συγχρόνως τόσο θεμελιώδεις όσο και μη θεμελιώδεις συνιστώσες μη ενεργού ισχύος. Ωστόσο, η μη ενεργός ισχύς **δεν** θα πρέπει να συγχέεται με την άεργο ισχύ. Η ταύτισή τους ($N = Q_1 = Q$) είναι αποδεκτή **μόνον** όταν οι κυματομορφές είναι απολύτως ημιτονοειδείς.

2.3.2.6. Συντελεστής ισχύος (power factor)

Ο θεμελιώδης συντελεστής ισχύος ορίζεται, κατά τα γνωστά, ως ο λόγος της θεμελιώδους ενεργού και της θεμελιώδους φαινόμενης ισχύος:

$$pf_1 = P_1/S_1 = \cos(\theta_{v,1} - \theta_{i,1}) \quad (2.31)$$

Ο λόγος αυτός βοηθάει στην ξεχωριστή μελέτη και αξιολόγηση της ροής της θεμελιώδους ισχύος στο σύστημα.

Ο συνολικός συντελεστής ισχύος ισούται με τον λόγο της συνολικής ενεργού προς τη συνολική φαινόμενη ισχύ και λαμβάνοντας υπόψη, επιπλέον, τις σχέσεις (2.15) και (2.18) προκύπτει η ακόλουθη έκφρασή του:

$$pf_{\text{tot}} = \frac{P_{\text{tot}}}{S_{\text{tot}}} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{(P_1/S_1)[1 + (P_H/P_1)]}{\sqrt{1 + (S_N/S_1)^2}} \quad (2.32)$$

Εάν, επιπλέον, ληφθούν υπόψη οι εκφράσεις των D_I , D_V , S_H και η (2.31), τότε η (2.32) μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω:

$$pf_{\text{tot}} = \frac{[1 + (P_H/P_1)]pf_1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2 + (THD_V)^2 + (THD_V THD_I)^2}} \quad (2.33)$$

Σημειώνεται, ότι εάν $THD_V < 5\%$ και $THD_I > 40\%$, είναι βολικότερο να χρησιμοποιείται η παρακάτω εναλλακτική έκφραση για τον συνολικό συντελεστή ισχύος (με μικρό σφάλμα) (IEEE Std 1459, 2010):

$$pf_{\text{tot}} \approx \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} pf_1 \quad (2.34)$$

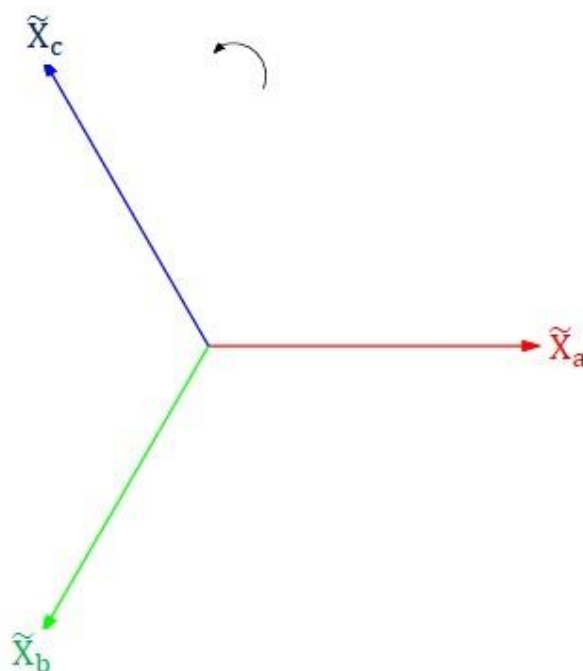
2.4. Τριφασικά συστήματα (three-phase systems)

Προτού γίνει η αντίστοιχη -με το μονοφασικό σύστημα- ανάλυση της ισχύος σε συνιστώσες, πρέπει για λόγους πληρότητας να αποσαφηνιστούν κάποιες έννοιες σχετικές με τα τριφασικά κυκλώματα.

Εξετάζεται το σύστημα τριών phasors ενός μεγέθους X (για παράδειγμα τάση, ρεύμα, ισχύς κλπ.). Οι δείκτες a , b και c αναφέρονται στις αντίστοιχες φάσεις του τριφασικού δικτύου. Το σύστημα καλείται **συμμετρικό** (balanced), όταν ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- 1) Τα τρία phasors έχουν το ίδιο μέτρο.
- 2) Τα τρία phasors έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους 120° .
- 3) Για αντιωρολογιακή φορά περιστροφής των phasors, θετική ακολουθία των phasors θεωρείται η abc (στο συγκεκριμένο παράδειγμα).

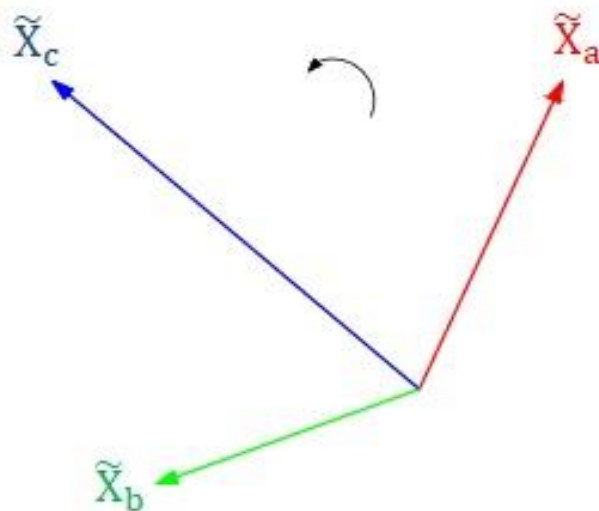
Οι προϋποθέσεις αυτές συνοψίζονται στο σχήμα 2.2.:



Σχήμα 2.2.: Συμμετρικό (balanced) σύστημα τριών phasors

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η φάση a , με πράσινο χρώμα η φάση b και με μπλε χρώμα η φάση c .

Εάν οποιαδήποτε από τις τρεις προϋποθέσεις του συμμετρικού συστήματος δεν ισχύει, τότε το σύστημα λέγεται **ασύμμετρο** (unbalanced). Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.:



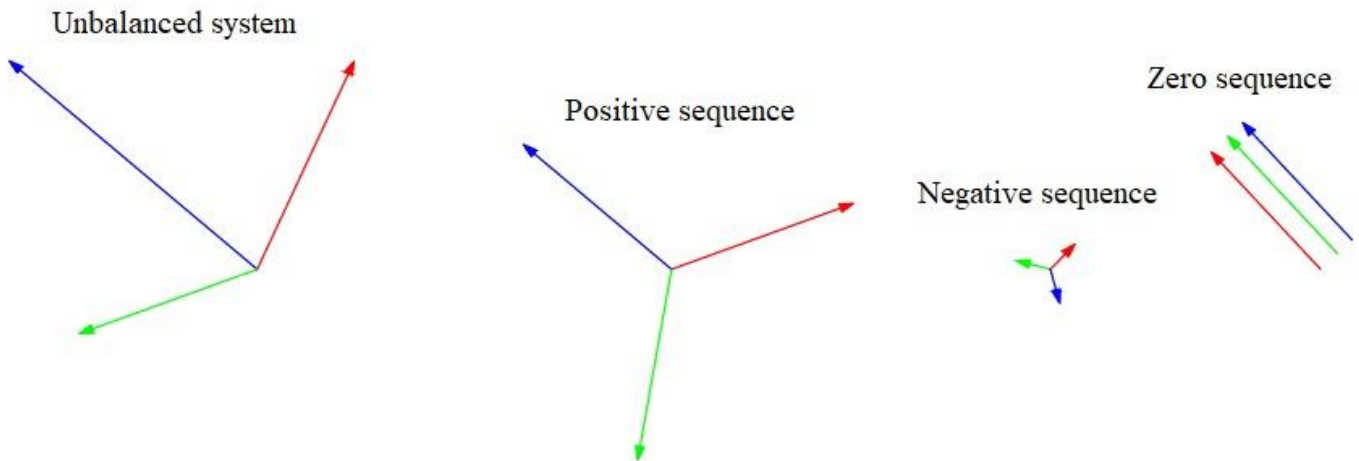
Σχήμα 2.3.: Ασύμμετρο (unbalanced) σύστημα τριών phasors

Κάθε ασύμμετρο σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε τρεις ομάδες συνιστωσών, οι οποίες καλούνται **συμμετρικές συνιστώσες** (symmetrical components) του συστήματος:

- 1) Συνιστώσες **θετικής ακολουθίας** (positive sequence components)
- 2) Συνιστώσες **αρνητικής ακολουθίας** (negative sequence components)
- 3) Συνιστώσες **μηδενικής ακολουθίας** (zero sequence components)

Διατηρώντας και στις τρεις περιπτώσεις την αντιωρολογιακή φορά περιστροφής, η αρνητική ακολουθία θα είναι η acb (εφόσον ως θετική έχει επιλεγεί η abc).

Στο σχήμα 2.4. φαίνεται η ανάλυση του ασύμμετρου συστήματος στις συμμετρικές συνιστώσες του:



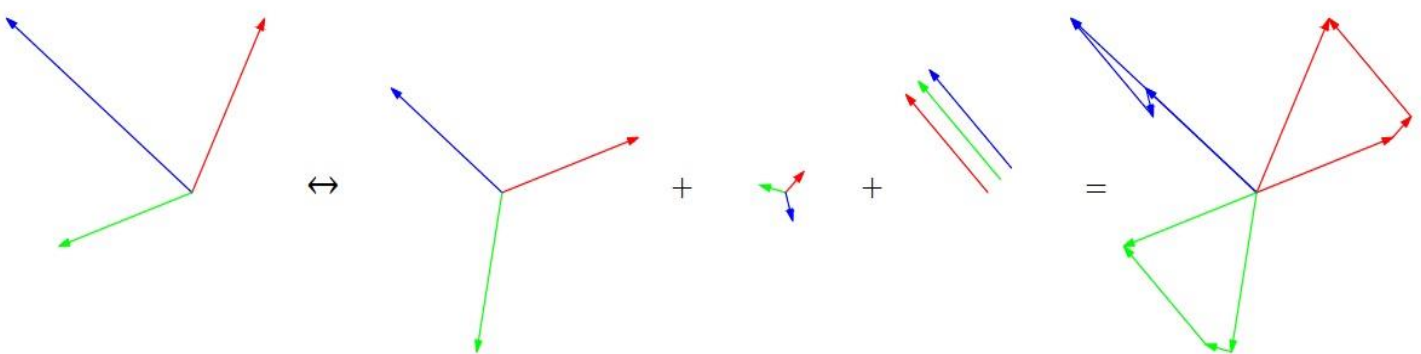
Σχήμα 2.4.: Συμμετρικές συνιστώσες ασύμμετρου συστήματος

Στο σημείο αυτό, σημειώνεται ότι:

i) Εάν το σύστημα των τριών phasors είναι συμμετρικό, τότε ταυτίζεται με τη θετική ακολουθία συνιστωσών του, ενώ οι συνιστώσες αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι μηδενικές.

iii) Οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας κανονικά επικαλύπτονται (και οι τρεις έχουν την ίδια γωνία και το ίδιο μέτρο), ωστόσο στο σχήμα απεικονίζονται ξεχωριστά για λόγους ευκρίνειας.

Εάν, τώρα, οι συμμετρικές συνιστώσες αθροιστούν διανυσματικά, προκύπτει το ασύμμετρο σύστημα του σχήματος 2.3.:



Σχήμα 2.5.: Ανάλυση του ασύμμετρου συστήματος σε άθροισμα συμμετρικών συνιστωσών

2.4.1. Ημιτονοειδή και συμμετρικά (sinusoidal balanced)

Υποθέτοντας αντιωρολογιακή φορά περιστροφής και θετική ακολουθία φάσεων abc, η φασική τάση (line to neutral) κάθε μίας φάσης εκ των a, b και c θα δίνεται από τις εξισώσεις (IEEE Std 1459, 2010):

$$v_a(t) = \sqrt{2}V\cos(\omega t) \quad (2.35)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V\cos(\omega t - 120^\circ) \quad (2.36)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V\cos(\omega t + 120^\circ) \quad (2.37)$$

Οι αντίστοιχες εκφράσεις για το ρεύμα, είναι:

$$i_a(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t - \varphi) \quad (2.38)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t - \varphi - 120^\circ) \quad (2.39)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t - \varphi + 120^\circ) \quad (2.40)$$

όπου φ είναι, κατά τα γνωστά, η φασική απόκλιση μεταξύ του phasor του ρεύματος και της τάσης (χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρείται ότι το ρεύμα επιπορεύεται της τάσης, δηλαδή το φορτίο είναι επαγωγικό, όπως συμβαίνει στη συνηθέστερη περίπτωση και συνεπώς $\varphi > 0$).

Σημειώνεται, ότι τέτοιες συνθήκες λειτουργίας στην πράξη είναι σπάνιες. Για να θεωρηθεί ένα τριφασικό σύστημα τέλεια ημιτονοειδές και συμμετρικό θα πρέπει να ισχύει $THD_V < 0.1\%$ και $V/V^+ < 0.1\%$ αντιστοίχως, κάτι που επιτυγχάνεται μόνο σε εργαστηριακές συνθήκες με χρήση ενισχυτών ισχύος χαμηλής παραμόρφωσης (IEEE, Std 1459, 2010).

2.4.1.1. Ενεργός ισχύς (active power)

Η ενεργός ισχύς για ημιτονοειδές συμμετρικό τριφασικό σύστημα δίνεται από τη σχέση (IEEE Std 1459, 2010):

$$P = 3V_\varphi I_\varphi \cos\varphi = \sqrt{3}V_\pi I_\gamma \cos\varphi \quad [\text{W}] \quad (2.41)$$

όπου

V_φ : η ενεργός τιμή της φασικής τάσης (line to neutral)

V_π : η ενεργός τιμή της πολικής τάσης (line to line)

I_ϕ : η ενεργός τιμή του εσωτερικού ρεύματος φάσης

I_γ : η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής

Η σχέση (2.41) αποδεικνύεται εύκολα ότι ισχύει και για συνδεσμολογία αστέρα (Y) και για συνδεσμολογία τριγώνου (Δ).

2.4.1.2. Άεργος ισχύς (reactive power)

Κατ' αντιστοιχία με την ενεργό ισχύ, η άεργος ισχύς υπολογίζεται από την εξίσωση (IEEE Std 1459, 2010):

$$Q = 3V_\phi I_\phi \sin\phi = \sqrt{3}V_\pi I_\gamma \sin\phi \quad [\text{VAr}] \quad (2.42)$$

2.4.1.3. Φαινόμενη ισχύς (apparent power)

Η φαινόμενη ισχύς περιγράφεται από τη σχέση (IEEE Std 1459, 2010):

$$S = 3V_\phi I_\phi = \sqrt{3}V_\pi I_\gamma \quad [\text{VA}] \quad (2.43)$$

Επιπλέον, κατά τα γνωστά, θα ισχύει:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.44)$$

2.4.1.4. Συντελεστής ισχύος (power factor)

Σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δοθεί και για το μονοφασικό σύστημα, ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται ως:

$$pf = P/S \quad (2.45)$$

2.4.2. Ημιτονοειδή και ασύμμετρα (sinusoidal unbalanced)

Στην περίπτωση αυτή, τα τρία phasors του ρεύματος \tilde{I}_a , \tilde{I}_b και \tilde{I}_c δεν έχουν ίσα μέτρα ή/και δεν είναι στραμμένα το ένα σε σχέση με το άλλο κατά ακριβώς 120° . Η ανισορροπία του φορτίου οδηγεί σε μη-συμμετρικά ρεύματα που με τη σειρά τους προκαλούν ασυμμετρία των τάσεων. Υπάρχουν, ακόμη, περιπτώσεις που τα phasors των τριών τάσεων δεν είναι συμμετρικά. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ασύμμετρα ρεύματα, ακόμη και εάν το φορτίο είναι τέλεια συμμετρικό (IEEE Std 1459, 2010).

Οι φασικές τάσεις, σαν συναρτήσεις του χρόνου, δίνονται από τις σχέσεις:

$$v_a(t) = \sqrt{2}V_a \cos(\omega t + \theta_{v,a}) \quad (2.46)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V_b \cos(\omega t + \theta_{v,b} - 120^\circ) \quad (2.47)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V_c \cos(\omega t + \theta_{v,c} + 120^\circ) \quad (2.48)$$

όπου τουλάχιστον ένα από τα τρία πλάτη $\sqrt{2}V_a$, $\sqrt{2}V_b$ ή $\sqrt{2}V_c$ έχει διαφορετική τιμή από τα άλλα δύο. Το ίδιο ισχύει και για τις γωνίες $\theta_{v,a}$, $\theta_{v,b}$ και $\theta_{v,c}$. Εάν μία φασική γωνία έχει τιμή διαφορετική από τις άλλες δύο, το σύστημα χάνει τη συμμετρία του.

Αντίστοιχες είναι και οι εκφράσεις για τα ρεύματα γραμμής (υπενθυμίζεται ότι στη συνδεσμολογία αστέρα το ρεύμα φάσης ταυτίζεται με το ρεύμα γραμμής):

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + \theta_{i,a}) \quad (2.49)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I_b \cos(\omega t + \theta_{i,b} - 120^\circ) \quad (2.50)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I_c \cos(\omega t + \theta_{i,c} + 120^\circ) \quad (2.51)$$

2.4.2.1. Ενεργός ισχύς (active power)

Η ενεργός ισχύς, ορίζεται πλέον ως το άθροισμα των μεγεθών ενεργού ισχύος των τριών φάσεων, δηλαδή:

$$P = P_a + P_b + P_c \quad [\text{W}] \quad (2.52)$$

όπου

$$P_a = V_a I_a \cos(\theta_{v,a} - \theta_{i,a}) \quad (2.53)$$

$$P_b = V_b I_b \cos(\theta_{v,b} - \theta_{i,b}) \quad (2.54)$$

$$P_c = V_c I_c \cos(\theta_{v,c} - \theta_{i,c}) \quad (2.55)$$

Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα, σε συστήματα με τέσσερα καλώδια, όπου βοηθάει η χρήση των συμμετρικών συνιστωσών. Οι συμμετρικές συνιστώσες της τάσης V^+ , V^- και V^0 και του ρεύματος I^+ , I^- και I^0 μαζί με τις μεταξύ τους φασικές αποκλίσεις φ^+ , φ^- και φ^0 , οδηγούν στις παρακάτω τρεις συνιστώσες ενεργού ισχύος (IEEE Std 1459. 2010):

$$P^+ = 3V^+I^+\cos\varphi^+ \quad (2.56)$$

$$P^- = 3V^-I^-\cos\varphi^- \quad (2.57)$$

$$P^0 = 3V^0I^0\cos\varphi^0 \quad (2.58)$$

όπου

P^+ : η ενεργός ισχύς που αντιστοιχεί στη θετική ακολουθία [W]

P^- : η ενεργός ισχύς που αντιστοιχεί στην αρνητική ακολουθία [W]

P^0 : η ενεργός ισχύς που αντιστοιχεί στη μηδενική ακολουθία [W]

Η συνολική ενεργός ισχύς, θα ισούται με:

$$P = P^+ + P^- + P^0 \quad [\text{W}] \quad (2.59)$$

2.4.2.2. Άεργος ισχύς (reactive power)

Η ανά φάση άεργος ισχύς, ορίζεται με τη βοήθεια των παρακάτω εκφράσεων (IEEE Std 1459, 2010):

$$Q_a = V_a I_a \sin(\theta_{v,a} - \theta_{i,a}) \quad (2.60)$$

$$Q_b = V_b I_b \sin(\theta_{v,b} - \theta_{i,b}) \quad (2.61)$$

$$Q_c = V_c I_c \sin(\theta_{v,c} - \theta_{i,c}) \quad (2.62)$$

Για το φανταστικό μέρος της **διανυσματικής** φαινόμενης ισχύος S_V (βλ. παράγραφο 2.4.2.3), η συνολική άεργος ισχύς ισούται με:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \quad [\text{VAR}] \quad (2.63)$$

Σημειώνεται, ότι η έκφραση (2.63) **δεν** χρησιμοποιείται σε σχέση με την **αριθμητική φαινόμενη** ισχύ S_A (βλ. παράγραφο 2.4.2.3).

Οι τρεις συμμετρικές συνιστώσες της αέργου ισχύος, δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$Q^+ = 3V^+I^+\sin\varphi^+ \quad (2.64)$$

$$Q^- = 3V^-I^-\sin\varphi^- \quad (2.65)$$

$$Q^0 = 3V^0I^0\sin\varphi^0 \quad (2.66)$$

όπου

Q^+ : η άεργος ισχύς που αντιστοιχεί στη θετική ακολουθία [VAr]

Q^- : η άεργος ισχύς που αντιστοιχεί στην αρνητική ακολουθία [VAr]

Q^0 : η άεργος ισχύς που αντιστοιχεί στη μηδενική ακολουθία [VAr]

Η συνολική άεργος ισχύς, θα είναι:

$$Q = Q^+ + Q^- + Q^0 \quad [\text{VAr}] \quad (2.67)$$

2.4.2.3. Φαινόμενη ισχύς (apparent power)

Αρχικά, διακρίνεται η έννοια της φασικής φαινόμενης ισχύος (phase apparent power), η οποία για κάθε μία από τις τρεις φάσεις δίνεται από τις σχέσεις:

$$S_a = V_a I_a, \quad S_b = V_b I_b, \quad S_c = V_c I_c \quad [\text{VA}] \quad (2.68)$$

ενώ, παράλληλα, ισχύει:

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2}, \quad S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_b^2}, \quad S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad [\text{VA}] \quad (2.69)$$

Στη συνέχεια, αναφέρονται τρεις διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού της συνολικής φαινόμενης ισχύος (IEEE Std 1459, 2010):

1) Αριθμητική φαινόμενη ισχύς S_A (arithmetic apparent power)

Ορίζεται ως το άθροισμα των μέτρων των επιμέρους μεγεθών φαινόμενης ισχύος των τριών φάσεων a, b και c:

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad [\text{VA}] \quad (2.70)$$

Σημειώνεται, ότι η αριθμητική φαινόμενη ισχύς **δεν** μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, όπου $P = P_a + P_b + P_c$ και $Q = Q_a + Q_b + Q_c$.

2) Διανυσματική φαινόμενη ισχύς S_V (vector apparent power)

Η διανυσματική έκφραση της φαινόμενης ισχύος, ορίζεται ως εξής (IEEE Std 1459, 2010):

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}] \quad (2.71)$$

Η έκφραση (2.71) είναι ισοδύναμη με την παρακάτω:

$$S_V = |P + jQ| \quad [\text{VA}] \quad (2.72)$$

Από τις σχέσεις (2.52), (2.59), (2.63) και (2.67), η (2.72) γράφεται ως:

$$S_V = |P_a + P_b + P_c + j(Q_a + Q_b + Q_c)| = |P^+ + P^- + P^0 + j(Q^+ + Q^- + Q^0)| \quad (2.73)$$

Δηλαδή, σε αυτή τη μέθοδο, προστίθεται διανυσματικά η ενεργός ισχύς κάθε φάσης και η άεργος ισχύς κάθε φάσης. Επειδή, το διάνυσμα της ενεργού και της άεργου ισχύος σχηματίζουν γωνία 90° , η φαινόμενη ισχύς αποτελεί την υποτεινούσα και υπολογίζεται από το πυθαγόρειο θεώρημα.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται γεωμετρικά οι δύο μέθοδοι που περιγράφηκαν:

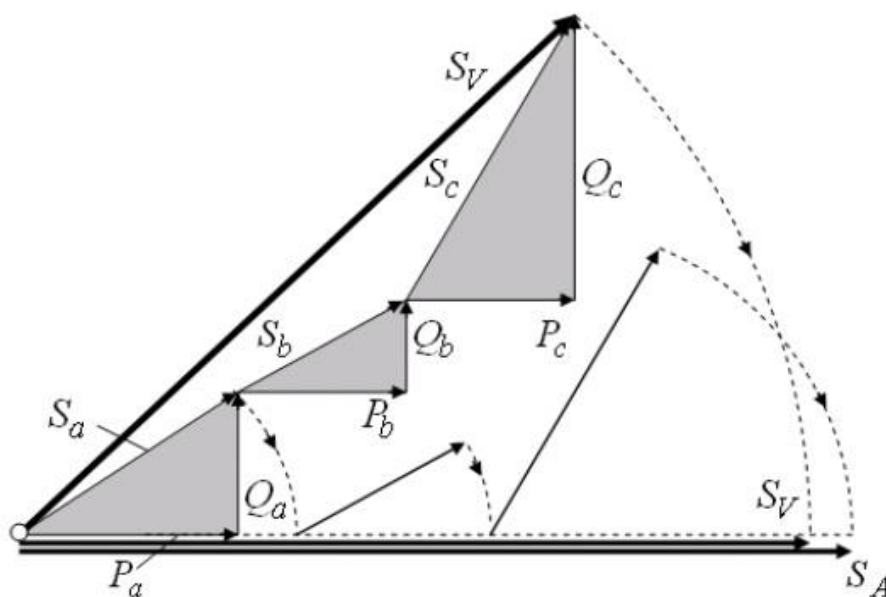


Figure 3—Arithmetic and vector apparent powers (VA)

Σχήμα 2.6.: Γεωμετρική απεικόνιση της αριθμητικής και της διανυσματικής φαινόμενης ισχύος (πηγή: IEEE Std 1459, 2010, σελ. 19)

Παρατηρείται, ότι οι δύο μέθοδοι έχουν μία μικρή διαφορά μεταξύ τους. Πιο ακριβής μέθοδος θεωρείται αυτή της αριθμητικής φαινόμενης ισχύος και όπου είναι εφικτό θα πρέπει να προτιμάται έναντι της διανυσματικής μεθόδου (IEEE Std 1459, 2010).

3) **Effective** apparent power S_e

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού, θεωρεί ένα συμμετρικό κύκλωμα που έχει ακριβώς τις ίδιες απώλειες ισχύος στα καλώδια με το πραγματικό ασύμμετρο κύκλωμα. Με βάση αυτήν την ισοδυναμία, ορίζεται ένα ρεύμα, το οποίο στην αγγλική ορολογία αναφέρεται ως “effective line current” και συμβολίζεται ως I_e (IEEE Std 1459, 2010).

Επειδή στις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις των πλοίων **δεν** συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός (neutral line), η μελέτη της S_e εστιάζεται σε σύστημα τριών καλωδίων (όπου ισχύει $I^0 = 0$, καθώς το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας κυκλοφορεί διαμέσου του ουδέτερου αγωγού).

Η απλοποιημένη, για το κύκλωμα τριών καλωδίων, έκφραση για το ρεύμα I_e , είναι:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} = \sqrt{(I^+)^2 + (I^-)^2} \quad (2.74)$$

Αντίστοιχη έκφραση για την τάση δίνεται στην εξίσωση (2.75):

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2} \quad (2.75)$$

Από τις (2.74) και (2.75), προκύπτει τελικά και η S_e :

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.76)$$

Στα ασύμμετρα τριφασικά κυκλώματα, προτιμάται ο υπολογισμός της φαινόμενης ισχύος μέσω του ορισμού της S_e έναντι των άλλων δύο μεθόδων, διότι **μόνον** η S_e ικανοποιεί το κριτήριο ότι οι απώλειες στον ζυγό του συστήματος πρέπει να είναι γραμμική συνάρτηση του τετραγώνου της φαινόμενης ισχύος του φορτίου που τροφοδοτεί (Δημουλιάς, 2006).

Όταν το σύστημα είναι συμμετρικό, θα ισχύει προφανώς $S_V = S_A = S_e$, ενώ για ασύμμετρο σύστημα ισχύει $S_V \leq S_A \leq S_e$.

2.4.2.4. Συντελεστής ισχύος (power factor)

Κατ' αντιστοιχία με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν για τον υπολογισμό της φαινόμενης ισχύος, ορίζονται οι ακόλουθες εκφράσεις του συντελεστή ισχύος:

$$pf_V = P/S_V \quad (2.77)$$

$$pf_A = P/S_A \quad (2.78)$$

$$pf_e = P/S_e \quad (2.79)$$

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ο συντελεστής ισχύος θετικής ακολουθίας (positive sequence power factor), ο οποίος έχει την ίδια σημασία με τον θεμελιώδη συντελεστή ισχύος και βοηθάει στην αξιολόγηση των συνθηκών ροής ισχύος θετικής ακολουθίας (IEEE Std 1459, 2010):

$$pf^+ = P^+/S^+ \quad (2.80)$$

όπου $S^+ = |S^+| = |P^+ + jQ^+|$ η φαινόμενη ισχύς θετικής ακολουθίας.

2.4.3. Μη ημιτονοειδή και ασύμμετρα (nonsinusoidal unbalanced)

Σε αυτήν την παράγραφο καλύπτεται η πλέον γενική περίπτωση συνθηκών λειτουργίας.

Η προσοχή εστιάζεται και πάλι σε τριφασικά συστήματα τριών καλωδίων, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Στην περίπτωση αυτή, οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το ρεύμα σε πρακτικές εφαρμογές είναι οι ακόλουθες:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (2.81)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2}{3}} \quad (2.82)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2}{3}} \quad (2.83)$$

όπου οι δείκτες 1 και H αναφέρονται στη θεμελιώδη και στη συνολική αρμονική συνιστώσα αντίστοιχα.

Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για τις τάσεις:

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (2.84)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{9}} \quad (2.85)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{9}} \quad (2.86)$$

Η έκφραση για τη φαινόμενη ισχύ είναι παρόμοια με εκείνη της σχέσης (2.18), δηλαδή:

$$S_e = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} = 3V_e I_e \quad (2.87)$$

Η μη θεμελιώδης φαινόμενη ισχύς S_N αναλύεται περαιτέρω στους όρους:

$$S_{eN} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2} \quad (2.88)$$

όπου

$D_{eI} = 3V_{e1}I_{eH}$: η ισχύς λόγω παραμόρφωσης του ρεύματος (current distortion power)

$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1}$: η ισχύς λόγω παραμόρφωσης της τάσης (voltage distortion power)

$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH}$: η αρμονική φαινόμενη ισχύς (harmonic apparent power)

και $D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2}$: η αρμονική ισχύς παραμόρφωσης D_H (harmonic distortion power)

Κατ' αντιστοιχία με τις σχέσεις (2.13) και (2.14), ορίζονται οι δείκτες συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης:

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}}, \quad THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (2.89)$$

επομένως, θα ισχύει:

$$D_{eI} = S_{e1} THD_{eI} \quad (2.90)$$

$$D_{eV} = S_{e1} THD_{eV} \quad (2.91)$$

$$S_{eH} = S_{e1} THD_{eV} THD_{eI} \quad (2.92)$$

$$S_{eN} = \sqrt{THD_{eI}^2 + THD_{eV}^2 + (THD_{eI}THD_{eV})^2} \quad (2.93)$$

Για συστήματα στα οποία $THD_{eV} \leq 5\%$ και $THD_{eI} > 40\%$, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη έκφραση χωρίς μεγάλο σφάλμα (IEEE Std 1459, 2010):

$$S_{eN} = S_{eI}THD_{eI} \quad (2.94)$$

Τέλος, για τον συντελεστή ισχύος, δίνονται οι παρακάτω δύο εκφράσεις:

$$pf_1^+ = P_1^+/S_1^+ \quad (2.95)$$

όπου

pf_1^+ : ο θεμελιώδης συντελεστής ισχύος θετικής ακολουθίας, ο οποίος παίζει τον ίδιο σημαντικό ρόλο με τον θεμελιώδη συντελεστή ισχύος στα μη ημιτονοειδή μονοφασικά συστήματα

$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2}$: η θεμελιώδης φαινόμενη ισχύς θετικής ακολουθίας

$P_1^+ = 3V_1^+I_1^+\cos(\theta_{v,1}^+ - \theta_{i,1}^+)$: η θεμελιώδης ενεργός ισχύς

$Q_1^+ = 3V_1^+I_1^+\sin(\theta_{v,1}^+ - \theta_{i,1}^+)$: η θεμελιώδης άεργος ισχύς

και

$$pf = P/S_e \quad (2.96)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ

Περίληψη του κεφαλαίου

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού, είναι να γίνει κατανοητή η περιγραφή του συστήματος διέγερσης των σύγχρονων τριφασικών γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος (εναλλακτών) και οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία του.

Ειδικότερα, στη συνέχεια αναλύονται έννοιες όπως *σύγχρονη γεννήτρια, διεγέρτρια εναλλακτήρα, αυτόματος ρυθμιστής τάσης, σύστημα ελέγχου διέγερσης*, ενώ παρουσιάζεται και η *μοντελοποίηση* των κυριότερων συστημάτων διέγερσης (με εφαρμογή στο πεδίο της ναυπηγικής) κατά τα πρότυπα του *IEEE*.

3.1. Εισαγωγή

Η βασική ιδέα πίσω από τη λειτουργία μίας **σύγχρονης** μηχανής, είναι η ευθυγράμμιση δύο ανεξάρτητων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, εκείνων του τυλίγματος διέγερσης (field winding) και του τυλίγματος επαγωγίμου (armature winding). Το τύλιγμα του επαγωγίμου μίας σύγχρονης μηχανής διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ το τύλιγμα διέγερσης από συνεχές ρεύμα. Επειδή η διέλευση των τεράστιων ποσών ισχύος του επαγωγίμου (κάποιες φορές της τάξης μεγέθους των MW) διαμέσου στρεφόμενων δακτυλίων (sliprings), αποτελεί, από κατασκευαστικής απόψεως, εξαιρετικά επίπονη διαδικασία, στη συντριπτική τους πλειοψηφία οι σύγχρονες μηχανές έχουν το τύλιγμα του επαγωγίμου στον ακίνητο στάτη (stator) και το τύλιγμα διέγερσης στον περιστρεφόμενο δρομέα ή ρότορα (rotor). Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της διέγερσης, που οφείλεται στο συνεχές ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα διέγερσης, περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα, ενώ το τύλιγμα του επαγωγίμου αποτελείται από τρία τυλίγματα κατανομημένα στον στάτη κατά 120°, στα οποία επάγονται εναλλασσόμενα ρεύματα συγκεκριμένης

ηλεκτρικής συχνότητας. Έτσι, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προκύπτει, περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την ηλεκτρική συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Η διατήρηση αυτής της περιστροφικής κίνησης, προϋποθέτει την κίνηση των δύο πεδίων με την ίδια ταχύτητα, δηλαδή η ηλεκτρική συχνότητα πρέπει να ισούται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής (εξού και ο χαρακτηρισμός “σύγχρονη”). Συγκεκριμένα, η συχνότητα των επαγόμενων ηλεκτρικών μεγεθών (ρεύματων, τάσεων κλπ.) και η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, συνδέονται με την παρακάτω σχέση (Προυσαλίδης, 2012):

$$f = \frac{p}{2} \frac{n}{2} \quad (3.1)$$

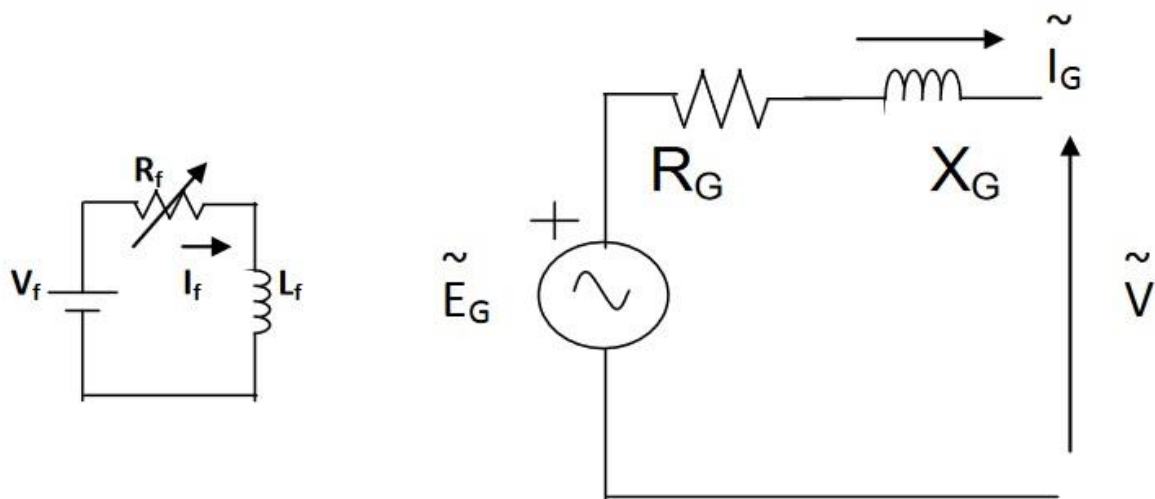
όπου

f : η ηλεκτρική συχνότητα των εναλλασσόμενων ρευμάτων και τάσεων του στάτη [Hz]

p : το πλήθος των πόλων (ίδιο για στάτη και δρομέα)

n : η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα [RPM]

Στο επόμενο σχήμα, απεικονίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης γεννήτριας (δεξιά), σε συνδυασμό με το κύκλωμα διέγερσης συνεχούς ρεύματος (αριστερά).



Σχήμα 3.1.: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας με το κύκλωμα διέγερσης συνεχούς ρεύματος (πηγή: Προυσαλίδης, 2012, σελ. 92)

Τα σύμβολα που απεικονίζονται στο σχήμα 3.1., επεξηγούνται ως εξής:

\tilde{E}_G : η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) ή τάση εξ επαγωγής της σύγχρονης γεννήτριας

\tilde{V} : η τάση ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας

R_G : η ωμική αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου της σύγχρονης γεννήτριας (συνήθως αμελείται, καθώς $R_G \ll X_G$)

X_G : η επαγωγική αντίδραση τυλίγματος τυμπάνου της σύγχρονης γεννήτριας

\tilde{I}_G : το ρεύμα φάσης τυμπάνου της σύγχρονης γεννήτριας

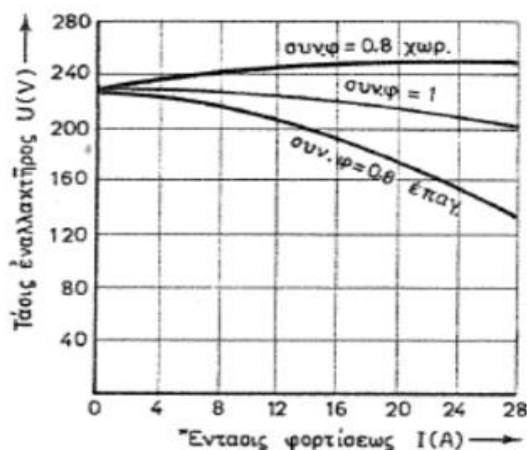
Το συνεχές ρεύμα του κυκλώματος διέγερσης του σχήματος 3.1., παράγεται από μία βοηθητική πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία καλείται **διεγέρτρια** και τοποθετείται συνήθως στην άκρη του άξονα του εναλλακτήρα. Στην περίπτωση που ως διεγέρτρια χρησιμοποιείται γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ή συσσωρευτής (μπαταρία), η τροφοδοσία του συνεχούς ρεύματος στον δρομέα πραγματοποιείται συνήθως με χρήση ψηκτρών (brushes). Αντί αυτών, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μικρές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με ανορθωτική διάταξη για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Στην περίπτωση αυτή, δεν απαιτείται η χρήση ψηκτρών (γεννήτρια άνευ ψηκτρών – brushless). Το τύλιγμα διέγερσης είτε περιβάλλει έκτυπους πόλους (salient poles), είτε τοποθετείται σε αυλακώσεις κατά μήκος της κυλινδρικής επιφάνειας του δρομέα.

Πολλές φορές, η αύξηση του φορτίου I της σύγχρονης γεννήτριας οδηγεί σε πτώση τάσης, εξαιτίας (Προυσαλίδης, 2019):

i) της αντίστασης του επαγωγίμου, $I \cdot R$ (σχετικά μικρή)

ii) της αντίδρασης του επαγωγίμου: τα αμπερελίγματα του τυλίγματος του επαγωγίμου αντιτίθενται στα αμπερελίγματα των μαγνητικών πόλων, με αποτέλεσμα η διέγερση της γεννήτριας να ελαττώνεται όταν αυξάνεται η ένταση του φορτίου I στο τύλιγμα του επαγωγίμου

Επιπλέον, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.2., η πτώση της τάσης μπορεί να οφείλεται και στην αύξηση της έντασης των επαγωγικών φορτίων του δικτύου.



Σχήμα 3.2.: Μεταβολή της τάσης εναλλακτήρα με διάφορους συντελεστές ισχύος και σταθερή διέγερση (πηγή: Προυσαλίδης, 2019, σελ. 68)

Η επαναφορά της τάσης στο αρχικό επίπεδο επιτυγχάνεται με τη μείωση της ρυθμιστικής αντίστασης διέγερσης της διεγέρτριας, προκαλώντας έτσι αύξηση της τιμής του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας. Συμβολικά, παρατηρείται η παρακάτω σειρά αντιδράσεων:

$$R_{\delta, \delta i e \gamma .} \downarrow \rightarrow I_{\delta, \delta i e \gamma .} \uparrow \rightarrow V_{\delta i e \gamma .} \uparrow \rightarrow I_{\delta i e \gamma .} \uparrow \rightarrow V \uparrow$$

όπου

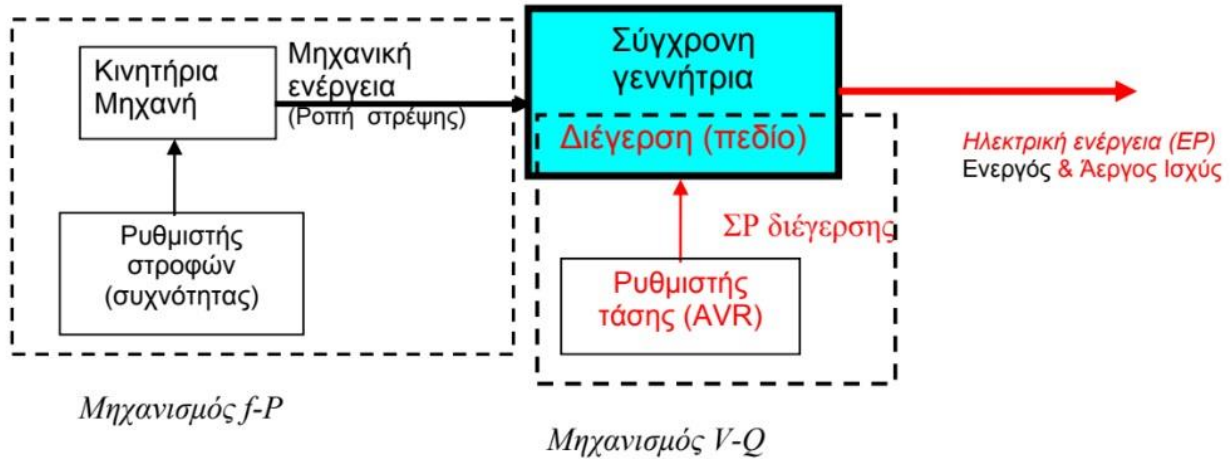
V : η τάση ακροδεκτών (terminal voltage) του εναλλακτήρα

$\delta i e \gamma .$: διεγέρτρια

$\delta, \delta i e \gamma .$: διέγερση της διεγέρτριας

Στην αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή απαιτείται μείωση της τάσης του εναλλακτήρα, εφαρμόζεται η αντίστροφη μέθοδος, δηλαδή αύξηση της ρυθμιστικής αντίστασης διέγερσης της διεγέρτριας. Η ρύθμιση αυτή είναι δυνατόν να γίνει χειροκίνητα, όμως στη συνηθέστερη περίπτωση πραγματοποιείται αυτόματα, μέσω συστήματος αυτομάτου ελέγχου που ονομάζεται **Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης** ή εν συντομία **AVR** (Automatic Voltage Regulator – AVR).

Υπάρχουν δύο κύριες παράμετροι που προσφέρονται για τον έλεγχο της συμπεριφοράς μίας σύγχρονης γεννήτριας: η ροπή που εφαρμόζεται στον δρομέα για την περιστροφή του και η τάση του πεδίου διέγερσης.

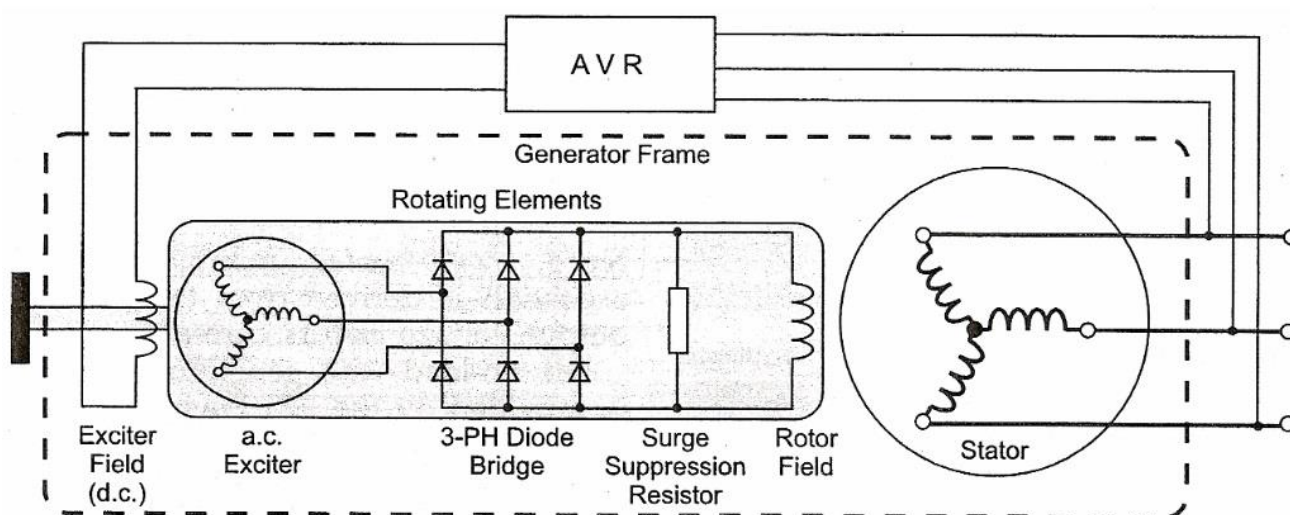


Σχήμα 3.3.: Μηχανισμοί τροφοδότησης ενέργειας (μηχανικής και ηλεκτρικής) προς τη σύγχρονη γεννήτρια (πηγή: Προυσαλίδης, 2019, σελ. 71)

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η τροφοδοσία του εναλλακτήρα από την ηλεκτρική πηγή ενέργειας (για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον μηχανισμό $f - P$ ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην αναφερόμενη βιβλιογραφία). Ειδικότερα, η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτείται μέσω του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της διέγερσης με ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μεταφράζεται σε ενέργεια αέργου ισχύος. Μέσω αυτής της επικουρικής τροφοδότησης ενέργειας, η οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως παρέχεται από κάποια βοηθητική πηγή συνεχούς ρεύματος (διεγέρτρια), είναι δυνατόν να ρυθμιστεί το μέτρο της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας. Προκειμένου η τάση ακροδεκτών να παραμένει όσο το δυνατόν σταθερή, απαραίτητη προϋπόθεση για την εξασφάλιση της ικανοποιητικής ευστάθειας του συστήματος όπως θα φανεί στη συνέχεια, η τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης με συνεχές ρεύμα ελέγχεται μέσω ειδικής διάταξης, του λεγόμενου Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (AVR). Αποδεικνύεται, ότι η τάση ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας είναι άμεσα συνυφασμένη με την παραγωγή αέργου ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο, γι' αυτό και ο συγκεκριμένος μηχανισμός ελέγχου συχνά αναφέρεται ως “ $V - Q$ μηχανισμός” (Προυσαλίδης, 2019).

Οι σύγχρονες μηχανές, κατά τη λειτουργία τους ως γεννήτριες, αποτελούν τη βασική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα δίκτυα

ηλεκτρικής ισχύος των πλοίων. Για την περιστροφή του δρομέα χρησιμοποιούνται συνήθως κινητήρες Diesel (εναλλακτικά αεριοστρόβιλοι ή ατμοστρόβιλοι), συνιστώντας, έτσι, τη λεγόμενη κινητήρια μηχανή (prime mover). Ειδικά για τις σύγχρονες γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στη ναυσιπλοΐα, σημειώνεται ότι είναι “γεννήτριες άνευ ψηκτρών” (brushless), δηλαδή η διεγέρτριά τους είναι μία ομοαξονικά συζευγμένη μικρής ισχύος σύγχρονη γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Βασικό χαρακτηριστικό αυτού του εναλλακτήρα διέγερσης, αποτελεί η λεγόμενη “αντίστροφη διάταξη από τη συνηθισμένη”, δηλαδή η τοποθέτηση του τυλίγματος διέγερσης τον στάτη και του τριφασικού τυλίγματος του επαγωγίμου στον δρομέα, ενώ συνοδεύεται από διάταξη ανόρθωσης για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγει σε συνεχές ρεύμα για το πεδίο διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται απλουστευτικά στο σχήμα 3.4. που ακολουθεί:



Σχήμα 3.4.: Σχηματική αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας άνευ ψηκτρών (brushless) (πηγή: Hall, 1999, σελ. 65)

3.2. Το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας

3.2.1. Μέθοδοι διέγερσης

Οι δύο παράγοντες που αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την επαγωγή ΗΕΔ σε έναν εναλλακτήρα είναι, όπως τονίστηκε και προηγουμένως, η μηχανική περιστροφική ταχύτητα (rotational speed), η οποία αναπτύσσεται στον δρομέα μέσω μίας εξωτερικής κινητήριας μηχανής, και η μαγνητική ροή (magnetic flux) που δημιουργείται λόγω της κυκλοφορίας συνεχούς ρεύματος διαμέσου του τυλίγματος

διέγερσης. Το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα δημιουργεί ισχυρούς πόλους μαγνητικού πεδίου, όταν διαρρέεται από συνεχές ρεύμα. Διάφορες μέθοδοι έχουν δοκιμαστεί, ώστε το πεδίο διέγερσης να τροφοδοτείται από το κατάλληλο συνεχές ρεύμα και με τη σειρά του να παράγει την απαιτούμενη εναλλασσόμενη τάση στους ακροδέκτες του τυλίγματος του στάτη. Η διέγερση πρέπει διαρκώς να ρυθμίζεται, ώστε η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας να διατηρείται σταθερή, παρά τις πιθανές διακυμάνσεις της ζήτησης ισχύος από το φορτίο.

Γενικά, οι μέθοδοι διέγερσης διακρίνονται σε περιστροφικές και στατικές. Μία περιστροφική μέθοδος, χρησιμοποιεί μία διεγέρτρια εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος, η οποία είναι στερεωμένη στον άξονα του δρομέα και περιστρέφεται με την ίδια μηχανική ταχύτητα. Παλαιότερα, οι περιστρεφόμενες διεγέρτριες ήταν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος με ακίνητους πόλους πεδίου διέγερσης, περιστρεφόμενο τύλιγμα επαγωγίμου, συλλέκτη (commutator) και ψήκτρες (brushes). Πλέον, όμως, η πιο συνηθισμένη διάταξη, ειδικά για τις ναυτικές εφαρμογές, είναι με διεγέρτρια εναλλασσόμενου ρεύματος τοποθετημένη στον άξονα του δρομέα.

Σε μερικές εφαρμογές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετα μία μικρή περιστρεφόμενη βοηθητική διεγέρτρια (pilot exciter) για την τροφοδότηση του πεδίου της βασικής διεγέρτριας με ρεύμα. Αυτές οι διεγέρτριες είναι μικρές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, οι οποίες περιστρέφονται από τον άξονα της κύριας γεννήτριας. Η τάση που παράγουν είναι υψίσυχνη (για παράδειγμα 1000 Hz), αλλά ανορθώνεται σε συνεχή προτού τροφοδοτηθεί στο πεδίο της βασικής διεγέρτριας.

Η διάταξη μίας “άνευ ψηκτρών” μεθόδου διέγερσης αναπαρίσταται στο σχήμα 3.4. Η απουσία ψηκτρών βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος και μειώνει σημαντικά τις απαιτήσεις συντήρησης της σύγχρονης γεννήτριας. Η ανόρθωση της τάσης που παράγει η διεγέρτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, πραγματοποιείται μέσω έξι διόδων σιλικόνης (silicon diodes), προσηρτημένων στον άξονα της γεννήτριας. Η αντίσταση που φαίνεται συνδεδεμένη παράλληλα με το τύλιγμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας στο σχήμα 3.4. (surge suppression resistor), προστατεύει τις διόδους έναντι υψηλών τιμών της τάσης που προκύπτουν από την απότομη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης.

Ένα εύλογο ερώτημα που προκύπτει, είναι τι συμβαίνει εάν μία περιστρεφόμενη διάδος αστοχήσει. Οι πιθανές περιπτώσεις είναι δύο (Hall, 1999):

i) Στην περίπτωση που η αστοχία συνίσταται στην ανοικτοκύκλωση της διόδου (open – circuited diode), οι εναπομείνουσες υγιείς διόδοι θα συνεχίσουν να τροφοδοτούν το κύριο πεδίο διέγερσης με συνεχές ρεύμα. Εάν ο έλεγχος είναι χειροκίνητος (manual), το συνολικό ρεύμα διέγερσης και συνεπώς η τάση της γεννήτριας, θα μειωθεί ελαφρώς. Εάν ο έλεγχος είναι αυτόματος (μέσω του AVR), το ρεύμα του πεδίου διέγερσης θα ενισχυθεί αυτόματα έτσι ώστε να διατηρηθεί η κατάλληλη τάση ακροδεκτών της γεννήτριας, ενώ η αστοχία της διόδου πιθανώς δεν θα έχει ανιχνευθεί. Αυτό θα οδηγήσει σε σταδιακή υπερθέρμανση της διεγέρτριας.

ii) Στην περίπτωση που βραχυκυκλωθεί η διάδος (short – circuited diode) το πρόβλημα είναι εντονότερο, καθώς θα ακολουθήσει βραχυκύκλωση της διεγέρτριας. Έτσι, θα παρατηρηθεί ταχύτατη υπερθέρμανση της διεγέρτριας.

Παρότι η αστοχία διόδων αποτελεί σπάνιο φαινόμενο, μερικές γεννήτριες είναι εφοδιασμένες με ηλεκτρονικό ρελέ που ανιχνεύει τυχόν αστοχία και παράγει κατάλληλο σήμα συναγερμού ή/και διακοπής στην περίπτωση που συμβεί τέτοιο σφάλμα. Συνήθως, ο ανιχνευτής παρακολουθεί το ρεύμα διέγερσης, του οποίου το μέγεθος και η μορφή παρουσιάζουν αξιοπρόσεκτη μεταβολή όταν μία διάδος αστοχεί.

Οι γεννήτριες με περιστρεφόμενες διεγέρτριες, συμβατικές ή “άνευ ψηκτρών”, εμφανίζουν μία σχετικά αργή απόκριση σε απότομες μεταβολές του φορτίου. Για παράδειγμα, μπορεί να χρειαστεί χαρακτηριστικά μέχρι και ένα δευτερόλεπτο για να διορθωθεί μία πτώση τάσης της τάξης του 15%, λόγω της εκκίνησης ενός μεγάλου κινητήρα αντλίας (Hall, 1999). Οι παράγοντες που καθορίζουν τη συνολική απόκριση της τάσης ενός εναλλακτήρα σε απότομες (μεταβατικές) μεταβολές του φορτίου είναι:

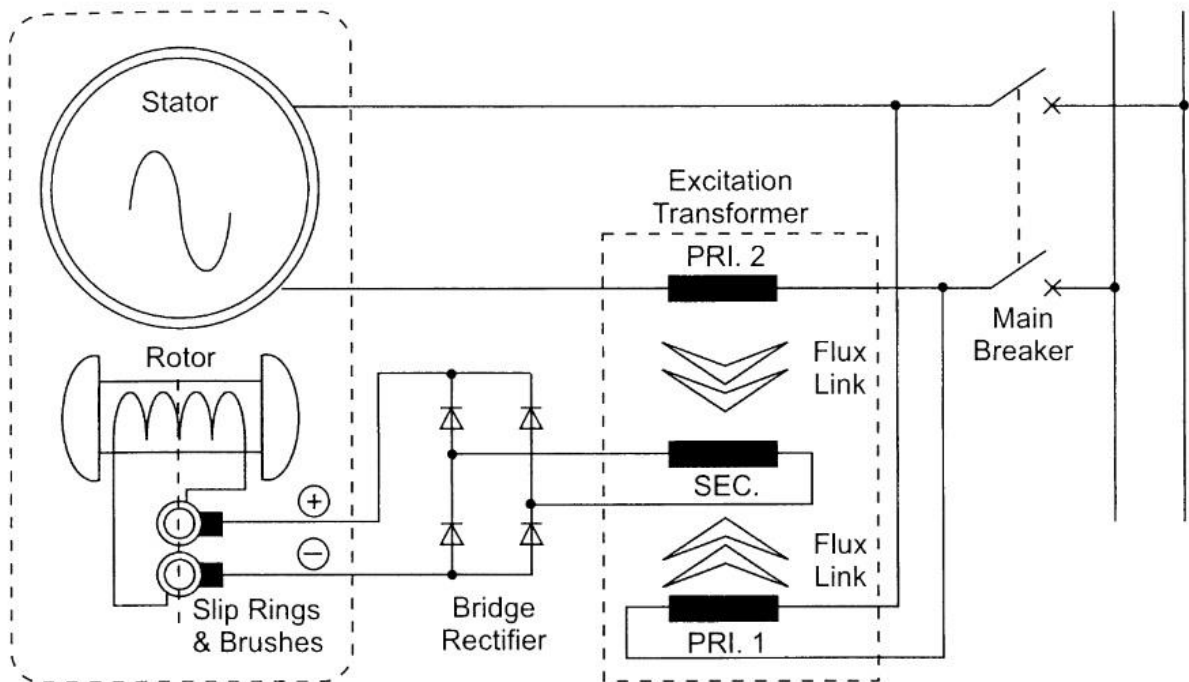
i) Η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα της κύριας γεννήτριας.

ii) Η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος διέγερσης της ίδιας της διεγέρτριας.

iii) Η απόκριση (χειροκίνητη ή αυτόματη) του ρυθμιστή τάσης.

Η μεταβατική απόκριση της γεννήτριας, μπορεί να βελτιωθεί εάν αντί μίας περιστρεφόμενης διεγέρτριας επιλεγθεί μία μέθοδος στατικής διέγερσης (static excitation method). Σε μία τέτοια διάταξη, το πεδίο διέγερσης της γεννήτριας αντλεί το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα μέσω μίας μονάδας στατικής διέγερσης μετασχηματιστή / ανορθωτή, τροφοδοτούμενη απευθείας από την τάση και το ρεύμα εξόδου (output) της κύριας γεννήτριας. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως “σύνθετη” (compounding), καθώς ελέγχεται μέσω ανατροφοδότησης (feedback) τόσο της τάσης (δράση εν παραλλήλω ή shunt effect) όσο και του ρεύματος (δράση εν σειρά ή series effect). Ο χρόνος απόκρισης για τη διόρθωση μίας πτώσης τάσης 15% μπορεί να είναι τόσο χαμηλός όσο ένα δέκατο του δευτερολέπτου (0.1 second), όταν χρησιμοποιείται τέτοια μέθοδος διέγερσης (Hall, 1999). Αυτή η ταχεία απόκριση, είναι κυρίως επιθυμητή σε πλοία γενικού φορτίου ή φορτίου χύδην, όπου παρατηρούνται σημαντικές αυξήσεις του φορτίου εξαιτίας της ύπαρξης γερανών στο κατάστρωμα (deck cranes) και των βαρούλκων (winch gear). Ο εξοπλισμός στατικής διέγερσης μπορεί να βρίσκεται εντός του πλαισίου της γεννήτριας ή εντός του κύριου πίνακα διανομής (main switchboard). Αυτού του είδους οι γεννήτριες έχουν δύο δακτυλίους (sliprings) στον άξονά τους και μηχανισμό ψηκτρών για την επίτευξη της σύνδεσης του εξοπλισμού στατικής διέγερσης με το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα.

Στο σχήμα 3.5. απεικονίζεται το βασικό σχεδιάγραμμα μίας αυτο – διεγερόμενης (self – excited) σύνθετης γεννήτριας (παρατίθεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα διέγερσης για λόγους απλότητας). Σημειώνεται, ότι ο χαρακτηρισμός “σύνθετη” αναφέρεται στην επίτευξη της διέγερσης τόσο μέσω της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας όσο και μέσω του αντίστοιχου ρεύματος.

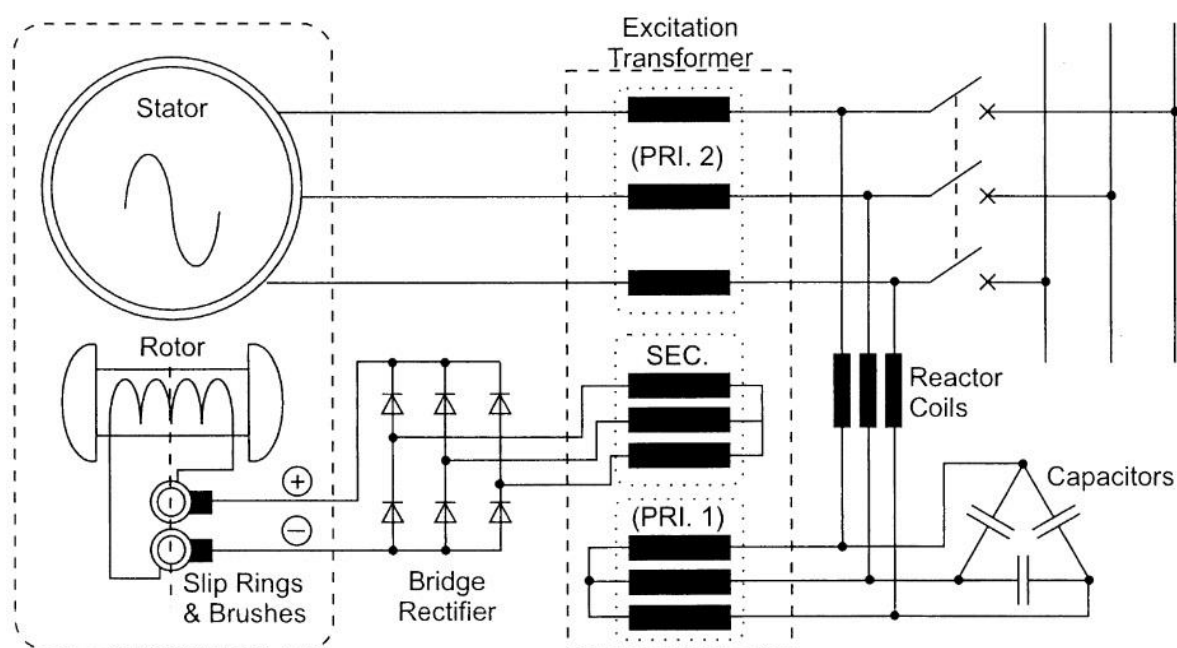


Σχήμα 3.5.: Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα σύνθετης (compound) διέγερσης (πηγή: Hall, 1999, σελ. 67)

Κατά τη λειτουργία κενού φορτίου (no – load), η διέγερση της γεννήτριας παρέχεται μέσω του τυλίγματος PRI.1 του μετασχηματιστή διέγερσης. Σε συνθήκες λειτουργίας με φορτίο, το ρεύμα της γεννήτριας εγγείει επιπρόσθετο ρεύμα διέγερσης μέσω του τυλίγματος PRI.2 του μετασχηματιστή, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας. Εάν τα επιμέρους τμήματα της διέγερσης είναι σχεδιασμένα προσεκτικά, η τάση ακροδεκτών μίας σύνθετης γεννήτριας μπορεί να διατηρηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό σε όλα τα φορτία, χωρίς τη χρήση AVR ή χειροκίνητου ελέγχου με μεταβλητή αντίσταση (voltage trimmer). Παρόλα αυτά, κάποιοι κατασκευαστές εναλλακτήρων τοποθετούν AVR και χειροκίνητο ροοστάτη σε τέτοια συστήματα σύνθετης στατικής διέγερσης. Αυτή η προσθήκη βοηθάει στην προσεκτικότερη ρύθμιση της τάσης σε όλο το εύρος των φορτίων και επιτρέπει τον χειροκίνητο έλεγχο της τάσης της γεννήτριας, για παράδειγμα για τον συγχρονισμό και την ισοκατανομή της αέργου ισχύος μεταξύ των γεννητριών.

Στην πράξη, το πραγματικό τριφασικό κύκλωμα στατικής διέγερσης περιλαμβάνει επιπλέον συνιστώσες, όπως πηνία και πυκνωτές. Μία τέτοια διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3.6., στο οποίο δεν περιλαμβάνεται

AVR ή μεταβλητή αντίσταση για τη ρύθμιση της τάσης. Πιθανή αύξηση του ρεύματος του φορτίου θα προκαλέσει αυτόματα, μέσω ανατροφοδότησης, τη ρύθμιση του πεδίου διέγερσης, ώστε να διορθωθεί η επακόλουθη αύξηση της τάσης με τέτοια ταχύτητα, που η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας θα παραμείνει πρακτικά σταθερή. Τα σύνθετα συστήματα διέγερσης απαιτούν την προσεκτική σχεδίαση των στατικών τμημάτων τους, έτσι ώστε να ευνοούν τη συνεργασία με τη σχετική γεννήτρια που διεγείρουν.



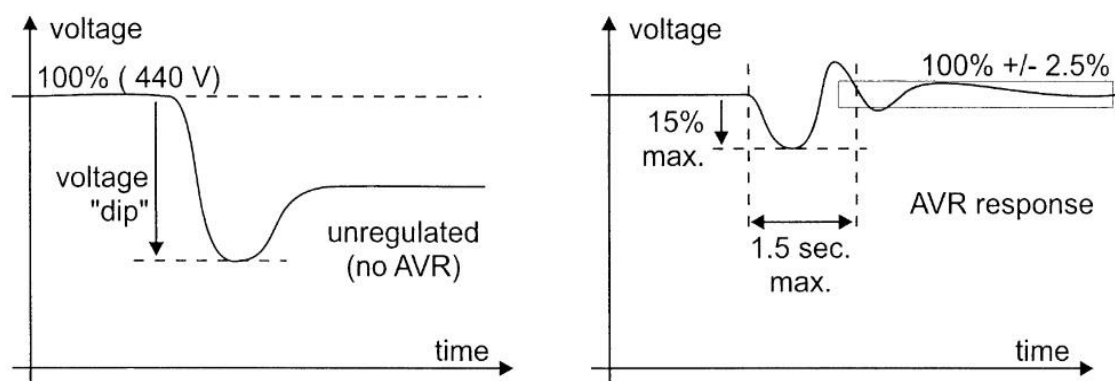
Σχήμα 3.6.: Πραγματικό τριφασικό κύκλωμα σύνθετης (compound) διέγερσης (πηγή: Hall, 1999, σελ. 67)

3.2.2. Αυτόματη ρύθμιση της τάσης (automatic voltage regulation)

Απότομη αύξηση του φορτίου μίας γεννήτριας (για παράδειγμα λόγω εκκίνησης κάποιου κινητήρα), προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή της τάσης εξόδου της γεννήτριας. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει εξαιτίας μίας εσωτερικής πτώσης της τάσης στα τυλίγματα της γεννήτριας και είναι γνωστό ως “βύθιση τάσης” (voltage dip or sag). Ένα μη – ρυθμιζόμενο σύστημα διέγερσης δεν μπορεί να σταθεί ικανοποιητικά στις γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα πλοία, εξαιτίας των συχνών μεταβολών που προκαλούνται στην τάση από τις διακυμάνσεις της ζήτησης του φορτίου. Για τον λόγο αυτόν, απαιτείται αυτόματη ρυθμιστική διάταξη (AVR) για την γρήγορη διόρθωση τέτοιων μεταβολών της τάσης.

Ο AVR ελέγχει την τάση της γεννήτριας σε ποσοστό μέχρι $\pm 2.5\%$ της ονομαστικής τιμής της, σε όλο το εύρος των φορτίων. Αυτή η ρύθμιση καλείται “ρύθμιση τάσης μόνιμης κατάστασης” (steady – state voltage regulation). Η βύθιση της τάσης σε μεταβατικές συνθήκες, συνήθως φτάνει μέχρι 15% για μία δεδομένη απότομη μεταβολή του φορτίου, με χρόνο ανάκτησης της αρχικής τάσης μέχρι 1.5 δευτερόλεπτα (Hall, 1999). Σε ειδικές περιπτώσεις, όπου μπορεί να συμβεί ασυνήθιστα μεγάλη αύξηση του φορτίου (για παράδειγμα λόγω λειτουργίας γερανών βαρέων φορτίων), τα όρια απόδοσης της γεννήτριας και του AVR μπορεί να χρειαστεί να επεκταθούν.

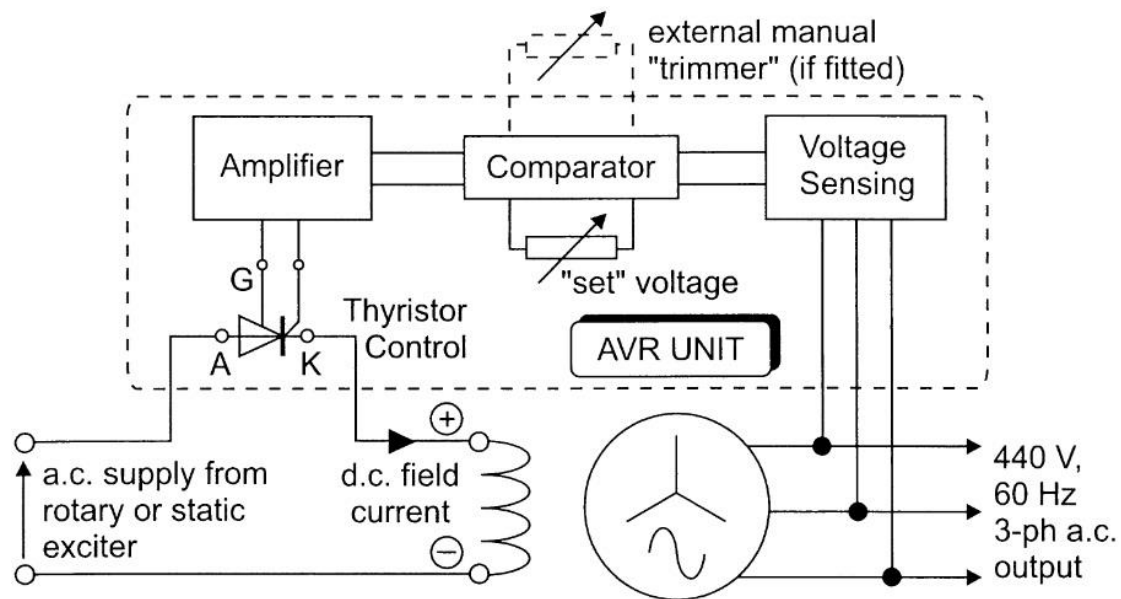
Ο AVR παρακολουθεί την τάση ακροδεκτών της γεννήτριας και δρα τροποποιώντας το ρεύμα διέγερσης, προκειμένου να διατηρεί την τάση στην επιθυμητή τιμή. Μερικές φορές, ένας χειροκίνητος ρυθμιστής (manual trimmer regulator) μπορεί να βρίσκεται τοποθετημένος στον πίνακα ελέγχου της γεννήτριας, έτσι ώστε να μπορεί να οριστεί η προεπιλεγμένη τιμή (set value) της τάσης, για παράδειγμα στα 440 V (Hall, 1999). Πιο σύνηθες φαινόμενο είναι το ποτενσιόμετρο για τη ρύθμιση της τάσης (voltage trimmer potentiometer) να βρίσκεται στην κάρτα ελέγχου του AVR, οπότε και είναι μη – προσβάσιμο για τον χειριστή.



Σχήμα 3.7.: Απόκριση γεννήτριας στη μεταβολή της τάσης της με και χωρίς ύπαρξη AVR (πηγή: Hall, 1999, σελ. 68)

Το κύκλωμα ελέγχου για έναν σύγχρονο AVR αποτελείται από μετασχηματιστές, ανορθωτές, τρανζίστορ, διόδους κατάρρευσης (zener diodes) και θύριστορ (thyristors). Τα στοιχεία αυτά, τοποθετούνται σε μία ή περισσότερες κάρτες κυκλώματος, είτε εντός του πίνακα ελέγχου είτε σε σημείο τοπικά της γεννήτριας. Παρότι ο σχεδιασμός του

κυκλώματος ελέγχου του AVR ποικίλλει ανάλογα με τον κατασκευαστή, το βασικό σχεδιάγραμμά του είναι εκείνο που απεικονίζεται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8.: Κύκλωμα ελέγχου AVR (πηγή: Hall, 1999, σελ. 69)

Η μονάδα ανίχνευσης της τάσης (voltage sensing unit) μετασχηματίζει υποβιβάζοντας, ανορθώνει και εξομαλύνει το σήμα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου της γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό, παράγεται ένα χαμηλό σήμα συνεχούς τάσης, το οποίο είναι ανάλογο με την αντίστοιχη εναλλασσόμενη τάση της γεννήτριας. Αυτό το πραγματικό σήμα συγκρίνεται με μία ομάδα τιμών συνεχών τάσεων αναφοράς, που παράγονται από ένα κύκλωμα αποτελούμενο από διόδους zener και αντιδράσεις. Από τον συγκριτή (comparator) παράγεται ως έξοδος ένα σήμα σφάλματος (error signal), το οποίο με τη σειρά του ενισχύεται και έτσι μπορεί να κατευθύνει τη λειτουργία των θύριστορ ρύθμισης του κυκλώματος διέγερσης (field circuit). Το θύριστορ αποτελεί έναν ηλεκτρονικό διακόπτη ταχείας αντίδρασης, ελεγχόμενο από ένα σήμα τάσης μέσω του ακροδέκτη πύλης του (gate terminal). Παράλληλα, το θύριστορ έχει την ικανότητα να ανορθώνει και να ρυθμίζει το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας. Επιπρόσθετα τμήματα και υπο – κυκλώματα που περιλαμβάνονται στον AVR εξασφαλίζουν:

- Σύντομο χρόνο απόκρισης σε συνδυασμό με σταθερότητα της τάσης.
- Λογική κατανομή του ρεύματος (φορτίου) και της αέργου ισχύος μεταξύ των γεννητριών, όταν αυτές λειτουργούν παράλληλα.
- Προστασία έναντι υπερβολικά υψηλών ή χαμηλών τάσεων.

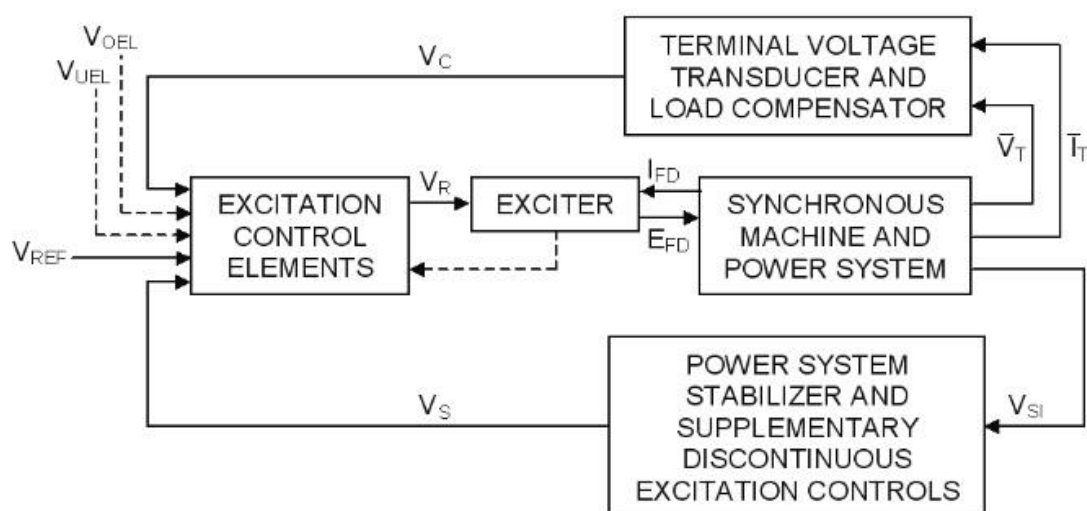
Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ενός AVR είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και περιλαμβάνει μερικές προεπιλεγμένες μεταβλητές αντιστάσεις για τον έλεγχο της ευαισθησίας (sensitivity), του μόνιμου σφάλματος εξαιτίας της μεταβολής του φορτίου (offset error) και της σταθερότητας του συστήματος (stability) (έλεγχος PID, δηλαδή Proportional, Integral and Differential control). Αυτές οι παράμετροι ρυθμίζονται και καθορίζονται κατά τη διάρκεια δοκιμών της γεννήτριας, με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης και σταθερής λειτουργίας της.

Έλεγχοι λειτουργίας του AVR, όπως υποδεικνύονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή, αποτελούνται από μετρήσεις συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης σε εγκατεστημένα σημεία εξέτασης. Αυτές οι μετρήσεις συγκρίνονται στη συνέχεια με αντίστοιχες τιμές που είχαν αξιολογηθεί ως αποδεκτές κατά τη διάρκεια προηγούμενων δοκιμαστικών της γεννήτριας. Ο τύπος και το εύρος λειτουργίας του βολτόμετρου που χρησιμοποιείται στις δοκιμές, συνήθως ορίζεται ειδικά για κάθε δοκιμή.

Τα περισσότερα πλοία είναι εφοδιασμένα με εφεδρική μονάδα AVR ή με εφεδρικές κάρτες, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης σε περίπτωση βλάβης. Η αλλαγή του AVR θα πρέπει να επιχειρείται μόνον εφόσον η γεννήτρια βρίσκεται εκτός λειτουργίας και έχει εξασφαλιστεί ότι δεν πρόκειται να τεθεί με οποιονδήποτε τρόπο σε λειτουργία προτού ολοκληρωθούν οι εργασίες αντικατάστασης. Τα επίπεδα του ρεύματος διέγερσης μετά την τοποθέτηση του καινούριου AVR θα πρέπει να ελεγχθούν με δοκιμές στα κατάλληλα σημεία. Το ίδιο ισχύει και για τη λειτουργία του χειροκίνητου ρυθμιστή, εφόσον υπάρχει. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με τη γεννήτρια να λειτουργεί χωρίς φορτίο, προτού επιχειρηθεί ο συγχρονισμός με τον ζυγό (bus – bar). Όταν το φορτίο μοιράζεται σε περισσότερες από μία γεννήτριες, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, η (κατά προσέγγιση) ίση κατανομή του φορτίου (ρεύματος) ή της αέργου ισχύος μεταξύ των γεννητριών συνιστά ένδειξη σωστής λειτουργίας του AVR.

3.2.3. Δομικό διάγραμμα συστήματος διέγερσης σύγχρονης μηχανής

Το γενικό δομικό διάγραμμα λειτουργίας (functional block diagram) του σχήματος 3.9., απεικονίζει διάφορα υποσυστήματα διέγερσης των σύγχρονων μηχανών. Τέτοια υποσυστήματα μπορεί να περιλαμβάνουν μία διάταξη μέτρησης της τάσης ακροδεκτών (terminal voltage transducer) και έναν αντισταθμιστή φορτίου (load compensator), στοιχεία ελέγχου της διέγερσης (excitation control elements), μία διεγέρτρια (exciter) και σε αρκετές περιπτώσεις έναν σταθεροποιητή ισχύος του συστήματος (Power System Stabilizer – PSS). Μερικά συστήματα μπορεί να είναι εφοδιασμένα, επιπλέον, με συμπληρωματικό ασυνεχή έλεγχο της διέγερσης (discontinuous excitation control). Μοντέλα για όλες αυτές τις λειτουργίες παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στη συνέχεια.



Σχήμα 3.9.: Δομικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου της διέγερσης σύγχρονων μηχανών
(πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 3)

Ένα σύστημα ελέγχου διέγερσης (Excitation Control System – ECS) με τη δομή που φαίνεται στο σχήμα 3.9., συνιστά ένα σύστημα ελέγχου με ανατροφοδότηση (feedback) που περιλαμβάνει τόσο τη σύγχρονη μηχανή όσο και το σύστημα διέγερσης. Συνεπώς, ο όρος χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής και του συστήματος διέγερσης σε σύζευξη με το δίκτυο ισχύος από τη λειτουργία του συστήματος διέγερσης μόνον. Σήματα ελέγχου που μπορεί να υπάρχουν προαιρετικά σε ένα τέτοιο σύστημα, όπως είναι εκείνα για τον σταθεροποιητή ισχύος του συστήματος, τον περιοριστή υπερδιέγερσης και υποδιέγερσης, τον σταθεροποιητή διέγερσης του συστήματος, την

ανατροφοδότηση του ρεύματος διέγερσης και το ρεύμα του στάτη για την αντιστάθμιση φορτίου, αναπαρίστανται με διακεκομμένες γραμμές.

Στη συνέχεια γίνεται μία σύντομη επεξήγηση των βασικών υποσυστημάτων του συστήματος διέγερσης του σχήματος 3.9.:

Διάταξη μέτρησης τάσης ακροδεκτών και αντισταθμιστής φορτίου:

Αυτό το υποσύστημα μετράει το σήμα της εναλλασσόμενης τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας, το ανορθώνει και το φιλτράρει σε συνεχή ποσότητα και στη συνέχεια το συγκρίνει με κάποιες τιμές αναφοράς, ενώ μπορεί να παρέχεται, επιπλέον, και αντιστάθμιση φορτίου για τη ρύθμιση της τάσης σε κάποιο σημείο διαφορετικό από εκείνο των ακροδεκτών της γεννήτριας (remote point).

Διεγέρτρια: Παρέχει το απαραίτητο συνεχές ρεύμα προς το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Η συνήθης διαβάθμιση ισχύος μίας διεγέρτριας κυμαίνεται ανάμεσα στα 2.0 – 3.5 kW/MVA ισχύος της γεννήτριας, για παράδειγμα σε μία σύγχρονη γεννήτρια των 600 MVA το σύστημα διέγερσης θα πρέπει να μπορεί να παράσχει ισχύ 1.2 με 2.1 MW (Phase to Phase, 2016).

Στοιχεία ελέγχου διέγερσης: Ελέγχουν την τιμή εξόδου της διεγέρτριας και σαν επακόλουθο την επιθυμητή τιμή της παραγόμενης τάσης και της αέργου ισχύος. Η μοντελοποίηση των συστημάτων διέγερσης κατά το πρότυπο 421.5 (2005) του IEEE περιλαμβάνει μόνον γραμμικούς (linear) ελεγκτές (P, PI ή PID), καθώς είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε πρακτικές εφαρμογές. Σε αυτό το υποσύστημα, περιλαμβάνονται λειτουργίες που αφορούν τόσο τη ρύθμιση όσο και τη σταθεροποίηση της διέγερσης.

Σταθεροποιητής ισχύος του συστήματος και ασυνεχής έλεγχος διέγερσης: Παρέχει ένα επιπλέον σήμα εισόδου προς τον ελεγκτή με σκοπό την απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος ισχύος. Πιθανή χρήση ασυνεχούς ελέγχου διέγερσης ενισχύει τη σταθερότητα του συστήματος ύστερα από μεγάλες μεταβατικές διαταραχές.

Περιοριστές υπερδιέγερσης και υποδιέγερσης: Ο περιοριστής υπερδιέγερσης (Over – Excitation Limiter or OEL), προσφέρει προστασία έναντι υπερθέρμανσης εξαιτίας υψηλών τιμών του ρεύματος διέγερσης, ενώ ο περιοριστής υποδιέγερσης (Under – Excitation Limiter

οι UEL) δρα ενισχύοντας την διέγερση προκειμένου να εξασφαλίζεται η ικανοποιητική λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, κάθε ένα από τα μοντέλα συστημάτων διέγερσης, υποδεικνύει πώς θα πρέπει να συνδέονται κανονικά τα σήματα εξόδου τέτοιων περιοριστών (συμβολίζονται με V_{OEL} και V_{UEL}) με το υπόλοιπο κύκλωμα του συστήματος διέγερσης. Ειδικότερα, το σήμα εξόδου του UEL μπορεί να αποτελέσει είσοδο για το σύστημα διέγερσης σε διάφορα σημεία του, είτε ως είσοδος σε κόμβους άθροισης (summing input) είτε ως είσοδος πύλης (gated input), αλλά για κάθε εφαρμογή του μοντέλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος μόνον σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Αντίστοιχα, κάποια μοντέλα παρέχουν πύλη, μέσω της οποίας το σήμα εξόδου του OEL, που εναλλακτικά μπορεί να αναφέρεται ολογράφως και ως περιοριστής τάσης ακροδεκτών (terminal voltage limiter), μπορεί να εισέρχεται στον βρόχο ελέγχου του ρυθμιστή.

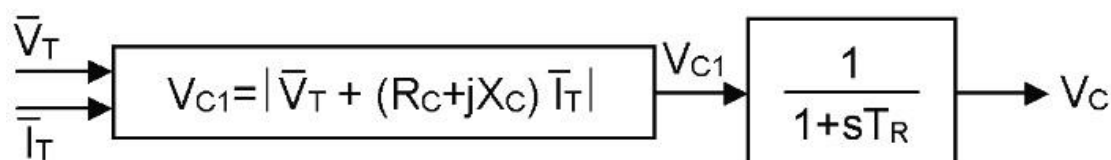
Κατά την εφαρμογή όλων των μοντέλων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στον χειρισμό των μηδενικών τιμών των παραμέτρων τους. Για κάποιες παραμέτρους, πιθανή μηδενική τους τιμή μπορεί να επιτρέπει την παράκαμψη ακόμη και ολόκληρων τμημάτων του δομικού διαγράμματος ενός μοντέλου.

Υπενθυμίζεται, ότι υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες συστημάτων διέγερσης, ανάλογα με τον τύπο της πηγής ισχύος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του συνεχούς ρεύματος διέγερσης (IEEE Std 421.5, 2005):

- i) Συστήματα διέγερσης τύπου DC, όπου χρησιμοποιείται γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μαζί με συλλέκτη ως πηγή ισχύος του συστήματος διέγερσης.
- ii) Συστήματα διέγερσης τύπου AC, όπου χρησιμοποιείται εναλλακτήρας σε συνδυασμό με στατικούς ή περιστρεφόμενους ανορθωτές για την παραγωγή του συνεχούς ρεύματος που απαιτείται για το πεδίο διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.
- iii) Συστήματα διέγερσης τύπου ST (static), στα οποία η ισχύς διέγερσης παρέχεται μέσω μετασχηματιστών ή βοηθητικών τυλιγμάτων της γεννήτριας και ανορθωτών.

3.2.4. Μοντελοποίηση διάταξης μέτρησης τάσης και αντισταθμιστή φορτίου σύγχρονης γεννήτριας

Το δομικό διάγραμμα της διάταξης μέτρησης τάσης και του αντισταθμιστή φορτίου φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η μοντελοποίηση αυτών των στοιχείων είναι κοινή για όλα τα μοντέλα συστημάτων διέγερσης που περιγράφονται στο πρότυπο IEEE Std 421.5 (2005). Γίνεται αντιληπτό, ότι για μερικά συστήματα, πιθανώς να υπάρχουν ξεχωριστές και διαφορετικές χρονικές σταθερές σχετικές με τις λειτουργίες της μέτρησης τάσης και της αντιστάθμισης φορτίου. Παρόλα αυτά, αυτή η διάκριση δεν υιοθετείται στην παρούσα μελέτη, όπου μόνο μία χρονική σταθερά, η T_R , χρησιμοποιείται για τον συνδυασμό του σήματος μέτρησης τάσης και αντιστάθμισης.



Σχήμα 3.10.: Στοιχεία διάταξης μέτρησης τάσης ακροδεκτών και (προαιρετικής) αντιστάθμισης φορτίου (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 4)

Όταν δεν χρησιμοποιείται αντιστάθμιση φορτίου ($R_C = X_C = 0$), το δομικό διάγραμμα του σχήματος 3.10 απλοποιείται σε ένα απλό κύκλωμα μέτρησης της τάσης ακροδεκτών. Η τερματική τάση της σύγχρονης γεννήτριας μετριέται και συνήθως μετατρέπεται σε ποσότητα συνεχούς ρεύματος (dc). Καθώς το φιλτράρισμα του σήματος που πραγματοποιείται από την εν λόγω βαθμίδα του συστήματος διέγερσης ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο, συνήθως παραλείπεται κατά τη μοντελοποίηση και τελικά θεωρείται ότι περιέχεται στη χρονική σταθερά T_R . Για αρκετά συστήματα, αυτή η χρονική σταθερά είναι πολύ μικρή και καλό θα ήταν η τιμή της να θεωρείται μηδενική (IEEE Std 421.5, 2005).

Το σήμα εξόδου της διάταξης μέτρησης της τάσης ακροδεκτών, που συμβολίζεται με V_C , συγκρίνεται με μία τιμή αναφοράς που εκφράζει την επιθυμητή τερματική τάση της γεννήτριας. Το ισοδύναμο σήμα αναφοράς που παράγεται από τον AVR, V_{REF} , υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να ικανοποιεί τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας. Συνεπώς, θα λαμβάνει μία μοναδική τιμή, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας που μελετάται κάθε φορά. Το παραγόμενο

σήμα σφάλματος ενισχύεται, προκειμένου να είναι ικανό να εξασφαλίζει ότι η τάση του πεδίου διέγερσης και συνεπώς η τάση ακροδεκτών ικανοποιούν τις συνθήκες λειτουργίας στη μόνιμη κατάσταση. Χωρίς αντιστάθμιση φορτίου, το σύστημα διέγερσης επιχειρεί να διατηρήσει την τάση ακροδεκτών στο επίπεδο που καθορίζει το σήμα αναφοράς.

Όταν είναι επιθυμητή η αντιστάθμιση, οι παράμετροι R_C και X_C παίρνουν τις κατάλληλες τιμές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή της R_C είναι αμελητέα. Οι μεταβλητές εισόδου, δηλαδή η τάση και το ρεύμα της σύγχρονης γεννήτριας, θα πρέπει να είναι σε μορφή στρεφόμενων μιγάδων (phasors) για τους υπολογισμούς του αντισταθμιστή. Προσοχή πρέπει να δίνεται στο σύστημα ανά μονάδα (per unit – pu) που χρησιμοποιείται, καθώς πρέπει να είναι το ίδιο για τις παραμέτρους αντιστάθμισης και για τη σύγχρονη γεννήτρια.

Χρησιμοποιούνται, γενικά, δύο τύποι αντιστάθμισης φορτίου:

i) Όταν δύο σύγχρονες γεννήτριες είναι μαζί συνδεδεμένες στον ίδιο ζυγό, χωρίς να παρεμβάλλεται σύνθετη αντίσταση μεταξύ τους, ο αντισταθμιστής χρησιμοποιείται με σκοπό τη δημιουργία τεχνητής σύνθετης αντίστασης στη μεταξύ τους διασύνδεση, έτσι ώστε οι γεννήτριες να μοιράζονται κατάλληλα την άεργο ισχύ. Αυτή η διαδικασία αντιστοιχεί στην επιλογή ενός σημείου ρύθμισης εντός τη σύγχρονης γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι R_C και X_C λαμβάνουν θετικές τιμές.

ii) Όταν μία μόνο σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη στο σύστημα μέσω σημαντικής σύνθετης αντίστασης, ή όταν δύο ή περισσότερες γεννήτριες είναι συνδεδεμένες μέσω διαφορετικού μετασχηματιστή η κάθε μία, πιθανώς να είναι επιθυμητή η ρύθμιση της τάσης σε κάποιο σημείο εκτός των ακροδεκτών της γεννήτριας. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι επιθυμητή η αντιστάθμιση της πώσης τάσης στην σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή ανύψωσης, ούτως ώστε να διατηρείται σταθερή στον ζυγό του δικτύου που συνδέεται ο σταθμός παραγωγής. Στην περίπτωση αυτή, οι παράμετροι R_C και X_C λαμβάνουν αρνητικές τιμές.

Το σήμα ανατροφοδότησης του AVR μπορεί να περιλαμβάνει εισόδους από άλλες σύγχρονες γεννήτριες, όταν οι γεννήτριες είναι συνδεδεμένες μαζί σε ζυγό χαμηλής τάσης και μοιράζονται έναν κοινό μετασχηματιστή

στο τερματικό άκρο τους. Η γενική μορφή του σήματος ανατροφοδότησης του AVR για τη μονάδα (unit) 1, που συμβολίζεται ως V_{C1} , αναγράφεται στη σχέση (3.2):

$$V_{C1} = [V_T + (R_{C11} + jX_{C11})I_{T1} + (R_{C12} + jX_{C12})I_{T2}] \quad (3.2)$$

όπου

V_T : το phasor της εναλλασσόμενης τάσης, κοινό και για τις δύο γεννήτριες

I_{Ti} : το εναλλασσόμενο ρεύμα που παράγεται από τη γεννήτρια i

R_{Cij} : η συνιστώσα ωμικής αντίστασης της αντιστάθμισης της γεννήτριας i για ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεννήτρια j

X_{Cij} : η συνιστώσα επαγωγικής / χωρητικής αντίδρασης της αντιστάθμισης της γεννήτριας i για ροή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεννήτρια j

Οι δείκτες συσχετίζουν τα σήματα με την εκάστοτε γεννήτρια. Ο δείκτης i υποδεικνύει τη μονάδα (πχ. εδώ μονάδα 1) στην οποία συνδέεται η αντιστάθμιση φορτίου, ενώ ο δείκτης j δείχνει από ποια πηγή (γεννήτρια) παράγεται το σήμα του ρεύματος προς τον αντισταθμιστή.

Για την απλοποίηση των υπολογισμών, η συνιστώσα της ωμικής αντίστασης της αντιστάθμισης μπορεί να θεωρηθεί ίση με μηδέν, οπότε το σήμα του ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες, όπως φαίνεται στη σχέση 3.3:

$$I_T = I_P - jI_Q \quad (3.3)$$

Το ρεύμα I_P αντιστοιχεί στη συνιστώσα του ρεύματος που βρίσκεται σε φάση με την τάση ακροδεκτών και επομένως αντιστοιχεί στη συνιστώσα εκείνη που είναι υπεύθυνη για τη ροή ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια προς το δίκτυο. Αντίστοιχα, το ρεύμα I_Q αντιστοιχεί στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος. Όταν το ρεύμα που εξέρχεται από τη γεννήτρια επιπορεύεται (lags) της τάσης, η άεργος συνιστώσα του ρεύματος, I_Q , και η αντίστοιχη άεργος ισχύς, Q , λαμβάνουν θετικές τιμές. Για σχετικά σταθερή τιμή της τάσης ακροδεκτών (για παράδειγμα για μεταβολές όχι μεγαλύτερες από μερικές ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με την ονομαστική τιμή), το πλάτος της ενεργού και της αέργου συνιστώσας του ρεύματος θα είναι ίσο με την παραγόμενη ενεργό και άεργο ισχύ από τη

γεννήτρια αντίστοιχα, όταν τα μεγέθη ισχύος αυτά είναι εκφρασμένα σύμφωνα με το σύστημα pu.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η εξίσωση (3.2) μπορεί πλέον να γραφτεί ως εξής:

$$V_{C1} = |(V_T + X_{C11}I_{Q1} + X_{C12}I_{Q2}) + j(X_{C11}I_{P1} + X_{C12}I_{P2})| \quad (3.4)$$

$$\approx (V_T + X_{C11}I_{Q1} + X_{C12}I_{Q2})$$

Η τελευταία προσέγγιση στη σχέση (3.4) οφείλεται στο γεγονός ότι αλλαγές στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος θα έχουν πολύ μικρή επίδραση στο πλάτος της αντισταθμισμένης τάσης. Στα νεώτερα συστήματα, η αλγεβρική εξίσωση της σχέσης (3.4) αποτελεί την ακριβή αναπαράσταση του σήματος ανατροφοδότησης του AVR, καθώς η άεργος συνιστώσα αναλύεται και πολλαπλασιάζεται με τις παραμέτρους αντιστάθμισης και τελικά συνδυάζεται με το σήμα της τάσης ακροδεκτών.

Αναφορικά με την εξίσωση (3.4), όταν η επιλεγμένη αντιστάθμιση είναι θετική και η άεργος συνιστώσα του ρεύματος επιπορεύεται της τάσης, η αντισταθμισμένη τάση V_{C1} θα είναι μεγαλύτερη από την τερματική τάση V_T . Όταν η τιμή της τάσης που δέχεται ο AVR ως είσοδο ανατροφοδότησης είναι μεγαλύτερη, το αποτέλεσμα είναι μία μείωση της διέγερσης. Με βάση αυτό το γεγονός, τα είδη της αντιστάθμισης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

- Όταν $X_{C11} > 0$, $X_{C12} = 0$: Η περίπτωση αυτή, αναφέρεται στην ξένη βιβλιογραφία ως “reactive droop compensation”. Η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας παρουσιάζει μειούμενη (drooping) συμπεριφορά καθώς αυξάνεται η παραγόμενη άεργος ισχύς.
- Όταν $X_{C11} < 0$, $X_{C12} = 0$: Η περίπτωση αυτή, αναφέρεται στην ξένη βιβλιογραφία ως “line – drop compensation”. Η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας παρουσιάζει αυξανόμενη συμπεριφορά καθώς αυξάνεται η παραγόμενη άεργος ισχύς.
- Όταν $X_{C11} \neq 0$, $X_{C12} \neq 0$: Η περίπτωση αυτή, αναφέρεται στην ξένη βιβλιογραφία ως “cross – current compensation”, αν και η προτιμώμενη ορολογία είναι “reactive differential compensation”.

Μέσω της προσεκτικής επιλογής των δύο παραμέτρων (για παράδειγμα $X_{C12} = -X_{C11}$), αυτή η μορφή αντιστάθμισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξουδετέρωση της πτωτικής χαρακτηριστικής της τάσης της περίπτωσης drooping, επιβάλλοντας τον επιμερισμό της αέργου συνιστώσας του ρεύματος μεταξύ σύγχρονων γεννητριών που μοιράζονται κοινή σύνδεση χαμηλής τάσης.

3.3. Μοντελοποίηση συστημάτων διέγερσης τύπου AC

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η πλέον διαδεδομένη μέθοδος διέγερσης στις σύγχρονες γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στις ναυτικές εφαρμογές, είναι τύπου AC, δηλαδή το συνεχές ρεύμα της διέγερσης παράγεται από έναν εναλλακτήρα σε συνδυασμό με ανορθωτική διάταξη, περιστρεφόμενη ή στατική. Γι' αυτόν τον λόγο, τα μοντέλα που παρουσιάζονται στη συνέχεια ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, αφού παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τις εφαρμογές που αφορούν την παρούσα μελέτη.

Τα μοντέλα συστημάτων διέγερσης που αναλύονται, τα οποία περιέχονται στο πρότυπο του IEEE Std 421.5 (2005), είναι κατάλληλα για χρήση σε μελέτες σταθερότητας συστημάτων (system stability studies) μεγάλης κλίμακας. Σκοπός τους είναι να διευκολύνουν τη χρήση δεδομένων σχετικών με το πεδίο διέγερσης που προκύπτουν από δοκιμές, ως μέσο για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που χρησιμοποιούν. Τα μοντέλα αυτά, ωστόσο, είναι μειωμένης τάξης και δεν αντιπροσωπεύουν όλους τους βρόχους ελέγχου σε κανένα από τα επιμέρους υποσυστήματα. Σε μερικές περιπτώσεις, μάλιστα, τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα μπορεί να έχουν υποστεί σημαντική απλοποίηση, με αποτέλεσμα η δομή τους να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από εκείνη του πραγματικού φυσικού συστήματος. Επιπλέον, είναι κατάλληλα για αποκλίσεις συχνότητας μέχρι $\pm 5\%$ από την ονομαστική και για ταλαντώσεις συχνότητας μέχρι 3 Hz. Κάθε μοντέλο συνοδεύεται από έναν πίνακα με ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων του, κατάλληλες για τουλάχιστον μία εφαρμογή, αλλά όχι απαραίτητα χαρακτηριστικές για το εκάστοτε μοντέλο. Η κατάληξη "A" και "B" (για παράδειγμα AC1A, AC7B κλπ.), χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των μοντέλων, ανάλογα με το εάν εισήχθησαν πρώτη φορά ή τροποποιήθηκαν κατά το πρότυπο του IEEE Std 421.5 (1992) ή στην αναθεώρηση αυτού IEEE Std 421.5 (2005) αντιστοίχως.

3.3.1. Βασικά στοιχεία αναφορικά με τη μοντελοποίηση συστημάτων διέγερσης (τύπου AC)

Προτού παρουσιαστούν τα ολοκληρωμένα μοντέλα διέγερσης τύπου AC, σκόπιμο είναι να αναφερθούν κάποιες πρακτικές που χρησιμοποιούνται κατά τη χρήση τους (για παράδειγμα το σύστημα ανά μονάδα ή per unit – pu system) και να επεξηγηθούν οι βασικές συνιστώσες τους, ώστε ο αναγνώστης να έχει καλύτερη εικόνα και βαθύτερη κατανόηση του πλήρους συστήματος.

3.3.1.1. Το σύστημα ανά μονάδα (per unit or pu system)

Κατά τη μελέτη των συστημάτων των σύγχρονων μηχανών, τα διάφορα ρεύματα και οι τάσεις συνηθίζεται να εκφράζονται ως per unit ή εν συντομία pu μεταβλητές. Στο σύστημα pu που χρησιμοποιείται στο πρότυπο του IEEE Std 421.5 (2005), το οποίο υιοθετείται και στην παρούσα μελέτη, ως 1 pu τάση ακροδεκτών σύγχρονης μηχανής ορίζεται η ονομαστική τάση (rated voltage), ενώ αντίστοιχα ως 1 pu ρεύμα του στάτη ορίζεται το ονομαστικό ρεύμα (rated current). Ομοίως, 1 pu ρεύμα διέγερσης (field current) γεννήτριας, αντιστοιχεί στο ρεύμα που απαιτείται για την παραγωγή της ονομαστικής τάσης ακροδεκτών με βάση τη γραμμή διακένου (air – gap line), ενώ 1 pu τάση πεδίου διέγερσης (field voltage) θεωρείται η αντίστοιχη τάση διέγερσης (IEEE Committee Report, 1973).

Μεταξύ του μοντέλου του συστήματος διέγερσης και του αντίστοιχου μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας, πρέπει να υπάρχει διεπαφή (interface) τόσο στους ακροδέκτες του τυλίγματος διέγερσης όσο και σε εκείνους του στάτη. Τα σήματα που αθροίζονται με την pu τάση ακροδεκτών της σύγχρονης μηχανής στην είσοδο του AVR, πρέπει κατ' ανάγκη να κανονικοποιηθούν ως προς την ίδια βάση με αυτή. Ομοίως, το ρεύμα εξόδου της διεγέρτριας πρέπει να είναι εκφρασμένο στο pu σύστημα, ως προς τη βάση του ρεύματος πεδίου διέγερσης της σύγχρονης μηχανής και αντίστοιχα η τάση εξόδου της διεγέρτριας πρέπει να είναι σε pu ως προς τη βάση της τάσης πεδίου διέγερσης της σύγχρονης μηχανής. Πρέπει να σημειωθεί, ότι αυτές οι βάσεις τάσης και ρεύματος διέγερσης, μπορεί να διαφέρουν από εκείνες που χρησιμοποιούνται εσωτερικά στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής και

συνεπώς να απαιτείται μετατροπή της βάσης των δύο αυτών ποσοτήτων στα σημεία διεπαφής.

Η βάση της τάσης πεδίου διέγερσης στο συγκεκριμένο pu σύστημα, εξαρτάται άμεσα από τη βάση της αντίστασης του πεδίου. Μία θερμοκρασία αναφοράς του τυλίγματος διέγερσης είχε οριστεί, ανάλογα με την κλάση μόνωσης, στο πρότυπο ANSI C50.10. Στο πρότυπο του IEEE Std 421.1, ορίζονται δύο θερμοκρασίες στις οποίες μετριέται η βάση αντίστασης του τυλίγματος διέγερσης (75 °C και 100 °C), οι οποίες σχετίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας αντί για την μονωτική κλάση. Όταν πρόκειται να μοντελοποιηθεί ένα σύστημα διέγερσης, τόσο η βάση αντίστασης όσο και η θερμοκρασία στην οποία αυτή υπολογίζεται πρέπει να καθορίζονται. Έτσι, είναι δυνατός ο υπολογισμός μίας νέας τιμής για τη βάση αντίστασης, για οποιαδήποτε επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας, σύμφωνα με τις εξισώσεις του προτύπου του IEEE Std 115.

Στο παρελθόν, πολλές διαφορετικές βάσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για την κανονικοποίηση της τάσης εξόδου του ρυθμιστή τάσης. Παρόμοια συστήματα διέγερσης, με ουσιαστικά τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας, μπορεί να έχουν αρκετά διαφορετικές παραμέτρους ανάλογα με την επιλογή βάσης που γίνεται για το καθένα (IEEE Committee Report, 1968).

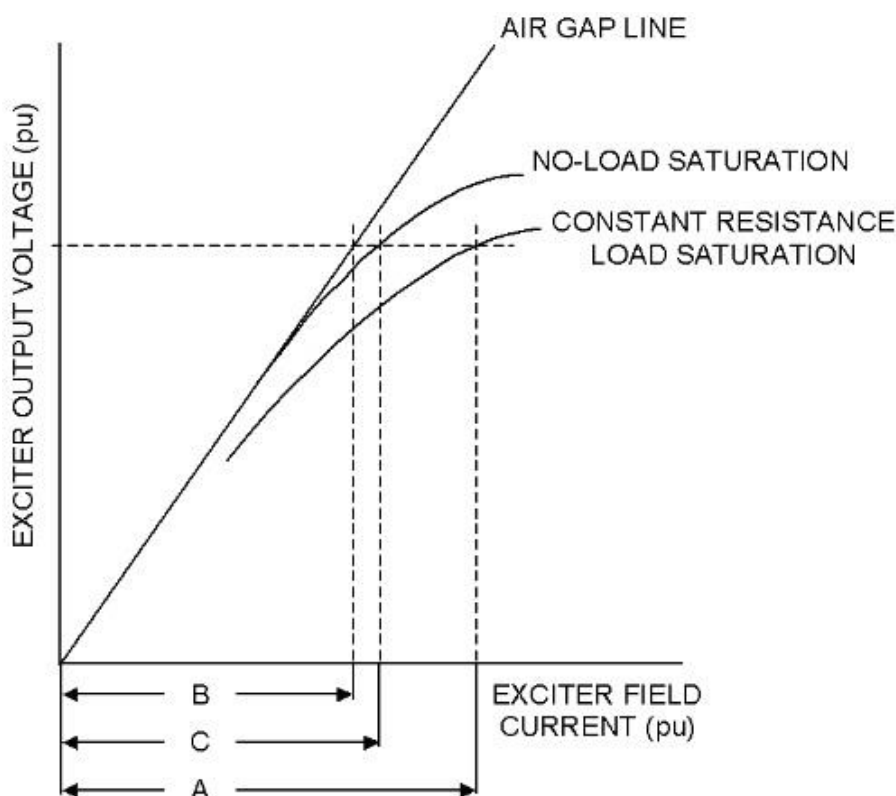
3.3.1.2. Κορεσμός της διεγέρτριας και επίδραση του φορτίου

Όταν αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης μίας σύγχρονης γεννήτριας, ενώ παράλληλα η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα παραμένει αμετάβλητη, αυξάνεται αντίστοιχα η μαγνητική ροή και συνεπώς η τάση ακροδεκτών της. Υπάρχει, όμως, μία κρίσιμη τιμή του ρεύματος διέγερσης, πάνω από την οποία παρατηρείται κορεσμός (saturation) του σιδηρομαγνητικού υλικού της γεννήτριας. Αυτό σημαίνει, ότι περαιτέρω αύξηση της τιμής του ρεύματος διέγερσης, οδηγεί σε ανεπαίσθητη αύξηση της μαγνητικής ροής του πεδίου διέγερσης και επομένως της τάσης ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας.

Η συνάρτηση κορεσμού της διεγέρτριας συμβολίζεται ως $S_E[E_{FD}]$, όπου E_{FD} είναι η τάση εξόδου της διεγέρτριας. Ορίζεται ως ένας πολλαπλασιαστής επί της pu τάσης εξόδου της διεγέρτριας,

συνυπολογίζοντας έτσι την απαιτούμενη αύξηση της διέγερσης που πρέπει να παράξει η διεγέρτρια εξαιτίας του φαινομένου του κορεσμού.

Στο σχήμα 3.11. απεικονίζεται η γενική μορφή της $S_E[E_{FD}]$. Για δεδομένη pu τάση εξόδου της διεγέρτριας, οι ποσότητες A , B και C που φαίνονται στο σχήμα ορίζονται ως η απαιτούμενη διέγερση (ρεύμα) από τη διεγέρτρια σε pu σύστημα, προκειμένου να παραχθεί η συγκεκριμένη τάση εξόδου, με βάση την καμπύλη κορεσμού φορτίου σταθερής αντίστασης (constant – resistance – load), τη γραμμή διακένου (air – gap line) και την καμπύλη κορεσμού χωρίς φορτίο (no – load) αντίστοιχα.



Σχήμα 3.11.: Χαρακτηριστικές καμπύλες κορεσμού της διεγέρτριας (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 50)

Η χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού σε συνθήκες φορτίου σταθερής αντίστασης, χρησιμοποιείται για τον ορισμό της S_E των διεγερτριών τύπου AC που περιγράφονται από το απλοποιημένο μοντέλο AC5A, το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια. Σε αυτή την περίπτωση, η $S_E[E_{FD}]$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (IEEE Std 421.5, 2005):

$$S_E[E_{FD}] = \frac{A-B}{B} \quad (3.5)$$

Σημειώνεται, ότι όταν η αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης της διεγέρτριας είναι σημαντικά διαφορετική από την επιλεγμένη βάση αντίστασης της διεγέρτριας του ρυ συστήματος, ίσως χρειαστεί επιπλέον ρύθμιση της τιμής της S_E , όπως υποδεικνύεται στο IEEE Committee Report (1981).

Η χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού χωρίς φορτίο, χρησιμοποιείται για τον ορισμό της $S_E[V_E]$ των μοντέλων των διεγερτριών τύπου AC (πλην του AC5A), όπου με V_E συμβολίζεται η τάση εξόδου της διεγέρτριας εναλλασσόμενου ρεύματος, στην οποία, όμως, δεν έχει συνυπολογιστεί η πτώση τάσης εξαιτίας των επαγωγικών αντιδράσεων των γραμμών τροφοδοσίας του εναλλασσόμενου ρεύματος της διεγέρτριας προς τον ανορθωτή. Στην περίπτωση αυτή, η $S_E[V_E]$ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (IEEE Std 421.5, 2005):

$$S_E[V_E] = \frac{C-B}{B} \quad (3.6)$$

Η χαρακτηριστική αυτή χρησιμοποιείται για τις διεγέρτριες εναλλασσόμενου ρεύματος με διάταξη ανόρθωσης, διότι εντός του μοντέλου συνυπολογίζεται η επίδραση πάνω στη διεγέρτρια της απομαγνήτισης, εξαιτίας της αντίδρασης του τυλίγματος επαγωγίμου, μέσω του συντελεστή απομαγνήτισης K_D , όπως και η πτώση τάσης εξαιτίας των επαγωγικών αντιδράσεων, οι οποίες παρεμβάλλονται στο κύκλωμα τροφοδοσίας ρεύματος μεταξύ της διεγέρτριας εναλλασσόμενου ρεύματος και του ανορθωτή.

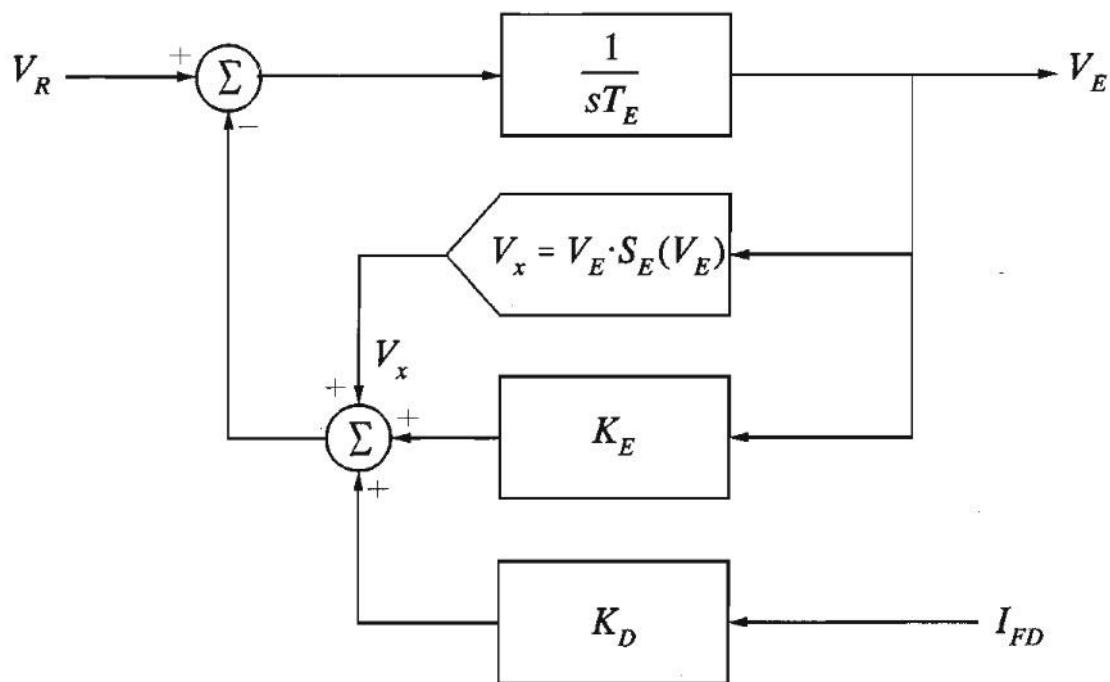
Διάφορα υπολογιστικά προγράμματα έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση των χαρακτηριστικών κορεσμού των διεγερτριών, βασιζόμενα σε διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα. Γενικά, η συνάρτηση κορεσμού μπορεί να οριστεί σε επαρκώς από δύο σημεία. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία που προτείνεται στηρίζεται στον καθορισμό δύο τιμών της τάσης V_E , στις οποίες υπολογίζεται η $S_E[V_E]$ και στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για κάποιο υπολογιστικό πρόγραμμα. Η μορφή των συναρτήσεων κορεσμού δεν μπορεί να οριστεί με ακρίβεια εδώ, καθώς εξαρτάται από το εκάστοτε υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται.

Από τη στιγμή που το φαινόμενο κορεσμού είναι πιο έντονο για υψηλότερες τιμές της τάσης V_E , η πρώτη τιμή για την οποία υπολογίζεται

η συνάρτηση κορεσμού, V_{E1} , θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στο άνω όριο της τάσης ανοικτού κυκλώματος της διεγέρτριας (open circuit ceiling voltage), ενώ η δεύτερη τιμή της τάσης, V_{E2} , θα πρέπει να είναι χαμηλότερη, συνήθως κοντά στο 75% της V_{E1} . Όταν παρέχονται δεδομένα σχετικά με τον κορεσμό, οι τάσεις V_{E1} και V_{E2} θα πρέπει να αναφέρονται μαζί με τα αντίστοιχα δεδομένα κορεσμού.

3.3.1.3. Μοντέλο διεγέρτριας τύπου AC (χωρίς την ανορθωτική διάταξη)

Στο σχήμα 3.12. απεικονίζεται το ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα μίας διεγέρτριας εναλλασσόμενου ρεύματος. Το μοντέλο δεν περιλαμβάνει το κύκλωμα ανόρθωσης του εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγει η διεγέρτρια, καθώς αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 3.12.: Δομικό διάγραμμα διεγέρτριας εναλλασσόμενου ρεύματος (χωρίς το κύκλωμα ανόρθωσης) (πηγή: Kundur, 1994, σελ. 354)

Στη συνέχεια, επεξηγούνται τα μεγέθη που αναγράφονται στο σχήμα 3.12:

V_R : η τάση εξόδου του αυτόματου ρυθμιστή τάσης

T_E : η χρονική σταθερά της διεγέρτριας, η οποία σχετίζεται με τον έλεγχο της τελευταίας

V_X : σήμα τάσης ανάλογο του κορεσμού της διεγέρτριας

K_E : σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο-διέγερση πεδίου

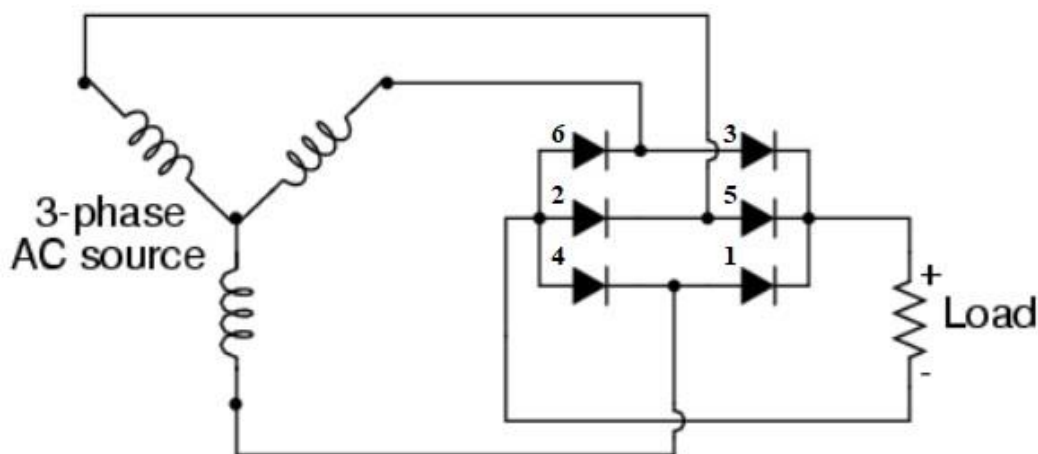
K_D : συντελεστής απομαγνήτισης, ο οποίος αποτελεί συνάρτηση των αντιδράσεων (reactances) του εναλλακτήρα διέγερσης

I_{FD} : το ρεύμα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας

V_E : η τάση εξόδου της διεγέρτριας, πριν την επίδραση της επαγωγικής αντίδρασης (inductive reactance or commutating inductance) της γραμμής τροφοδοσίας προς τον ανορθωτή

3.3.1.4. Ρύθμιση ανορθωτή (rectifier regulation)

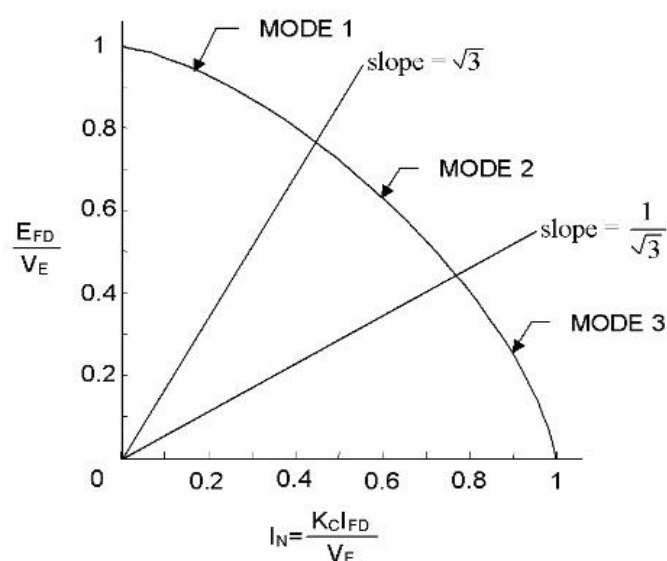
Για την ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος εξόδου της διεγέρτριας AC, χρησιμοποιείται συνήθως τριφασικό κύκλωμα ανορθωτή πλήρους κύματος σε διάταξη γέφυρας (three – phase full – wave bridge rectifier). Μία τέτοια διάταξη αποτελείται από έξι διόδους (ή άλλου είδους διακόπτες, για παράδειγμα θύριστορ), εκ των οποίων κάθε χρονική στιγμή μόνον οι δύο επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος διαμέσου αυτών και τροφοδοτούν το φορτίο, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση το τύλιγμα διέγερσης. Συγκεκριμένα, συνδυάζεται μία δίοδος της ομάδας (1, 3, 5) (upper group) με μία δίοδο της ομάδας (2, 4, 6) (lower group), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13. που ακολουθεί.



Σχήμα 3.13.: Τριφασικό κύκλωμα πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος με ανορθωτική διάταξη

Οποιαδήποτε πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα του ανορθωτή, χαρακτηρίζεται από εσωτερική σύνθετη αντίσταση, η οποία κατά κύριο λόγο αποτελεί επαγωγική αντίδραση. Αυτή η επαγωγική αντίδραση, καθυστερεί τη διαδικασία της εναλλαγής των ζευγών των διόδων του κυκλώματος του ανορθωτή, που τροφοδοτούν με το συνεχές ρεύμα της ανόρθωσης το τύλιγμα διέγερσης. Αυτή η διαδικασία εναλλαγής στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως “commutation”, γι’ αυτό και η εν λόγω επαγωγική αντίδραση συχνά συναντάται και ως “commutating inductance”. Επειδή λόγω της επαγωγικής αντίδρασης η εναλλαγή δεν πραγματοποιείται στιγμιαία, αλλά απαιτείται ένα χρονικό διάστημα ανάμεσα στον μηδενισμό του ρεύματος που διαρρέει δύο διόδους και στη σταθεροποίηση του ρεύματος, στην τιμή του φορτίου, που διαρρέει τις διόδους που τις διαδέχονται, παρατηρείται το φαινόμενο της υπερκάλυψης (commutation overlap) μεταξύ των δύο ζευγών των διόδων.

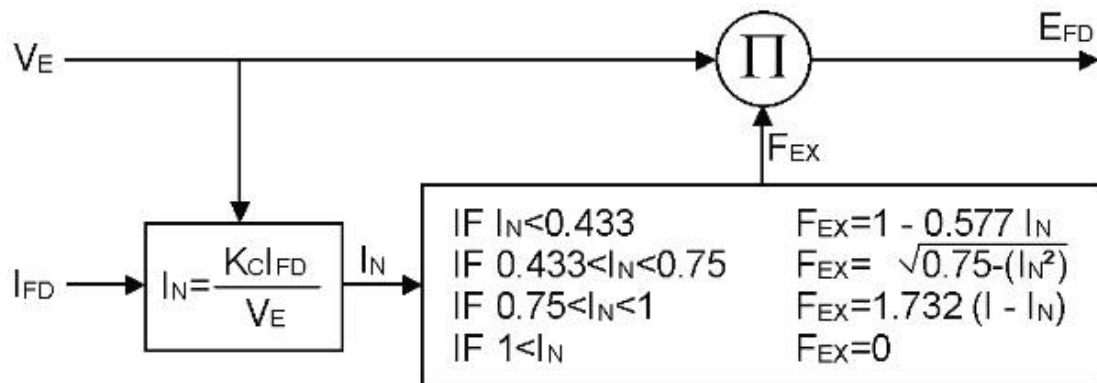
Το αποτέλεσμα του παραπάνω φαινομένου είναι η έντονα μη – γραμμική πτώση της μέσης τάσης εξόδου του ανορθωτή, όταν το ρεύμα φορτίου του ανορθωτή, δηλαδή το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας εν προκειμένω, αυξάνεται. Τα τριφασικά κυκλώματα γέφυρας πλήρους κύματος που χρησιμοποιούνται συνήθως, έχουν τρεις ξεχωριστές περιοχές λειτουργίας, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 3.14. Η τιμή του ρεύματος φορτίου του ανορθωτή καθορίζει τις εξισώσεις οι οποίες χαρακτηρίζουν κάθε μία από αυτές τις περιοχές λειτουργίας.



Σχήμα 3.14.: Χαρακτηριστική καμπύλη ρύθμισης ανορθωτή (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 52)

Στο παραπάνω σχήμα, το σύμβολο K_C εκφράζει τον συντελεστή φόρτισης του ανορθωτή, μέγεθος ανάλογο της επαγωγικής αντίδρασης της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ το σύμβολο I_N την κανονικοποιημένη τιμή του ρεύματος φορτίου της διεγέρτριας (όλα τα υπόλοιπα μεγέθη έχουν επεξηγηθεί στην προηγούμενη παράγραφο). Για μικρές τιμές του K_C , απαιτείται η μοντελοποίηση μόνο της πρώτης περιοχής λειτουργίας του σχήματος 3.14. (Mode 1). Επιπλέον, σημειώνεται ότι τα μεγέθη E_{FD} , I_{FD} , V_E και K_C που αναγράφονται στο εν λόγω σχήμα, είναι όλα εκφρασμένα σε σύστημα pu, έχοντας ως βάση τα μεγέθη του πεδίου διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.

Στο σχήμα 3.15. απεικονίζεται το δομικό διάγραμμα του συστήματος ρύθμισης του ανορθωτή, συνοδευόμενο από τις κατάλληλες εξισώσεις που περιγράφουν τις τρεις περιοχές του σχήματος 3.14, σαν συνάρτηση της πτώσης τάσης εξαιτίας της επαγωγικής αντίδρασης της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος. Σημειώνεται, ότι η τιμή του I_N δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τη μονάδα και εάν αυτό συμβεί για οποιονδήποτε λόγο, η τιμή του F_{EX} (βλ. σχήμα 3.15.) θα πρέπει να ληφθεί μηδενική (IEEE Std 421.5, 2005).



Σχήμα 3.15.: Δομικό διάγραμμα συστήματος ρύθμισης ανορθωτή και εξισώσεις ρύθμισης (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 52)

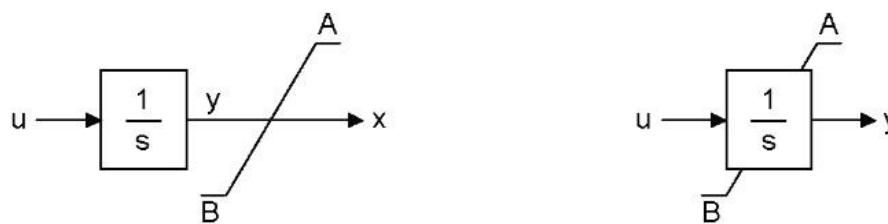
Συμπερασματικά, η τελική τάση εξόδου E_{FD} της διεγέρτριας, μπορεί να εξαχθεί από την εσωτερική τάση V_E του εναλλακτήρα διέγερσης, μειωμένη κατά την επίδραση της αντίδρασης του τυλίγματος επαγωγίμου της (παράγοντας $I_{FD}K_D$, βλ. προηγούμενη παράγραφο) και της ρύθμισης του ανορθωτή (παράγοντας F_{EX}).

3.3.1.5. Αναπαράσταση των οριακών τιμών ενός συστήματος διέγερσης στο δομικό διάγραμμα του μοντέλου του

Υπάρχουν, γενικά, δύο κατηγορίες περιοριστών που αναπαρίστανται στα μοντέλα συστημάτων διέγερσης, οι λεγόμενοι windup και non – windup περιοριστές. Στη συνέχεια, περιγράφεται η εφαρμογή των δύο αυτών κατηγοριών περιοριστών για τρία είδη δομικών μονάδων (blocks) που συναντώνται στα μοντέλα.

Απλός ολοκληρωτής (simple integrator)

Οι συναρτήσεις που ορίζουν τη λειτουργία των δύο τύπων ορίων, όπως εφαρμόζονται στην περίπτωση της δομικής μονάδας απλού ολοκληρωτή, απεικονίζονται στο σχήμα 3.16. Για να γίνει αντιληπτή η διαφορά μεταξύ των δύο ειδών περιοριστών, γίνεται η υπόθεση, ότι αρχικά η μεταβλητή εξόδου και στις δύο περιπτώσεις (δηλαδή η x για τον windup και η y για τον non – windup περιοριστή αντίστοιχα), έχει ως τιμή τον περιορισμό A ή B , δηλαδή βρίσκεται εκτός των ορίων του περιοριστή. Στην περίπτωση του windup περιοριστή, η μεταβλητή y , δηλαδή η έξοδος της δομικής μονάδας του ολοκληρωτή και είσοδος του περιοριστή, δεν περιορίζεται, επομένως η μεταβλητή εξόδου του περιοριστή x δεν μπορεί να τεθεί εκτός περιορισμού, έως ότου η μεταβλητή y λάβει τιμή εντός των ορίων A και B . Αντιθέτως, στην περίπτωση του non – windup περιοριστή, η μεταβλητή εξόδου y περιορίζεται και συνεπώς τίθεται εκτός περιορισμού αμέσως μετά την αλλαγή προσήμου της μεταβλητής εισόδου u , δηλαδή της χρονικής παραγώγου της μεταβλητής y , αφού η συνάρτηση μεταφοράς συνιστά απλή ολοκλήρωση.



$$dy/dt = u$$

If $A \geq y \geq B$, then $x = y$

If $y > A$, then $x = A$

If $y < B$, then $x = B$

If $A \geq y \geq B$, then $dy/dt = u$

If $y > A$, then dy/dt is set to 0

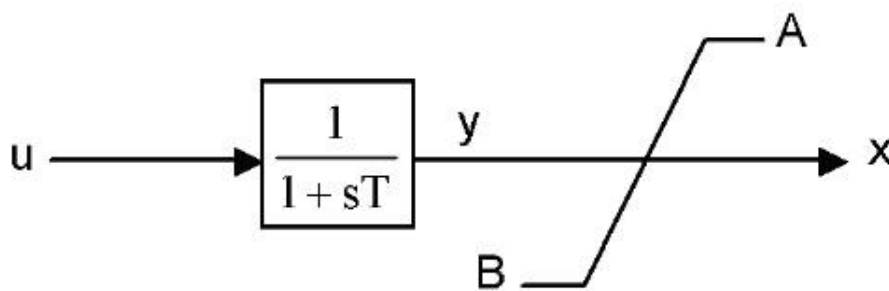
If $y < B$, then dy/dt is set to 0

Σχήμα 3.16.: Ολοκληρωτής με windup (αριστερά) και non – windup (δεξιά) περιοριστή (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 53)

Απλή χρονική σταθερά (simple time constant)

Στα σχήματα 3.17. και 3.18., περιγράφεται ο windup και ο non – windup περιορισμός αντίστοιχα, για μία δομική μονάδα μονής χρονικής σταθεράς. Σημειώνεται, ότι στην περίπτωση windup, η μεταβλητή y δεν περιορίζεται. Ως εκ τούτου, εάν η μεταβλητή εξόδου x αποκτήσει οριακή τιμή (A ή B), δεν μπορεί να λάβει τιμή μεταξύ των ορίων μέχρι η y να είναι επίσης εντός των ορίων.

Στην περίπτωση του non – windup περιορισμού, η μεταβλητή y περιορίζεται. Για να υπάρξει οριακή κατάσταση, όπου $y = A$ ή $y = B$, πρέπει η είσοδος u να υπερβεί τα όρια, δηλαδή να ισχύει $u > A$ ή $u < B$ αντιστοίχως. Ο περιοριστής παύει να δρα πάνω στη μεταβλητή εξόδου, αμέσως μόλις η μεταβλητή εισόδου u ξαναπερνάει στο εύρος τιμών εντός των ορίων A και B .



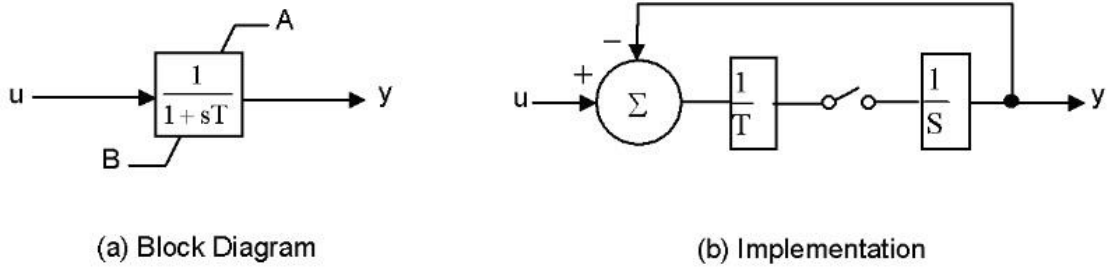
$$dy/dt = (u - y) / T$$

$$\text{If } B \leq y \leq A, \text{ then } x = y$$

$$\text{If } y > A, \text{ then } x = A$$

$$\text{If } y < B, \text{ then } x = B$$

Σχήμα 3.17.: Περιοριστής windup μονής χρονικής σταθεράς (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 54)



(a) Block Diagram

(b) Implementation

$$f = (u - y)/T$$

If $y = A$, and $f > 0$, then dy/dt is set to 0

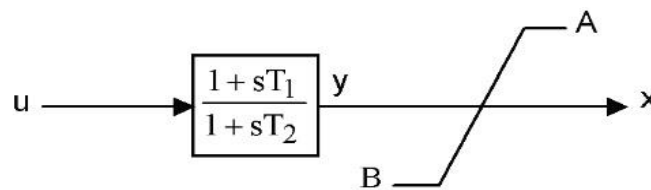
If $y = B$, and $f > 0$, then dy/dt is set to 0

Otherwise, $B < y < A$, and $dy/dt = f$

Σχήμα 3.18.: Περιοριστής non – windup μονής χρονικής σταθεράς (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 54)

Δομική μονάδα καθυστέρησης – προήγησης (lag – lead block)

Στο σχήμα 3.19., παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα και οι εξισώσεις που διέπουν έναν windup περιοριστή, ο οποίος εφαρμόζεται σε μία δομική μονάδα καθυστέρησης – προήγησης. Ομοίως, στο σχήμα 3.20., απεικονίζεται το δομικό διάγραμμα ενός non – windup περιοριστή για την ίδια δομική μονάδα, συνοδευόμενο από τις αντίστοιχες εξισώσεις και ένα συμπληρωματικό διάγραμμα στο οποίο αναλύεται ο τρόπος πραγματοποίησής του. Υπάρχουν και άλλα μοντέλα non – windup περιορισμού, όταν πρόκειται για δομικές μονάδες καθυστέρησης – προήγησης, ωστόσο το συγκεκριμένο θεωρείται ότι αντικατοπτρίζει με τη μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά των περισσότερων ηλεκτρονικών εφαρμογών των συναρτήσεων μεταφοράς καθυστέρησης – προήγησης (IEEE Std 421.5, 2005).



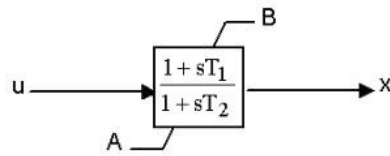
If $T_1 = T_2$, then $y = u$

If $B \leq y \leq A$, then $x = y$

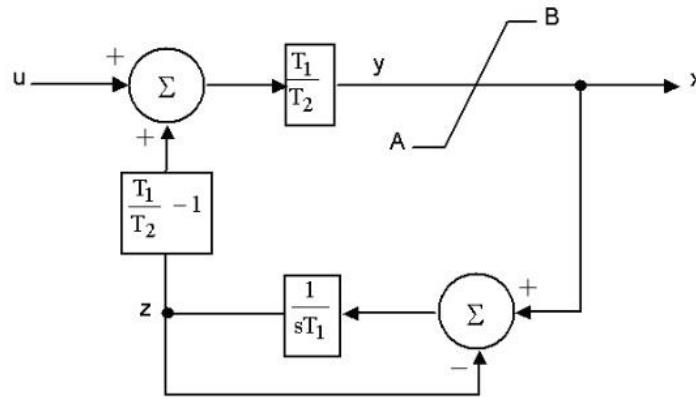
If $y > A$, then $x = A$

If $y < B$, then $x = B$

Σχήμα 3.19.: Περιοριστής windup δομικής μονάδας καθυστέρησης – προήγησης (lag – lead block) (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 55)



(a) Model



(b) Implementation

$$T_2 > T_1, T_1 > 0, T_2 > 0$$

If $y > A$, then $x = A$

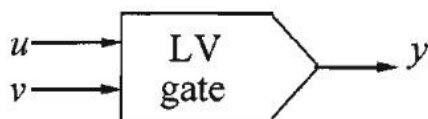
If $y < B$, then $x = B$

If $A \geq y \geq B$, then $x = y$

Σχήμα 3.20.: Περιοριστής non – windup δομικής μονάδας καθυστέρησης – προήγησης (lag – lead block) (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 55)

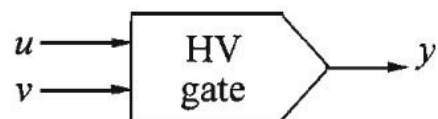
3.3.1.6. Συναρτήσεις πύλης (gating functions)

Οι συναρτήσεις πύλης ή απλά πύλες, αποτελούν δομικές μονάδες των μοντέλων με δύο εισόδους και μία έξοδο. Υπάρχουν δύο είδη πύλης: η πύλη χαμηλής τιμής (Low Value – LV gate), στην οποία η έξοδος αντιστοιχεί πάντοτε στη μικρότερη από τις δύο εισόδους, και η πύλη υψηλής τιμής (High Value – HV gate), στην οποία η έξοδος αντιστοιχεί πάντοτε στη μεγαλύτερη από τις δύο εισόδους.



If $u \leq v$, $y = u$

If $u > v$, $y = v$



If $u \geq v$, $y = u$

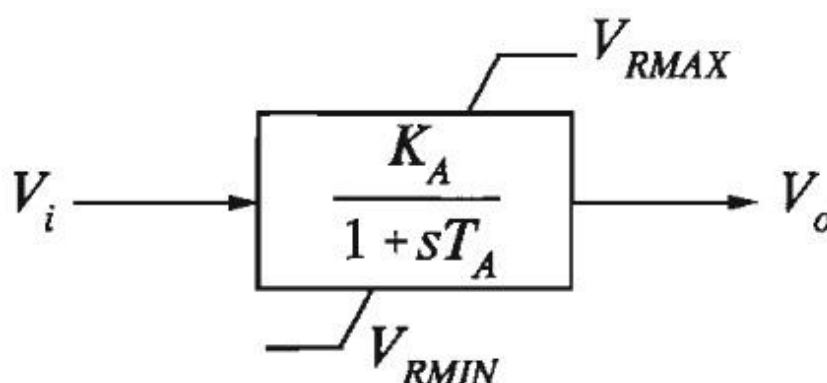
If $u < v$, $y = v$

Σχήμα 3.21.: LV και HV συναρτήσεις πύλης (πηγή: Kundur, 1994, σελ. 361)

3.3.1.7. Ενισχυτής μοντέλου αυτόματου ρυθμιστή τάσης

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως και θα φανεί ακόμα καλύτερα κατά την παρουσίαση των μοντέλων των συστημάτων διέγερσης τύπου AC παρακάτω, στη διάταξη του AVR περιλαμβάνεται και ενισχυτής του σήματος τάσης, έτσι ώστε το μέγεθος και η μορφή του σήματος που εξέρχεται από τον AVR να είναι κατάλληλα για τον έλεγχο της διεγέρτριας.

Υπάρχουν τρεις τύποι ενισχυτών: οι μαγνητικοί, οι περιστροφικοί και οι ηλεκτρονικοί. Οι μαγνητικοί και οι ηλεκτρονικοί ενισχυτές χαρακτηρίζονται από ένα κέρδος (gain), K_A , και πιθανώς να περιλαμβάνουν και μία χρονική σταθερά (time constant), T_A , (Kundur, 1994). Κατ' αυτόν τον τρόπο, το δομικό τους διάγραμμα απεικονίζεται στο σχήμα 3.22.



Σχήμα 3.22.: Μοντέλο ενισχυτή AVR (πηγή: Kundur, 1994, σελ. 356)

Το σήμα εξόδου του ενισχυτή περιορίζεται από όρια σχετικά με το φαινόμενο του κορεσμού ή της δυνατότητας παροχής ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου. Τα όρια αυτά αντιστοιχούν στους non – windup περιορισμούς V_{RMAX} και V_{RMIN} , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.22. (στη συνέχεια, οι περιορισμοί που αφορούν στον ενισχυτή του AVR συμβολίζονται ισοδύναμα ως V_{AMAX} και V_{AMIN} αντίστοιχα).

3.3.2. Παρουσίαση των μοντέλων των συστημάτων διέγερσης τύπου AC κατά το πρότυπο του IEEE Std 421.5 (2005)

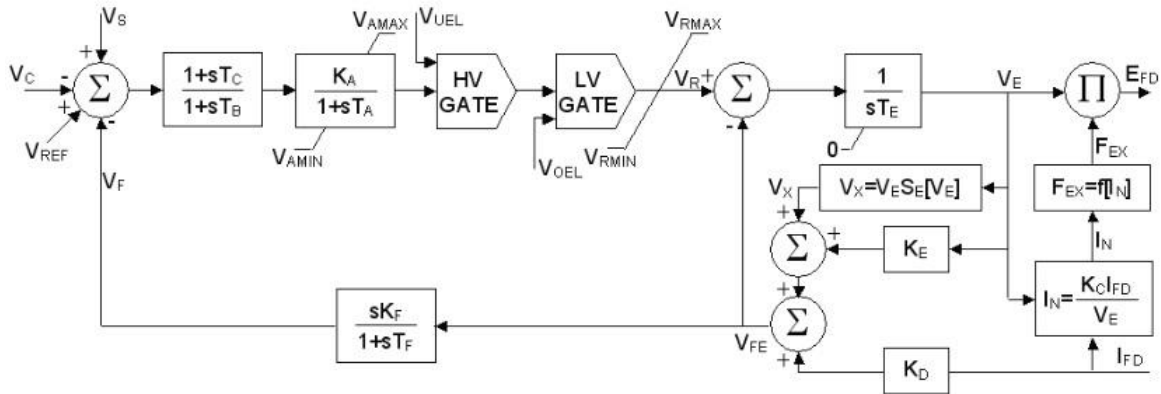
Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, αυτά τα συστήματα διέγερσης εμφανίζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στις ναυτικές εφαρμογές, καθώς είναι τα πλέον χρησιμοποιούμενα στις σύγχρονες γεννήτριες που καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες των πλοίων. Η πηγή του ρεύματος

διέγερσης είναι ένας εναλλακτήρας, το εναλλασσόμενο ρεύμα του οποίου μετατρέπεται σε συνεχές με τη βοήθεια ανορθωτικής διάταξης, στατικής ή περιστροφικής, παράγοντας έτσι το απαιτούμενο συνεχές ρεύμα για τη διέγερση της γεννήτριας. Οι επιδράσεις της φόρτισης είναι σημαντικές σε τέτοιου είδους συστήματα διέγερσης, επομένως η χρήση του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας ως είσοδος σε διάφορα υποσυστήματα ελέγχου των μοντέλων, επιτρέπει την ακριβή καταγραφή αυτών των επιδράσεων. Επιπλέον, σημειώνεται ότι τα συστήματα αυτά δεν επιτρέπουν την τροφοδοσία αρνητικού ρεύματος διέγερσης και μόνον ο τύπος μοντέλου AC4A επιτρέπει την επιβολή αρνητικής τάσης διέγερσης (IEEE Std 421.5, 2005).

Στα μοντέλα τύπου AC, συναντάται μία τάση V_{FE} , η οποία είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης και προκύπτει από την άθροιση των σημάτων της τάσης εξόδου της διεγέρτριας, V_E , πολλαπλασιασμένης με τον παράγοντα $K_E + S_E[V_E]$ και του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας, I_{FD} , πολλαπλασιασμένου με τον συντελεστή απομαγνήτισης K_D . Σε κάποια από αυτά τα μοντέλα, το σήμα τάσης V_{FE} χρησιμοποιείται ως είσοδος της δομικής μονάδας σταθεροποίησης του συστήματος διέγερσης, η έξοδος του οποίου είναι το σήμα τάσης V_F .

3.3.2.1. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC1A

Το μοντέλο που φαίνεται στο σχήμα 3.23., αντιπροσωπεύει τα συστήματα διέγερσης ελεγχόμενου πεδίου διέγερσης (field controlled) με χρήση εναλλακτήρα (πηγή) – ανόρθωσης του τύπου AC1A. Αυτά τα συστήματα διέγερσης αποτελούνται από έναν εναλλακτήρα στον ρόλο της διεγέρτριας και από μη – ελεγχόμενους ανορθωτές. Η διεγέρτρια δεν χρησιμοποιεί μεθόδους αυτο – διέγερσης και η τροφοδοτούμενη ισχύς προς τον AVR παράγεται από πηγή που δεν επηρεάζεται από εξωτερικές μεταβατικές διαταραχές (transients). Η χαρακτηριστική της διόδου (δηλαδή η καμπύλη του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο συναρτήσεως της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της) στην έξοδο της διεγέρτριας, επιβάλλει κατώτατο όριο ίσο με μηδέν για την τάση εξόδου της διεγέρτριας, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23.: Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC1A (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 11)

Για μελέτες σταθερότητας μεγάλων συστημάτων ισχύος, το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να περιγραφεί από το απλοποιημένο μοντέλο του σχήματος 3.23. Η επίδραση απομαγνήτισης από το ρεύμα διέγερσης, I_{FD} , στην τάση εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, V_E , υπολογίζεται μέσω της διαδρομής ανατροφοδότησης που περιλαμβάνει τη σταθερά K_D . Η σταθερά αυτή, αποτελεί συνάρτηση των επαγωγικών αντιδράσεων του τυλίγματος επαγωγίμου του εναλλακτήρα διέγερσης.

Η πτώση της τάσης εξόδου της διεγέρτριας, εξαιτίας της ρύθμισης του ανορθωτή, συνυπολογίζεται μέσω της σταθεράς K_C , η οποία αποτελεί συνάρτηση των επαγωγικών αντιδράσεων που παρεμβάλλονται στη διαδρομή μεταξύ της διεγέρτριας και του ανορθωτή, και της καμπύλης ρύθμισης του ανορθωτή F_{EX} .

3.3.2.2. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC2A

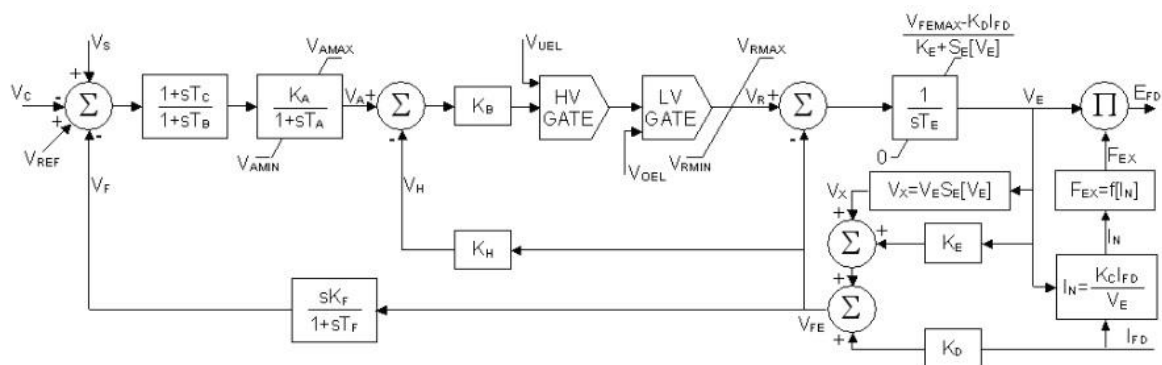
Το μοντέλο του σχήματος 3.24., που περιγράφει τη μορφή των μοντέλων τύπου AC2A, αποτελεί ένα σύστημα διέγερσης εναλλακτήρα – ανορθωτή ελεγχόμενου πεδίου διέγερσης, υψηλής αρχικής απόκρισης. Οι ανορθωτές που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τον εναλλακτήρα διέγερσης είναι μη – ελεγχόμενοι. Το μοντέλο τύπου AC2A είναι παρόμοιο με εκείνο του τύπου AC1A, με τη διαφορά ότι περιλαμβάνει, επιπλέον, χρονική σταθερά αντιστάθμισης της διεγέρτριας και στοιχεία περιορισμού του ρεύματος διέγερσης που αυτή παράγει.

Η χρονική σταθερά αντιστάθμισης της διεγέρτριας, αποτελείται ουσιαστικά από το σήμα αρνητικής ανατροφοδότησης V_H . Η χρονική σταθερά μειώνεται από έναν παράγοντα ανάλογο του γινομένου των

κερδών K_B και K_H του βρόχου αντιστάθμισης, που φαίνονται στο σχήμα 3.24. και είναι συνήθως περισσότερο από μία τάξη μεγέθους μικρότερη από τη χρονική σταθερά χωρίς αντιστάθμιση.

Για την επίτευξη υψηλής αρχικής απόκρισης του συστήματος, μία πολύ υψηλή επιβαλλόμενη τάση, V_{RMAX} , εφαρμόζεται στο πεδίο της διέγερσης. Ένας περιοριστής, που ανιχνεύει το ρεύμα διέγερσης, επιτρέπει την επιβολή υψηλής τάσης, αλλά συγχρόνως μπορεί να περιορίζει την τιμή του ρεύματος. Περιορίζοντας το ρεύμα διέγερσης, η τάση εξόδου V_E της διεγέρτριας περιορίζεται επίσης σε μία επιλεγμένη τιμή, η οποία συνήθως ορίζεται από την καθορισμένη ονομαστική απόκριση του συστήματος διέγερσης. Παρότι στο πραγματικό φυσικό σύστημα ο περιορισμός αυτός υλοποιείται μέσω ενός βρόχου ανατροφοδότησης, οι χρονικές σταθερές που σχετίζονται με αυτόν τον βρόχο μπορεί να είναι εξαιρετικά μικρές, προκαλώντας έτσι προβλήματα στους υπολογισμούς. Για τον λόγο αυτό, ο περιοριστής αυτός απεικονίζεται στο σχήμα 3.24. σαν ένα θετικό όριο της τάσης εξόδου της διεγέρτριας, πριν την επίδραση σε αυτήν των επαγωγικών αντιδράσεων της γραμμής τροφοδοσίας του ανορθωτή, δηλαδή της V_E , το οποίο με τη σειρά του αποτελεί συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας I_{FD} . Για μικρές χρονικές σταθερές του βρόχου του περιοριστή, η παραπάνω μέθοδος έχει τα ίδια αποτελέσματα, αλλά αποτρέπει τα υπολογιστικά προβλήματα που σχετίζονται με τα υψηλά κέρδη και τις χαμηλές χρονικές σταθερές του συγκεκριμένου βρόχου.

Τα όρια που εφαρμόζονται στην τάση V_E χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των επιδράσεων που ασκεί η λειτουργία του περιοριστή ανατροφοδότησης.

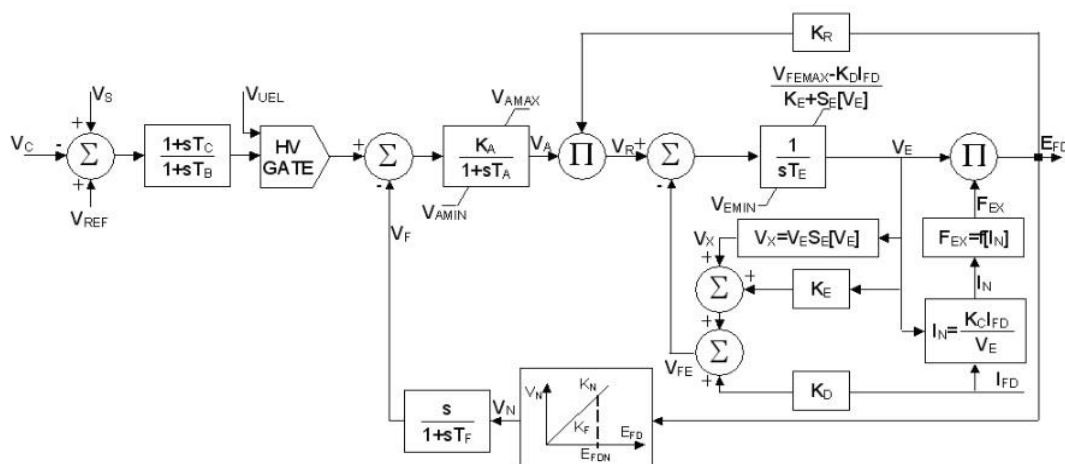


Σχήμα 3.24.: Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC2A (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 12)

3.3.2.3. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC3A

Το μοντέλο του σχήματος 3.25., που περιγράφει τη μορφή των μοντέλων τύπου AC3A, αποτελεί ένα σύστημα διέγερσης εναλλακτήρα – ανορθωτή ελεγχόμενου πεδίου διέγερσης. Οι ανορθωτές που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τον εναλλακτήρα διέγερσης είναι μη – ελεγχόμενοι. Η διεγέρτρια χρησιμοποιεί μεθόδους αυτο – διέγερσης και η τροφοδοτούμενη ισχύς προς τον AVR αντλείται μέσω της τάσης εξόδου της διεγέρτριας. Ως εκ τούτου, το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται από μία επιπρόσθετη μη – γραμμικότητα, η οποία περιγράφεται με τη χρήση ενός πολλαπλασιαστικού κόμβου, του οποίου οι είσοδοι είναι το σήμα εντολής του AVR, V_A , και η τάση εξόδου της διεγέρτριας, E_{FD} , πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα K_R . Ο παράγοντας K_R αποτελεί μία σταθερά, η τιμή της οποίας εξαρτάται από την πηγή ισχύος που τροφοδοτεί τον AVR και το πεδίο διέγερσης του εναλλακτήρα. Το μοντέλο αυτό βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα διέγερσης που χρησιμοποιούν στατικούς ρυθμιστές τάσης. Για μελέτες σταθερότητας μεγάλων συστημάτων ισχύος, το μοντέλο της διεγέρτριας εναλλασσόμενου ρεύματος απλοποιείται.

Η επίδραση της απομαγνήτισης που προκαλεί το ρεύμα διέγερσης, I_{FD} , στα δυναμικά χαρακτηριστικά της τάσης εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, V_E , συνυπολογίζεται εντός του μοντέλου, μέσω της διαδρομής ανατροφοδότησης που περιλαμβάνει τη σταθερά K_D . Η σταθερά αυτή, αποτελεί συνάρτηση των επαγωγικών αντιδράσεων του τυλίγματος επαγωγίμου του εναλλακτήρα διέγερσης.



Σχήμα 3.25.: Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC3A (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 12)

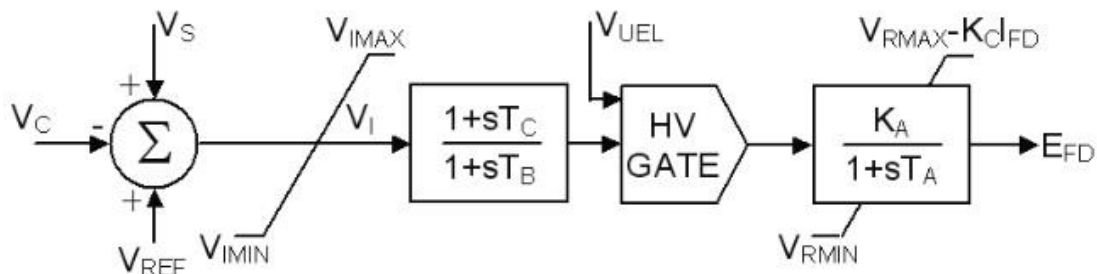
Η πτώση της τάσης εξόδου της διεγέρτριας, εξαιτίας της ρύθμισης του ανορθωτή, συνυπολογίζεται μέσω της σταθεράς K_C , η οποία αποτελεί συνάρτηση των επαγωγικών αντιδράσεων που παρεμβάλλονται στη διαδρομή μεταξύ της διεγέρτριας και του ανορθωτή, και της καμπύλης ρύθμισης του ανορθωτή F_{EX} .

Ο σταθεροποιητής του συστήματος διέγερσης σε αυτό το μοντέλο έχει μη – γραμμικά χαρακτηριστικά. Το κέρδος είναι K_F για τάση εξόδου της διεγέρτριας μικρότερη από E_{FDN} . Όταν η τάση εξόδου της διεγέρτριας ξεπεράσει την τιμή E_{FDN} , το αντίστοιχο κέρδος αποκτά την τιμή K_N .

Τα όρια που εφαρμόζονται στην τάση V_E χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των επιδράσεων που ασκεί η λειτουργία του περιοριστή ανατροφοδότησης.

3.3.2.4. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC4A

Το σύστημα διέγερσης τύπου AC4A, το δομικό διάγραμμα του οποίου απεικονίζεται στο σχήμα 3.26., είναι λίγο διαφορετικό από τα υπόλοιπα συστήματα τύπου AC. Αυτό το σύστημα υψηλής αρχικής απόκρισης, χρησιμοποιεί μία διάταξη θύριστορ πλήρους γέφυρας (full thyristor bridge) στο κύκλωμα εξόδου της διεγέρτριας.



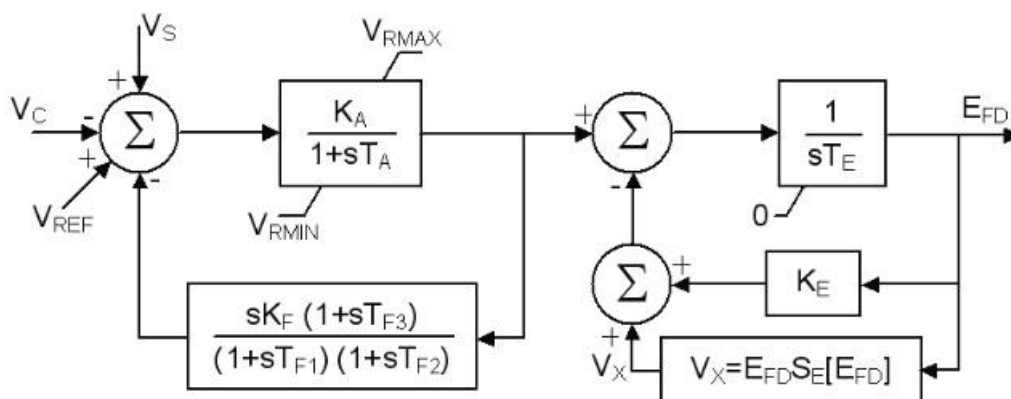
Σχήμα 3.26.: Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC4A (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 13)

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης ελέγχει την ενεργοποίηση των γεφυρών θύριστορ. Ο εναλλακτήρας διέγερσης χρησιμοποιεί έναν ανεξάρτητο ρυθμιστή τάσης για να διατηρεί την τάση εξόδου της σε μία σταθερή τιμή. Οι επιδράσεις αυτής της μεθόδου δεν μοντελοποιούνται, ωστόσο στο μοντέλο περιλαμβάνονται οι επιδράσεις μεταβατικής κατάστασης φόρτισης στον εναλλακτήρα διέγερσης. Η φόρτιση της διεγέρτριας περιορίζεται στην περιοχή που περιγράφεται ως “Mode 1” στο σχήμα 3.14. και οι επιδράσεις της φόρτισης μπορούν να συνυπολογιστούν

χρησιμοποιώντας το ρεύμα φορτίου και τις επαγωγικές αντιδράσεις τις διεγέρτριας για την τροποποίηση των ορίων διέγερσης. Η σταθεροποίηση του συστήματος διέγερσης, συχνά επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης συστημάτων θύριστορ, μέσα από μία σειρά δικτύων καθυστέρησης – προήγησης, αντί της χρήσης ανατροφοδότησης. Οι χρονικές σταθερές T_B και T_C επιτρέπουν την προσομοίωση αυτής της λειτουργίας ελέγχου. Το συνολικό ισοδύναμο κέρδος και η χρονική σταθερά που αφορούν στον ρυθμιστή τάσης και/ή στην ενεργοποίηση των θύριστορ, εκφράζονται από τις σταθερές K_A και T_A αντίστοιχα.

3.3.2.5. Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC5A

Το μοντέλο του σχήματος 3.27., που περιγράφει τα μοντέλα συστημάτων διέγερσης τύπου AC5A, συνιστά ένα απλοποιημένο μοντέλο για την περιγραφή των συστημάτων διέγερσης άνευ ψηκτρών (brushless excitation systems). Ο ρυθμιστής τάσης τροφοδοτείται από μία πηγή, για παράδειγμα από μία γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, η οποία δεν επηρεάζεται από πιθανές διαταραχές του συστήματος.



Σχήμα 3.27.: Μοντέλο συστήματος διέγερσης τύπου AC5A (πηγή: IEEE Std 421.5, 2005, σελ. 13)

Εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα μοντέλα τύπου AC, το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί δεδομένα σχετικά με το φαινόμενο κορεσμού της διεγέρτριας, τα οποία αναφέρονται στην κατάσταση λειτουργίας με φορτίο και όχι στην κατάσταση ανοικτού κυκλώματος, όπως ακριβώς γίνεται και για τα μοντέλα των συστημάτων διέγερσης τύπου DC.

Λόγω της ευρείας εφαρμογής του μοντέλου αυτού στη βιομηχανία, ενίοτε χρησιμοποιείται και για την περιγραφή άλλων τύπων συστημάτων,

3.3.3.1. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC1A

Πίνακας 3.1.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC1A

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0
R_C	Resistive component of load compensation (Ωμική αντίσταση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
X_C	Reactance component of load compensation (Χωρητική αντίδραση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
K_A	Voltage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης)	400
T_A	Voltage regulator time constants (Χρονικές σταθερές ρυθμιστή τάσης)	0.02
T_B		0
T_C		0
K_F	Excitation control system stabilizer gain (Κέρδος σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	0.03
T_F	Excitation control system stabilizer time constant (Χρονική σταθερά σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	1.0
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.0
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	0.80
K_D	Demagnetizing factor, a function of exciter alternator reactances (Συντελεστής απομαγνήτισης, συνάρτηση των εσωτερικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.38
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.20
V_{AMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	14.5
V_{AMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-14.5
V_{RMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	6.03
V_{RMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-5.43
$S_E[V_{E1}]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, V_E , back of commutating reactance (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, V_E , πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας)	0.10
$S_E[V_{E2}]$		0.03
V_{E1}	Exciter alternator output voltages back of commutating reactance at which saturation is defined (Τάσεις εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας, για τις οποίες	4.18
V_{E2}		3.14

	υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης κορεσμού)	
--	---	--

3.3.3.2. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC2A

Πίνακας 3.2.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC2A

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0
R_C	Resistive component of load compensation (Ωμική αντίσταση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
X_C	Reactance component of load compensation (Χωρητική αντίδραση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
K_A	Voltage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης)	400
T_A	Voltage regulator time constants (Χρονικές σταθερές ρυθμιστή τάσης)	0.01
T_B		0
T_C		0
K_B	Second stage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης δευτέρου επιπέδου)	25
K_H	Exciter field current feedback gain (Κέρδος ανατροφοδότησης ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	1.0
K_F	Excitation control system stabilizer gain (Κέρδος σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	0.03
T_F	Excitation control system stabilizer time constant (Χρονική σταθερά σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	1.0
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.0
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	0.60
K_D	Demagnetizing factor, a function of exciter alternator reactances (Συντελεστής απομαγνήτισης, συνάρτηση των εσωτερικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.35
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.28
V_{AMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	8.0
V_{AMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-8.0
V_{RMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	105
V_{RMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-95
V_{FEMAX}	Exciter field current limit reference (Τιμή αναφοράς του ορίου ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	4.4

$S_E[V_{E1}]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, V_E , back of commutating reactance (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, V_E , πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας)	0.037
$S_E[V_{E2}]$		0.012
V_{E1}	Exciter alternator output voltages back of commutating reactance at which saturation is defined (Τάσεις εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας, για τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης κορεσμού)	4.4
V_{E2}		3.3

3.3.3.3. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC3A

Πίνακας 3.3.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC3A

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0
T_C	Voltage regulator time constants (Χρονικές σταθερές ρυθμιστή τάσης)	0
T_B		0
T_A		0.013
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	1.17
T_F	Excitation control system stabilizer time constant (Χρονική σταθερά σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	1.0
V_{AMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	1.0
V_{AMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-0.95
V_{LV}	Field voltage limiter reference (Τιμή αναφοράς του περιοριστή τάσης διέγερσης)	0.790
$V_{E MAX} = V_{E1}$	Maximum exciter voltage output (Μέγιστη τάση εξόδου της διεγέρτριας)	6.24
$V_{E MIN}$	Minimum exciter voltage output (Ελάχιστη τάση εξόδου της διεγέρτριας)	0.1
$S_E[V_{E1}]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, V_E , back of commutating reactance (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, V_E , πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας)	1.143
$S_E[V_{E2}]$		0.100
V_{E2}	Exciter alternator output voltage back of commutating reactance at which saturation is defined (Τάση εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας, για την οποία υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης κορεσμού)	$0.75 V_{E MAX}$

E_{FDN}	Value of E_{FD} at which feedback gain changes (Τιμή της E_{FD} στην οποία αλλάζει το κέρδος ανατροφοδότησης)	2.36
K_A	Voltage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης)	45.62
K_R	Constant associated with regulator and alternator field power supply (Σταθερά σχετική με την τροφοδότηση ισχύος του ρυθμιστή τάσης και του πεδίου διέγερσης της διεγέρτριας)	3.77
K_{LV}	Field voltage limiter gain (Κέρδος περιοριστή τάσης διέγερσης)	0.194
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.104
K_D	Demagnetizing factor, a function of exciter alternator reactances (Συντελεστής απομαγνήτισης, συνάρτηση των εσωτερικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.499
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.0
K_F	Excitation control system stabilizer gains (Κέρδος σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	0.143
K_N	Excitation system stabilizer gain (Κέρδος σταθεροποιητή του συστήματος διέγερσης)	0.05
V_{FEMAX}	Exciter field current limit reference (Τιμή αναφοράς του ορίου ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	16

3.3.3.4. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC4A

Πίνακας 3.4.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC4A

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0
T_C	Voltage regulator time constants (Χρονικές σταθερές ρυθμιστή τάσης)	1.0
T_B		10
T_A		0.015
V_{IMAX}	Voltage regulator input limits (Όρια εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	10
V_{IMIN}		-10
V_{RMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	5.64
V_{RMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-4.53
K_A	Voltage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης)	200
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0

3.3.3.5. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC5A

Πίνακας 3.5.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC5A

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0
R_C	Resistive component of load compensation (Ωμική αντίσταση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
X_C	Reactance component of load compensation (Χωρητική αντίδραση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
K_A	Voltage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης)	400
T_A	Voltage regulator time constant (Χρονική σταθερά ρυθμιστή τάσης)	0.02
V_{RMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	7.3
V_{RMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-7.3
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	0.8
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.0
$S_E[E_{FD1}]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, E_{FD} (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, E_{FD})	0.86
$S_E[E_{FD2}]$		0.5
E_{FD1}	Exciter voltages at which exciter saturation is defined (Τάσεις εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης για τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης κορεσμού)	5.6
E_{FD2}		$0.75 \times E_{FD1}$
K_F	Excitation control system stabilizer gains (Κέρδος σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	0.03
T_{F1}	Excitation control system stabilizer time constants (Χρονικές σταθερές σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	1.0
$T_{F2} = T_{F3}$		0

3.3.3.6. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC6A

Πίνακας 3.6.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC6A

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0.02
R_C	Resistive component of load compensation (Ωμική αντίσταση της αντιστάθμισης φορτίου)	0
X_C	Reactance component of load compensation (Χωρητική αντίδραση της αντιστάθμισης φορτίου)	0

K_A	Voltage regulator gain (Κέρδος ρυθμιστή τάσης)	536
T_A	Voltage regulator time constants (Χρονικές σταθερές ρυθμιστή τάσης)	0.086
T_B		9.0
T_C		3.0
T_K	Regulator lead time constant (Χρονική σταθερά προήγησης ρυθμιστή τάσης)	0.18
K_H	Exciter field current limiter gain (Κέρδος περιοριστή ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	92
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	1.0
T_H	Exciter field current limiter time constants (Χρονικές σταθερές περιοριστή του ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	0.08
T_J		0.02
K_D	Demagnetizing factor, a function of exciter alternator reactances (Συντελεστής απομαγνήτισης, συνάρτηση των εσωτερικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	1.91
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.173
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.6
V_{AMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	75
V_{AMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-75
V_{RMAX}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	44
V_{RMIN}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-36
V_{HMAX}	Maximum exciter field current feedback signal (Μέγιστο σήμα ανατροφοδότησης του ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	75
V_{FELIM}	Exciter field current limit reference (Τιμή αναφοράς του ορίου ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	19
$S_E[V_{E1}]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, V_E , back of commutating reactance (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, V_E , πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας)	0.214
$S_E[V_{E2}]$		0.044
V_{E1}	Exciter alternator output voltages back of commutating reactance at which saturation is defined (Τάσεις εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας, για τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης κορεσμού)	7.4
V_{E2}		5.55

3.3.3.7. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC7B

Πίνακας 3.7.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC7B

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
T_R	Regulator input filter time constant (Χρονική σταθερά του φίλτρου εισόδου του ρυθμιστή τάσης)	0.0
K_{PR}	Voltage regulator proportional gain (Αναλογικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	4.24
K_{IR}	Voltage regulator integral gain (Ολοκληρωτικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	4.24
K_{DR}	Voltage regulator derivative gain (Διαφορικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	0.0
T_{DR}	Lag time constant (Χρονική σταθερά καθυστέρησης)	0.0
V_{Rmax}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	5.79
V_{Rmin}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-5.79
K_{PA}	Voltage regulator proportional gain (Αναλογικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	65.36
K_{IA}	Voltage regulator integral gain (Ολοκληρωτικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	59.69
V_{Amax}	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	1.0
V_{Amin}	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	-0.95
K_P	Potential circuit gain coefficient (Συντελεστής κέρδους κυκλώματος ρύθμισης δυναμικού)	4.96
K_L	Lower limit coefficient of regulator output (Συντελεστής κατώτατου ορίου εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	10.0
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	1.1
V_{FEmax}	Exciter field current limit reference (Τιμή αναφοράς του ορίου ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	6.9
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.18
K_D	Demagnetizing factor, a function of exciter alternator reactances (Συντελεστής απομαγνήτισης, συνάρτηση των εσωτερικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.02
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.0
K_{F1}	Excitation control system stabilizer gains (Κέρδη σταθεροποιητή του συστήματος ελέγχου της διέγερσης)	0.212
K_{F2}		0.0
$S[V_{Emax}]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, V_E , back of commutating reactance (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, V_E ,	0.44
$S[V_{E 0.75max}]$		0.075

	πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας)	
$V_{E_{max}}$	Exciter alternator output voltages back of commutating reactance at which saturation is defined (Τάσεις εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας, για τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης κορεσμού)	6.30
$V_{E\ 0.75max}$		3.02

3.3.3.8. Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων για το σύστημα διέγερσης τύπου AC8B

Πίνακας 3.8.: Ενδεικτικές τιμές παραμέτρων μοντέλου AC8B

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
K_{PR}	Voltage regulator proportional gain (Αναλογικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	80
K_{IR}	Voltage regulator integral gain (Ολοκληρωτικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	5
K_{DR}	Voltage regulator derivative gain (Διαφορικό κέρδος ρυθμιστή τάσης)	10
T_{DR}	Lag time constant (Χρονική σταθερά καθυστέρησης)	0.1
$V_{FE_{max}}$	Exciter field current limit reference (Τιμή αναφοράς του ορίου ρεύματος διέγερσης της διεγέρτριας)	6.0
$V_{R_{max}}$	Maximum voltage regulator output (Μέγιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	35
$V_{R_{min}}$	Minimum voltage regulator output (Ελάχιστη τάση εξόδου του ρυθμιστή τάσης)	0
K_E	Exciter constant related to self-excited field (Σταθερά της διεγέρτριας σχετική με την αυτο – διέγερση πεδίου)	1.0
T_E	Exciter time constant, integration rate associated with exciter control (Χρονική σταθερά της διεγέρτριας, ρυθμός ολοκλήρωσης που σχετίζεται με τον έλεγχο της διεγέρτριας)	1.2
K_C	Rectifier loading factor proportional to commutating reactance (Συντελεστής φόρτισης του ανορθωτή, ανάλογος των επαγωγικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	0.55
K_D	Demagnetizing factor, a function of exciter alternator reactances (Συντελεστής απομαγνήτισης, συνάρτηση των εσωτερικών αντιδράσεων του εναλλακτήρα διέγερσης)	1.1
$S[E_1]$	Exciter saturation function value at the corresponding exciter voltage, E , back of commutating reactance (Τιμή συνάρτησης κορεσμού της διεγέρτριας στην αντίστοιχη τάση εξόδου της, V_E , πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας)	0.3
$S[E_2]$		3.0
E_1	Exciter alternator output voltages back of commutating reactance at which saturation is defined (Τάσεις εξόδου του εναλλακτήρα διέγερσης, πριν την επίδραση των εσωτερικών επαγωγικών αντιδράσεων της διεγέρτριας, για τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης κορεσμού)	6.5
E_2		9.0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΤΡΟΠΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ AVR

Περίληψη του κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό, αναλύονται οι *βασικοί τρόποι ελέγχου* που είναι διαθέσιμοι κατά τη λειτουργία ενός σύγχρονου *Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (AVR)*.

Συγκεκριμένα, σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να γίνουν κατανοητές οι έννοιες που σχετίζονται με τις *κύριες λειτουργίες ρύθμισης* τις οποίες παρέχει ένας AVR, όπως η *ρύθμιση της τάσης ακροδεκτών* της σύγχρονης γεννήτριας, η *ρύθμιση του συντελεστή ισχύος* που χαρακτηρίζει τη λειτουργία της γεννήτριας, η *ρύθμιση της αέργου ισχύος* την οποία η γεννήτρια παρέχει προς το δίκτυο, καθώς και η *ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης* που παράγεται από το σύστημα διέγερσης του εναλλακτήρα.

4.1. Εισαγωγή

Υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, η κύρια αποστολή ενός AVR, όπως είναι άλλωστε προφανές και από την ονομασία του, συνίσταται στη ρύθμιση της τάσης εξόδου την οποία παράγει μία σύγχρονη γεννήτρια σε μία σταθερή τιμή, παρά την επίδραση διαφόρων παραγόντων (για παράδειγμα μίας απότομης αύξησης του φορτίου που τροφοδοτεί η γεννήτρια), που τείνουν να μεταβάλλουν την τάση ακροδεκτών του στάτη. Ωστόσο, ένας σύγχρονος AVR παρέχει τη δυνατότητα επιπροσθέτων ρυθμίσεων σχετικών με τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας, οι οποίες αφορούν στον συντελεστή ισχύος της γεννήτριας, στην άεργο ισχύ με την οποία αυτή τροφοδοτεί (ή σπανιότερα τροφοδοτείται από) το δίκτυο και στο ρεύμα διέγερσης το οποίο τροφοδοτείται από τη διεγέρτρια με σκοπό τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του δρομέα.

Ανακεφαλαιώνοντας, στις επόμενες παραγράφους γίνεται περιγραφή των τρόπων ελέγχου (control modes) που συνήθως διατίθενται κατά τη λειτουργία ενός αυτόματου ρυθμιστή τάσης και οι οποίοι αφορούν:

1) Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών (terminal voltage regulation): αποτελεί διαδικασία αυτομάτου ελέγχου, η τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας διατηρείται σε μία σταθερή τιμή.

2) Ρύθμιση ρεύματος διέγερσης (excitation current regulation): ελέγχεται από τον χειριστή (operator) μέσω του AVR και χρησιμοποιείται σε ειδικές περιπτώσεις (για παράδειγμα κατά τη διάρκεια δοκιμών, αντιμετώπισης προβλημάτων κ.ά.), βασίζεται στη διατήρηση του ρεύματος διέγερσης σε μία σταθερή τιμή.

3) Ρύθμιση συντελεστή ισχύος της γεννήτριας (generator power factor regulation): αποτελεί πρόσθετη λειτουργία ελέγχου και ενεργοποιείται μόνον κατά την παράλληλη λειτουργία της γεννήτριας με το δίκτυο, η τιμή του συντελεστή ισχύος της γεννήτριας παραμένει σε ένα σταθερό επίπεδο.

4) Ρύθμιση αέργου ισχύος της γεννήτριας (generator reactive power regulation): αποτελεί πρόσθετη λειτουργία ελέγχου και ενεργοποιείται μόνον κατά την παράλληλη λειτουργία της γεννήτριας με το δίκτυο, η τιμή της αέργου ισχύος που παράγεται από τη γεννήτρια και διανέμεται στο δίκτυο παραμένει σε ένα σταθερό επίπεδο.

Σημειώνεται ότι, εφόσον ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις, είναι δυνατή η εναλλαγή από μία λειτουργία ρύθμισης σε μία άλλη, χωρίς την πρόκληση βλάβης στον AVR ή στη γεννήτρια.

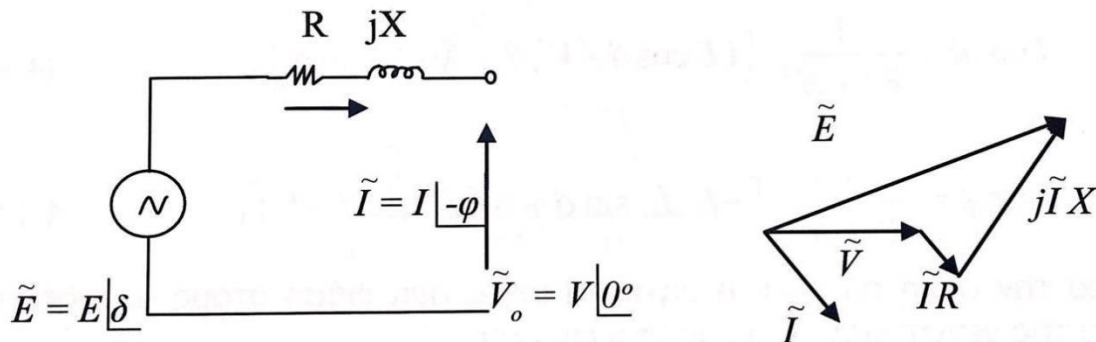
4.2. Δυνατότητες ρύθμισης με χρήση του AVR

4.2.1. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας

Στην παράγραφο αυτή, αρχικά γίνεται περιγραφή της μαθηματικής σχέσης μεταξύ της τάσης ακροδεκτών του εναλλακτήρα και της ζήτησης αέργου φόρτισης που αυτός καλείται να καλύψει, ενώ εισάγεται επιπλέον η έννοια του στατισμού του ρυθμιστή τάσης. Στη συνέχεια, αναλύεται η διαδικασία ρύθμισης της τάσης εξόδου της γεννήτριας από τον AVR, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας της, δηλαδή κατά τον συγχρονισμό της με το δίκτυο και κατά την παράλληλη λειτουργία της με το δίκτυο ή άλλες γεννήτριες.

4.2.1.1. Μαθηματική έκφραση $V - Q$ και στατισμός ρυθμιστή τάσης (voltage droop)

Στο σχήμα 4.1. απεικονίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας, καθώς και οι στρεφόμενοι μιγάδες των τάσεων και του ρεύματος του κυκλώματος σε κοινό διάγραμμα.



Σχήμα 4.1.: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας
(πηγή: Προυσαλίδης, 2019, σελ. 73)

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, θεωρείται ότι η τάση ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας \tilde{V} αποτελεί το διάνυσμα αναφοράς, δηλαδή έχει μηδενικό όρισμα ή $\tilde{V} = V\angle 0^\circ = V$. Το διάνυσμα του ρεύματος \tilde{I} επιπορεύεται της τάσης ακροδεκτών κατά γωνία φ (άρα η γωνία φ είναι θετική αφού παίρνει αρνητικό πρόσημο) και το διάνυσμα της ΗΕΔ ή εσωτερικής τάσης της σύγχρονης γεννήτριας \tilde{E} προπορεύεται της τάσης ακροδεκτών κατά γωνία δ . Οι παραπάνω θεωρήσεις ισχύουν στις περισσότερες εφαρμογές, όσον αφορά στα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος των πλοίων. Επιπλέον, από το σχήμα 4.1. μπορεί να εξαχθεί η μαθηματική σχέση ρεύματος – τάσης ακροδεκτών:

$$\tilde{E} = \tilde{I} \cdot (R + j \cdot X) + \tilde{V} \Rightarrow \tilde{I} = \frac{\tilde{E} - \tilde{V}}{R + j \cdot X} \quad (4.1)$$

Εάν στη σχέση (4.1) αντικατασταθούν οι στρεφόμενοι μιγάδες των μεγεθών με τις αναλυτικές μιγαδικές εκφράσεις τους, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \tilde{I} &= I\angle -\varphi = I\cos\varphi - jI\sin\varphi \Rightarrow I\cos\varphi - jI\sin\varphi = \frac{E\cos\delta + jE\sin\delta - V}{R + jX} \cdot \frac{R - jX}{R - jX} \Rightarrow \\ \tilde{E} &= E\angle\delta = E\cos\delta + jE\sin\delta \\ \Rightarrow I\cos\varphi - jI\sin\varphi &= \frac{[(E\cos\delta - V)R + X \cdot E \cdot \sin\delta] + j[E \cdot R \cdot \sin\delta - X(E \cdot \cos\delta - V)]}{R^2 + X^2} \end{aligned}$$

Απομονώνοντας το φανταστικό μέρος της παραπάνω έκφρασης και πολλαπλασιάζοντας το με την τάση ακροδεκτών V , προκύπτει η

ζητούμενη μαθηματική έκφραση που συνδέει την τάση ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας με την άεργο ισχύ που παρέχει στο σύστημα:

$$I \sin \varphi = \frac{1}{R^2 + X^2} \cdot [(E \cdot \cos \delta - V)X - R \cdot E \cdot \sin \delta] \xrightarrow{\times V}$$

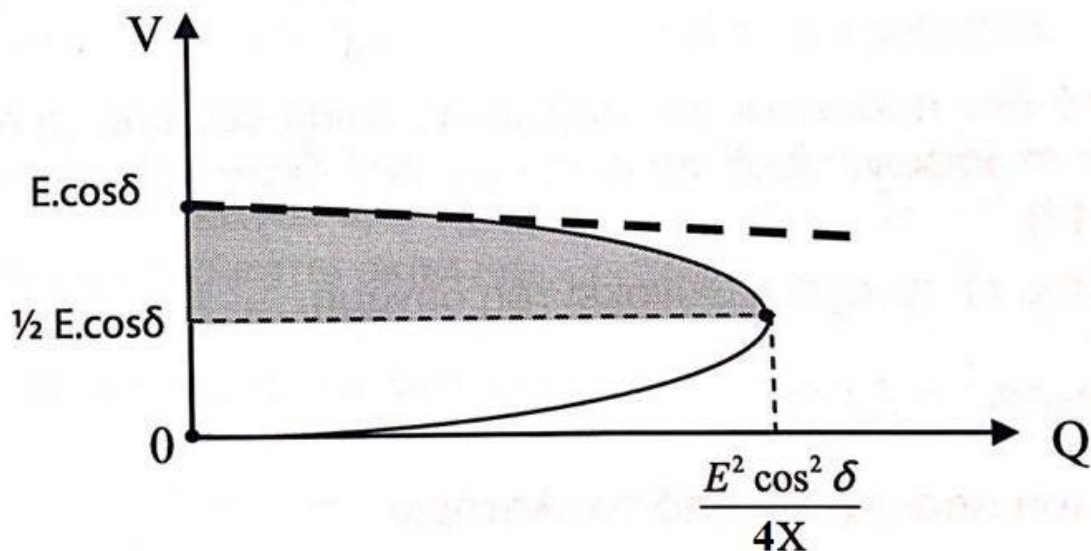
$$VI \sin \varphi = \frac{V}{R^2 + X^2} \cdot [(E \cdot \cos \delta - V)X - R \cdot E \cdot \sin \delta] \xrightarrow{VI \sin \varphi = Q}$$

$$Q = \frac{V}{R^2 + X^2} \cdot [(E \cdot \cos \delta - V)X - R \cdot E \cdot \sin \delta] \quad (4.2)$$

Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, η εσωτερική ωμική αντίσταση του κυκλώματος της γεννήτριας R είναι αμελητέα σε σύγκριση με την αντίστοιχη αντίδραση X . Επομένως, από τη σχέση (4.2) μπορούν να απαλειφθούν οι όροι που περιέχουν το R , χωρίς σημαντικό σφάλμα, οδηγώντας στην ακόλουθη απλοποιημένη έκφραση:

$$Q = \frac{V}{X} \cdot (E \cdot \cos \delta - V) \quad (4.3)$$

Η σχέση (4.2) και η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη απλοποιημένη έκφραση αυτής (4.3), αποτελούν τον λεγόμενο “κανόνα $V - Q$ ”. Η γραφική αναπαράσταση αυτής της σχέσης απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.:

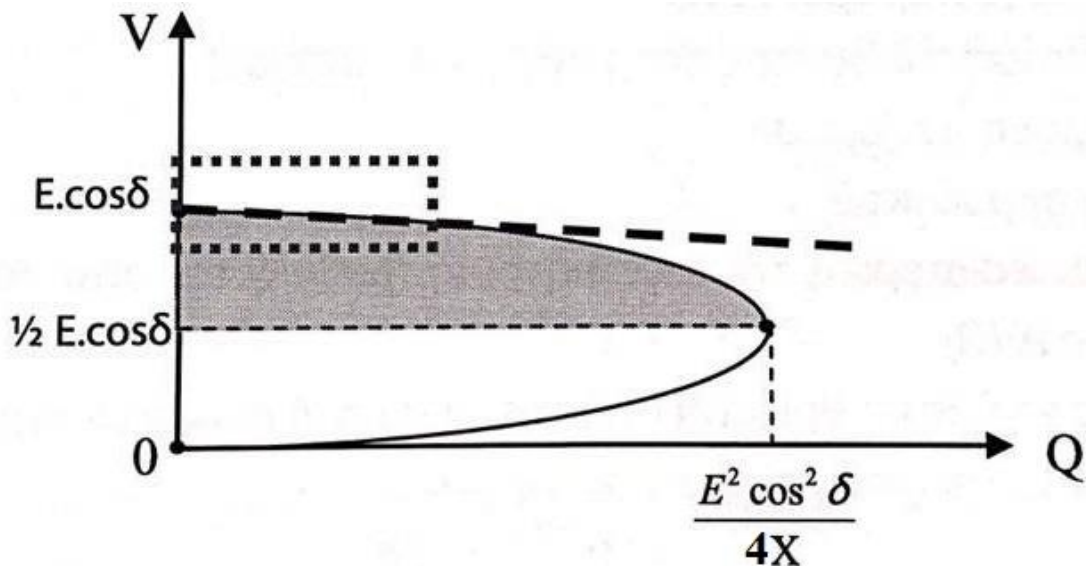


Σχήμα 4.2.: Διάγραμμα τάσης ακροδεκτών V προς την άεργο ισχύ Q (πηγή: Προυσαλίδης, 2019, σελ. 75)

Η σκιασμένη περιοχή στο σχήμα 4.2. δηλώνει τη στατικά ευσταθή περιοχή λειτουργίας, η οποία περιορίζεται από τις ακόλουθες μαθηματικές ανισότητες:

$$\frac{1}{2} \cdot E \cdot \cos\delta \leq V \leq E \cdot \cos\delta \quad \& \quad Q \leq \frac{E^2 \cdot \cos^2\delta}{4X} \quad (4.4)$$

Όπως είναι φανερό από τις σχέσεις (4.2) και (4.3) και από τη γραφική απεικόνιση αυτών στο σχήμα 4.2., ο κανόνας $V - Q$ δεν είναι γραμμικός, ωστόσο μπορεί να προσεγγιστεί γραμμικά χωρίς μεγάλο σφάλμα στην περιοχή των μικρών αέργων φορτίσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3.:



Σχήμα 4.3.: Γραμμικοποίηση σχέσης τάσης ακροδεκτών V προς άεργο ισχύ Q (πηγή: Προυσαλίδης, 2019, σελ.83)

Ως βαθμός αναλογίας ή στατισμός ρυθμιστή τάσης (voltage droop), ορίζεται η κλίση της καμπύλης $V - Q$. Επειδή η σχέση της τάσης ακροδεκτών με την άεργο ισχύ δεν είναι γραμμική, η κλίση αλλάζει ανάλογα με το σημείο λειτουργίας, επομένως η σχέση που ορίζει τον στατισμό ρυθμιστή τάσης x_Q είναι η ακόλουθη:

$$x_Q = \frac{\partial V}{\partial Q} = \frac{1}{\frac{\partial Q}{\partial V}} \quad (4.5)$$

Από τη σχέση (4.2) σε συνδυασμό με την (4.5), προκύπτει η παρακάτω έκφραση που συσχετίζει τον στατισμό ρυθμιστή τάσης με την τάση ακροδεκτών της γεννήτριας:

$$x_Q^{-1} = \frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{1}{R^2 + X^2} [(E \cdot \cos\delta - V)X - R \cdot E \cdot \sin\delta] + \frac{V}{R^2 + X^2} (-X) \quad (4.6)$$

ενώ από τον συνδυασμό της (4.3) με την (4.5), προκύπτει η απλοποιημένη σχέση:

$$x_Q^{-1} = \frac{1}{X} (E \cdot \cos\delta - V) - \frac{V}{X} \quad (4.7)$$

Συχνά, ως μέση τιμή του x_Q , θεωρείται προσεγγιστικά η κλίση της ευθείας που ενώνει τις ακραίες τιμές τάσης και αέργου ισχύος, οι οποίες οριοθετούν την ευσταθή περιοχή, δηλαδή:

$$\hat{x}_Q \cong \frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{E \cdot \cos\delta - \frac{1}{2} \cdot E \cdot \cos\delta}{0 - \frac{\frac{1}{4} \cdot E^2 \cdot \cos^2\delta}{X}} = -\frac{\frac{1}{2} \cdot E \cdot \cos\delta}{\frac{\frac{1}{4} \cdot E^2 \cdot \cos^2\delta}{X}} \Rightarrow \hat{x}_Q = -\frac{2X}{E \cdot \cos\delta} \quad (4.8)$$

Όπως φαίνεται και από τη σχέση (4.8), ο μέσος στατισμός ρυθμιστή τάσης είναι σταθερός και ανεξάρτητος της τάσης ακροδεκτών, ενώ η ευθεία από την οποία προκύπτει αποτελεί, κατά καλή προσέγγιση, την χαρακτηριστική του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και καθορίζει τη συμπεριφορά της τάσης ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας, καθώς μεταβάλλεται η αέργος φόρτιση που αυτή καλείται να καλύψει.

4.2.1.2. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας κατά τον συγχρονισμό της με το δίκτυο

Πολλές φορές οι σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να τεθούν εκτός υπηρεσίας και στη συνέχεια να χρειαστεί να επανασυνδεθούν με το σύστημα ισχύος, ανάλογα με το φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει το σύστημα ή για λόγους συντήρησης, επιδιόρθωσης κ.ά. Προτού γίνει κάθε φορά ο παραλληλισμός της γεννήτριας με το δίκτυο, είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός (synchronization) των παραμέτρων λειτουργίας της με εκείνες του δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Ακατάλληλος συγχρονισμός της γεννήτριας μπορεί να επηρεάσει την υγιή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος και να οδηγήσει σε ηλεκτρικές ή / και μηχανικές διαταραχές, με δυσμενείς συνέπειες για την κινητήρια μηχανή (prime mover) του άξονα της γεννήτριας, την ίδια τη γεννήτρια, τους μετασχηματιστές και διάφορα άλλα στοιχεία του συστήματος ισχύος.

Ως **συγχρονισμός** ή **παραλληλισμός** ενός εναλλακτήρα με έναν ή περισσότερους εναλλακτήρες ή με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (για παράδειγμα το δίκτυο της ΔΕΗ), ορίζεται η ρύθμιση των παρακάτω παραμέτρων λειτουργίας του εναλλακτήρα, ώστε αυτές να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες του δικτύου:

- i. Τάση (voltage)
- ii. Συχνότητα (frequency)
- iii. Διαδοχή φάσεων (phase sequence)

iv. Γωνία φάσης (phase angle) για την τάση κάθε μίας εκ των τριών φάσεων

Πιο αναλυτικά, η στιγμιαία τιμή της τάσης της γεννήτριας κατά τον παραλληλισμό της με το σύστημα, πρέπει να είναι ίδια με εκείνη του συστήματος, τόσο όσον αφορά στο μέτρο της όσο και στην πολικότητά της. Αυτή η ταύτιση θα πρέπει να συνεχιστεί και κατά την παράλληλη λειτουργία του εναλλακτήρα με το υπόλοιπο σύστημα, επομένως απαιτείται επιπλέον η σύμπτωση των συχνοτήτων τους. Ακόμη, όλοι οι παραλληλισμένοι εναλλακτήρες θα πρέπει να έχουν την ίδια διαδοχή φάσεων, απαίτηση που εξασφαλίζεται κατά τη σύνδεση του εναλλακτήρα με τους ζυγούς, ενώ οι τάσεις των εναλλακτών που αντιστοιχούν στην ίδια φάση, θα πρέπει να έχουν ίσες φασικές γωνίες, δηλαδή μηδενική φασική απόκλιση.

Η ανάγκη για συγχρονισμό είναι εμφανής στην περίπτωση των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος των πλοίων, όπου συνήθως δύο κύριες γεννήτριες (εναλλακτήρες) συνεργάζονται για την τροφοδότηση των ηλεκτρικών φορτίων των πλοίων. Αυτή η ανάγκη δημιουργείται εξαιτίας των χρονικά μεταβαλλόμενων φορτίων που παραλαμβάνουν οι εναλλακτήρες του πλοίου και συνεπώς της συνεχούς ανακατανομής των φορτίσεων μεταξύ τους. Έτσι, εάν θεωρηθεί ότι το δίκτυο τροφοδοτείται από κάποιον εναλλακτήρα που βρίσκεται ήδη σε λειτουργία, η ασφαλής σύνδεση ενός ακόμη εναλλακτήρα με το δίκτυο περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- 1) Ρύθμιση της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής (και άρα της ηλεκτρικής συχνότητας) του συγχρονιζόμενου εναλλακτήρα, ώστε αυτή να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη (με άνω όριο το 1%) από τη συχνότητα του δικτύου (Προυσαλίδης, 2019).
- 2) Ρύθμιση της τάσης του εναλλακτήρα, ώστε αυτή να είναι λίγο μεγαλύτερη (με άνω όριο το 5%) από την αντίστοιχη του δικτύου (Προυδαλίδης, 2019).
- 3) Κλείσιμο του διακόπτη που συνδέει τον εναλλακτήρα με το δίκτυο (generator circuit breaker), όταν οι στιγμιαίες τάσεις τους ταυτίζονται και έχουν την ίδια φασική γωνία.

Ο λόγος που η τάση και η συχνότητα του εναλλακτήρα είναι λίγο μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα μεγέθη του δικτύου, είναι ώστε ο εναλλακτήρας να έχει το περιθώριο να παραλάβει από την αρχή της σύνδεσης ένα μικρό μέρος του φορτίου και να μην λειτουργήσει ως κινητήρας, δηλαδή απορροφώντας ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο, παρότι υπάρχουν ειδικοί διακόπτες προστασίας (reverse power or anti – motoring protective relays) για την αποτροπή αυτού του φαινομένου. Εάν ο προς παραλληλισμόν εναλλακτήρας απορροφήσει ισχύ από τον εναλλακτήρα που βρίσκεται ήδη σε λειτουργία, ενέχεται ο κίνδυνος καταστροφής της κινητήριας μηχανής του πρώτου.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διαδικασία του συγχρονισμού είναι αυτοματοποιημένη και πραγματοποιείται μέσω ενός αυτόματου συγχρονιστή (synchronizer), με δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου από τον χειριστή (operator) για κάποιες ειδικές περιπτώσεις. Ο συγχρονιστής καθορίζει το σημείο ρύθμισης του AVR, ελέγχοντας έτσι το ρεύμα που παρέχεται από τη διεγέρτρια στο τύλιγμα διέγερσης, προκειμένου να ικανοποιούνται οι σχετικές με την τάση συνθήκες σύνδεσης του εναλλακτήρα με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο.

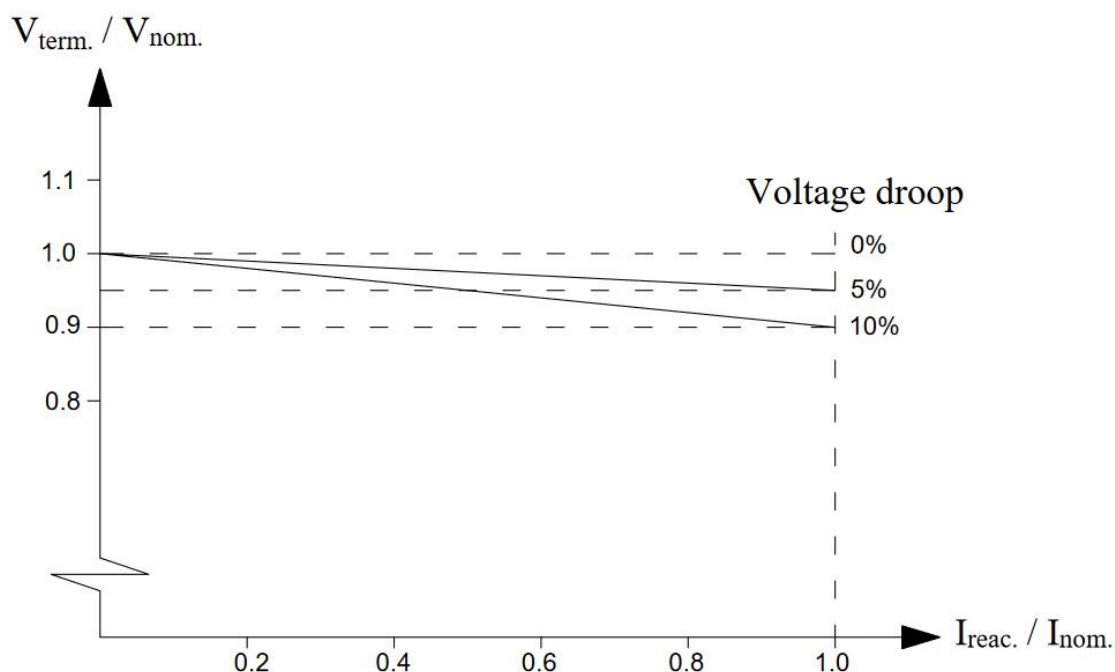
4.2.1.3. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας παραλληλισμένης με το ηλεκτρικό δίκτυο

Η λειτουργία ενός εναλλακτήρα παραλληλισμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο (paralleled with grid operation mode), συμβαίνει όταν ο εναλλακτήρας λειτουργεί σε σύνδεση με έναν “άπειρο ζυγό” (infinite bus), ο οποίος μπορεί να αντιστοιχεί, για παράδειγμα, στο δίκτυο της ΔΕΗ. Ως άπειρος ζυγός μπορεί να θεωρηθεί και μία γεννήτρια, όταν είναι πολύ μεγαλύτερου μεγέθους από τον παραλληλισμένο με αυτή εναλλακτήρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της περίπτωσης αυτής, όσον αφορά στις ναυτικές εφαρμογές, αποτελεί η παράλληλη λειτουργία των εναλλακτών του πλοίου με το ηλεκτρικό δίκτυο της ξηράς, κατά την ηλεκτρική διασύνδεση των ελλιμενιζόμενων πλοίων, όταν αυτή προβλέπεται.

Το ηλεκτρικό δίκτυο που λειτουργεί ως άπειρος ζυγός, με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο εναλλακτήρας, χαρακτηρίζεται από πολύ μεγαλύτερη αδράνεια συγκριτικά με τον συνεργαζόμενο εναλλακτήρα και συνεπώς είναι εκείνο που υπαγορεύει τη συχνότητα και την τάση λειτουργίας του

συστήματος. Η χαρακτηριστική $V - Q$ του απείρου ζυγού είναι (σχεδόν) οριζόντια ευθεία ($x_Q \approx 0\%$) και επομένως θεωρείται ότι η τιμή της τάσης του διατηρείται σταθερή, παρά τις όποιες μεταβολές της αέργου φόρτισεως του συστήματος.

Όπως τονίστηκε προηγουμένως, η χαρακτηριστική του AVR προσεγγίζεται από μία ευθεία με σταθερή αρνητική κλίση. Το εσωτερικό σημείο ρύθμισης (set - point) του AVR, επιλέγεται έτσι ώστε όταν η τροφοδοτούμενη άεργος ισχύς από τη γεννήτρια προς το δίκτυο είναι μηδενική, η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας να ισούται με την ονομαστική της τάση. Ο βαθμός αναλογίας ή στατισμός του AVR x_Q (voltage droop), συνήθως εκφράζεται ως το ποσοστό μείωσης της τάσης στην κατάσταση μέγιστης αέργου φορτίσεως, σε σχέση με την ονομαστική τάση του εναλλακτήρα που χαρακτηρίζει την κατάσταση μηδενικής αέργου φορτίσεως. Ανάλογα με τον AVR, η μέγιστη άεργος ισχύς ορίζεται συνήθως είτε ως η παραγόμενη άεργος ισχύς κατά τη λειτουργία της γεννήτριας στον ονομαστικό συντελεστή ισχύος, είτε ως η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας. Οι τιμές του x_Q κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 2 - 5% (Προυσαλίδης, 2019). Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 4.4. που ακολουθεί.



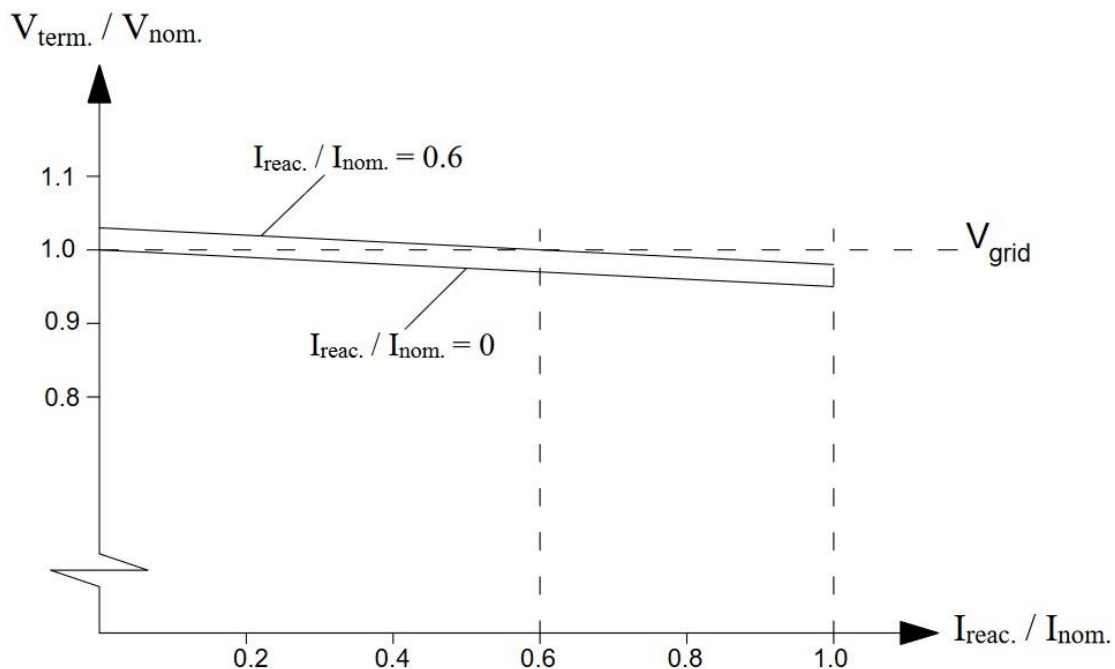
Σχήμα 4.4.: Χαρακτηριστικές αυτόματων ρυθμιστών τάσης με στατισμό 5% και 10%

Η ερμηνεία του παραπάνω γραφήματος είναι, ότι καθώς η άεργος φόρτιση της γεννήτριας αυξάνεται, η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας

μειώνεται προσεγγιστικά με σταθερό ρυθμό, ο οποίος εκφράζεται από την κλίση της χαρακτηριστικής. Στο σχήμα απεικονίζονται δύο παραδείγματα χαρακτηριστικών διαφορετικών AVR, για τις περιπτώσεις όπου $x_Q = 5\%$ και $x_Q = 10\%$. Εάν δεν αλλάξει το αρχικό σημείο ρύθμισης του AVR, για όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις αέργου φορτίσεως του σχήματος 4.4. η μείωση της τάσης δίνεται από την χαρακτηριστική του εκάστοτε AVR.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4., η τάση ακροδεκτών, $V_{term.}$, της γεννήτριας εκφράζεται συχνά ως ποσοστό της ονομαστικής τάσης της, $V_{nom.}$, ενώ η άεργος φόρτιση της γεννήτριας εκφράζεται ως ποσοστό της άεργου συνιστώσας του ρεύματος που παράγει η γεννήτρια, $I_{react.}$, επί του ονομαστικού ρεύματος της γεννήτριας, $I_{nom.}$.

Όταν ένας εναλλακτήρας είναι απευθείας συνδεδεμένος με ένα ηλεκτρικό δίκτυο που λειτουργεί σαν άπειρος ζυγός, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η τάση του δικτύου θεωρείται σταθερή και δεν μπορεί να ελεγχθεί από τον AVR. Αυτό που μπορεί να ελέγξει ο AVR είναι η παραγωγή άεργου ισχύος της γεννήτριας, μέσω κατάλληλης μεταβολής του σημείου ρύθμισής του, όπως φαίνεται από το σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5.: Αλλαγή του σημείου ρύθμισης (set – point) του AVR γεννήτριας παραλληλισμένης με το ηλεκτρικό δίκτυο, ανάλογα με την άεργο φόρτιση

Στο παραπάνω σχήμα, θεωρείται ότι η τάση του δικτύου V_{grid} που λειτουργεί ως άπειρος ζυγός είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική

τιμή της τάσης ακροδεκτών του παραλληλισμένου εναλλακτήρα. Στην αρχή θεωρείται ότι η άεργος φόρτιση του συστήματος είναι μηδενική, δηλαδή $I_{react.} / I_{nom.} = 0$. Εάν αυξηθεί η άεργος φόρτιση της γεννήτριας (για παράδειγμα $I_{react.} / I_{nom.} = 0.6$ στο σχήμα 4.5.), τότε, αφού η τάση του δικτύου παραμένει αναγκαστικά σταθερή, η χαρακτηριστική του AVR θα πρέπει να μετακινηθεί παράλληλα προς τον εαυτό της, χωρίς αλλαγή της κλίσης της και προς τα επάνω, για να ικανοποιήσει τις ανάγκες σε άεργο ισχύ στην τάση λειτουργίας που επιβάλλει το δίκτυο – άπειρος ζυγός. Η μετακίνηση αυτή της χαρακτηριστικής πραγματοποιείται με αύξηση του εσωτερικού σημείου ρύθμισης της τάσης του AVR.

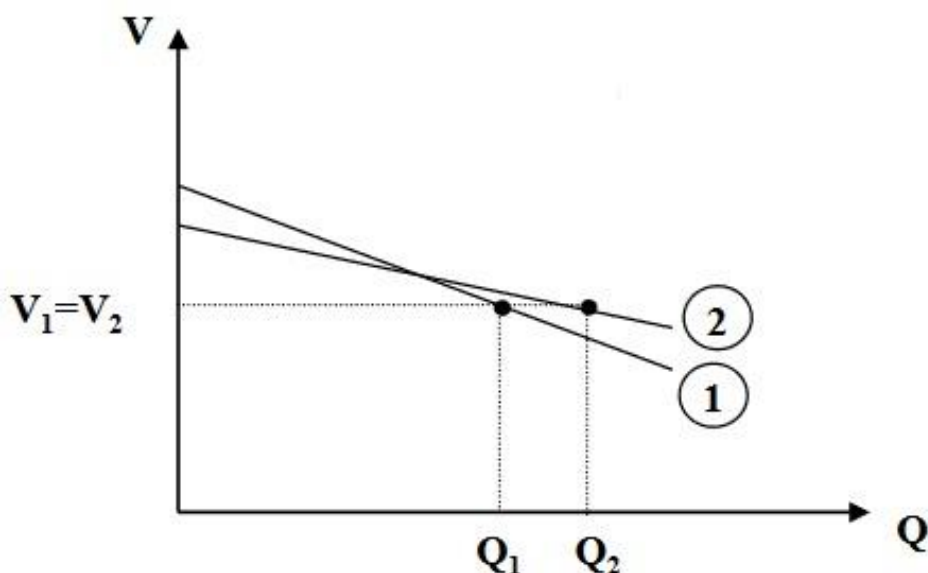
Αύξηση της αέργου φορτίσεως επιβάλλει αύξηση του σημείου ρύθμισης του AVR, συνεπώς αύξηση του συνεχούς ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα διέγερσης και παράλληλη μετακίνηση της χαρακτηριστικής του ρυθμιστή τάσης προς τα επάνω. Αντιστρόφως, μείωση της αέργου φορτίσεως της γεννήτριας, οδηγεί σε μείωση του εσωτερικού σημείου ρύθμισης του AVR και άρα σε μείωση του συνεχούς ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα διέγερσης και σε παράλληλη μετακίνηση της χαρακτηριστικής του ρυθμιστή τάσης προς τα κάτω.

4.2.1.4. Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών σύγχρονης γεννήτριας παραλληλισμένης με άλλες σύγχρονες γεννήτριες

Εάν το ηλεκτρικό δίκτυο με το οποίο συνδέεται ο παραλληλισμένος εναλλακτήρας είναι πολύ μικρό, ή απλώς αποτελείται από άλλους εναλλακτήρες, η άεργος φόρτιση θα μοιράζεται μεταξύ των μονάδων του δικτύου, ανάλογα με τον στατισμό ρυθμιστή τάσης του κάθε εναλλακτήρα. Η λειτουργία δύο ή περισσότερων εναλλακτάρων παραλληλισμένων μεταξύ τους, χωρίς να βρίσκονται συνδεδεμένοι με το ηλεκτρικό δίκτυο της ξηράς (π.χ. ΔΕΗ), συχνά συναντάται στην ξένη βιβλιογραφία ως “island operation mode”. Η λειτουργία αυτή χαρακτηρίζει τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των πλοίων, όπου συνήθως δύο κύριες σύγχρονες γεννήτριες τροφοδοτούν με ηλεκτρική ισχύ τα διάφορα φορτία. Η ειδική περίπτωση όπου μία μόνον γεννήτρια, απομονωμένη από το δίκτυο, τροφοδοτεί ένα ή περισσότερα φορτία, συναντάται στην ξένη βιβλιογραφία και ως “stand – alone operation mode” και αποτελεί ουσιαστικά μία υπο – περίπτωση του τρόπου λειτουργίας που αναφέρθηκε παραπάνω.

Ο επιμερισμός των αέργων φορτίσεων μεταξύ παραλληλισμένων εναλλακτήρων, βασίζεται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στους στατισμούς των ρυθμιστών τάσης αυτών, δηλαδή στις κλίσεις των χαρακτηριστικών τάσης ακροδεκτών – αέργου ισχύος ($V - Q$), οι οποίες αναπαριστούν τη συνεργασία των ζευγών των γεννητριών με τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης τους. Υπενθυμίζεται, ότι ο κανόνας $V - Q$ στην πραγματικότητα δεν είναι γραμμικός, αλλά υπό προϋποθέσεις (μικρές αέργες φορτίσεις, βλ. σχήμα 4.3.) μπορεί να προσεγγιστεί από μία γραμμική χαρακτηριστική.

Γίνεται η θεώρηση, ότι δύο εναλλακτήρες (1) και (2), με διαφορετικές χαρακτηριστικές $V - Q$ του AVR τους, λειτουργούν παραλληλισμένοι για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου σε άεργο ισχύ, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6.: Συνεργασία παραλληλισμένων εναλλακτήρων σε κοινό $V - Q$ διάγραμμα
(πηγή: Προυσαλίδης, 2019)

Η συνολική άεργος φόρτιση που παραλαμβάνουν οι δύο εναλλακτήρες θα ισούται με:

$$Q_{\text{tot}} = Q_1 + Q_2 \quad (4.9)$$

Οι χαρακτηριστικές $V - Q$ των εναλλακτήρων (1) και (2) προσεγγίζονται με γραμμικό τρόπο σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\text{Εναλλακτήρας (1): } V_1 = V = E_1 - x_{Q1} V_{N1} \frac{Q_1}{Q_{N1}} \quad (4.10)$$

$$\text{Εναλλακτήρας (2): } V_2 = V = E_2 - x_{Q2} V_{N2} \frac{Q_2}{Q_{N2}} \quad (4.11)$$

όπου

E_1, E_2 : οι τάσεις κενού φορτίου των εναλλακτών (1) και (2) αντίστοιχα

V_{N1}, V_{N2} : οι ονομαστικές τάσεις των εναλλακτών (1) και (2) αντίστοιχα

Q_{N1}, Q_{N2} : οι ονομαστικές (πλήρεις) άεργες φορτίσεις των εναλλακτών (1) και (2) αντίστοιχα

$V = V_1 = V_2$: η κοινή τάση λειτουργίας των εναλλακτών (1) και (2)

Με γνωστά όλα τα υπόλοιπα μεγέθη, από το σύστημα των εξισώσεων (4.9), (4.10) και (4.11) μπορούν να υπολογιστούν οι επιμέρους άεργες φορτίσεις των δύο εναλλακτών Q_1 και Q_2 και η κοινή τάση λειτουργίας τους V .

Εάν τώρα αλλάξει η συνολική άεργος φόρτιση Q_{tot} , θα αλλάξει και ο επιμερισμός των φορτίσεων μεταξύ των γεννητριών, σύμφωνα με τους στατισμούς των ρυθμιστών τάσης τους, άρα και η κοινή τάση λειτουργίας τους. Η αλλαγή αυτή, η οποία εξαρτάται από τις τιμές των στατισμών, καλείται “πρωτεύουσα ρύθμιση” ή αλλιώς “αυτορρύθμιση”. Είναι πιθανόν, ωστόσο, η νέα τάση λειτουργίας των δύο εναλλακτών να απέχει σημαντικά από την ονομαστική τάση τους, γεγονός που είναι γενικά ανεπιθύμητο. Στην περίπτωση αυτή, ακολουθεί μία επιπλέον ρύθμιση, η οποία αποκαλείται “δευτερεύουσα ρύθμιση”. Αυτό που συμβαίνει ποιοτικά, είναι ότι η $V - Q$ χαρακτηριστική του ενός ή περισσότερων παραλληλισμένων εναλλακτών μετακινείται παράλληλα προς τον εαυτό της, χωρίς να μεταβάλλεται ο στατισμός του ρυθμιστή της, κατά τρόπο όμοιο με εκείνον που συζητήθηκε στην παράγραφο 4.2.1.3. Έτσι, όταν απαιτείται αύξηση της τάσης, η χαρακτηριστική μετακινείται προς τα επάνω, μέσω κατάλληλης αύξησης του εσωτερικού σημείου ρύθμισης της τάσης του AVR του εναλλακτήρα. Η μετακίνηση προς τα επάνω υποδηλώνει αύξηση του ρεύματος διέγερσης του δρομέα, η οποία ρυθμίζεται μετά από παρέμβαση του AVR. Η αντίστροφη διαδικασία ακολουθείται όταν απαιτείται μείωση της κοινής τάσης λειτουργίας.

Ουσιαστικά, η δευτερεύουσα ρύθμιση έγκειται στην επίλυση του παρακάτω συστήματος δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους:

$$E_1 = V_{N1} + x_{Q1} V_{N1} \frac{Q_1}{Q_{N1}} \quad (4.12)$$

$$E_2 = V_{N2} + x_{Q2} V_{N2} \frac{Q_2}{Q_{N2}} \quad (4.13)$$

Δηλαδή, με γνωστές τις επιμέρους άεργες φορτίσεις Q_1 και Q_2 των εναλλακτών (1) και (2) αντίστοιχα, όπως αυτές προκύπτουν από τη διαδικασία της πρωτεύουσας ρύθμισης, αναζητούνται οι τιμές των τάσεων κενού φορτίου των δύο εναλλακτών, E_1 και E_2 , έτσι ώστε οι δύο εναλλακτές να λειτουργούν στην ονομαστική τους τάση, V_{N1} και V_{N2} (στις περισσότερες εφαρμογές ισχύει $V_{N1} = V_{N2}$, αποτελώντας έτσι την κοινή τάση λειτουργίας των δύο εναλλακτών). Αφού αυτές υπολογιστούν, μέσω του AVR του κάθε εναλλακτήρα ρυθμίζεται στη συνέχεια το σημείο λειτουργίας κενού φορτίου, μέσω παράλληλης μεταφοράς της χαρακτηριστικής του.

4.2.2. Ρύθμιση συντελεστή ισχύος / αέργου ισχύος σύγχρονης γεννήτριας

Όταν μία σύγχρονη γεννήτρια είναι παραλληλισμένη με δίκτυο – άπειρο ζυγό, η λειτουργία της μπορεί να ελεγχθεί είτε ως προς την τερματική τάση της είτε ως προς τον συντελεστή ισχύος της ή την άεργο ισχύ που παράγει. Η δεύτερη περίπτωση, αναφέρεται στην ξένη βιβλιογραφία ως “power factor / var control”. Η επιλογή του τρόπου ελέγχου εξαρτάται από το μέγεθος της γεννήτριας και από τη “στιβαρότητα” του ζυγού του δικτύου με το οποίο είναι παραλληλισμένη.

Για αρκετά μεγάλες γεννήτριες, των οποίων η ονομαστική φαινόμενη ισχύς είναι επαρκής ώστε να μπορούν αυτές να καθορίζουν την τάση του ζυγού του συστήματος, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η μέθοδος ρύθμισης της τάσης ακροδεκτών. Όταν, όμως, ρυθμίζεται η τάση ακροδεκτών μικρότερων γεννητριών, οι οποίες είναι παραλληλισμένες με άπειρο ζυγό, η τάση του συστήματος δεν επηρεάζεται από αυτή τη ρύθμιση, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και στις προηγούμενες παραγράφους. Σε αυτήν την περίπτωση, η γεννήτρια μπορεί να επηρεάσει μόνον την παραγωγή αέργου ισχύος του συστήματος, μέσω κατάλληλης αλλαγής του σημείου ρύθμισης του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της.

Ωστόσο, εάν η τάση του συστήματος αλλάξει σημαντικά, η μικρή γεννήτρια, μέσω της συνεχούς δράσης του AVR της, θα επιχειρήσει να διατηρήσει το καθορισμένο σημείο ρύθμισης της τάσης της (voltage set – point) σε σταθερό επίπεδο. Έτσι, καθώς ο AVR της σύγχρονης γεννήτριας ακολουθεί τη χαρακτηριστική του, μπορεί να προκαλέσει είτε υπερ – διέγερση είτε υπο – διέγερση της γεννήτριας, εάν η τάση του δικτύου μειωθεί ή αυξηθεί αντίστοιχα.

Μεγάλη αύξηση της τάσης του δικτύου, μπορεί να προκαλέσει στη μικρή γεννήτρια απώλεια ροπής συγχρονισμού (synchronizing torque), δηλαδή της ροπής που ενεργεί πάνω στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας όταν η μηχανική περιστροφική ταχύτητα του δρομέα αποκλίνει από τη σύγχρονη ταχύτητα, διατηρώντας, έτσι, τη σύγχρονη λειτουργία της γεννήτριας. Αντίθετα, μεγάλη μείωση της τάσης του δικτύου, πιθανώς να οδηγήσει σε υπερθέρμανση της γεννήτριας ή και υπερφόρτιση του συστήματος διέγερσης, εξαιτίας της σημαντικής αύξησης του ρεύματος διέγερσης.

Διατηρώντας σταθερή την άεργο φόρτιση της μικρότερης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (σύγχρονη γεννήτρια), μπορούν να μειωθούν οι μεταβολές του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας, με πολλαπλά οφέλη για τη λειτουργία του συστήματος διέγερσης και των εξαρτημάτων που το απαρτίζουν.

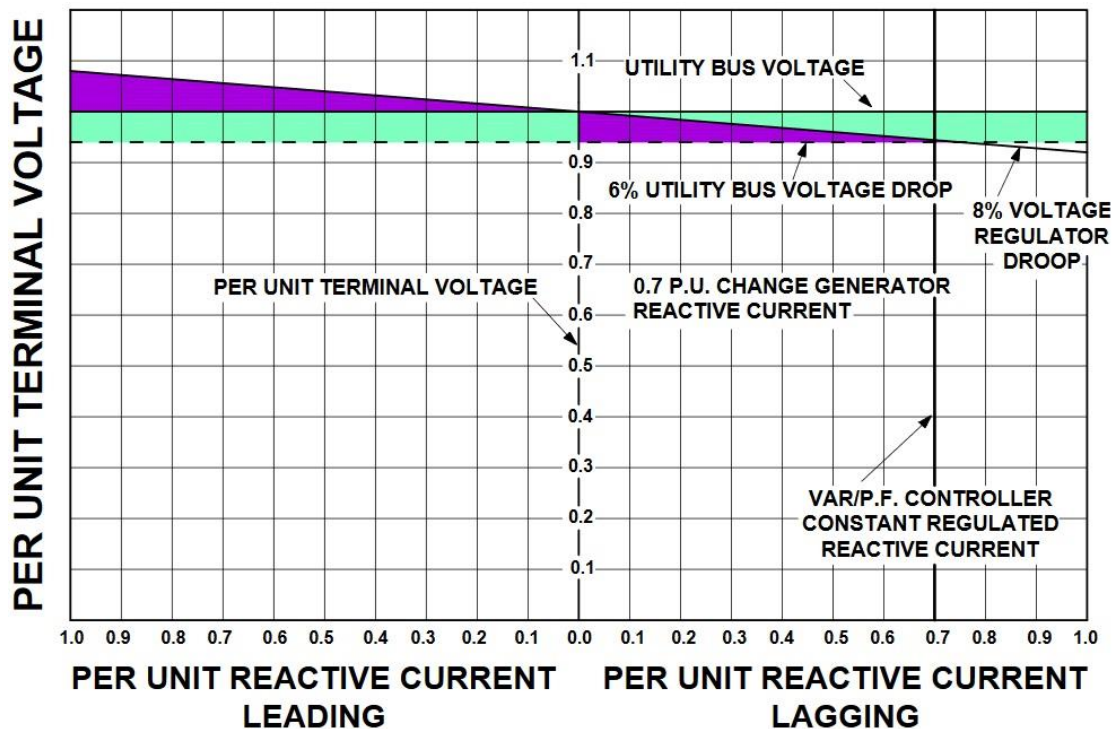
Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, όταν μία σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο, πιθανώς να υπάρξουν περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι επιθυμητή η ρύθμιση της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας μέσω του στατισμού τάσης από τον AVR της (voltage droop compensation). Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται, όταν η τάση της γραμμής μεταφοράς (transmission line voltage) ή/και της γραμμής διανομής (distribution line voltage) του συστήματος είναι ευαίσθητη σε τοπικές διακυμάνσεις του φορτίου. Για παράδειγμα, θεωρείται ότι το ηλεκτρικό δίκτυο – άπειρος ζυγός, με το οποίο είναι παραλληλισμένος ο εναλλακτήρας, είναι το δίκτυο της ΔΕΗ. Κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, η τάση του δικτύου πιθανώς να είναι κανονική, αλλά καθώς η φόρτιση του δικτύου αυξάνεται προοδευτικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, η τάση θα παρουσιάσει πτώση. Ένα άλλο παράδειγμα, είναι η πτώση τάσης που παρατηρείται παράλληλα με την αύξηση της φόρτισης του συστήματος, όταν οι γραμμές μεταφοράς και

διανομής χαρακτηρίζονται από υψηλές επαγωγικές αντιδράσεις. Εξαιτίας του φαινομένου αυτού, μειώνεται η διαθέσιμη τάση προς το φορτίο, αναγκάζοντας τις τοπικές γεννήτριες να τροφοδοτούν με μεγαλύτερα ποσά αέργου ισχύος τον ζυγό του δικτύου, προκειμένου να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του συστήματος.

Ανάλογα με τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς ή της γραμμής διανομής στην περιοχή του τοπικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και με τη ρύθμιση της τάσης του ζυγού του συστήματος, μία μικρού μεγέθους γεννήτρια συνδεδεμένη με τον ζυγό του δικτύου μπορεί να υποστεί είτε σοβαρή υπερφόρτιση είτε υπο – διέγερση. Η σοβαρότητα εξαρτάται από το μέγεθος και την κατεύθυνση της μεταβολής της τάσης του συστήματος.

Οι μεταβολές τάσης, λοιπόν, δεν είναι σπάνιες στα δίκτυα ηλεκτρικής ισχύος που λειτουργούν ως άπειροι ζυγοί. Όταν είναι ασήμαντες, ο στατισμός τάσης μέσω του AVR εξασφαλίζει την ομαλή κατανομή της αέργου φορτίσεως ανάμεσα στη γεννήτρια και τον διασυνδεδεμένο ζυγό. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αυτή η μέθοδος ρύθμισης, αποτρέπει μεγάλες αλλαγές στην τροφοδοσία αέργου ρεύματος για οποιαδήποτε από τις παραλληλισμένες με το δίκτυο γεννήτριες.

Στο σχήμα 4.7., μία γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με αυτόματο ρυθμιστή τάσης, ο οποίος χαρακτηρίζεται από στατισμό 8%. Το γράφημα αυτό, απεικονίζει την επίδραση που έχουν οι αλλαγές της τάσης του απείρου ζυγού στην άεργο φόρτιση της γεννήτριας. Για παράδειγμα, φαίνεται ότι εάν η τάση του ζυγού μειωθεί κατά 6%, η άεργος φόρτιση της γεννήτριας θα αλλάξει από μηδενική σε 70%, εφόσον ο AVR διατηρεί σταθερό το σημείο ρύθμισης της τάσης (δηλαδή το σημείο της τάσης μηδενικού φορτίου, στο σχήμα 4.7. ίσης με την ονομαστική τάση της γεννήτριας). Μία περαιτέρω πτώση της τάσης του ζυγού, της τάξης του 10%, θα υπερέβαινε την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της γεννήτριας, όπως φαίνεται και στο σχήμα, προκαλώντας υπερβολική θέρμανση του τυλίγματος διέγερσης και των ημιαγωγών ισχύος του συστήματος διέγερσης. Αυτή η υπερθέρμανση είναι ανάλογη της αύξησης της αέργου φορτίσεως με επαγωγικό συντελεστή ισχύος (lagging reactive load).



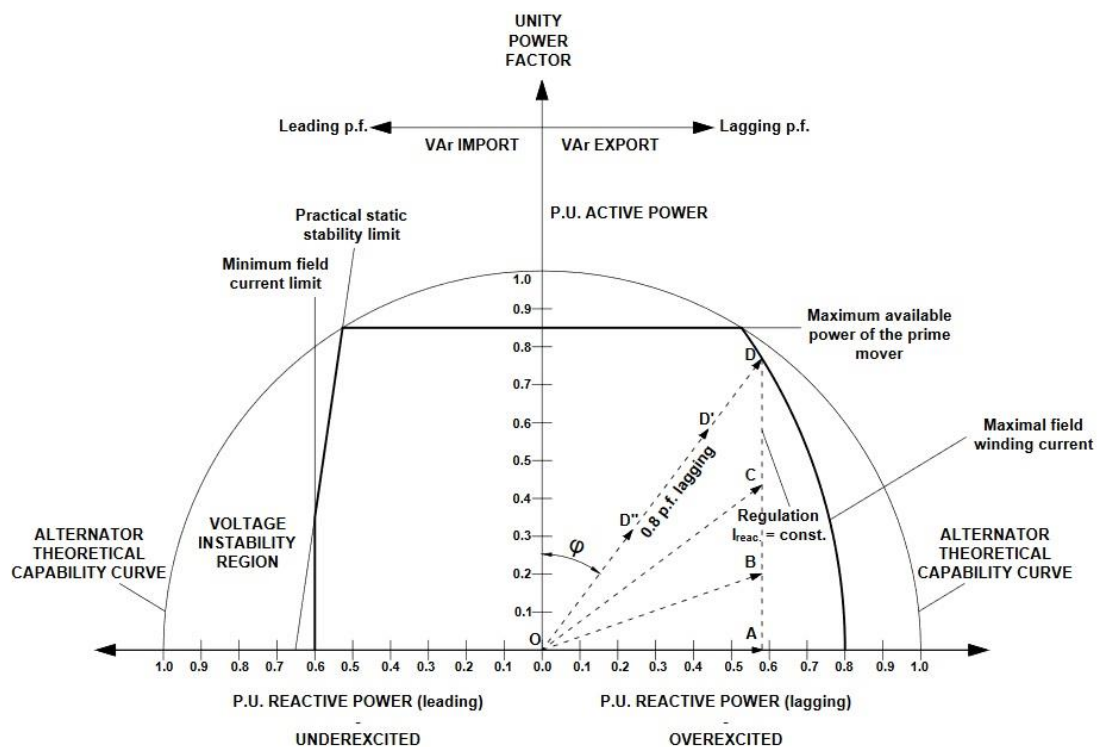
Σχήμα 4.7.: Ρύθμιση τάσης ακροδεκτών μέσω στατισμού AVR σε σύγκριση με ρύθμιση συντελεστή ισχύος / αέργου φορτίσεως της γεννήτριας (πηγή: Eberly, 2002)

Από το σχήμα 4.7., μπορεί κάποιος εύκολα να παρατηρήσει, επιπλέον, ότι στην περίπτωση που η τάση του δικτύου αυξηθεί πάνω από την ονομαστική, ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας γίνεται χωρητικός (leading reactive load). Κατά την περίπτωση αυτή, ανάλογα με τον στατισμό του ρυθμιστή τάσης, πιθανώς να προκληθεί υπο – διέγερση της γεννήτριας και το κύκλωμα του AVR να προκαλέσει απώλεια του συγχρονισμού της σύγχρονης μηχανής. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα ανεπιθύμητα φαινόμενα, χρησιμοποιείται περιοριστής για το μέγιστο ρεύμα διέγερσης, για την αποφυγή υπερθέρμανσης του δρομέα όταν η τάση του δικτύου πέφτει πολύ χαμηλά, ενώ χρησιμοποιείται περιοριστής και για το ελάχιστο ρεύμα διέγερσης, με στόχο την προστασία της γεννήτριας έναντι πιθανής απώλειας συγχρονισμού όταν η τάση του δικτύου αυξάνεται σημαντικά.

Υπό τέτοιες συνθήκες, οι οποίες μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση της σύγχρονης γεννήτριας, είναι προτιμότερη η μέθοδος ελέγχου του συντελεστή ισχύος ή της αέργου ισχύος της γεννήτριας. Αυτές οι επιλογές ελέγχου, οι οποίες μπορεί να είναι διαθέσιμες μέσω του AVR, επιτρέπουν τη ρύθμιση της γεννήτριας, έτσι ώστε να λειτουργεί με έναν καθορισμένο σταθερό συντελεστή ισχύος ή να παράγει καθορισμένη ποσότητα σταθερών VAr. Στο σχήμα 4.7.,

απεικονίζεται, επιπλέον, ο τρόπος ελέγχου της αέργου φορτίσεως της γεννήτριας αντί για τη ρύθμιση της τάσης ακροδεκτών της μέσω της χαρακτηριστικής του AVR. Εύκολα παρατηρείται η επίδραση των μεταβολών τάσης του ζυγού στην αέργο φόρτιση του συστήματος, όταν εφαρμόζεται η ρύθμιση της τάσης ακροδεκτών, εν αντιθέσει με τη ρύθμιση της αέργου ισχύος σε ένα σταθερό επίπεδο (70% στο σχήμα 4.7.), η οποία διατηρείται σταθερή ανεξαρτήτως των μεταβολών τάσης του δικτύου που πιθανώς θα συμβούν. Θα μπορούσε, λοιπόν, κανείς, να παρομοιάσει τον έλεγχο της γεννήτριας μέσω της ρύθμισης της αέργου φορτίσεως της, με τον έλεγχο της τάσης ακροδεκτών, εάν ο στατισμός του AVR ήταν άπειρος (γωνία 90° μεταξύ της χαρακτηριστικής του AVR και του οριζόντιου άξονα της αέργου φορτίσεως).

Το σχήμα 4.8. μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατανόηση του ελέγχου της σύγχρονης γεννήτριας μέσω της ρύθμισης του συντελεστή ισχύος ή της αέργου φορτίσεως της.



Σχήμα 4.8.: Ρύθμιση συντελεστή ισχύος και αέργου φορτίσεως της σύγχρονης γεννήτριας

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει το διάγραμμα φόρτισεως μίας σύγχρονης γεννήτριας (load diagram or capability curve). Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στην παραγωγή ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια, ενώ ο οριζόντιος άξονας στην παραγωγή ή κατανάλωση

αέργου ισχύος από τη γεννήτρια, ανάλογα με το εάν ο συντελεστής ισχύος είναι επαγωγικός (lagging) ή χωρητικός (leading) αντίστοιχα. Προφανώς, τα σημεία του επιπέδου $P - Q$ αντιστοιχούν στη μιγαδική ισχύ \tilde{S} , αφού είναι γνωστό ότι $\tilde{S} = P + jQ$, ενώ το μέτρο της διανυσματικής ακτίνας των σημείων του επιπέδου αντιστοιχεί στη φαινόμενη ισχύ S , όπου $S^2 = P^2 + Q^2$. Η θεωρητική οριακή καμπύλη φαινόμενης ισχύος της γεννήτριας αντιστοιχεί στο ημικύκλιο του σχήματος 4.8. και εκφράζει το ανώτατο όριο υπερθέρμανσης του στάτη. Στην πραγματικότητα, όμως, η λειτουργία της γεννήτριας χαρακτηρίζεται και από άλλους περιορισμούς, οι οποίοι απεικονίζονται στο σχήμα 4.8. με αυξημένο πάχος γραμμής (bold) και συνιστούν τα όρια φόρτισης της γεννήτριας. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στο μέγιστο ρεύμα διέγερσης εξαιτίας της υπερθέρμανσης του δρομέα, στη μέγιστη δυνατότητα παραγωγής ενεργού ισχύος λόγω του ανώτατου ορίου ισχύος που μπορεί να αποδώσει η κινητήρια μηχανή, στο ελάχιστο ρεύμα διέγερσης και στην ασταθή συμπεριφορά της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας κατά τη λειτουργία της τελευταίας με χωρητικό συντελεστή ισχύος.

Στο ίδιο σχήμα, απεικονίζεται μέσω του διανύσματος OD η μέγιστη παραγωγή φαινόμενης ισχύος της γεννήτριας, σύμφωνα με τα όρια του διαγράμματος φόρτισης, με σταθερό επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0.8. Κατά τον έλεγχο της γεννήτριας με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος, μείωση της αέργου φορτίσεως της γεννήτριας θα επιφέρει αντίστοιχη μείωση της ενεργού ισχύος που παράγει, προκειμένου ο συντελεστής ισχύος (άρα και η γωνία φ) να παραμείνει σταθερός (βλ. διανύσματα OD' και OD'' στο σχήμα 4.8.).

Κατά τον έλεγχο της γεννήτριας με ρύθμιση της αέργου ισχύος της, καθώς η ενεργός ισχύς της γεννήτριας μειώνεται προοδευτικά, το διάνυσμα OD κινείται με κατακόρυφο τρόπο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Το άκρο του διανύσματος κινείται κατά μήκος μίας κατακόρυφης ευθείας (βλ. διανύσματα OC, OB και OA στο σχήμα 4.8.), η οποία αναπαριστά μία σταθερή τιμή της αέργου ισχύος της γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτόν, η ποσότητα της αέργου ισχύος που παράγει η γεννήτρια ρυθμίζεται σε σταθερό επίπεδο, παρά τις όποιες μεταβολές της ενεργού ισχύος.

4.2.3. Ρύθμιση ρεύματος διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας

Μέσω του AVR, πιθανώς να παρέχεται ακόμη η δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας. Αυτός ο τρόπος ελέγχου αναφέρεται σε χειροκίνητο έλεγχο (manual control) από τον χειριστή. Το ρεύμα διέγερσης, ρυθμίζεται έτσι ώστε να διατηρείται σε μία σταθερή τιμή. Φυσικά, μεταβάλλοντας την τιμή του ρεύματος διέγερσης, θα επηρεάζεται αναλόγως και η άεργος ισχύς της γεννήτριας. Η ρύθμιση αυτή προορίζεται κυρίως για εφαρμογές όπως αντιμετώπιση προβλημάτων (troubleshooting) και κατά τις δοκιμές παραλαβής των γεννητριών (commissioning) και παρακάμπτει όλες τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις λειτουργίας. Για τους λόγους αυτούς, η ρύθμιση αυτή θα πρέπει να εκτελείται μόνον από πολύ εξειδικευμένο προσωπικό, για την αποφυγή βλαβών κατά τη λειτουργία της γεννήτριας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΒΛΑΒΕΣ ΤΟΥ AVR

Περίληψη του κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία σύντομη αναφορά στα συνηθέστερα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά τη χρήση του ρυθμιστή τάσης μίας σύγχρονης γεννήτριας, στα πιθανά αίτιά τους και στις επιπτώσεις που έχουν στην ομαλή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος.

5.1. Εισαγωγή

Όπως έχει σημειωθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κύκλωμα του AVR συνίσταται από τρία επιμέρους βασικά υπο – κυκλώματα: το κύριο κύκλωμα ανόρθωσης που παράγει το ρεύμα διέγερσης (rectifier main circuit), το κύκλωμα ανίχνευσης της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας (voltage detection or voltage sensing circuit) και το κύκλωμα σύγκρισης και ελέγχου (comparison and control circuit), το οποίο παράγει το σήμα σφάλματος βάσει του οποίου ελέγχεται το μέγεθος του ρεύματος διέγερσης. Εξαιρουμένης της γενικής περίπτωσης, κατά την οποία η βλάβη του συστήματος οφείλεται στη χαμηλή ποιότητα των ηλεκτρικών στοιχείων τα οποία συνθέτουν το σύστημα, τα πιο συνηθισμένα προβλήματα κατά τη λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης εντοπίζονται, μεταξύ των συνιστωσών που τον απαρτίζουν, εντός του κυρίου κυκλώματος και του κυκλώματος σύγκρισης και ελέγχου του. Ειδικότερα, η γέφυρα ανόρθωσης του κυρίου κυκλώματος του AVR, η οποία αποτελείται από διόδους ή από θυρίστορ, καθώς και το τρανζίστορ του κυκλώματος σύγκρισης, εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα βλάβης και αντικατάστασης μεταξύ των ηλεκτρονικών ισχύος που συνθέτουν τα δύο αυτά κυκλώματα, καταλαμβάνοντας ποσοστό ίσο ή μεγαλύτερο του 90% των συνολικών βλαβών που καταγράφονται για έναν AVR. Μερικά από τα επιμέρους στοιχεία από τα οποία αποτελείται ο AVR δεν γίνεται να απομονωθούν και να επιδιορθωθούν ξεχωριστά

από το υπόλοιπο σύστημα, συνεπώς ενδεχόμενη αστοχία τους απαιτεί αντικατάσταση ολόκληρης της συσκευής. Για τον λόγο αυτόν, είναι πολύ σημαντικό να αναλύονται οι αιτίες που προκαλούν βλάβες και δυσλειτουργίες του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και κατ' επέκταση της σύγχρονης γεννήτριας, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή και υγιής λειτουργία του εκάστοτε συστήματος ηλεκτρικής ισχύος.

Η διάρκεια ζωής ενός AVR μπορεί να παραταθεί σημαντικά, εφόσον τηρούνται με μεγάλη προσοχή οι κατάλληλες συνθήκες κατά τη λειτουργία του:

- Η τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν πιο σταθερή. Όσο πιο ήπια είναι η εναλλαγή των συνθηκών λειτουργίας που αντιμετωπίζουν οι διακόπτες των υπο – κυκλωμάτων του AVR, η πιθανότητα αστοχίας τους μειώνεται.
- Το ρεύμα του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας, δηλαδή το ρεύμα με το οποίο τροφοδοτείται το φορτίο, πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν σε σταθερό επίπεδο για τους ίδιους λόγους με παραπάνω.
- Η μηχανική περιστροφική ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας πρέπει να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή, προκειμένου να περιορίζονται τα φαινόμενα ταλάντωσης που παρατηρούνται κατά τη λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης.
- Η συχνή και παρατεταμένη λειτουργία της γεννήτριας χωρίς φορτίο (idle running), καθώς και η υπερφόρτιση της και η λειτουργία της υπό σημαντικές διακυμάνσεις του φορτίου, πρέπει να αποφεύγονται, έτσι ώστε να μειώνονται οι πιθανότητες προβληματικής λειτουργίας του AVR.

5.2. Βασικές αιτίες της προβληματικής λειτουργίας και των βλαβών του AVR

Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης μπορεί να οφείλονται σε ποικίλους παράγοντες, οι οποίοι πιθανώς να σχετίζονται με τη φόρτιση της σύγχρονης γεννήτριας, με τις συνθήκες λειτουργίας της κινητήριας μηχανής του δρομέα της, με σφάλματα του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος και με την φθορά του AVR από τις συνεχόμενες ώρες λειτουργίας για μεγάλο χρονικό

διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικοί λόγοι που ευθύνονται για την προβληματική λειτουργία ενός AVR συνδέονται με:

1) Μη σταθερή μηχανική ταχύτητα περιστροφής της σύγχρονης γεννήτριας

Όταν η κινητήρια μηχανή της σύγχρονης γεννήτριας λειτουργεί με μη σταθερή περιστροφική ταχύτητα, επηρεάζεται αναλόγως και η περιστροφή του δρομέα του εναλλακτήρα και τελικά η ομαλή λειτουργία του τελευταίου. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο AVR συναντά δυσκολίες κατά τη λειτουργία του, καθώς η απόδοσή του επηρεάζεται από ασταθείς διακυμάνσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και σε βλάβη του. Για τον λόγο αυτόν, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η περιστροφική ταχύτητα του ζεύγους κινητήριας μηχανής – σύγχρονης γεννήτριας παραμένει σταθερή, έτσι ώστε ο ρυθμιστής τάσης να λειτουργεί ομαλά και με διάρκεια και να μην χρειάζεται να αναλαμβάνει επιπλέον φόρτο εργασίας.

2) Υπερφόρτιση της σύγχρονης γεννήτριας

Όταν μία γεννήτρια καλείται από την άφορτη κατάσταση να αναλάβει κάποιο φορτίο, ή στην περίπτωση που απλώς αυξάνεται το φορτίο που καλείται να καλύψει, τότε, όπως είναι ήδη γνωστό, παρατηρείται αφενός μία μείωση της περιστροφικής ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας και αφετέρου μία πτώση της τάσης ακροδεκτών της. Στην περίπτωση αυτή, ο AVR εργάζεται ώστε να διατηρήσει την τάση όσο γίνεται πιο κοντά στην αρχική τιμή της. Ωστόσο, εάν το φορτίο που παραλαμβάνει ο εναλλακτήρας είναι υπερβολικά μεγάλο, η περιστροφική ταχύτητα της κινητήριας μηχανής πιθανώς να μειωθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε η κινητήρια μηχανή να μην είναι σε θέση να αυξήσει εκ νέου την περιστροφική της ταχύτητα, καθώς θα έχει υπερβεί το όριο των δυνατοτήτων της σύμφωνα με το διάγραμμα φορτίσεώς της. Υπό τέτοιες συνθήκες, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης πρέπει να εργαστεί πολύ πιο έντονα, ώστε να αντιμετωπίσει την πτώση τάσης ακροδεκτών που παρατηρείται ταυτόχρονα με την μείωση της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής. Έτσι, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η γεννήτρια δεν χρησιμοποιείται για την κάλυψη πολύ μεγάλων φορτίων, πέραν των δυνατοτήτων της.

3) Απότομη αύξηση της ζήτησης ισχύος από το σύστημα

Μερικές φορές, η σύγχρονη γεννήτρια έρχεται αντιμέτωπη με πολύ απότομες και μεγάλες αυξήσεις του φορτίου και συνεπώς της ισχύος που παράγει, με αποτέλεσμα ο AVR να αντιμετωπίζει ένα σοκ και να αδυνατεί να σταθεροποιήσει την τάση ακροδεκτών του εναλλακτήρα, η οποία επίσης μεταβάλλεται ξαφνικά και σε μεγάλη κλίμακα. Τέτοιες απότομες μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για τα ηλεκτρικά στοιχεία που συνθέτουν το κύκλωμα του AVR και γι' αυτόν τον λόγο καλό θα είναι να αποφεύγονται κατά το δυνατόν.

4) Βραχυκύκλωμα

Η περίπτωση κατά την οποία ο AVR έρχεται αντιμέτωπος με βραχυκύκλωμα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, ακόμη και την ολική καταστροφή του, με αποτέλεσμα την αντικατάσταση της συσκευής. Επομένως, πρέπει να λαμβάνονται όλα τα κατάλληλα μέτρα προστασίας και προφύλαξης της ηλεκτρικής εγκατάστασης, καθώς επίσης να εκτελούνται τακτικοί έλεγχοι των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων του συστήματος, προκειμένου να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ενός τέτοιου ηλεκτρικού σφάλματος.

5) Υπέρβαση της διάρκειας ζωής του AVR

Ακριβώς όπως και πολλές άλλες ηλεκτρικές συσκευές, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης υφίσταται τη φθορά των επιμέρους στοιχείων που τον αποτελούν, καθώς αυξάνονται οι ώρες λειτουργίας του. Η συχνή έκθεση του AVR σε δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, όπως εκείνες που αναφέρονται παραπάνω, μειώνει τη διάρκεια ζωής της συσκευής. Απαιτείται, λοιπόν, σωστή λειτουργία και τακτικός έλεγχος και συντήρηση του AVR, σύμφωνα με τις διαθέσιμες οδηγίες από τον κατασκευαστή, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη διάρκεια ζωής του.

5.3. Συνήθη ηλεκτρικά σφάλματα κατά τη λειτουργία του AVR

Παρακάτω γίνεται αναφορά σε κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα προβληματικής λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας, εξαιτίας βλάβης του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της.

- Μηδενική τάση στη λειτουργία κενού φορτίου κατά την εκκίνηση της γεννήτριας

Στην περίπτωση αυτή, μία καινούρια μπαταρία, το εύρος της διαφοράς δυναμικού της οποίας καθορίζεται από τον κατασκευαστή, συνδέεται για μερικά δευτερόλεπτα με τους ακροδέκτες του κυκλώματος διέγερσης. Εάν ο εναλλακτήρας αρχίσει να αποκτά διαφορά δυναμικού, αλλά μετά την απομάκρυνση της μπαταρίας η τάση ακροδεκτών του δεν φτάνει την ονομαστική της τιμή, πιθανώς να είναι προβληματική η σύνδεση του σήματος της τάσης αναφοράς με τον AVR ή να είναι ελαττωματικές οι δίοδοι. Κατά την περίπτωση όπου μετά την απομάκρυνση της μπαταρίας η τάση του εναλλακτήρα εξαφανίζεται εντελώς, υπάρχει η πιθανότητα ο ίδιος ο AVR να είναι ελαττωματικός και να απαιτείται περαιτέρω έλεγχος.

- Πολύ χαμηλή τάση ακροδεκτών της γεννήτριας

Ο πρώτος έλεγχος που πρέπει να πραγματοποιηθεί σε αυτήν την περίπτωση, είναι εκείνος της ταχύτητας περιστροφής της κινητήριας μηχανής και συνεπώς του δρομέα του εναλλακτήρα. Εφόσον κατά τον έλεγχο αυτόν διαπιστωθεί ότι η ταχύτητα είναι η σωστή, τότε πιθανώς το πρόβλημα να οφείλεται σε βλάβη του AVR και να απαιτείται περαιτέρω έλεγχος των συνδέσεων του ρυθμιστή τάσης με το υπόλοιπο σύστημα.

- Πολύ υψηλή τάση ακροδεκτών της γεννήτριας

Η κίνηση που πρέπει να γίνει πρώτα, αφορά στη σωστή ρύθμιση του ποτενσιόμετρου (δηλαδή της μεταβλητής αντίστασης για τη ρύθμιση της τάσης) του AVR (voltage potentiometer). Εφόσον το ποτενσιόμετρο είναι σωστά ρυθμισμένο, αλλά η τάση εξόδου της γεννήτριας εξακολουθεί να είναι αρκετά υψηλή, τότε το πρόβλημα αυτό οφείλεται σε δυσλειτουργία του AVR και χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση των αιτιών.

- Ταλαντώσεις της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας

Όταν παρατηρούνται τέτοια φαινόμενα, πρέπει να γίνεται ρύθμιση του ποτενσιόμετρου που χρησιμοποιεί ο AVR για την επίτευξη ευστάθειας της τάσης (stability potentiometer). Εάν η ρύθμιση αυτή δεν έχει κάποιο αποτέλεσμα, το σφάλμα μπορεί να οφείλεται στη δυσλειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και πρέπει να γίνει περαιτέρω διερεύνηση για τον εντοπισμό βλαβών στο σύστημα του AVR.

- Ορθή τιμή της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας κατά τη λειτουργία της χωρίς φορτίο και πολύ χαμηλή τάση ακροδεκτών όταν η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με φορτίο

Στην περίπτωση αυτή, γίνεται δοκιμή με λειτουργία της γεννήτριας χωρίς φορτίο και παράλληλο έλεγχο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών του κυκλώματος διέγερσης του AVR. Εάν η τιμή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών αυτών προκύψει μεγαλύτερη από κάποιες προκαθορισμένες τιμές, οι οποίες ορίζονται από τον κατασκευαστή, τότε πιθανώς το σφάλμα να οφείλεται σε ελαττωματικές περιστρεφόμενες διόδους του συστήματος διέγερσης ή σε ελαττωματικό τύλιγμα επαγωγίμου της διεγέρτριας.

- Η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας χάνεται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της

Εάν παρατηρηθεί αυτό το εξαιρετικά δυσμενές φαινόμενο για τη γεννήτρια και το ηλεκτρικό δίκτυο, πρέπει να ελεγχθεί ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης και οι περιστρεφόμενες διόδοι του συστήματος διέγερσης και να αντικατασταθούν τα ελαττωματικά στοιχεία. Στην περίπτωση κατά την οποία, παρά τις ενέργειες αυτές, η τάση δεν επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή, ο AVR μπορεί να είναι ελαττωματικός και να απαιτείται η επιδιόρθωση ή ακόμη και η αντικατάστασή του. Για την αποφυγή σημαντικής βλάβης της γεννήτριας, πιθανώς να ενεργοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις ο εσωτερικός μηχανισμός προστασίας της γεννήτριας (για παράδειγμα η προστασία έναντι υπερφόρτισης, ανοικτοκύκλωσης ή βραχυκύκλωσης).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία έντονη στροφή της ναυτιλίας προς την πιο οικολογική λειτουργία των πλοίων, κατευθυνόμενη από τον διεθνή ναυτιλιακό οργανισμό (ΙΜΟ) μέσω της θέσπισης νέων και πιο αυστηρών κανονισμών, σχετικών με τα όρια εκπομπών αερίων ρύπων από τα πλοία. Σε αυτά τα πλαίσια, η λύση μπορεί να βρεθεί, ως έναν βαθμό, από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας έναντι των ορυκτών καυσίμων, όπου αυτό είναι δυνατόν. Διανύοντας, λοιπόν, μία εποχή έντονου εξηλεκτρισμού των πλοίων, είναι σημαντικό για έναν ναυπηγό μηχανολόγο μηχανικό να γνωρίζει τις βασικές αρχές λειτουργίας των ναυτικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή δόθηκε έμφαση στην περιγραφή κάποιων βασικών ηλεκτρικών μεγεθών και εγκαταστάσεων που συναντώνται συχνότερα στις ναυτιλιακές εφαρμογές, με όσο το δυνατόν πιο απλό και επεξηγηματικό τρόπο, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει και να εξοικειωθεί με έννοιες που είτε δεν είναι αρκετά ξεκάθαρες στη βιβλιογραφία είτε πιθανώς να μην είχε έρθει ξανά σε επαφή.

Για λόγους πληρότητας, έγινε αναφορά σε κάποια θεμελιώδη μεγέθη ηλεκτρικής ισχύος, προκειμένου να υπενθυμιστούν και να παρουσιαστούν συγκεντρωτικά κάποιες βασικές έννοιες που είχαν διδαχθεί σε μαθήματα προηγούμενων εξαμήνων της σχολής. Έχοντας θέσει αυτές τις βάσεις, εισήχθη η έννοια της αρμονικής ισχύος και των παραμορφώσεων που προκύπτουν όταν τα φορτία που πρέπει να τροφοδοτηθούν είναι μη γραμμικά. Ο εξηλεκτρισμός που παρατηρείται στη ναυτιλία ευνοεί τη χρήση τέτοιων έντονα μη γραμμικών ηλεκτρονικών ισχύος, καθιστώντας τις αρμονικές παραμορφώσεις και τις παράπλευρες συνέπειες τους ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των πλοίων. Το επιπλέον βάρος των αρμονικών συνιστωσών ισχύος καλούνται να επωμιστούν οι πηγές

ηλεκτρικής ισχύος των πλοίων, δηλαδή οι σύγχρονες γεννήτριες που λειτουργούν παράλληλα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε κάθε κατάσταση λειτουργίας. Αναπόσπαστο τμήμα της εγκατάστασης των ηλεκτρο – γεννητριών αποτελεί το σύστημα διέγερσής τους, μέσω του οποίου ελέγχεται η τάση ακροδεκτών και η παραγωγή αέργου ισχύος από το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. Για τον λόγο αυτόν, παρουσιάστηκαν εκτενώς οι αρχές λειτουργίας και τα μοντέλα των επικρατέστερων συστημάτων διέγερσης που συναντώνται συνήθως στη ναυτιλία, ακολουθώντας τα αντίστοιχα πρότυπα του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην κατανόηση της δομής και της λειτουργίας του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, η ύπαρξη του οποίου καθορίζει την ομαλή λειτουργία του εναλλακτήρα, παρά τις όποιες μεταβολές πιθανώς να προκύψουν στη φόρτιση. Ο μηχανισμός ρύθμισης της τάσης εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας (γεννήτρια παραλληλισμένη με δίκτυο – άπειρο ζυγό, γεννήτρια παραλληλισμένη με άλλη γεννήτρια κλπ.), οπότε παρουσιάστηκε ο τρόπος ρύθμισης της τάσης μέσω του AVR ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Παράλληλα, αναλύθηκαν και οι δευτερεύοντες τρόποι ρύθμισης που παρέχονται μέσω του AVR, ελέγχοντας άλλα ηλεκτρικά μεγέθη πέραν της τάσης ακροδεκτών, όπως την παραγόμενη άεργο ισχύ και τον συντελεστή ισχύος. Για να έχει ο αναγνώστης μία αίσθηση των συνηθέστερων προβλημάτων και βλαβών που μπορεί να συναντήσει κατά τη λειτουργία του AVR, έγινε μία σύντομη αναφορά στις κύριες αιτίες προβληματικής λειτουργίας του ρυθμιστή τάσης και στην ανίχνευση σφαλμάτων που προκαλούν δυσλειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας.

Η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να αποτελέσει έναν οδηγό για εκτενέστερη έρευνα ζητημάτων σχετικών με την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης και το σύστημα διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών των πλοίων. Έχοντας κατανοήσει σε θεωρητικό επίπεδο τις βασικές αρχές λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές εφαρμογές, μπορεί κάποιος να προχωρήσει πλέον και σε πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις, προκειμένου να επαληθεύσει στην πράξη όσα υπαγορεύει η θεωρία που περιλαμβάνεται στην παρούσα μελέτη. Καθώς αναδύονται συνεχώς καινούριες προκλήσεις αναφορικά με την παραγωγή

αρμονικής ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα των πλοίων, αποκτά εξαιρετικό ενδιαφέρον η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσης και του υπόλοιπου συστήματος διέγερσης στις απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής και των “πράσινων” εξηλεκτρισμένων πλοίων του παρόντος και του μέλλοντος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ MATLAB[®]

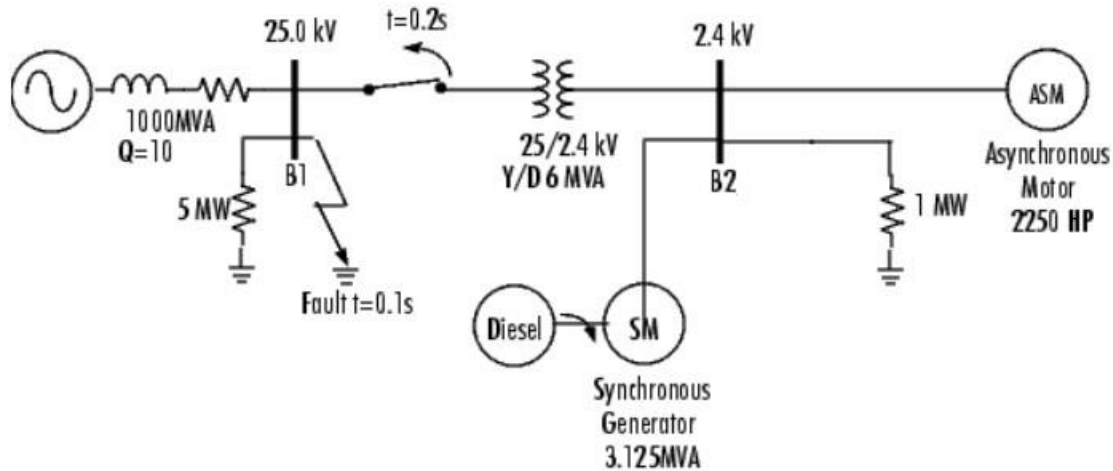
Περίληψη

Προκειμένου ο αναγνώστης να αποκτήσει μία εικόνα της *απόκρισης* των *συστημάτων διέγερσης* που αναλύθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, σε *απότομες μεταβολές του φορτίου* της σύγχρονης γεννήτριας, πραγματοποιήθηκε *προσομοίωση* της λειτουργίας μερικών εξ αυτών στο πρόγραμμα *Matlab[®]* και συγκεκριμένα στο περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού *Simulink*. Με τον τρόπο αυτόν, μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την *ταχύτητα* και τον *τρόπο σύγκλισης* (για παράδειγμα σύγκλιση με *ταλαντώσεις*) κάποιων συστημάτων διέγερσης του προτύπου IEEE Std 421.5 (2005).

Περιγραφή του μοντέλου

Για την επίτευξη της προσομοίωσης των συστημάτων διέγερσης, χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα ενός συστήματος σύγχρονης γεννήτριας έκτακτης ανάγκης – ασύγχρονου κινητήρα (Emergency Diesel – Generator and Asynchronous Motor). Το παράδειγμα αυτό βρίσκεται ενσωματωμένο στη βιβλιοθήκη του *Matlab[®]* και είναι προσβάσιμο στον χρήστη πληκτρολογώντας την εντολή *power_machines* στο *command window* του προγράμματος.

Το μονογραμμικό διάγραμμα του ανωτέρω συστήματος δίνεται στο παρακάτω σχήμα:

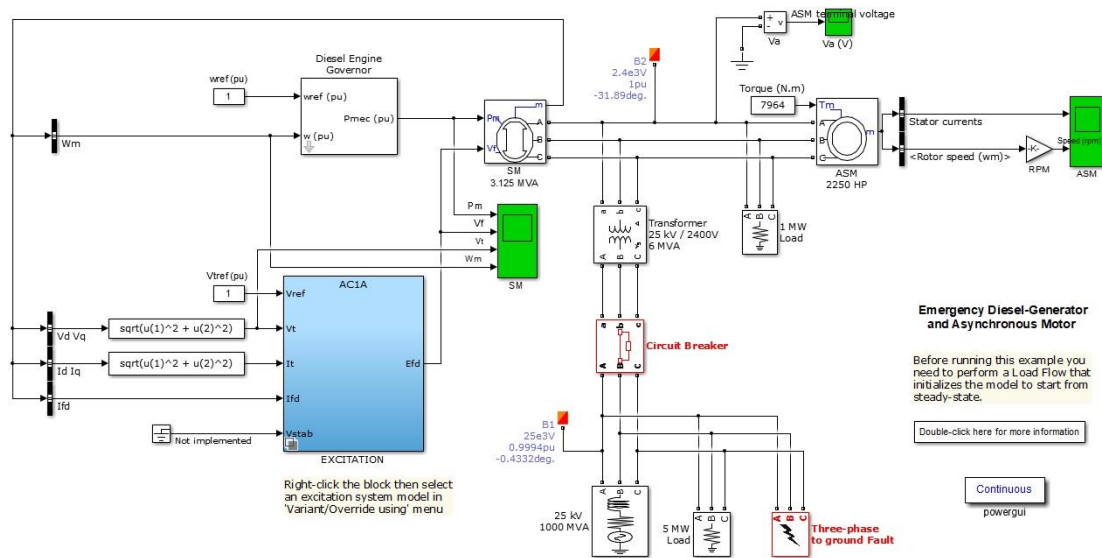


Σχήμα 1: Μονογραμμικό διάγραμμα μοντέλου προσομοίωσης

Η παραπάνω εγκατάσταση τροφοδοτεί ένα ωμικό φορτίο (1 MW) και έναν ασύγχρονο κινητήρα (ASM). Τα φορτία αυτά τροφοδοτούνται σε τάση 2400 V από ένα δίκτυο διανομής 25 kV μέσω ενός τριφασικού μετασχηματιστή (6 MVA 25/2 kV Wye – Delta transformer) και από μία μονάδα σύγχρονης γεννήτριας έκτακτης ανάγκης / κινητήρα diesel (SM). Το δίκτυο των 25 kV συνίσταται από μία συμμετρική τριφασική πηγή τάσης με εσωτερική σύνθετη αντίσταση R – L, επιπέδου βραχυκύκλωσης (short – circuit level) 1000 MVA και συντελεστή ποιότητας (quality factor) $Q = X / R = 10$, καθώς επίσης και από ένα φορτίο 5 MW. Η ονομαστική ισχύς του ασύγχρονου κινητήρα είναι 2250 HP, στα 2.4 kV, και της σύγχρονης γεννήτριας 3.125 MVA, στα 2.4 kV.

Αρχικά, ο κινητήρας αναπτύσσει μηχανική ισχύ 2000 HP (≈ 1.492 MW), και η σύγχρονη γεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής (standby), δεν παρέχει δηλαδή ενεργό ισχύ στα φορτία. Το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας ελέγχει την τάση του ζυγού B2 (2400 V) στην τιμή 1 pu στο ανά μονάδα σύστημα. Τη χρονική στιγμή $t = 0.1$ sec, συμβαίνει ένα τριφασικό σφάλμα (βραχυκύκλωμα) φάσης – εδάφους (three – phase to ground fault) στο σύστημα των 25 kV, προκαλώντας έτσι το άνοιγμα του διακόπτη του κυκλώματος των 25 kV τη χρονική στιγμή $t = 0.2$ sec και παράλληλα την απότομη αύξηση της φόρτισης της γεννήτριας έκτακτης ανάγκης. Κατά το μεταβατικό χρονικό διάστημα που ακολουθεί το σφάλμα μέχρι την απομονωμένη λειτουργία της γεννήτριας (islanding), δηλαδή χωρίς το δίκτυο των 25 kV, το σύστημα διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας δρα, έτσι ώστε να διατηρήσει την τάση ακροδεκτών σε μία σταθερή τιμή.

Στο σχήμα 2 απεικονίζεται η υλοποίηση του παραπάνω συστήματος σε μοντέλο Matlab® με τη βοήθεια του περιβάλλοντος Simulink.



Σχήμα 2: Μοντέλο προσομοίωσης με χρήση του περιβάλλοντος Simulink της γλώσσας προγραμματισμού Matlab®

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι από τα μοντέλα συστημάτων διέγερσης που μελετήθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, υπάρχουν blocks ενσωματωμένα στις βιβλιοθήκες του Simulink (Simscape / SimPowerSystems / Second Generation / Machines / Excitation Systems) για την προσομοίωση των συστημάτων AC1A, AC4A και AC5A. Αυτά τα τρία συστήματα, λοιπόν, μελετώνται ξεχωριστά στη συνέχεια και συγκρίνονται ως προς την ταχύτητα και τον τρόπο σύγκλισής τους.

Εκτέλεση της προσομοίωσης

Για την ομαλή εκτέλεση της προσομοίωσης, χρειάζεται ο χρήστης να ακολουθήσει τα παρακάτω βήματα:

1. Προκειμένου να ξεκινήσει η προσομοίωση με συνθήκες μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (steady state), πρέπει να καθοριστούν οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας και του ασύγχρονου κινητήρα, με βάση τις προεπιλεγμένες παραμέτρους του μοντέλου. Σημειώνεται, ότι οι παράμετροι του εκάστοτε συστήματος διέγερσης που επιλέγεται, καθώς και όλων των υπόλοιπων στοιχείων του συστήματος, διατηρούν τις προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος. Η αρχικοποίηση των συνθηκών ροής φορτίου γίνεται με τη βοήθεια της καρτέλας “Load Flow” του powergui block. Οι σχετικές παράμετροι των δύο μηχανών

καθορίζονται μέσω της καρτέλας “Load Flow” των block των δύο αυτών στοιχείων:

- Για τη σύγχρονη γεννήτρια, η παράμετρος “Generator type” τίθεται στη θέση “PV”, δηλώνοντας έτσι ότι η ροή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με τον έλεγχο από τη σύγχρονη γεννήτρια της ενεργού ισχύος που αποδίδει στο σύστημα και της τάσης ακροδεκτών της. Η παράμετρος “Active power generation P” λαμβάνει την τιμή μηδέν, καθώς, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αρχικά η γεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής (standby).

- Για τον ασύγχρονο κινητήρα, η παράμετρος “Mechanical Power” λαμβάνει την τιμή $1.492e+006$ W (2000 HP).

2. Ανοίγοντας το powergui menu, επιλέγεται η καρτέλα “Load Flow” και εμφανίζεται στην οθόνη ένα καινούριο παράθυρο. Σε αυτό περιέχεται ένας πίνακας με τη συνοπτική παρουσίαση των ρυθμίσεων της ροής του φορτίου.

3. Πατώντας το κουμπί “Compute”, υπολογίζονται οι αρχικές συνθήκες της ροής φορτίου σύμφωνα με τις προεπιλεγμένες παραμέτρους του μοντέλου. Ο πίνακας απεικονίζει πλέον και τις πραγματικές τιμές της ενεργού και της αέργου ισχύος των δύο μηχανών.

4. Πατώντας το κουμπί “Apply”, η λύση του βήματος 3 για τη ροή του φορτίου εφαρμόζεται στο μοντέλο.

5. Εάν ανοιχτεί το block της σύγχρονης γεννήτριας (SM) και του ασύγχρονου κινητήρα (ASM), παρατηρείται ότι οι αρχικές τιμές έχουν ενημερωθεί σύμφωνα με την παραπάνω λύση.

6. Εάν ανοιχτεί το block της κινητήριας μηχανής diesel (Diesel Engine Governor), παρατηρείται ότι η αρχική τιμή της μηχανικής ισχύος του κινητήρα έχει πλέον την τιμή 0.00027 pu (844 W) σύμφωνα με την παραπάνω λύση.

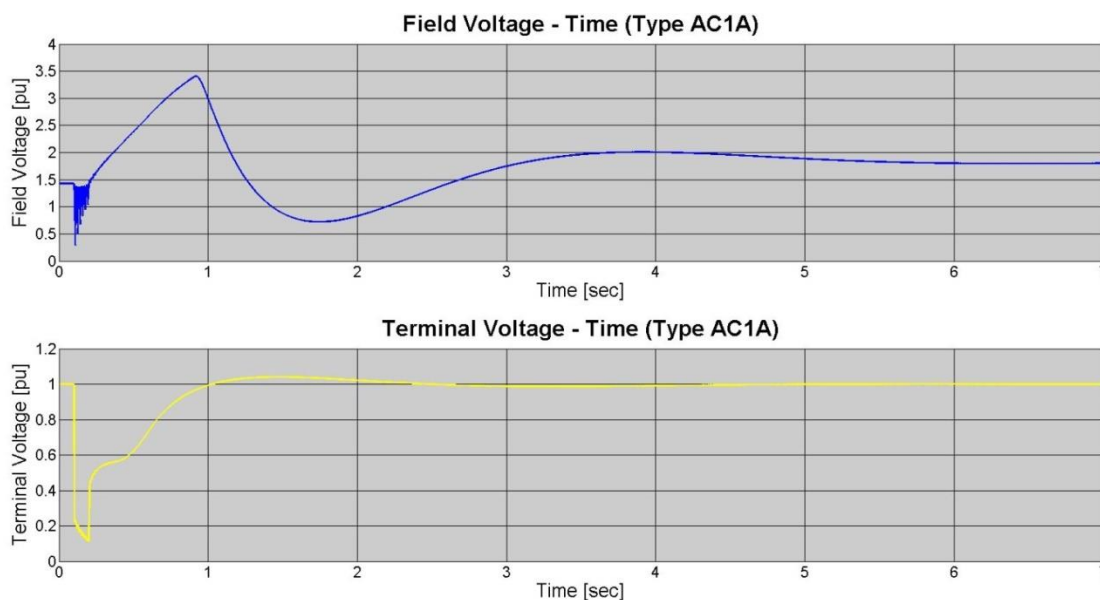
7. Εάν ανοιχτεί το block του συστήματος διέγερσης, παρατηρείται στην καρτέλα “Initial values” ότι η αρχική τιμή της τάσης ακροδεκτών και της τάσης διέγερσης έχουν ενημερωθεί και πλέον έχουν την τιμή 1.0 και 1.4273 pu αντίστοιχα.

8. Με δεξί κλικ στο block του συστήματος διέγερσης και ακολουθώντας τις οδηγίες που αναγράφονται ακριβώς κάτω από αυτό, επιλέγεται το μοντέλο του συστήματος διέγερσης που πρόκειται να προσομοιωθεί.

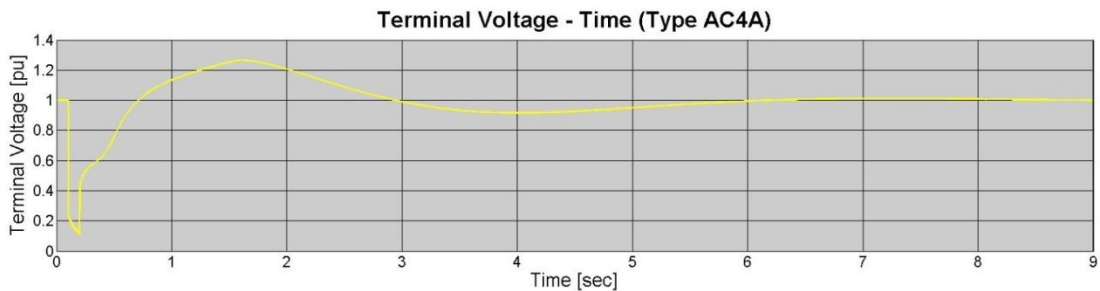
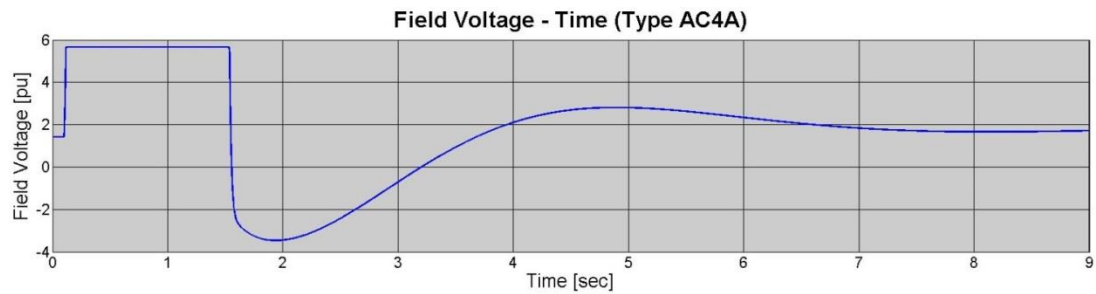
9. Η προσομοίωση μπορεί να ξεκινήσει. Στα διαγράμματα των μεγεθών τάσης τα οποία παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η προσομοίωση ξεκινά με μόνιμη κατάσταση.

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

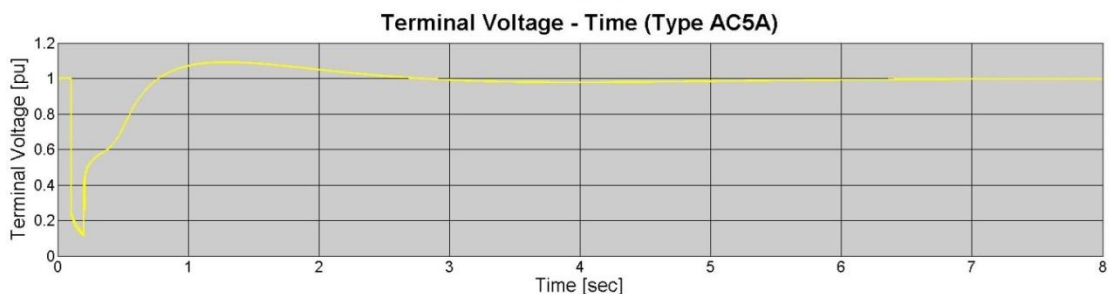
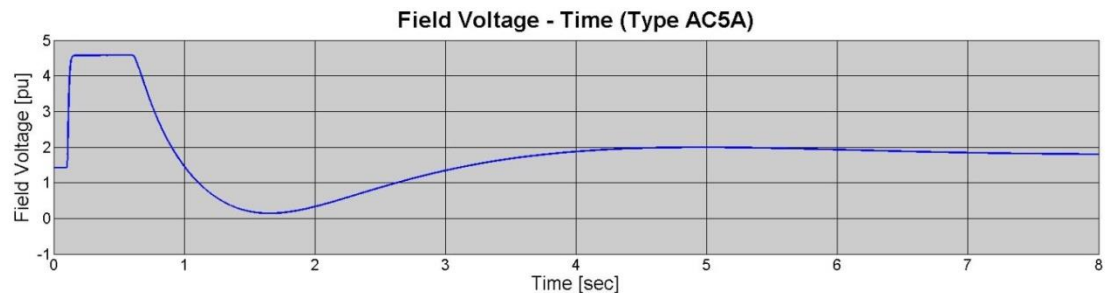
Ξεκινώντας την προσομοίωση σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, παρατηρείται ότι τη χρονική στιγμή $t = 0.1 \text{ sec}$ συμβαίνει το σφάλμα (βραχυκύκλωμα) στο δίκτυο τάσης 25 kV, οπότε και η σύγχρονη γεννήτρια αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου το φορτίο. Στα σχήματα που ακολουθούν, απεικονίζεται η απόκριση του συστήματος διέγερσης που επιλέγεται σε κάθε προσομοίωση, μέσω της τάσης διέγερσης, καθώς και η ρύθμιση της τάσης ακροδεκτών της γεννήτριας, αμέσως μετά την εμφάνιση του σφάλματος.



Σχήμα 3: Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του μοντέλου συστήματος διέγερσης AC1A



Σχήμα 4: Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του μοντέλου συστήματος διέγερσης AC4A



Σχήμα 5: Αποτελέσματα προσομοίωσης με χρήση του μοντέλου συστήματος διέγερσης AC5A

Όπως εύκολα παρατηρείται, κατά τη διάρκεια του σφάλματος, δηλαδή από τη χρονική στιγμή $t = 0.1 \text{ sec}$ όπου συμβαίνει το σφάλμα μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 0.2 \text{ sec}$ όπου ανοίγει ο διακόπτης του κυκλώματος των 25 kV, η τάση ακροδεκτών μειώνεται από 1 pu σε λίγο κάτω από 0.2 pu και στις τρεις περιπτώσεις. Αυτό που αλλάζει ανάλογα με το σύστημα διέγερσης που χρησιμοποιείται, είναι αφενός ο χρόνος που απαιτείται ώστε η τάση ακροδεκτών να αποκατασταθεί στην αρχική της τιμή και αφετέρου πόσο έντονη είναι η ταλάντωση του σήματος της τάσης ακροδεκτών. Μεγάλες είναι οι διακυμάνσεις και στην τιμή της τάσης

διέγερσης, φτάνοντας μέχρι και τα 6 pu στην περίπτωση του συστήματος AC4A. Παρόλα αυτά η τάση διέγερσης αποκτά την οριακή τιμή της χωρίς την εμφάνιση κορεσμού και στα τρία μοντέλα.

Από τα τρία συστήματα διέγερσης που χρησιμοποιήθηκαν, την ταχύτερη σύγκλιση στην αρχική τιμή της τάσης ακροδεκτών φαίνεται να έχει το μοντέλο AC1A, με την αποκατάσταση της τάσης να επιτυγχάνεται σε λιγότερο από 3 δευτερόλεπτα και την ταλάντωση του σήματος να περιορίζεται σε πολύ κοντινές τιμές γύρω από την τιμή μόνιμης κατάστασης. Το μοντέλο AC4A απαιτεί περίπου τον διπλάσιο χρόνο για την αποκατάσταση της τάσης ακροδεκτών, ενώ αρκετά υψηλότερη είναι και η υπερακόντιση (overshoot) της τάσης κατά την ταλάντωση του σήματός της γύρω από την τιμή μόνιμης κατάστασης. Παρόμοια συμπεριφορά με το σύστημα διέγερσης AC4A εμφανίζει και το μοντέλο AC5A, ωστόσο η σύγκλιση έρχεται ταχύτερα και η υπερακόντιση του σήματος της τάσης ακροδεκτών είναι μικρότερη.

Συμπερασματικά, μεταξύ των τριών συστημάτων διέγερσης το μοντέλο AC1A χαρακτηρίζεται ως το πιο ευσταθές, ενώ σε σειρά αποτελεσματικότητας δεύτερο έρχεται το σύστημα AC5A και τελευταίο το AC4A. Φυσικά, εφόσον μεταβληθούν οι παράμετροι του κάθε συστήματος διέγερσης τα αποτελέσματα και η συμπεριφορά τους μπορεί να ποικίλουν, επομένως τα συμπεράσματα αυτά αφορούν το συγκεκριμένο πρόβλημα και δεν αντικατοπτρίζουν τη γενική περίπτωση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Προυσαλίδης, Ι., 2014. Βασικές Αρχές Ηλεκτροτεχνίας. Αθήνα: Εκδόσεις Ι. ΣΙΔΕΡΗΣ.
- [2] Φραγκόπουλος, Χ., Προυσαλίδης, Ι., 2019. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΟΥ. Αθήνα: Εκδόσεις DaVinci.
- [3] Electronics Hub. 2015. AC Inductive Circuits. [online] Available at: <<https://www.electronicshub.org/ac-inductive-circuits/>>.
- [4] Arora, M., n.d. Understanding The Power Factor. [online] electricaleasy.com. Available at: <https://www.electricaleasy.com/2015/11/understanding-power-factor.html?fbclid=IwAR01FxfjE8eqhVEeB7yUu4PwihFHpglVutpnbiTInYexQYuDZ_txPRGXHVqc>.
- [5] IEEE Std 1459 – 2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
- [6] Elsebaay, A., Ramadan, M. and Adma, M., 2017. Studying the Effect of Non – Linear Loads Harmonics on Electric Generator Power Rating Selection. European Scientific Journal, 13(18), pp.548-561.
- [7] Manias, S., 2002. Harmonic Treatment in Industrial Power Systems.
- [8] Δημουλιάς, Χ., Γκουραμάνης, Κ., Παπαδόπουλος, Θ., Παπαϊωάννου, Ι. και Ντοκόπουλος, Π., 2006. Ακρίβεια στη Μέτρηση της Ηλεκτρικής Ισχύος και Ενέργειας υπό μη – Ημιτονοειδείς Συνθήκες. Ηλεκτρονικά ισχύος, συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και βιομηχανικές εφαρμογές. Αθήνα.
- [9] Προυσαλίδης, Ι., 2012. Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές Σε Πλοία Και Πλωτές Κατασκευές. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.

- [10] Hall, D., 1999. PRACTICAL MARINE ELECTRICAL KNOWLEDGE. 2nd ed. London: Witherby Seamanship Inter.
- [11] IEEE Std 421.5 – 2005, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.
- [12] 2016. Synchronous Machine Excitation System Vision Dynamical Analysis. [ebook] Arnhem: Phase to Phase. Available at: <<https://phasetophase.nl/pdf/SynchronousMachineExcitationSystems.pdf>>.
- [13] IEEE Committee Report, “Excitation System Dynamic Characteristics” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 92, pp. 64 – 75, January/February 1973.
- [14] ANSI C50.10 – 1990, American National Standard Rotating Electrical Machinery – Synchronous Machines.
- [15] IEEE Std 421.1 – 2007, IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines.
- [16] IEEE Std 115 – 2009, IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part I – Acceptance and Performance Testing Part II – Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis.
- [17] IEEE Committee Report, “Computer Representation of Excitation Systems” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 87, no. 6, pp. 1460 – 1464, June 1968.
- [18] IEEE Committee Report, “Excitation System Models for Power Systems Stability Studies” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS – 100, pp. 494 – 509, February 1981.
- [19] Kundur, P., 1994. Power System Stability And Control. New York: McGraw-Hill.
- [20] T. W. Eberly and R. C. Schaefer, "Voltage versus VAR/power – factor regulation on synchronous generators" in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 6, pp. 1682 – 1687, Nov. – Dec. 2002, doi: 10.1109/TIA.2002.805560.

- [21] Vrazic, M., Viskovic, A. and Hanic, Z., 2014. User P – Q Diagram as a Part of a Synchronous Generator Monitoring System. Electronics and Electrical Engineering, 20(4).
- [22] Stutvoet, H., 2014. Generator Operation Modes. [online] Svri.nl. Available at: <<https://www.svri.nl/en/generator-operation-modes/>>.
- [23] Fgwilson.ie. n.d. [online] Available at: <<http://www.fgwilson.ie/files/generator-set-capability-curve-vectors-colour-a.pdf>>.
- [24] Nidec Leroy – Somer. (2018). R438 AVR's: Installation and maintenance. Retrieved from <https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/3971_en.pdf>
- [25] Electronics Hub. n.d. Synchronization Of Generators. [online] Available at: <<https://www.electronicshub.org/synchronization-of-generators/>>.
- [26] Αρταβάνης - Τσαπατσάρης, Α., 2011. Εκτίμηση Παραμέτρων Και Σχεδίαση Σταθεροποιητών ΣΗΕ Με Εφαρμογή Σε ΑΗΣ Του Ελληνικού Συστήματος. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.