







(Υπογραφή)

.....  
ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΤΣΙΑΝΝΗΣ

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

Copyright © Άγγελος Γ. Τσιαννής 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ***Ευχαριστίες***

*Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον Βασιλάκη Αθανάσιο (Νάσσο) για την πολύτιμη προσφορά του στην διπλωματική μου εργασία καθώς επίσης και για την κατανόηση, την στήριξη και τις γνώσεις που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια της συνεργασίας μας.*

*Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Χατζηαργύριου, καθηγητή του ΕΜΠ, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα*

*Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς που όλα αυτά τα χρόνια με στηρίζουν συνεχώς.*



## Περίληψη

Με την συνεχή και αυξανόμενη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την μείωση των σύγχρονων ηλεκτρικών γεννητριών, που χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίστηκε το φαινόμενο της μείωσης της συνολικής αδράνειας του δικτύου.

Μια καινοτόμα στρατηγική ελέγχου η οποία έχει προταθεί τα τελευταία χρόνια είναι χρήση των εικονικών σύγχρονων μηχανών (VISMA). Η βασική ιδιότητα των εικονικών σύγχρονων μηχανών είναι ότι μπορούν να αντικαταστήσουν όλες τις ιδιότητες και δυνατότητες τις οποίες έχει μια σύγχρονη μηχανή. Τα δυναμικά, στατικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης μηχανής εκφράζονται μέσα από το μοντέλο του VISMA. Ουσιαστικά, το VISMA είναι ένας τριφασικός μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας δύο επιπέδων, ο οποίος μπορεί να μιμείται την λειτουργία μιας σύγχρονης μηχανής. Η χρήση του μοντέλου αυτού μπορεί να γίνει για την διασύνδεση αιολικών ή φωτοβολταϊκών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για να προσδίδουν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) την απαιτούμενη αδράνεια (εικονική) την οποία χρειάζεται για την διατήρηση της ευστάθειας του ΣΗΕ. Πρωταρχικός στόχος της ιδέας αυτής είναι ο έλεγχος της αλληλεπίδρασης της εικονικής σύγχρονης μηχανής με το δίκτυο. Το VISMA αποτελείται από δύο εν σειρά ελεγκτές, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μια περιγραφή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και οι τρόποι προστασίας των ΣΗΕ. Στην συνέχεια στο κεφάλαιο 2 γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο κομμάτι της ευστάθειας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται και η συνεισφορά των σύγχρονων μηχανών για την διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση του μοντέλου του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας που υλοποιήσαμε. Αρχικά, γίνεται ο έλεγχος των επιθυμητών ρευμάτων μέσω του ελεγκτή ρεύματος και ακολούθως, με την τεχνική του PWM, γίνεται η οδήγηση του σήματος αναφοράς στην γέφυρα του αντιστροφέα. Επιπρόσθετα, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της λειτουργίας του μοντέλου της σύγχρονης μηχανής. Μέσα από την μαθηματική ανάλυση για την λειτουργία της σύγχρονης μηχανής εστιάζουμε στις σχέσεις οι οποίες μας βοήθησαν να υλοποιήσουμε το κομμάτι του μοντέλου της σύγχρονης μηχανής του VISMA. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αρχικοποιήσεις που έγιναν για την ορθή λειτουργία της εικονικής μηχανής καθώς επίσης και τα πειράματα ελέγχου λειτουργίας. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του τελικού μοντέλου προσομοίωσης (VISMA) και τα τελικά πείραμα ελέγχου. Επίσης στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται και σύγκριση μοντέλων εικονικών σύγχρονων μηχανών. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα μας και οι μελλοντικές επεκτάσεις που μπορεί να έχει το μοντέλο του VISMA.

## *Abstract*

The future power system integrated a large share of renewable energy sources, which causes a reduction of the system rotational inertia because the number of synchronous machine will be reduced. Reducing the total inertia of the system may cause stability issues. An idea for solving these issues is to connect a virtual synchronous machine (VISMA) between the grid and the renewable energy source. The concept of VISMA implements a control system in order to combine a three phase inverter to imitate the synchronous generator behaviour. This thesis presents the model of VISMA and shows its functionality. The development of VISMA was the main objective of this thesis.



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	
1.1	Γενικά για το θέμα	1
1.1.1	Εικονική Αδράνεια	2
1.2	Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.2.1	Μικρό-Δίκτυα (Micro – grid)	3
1.2.2	Έξυπνα-Δίκτυα (Smart – grid)	3
1.3	Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	5
1.3.1	Παραγωγή με λιγνίτη	5
1.3.2	Παραγωγή με φυσικό αέριο	5
1.3.3	Πυρηνική Ενέργεια	5
1.3.4	Φωτοβολταϊκά Συστήματα	6
1.3.5	Αιολικά Συστήματα	6
1.3.6	Βιομάζα -Βιοκαύσιμα	7
1.3.7	Γεωθερμία	7
1.3.8	Διεσπαρμένη Παραγωγή	7
1.4	Προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	8
<b>2</b>	<b>Ευστάθεια δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας</b>	
2.1	Ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	11
2.1.1	Ευστάθεια μονίμου κατάστασης	12
2.1.2	Μεταβατική ευστάθεια	12
2.1.3	Ευστάθεια γωνίας δρομέα	12
2.1.4	Ευστάθεια συχνότητας	12
2.1.5	Ευστάθεια τάσης	13
2.1.6	Αστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας	13
2.2	Ευστάθεια σύγχρονων μηχανών	13
2.2.1	Εισαγωγή	13
2.2.2	Συγχρονιστική ροπή	14
2.2.3	Δυναμική ευστάθεια	15
2.3	Δείκτες ευστάθειας	18
<b>3</b>	<b>Ελεγκτής ρεύματος (current control)</b>	
3.1	Εισαγωγή	21
3.2	Κατασκευή μοντέλου μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας	22
3.2.1	Έλεγχος λειτουργίας ελεγκτή ρεύματος	28
<b>4</b>	<b>Μοντέλο σύγχρονης μηχανής</b>	
4.1	Εισαγωγή	37
4.2	Τρόποι λειτουργίας σύγχρονης μηχανής	38
4.3	Χαρακτηριστικά σύγχρονης μηχανής	39
4.3.1	Προσδιορισμός παραμέτρων σύγχρονης μηχανής	40
4.4	Μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής	41
4.4.1	Εξισώσεις πεπλεγμένων ροών της σύγχρονης μηχανής	43
4.4.2	Υπολογισμός ρευμάτων (iq και id)	45
4.4.3	Μηχανικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής	45
4.5	Υλοποίηση εικονικής σύγχρονης γεννήτριας	47
4.5.1	Αρχικοποίηση εικονικής σύγχρονης γεννήτριας	49
4.6	Έλεγχος λειτουργίας εικονικής σύγχρονης γεννήτριας	51
<b>5</b>	<b>Μοντέλο Προσομοίωσης</b>	
5.1	Εισαγωγή	61

5.1.1	Ανασκόπηση μοντέλων σύγχρονων εικονικών μηχανών	61
5.2	Παρουσίαση μοντέλου προσομοίωσης	62
5.3	Πειράματα ελέγχου μοντέλου προσομοίωσης (VISMA)	64
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις</b>	
6.1	Συμπεράσματα	73
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	74
<b>7</b>	<b>Παραρτήματα</b>	<b>75</b>
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>81</b>

# 1

---

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Γενικά για το θέμα*

Η ανάπτυξη των μεγάλων διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα, ακολουθώντας το γενικότερο κλίμα εκβιομηχανισμού και αστικοποίησης που επικρατεί. Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στις αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες σε όλο τον κόσμο φέρει ως ζητούμενο την βέλτιστη αξιοποίηση και εκμετάλλευση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μέρες μας με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας τίθεται θέμα για περαιτέρω ανάπτυξη των υφιστάμενων δομών υποδομής του ηλεκτρικού δικτύου. Οι απαιτήσεις που προβάλλονται μέσα από τον ανταγωνισμό ωθούν στην μείωση του κόστους παραγωγής, προστασίας και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αδυναμία των ηλεκτρικών δικτύων να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος λόγω φυσικών ή άλλων περιορισμών σε συνδυασμό με άλλα προβλήματα, μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά φαινόμενα αστάθειας. Με την ένταξη ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων και γενικά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προβάλλονται προβλήματα διατήρησης της ευσταθείας και ελέγχου του ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούνται σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές για να συνεισφέρουν στην διατήρηση της ευσταθείας του ηλεκτρικού δικτύου, λόγω της αδράνειας της περιστρεφόμενης μάζας τους. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται η θεωρία της χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών ισχύος και μετατροπών ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία θα παρέχουν την απαιτούμενη εικονική αδράνεια για την στήριξη του δικτύου. Επιπλέον, η συνεχής κατασκευή και ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο επηρεάζει αρνητικά την ευστάθεια του δικτύου. Οι καιρικές συνθήκες (αέρας, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας) που προσδίδουν ισχύ, σε δύο από τις σημαντικότερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν μεγάλες διακυμάνσεις και ασταθή χαρακτήρα. Η ένταξη αυτών των συστημάτων και η αντικατάσταση των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών που υπάρχουν μειώνουν αισθητά την ολική αδράνεια του ηλεκτρικού δικτύου. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν τεχνικές ελέγχου εικονική αδράνειας για την διατήρηση της ευσταθείας του δικτύου.

### 1.1.1 Εικονική Αδράνεια

Με τον όρο εικονική αδράνεια εννοούμε την συνεισφορά που έχει ένας μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας κατά την αλληλεπίδραση του με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος είναι είτε να προσφέρει είτε να απορροφήσει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο σύμφωνα με διάφορες διακυμάνσεις ή μεταβολές οι οποίες μπορεί να προκληθούν σε αυτό. Σε περίπτωση μεταβολής, η κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην περιστρεφόμενη μάζα της σύγχρονης μηχανής χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει αυτές τις μεταβολές. Όλες οι θεωρίες ελέγχου συνθετικής αδράνειας για τους διασυνδεδεμένους μετατροπείς ηλεκτρικής ενεργείας στηρίχθηκαν στην εξίσωση ταλάντωσης (εξίσωση 1.1) των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών.

$$d(P_m - P_e) = H \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

## 1.2 Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρείται μια διαρκής αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Όλα αυτά τα χρόνια η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και τα ενεργειακά ζητήματα αποτελούν βασικό κομμάτι της πολιτικής ατζέντας του κάθε κράτους. Για αυτό μπορούμε να κατανοήσουμε πόσο σημαντικό είναι να υπάρχει η ομαλή και σταθερή λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Παρατηρώντας στατιστικά στοιχεία μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι χρόνο με το χρόνο οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται ανά το παγκόσμιο. Η παρούσα δομή του δικτύου ηλεκτρικής ενεργείας αποτελείται από διάφορες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και γραμμές μεταφοράς που συνδέουν την παραγωγή με τα φορτία κατανάλωσης. Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας καλύπτουν τεράστιες εκτάσεις συνδέοντας ολόκληρες ηπείρους ακόμα και διαφορετικές ηπείρους μεταξύ τους. Σύμφωνα, με αυτά ορίζουμε ότι ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας ( ΣΗΕ ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ποιοτικές προδιαγραφές του ΣΗΕ που πρέπει να τηρούνται για την εύρυθμη λειτουργία του, είναι η σταθερότητα της τάσης και της συχνότητας.

Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για την μεταφορά του ρεύματος. Στις πλείστες περιπτώσεις οι σταθμοί παραγωγής πραγματοποιούν την μετατροπή μιας πρώτης ύλης σε κινητική ενέργεια μιας ηλεκτρικής μηχανής. Εκτενέστερη ανάλυση των μονάδων παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας γίνεται στην ενότητα 1.3.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεως του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση. Το δίκτυο μεταφοράς εκτός από το να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές, διασυνδέει επίσης και τις μονάδες παραγωγής μεταξύ τους αλλά και με διαφορετικά ΣΗΕ. Τα συστήματα

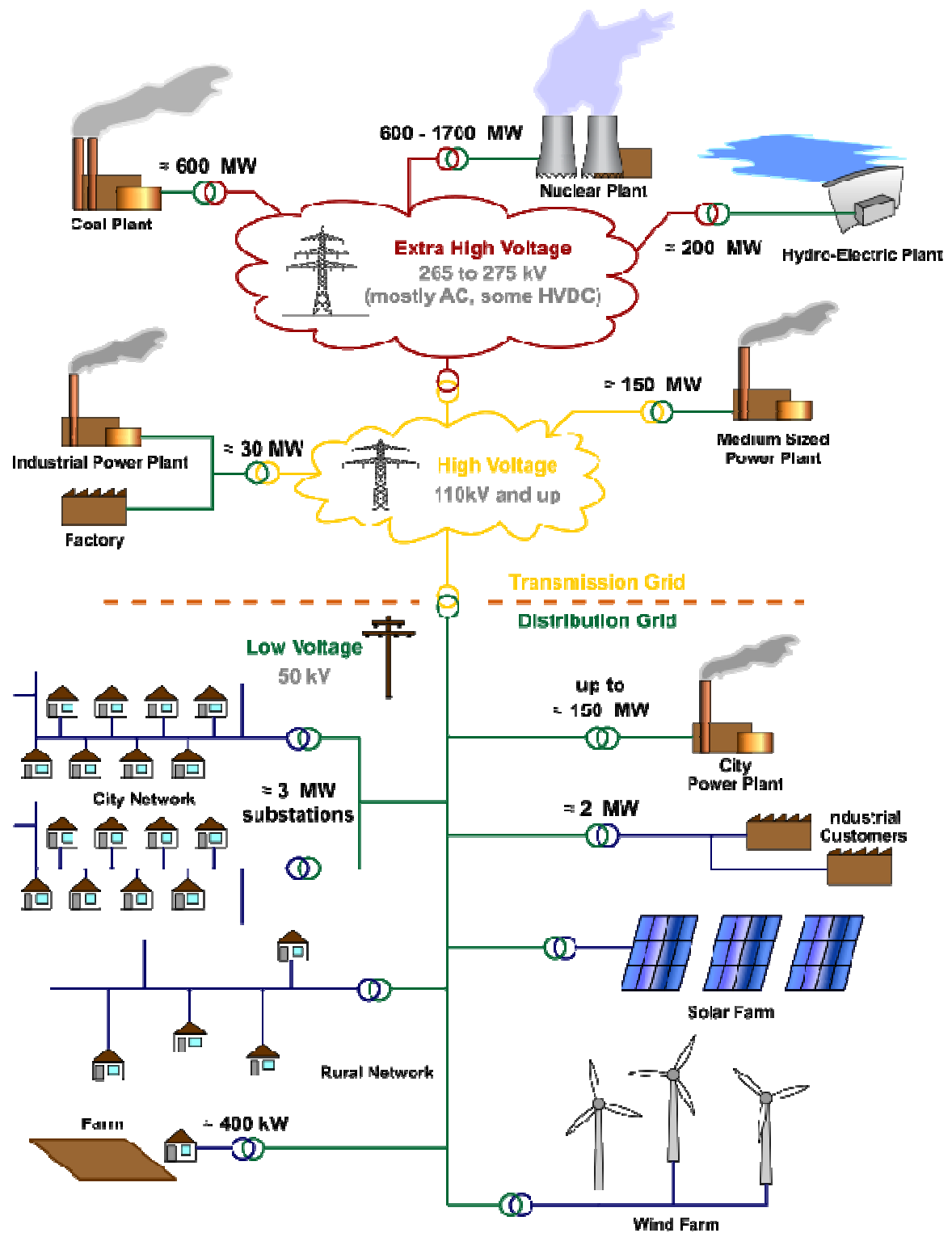
μεταφοράς πρέπει να παρέχουν ημιτονοειδή τάση με σταθερή συχνότητα και οι τάσεις των τριών φάσεων πρέπει να βρίσκονται σε συμμετρία.

### **1.2.1 Μικρό-Δίκτυα (Micro – grid)**

Η διασύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής σε συστήματα διανομής χαμηλής τάσης αποτελούν ένα τύπο συστήματος ισχύος που ονομάζεται μικρό-δίκτυο. Τα μικρό-δίκτυα μπορούν να συνδέονται στο κυρίως δίκτυο ισχύος ή να λειτουργούν αυτόνομα. Η ιδέα αυτή βασίζεται στην ύπαρξη ενός συνόλου ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων μαζί με ηλεκτρικές πηγές ισχύος, οι οποίες περιλαμβάνουν διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Βασικά πλεονεκτήματα των μικρό-δικτύων είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης, βελτιωμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις, αυξημένη αξιοπιστία και καλύτερος έλεγχος της τάσης και της συχνότητας.

### **1.2.2 Έξυπνα-Δίκτυα (Smart – grid)**

Η εγκατάσταση έξυπνων δικτύων έχει ως στόχο την αειφόρο ανάπτυξη με τη δημιουργία ενός αποδοτικότερου δικτύου διανομής, δίνοντας έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στη διεσπαρμένη παραγωγή (ενότητα 1.3.8). Ένα έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που μπορεί να ενσωματώσει ευφυώς τη συμπεριφορά και τις δράσεις όλων των αναγκών και μεταβολών στην παραγωγή και κατανάλωση με σκοπό να διασφαλιστεί αποτελεσματικά η σταθερότητα, η οικονομία και η ασφάλεια παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από ένα συνδυασμό λογισμικού και υλικού που επιτρέπει την βέλτιστη ροή ισχύος και δίνει την δυνατότητα στους καταναλωτές να ελέγχουν την ζήτηση ενέργειας. Οι κύριοι άξονες στους οποίους στοχεύουν τα έξυπνα δίκτυα είναι η εμπορία ενέργειας και βελτιστοποίηση του κόστους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω χρονομεταβλητών τιμολογίων και ενεργό συμμετοχή του πελάτη που γίνεται στην βάση δύο κατευθύνσεων, της επικοινωνίας και της μεγάλης ροής πληροφορίας.



Σχήμα 1.1 – Τοπολογία δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [10].

## **1.3 Μονάδες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Η Ηλεκτροπαραγωγή κατατάσσεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος των πηγών ενέργειας που χρησιμοποιεί. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η τοπολογία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κατηγορίες αυτές είναι[9]:

- η ηλεκτροπαραγωγή από συμβατικά καύσιμα η οποία χρησιμοποιεί σαν πηγή ενέργειας ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, τα οποία έχουν σχηματιστεί σε παλαιότερες γεωλογικές περιόδους και βρίσκονται αποθηκευμένα στο υπέδαφος, σε διάφορα βάθη σε πεπερασμένες και μη ανανεώσιμες ποσότητες.
- η ηλεκτροπαραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), η οποία αντίθετα με την πρώτη χρησιμοποιεί διαχρονικές πηγές οι οποίες δεν εξαντλούν περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα καθώς εξαρτώνται από φυσικά φαινόμενα και κατά συνέπεια επηρεάζονται από την περιοδικότητα ή την στοχαστικότητα τους.

### **1.3.1 Παραγωγή με λιγνίτη**

Ο λιγνίτης αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πρώτες ύλες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Ο εξορυγμένος λιγνίτης θρυμματίζεται και αναμειγνύεται με αέρα. Ακολούθως, καίγεται στο θάλαμο καύσης παράγοντας θερμότητα η οποία θερμαίνει το νερό και αυξάνει την πίεση. Ο ατμός που δημιουργείται περνά μέσα από σωληνώσεις αυξάνοντας την κινητική ενέργεια του αμοστροβίλου. Η κινητική ενέργεια του αμοστροβίλου με την βοήθεια μιας γεννήτριας παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

### **1.3.2 Παραγωγή με φυσικό αέριο**

Το φυσικό αέριο εισέρχεται εντός του αεροστροβίλου και αναμειγνύεται με αέρα. Ακολούθως καίγεται και έτσι μετατρέπεται η χημική ενέργεια του σε θερμική ενέργεια. Το αέριο καύσης προκαλεί συσσώρευση πίεσης που προκαλεί περιστροφή στα πτερύγια του στροβίλου με αποτέλεσμα η θερμική ενέργεια να μετατρέπεται σε μηχανική. Ο άξονας του αεροστροβίλου είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια η οποία με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο διαθέτει μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.

### **1.3.3 Πυρηνική Ενέργεια**

Σε ένα τυπικό πυρηνικό αντιδραστήρα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εμπεριέχονται στον πυρήνα εκατοντάδες τόνοι ουρανίου σε ράβδους καυσίμων. Οι ράβδοι καυσίμων ουρανίου αποδίδουν την θερμότητα που παράγουν στο νερό το

οποίο βρίσκεται στο δοχείο ατμοπαραγωγής του αντιδραστήρα. Ο ατμός συνεχίζει την πορεία του για κίνηση των ατμοστροβίλων (τουρμπίνες ) που συνδέονται με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Ο ατμός που εξέρχεται από τους ατμοστροβίλους ψύχεται συμπυκνώνεται και διοχετεύεται πάλι στο σύστημα.

### **1.3.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα**

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα ενέργειας όταν εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ένα ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το ποσό αυτό ονομάζεται βαθμός απόδοσης και εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης του στοιχείου βρίσκεται μεταξύ 13-15%. Συγκρινόμενος με την απόδοση άλλων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παραμένει αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι τα φωτοβολταϊκά συστήματα πρέπει να καταλαμβάνουν μεγάλες επιφάνειες για να αποδώσουν την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Πλεονεκτήματα τους είναι η ελάχιστη συντήρηση που χρειάζονται και η ευελιξία στην εφαρμογή και εγκατάστασή τους. Τέλος, έχουν αθόρυβη λειτουργία και συστήματα αποθήκευσης (συσσωρευτές ) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [11].



**Σχήμα 1.2- Φωτοβολταϊκό Πάρκο στην Κύπρο**

### **1.3.5 Αιολικά Συστήματα**

Τα σύγχρονα αιολικά συστήματα αποτελούνται από ένα πλήθος ανεμογεννητριών οι οποίες είναι μηχανές μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η σημαντικότερη εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο της κάθε χώρας. Στην περίπτωση αυτή ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μια συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μια περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό, Διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής ηλεκτρικής



ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα. Υπάρχει και η δυνατότητα να λειτουργήσουν αυτόνομα σε περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται [11].



**Σχήμα 1.3 – Αιολικό Πάρκο στην Ρόδο**

### **1.3.6 Βιομάζα – Βιοκαύσιμα**

Βιομάζα είναι ότι προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τη φωτοσύνθεση φυτών. Επίσης βιομάζα θεωρείται το βιοαποικοδομήσιμο μέρος των προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων που προέρχονται από την γεωργία, την βιομηχανία και τα αστικά απόβλητα. Τα βιοκαύσιμα είναι στερεά, υγρά και αέρια καύσιμα τα οποία παράγονται από την βιομάζα. Θεωρούνται ανανεώσιμα καύσιμα επειδή προέρχονται από οργανικά προϊόντα.[11]

### **1.3.7 Γεωθερμία**

Η γεωθερμία είναι μια ήπια και ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή που μπορεί, με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες να καλύψει ενεργειακές ανάγκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια εκμεταλλεύεται τις υψηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούν στο εσωτερικό της γης και συγκεκριμένα την ανάβλυση μεγάλης ποσότητας θερμού νερού ή ατμών σε πολλές περιοχές της γης[11].

### **1.3.8 Διεσπαρμένη παραγωγή**

Διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως μια παραγωγή μικρής κλίμακας με τιμές που κυμαίνονται κατά κανόνα από το 1kW μέχρι 100MW, με τις μονάδες παραγωγής να είναι εγκατεστημένες κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Οι κυριότεροι λόγοι που ευνοούν την εξέλιξη της διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι περιορισμοί στην

κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, οι αυξημένες απαιτήσεις καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια και οι ανησυχίες για τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ύπαρξη διεσπαρμένων γεννητριών στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, η ευκολότερη επανόρθωση της γραμμής και η δυνατότητα τους να παραμείνουν συνδεδεμένες σε μια ελαττωματική γραμμή. Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής είναι το υψηλό κόστος κατασκευής.

## ***1.4 Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας***

Η προστασία του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) περιλαμβάνει την επιλογή και εγκατάσταση κατάλληλων συσκευών στο ΣΗΕ ώστε οι εγκαταστάσεις, ο εξοπλισμός, οι γραμμές μεταφοράς και οι άνθρωποι να είναι προστατευμένοι από βλάβες και καταστροφές εξαιτίας απρόβλεπτων καταστάσεων λειτουργίας ή λόγω αποτυχίας επίλυσης σφαλμάτων τα οποία θα προκληθούν στο σύστημα. Προτεραιότητα του συστήματος προστασίας είναι η ασφάλεια από υπερτάσεις ή υπερεντάσεις. Επίσης συμβάλλει στην καλύτερη και οικονομικότερη λειτουργία του ΣΗΕ απομονώνοντας το κομμάτι του το οποίο έχει υποστεί βλάβη πετυχαίνοντας την ελάττωση:

- του κόστους επισκευής ζημιών που προκαλούν τα βραχυκυκλώματα.
- της πιθανότητας να επεκταθούν οι ζημιές σε άλλα κομμάτια του ΣΗΕ και να σταματήσει η λειτουργία άλλων εξοπλισμών του συστήματος.
- του χρόνου κατά τον οποίο οι συσκευές για παράδειγμα οι μηχανές βρίσκονται εκτός λειτουργίας.
- των κοινωνικοοικονομικών προβλημάτων τα οποία μπορεί να αντιμετωπίσουν οι πολίτες σε συνεχόμενη απουσία ηλεκτρικού ρεύματος.

Η προστασία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τεχνική της εφαρμογής ασφαλειών και ηλεκτρονόμων προστασίας για να προσφέρουν την μέγιστη δυνατή ευαισθησία σε σφάλματα και ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας. Ο ηλεκτρονόμος (ρελέ) προστασίας είναι ένα ηλεκτρονικό ισχύος του οποίου βασική λειτουργία του είναι να εντοπίζει γραμμές ή συσκευές με βλάβη ή άλλες μη επιθυμητές ή επικίνδυνες συνθήκες λειτουργίας του ΣΗΕ και να προκαλεί την αποσύνδεση του τμήματος αυτού. Είναι μια ηλεκτρική συσκευή που είναι σχεδιασμένη να ανταποκρίνεται σε συνθήκες εισόδου με ένα προκαθορισμένο τρόπο. Εφόσον οι συγκεκριμένες συνθήκες πληρούνται προκαλεί το κλείσιμο των επαφών ή μιας παρόμοιας διακοπτικής αλλαγής σε ηλεκτρικά κυκλώματα ελέγχου. Ένας ηλεκτρονόμος μπορεί να ελέγχει ηλεκτρικές, μηχανικές ή θερμικές διαταραχές που μπορεί να προκληθούν στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αλλά δεν λειτουργεί ποτέ ως τερματικός διακόπτης. Επιπρόσθετα, μια άλλη ηλεκτρική συσκευή προστασίας είναι η ασφάλεια η οποία τήκεται όταν περάσει από μέσα της μεγαλύτερη τιμή έντασης από την ανοχή της και αυτομάτως αποκόπτει το μέρος του συστήματος προστατεύοντας το υπόλοιπο ΣΗΕ..

Ο πρωταρχικός και βασικός στόχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι να διατηρήσουν υψηλό το επίπεδο συνεχόμενης παροχής ηλεκτρικής ισχύος και να ελαχιστοποιήσουν την διάρκεια διακοπής της λειτουργίας τους όταν συμβεί ένα απρόοπτο σφάλμα ή μια δυσλειτουργία. Όμως, η πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων και δυσλειτουργιών δεν μπορεί να μηδενιστεί και να απαλειφτεί εντελώς καθώς τα ΣΗΕ μπορεί να επηρεαστούν από ανθρώπινο παράγοντα, φυσικά γεγονότα, καταστροφή εξοπλισμού ή μηχανών και λανθασμένων λειτουργιών. Τα συστήματα προστασίας δρουν μόνο όταν παρουσιαστεί μια ανωμαλία ή μια μη αποδεκτή συνθήκη λειτουργίας

Βασικά επιθυμητά χαρακτηριστικά που πρέπει να διακρίνουν ένα σύστημα προστασίας είναι:

- **Αξιοπιστία:** είναι ο βαθμός βεβαιότητας που το σύστημα λειτουργεί σωστά και αποδοτικά σε ανεπίτρεπτες συνθήκες αλλά και σε μεταβατικές καταστάσεις.
- **Επιλεκτικότητα:** χαρακτηρίζεται ως η διαδικασία εφαρμογής και ρύθμισης των ηλεκτρονόμων προστασίας για την αποδοτικότερη αντιμετώπιση σφαλμάτων. Στους ηλεκτρονόμους προστασίας ανατίθεται μια γνωστή περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται πρωτεύουσα ζώνη προστασίας.
- **Ταχύτητα:** είναι η γρήγορη ανταπόκριση των ηλεκτρικών συστημάτων προστασίας για την αποφυγή μεγαλύτερων βλαβών που μπορεί να προκληθούν.
- **Απλότητα:** κάθε μονάδα, εξάρτημα ή χαρακτηριστικό που μπορεί να προσφέρει βελτίωση στην προστασία αλλά δεν είναι απαραίτητο για τις βασικές απαιτήσεις της πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά καθώς μπορεί να αποτελέσει πηγή προβλημάτων.
- **Οικονομία:** το κόστος είναι πάντα ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες σχεδιασμού ενός συστήματος. Έτσι, παρότι στα συστήματα προστασίας είναι αρκετά ψηλό θα πρέπει να είναι ανάλογο του κόστους του εξοπλισμού ή της συσκευής που προστατεύει. Δεν μπορούμε να αποφύγουμε το κόστος για τα συστήματα προστασίας γιατί χωρίς αυτά θα ήταν αναγκαίες μεγαλύτερες δαπάνες για επισκευή και αποκατάσταση του ΣΗΕ.

Είναι σαφές ότι όλα τα πιο πάνω χαρακτηριστικά δεν είναι εφικτό να ικανοποιούνται ταυτόχρονα γιατί ο κάθε σχεδιασμό συστήματος προστασίας έχει τον δικό του συμβιβασμό.



# 2

---

## *Ευστάθεια Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας*

### *2.1 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυναμικά μη γραμμικά συστήματα τα οποία υφίστανται συνεχώς διάφορες μικρές ή σοβαρότερες διαταραχές προερχόμενες από μεταβολές της ζήτησης, της παραγωγής, διακοπών, βραχυκυκλωμάτων ή άλλων σφαλμάτων. Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών δικτύων καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα φαινομένων τα οποία μπορεί να είναι είτε ηλεκτρικά, είτε μηχανικά είτε θερμικά. Ο μεταβατικός χρόνος του σφάλματος χαρακτηρίζεται από:

- Μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου όπως υπερτάσεις χειρισμών, γραμμών ή καλωδίων.
- Πολλά λεπτά για παράδειγμα φαινόμενα μεταβολής συχνότητας ή τάσης και ανταλλαγής ισχύος μεταξύ διασυνδεδεμένων δικτύων.

Η ευστάθεια είναι από μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς παίζει καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία του. Η απαίτηση για ευστάθεια είναι περισσότερο επιτακτική με την πάροδο των χρόνων γιατί γίνονται όλο και μεγαλύτερες συνδέσεις με γειτονικά δίκτυα. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται γενικά ως ευσταθές, όταν τείνει να επανέλθει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όταν υφίσταται οποιαδήποτε διαταραχή ενώ λειτουργεί. Επιπρόσθετα με τον όρο μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ορίζεται μια συνήθης κατάσταση λειτουργίας του συστήματος κατά την οποία παράγει, μεταφέρει και διανέμει σε κάθε στιγμή την ζητούμενη κατανάλωση.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διατρέχει μεγάλο κίνδυνο απώλειας της ευσταθείας του αν αυξηθεί απότομα το φορτίο ζήτησης. Η αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των ηλεκτρικών δικτύων επιβάλλεται από την διαρκή αύξηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, λόγω οικονομικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων δυσχεραίνεται η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς για την ικανοποίηση των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εντατικότερη χρήση των ήδη διαθέσιμων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

### **2.1.1 Ευστάθεια μονίμου κατάστασης**

Η ευστάθεια μονίμου κατάστασης ή σημείου λειτουργίας σχετίζεται με την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας και αφορά την απόκριση του συστήματος σε μικρές αργές και βαθμιαίες διαταραχές. Επίσης, ονομάζεται και στατική ευστάθεια ή ευστάθεια μικρών διαταραχών. Η στατική ευστάθεια εξαρτάται από το εξεταζόμενο σημείο αλλά όχι από την διαταραχή η οποία θεωρείται μικρή. Για να αναλυθεί το σύστημα πρέπει να γραμμικοποιηθεί γύρω από το εξεταζόμενο σημείο και να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ιδιοτιμών και ιδιοδυνασμάτων [12].

### **2.1.2 Μεταβατική ευστάθεια**

Μεταβατική ευστάθεια ή ευστάθεια μεγάλων διαταραχών χαρακτηρίζεται όταν η απόκριση του συστήματος επηρεάζεται από μεγάλες σοβαρές και απότομες διαταραχές όπως για παράδειγμα βραχυκυκλώματα. Μετά από μια μεγάλη διαταραχή εξετάζεται αν το σύστημα μπορεί να επανέλθει σε κανονική λειτουργία βάση του μεγέθους και του είδους της διαταραχής [12].

### **2.1.3 Ευστάθεια γωνίας δρομέα**

Η ευστάθεια γωνίας δρομέα αναφέρεται στην ικανότητα του συνόλου των συνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από την επιβολή μιας διαταραχής. Αστάθεια εμφανίζεται στη μορφή μη αποσβενυόμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων ή μονότονης επιτάχυνσης του δρομέα που οδηγεί σε απώλεια του συγχρονισμού. Το χρονικό πλαίσιο παρουσίασης μεταβολών στην γωνία του δρομέα έχει διάρκεια μερικών δευτερολέπτων. Αυτό βέβαια εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να συντηρήσει ή να αποκαταστήσει την ισορροπία μεταξύ ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής κάθε σύγχρονης μηχανής. Η αστάθεια που προκύπτει μπορεί να εκδηλωθεί σε μορφή αυξανόμενων ταλαντώσεων της γωνίας του δρομέα. Οι συνεχείς αυτές ταλαντώσεις μπορεί να οδηγήσουν στον αποσυγχρονισμό των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών.

### **2.1.4 Ευστάθεια συχνότητας**

Η ευστάθεια συχνότητας είναι η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τη συχνότητα κοντά στην ονομαστική τιμή μετά από μια σοβαρή διαταραχή. Η αστάθεια της συχνότητας προκαλείται λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενεργείας, η εμφάνιση αστάθειας συχνότητας είναι πιθανό να εμφανιστεί μόνο σε απομονωμένα τμήματα (island-mode) του συστήματος μετά από μια μεγάλη διαταραχή [12]. Η διαταραχή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη απώλεια γεννητριών ή υπερφόρτιση των γραμμών. Σε αντίθεση με την ευστάθεια γωνίας δρομέα η ευστάθεια συχνότητας καθορίζεται από την συνολική απόκριση του συστήματος.

### **2.1.5 Ευστάθεια τάσης**

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα διατήρησης ικανοποιητικής τιμής τάσης σε όλους τους ζυγούς μετά από μια διαταραχή. Αστάθεια μπορεί να προκληθεί από την αδυναμία του συστήματος να τροφοδοτήσει με την απαιτούμενη ισχύ τα φορτία. Μπορεί επίσης να προκληθεί από την επίδραση στατικών ή μεταβατικών διαταραχών. Επιπρόσθετα, η αδυναμία του συστήματος να μπορεί ανταποκριθεί στη ζήτηση άεργου ισχύος μπορεί να αποτελέσει ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες αστάθειας τάσης.

### **2.1.6 Αστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Σαν συνέχεια του όρου της ευστάθειας και των μορφών της που αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.1 προκύπτει ο όρος της αστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος αστάθεια πηγάζει από την απόπειρα των δυναμικών του φορτίου να αποκαταστήσουν την κατανάλωση ισχύος πέρα από την ικανότητα φόρτισης του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς. Έτσι κρίνεται αναγκαία η προστασία και διατήρηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε ευσταθή λειτουργία.

## **2.2 Ευστάθεια σύγχρονων μηχανών**

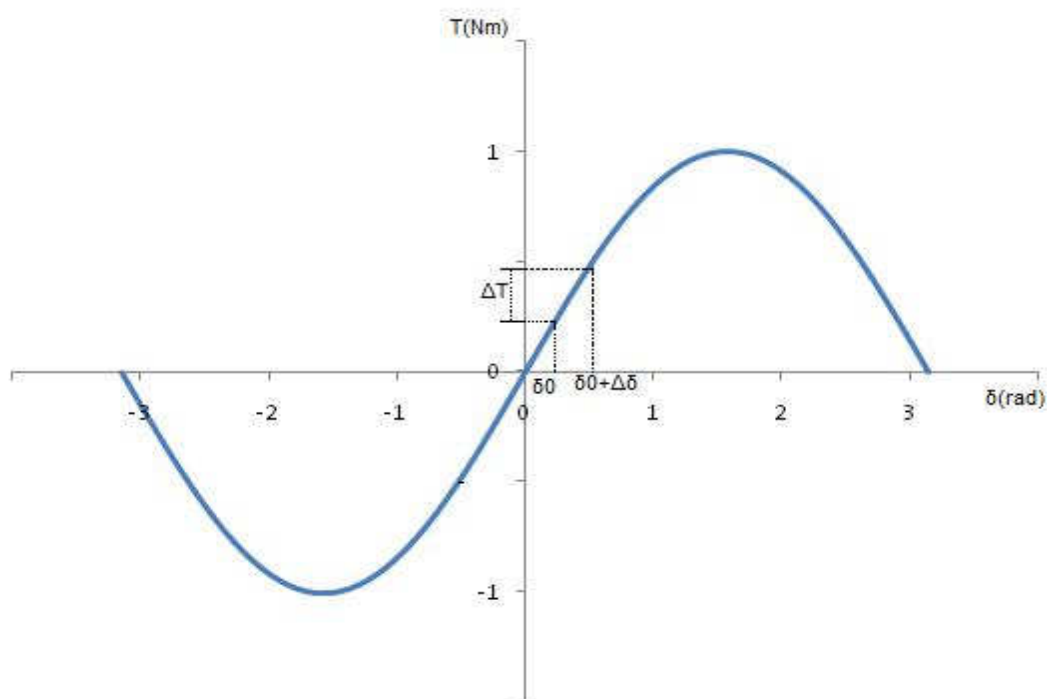
### **2.2.1 Εισαγωγή**

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια, η οποία τροφοδοτεί ένα δίκτυο μόνη, ο αριθμός στροφών ανά λεπτό (ΣΑΛ) μειώνεται όταν αυξηθεί το φορτίο μέχρι όπου ο ρυθμιστής της κινητήριας μηχανής την επαναριθμήσει. Δηλαδή ο αριθμός ΣΑΛ και η συχνότητα της γεννήτριας επηρεάζονται άμεσα από τις μεταβολές του φορτίου όταν λειτουργεί μόνη της. Αντιθέτως, η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική κατά την παράλληλη λειτουργία της γεννήτριας με άπειρο δίκτυο. Εφ' όσον η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί σε συγχρονισμό, ο αριθμός ΣΑΛ καθορίζεται από την συχνότητα του δικτύου. Μια μεταβολή του αριθμού αυτού συμβαίνει μόνο όταν όλες μαζί οι σύγχρονες μηχανές του δικτύου κάνουν συγχρόνως αυτή την αλλαγή. Για την μελέτη του φαινομένου διαταραχών κατά την παράλληλη λειτουργία σύγχρονων μηχανών πρέπει να θεωρήσουμε ότι μηχανικές ροπές, εξασκούνται στους άξονες γεννητριών ή κινητήρων και προσπαθούν πάντοτε να αυξήσουν την γωνία  $\delta$  και να οδηγήσουν την μηχανή σε αποσυγχρονισμό. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που αναπτύσσεται στην μηχανή προσπαθεί πάντοτε να ελαττώσει την γωνία  $\delta$ . Κατά την πλήρη αποφόρτιση, μια σύγχρονη μηχανή υπό την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής επανέρχεται στην γωνία  $\delta=0$ . Ο κινητήρας κατά την αποφόρτιση επιταχύνει ενώ η γεννήτρια φρενάρει για να επανέλθουν σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Συνεπώς η ηλεκτρομαγνητική ροπή της σύγχρονης μηχανής προσπαθεί να κρατήσει την τιμή της γωνίας  $\delta$  μηδενική. Αυτή η ιδιότητα της ροπής μας δίνει την δυνατότητα χρήσης πολλών γεννητριών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, διότι οι ρυθμιστές

στροφών δεν θα ήταν σε θέση να ρυθμίσουν την σύγχρονη ορθή λειτουργία όλων των μηχανών.

### 2.2.2 Συγχρονιστική ροπή

Μέτρο για τις συγχρονιστικές ιδιότητες μιας σύγχρονης μηχανής λαμβάνεται η ροπή ανά μονάδα γωνίας η οποία ονομάζεται σύγχρονιστική ροπή ( $\tau$ ) [1]. Την ροπή αυτή δεν την χρησιμοποιούμε για να καθορίσουμε την διατιθέμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία είναι ίση με την μηχανική ροπή στην μόνιμη κατάσταση. Την χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τα φαινόμενα κατά την διάρκεια αλλαγών φορτίου, στα οποία εμφανίζονται ροπές. Έτσι, εάν μία γεννήτρια κινηθεί προς τα εμπρός κατά μια γωνία  $\Delta\delta$ , όπως δείχνει και το σχήμα 2.1, τότε μετά την εξαφάνιση της ωθήσης υφίσταται ροπή ίση με  $\Delta T$ , η οποία επαναφέρει τον δρομέα στην αρχική γωνία  $\delta_0$ . Η συγχρονιστική ροπή εκφράζεται  $\Delta T/\Delta\delta$ .



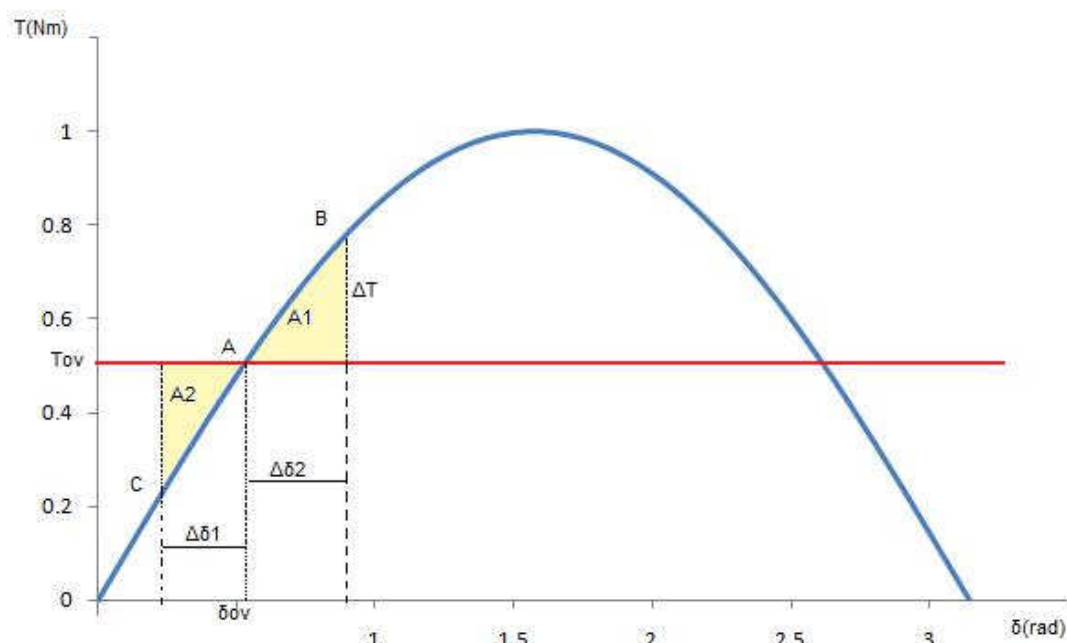
Σχήμα 2.1 – Καθορισμός της συγχρονιστικής ροπής.

Μια σύγχρονη μηχανή εργάζεται ευσταθώς όταν σε μια αργή ή αιφνίδια αλλαγή της φόρτισης, μπορεί όχι μόνο να αναλάβει το νέο φορτίο αλλά και να λειτουργήσει στην νέα κατάσταση φόρτισης επίσης ευσταθώς. Εάν οι αλλαγές της φόρτισης εκτελούνται αργά μιλούμε για στατική ευστάθεια ενώ όταν οι αλλαγές ισχύος είναι απότομες χαρακτηρίζεται ως δυναμική ευστάθεια.



### 2.2.3 Δυναμική Ευστάθεια

Δυναμική ευστάθεια είναι η έννοια που παρουσιάζεται σε μια αιφνίδια αλλαγή της προσαγόμενης ισχύος. Κατά την ονομαστική λειτουργία, υφίσταται ισορροπία μεταξύ της μηχανικά προσαγόμενης ισχύος και της ισχύος της γεννήτριας. Εάν δοθεί μια ώθηση στον δρομέα σε τρόπο ώστε η ροπή στον άξονα να αυξηθεί τότε ο δρομέας επιταχύνει και η γωνία του φορτίου αυξάνεται σε  $\delta_{ov} + \Delta\delta$ . Η αύξηση αυτής της γωνίας φορτίου αντιστοιχεί σε μια αύξηση της ροπής της γεννήτριας κατά  $\Delta T$ . Ο δρομέας αναλαμβάνει μια πρόσθετη γωνιακή ταχύτητα η οποία επαλληλίζεται με την σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα [1].



Σχήμα 2.2 – Καθορισμός δυναμικής ευσταθείας.

Πάνω από την γωνία φορτίου  $\delta_{ov}$ , η ισχύς της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη από την μηχανική ισχύ που προσδίδεται από την κινητήρια μηχανή. Ο δρομέας έχει μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια λόγω της αυξημένης γωνίας φορτίου  $\delta_{ov} + \Delta\delta_1$ , και η διαφορά ροπών  $\Delta T$  μπορεί να επενεργήσει επιταχύνοντας προς την αντίθετη φορά. Η γωνία φορτίου ελαττώνεται μέχρι ο δρομέας να φτάσει την αρχική του τιμή  $\delta_{ov}$ . Η δυναμική ενέργεια του, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια λόγω της αδράνειας των περιστρεφόμενων μαζών. Όμως ο δρομέας ταλαντώνεται προς την άλλη φορά μέχρι του σημείου C, στο οποίο αντιστοιχεί μια γωνία φορτίου  $\delta_{ov} + \Delta\delta_2$ . Τώρα ενεργεί πάλι η διαφορά μεταξύ της κινητήριας ροπής και της μικρότερης ροπής της γεννήτριας, επιταχύνοντας τον δρομέα κατά την αντίστροφη φορά. Οι ταλαντώσεις επιταχύνουν τον δρομέα κατά την αντίστροφη φορά. Οι ταλαντώσεις αυτές σε σχέση με την σύγχρονη πορεία του δρομέα θα επαναλαμβάνονταν περιοδικά, εάν δεν υπήρχε η απόσβεση. Η απόσβεση αυτή οφείλεται στα ρεύματα που επάγονται στα κλειστά κυκλώματα του δρομέα κατά την διάρκεια των ταλαντώσεων αυτών. Μια ταλάντωση γύρω από το σημείο A (σχήμα 2.2) συμβαίνει προφανώς όταν τα δύο εμβαδά A1 και

A2 είναι ίσα ή όταν το συνολικό έργο που παράγεται στο δρομέα μεταξύ των σημείων B και C είναι ίσο με μηδέν.

$$\Delta T = J \cdot \frac{\partial^2 \delta_m}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

$$\delta_m = \frac{2}{P} \cdot (\delta + \omega_0 t) \quad (2.2)$$

Από την σχέση 2.1 υπολογίζεται η τιμή της συγχρονιστικής ροπής η οποία είναι ανάλογη με την αδράνεια της μηχανής και με την δεύτερη παράγωγο της μηχανικής γωνίας του δρομέα ως προς σταθερό άξονα αναφοράς. Στην συνέχεια με χρήση της σχέσης 2.2 καταλήγουμε:

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{2P}{J} \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Η γωνία  $\delta$  αντιστοιχεί στην γωνία του φορτίου και το  $\omega_0$  στην σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα. Στο σημείο A του σχήματος 2.2 στο οποίο  $\delta = \delta_{ov} =$  σταθερό πρέπει να ισχύει ότι το  $d\delta/dt$  ίσο με μηδέν. Με την βοήθεια των σχέσεων 2.1, 2.2 και 2.3 καταλήγουμε στις συνθήκες 2.4 και 2.5 που ονομάζονται κριτήριο ίσων εμβαδών καθώς το εμβαδόν A1 θα πρέπει να είναι ίσο με το εμβαδόν A2 [1].

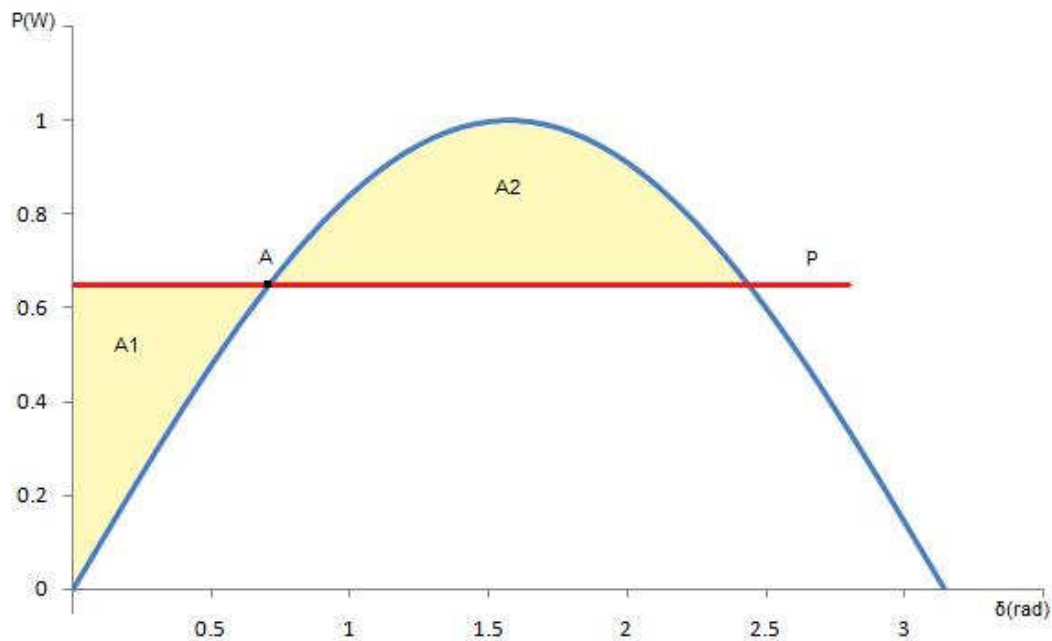
$$\int_{\delta_{ov}-\Delta\delta_2}^{\delta_{ov}+\Delta\delta_1} \Delta T d\delta = 0 \quad (2.4)$$

ή

$$\int_{\delta_{ov}-\Delta\delta_2}^{\delta_{ov}+\Delta\delta_1} \Delta P d\delta = 0 \quad (2.5)$$

Η συγχρονιστική ροπή περιγράφει την ιδιαιτερότητα της σύγχρονης μηχανής κατά την παράλληλη λειτουργία. Εάν ένας σύγχρονος κινητήρας ξαφνικά αποφορτιστεί, η ηλεκτρομαγνητική ροπή επιταχύνει τον δρομέα για να φτάσει την γωνία  $\delta$  ίση με μηδέν. Λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας στον δρομέα που προκύπτει από την επιτάχυνση, ο δρομέας ταλαντώνεται πέραν της μηδενικής του θέσης. Στην λειτουργία της γεννήτριας η ροπή αυτή αναπτύσσεται με επιτάχυνση αντίστροφης φοράς. Η σύγχρονη μηχανή σχηματίζει ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα ταλαντώσεων το οποίο μπορεί να συγκριθεί με τις ταλαντώσεις στρέψεως στρεφόμενων σφονδύλων, οι οποίοι κινούνται από τους ελαστικούς άξονες της μηχανής. Σε κάθε μεταβολή του φορτίου, δηλαδή η μετάβαση από μια γωνία σε άλλη, επιταχύνεται η μηχανή με αποσβημένες ταλαντώσεις του δρομέα. Η ικανότητα ταλάντωσης της σύγχρονης μηχανής υπό ορισμένες περιστάσεις είναι ανεπιθύμητη. Οι διαταραχές της σύγχρονης μηχανής που προκύπτουν σε τέτοιες περιπτώσεις είναι οι εξής:

- Διαταραχές της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που προκύπτουν από ταλαντώσεις της τάσης ή του ρεύματος του δικτύου οι οποίες οδηγούν την σύγχρονη μηχανή σε αυτοδιεγείρομενες ταλαντώσεις.
- Διαταραχές της μηχανικής ροπής που προκύπτουν από την ανομοιόμορφη πορεία των εμβόλων της μηχανής. Τέτοιου τύπου ταλαντώσεις μπορεί να παρουσιάζονται λόγω δυσλειτουργίας του ρυθμιστή στροφών ή αστάθειας της διεγέρτριας.



**Σχήμα 2.3 – Κριτήριο ίσων εμβαδών για λειτουργία γεννήτριας με κενό φορτίο.**

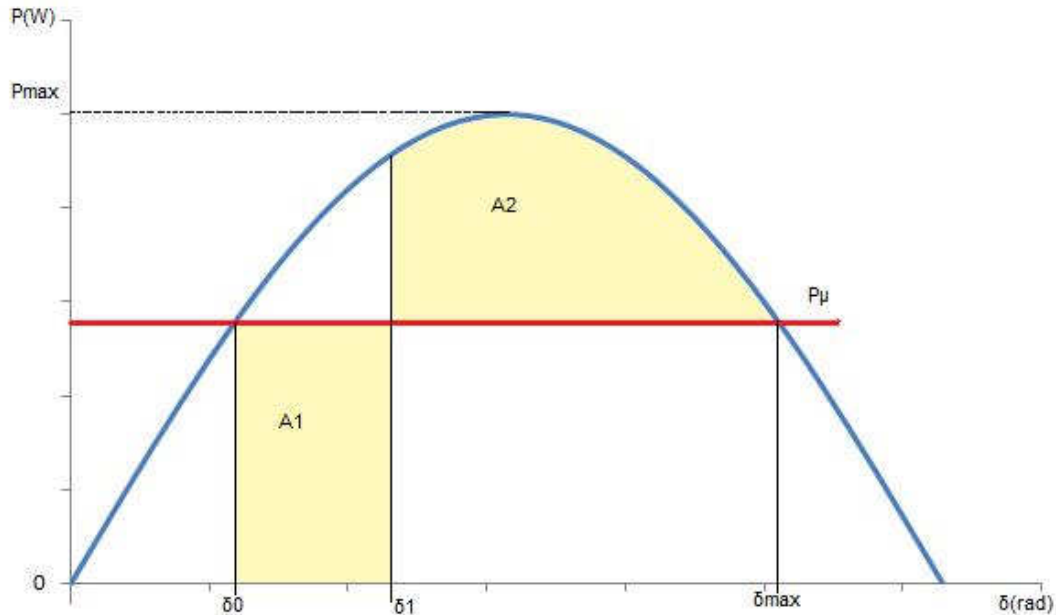
Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η ισχύς που πρέπει να συνδεθεί αιφνίδια σε μια γεννήτρια με κενό φορτίο για να χάσει τον συγχρονισμό. Η λύση που δίνει την ζητούμενη ισχύ σε αυτό το πρόβλημα είναι η εύρεση της ευθείας του P (κόκκινη ευθεία) η οποία σχηματίζει δύο ίσα εμβαδά ( $A1=A2$ ). Μια άλλη εφαρμογή του κριτηρίου ίσων εμβαδών είναι να αναγνωρίζει το σύστημα ένα σφάλμα και να υπολογίζει την οριακή περίπτωση ανάκτησης και διατήρησης της ορθής λειτουργίας. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζονται αυτά τα εμβαδά και από τις σχέσεις 2.6, 2.7 και 2.8 φτάνουμε στην επίλυση αυτού του προβλήματος υπολογίζοντας με την εξίσωση 2.9 την κρίσιμη γωνία  $\delta_1$ .

$$A1 = A2 \quad (2.6)$$

$$A1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} P_{\mu} d\delta \quad (2.7)$$

$$A2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_{\mu}) d\delta \quad (2.8)$$

$$\delta_1 = \arccos((\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0) \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.4 – Κριτήριο ίσων εμβαδών από την καμπύλη P-δ.

### 2.3 Δείκτες ευστάθειας δικτύου

Δύο βασικοί δείκτες για τον χαρακτηρισμό της ευστάθειας του δικτύου είναι ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης (ΚΧΕ) και η κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης (ΚΓΕ) οι οποίοι προκύπτουν από το κριτήριο ίσων εμβαδών (ενότητα 2.2.3). Οι δείκτες αυτοί δείχνουν την οριακή κατάσταση που το σύστημα είναι σε θέση να ανακτήσει την σταθερότητα του. Η γωνία λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής πρέπει να είναι μικρότερη της κρίσιμης γωνίας εκκαθάρισης και ο χρόνος εκκαθάρισης σφαλμάτων πρέπει να είναι μικρότερος από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης. Όταν αυτοί οι δύο χρόνοι ξεπερνιούνται ο δρομέας επιταχύνεται και η γωνία του δρομέα αυξάνεται χωρίς όριο. Κατά την παρουσία σφάλματος σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζουμε το περιθώριο ευστάθειας ως την διαφορά μεταξύ της πραγματικής γωνίας με την ΚΓΕ και του πραγματικού χρόνου εκκαθάρισης με τον ΚΧΕ.

Λόγω της δυσκολίας υπολογισμού αυτών των δεικτών σε μεγάλα δίκτυα χρησιμοποιούμε πιο πρακτικούς δείκτες οι οποίοι αναφέρονται στην διάρκεια ταλάντωσης του συστήματος και στην μέγιστη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα. Η διάρκεια ταλάντωσης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από την έναρξη μιας διαταραχής μέχρι την στιγμή στην οποία η συχνότητα παραμένει εντός ελαχίστου εύρους ζώνης. Όσο μεγαλύτερη είναι διάρκεια ταλάντωσης τόσο μεγαλύτερη είναι διάρκεια διαταραχής και αυτό οδηγεί στην αστάθεια του συστήματος.



# 3

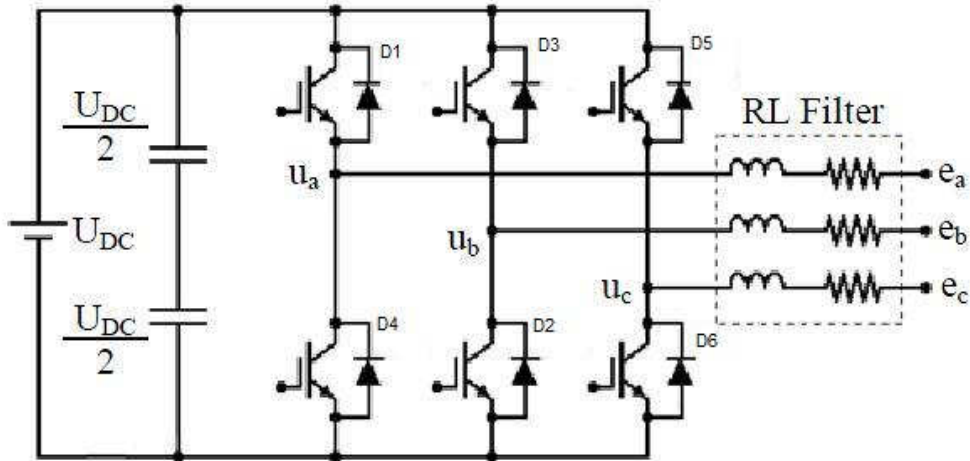
---

## *Ελεγκτής ρεύματος (Current Control)*

### *3.1 Εισαγωγή*

Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (converters) έχουν εισαχθεί τις τελευταίες δύο δεκαετίες στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ανάπτυξης των ημιαγωγών και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η κύρια απαίτηση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο ακριβής έλεγχος των ροών ενεργού και άεργου ισχύος. Η διατήρηση της σταθερότητας της τάσης και της συχνότητας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται, στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μέσω των ηλεκτρικών μετατροπέων ενέργειας με την ικανότητα τους να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια από εναλλασσόμενη (AC) σε συνεχής (DC). Για τον έλεγχο των διακοπών που χρησιμοποιούνται σε ένα μετατροπέα γίνεται οδήγηση ενός σήματος ελέγχου μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους πλάτος παλμών (PWM).

Η τεχνική διαμόρφωση εύρους παλμών PWM χρησιμοποιείται για την υλοποίηση μιας επιθυμητής ημιτονοειδούς μορφής τάσης ή ρεύματος εξόδου. Το επιθυμητό ημιτονοειδές σήμα ελέγχου συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή. Η συχνότητα και το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής διατηρούνται σταθερά κατά την διάρκεια παραγωγής του τελικού επιθυμητού σήματος εξόδου. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η τεχνική PWM είναι γιατί μειώνει τις αρμονικές που εμφανίζονται. Η διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) μας δίνει την δυνατότητα να αξιοποιήσουμε καλύτερα την DC τάση που διαθέτουμε. Τα PWM είναι τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για την οδήγηση DC κινητήρων.



Σχήμα 3.1 – Τριφασικός μετατροπέας δύο επίπεδων.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένας τριφασικός μετατροπέας δύο επίπεδων. Ένα τριγωνικό κύμα με συχνότητα  $f_c$  συγκρίνεται με τα ημιτονοειδή σήματα αναφοράς. Στα χρονικά διαστήματα που το τριγωνικό φέρων κύμα είναι μεγαλύτερο από το σήμα αναφοράς δημιουργούνται παλμοί οι οποίοι θέτουν σε λειτουργία τον ημιαγωγικό διακόπτη  $D_4$  που θα οδηγήσει την ημιγέφυρα (βλ. σχήμα 3.2) να δώσει έξοδο  $-V_{dc}/2$ . Το αντίστροφο συμβαίνει όταν το τριγωνικό φέρων είναι μικρότερο από το σήμα αναφοράς. Οι μεταγωγές συμβαίνουν στα σημεία τομής των δύο κυμάτων. Μ' αυτό τον τρόπο προκύπτει η κυματομορφή της τάσης φάσης  $a$ . Η συχνότητα της θεμελιώδους συνιστώσας αυτής της κυματομορφής είναι ίση με τη συχνότητα  $f$  του κύματος υπό διαμόρφωση, δηλαδή του ημιτόνου.

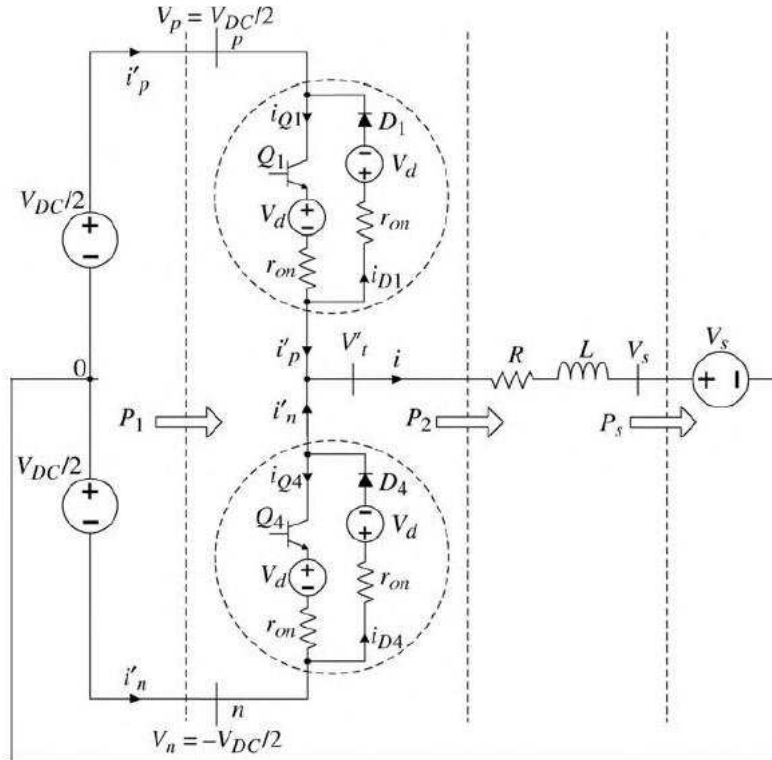
Ιδανικά, ο δείκτης διαμόρφωσης μπορεί να μεταβάλλεται από το  $-1$  μέχρι το  $1$  ώστε να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του σήματος αναφοράς και της εξόδου. Ουσιαστικά ο αντιστροφέας λειτουργεί σαν γραμμικός ενισχυτής με κέρδος :

$$V_t = m \cdot \frac{V_{DC}}{2} \quad (3.1)$$

### 3.2 Κατασκευή μοντέλου μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας

Το σχήμα 3.1 δείχνει την μορφή του αντιστροφέα που υλοποιήσαμε. Για την υλοποίηση του ελεγκτή ρεύματος ο οποίος θα ελέγχει αυτή την λειτουργία χρειάζεται να γίνει εκτενέστερη ανάλυση της λειτουργία μιας φάσης του μετατροπέα. Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός κλάδου της γέφυρας ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παραγωγή μιας φάσης της επιθυμητής κυματομορφής που θέλουμε να υλοποιήσουμε.





Σχήμα 3.2 – Ισοδύναμο κύκλωμα της γέφυρας για την ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου. [5]

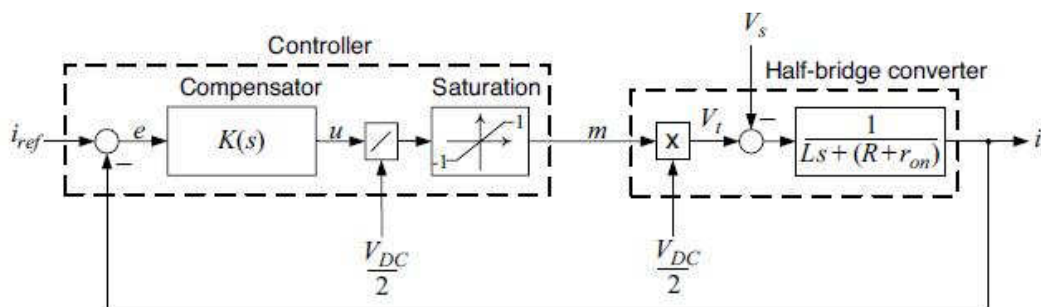
Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Kirchhoff στην AC πλευρά του μετατροπέα εξάγουμε την σχέση 3.2 η οποία περιγράφει το ρεύμα που αναπτύσσεται στην AC πλευρά του σύστημα μας. Η  $V_t$  (σχέση 3.1) εκφράζει την τάση ελέγχου στην εισόδου του φίλτρου. Η  $V_s$  είναι η τάση του δίκτυου στο οποίο θα είναι διασυνδεδεμένος ο μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξίσωση 3.3 δείχνει ότι η γενικευμένη σχέση ανταλλαγής ενεργού ισχύος είναι ανάλογη της τάσης  $V_s$  και του ρεύματος που αναπτύσσεται στην AC πλευρά του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση  $V_t$  είναι ανάλογη με το μισό της τάσης  $U_{DC}$  και της κυματομορφής διαμόρφωσης του σήματος  $m$ .

$$L \frac{di}{dt} + (R + r_{on}) \cdot i = V_t - V_s \quad (3.2)$$

$$P_s = \vec{V}_s \cdot \vec{i} \quad (3.3)$$

Αρχικά, για τις τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων του μετατροπέα επιλέγουμε τυπικές τιμές που χρησιμοποιούνται σε πραγματικούς μετατροπείς διασυνδεδεμένους με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για το φίλτρο RL επιλέξαμε την επαγωγική αντίδραση (L) να είναι ίση με 150mH και την αντίσταση (R) του φίλτρου ίση με 0.8Ω. Επίσης, οι επιλογές αυτών των τιμών έχουν να κάνουν και με την συχνότητα αποκοπής του

φίλτρον. Η εσωτερική αντίσταση ( $r_{on}$ ) για τα διακοπτικά ισχύος είναι ίση με  $1^{-4}\Omega$ . Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται σε μπλοκ διάγραμμα το κύκλωμα κλειστού βρόγχου του ελεγκτή ρεύματος. Ο έλεγχος και η λειτουργία του μετατροπέα θα γίνεται στο στρεφόμενο πεδίο q-d. Με την χρήση του στρεφόμενου πεδίου q-d έχουμε την δυνατότητα να ελέγχουμε τα σήματα τάσεως και ρεύματος σε συνεχή μορφή και όχι σε ημιτονοειδή μορφή η οποία εμφανίζεται στο πεδίο abc. Επιπρόσθετα, η χρήση του στρεφόμενου πεδίου q-d μας επιτρέπει την χρήση χαμηλής τάξεως ελεγκτές όπως είναι για παράδειγμα ο ΠΙ ελεγκτής. Η μετατροπή των εξισώσεων από το πεδίο αναφοράς abc στο στρεφόμενο πεδίο q-d γίνεται με την χρήση του μετασχηματισμού Park του οποίου εκτενέστερη ανάλυση γίνεται στο κεφάλαιο 4.



Σχήμα 3.3 – Κύκλωμα κλειστού βρόγχου ελεγκτή ρεύματος [5].

Στο κύκλωμα κλειστού βρόγχου του ελεγκτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3, το σήμα αναφοράς ( $i_{ref}$ ) συγκρίνεται με το σήμα του ρεύματος  $i$  (που αναπτύσσεται στην AC πλευρά του μετατροπέα ηλεκτρικής ενεργείας) για τον υπολογισμό της διαφοράς  $e$ . Με την είσοδο του σήματος  $e$  στον ΠΙ ελεγκτή δημιουργούμε το σήμα αναφοράς  $u$ . Ο ΠΙ ελεγκτής χρησιμοποιεί την συνάρτηση κέρδους  $K(s)=(k_p s+k_i)/s$ . Η έξοδος ( $m$ ) του ελεγκτή (controller) πρέπει να είναι μεταξύ του  $-1$  και του  $1$  για την ορθή λειτουργία της τεχνικής PWM. Η συνάρτηση μεταφοράς του αντιστροφέα προκύπτει να είναι ίση με  $1/(Ls+(R+r_{on}))$ . Με βάση το μπλοκ διάγραμμα (σχήμα 3.3) βρίσκουμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόγχου έχει ένα πόλο στο σημείο  $p=-(R+r_{on})/L$ . Για να βελτιώσουμε την απόκριση του μετατροπέα ακυρώνουμε τον πόλο με το μηδενικό του ΠΙ ελεγκτή. Επιλέγουμε της σχέσης 3.4 και 3.5 για τους συντελεστές ( $k_p$  και  $k_i$ ) του ΠΙ ελεγκτή. Έτσι, προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς της εξίσωσης 3.6. Η σταθερά χρόνου  $\tau_i$  μας δίνει την δυνατότητα επιλογής του χρόνου απόκρισης του ελεγκτή μας. Συνήθως, η σταθερά αυτή κυμαίνεται μεταξύ  $0.5ms$  με  $5ms$ .

$$k_p = \frac{L}{\tau_i} \quad (3.4)$$

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{R+r_{on}}{L} \quad \Leftrightarrow \quad k_i = \frac{R+r_{on}}{\tau_i} \quad (3.5)$$

$$G_i = \frac{i(s)}{i_{ref}(s)} = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (3.6)$$

Ακολουθώντας, δημιουργήσαμε το διάγραμμα του σχήματος 3.3 στο περιβάλλον δυναμικής προσομοίωσης (Matlab/Simulink) για την επιλογή της σταθεράς χρόνου απόκρισης του ελεγκτή μας. Τα δεδομένα που διατηρήθηκαν σταθερά για όλους τους ελέγχους είναι οι τιμές των ηλεκτρικών στοιχείων του φίλτρου  $L=150\text{mH}$  και  $R=0.8\Omega$  καθώς επίσης και η εσωτερική αντίσταση των διακοπών ισχύος  $10^{-4}\Omega$ . Συνεπάγεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς του αντιστροφέα (εξίσωση 3.7) με την χρήση αυτών των στοιχείων είναι:

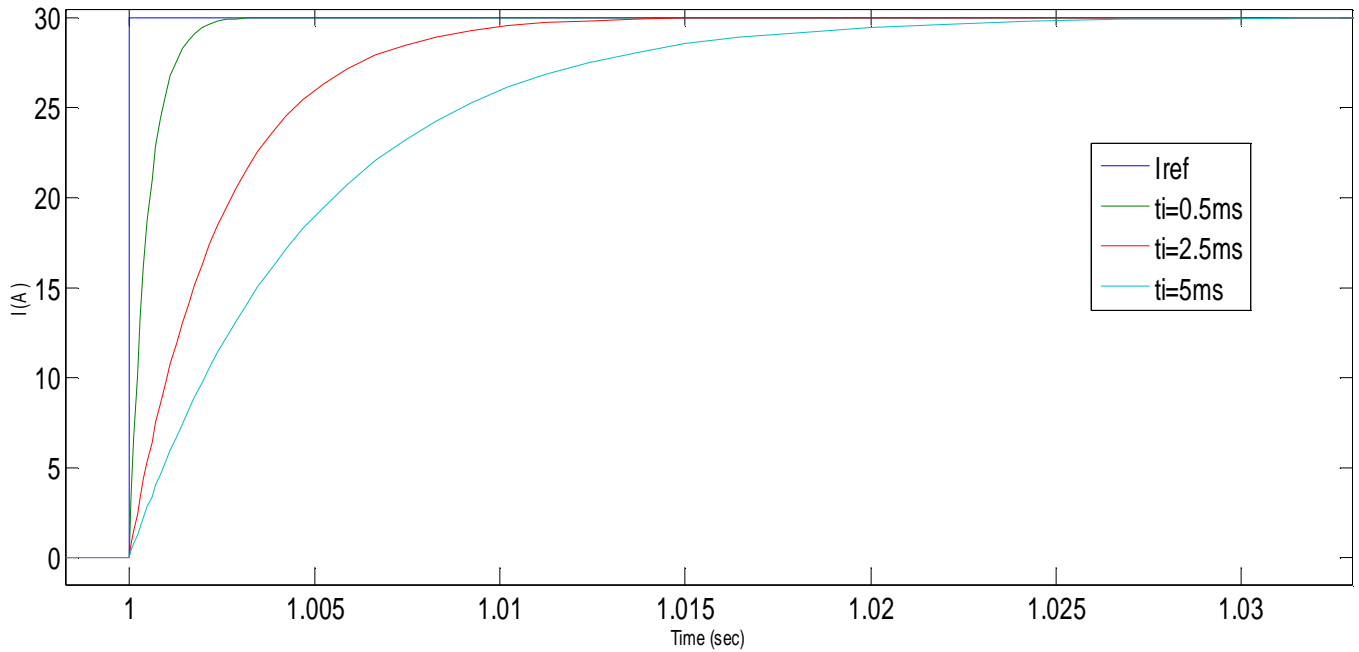
$$G_1 = \left( \frac{1}{0,15s+0.8001} \right) \quad (3.7)$$

Από το τυπικό εύρος τιμών (0.5ms με 5ms) επιλέχθηκαν να εξεταστούν τρεις διαφορετικές τιμές της σταθεράς χρόνου για τον έλεγχο του χρόνου απόκρισης του ελεγκτή μας. Οι τιμές αυτές είναι 0.5ms, 2.5ms και 5ms. Για τις τιμές αυτές υπολογίστηκαν οι σταθερές  $k_p$  και  $k_i$  του PI ελεγκτή μέσα από τις σχέσεις 3.4 και 3.5. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές που έχει ο εκάστοτε PI ελεγκτή.

$\tau_i$	$k_p$	$k_i$
0,5	300	1600,2
2,5	60	320,04
5	30	160,2

**Πίνακας 3.1 – Τιμές σταθερών  $k_p$  και  $k_i$  του PI ελεγκτή**

Με την χρήση των τιμών αυτών διενεργήθηκε ο έλεγχος της τιμής της σταθεράς χρόνου  $\tau_i$ . Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια βηματική μεταβολή του ρεύματος από τα 0A στα 30A. Παρατηρώντας το σχήμα 3.4 μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι όσο μικρότερη είναι η σταθερά χρόνου απόκρισης τόσο γρηγορότερα ανταποκρίνεται ο ελεγκτή μας. Επιλέξαμε να κατασκευάσουμε τον ελεγκτή ρεύματος μας με σταθερά χρόνου απόκρισης ίση με 0.5ms.



**Σχήμα 3.4 – Έλεγχος σταθεράς χρόνου απόκρισης ελεγκτή για την αρχική προσέγγιση των 30Α.**

Ο σχεδιασμός του μετατροπέα έγινε με βάση τις σχέσεις 3.11 και 3.12. Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν μετασχηματίζοντας τις σχέσεις 3.8 με 3.10 από το επίπεδο αναφοράς abc (3 φάσεις) στο στρεφόμενο πεδίο q-d με την χρήση του μετασχηματισμού Park.

$$L \frac{\partial i_a}{\partial t} = -(R + r_{on}) \cdot i_a + V_{ta} - V_{sa} \quad (3.8)$$

$$L \frac{\partial i_b}{\partial t} = -(R + r_{on}) \cdot i_b + V_{tb} - V_{sb} \quad (3.9)$$

$$L \frac{\partial i_c}{\partial t} = -(R + r_{on}) \cdot i_c + V_{tc} - V_{sc} \quad (3.10)$$

Με την χρήση του μετασχηματισμού Park συνεπάγεται,

$$L \frac{\partial i_q}{\partial t} = -L\omega id - (R + r_{on}) \cdot i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (3.11)$$

$$L \frac{\partial i_d}{\partial t} = L\omega iq - (R + r_{on}) \cdot i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (3.12)$$

όπου  $\omega$  είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα.

Τα ρεύματα ( $i_q$  και  $i_d$ ) του ελεγκτή πρέπει να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, για να μην επηρεάζει το ένα την λειτουργία του άλλου. Για να το πετύχουμε αυτό χρειάζεται να κάνουμε την μαθηματική ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος μας. Με την μεθοδολογία αυτή δημιουργούμε τις εξισώσεις ρευμάτων του ελεγκτή οι οποίες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (decoupling). Αντικαθιστούμε τις σχέσεις 3.13 και 3.14 στις σχέσεις 3.15 και 3.16 αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τις εν λόγω αντικαταστάσεις, το αντικαθιστούμε εκ νέου στις σχέσεις 3.11 και 3.12 και προκύπτουν οι ανεξάρτητες εξισώσεις των εκάστοτε ρευμάτων (εξισώσεις 3.17 και 3.18)

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}} \cdot (u_d + L\omega i_q + V_{sd}) \quad (3.13)$$

$$m_q = \frac{2}{V_{DC}} \cdot (u_q - L\omega i_d + V_{sq}) \quad (3.14)$$

$$V_{td} = \frac{V_{DC}}{2} \cdot m_d \quad (3.15)$$

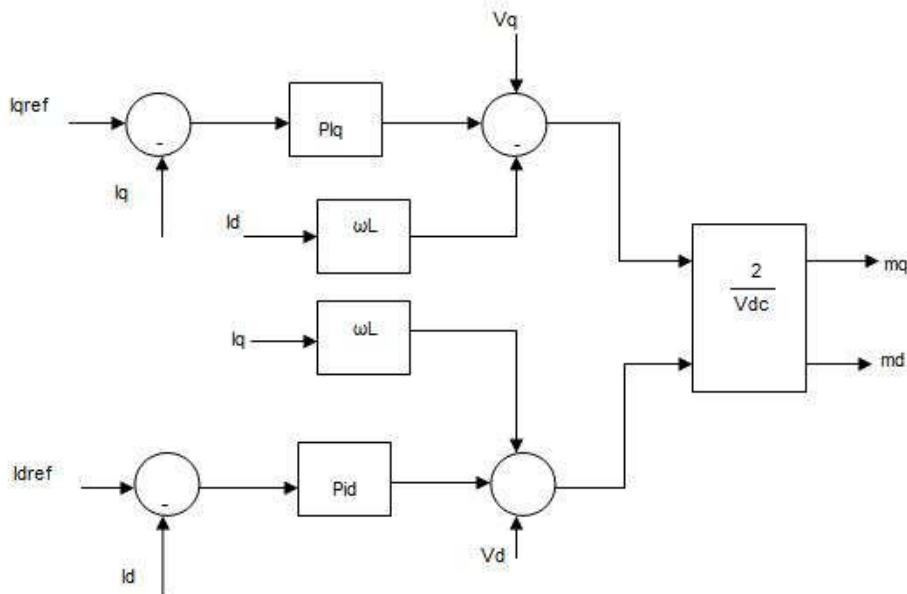
$$V_{tq} = \frac{V_{DC}}{2} \cdot m_q \quad (3.16)$$

Τελικά,

$$L \frac{\partial i_q}{\partial t} = -(R + r_{on}) \cdot i_q + u_q \quad (3.17)$$

$$L \frac{\partial i_d}{\partial t} = -(R + r_{on}) \cdot i_d + u_d \quad (3.18)$$

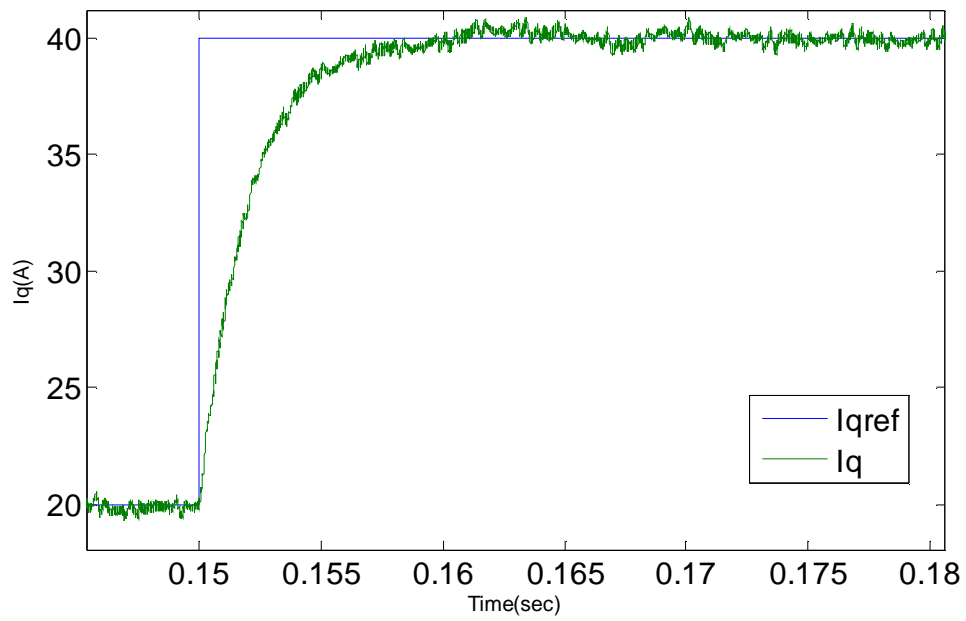
Στο σχήμα 3.5 φαίνεται το διάγραμμα του κυκλώματος που φτιάξαμε στο περιβάλλον δυναμικής προσομοίωσης (Matlab/Simulink). Με βάση τις μαθηματικές σχέσεις που δόθηκαν στην παρούσα ενότητα υλοποιήθηκε ο ελεγκτής ρεύματος του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθώς, οι τάσεις αναφοράς μετατρέπονται από το στρεφόμενο επίπεδο q-d στο επίπεδο αναφοράς abc και οδηγούνται μέσω της τεχνικής PWM. Έτσι δημιουργείται το επιθυμητό ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα.



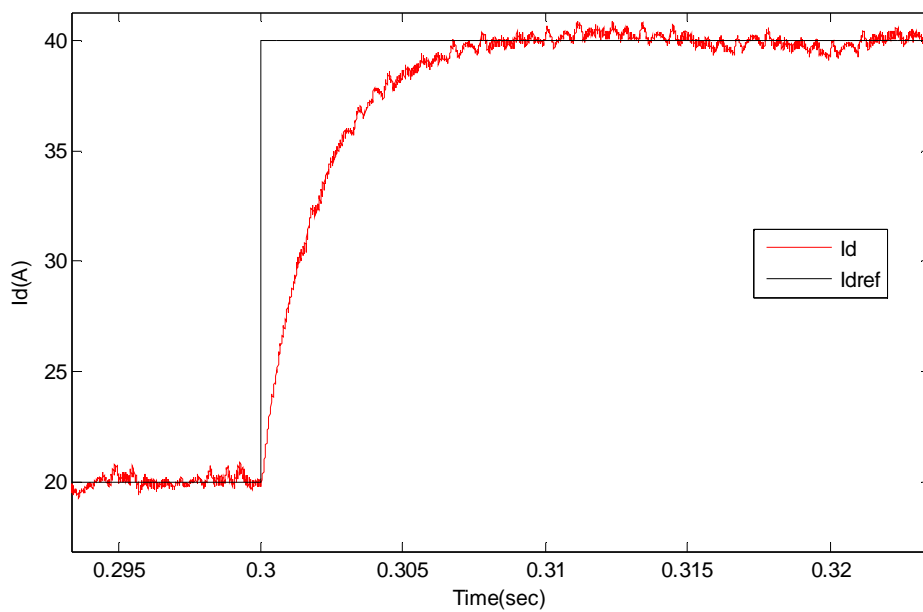
Σχήμα 3.5 - Διάγραμμα κυκλώματος του ελεγκτή ρεύματος.

### 3.2.1 Έλεγχος λειτουργίας ελεγκτή ρεύματος

Σε αυτή την ενότητα του παρόντος κεφαλαίου θα παρουσιάσουμε κάποια πειράματα ελέγχου λειτουργίας του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σκοπός των πειραμάτων είναι να ελέγξουμε την ορθή λειτουργία του μετατροπέα που υλοποιήσαμε. Στα περισσότερα πειράματα ελέγχεται αν ο χρόνος απόκρισης του αντιστροφέα που φτιάξαμε είναι ιδανικός για να ανταποκρίνεται στις μεταβολές των μεγεθών του τελικού μοντέλου προσομοίωσης (κεφάλαιο 5). Επιπρόσθετα ελέγξαμε αν μπορεί ο μετατροπέας να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Αρχικά στο σχήμα 3.6 γίνεται ο έλεγχος λειτουργίας του ενεργού ρεύματος  $i_q$  με την χρήση μιας μεταβολή στα 0.15sec από την αρχική τιμή των 20A στα 40A. Στην γραφική παράσταση 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τον έλεγχο της μεταβολής του άεργου ρεύματος  $i_d$ . Ομοίως έγινε μεταβολή από τα 20A στα 40A σε χρόνο 0.3sec. Παρατηρούμε ότι έχουμε ένα αρκετά καθαρό σήμα και ότι ο ελεγκτής ανταποκρίνεται γρήγορα στην μεταβολή που του επιβάλλαμε. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνει την επιθυμητή τιμή του ρεύματος αναφοράς σε χρόνο μικρότερο του 0.1sec και εν συνεχεία στην δεύτερη περίπτωση ξεκινά η μεταβολή σε χρόνο 0.3sec και αποκτά την τελική επιθυμητή τιμή λίγο πριν τα 0.31sec.

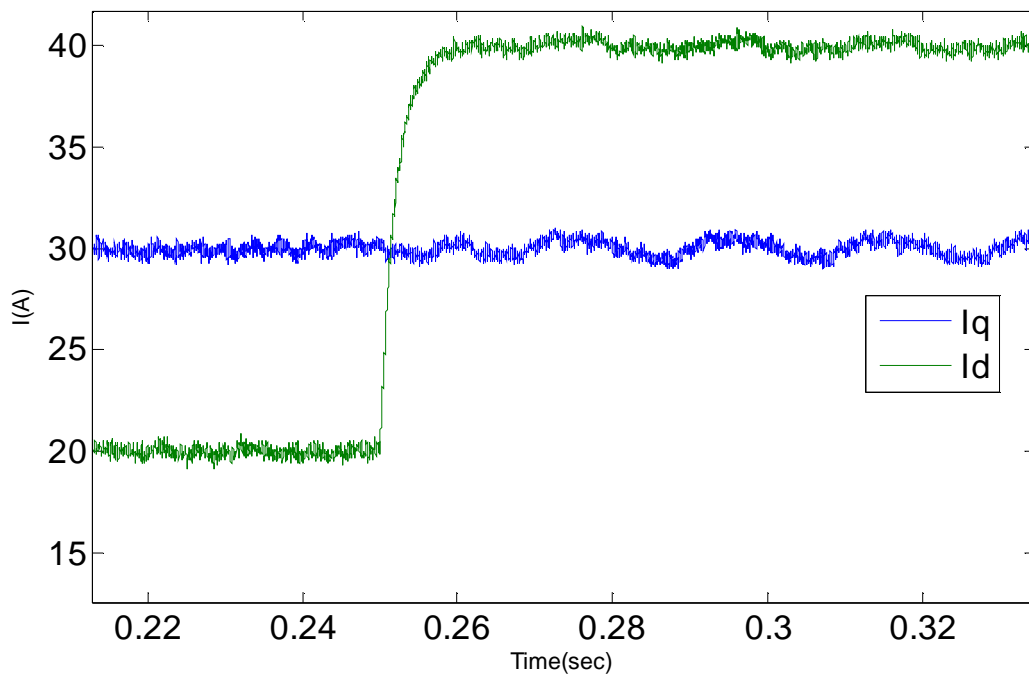


**Σχήμα 3.6 – Έλεγχος λειτουργίας ενεργού ρεύματος  $I_q$  για την προσέγγιση της μεταβολής στα 40A.**



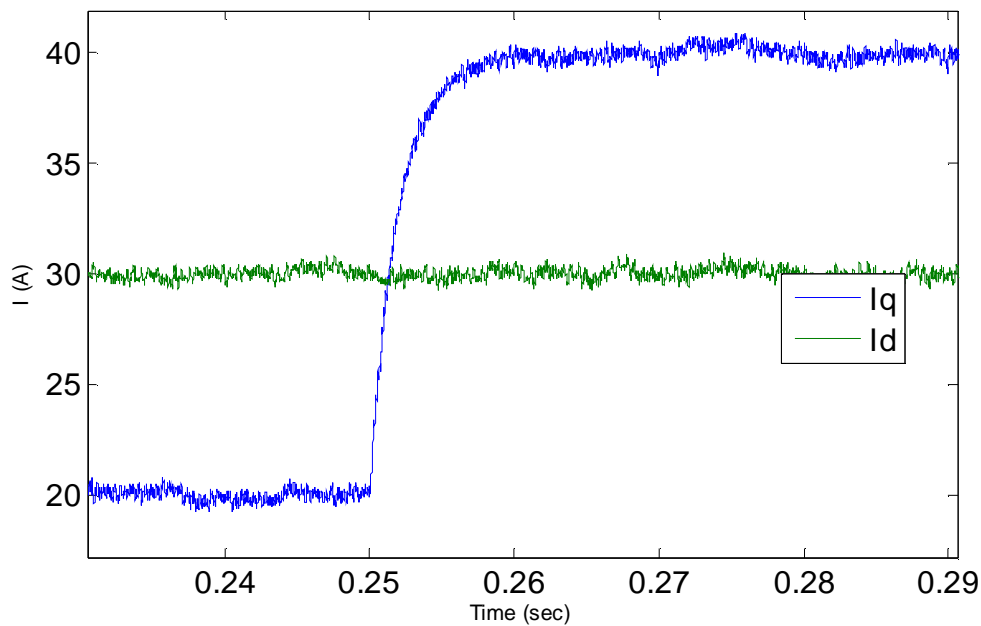
**Σχήμα 3.7 – Έλεγχος λειτουργίας ενεργού ρεύματος  $I_d$  για την προσέγγιση της μεταβολής στα 40A.**

Στο σχήμα 3.8 κρατήσαμε σταθερό το ενεργό ρεύμα στα 30A και μεταβάλαμε το άεργο ρεύμα σε χρόνο 0.25sec από τα 20A στα 40A. Σκοπός αυτού του έλεγχου είναι να δούμε αν έχουμε πετύχει σωστά να μην επηρεάζεται το ένα ρεύμα από τα άλλο κατά την μεταβολή της εκάστοτε τιμής του. Στο σχήμα 3.9 κρατήσαμε σταθερό το άεργο ρεύμα και μεταβάλλαμε το ενεργό ρεύμα. Ομοίως και σ' αυτή την περίπτωση βλέπουμε ότι κατά την αύξηση του  $i_q$  το ρεύμα  $i_d$  παραμένει σταθερό. Αυτό αποδεικνύει ότι τα δύο ρεύματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και δεν επηρεάζουν το ένα το άλλο.



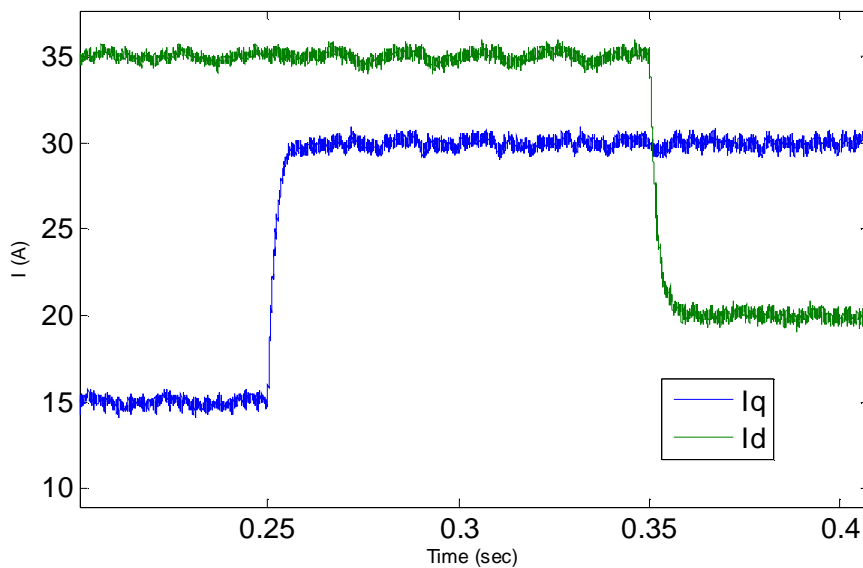
Σχήμα 3.8 – Αύξηση ρεύματος  $I_d$  με σταθερό  $I_q$ .



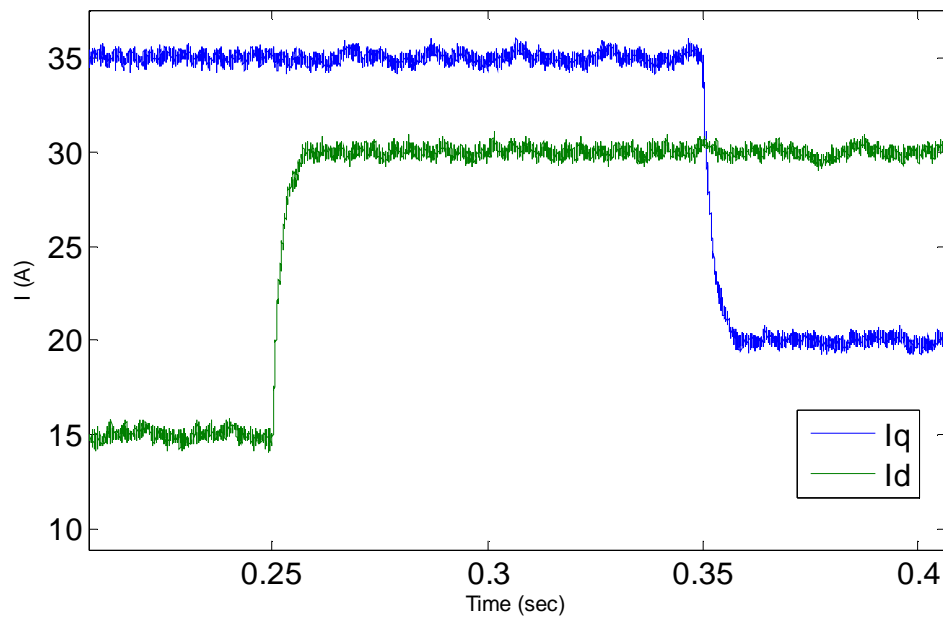


**Σχήμα 3.9 – Αύξηση ρεύματος  $I_q$  με σταθερό  $I_d$ .**

Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται μείωση του άεργου ρεύματος την χρονική στιγμή 0.35sec από τα 35A στα 20A και σε χρόνο 0.25sec αύξηση του ενεργού ρεύματος από τα 15A στα 30A. Σκοπός αυτού του πειράματος ήταν πρώτο να δούμε ότι κατά τις μεταβολές οποιουδήποτε από τα δύο ρεύματα δεν επηρεάζεται το άλλο και δεύτερο ότι κατά την μείωση του ενός ρεύματος, ο ελεγκτής μας ανταποκρίνεται εξίσου αποδοτικά. Στο σχήμα 3.11 φαίνεται ο έλεγχος με τα ίδια δεδομένα εισόδου μόνο που επέρχεται μείωση στο ενεργό ρεύμα και αύξηση στο άεργο.

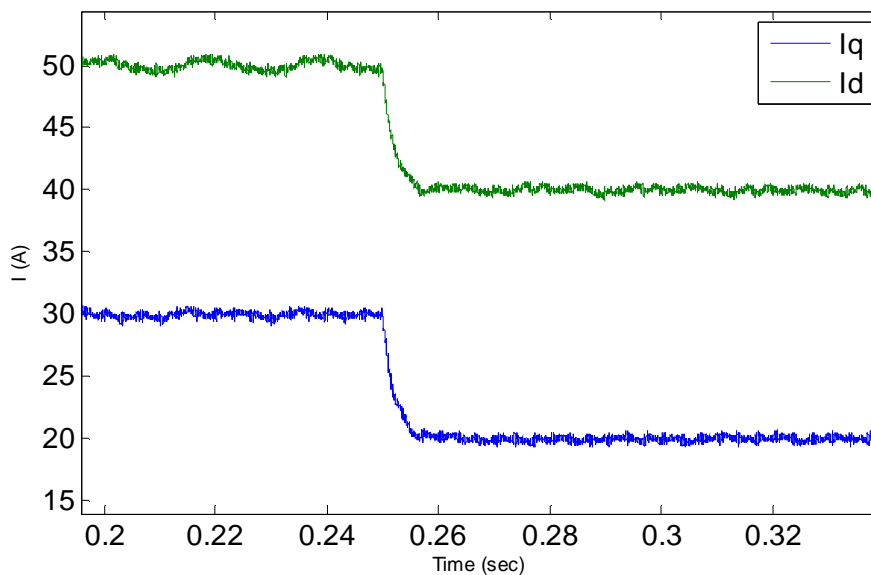


**Σχήμα 3.9 – Αύξηση  $I_q$  και μείωση  $I_d$ .**



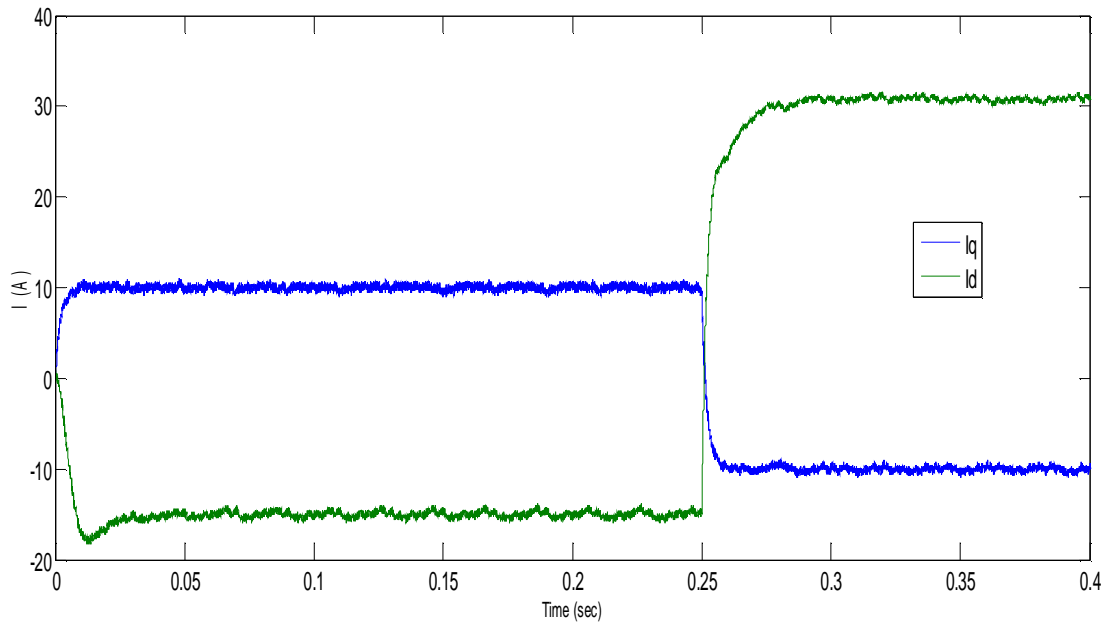
**Σχήμα 3.10 – Αύξηση  $I_d$  και μείωση  $I_q$ .**

Επιπλέον, ο επόμενος έλεγχος που πραγματοποιήσαμε είναι η ταυτόχρονη μείωση και των δύο ρευμάτων του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρώντας το γράφημα 3.11 αντιλαμβανόμαστε την ανεξάρτητη και ταυτόχρονη λειτουργία του μετατροπέα μας.

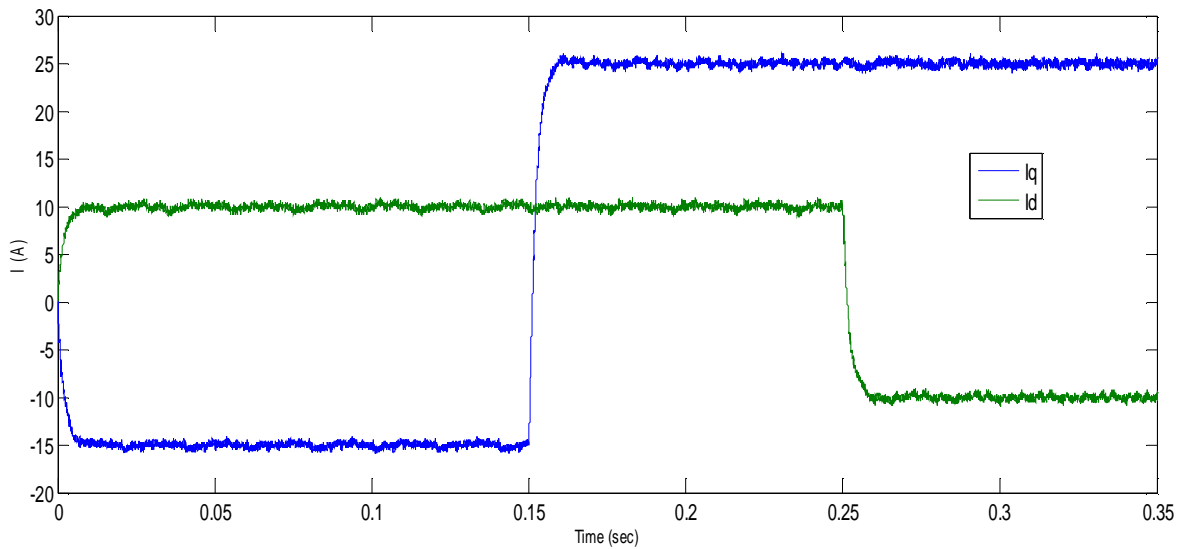


**Σχήμα 3.11 – Ταυτόχρονη μείωση ρευμάτων  $I_d$  και  $I_q$ .**

Ακόμα, διενεργήθηκε ο έλεγχος για την λειτουργία του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Σκοπός ήταν να δούμε αν μπορεί ο αντιστροφέας να απορροφήσει ή να προσδώσει ισχύ (είτε ενεργό είτε άεργο) στο δίκτυο. Στα σχήματα 3.12 και 3.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης από αυτό τον έλεγχο λειτουργίας του αντιστροφέα.

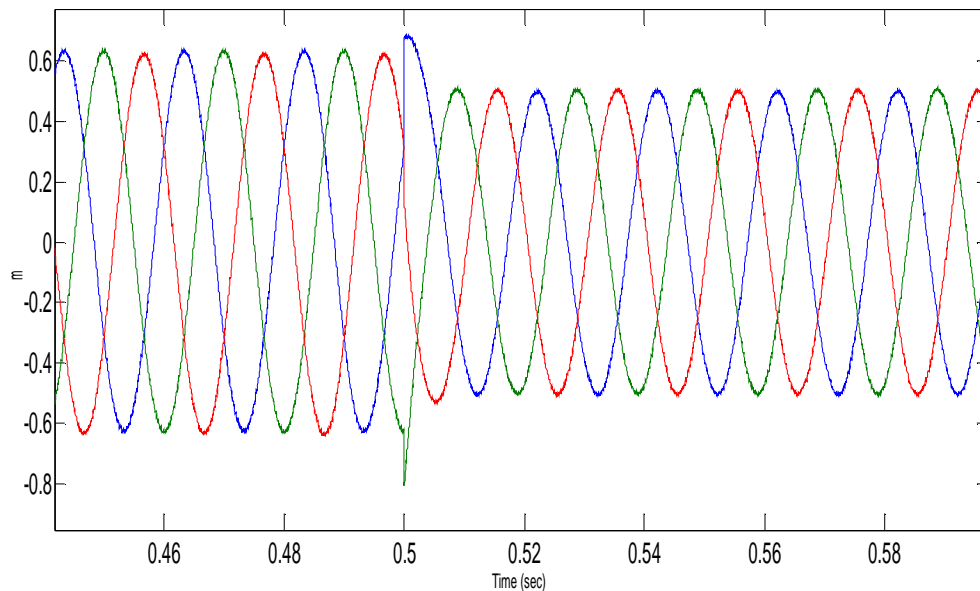


**Σχήμα 3.12 – Πρώτος έλεγχος λειτουργίας 4 τεταρτημορίων του αντιστροφέα.**

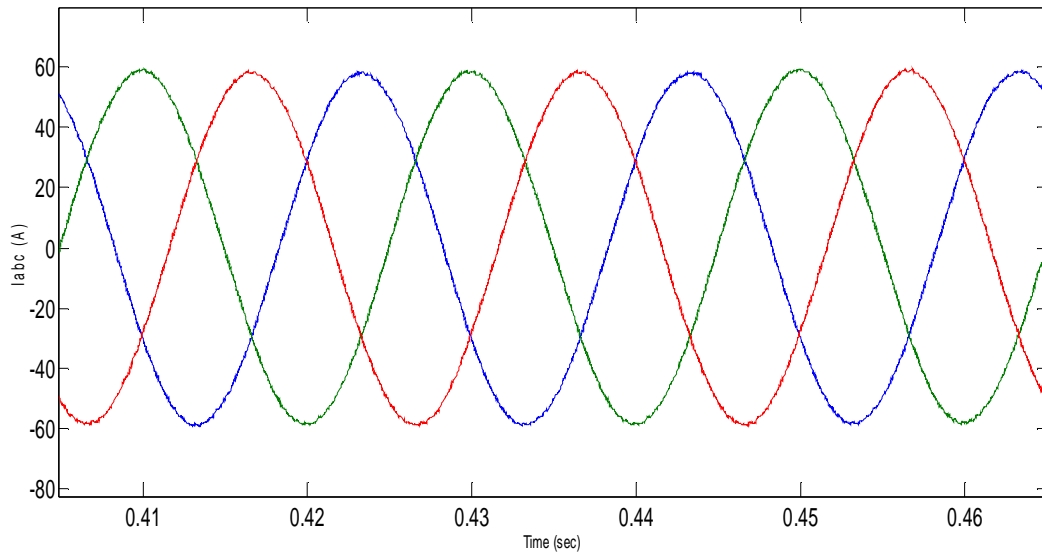


**Σχήμα 3.13 – Δεύτερος έλεγχος λειτουργίας 4 τεταρτημορίων του αντιστροφέα.**

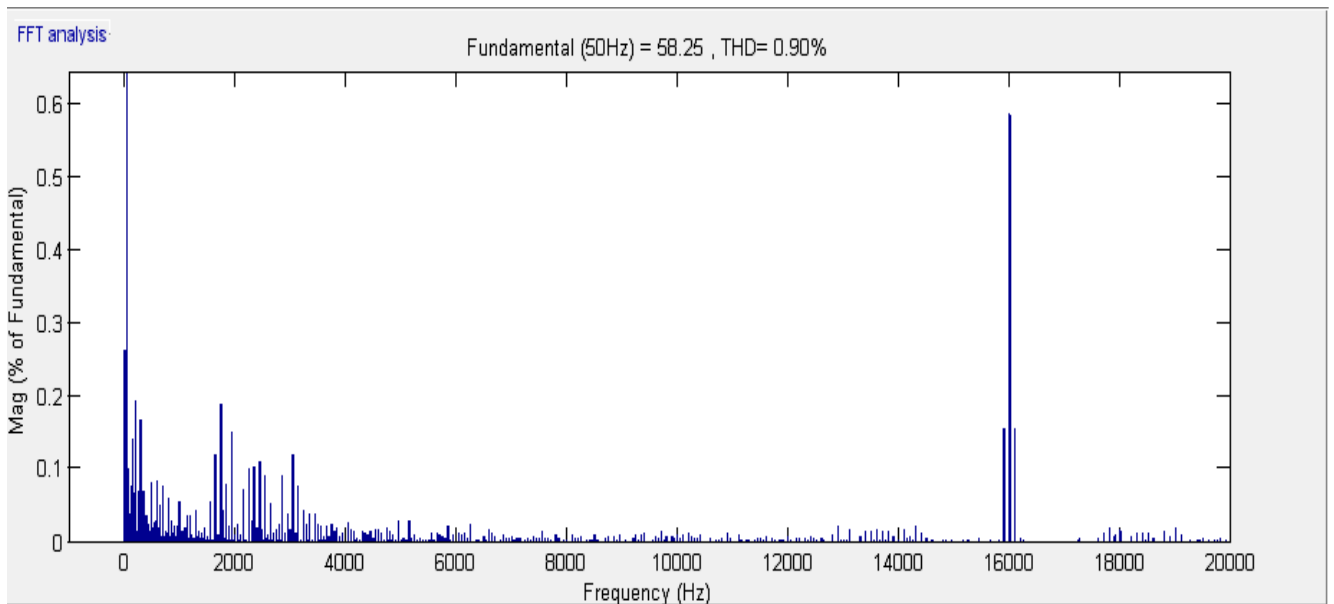
Τέλος, στο σχήμα 3.14 παρουσιάζεται η κυματομορφή διαμόρφωσης  $m$ . Σκοπός αυτού του πειράματος ήταν να ελέγξουμε ότι η κυματομορφή κυμαίνεται από -1 μέχρι 1. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί στο ασφαλές συμπέρασμα ότι η οδήγηση μέσω της τεχνικής PWM γίνεται σωστά και δεν ξεπερνάμε τα λειτουργικά όρια σύγκρισης των παλμών του PWM. Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η κυματομορφή του 3-φασικού ρεύματος του μετατροπέα. Παρουσιάζουμε στο σχήμα 3.16 το αρμονικό φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση Fourier (FFT analysis). Έχει ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η μεγαλύτερη αρμονική βρίσκεται στην συχνότητα  $f_s=16000\text{Hz}$  του PWM. Η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος (THD) είναι 0,90% το οποίο είναι επιθυμητό καθώς είναι μικρότερο του 5%, που προβλέπεται από τα διεθνή πρότυπα.



**Σχήμα 3.14 – Έλεγχος κυματομορφής  $m$ .**



**Σχήμα 3.15 – Κυματομορφή ρεύματος στο επίπεδο abc.**



**Σχήμα 3.16 – FFT analysis του ρεύματος του αντιστροφέα.**



# 4

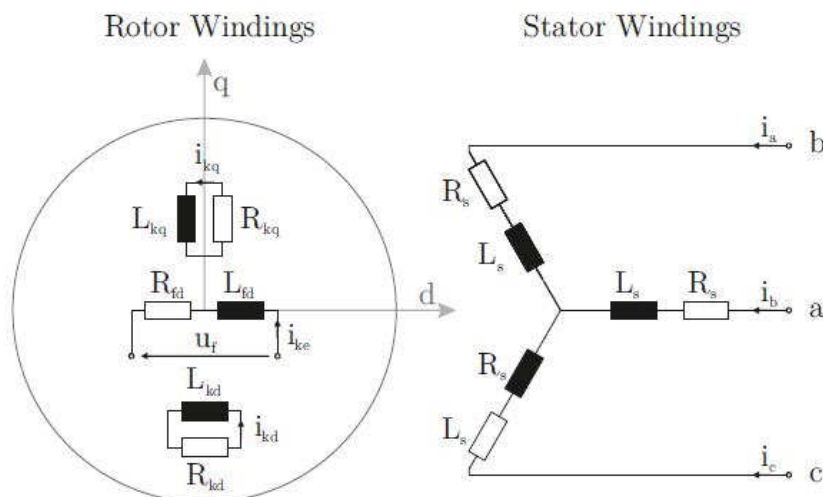
## Μοντέλο Σύγχρονης Μηχανής

### 4.1 Εισαγωγή

Μια από τις σπουδαιότερες ηλεκτρικές μηχανές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μεγάλη κλίμακα αποτελεί τον πυρήνα κάθε σταθμού ηλεκτρικής ενεργείας. Ο δρομέας της σύγχρονης μηχανής διεγείρεται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Επίσης διαθέτει ως επί το πλείστο ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα. Η ονομασία σύγχρονη μηχανή προέρχεται από το γεγονός ότι ο δρομέας περιστρέφεται συγχρόνως με το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Η σχέση μεταξύ της συχνότητας, αριθμού στροφών ανά λεπτό και αριθμού των πόλων είναι:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \quad (4.1)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι η ταχύτητα συνδέεται ευθέως με την συχνότητα του δικτύου. Εάν αυτή η συνθήκη δεν πληρείται σε περίπτωση ανωμαλίας τότε η μηχανή βρίσκεται σε αποσυγχρονισμό. Στο σχήμα 4.1 φαίνονται τα τυλίγματα στάτη (stator) και δρομέα (rotor) και ο τρόπος που είναι διαμορφωμένα σε μια διπολική σύγχρονη μηχανή. Ο στάτης έχει τρία τυλίγματα με διαφορά φάσης  $120^\circ$  ενώ το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα τροφοδοτείται εξωτερικά από μια DC πηγή συνεχούς ρεύματος.

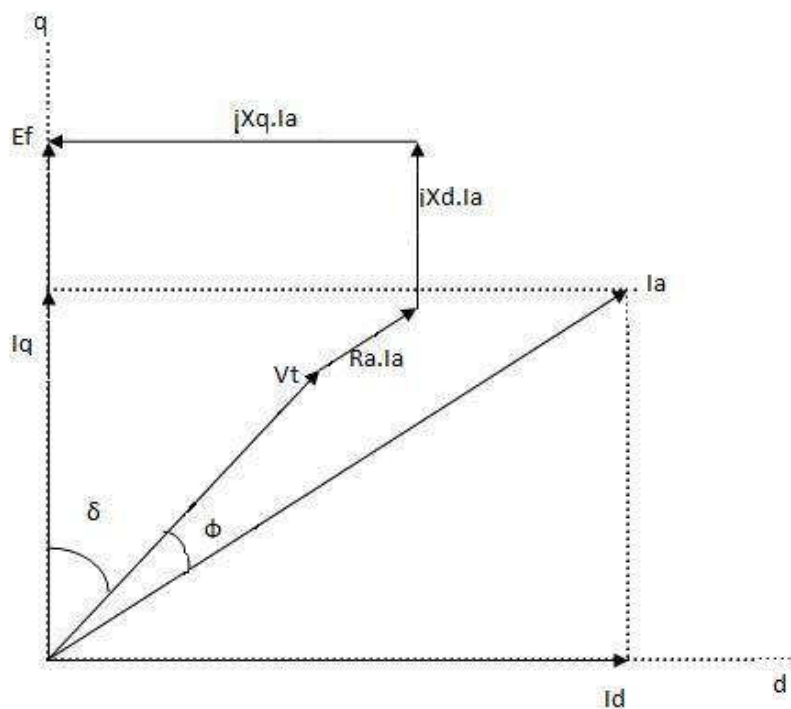


Σχήμα 4.1 – Τυλίγματα δρομέα και στάτη σύγχρονης μηχανής [3].

## 4.2 Τρόποι Λειτουργίας Σύγχρονης Μηχανής

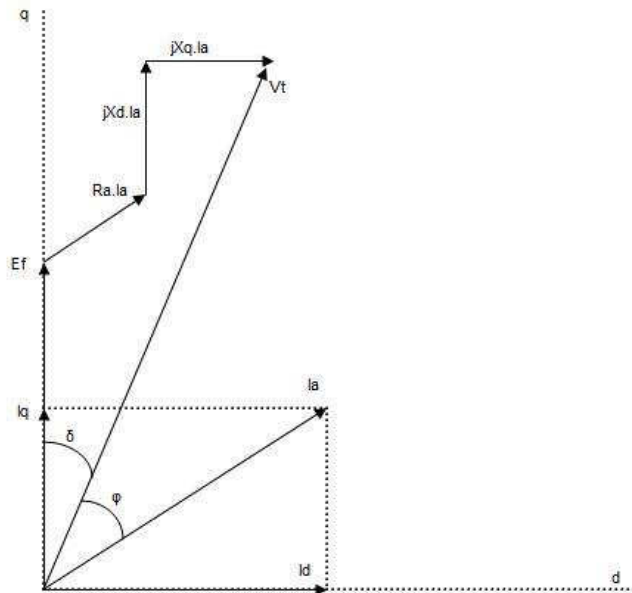
Όταν σε μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεθεί ηλεκτρικό φορτίο θα αναπτυχθούν ρεύματα στο στάτη. Τα τρία συμμετρικά ρεύματα του στάτη δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού μέτρου το οποίο στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό το πεδίο αλληλεπιδρά με το σταθερό πεδίο του δρομέα (το οποίο επίσης στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα) και από την τάση τους να ευθυγραμμιστούν προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η ροπή αυτή είναι αντίθετη στην φορά περιστροφής και για να προσδίσει ισχύ στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτός είναι στην ουσία ο μηχανισμός μετατροπής της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική.

Όταν ένας σύγχρονος κινητήρας συνδεθεί στο δίκτυο τα ρεύματα του στάτη επίσης δημιουργούν ένα σταθερό σε μέτρο πεδίο που στρέφεται με τις σύγχρονες στροφές. Το πεδίο του δρομέα είναι επίσης σταθερό και στρέφεται και αυτό με τις σύγχρονες στροφές και έτσι αναπτύσσεται μια σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία είναι στην κατεύθυνση της περιστροφής. Η ροπή αυτή εξισορροπείται από την ροπή του φορτίου. Έτσι, εφόσον η τάση έχει σταθερή συχνότητα, ο σύγχρονος κινητήρας θα έχει σταθερή ταχύτητα σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στο σχήμα 4.2 αναπαριστάται το διανυσματικό διάγραμμα μιας γεννήτριας ενώ στο σχήμα 4.3 το διανυσματικό διάγραμμα ενός κινητήρα.



Σχήμα 4.2 – Διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας.





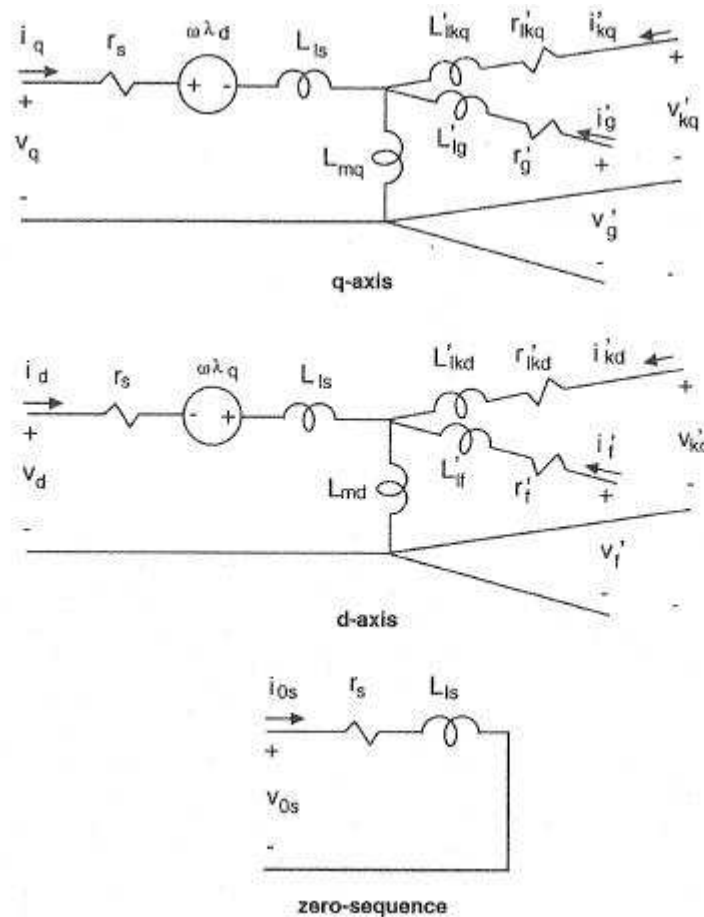
Σχήμα 4.3 – Διανυσματικό διάγραμμα κινητήρα.

### 4.3 Χαρακτηριστικά Σύγχρονης Μηχανής

Στον παρακάτω πίνακα 4.1 παραθέτονται τα χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης μηχανής και στο σχήμα 4.4 τα ισοδύναμα κυκλώματα στο επίπεδο  $qd0$ .

Σύμβολο	Περιγραφή
$R_s$	Αντίσταση στάτη
$R_f$	Αντίσταση διεγέρσεως
$R_g$	Αντίσταση διακένου
$R_{kd}$	Αντίσταση τυλίγματος απόσβεσης d-άξονα
$R_{kq}$	Αντίσταση τυλίγματος απόσβεσης q-άξονα
$L_{ls}$	Επαγωγή στάτη
$L_f$	Επαγωγή διεγέρσεως
$L_g$	Επαγωγή διακένου
$L_{kd}$	Επαγωγή τυλίγματος απόσβεσης d-άξονα
$L_{kq}$	Επαγωγή τυλίγματος απόσβεσης q-άξονα
$L_{md}$	Επαγωγή μαγνήτισης d-άξονα
$L_{mq}$	Επαγωγή μαγνήτισης q-άξονα
$L_{mf}$	Επαγωγή μαγνήτισης διεγέρσεως
$L_{mg}$	Επαγωγή μαγνήτισης διακένου
$L_{mkd}$	Επαγωγή μαγνήτισης τυλίγματος απόσβεσης d-άξονα
$L_{mkq}$	Επαγωγή μαγνήτισης τυλίγματος απόσβεσης q-άξονα

Πίνακας 4.1 – Στοιχεία Σύγχρονης Μηχανής



Σχήμα 4.4 – Ισοδύναμο κύκλωμα στο επίπεδο qd0 [3].

### 4.3.1 Προσδιορισμός παραμέτρων σύγχρονης μηχανής

Από τα φυλλάδια με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής βρίσκουμε τις τιμές των αντιδράσεων  $x_d, x'_d, x''_d, x_q, x'_q, x''_q, x_{ls}$  (ή  $x_0$ ), την τιμή της αντίστασης  $r_s$  και τις σταθερές χρόνου που προκύπτουν από τα πειράματα ανοικτοκυκλώματος και βραχυκυκλώματος  $T'_{d0}, T''_{d0}$  και  $T'_{q0}$  αντίστοιχα. Παρακάτω παρατίθενται οι σχέσεις υπολογισμού των υπόλοιπων παραμέτρων μιας σύγχρονης μηχανής[3].

$$x_{md} = x_d - x_{ls} \quad (4.2)$$

$$x_{mq} = x_q - x_{ls} \quad (4.3)$$

$$x_f = \frac{x_{md}(x'_d - x_{ls})}{x_{md} - (x'_d - x_{ls})} \quad (4.4)$$

$$x_f = \frac{x_{md}(x'_d - x_{ls})}{x_{md} - (x'_d - x_{ls})} \quad (4.5)$$

$$x_{kd} = \frac{x_f x_{md} (x_d'' - x_{ls})}{x_f x_{md} - (x_d'' - x_{ls})(x_{md} + x_f)} \quad (4.6)$$

$$x_{kq} = \frac{x_{mq} (x_q'' - x_{ls})}{x_{mq} - (x_q'' - x_{ls})} \quad (4.7)$$

$$r_f = \frac{1}{\omega_b T_{d0}'} (x_f + x_{md}) \quad (4.8)$$

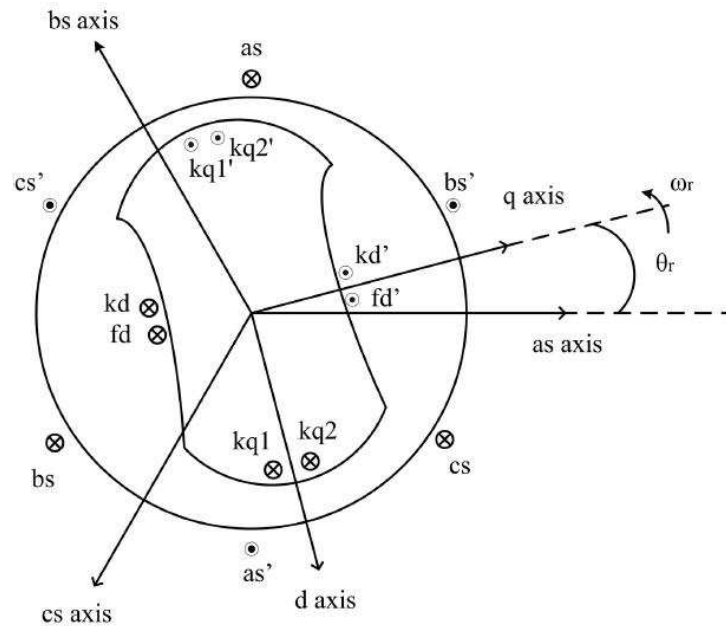
$$r_{kd} = \frac{1}{\omega_b T_{d0}''} (x_d' + x_{kd} - x_{ls}) \quad (4.9)$$

$$r_{kq} = \frac{1}{\omega_b T_{q0}''} (x_{mq} + x_{kq}) \quad (4.10)$$

όπου  $\omega_b$  βάση γωνιακής ταχύτητας

#### 4.4 Μαθηματικό Μοντέλο Σύγχρονης Μηχανής

Υπάρχουν πολλές μαθηματικές μέθοδοι οι οποίες μας βοηθούν να μελετήσουμε την συμπεριφορά της σύγχρονης μηχανής. Για το μοντέλο της εικονικής σύγχρονης μηχανής (VISMA) της προσομοίωσης, που υλοποιήσαμε με την βοήθεια του λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης (Matlab/Simulink), παίρνουμε για παραμέτρους εισόδου την τριφασική τάση του δικτύου ( $V_{abc}$ ), την τάση διέγερσης ( $E_f$ ) και την επιθυμητή μηχανική ροπή ( $T_m$ ). Η έξοδος του μοντέλου θα μας υποδεικνύει τα επιθυμητά ρεύματα λειτουργίας της μηχανής στο επίπεδο αναφοράς  $qd0$ . Στο σχήμα 4.5 φαίνεται η αναπαράσταση μιας σύγχρονης μηχανής.



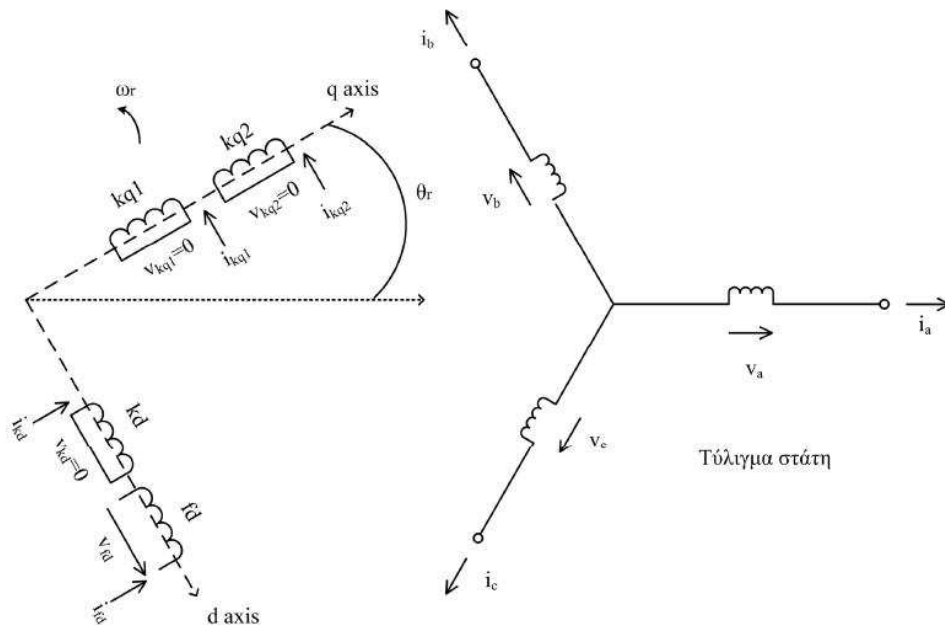
Σχήμα 4.5 – Παράσταση σύγχρονης μηχανής (έκτυπων πόλων).

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε το μοντέλο της εικονικής σύγχρονης μηχανής χρειάζεται να μεταφερθούμε από το abc επίπεδο αναφοράς στο qd0 επίπεδο αναφοράς με την χρήση του πίνακα P (σχέσεις 4.11 και 4.12), του μετασχηματισμού Park. Ο εν λόγω μετασχηματισμός μας δίνει το πλεονέκτημα ότι οι τάσεις  $V_q$  και  $V_d$  είναι ανεξάρτητες από τις μεταβολές του χρόνου, δηλαδή δεν ακολουθούν την ημιτονοειδή μορφή του επιπέδου αναφοράς abc. Επιπρόσθετα, στην ιδανική σύγχρονη μηχανή τα τυλίγματα του δρομέα βρίσκονται ήδη προσαρμοσμένα στον άξονα d και άξονα q αντίστοιχα. Στο σχήμα 4.6 υποδεικνύεται η κυκλωματική αναπαράσταση μιας σύγχρονης μηχανής στα στρεφόμενα πεδία q-d.

$$V_{qd0} = P \cdot V_{abc} \quad (4.11)$$

$$\text{όπου } P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\text{και ο αντίστροφος } P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$



Σχήμα 4.6 – Κυκλωματική παράσταση σύγχρονης μηχανής στο επίπεδο αναφοράς qd0 .

Το μοντέλο της μηχανής υλοποιήθηκε στο ανά μονάδα σύστημα. Το ονομαστικά δεδομένα της μηχανής τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την μετατροπή των παραμέτρων στο ανά μονάδα σύστημα είναι:

- $P_b$  - Ονομαστική τιμή βάσης ενεργού ισχύος (W)
- $S_b$  - Ονομαστική τιμή βάσης φαινόμενης ισχύος (VA)
- $V_b$  - Ονομαστική τιμή τάσης (V)
- $f_n$  - Ονομαστική τιμή συχνότητας δικτύου (Hz)
- $P$  - Ζεύγη πόλων μηχανής
- $J$  - Αδράνεια σύγχρονης μηχανής ( $\text{kgm}^2$ )

Βασισμένοι στις πιο πάνω τιμές μπορούμε να υπολογίσουμε:

$$I_b = \frac{P_b}{V_b} - \text{Ρεύμα Βάσης} \quad (4.14)$$

$$X_b = \frac{V_b}{I_b} - \text{Αντίδραση Βάσης} \quad (4.15)$$

$$\omega_b = 2\pi f_n - \text{Ονομαστική τιμή γωνιακής ταχύτητας} \quad (4.16)$$

$$T_b = \frac{S_b \cdot P}{2\omega_b} - \text{Ονομαστική τιμή βάσης Ροπής} \quad (4.17)$$

$$H = \left(\frac{\omega_b}{P}\right)^2 \frac{J}{2P_b} - \text{Ανηγμένη σταθερά αδράνειας (sec)} \quad (4.18)$$

#### 4.4.1 Εξισώσεις πεπλεγμένων ροών της σύγχρονης μηχανής

Για την μοντελοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών χρησιμοποιείται ευρέως ο μετασχηματισμός Park (4.12) όπου το πλαίσιο q-d στρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα. Οι επαγωγές των τυλιγμάτων της μηχανής είναι συναρτήσεις της γωνίας του δρομέα, οπότε και της γωνιακής ταχύτητας  $\omega_r$  αρά οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων που προκύπτουν έχουν μεταβαλλόμενους συντελεστές και είναι μη γραμμικές. Με την χρήση του μετασχηματισμού Park οι επαγωγές είναι χρονικά αμετάβλητες. Ακολουθούν οι διαφορικές εξισώσεις των τάσεων θεωρώντας δύο τυλίγματα απόσβεσης ένα στον κάθε άξονα και ένα τυλίγμα διεγέρσεως.

$$V_q = r_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d \quad (4.19)$$

$$V_d = r_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q \quad (4.20)$$

$$V_0 = r_s i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (4.21)$$

$$V_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \quad (4.22)$$

$$V_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} \quad (4.23)$$

$$V_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (4.24)$$

$$V_g = r_g i_g + \frac{d\psi_g}{dt} \quad (4.25)$$

Οι τιμές των ρευμάτων ( $i_d$  και  $i_q$ ) έχουν θετικό πρόσημο αν έχουμε λειτουργία κινητήρα και αρνητικό αν έχουμε λειτουργία γεννήτριας, αναλόγως της σύμβασης που έχουμε ορίσει. Το  $i_q$  εκφράζει την ενεργή τιμή του ρεύματος ενώ το  $i_d$  την άεργο. Ακολουθώντας προκύπτουν και οι εξισώσεις για τις πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο μιας σύγχρονης μηχανής:

$$\Psi_q = L_q i_q + L_{mq} i_g + L_{mq} i_{kq} \quad (4.26)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_{kd} \quad (4.27)$$

$$\Psi_0 = L_s i_0 \quad (4.28)$$

$$\Psi_f = L_{md} i_d + L_{md} i_{kd} + L_f i_f \quad (4.29)$$

$$\Psi_{kd} = L_{md} i_d + L_{md} i_f + L_{kd} i_{kd} \quad (4.30)$$

$$\Psi_{kq} = L_{mq} i_q + L_{mq} i_g + L_{kq} i_{kq} \quad (4.31)$$

$$\Psi_g = L_{mq} i_q + L_{mq} i_{kq} + L_g i_g \quad (4.32)$$

Για να καταστρώσουμε τις ολοκληρωτικές εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών του κάθε τυλίγματος χρησιμοποιούμε τις σχέσεις 4.19-4.25 και 4.26-4.32. Οι εξισώσεις 4.33 με 4.38 αναλογούν στις κύριες πεπλεγμένες ροές που επηρεάζουν την λειτουργία μιας σύγχρονης μηχανής και θα μας βοηθήσουν να υπολογίσουμε τα ρεύματα που θα παράγει η εικονική σύγχρονη μηχανή δεδομένου των τάσεων εισόδου.

$$\Psi_q = \int \left[ \left( V_q - \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_d + \frac{r_s}{x_{ls}} (\Psi_{mq} - \Psi_q) \right) \right] dt \quad (4.33)$$

$$\Psi_d = \int \left[ \left( V_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_q + \frac{r_s}{x_{ls}} (\Psi_{md} - \Psi_d) \right) \right] dt \quad (4.34)$$

$$\Psi_0 = \omega_b \int \left[ V_0 - \frac{r_s}{x_{ls}} \Psi_0 \right] dt \quad (4.35)$$

$$\Psi_f = \int \left[ \left( E_f + \frac{x_{md}}{x_f} (\Psi_{md} - \Psi_f) \right) \right] dt \quad (4.36)$$

$$\Psi_{kq} = \frac{\omega_b r_{kq}}{x_{kq}} \int \left[ \Psi_{mq} - \Psi_{kq} \right] dt \quad (4.37)$$

$$\Psi_{kd} = \frac{\omega_b r_{kd}}{x_{kd}} \int \left[ \Psi_{md} - \Psi_{kd} \right] dt \quad (4.38)$$

Η σχέση 4.35 ( $\Psi_0$ ) κατά την υλοποίηση του μοντέλου θα αγνοηθεί καθώς επίσης  $V_0$  και  $I_0$  θα θεωρούνται μηδενικές κατά τους μετασχηματισμούς Park. Με τις πιο πάνω ολοκληρωτικές σχέσεις των πεπλεγμένων ροών υπολογίζουμε και τις πεπλεγμένες ροές μαγνήτισης (4.39 και 4.40) που αναπτύσσονται στο στρεφόμενο πεδίο q-d.

$$\Psi_{mq} = x_{MQ} \left( \frac{\Psi_q}{x_{1s}} + \frac{\Psi_{kq}}{x_{kq}} \right) \quad (4.39)$$

$$\Psi_{md} = x_{MD} \left( \frac{\Psi_d}{x_{1s}} + \frac{\Psi_{kd}}{x_{kd}} + \frac{\Psi_f}{x_f} \right) \quad (4.40)$$

όπου ,

$$(x_{MD})^{-1} = \frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x_{kd}} + \frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_{1s}} \quad (4.41)$$

$$(x_{MQ})^{-1} = \frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x_{kq}} + \frac{1}{x_{1s}} \quad (4.42)$$

#### 4.4.2 Υπολογισμός Ρευμάτων ( $i_q$ και $i_d$ )

Έχοντας τις τιμές των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο που προκύπτουν από τις ολοκληρωτικές σχέσεις 4.33 με 4.38 και τις πεπλεγμένες μαγνητικές ροές 4.39 και 4.40 μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των ρευμάτων που προκύπτουν στον κάθε πεδίο της μηχανής.

$$i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{mq}}{x_{1s}} \quad (4.43)$$

$$i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{md}}{x_{1s}} \quad (4.44)$$

$$i_{kq} = \frac{\Psi_{kq} - \Psi_{mq}}{x_{kq}} \quad (4.45)$$

$$i_{kd} = \frac{\Psi_{kd} - \Psi_{md}}{x_{kd}} \quad (4.46)$$

$$i_f = \frac{\Psi_f - \Psi_{md}}{x_f} \quad (4.47)$$

Οι τιμές των ρευμάτων στο στρεφόμενο πεδίο q-d που προκύπτουν από τις σχέσεις 4.43 και 4.44 είναι αυτές που θα οδηγηθούν στον ελεγκτή ρεύματος του αντιστροφέα. Επίσης, οι τιμές αυτές των ρευμάτων θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ( $T_e$ ) που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της γωνίας ισχύος  $\delta$ .

#### 4.4.3 Μηχανικό Μοντέλο Σύγχρονης Μηχανής

Η ηλεκτρομηχανική ροπή που δημιουργείται σε μια σύγχρονη ηλεκτρική μηχανή είναι ανάλογη της ενεργού ισχύος που έχουμε ως συνολική είσοδο στην μηχανή (4.48).

$$P_{in} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c + V_f i_f + V_g i_g \quad (4.48)$$

Μεταφέροντας την πιο πάνω σχέση στο στρεφόμενο πεδίο q-d έχουμε:

$$P_{in} = \frac{3}{2} (V_q i_q + V_d i_d) + 3V_0 i_0 + V_f i_f + V_g i_g \quad (4.49)$$

Το πεδίο της μηχανής στρέφεται με την μηχανική γωνιακή ταχύτητα. Για να υπολογίσουμε την ηλεκτρομαγνητική ισχύ, η οποία παράγεται αφαιρούμε τις απώλειες διακένου, πυρήνα και αντικαθιστώντας τις εξισώσεις των τάσεων (4.26 - 4.32) προκύπτει η σχέση 4.50 η οποία εκφράζει την ηλεκτρομηχανική ισχύ ( $W$ ) της μηχανής. Η ηλεκτρομηχανική ροπή (4.53) προκύπτει με τον συνδυασμό των σχέσεων 4.51 με 4.52. Συνεπώς, μεταφέρουμε την τιμή της ηλεκτρομηχανικής ροπής ( $Nm$ ) στο ανά μονάδα (εξίσωση 4.54) διαιρώντας με την τιμή βάσης ροπής (4.17).

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot \omega_r (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (4.50)$$

$$T_e = \frac{P_{em}}{\omega_m} \quad (4.51)$$

$$\omega_m = \frac{p}{2} \cdot \omega_b \quad (4.52)$$

Συνεπάγεται,

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2\omega_b} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (4.53)$$

και στο ανά μονάδα σύστημα

$$T_e = (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (4.54)$$

Η  $T_e$  έχει θετική τιμή όταν η εικονική σύγχρονη μηχανή θα βρίσκεται σε λειτουργία κινητήρα και αρνητική τιμή όταν βρίσκεται σε λειτουργία γεννήτριας. Αντίθετως η μηχανική ροπή ( $T_m$ ) θα είναι αρνητική σε λειτουργία κινητήρα και θετική σε λειτουργία γεννήτριας. Έτσι σε εξωτερική αλλαγή της μηχανικής ροπής θα έχουμε την μεταβολή της  $T_e$  η οποία πάντα θα γίνεται ίση με αντίθετη φορά από την  $T_m$ . Κατά την λειτουργία της σύγχρονης μηχανής έχουμε  $T_e + T_m - T_{damp}$  όπου η  $T_{damp}$  (Damping(D)) εκφράζει τις απώλειες τριβών που προκύπτουν από την περιστροφή του δρομέα και είναι πάντα σε αντίθετη φορά από την μηχανική ταχύτητα. Καταλήγουμε στην σχέση 4.55 η οποία είναι η διαφορική εξίσωση ταλάντωσης μιας σύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής όπου το πρόσημο της  $T_e$  και της  $T_m$  προκύπτει από την πιο πάνω σύμβαση.

$$T_e + T_m - T_{damp} = 2H \frac{d\left(\frac{\omega_r - \omega_e}{\omega_b}\right)}{dt} \quad (4.55)$$

και η ολοκληρωτική μορφή,

$$\left(\frac{\omega_r - \omega_e}{\omega_b}\right) = \frac{1}{2H} \int (T_e + T_m - T_{damp}) dt \quad (4.56)$$



Τέλος, η γωνία  $\delta$  εκφράζεται ως η διαφορά της γωνίας περιστροφής(  $\theta_r$  ) με της ηλεκτρικής γωνίας (  $\theta_e$  ), δηλαδή  $\delta=d(\theta_r - \theta_e)$ . Επιπλέον, η γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ ) εκφράζεται από την παράγωγο μιας γωνίας ως προς το χρόνο, έτσι βάση αυτού προκύπτει η σχέση 4.57 που μας βοηθά να υπολογίσουμε την γωνία  $\delta$  σε ακτίνια (rad).

$$\delta = \int (\omega_r - \omega_e) dt \quad (4.57)$$

#### 4.5 Υλοποίηση Εικονικής Σύγχρονης Γεννήτριας

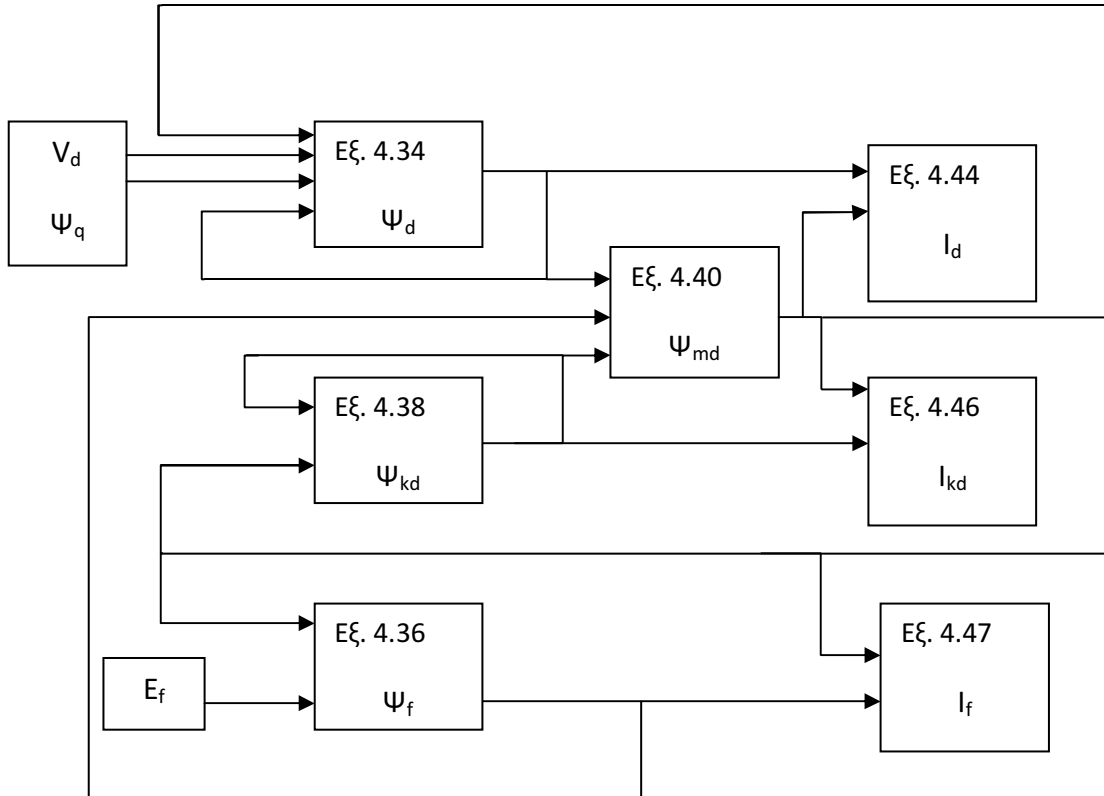
Η εικονική σύγχρονη γεννήτρια (VISMA) που υλοποιήσαμε δέχεται ως διάνυσμα εισόδου την τάση του δικτύου μετασχηματισμένη (εξίσωση 4.11) στο στρεφόμενο πεδίο q-d, την προκαθορισμένη τάση διεγέρσεως και την εξωτερική μηχανική ροπή στην οποία θέλουμε να δουλεύει η γεννήτρια μας. Σε συνέχεια με τις εξισώσεις, που δόθηκαν στην ενότητα 4.4 μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής, αναπτύχθηκε το μοντέλο του VISMA το οποίο βάση των δεδομένων που του δίνουμε μας υπολογίζει τα ρεύματα τα οποία θα παρήγαγε μια πραγματική σύγχρονη μηχανή αν βρισκόταν κάτω από τις ίδιες λειτουργικές συνθήκες.



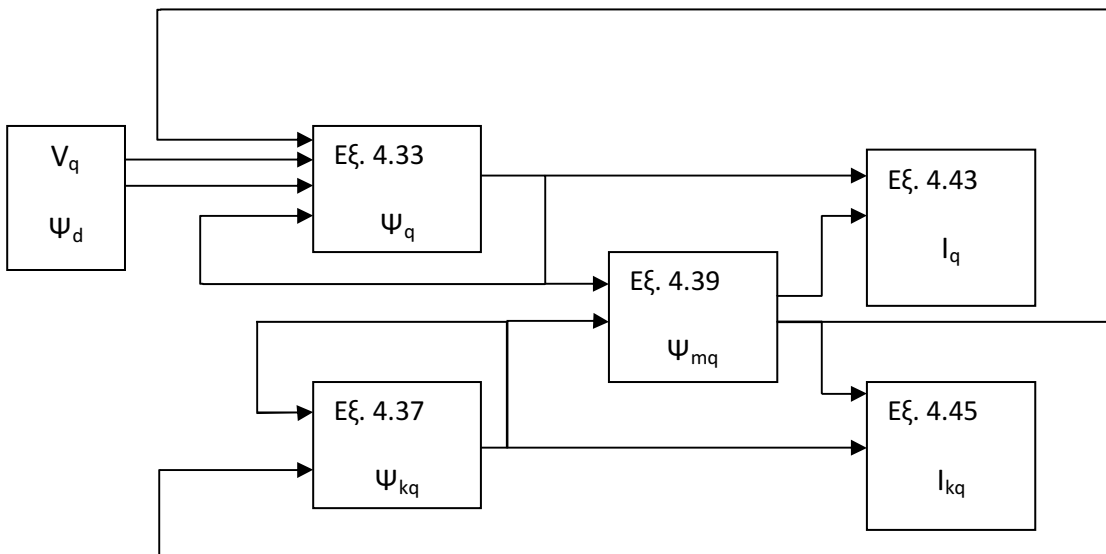
Σχήμα 4.7 – Διανύσματα εισόδου – εξόδου VISMA

Το κύκλωμα του VISMA αποτελείται από 3 υποκύκλωμα. Το 1ο υποκύκλωμα (σχήμα 4.9) περιγράφει την λειτουργία και τις σχέσεις που εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό των μεγεθών που αναπτύσσονται στον στρεφόμενο άξονα q. Μέσα από αυτό το κύκλωμα υπολογίζονται οι πεπλεγμένες ροές και τα ρεύματα που δημιουργούνται. Ομοίως, με το 1ο υποκύκλωμα, το 2ο υποκύκλωμα (σχήμα 4.8) υπολογίζει τα ίδια μεγέθη με την διαφορά ότι για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιείται και η τάση διεγέρσεως αφού βρίσκεται συμφασικά με το στρεφόμενο πεδίο d της μηχανής μας. Τέλος, το 3ο υποκύκλωμα (σχήμα 4.10) υπολογίζει την γωνία  $\delta$  και την ηλεκτρομηχανική ροπή. Τα μεγέθη που υπολογίζονται στο 1ο και 2ο μπλοκ οδηγούνται ως είσοδοι για το 3ο υποκύκλωμα. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε με την βοήθεια του λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης Matlab/Simulink. Οι παράμετροι της μηχανής που

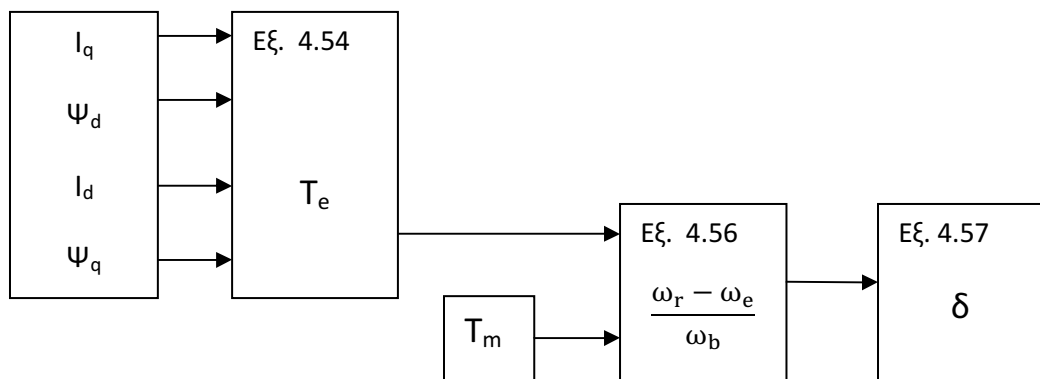
χρησιμοποιούνται στις πιο κάτω σχέσεις για την λειτουργία του μοντέλου του VISMA υπολογίζονται βάση των εξισώσεων 4.2 με 4.10, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.3.1. Στα πιο κάτω μπλοκ-διαγράμματα φαίνονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον εκάστοτε υπολογισμό κάθε μεγέθους και την σύνδεση που υπάρχει μεταξύ τους.



**Σχήμα 4.8 – Κύκλωμα στρεφόμενου άξονα d VISMA.**



**Σχήμα 4.9 – Κύκλωμα στρεφόμενου άξονα q VISMA.**



Σχήμα 4.10 – Κύκλωμα ρότορα (δρομέα) του VISMA

### 4.5.1 Αρχικοποίηση εικονικής σύγχρονης γεννήτριας

Εκτός από τις σχέσεις και τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν πιο πάνω, για την ορθή λειτουργία της γεννήτριας είναι απαραίτητη η αρχικοποίηση, δηλαδή ο καθορισμός της μόνιμης κατάστασης πριν την εφαρμογή διαταραχών και των μεταβατικών φαινομένων μέχρι να φτάσει η μηχανή σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η εικονική σύγχρονη μηχανή μας θα λειτουργεί στην ίδια συχνότητα του δικτύου και θα στρέφεται με την σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα του δικτύου η οποία είναι ίση με την ονομαστική γωνιακή ταχύτητα  $\omega_b$  (σχέση 4.16). Για την σωστό υπολογισμό των αρχικών καταστάσεων των πεπλεγμένων ρών και της γωνίας  $\delta$  πρέπει να θεωρήσουμε κάποια δεδομένα υπολογισμού τα οποία θα ισχύσουν στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ο υπολογισμός των αρχικοποιήσεων θα γίνει στο ανά μονάδα σύστημα, αφού οι παράμετροι και γενικά το συνολικό μοντέλο της μηχανής είναι προσαρμοσμένο σ' αυτό.

Αρχικά οι ανά μονάδα τιμές ενεργού και άεργου ισχύος στην μόνιμη κατάσταση,

$$P=1$$

$$Q=0$$

Έτσι προκύπτει ότι η φαινόμενη ισχύς σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι:

$$S_t = P + jQ$$

Θεωρούμαι την τερματική τάση της μηχανής ίση και συμφασική με αυτή του δικτύου στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Δεδομένου, ότι το μοντέλο της μηχανής μας είναι προσαρμοσμένο σε ένα 'άπειρο' ζυγό έχουμε  $V_t = 1 \angle 0^\circ = 1 + j0$ .

Γνωρίζοντας την σχέση φαινομένου ισχύος (εξίσωση 4.58) υπολογίζουμε το ρεύμα  $I_t$  που διαρρέει την εικονική σύγχρονη μηχανή μας.

$$S_t = V_t I_t^* \quad (4.58)$$

Ακολουθώντας με τις σχέσεις 4.59 και 4.60 υπολογίζουμε την τάση  $E_q$  η οποία αναπτύσσεται εσωτερικά της σύγχρονης μηχανής σε όμοια διεύθυνση και φορά με τον άξονα  $q$  και την αρχική γωνία δέλτα ( $\delta_0$ ), η οποία εκφράζει την γωνία μεταξύ των διανυσμάτων της τερματικής τάσης με της τάσης διεγέρσεως.

$$E_q = V_t + (r_s + j \cdot x_q) \cdot I_t \quad (4.59)$$

$$\delta_0 = \arctan \left( \frac{\text{Im}(E_q)}{\text{Re}(E_q)} \right) \quad (4.60)$$

Με το πιο πάνω δεδομένα και με την χρήση της πιο κάτω μεθοδολογίας, η οποία προκύπτει από το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας (σχήμα 4.2) υπολογίζουμε όλα τα μεγέθη τα οποία αναπτύσσονται και στα δύο στρεφόμενα πεδία  $q-d$  της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας μας.

$$E_{q0} = \text{abs}(E_q)$$

$$I_a = I_t (\cos(\delta_0) - j \sin(\delta_0))$$

$$I_{q0} = \text{real}(I_a)$$

$$I_{d0} = -\text{imag}(I_a)$$

$$E_{f0} = E_{q0} + (X_d + X_q) \cdot I_{d0}$$

και το ρεύμα διεγέρσεως,

$$I_{f0} = \frac{E_{q0}}{X_f}$$

Τέλος, με την χρήση των πιο πάνω τιμών που υπολογίσαμε, υπολογίζουμε τις αρχικές καταστάσεις για τις πεπλεγμένες ροές μαγνήτισης και για τις πεπλεγμένες ροές της μηχανής με την βοήθεια των εξισώσεων 4.26 με 4.32 προϋποθέτοντας ότι τα ρεύματα  $I_{kd}$ ,  $I_{kq}$  και  $I_g$  είναι αρχικά μηδέν κατά των προσδιορισμό των υπολοίπων αρχικοποιήσεων. Τα πρόσημα στα ρεύματα  $I_{q0}$  και  $I_{d0}$  είναι αρνητικά λόγω της σύμβασης που έχουμε κάνει στην ενότητα 4.4.1 για την λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια.

$$\Psi_{mq0} = X_{mq} (-I_{q0})$$

$$\Psi_{md0} = X_{md} (-I_{d0} + I_{f0})$$

$$\Psi_{q0} = X_{ls} (-I_{q0}) + \Psi_{mq0}$$

$$\Psi_{d0} = X_{ls} (-I_{d0}) + \Psi_{md0}$$

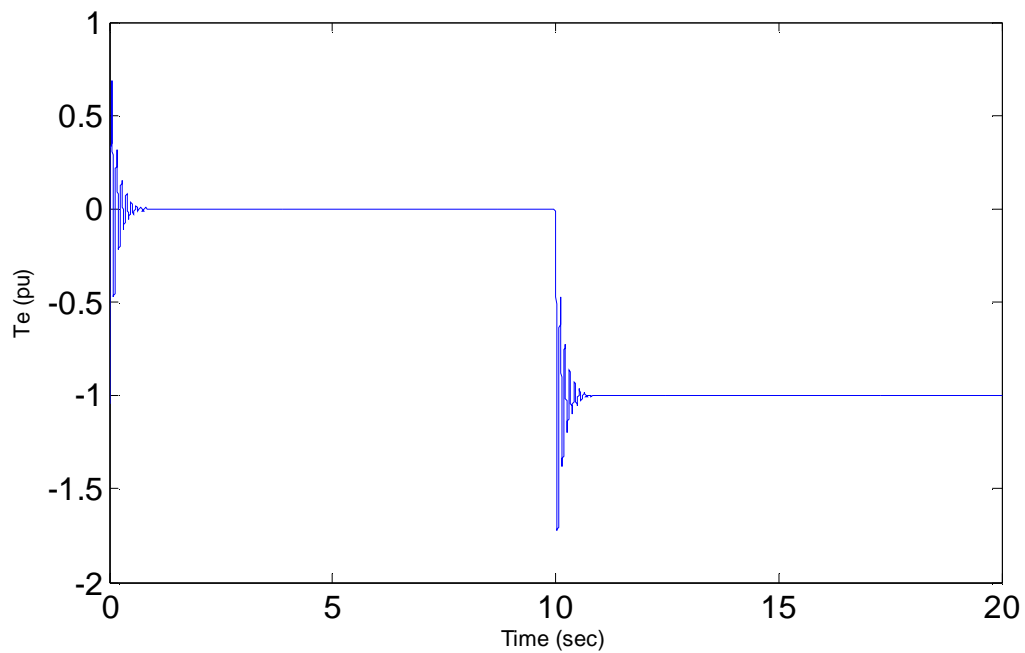
$$\Psi_{f0} = X_f (I_{f0}) + \Psi_{md0}$$

$$\Psi_{kq0} = \Psi_{mq0}$$

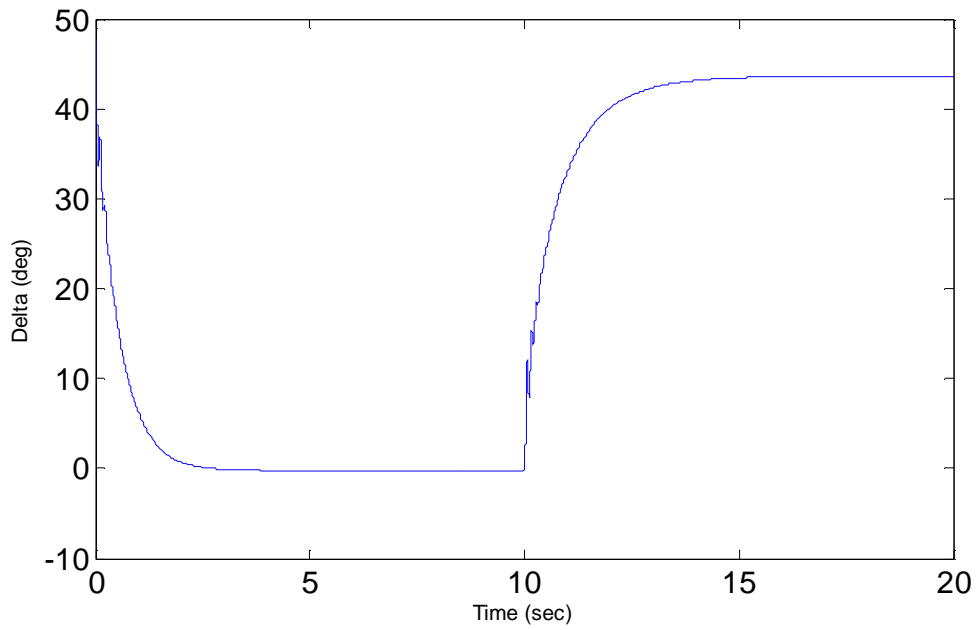
$$\Psi_{kd0} = \Psi_{md0}$$

#### 4.6 Έλεγχος Λειτουργίας Εικονικής Σύγχρονης Γεννήτριας

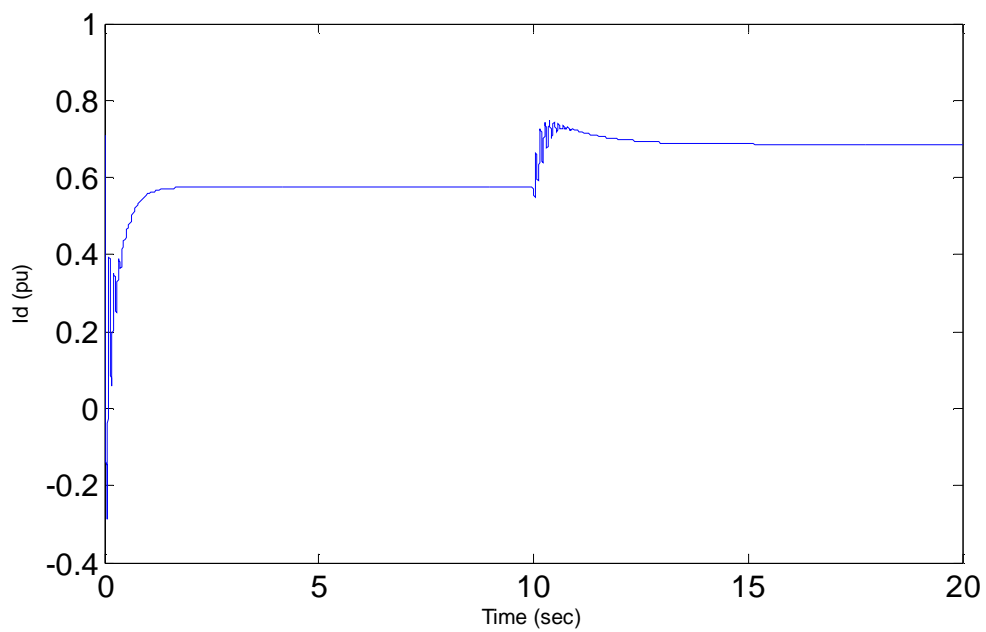
Σε αυτή την ενότητα παραθέτονται οι έλεγχοι που έγιναν για την ανάλυση της ορθής λειτουργίας του μοντέλου σύγχρονης γεννήτριας που φτιάξαμε.



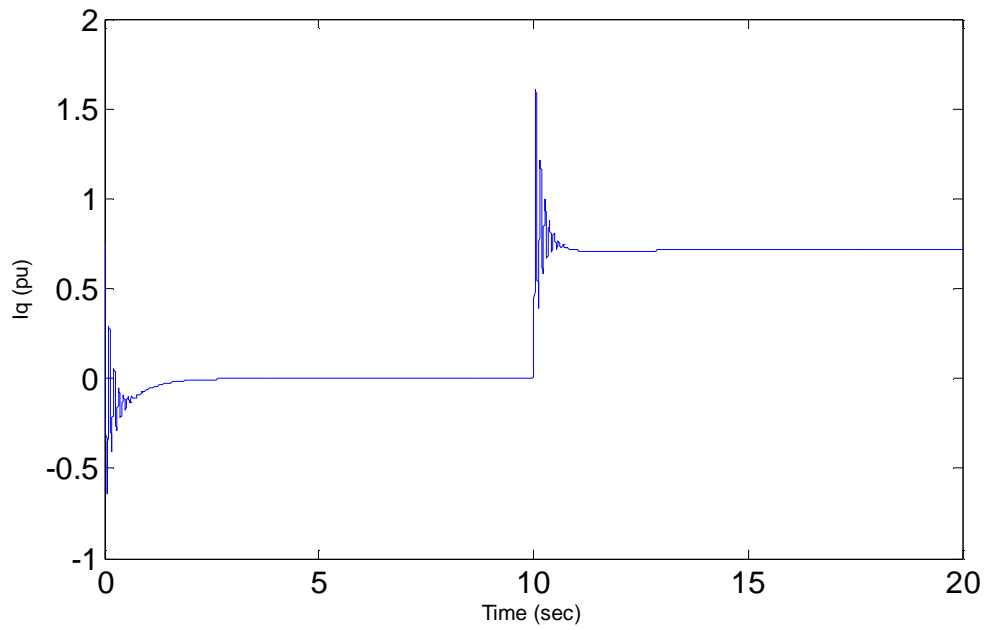
Σχήμα 4.11 – Απόκριση του  $T_e$  (αμ) κατά την μεταβολή του  $T_m$  από 0αμ σε 1αμ.



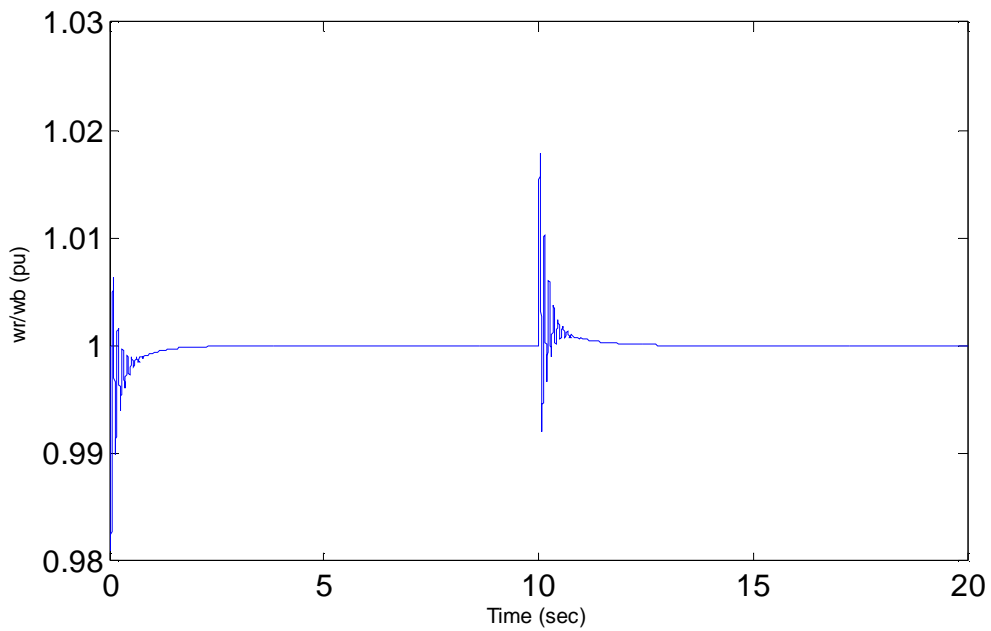
**Σχήμα 4.12 – Απόκριση της γωνίας  $\delta$  (μοίρες) κατά την του μεταβολή  $T_m$  από 0αμ σε 1αμ.**



**Σχήμα 4.13 – Απόκριση  $I_d$  (αμ) κατά την μεταβολή του  $T_m$  από 0αμ σε 1αμ.**

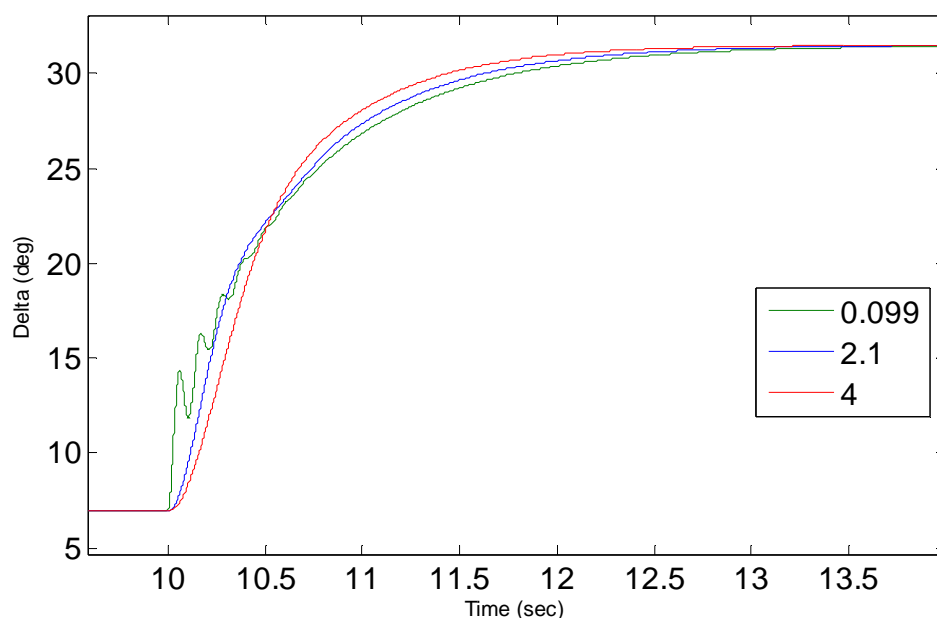


Σχήμα 4.14 – Απόκριση του  $I_q$  (αμ) κατά την μεταβολή του  $T_m$  από 0αμ σε 1αμ.



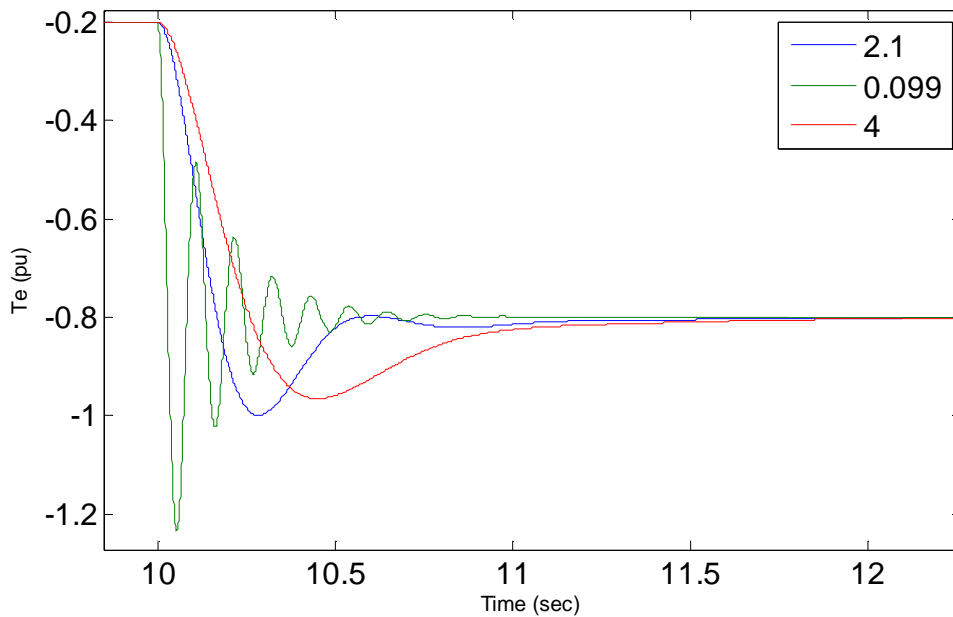
Σχήμα 4.15 – Απόκριση  $w_r/w_b$  (αμ) κατά την μεταβολή του  $T_m$  από 0αμ σε 1αμ.

Στα σχήματα 4.11 με 4.15 φαίνεται ο έλεγχος λειτουργίας του VISMA για την μέγιστη μεταβολή της μηχανικής ροπής, δηλαδή από 0αμ σε 1αμ, συναρτήσει του χρόνου. Αυτός ο έλεγχος έγινε για να διαπιστωθεί αν η μηχανή δουλεύει επιθυμητά σε όλο το εύρος της μηχανικής ροπής με εισόδους  $V_d=0\alpha\mu$ ,  $V_q=1\alpha\mu$ ,  $J=0.099\text{kgm}^2$ ,  $D=2$  και  $E_f=2.67\alpha\mu$ . Αρχικά στο σχήμα 4.11 φαίνεται η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, παρατηρούμαι ότι στα πρώτα διαστήματα της προσομοίωσης ταλαντώνεται μέχρι να πάρει την τιμή ίση και με αντίθετο πρόσημο από την μηχανική ροπή. Στο χρόνο στον οποίο γίνεται η μεταβολή βλέπουμε ότι η τιμή του  $T_e$  παίρνει τιμή  $-1\alpha\mu$  η οποία είναι και η επιθυμητή. Στο σχήμα 4.12 έχουμε την γραφική παράσταση για τον έλεγχο της γωνίας  $\delta$ , σε μηδενική μηχανική ροπή διατηρεί την τιμή 0 την οποία αναμέναμε. Ακολούθως, κατά την μέγιστη μεταβολή η γωνία αυξάνεται αλλά παραμένει μικρότερη των  $45^\circ$  άρα η μηχανή μας δεν αποσυγχρονίζεται. Τα σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζουν τις μεταβολές στα ρεύματα της μηχανής  $I_q$  (ενεργό) και  $I_d$  (άεργο). Το  $I_q$  είναι 0 κάτι το οποίο είναι επιθυμητό γιατί η εικονική γεννήτριας μας δεν πρέπει να παράγει ισχύ σε μηχανική ροπή ίση με μηδέν, ενώ στην αύξηση της  $T_m$  αποκτά την τιμή  $0.7\alpha\mu$  που στην ουσία μας υποδεικνύεται ότι η γεννήτρια μας παράγει ενεργό ισχύ. Το  $I_d$  αρχικά είναι  $0.575\alpha\mu$  που υποδηλώνει την παραγωγή άεργου ισχύος η οποία οφείλεται και την μεγάλη τάση διεγέρσεως στην οποία δουλεύει η μηχανή μας. Η αύξηση του ρεύματος αυτού κατά την μεταβολή της  $T_m$  οφείλεται στο μπλοκ λειτουργίας[3] που κατασκευάσαμε πριν την είσοδο των τάσεων για να σταθεροποιείται η λειτουργία της μηχανής και να επανέρχεται σε μόνιμη κατάσταση γρηγορότερα. Τέλος, στο σχήμα 4.15 αναπαριστάται η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας δια την τιμή της ονομαστικής τιμής βάσεως ( $\omega_r/\omega_b$ ). Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμαι ότι κατά της μεταβολές η σύγχρονη ταχύτητα επανέρχεται στην τιμή  $1\alpha\mu$  το οποίο είναι επιθυμητό γιατί η μηχανή δουλεύει με την σύγχρονη ταχύτητα.



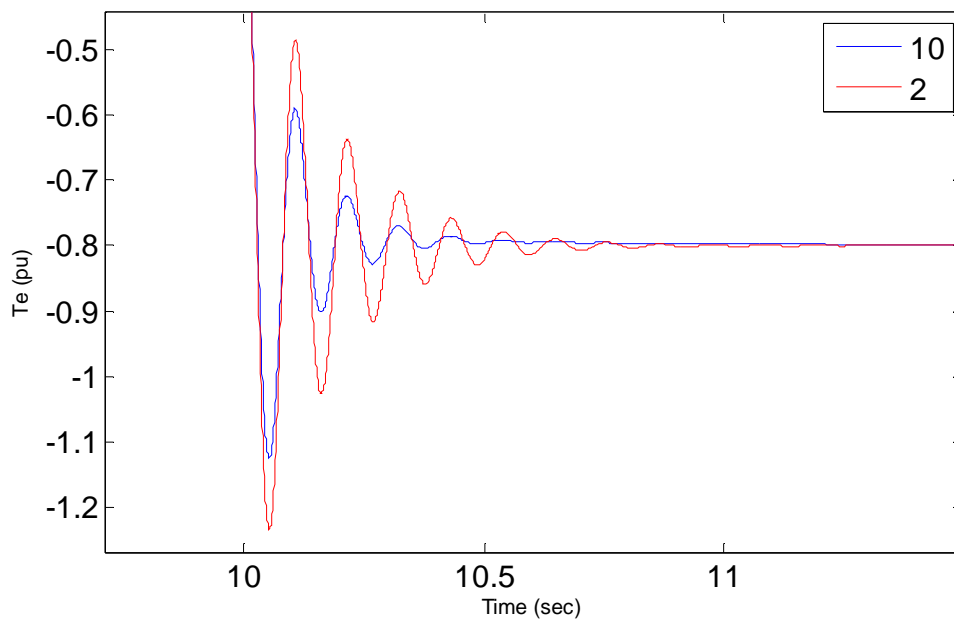
**Σχήμα 4.16 – Έλεγχος γωνίας  $\delta$  (μοίρες) για διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας ( $J$ ).**





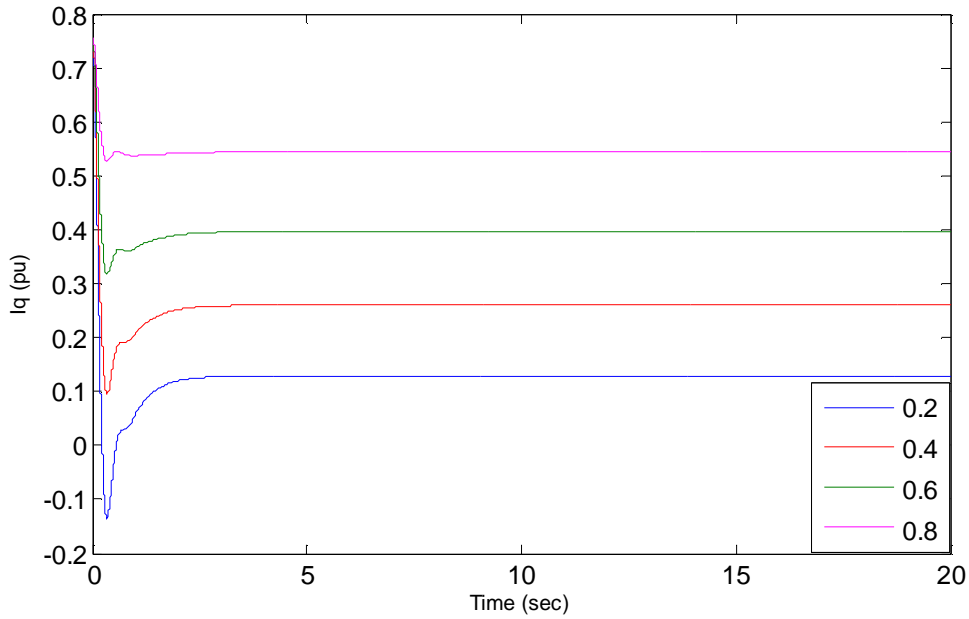
**Σχήμα 4.17 – Έλεγχος  $T_e$ (αμ) για διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας ( J ).**

Με δεδομένα εισόδου  $V_d=0$ αμ,  $V_q=1$ αμ,  $E_f=2.67$ αμ και  $D=2$  ελέγξαμε κατά πόσο η εικονική αδράνεια επηρεάζει τον ρυθμό μεταβολής της γωνίας  $\delta$  και τον ρυθμό μεταβολής με τον οποίο επιτυγχάνεται η αναμενόμενη τιμή της  $T_e$ , κατά την αύξηση της  $T_m$  από 0.2αμ σε 0.8αμ. Θεωρητικά όσο μεγαλύτερη είναι η εικονική αδράνεια αντιστέκεται στις απότομες αλλαγές μεγεθών της μηχανής χωρίς να επηρεάζει της τελικές τιμές των εκάστοτε μεγεθών. Στο σχήμα 4.16 εξετάστηκε αυτό το φαινόμενο για τις τρεις διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας( J )  $0.099\text{kgm}^2$  (πράσινο),  $2.1\text{kgm}^2$  (μπλε) και  $4\text{kgm}^2$  (κόκκινο). Παρατηρούμαι ότι στην μικρότερη τιμή εικονικής αδράνειας η μεταβολή στην γωνία έχει πολλές διακυμάνσεις, αλλά προσεγγίζει την τιμή γρηγορότερα. Επιπρόσθετα για την τιμή  $2.1\text{kgm}^2$  βλέπουμε ότι η μεταβολή είναι ομοιόμορφη με ομαλό σταθερό ρυθμό αύξησης. Εν κατακλείδι, για την μεγαλύτερη τιμή εικονικής αδράνειας παρατηρούμαι ότι η μεταβολή στην γωνία αργεί περισσότερο να ξεκινήσει και η εικονική γεννήτρια μας αντιστέκεται πιο πολύ σ' αυτή την μεταβολή για αυτό και λαμβάνει και τιμή γωνίας μεγαλύτερη από αυτή που παίρνει στην μόνιμη κατάσταση. Ομοίως στο σχήμα 4.17 φαίνεται η επίδραση της εικονικής αδράνειας στην μεταβολή της  $T_e$ . Παρατηρούμαι ότι για την τιμή  $J=0.099\text{ kgm}^2$  ( πράσινο ) η μεταβολή της τιμή ξεκινά ακαριαία στο χρόνο που επιβάλλαμε στην εικονική γεννήτρια αλλά υπάρχουν πολλές ταλαντώσεις μέχρι το σημείο που επιτυγχάνεται η τελική τιμή του  $T_e=-0.8$ αμ. Κατά την μέγιστη τιμή της εικονικής αδράνειας που θέσαμε  $4\text{kgm}^2$  (κόκκινο), συμπεραίνουμε τον τρόπο με τον οποίο η γεννήτρια προσπαθεί να αντιδράσει στην μεταβολή της εσωτερικής ηλεκτρικής ροπής της που επιβάλλαμε. Το μεταβατικό φαινόμενο είναι πιο ήπιο αλλά και συνάμα πιο αργή σε σύγκριση με τις άλλες τιμές εικονικής αδράνειας.



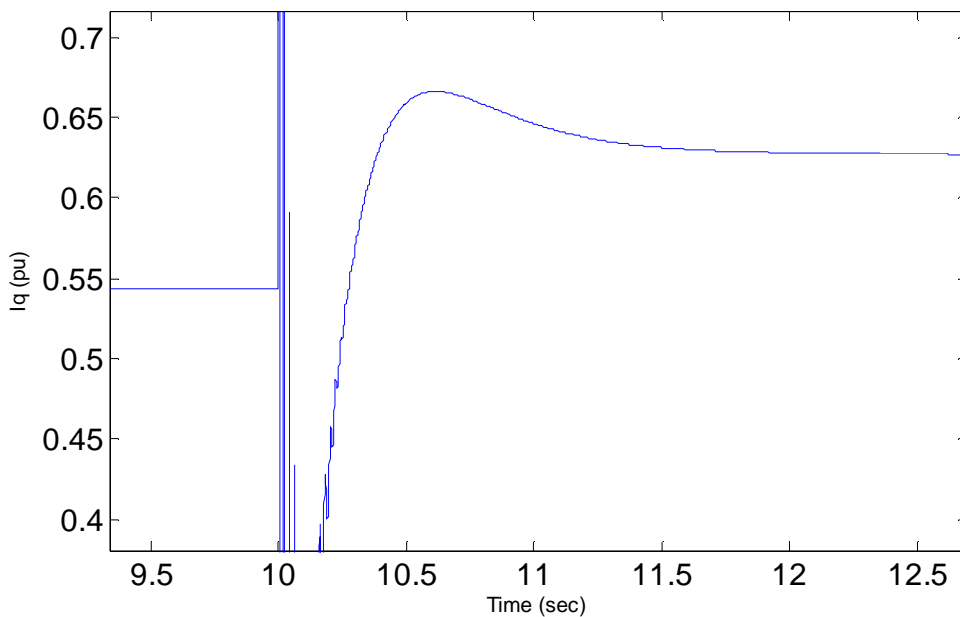
**Σχήμα 4.18 – Έλεγχος  $T_e$  για διαφορετικές τιμές Damping.**

Ο έλεγχος για δύο διαφορετικές τιμές του damping (τριβών) έγινε για να κατανοήσουμε την λειτουργία της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας. Παρατηρούμαι στο σχήμα 4.18, ότι για μεγαλύτερη τιμή damping, η εικονική σύγχρονη γεννήτρια που υλοποιήσαμε αποκτά γρηγορότερα και με μικρότερες διακυμάνσεις στο πλάτος των τιμών της  $T_e$ , μέχρι να τελειώσει το μεταβατικό φαινόμενο. Δεδομένα εισόδου σε αυτή την περίπτωση ήταν  $V_d=0$ αμ,  $V_q=1$ αμ,  $E_f=2.67$ αμ και  $J=0.099$ kgm<sup>2</sup>. Ο λόγος που επιλέχτηκε η μικρή τιμή εικονικής αδράνειας ήταν για να έχουμε μεγαλύτερες μεταβολές που θα μας βοήθησαν να κατανοήσουμε το φαινόμενο αυτό ευκολότερα.

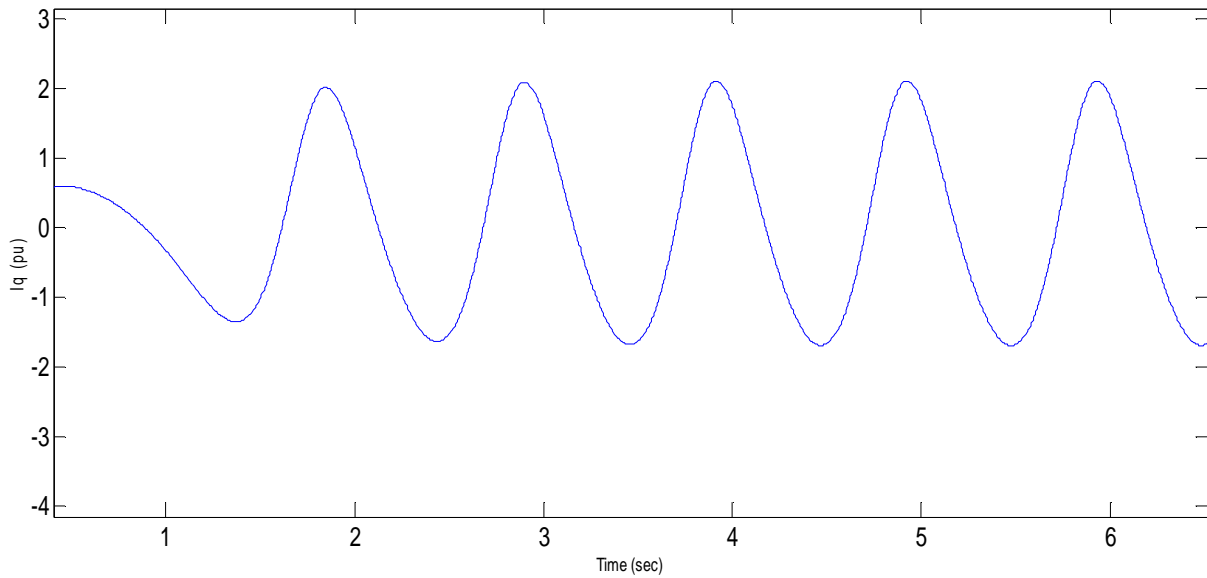


Σχήμα 4.19 – Έλεγχος ενεργού ρεύματος ( $I_q$ ) για διαφορετικές τιμές  $T_m$ .

Στο σχήμα 4.19 φαίνεται πως επηρεάζεται η τιμή του ενεργού ρεύματος ( $I_q$ ) κατά την αύξηση της μηχανικής ροπής της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας, με σταθερές τιμές εισόδου τάσεων για το στρεφόμενο πεδίο q-d  $1\mu$  και  $0\mu$  αντίστοιχα,  $E_f=2.67\mu$ ,  $J=2.1\text{kgm}^2$  και  $D=10$ . Το σχήμα 4.19 επίσης υποδεικνύει την επιθυμητή λειτουργία της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας η οποία κατά την αύξηση της μηχανικής ροπής γίνεται αναλογικά και η αύξηση του ενεργού ρεύματος.

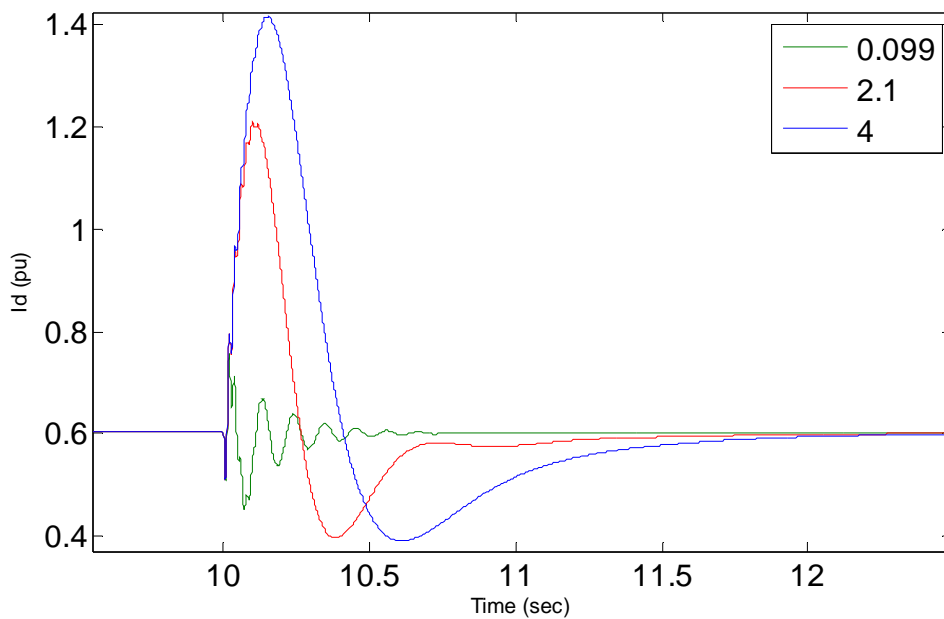


Σχήμα 4.20 - Έλεγχος ενεργού ρεύματος ( $I_q$ ) για διαφορετικές τιμές  $V_q$ .

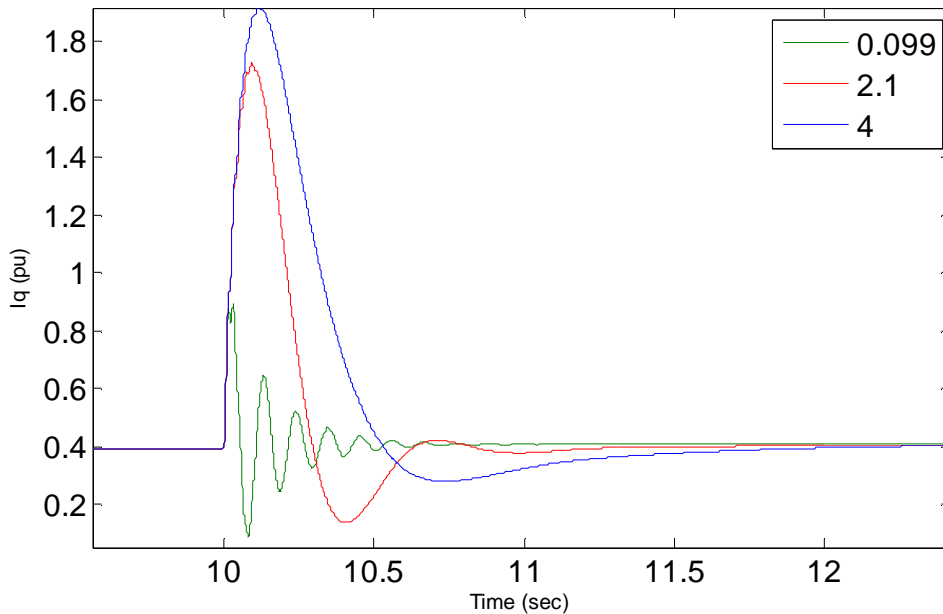


**Σχήμα 4.21 - Έλεγχος ενεργού ρεύματος ( $I_q$ ) για  $V_q=0,4$ αμ.**

Πιο πάνω έγινε ο έλεγχος του ενεργού ρεύματος για μείωση της τάση. Δεδομένα εισόδου όμοια με τον προηγούμενο έλεγχο με σταθερή μηχανική ροπή  $T_m=0,8$ αμ. Στο σχήμα 4.20 φαίνεται ότι με την μείωση της τάσης από 1αμ σε 0.8αμ δηλαδή έχουμε την αύξηση του ενεργού ρεύματος και αυτό είναι επιθυμητό για την διατήρηση του ισοζυγίου ενέργειας. Επίσης, αυτό μπορούμε να το υπολογίσουμε και από την εξίσωση  $E_f = V_t + (r_s + x_s) \cdot I_a$  (εξ. 4.61) η οποία μας δείχνει ότι αν μειωθεί η τερματική τάση πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα για σταθερή τάση διεγέρσεως. Στο σχήμα 4.21 έγινε έλεγχος για  $V_q=0.4$ αμ για να δείξουμε ότι σε μεγάλης κλίμακας πτώση τάσης η εικονική σύγχρονη γεννήτρια μας δεν μπορεί να ανταπεξέλθει και αποσυγχρονίζεται.

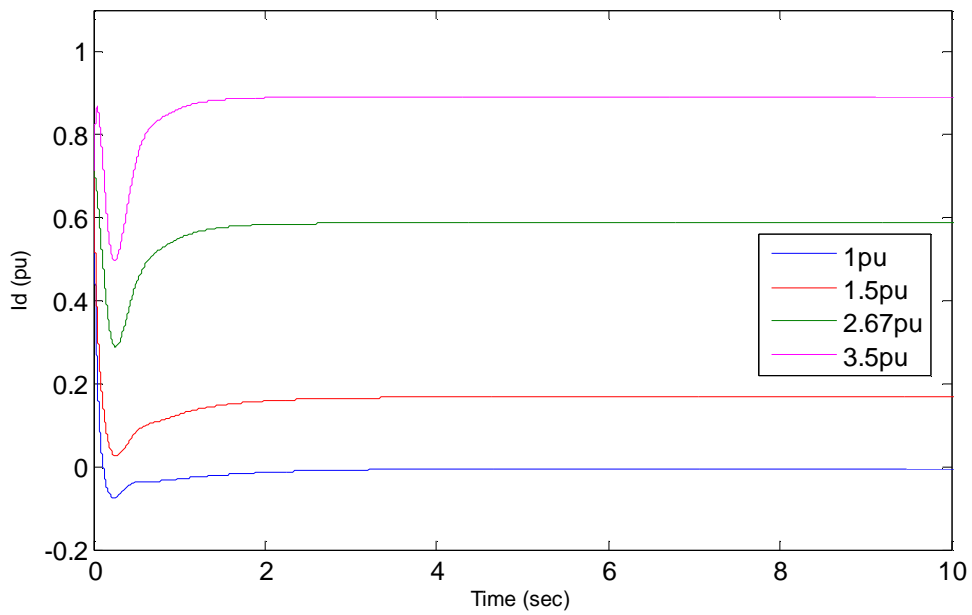


**Σχήμα 4.22 – Άεργο Ρεύμα ( $I_d$ ) κατά την πτώση συχνότητας δικτύου για διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας.**



**Σχήμα 4.23 – Ενεργό Ρεύμα ( $I_q$ ) κατά την πτώση της συχνότητας του δικτύου για διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας.**

Ο πιο πάνω έλεγχος για να αποδείξουμε ότι κατά την πτώση της συχνότητας του δικτύου από 50Hz σε 49.5Hz δεν επηρεάζονται οι τιμές των ρευμάτων που παράγει η εικονική σύγχρονη γεννήτρια. Επιπρόσθετα, παράλληλα με τον έλεγχο της συχνότητας συγκρίνεται για τρεις διαφορετικές τιμές εικονικές αδράνειας (πράσινο:  $0.099\text{kgm}^2$ , κόκκινο:  $2.1\text{kgm}^2$  και μπλε:  $4\text{kgm}^2$ ) ο ρυθμός με τον οποίο η γεννήτρια αντιδρά στις μεταβολές αυτές. Ακόμα μια φορά όπως και στα σχήματα 4.16 και 4.17 ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της εικονική αδράνειας τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίσταση που προβάλλει η εικονική σύγχρονη γεννήτρια στην αλλαγή της τιμή της. Όσο μεγαλώνει η τιμή της εικονικής αδράνειας μεγαλώνει ο χρόνος αποκατάστασης του VISMA. Τέλος παρατηρούμαι ότι η αδράνεια και συχνότητα δεν αλλάζουν την τιμή στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.



**Σχήμα 4.24 - Άεργο Ρεύμα ( $I_d$ ) κατά την μεταβολή της τάσης διεγέρσεως ( $E_f$ ).**

Στο σχήμα 4.24 παρουσιάζονται οι μεταβολές που υπεισέρχονται στην εικονική σύγχρονη γεννήτρια υπό διαφορετικές τιμές τάσεως διεγέρσεως. Η διέγερση στην οποία η εικονική σύγχρονη γεννήτρια υπολογίστηκε στα 2,67αμ βάση της μεθοδολογίας αρχικοποίησης που αναπτύχθηκε στην ενότητα 4.5.1. παρατηρούμαι ότι η γεννήτρια δουλεύει σε υποδιέγερση για τιμές μικρότερες του 1αμ.

# 5

---

## *Μοντέλο Προσομοίωσης*

### *5.1 Εισαγωγή*

Η ραγδαία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έφερε την μείωση της συνολικής αδράνειας του δικτύου και αυτό οφείλεται στην μείωση εγκατεστημένων σύγχρονων γεννητριών οι οποίες έχουν μεγάλη αδράνεια λόγω της στρεφόμενης τους μάζας. Στα πλαίσια της διπλωματικής επιλέξαμε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο σύγχρονης εικονικής μηχανής (VISMA). Η βασική λογική πίσω από την δημιουργία αυτής της τεχνικής είναι η μετατροπή συμβατικών μετατροπέων ώστε να μιμούνται την λειτουργία των σύγχρονων μηχανών. Η λειτουργία του μοντέλου του VISMA είναι να προσδίδει στο δίκτυο τα απαιτούμενα ρεύματα δημιουργώντας εικονική αδράνεια για την διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου.

#### **5.1.1 Ανασκόπηση μοντέλων σύγχρονων εικονικών μηχανών**

Μια άλλη βασική μεθοδολογία εκτός του VISMA η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια ονομάζεται *synchronverters*. Η λογική λειτουργίας του *synchronverter* βασίζεται στην λειτουργία του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας καθιστώντας τον ικανό να μιμείται την λειτουργία μιας σύγχρονης μηχανής και παρέχουν στο δίκτυο την απαιτούμενη τάση, ρεύμα και ισχύ που χρειάζεται. Η ρύθμιση της ενεργού ισχύος πραγματοποιείται ελέγχοντας την συχνότητα ( $f$ ) και τη γωνία της φάσεως ( $\theta$ ) προσεγγίζοντας την γωνία της φάσης της τάσης του δικτύου. Ο δεύτερος έλεγχος γίνεται για την ρύθμιση της άεργου ισχύος και συνάμα τον έλεγχο του μέτρου της τάσης [13,17]. Οι *synchronverters* έχουν να κάνουν με την τάση και τους ελέγχου αυτής εν συγκρίσει με την αντίστοιχη λειτουργία της εικονικής σύγχρονης μηχανής η οποία βασική της λειτουργία είναι ο έλεγχος των ρευμάτων που παράγονται. Ακόμα μία βασική διαφορά των *synchronverters* με το VISMA είναι ότι κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου των *synchronverters* δεν συμπεριλαμβάνονται τα τυλίγματα απόσβεσης στάτη και δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής. Αντί αυτών των τυλιγμάτων απόσβεσης συμπεριλαμβάνονται οι μηχανικές αποσβέσεις που επέρχονται από μια πραγματική σύγχρονη γεννήτρια. Επιπρόσθετα, οι *synchronverters* δέχονται σαν δεδομένα εισόδου τα ρεύματα και όχι την τάση γιατί ο σκοπός ελέγχου είναι η παραγωγή της απαιτούμενης τάσης για την ορθή λειτουργία με το σύστημα. Εν κατακλείδι, οι εικονικές σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν ένα πιο πλήρες μαθηματικό μοντέλο σύγχρονης μηχανής σε αντίθεση με τους *synchronverters* οι οποίοι χρησιμοποιούν πιο απλοποιημένο μοντέλο. Επιλέχθηκε η κατασκευή μοντέλου το οποίο χρησιμοποιεί την μεθοδολογία της σύγχρονης εικονικής γεννήτριας για να μιμηθεί πλήρως τα

δυναμικά, ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά μιας πραγματικής σύγχρονης μηχανής.

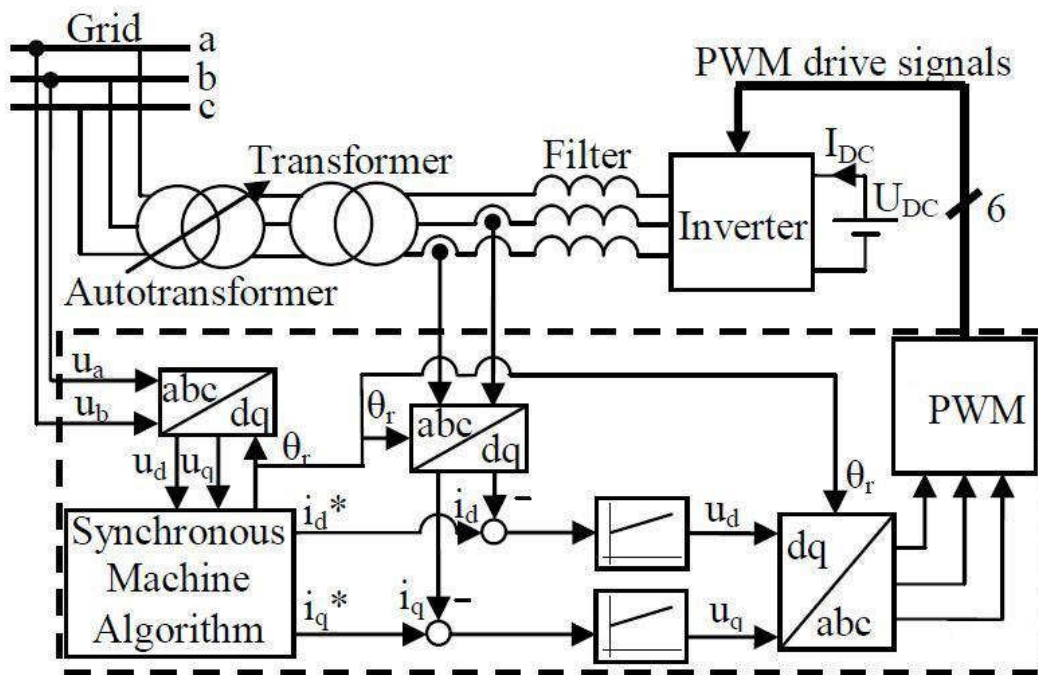
## **5.2 Παρουσίαση μοντέλου προσομοίωσης**

Τα βασικά μέρη του μοντέλου το οποίο υλοποιήσαμε είναι:

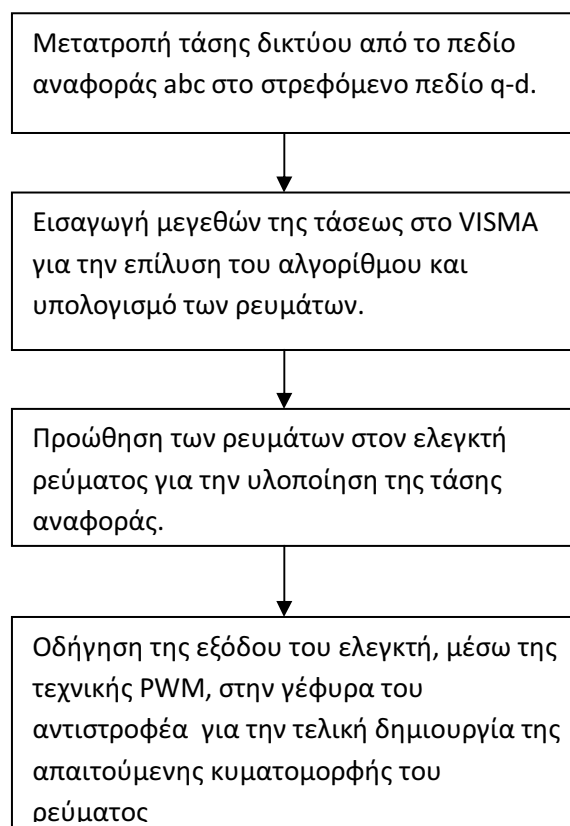
- Γέφυρα διακοπών αντιστροφέα
- RL φίλτρο
- Ελεγκτής οδήγησης PWM
- Ελεγκτή Ρεύματος
- Εικονική Σύγχρονη Γεννήτρια

Η βασική λειτουργία της πλήρους γέφυρας των διακοπών ισχύος είναι να άγει ένα διακοπικό κάθε φορά από το πάνω και ένα από τον κάτω κλάδο με σκοπό την παραγωγή της επιθυμητής κυματομορφής τάσεως ή ρεύματος. Για το μοντέλο του μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας και της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας γίνεται εκτενέστερη περιγραφή των λειτουργιών, των μαθηματικών σχέσεων και διάφοροι έλεγχοι ορθής λειτουργίας στο κεφάλαιο 3 και κεφάλαιο 4 αντίστοιχα. Το σχήμα 6.1 παρουσιάζει σε μπλοκ διάγραμμα τη δομή του VISMA. Αρχικά μετασχηματίζουμε την τάση του δικτύου στο στρεφόμενο πεδίο q-d με την χρήση του μετασχηματισμού Park. Οι τάσεις του πεδίου q-d οδηγούνται στο μοντέλο της σύγχρονης μηχανής. Το μοντέλο της σύγχρονης μηχανής, με την χρήση των σχέσεων του κεφαλαίου 4, επιλύει τις εξισώσεις και υπολογίζει τα ρεύματα στο πεδίο q-d. Τα ρεύματα αυτά οδηγούνται στον ελεγκτή ρεύματος που υλοποιήσαμε, σύμφωνα με την θεωρητική προσέγγιση του κεφαλαίου 3, για να παράγουν την τάση αναφοράς. Η τάση αναφοράς οδηγείται μέσω της τεχνικής PWM στον αντιστροφέα. Επιπρόσθετα στο σχήμα 6.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργίας του μοντέλο για τον υπολογισμό των εκάστοτε μεγεθών.





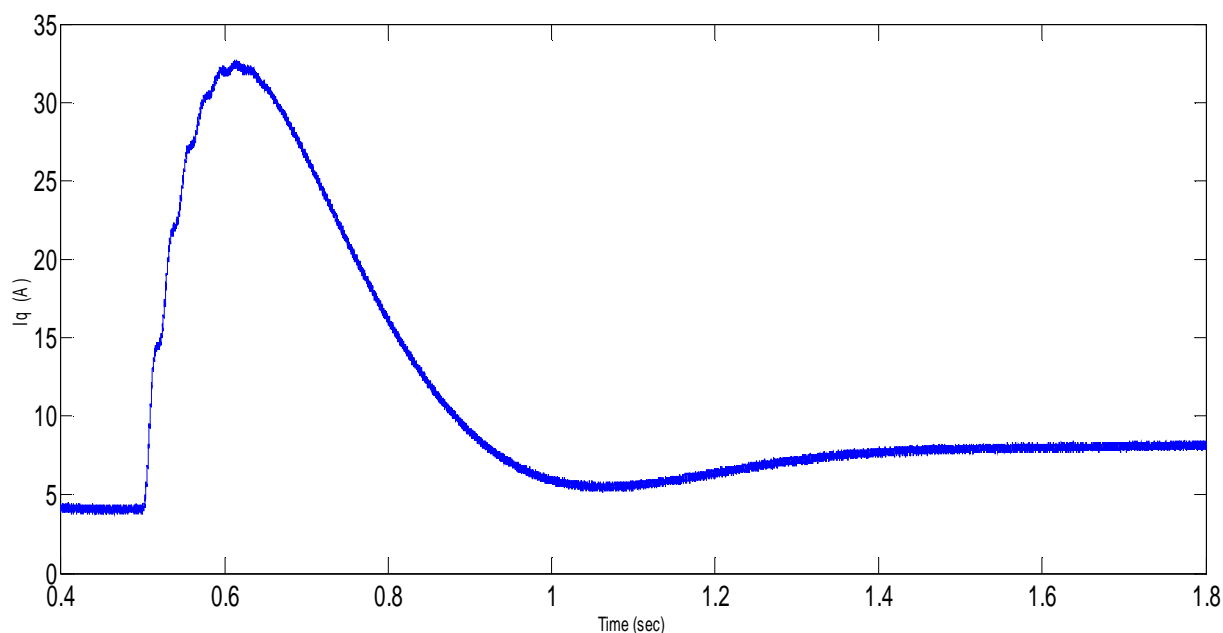
Σχήμα 6.1 – Αναπαράσταση τελικού μοντέλου [14].



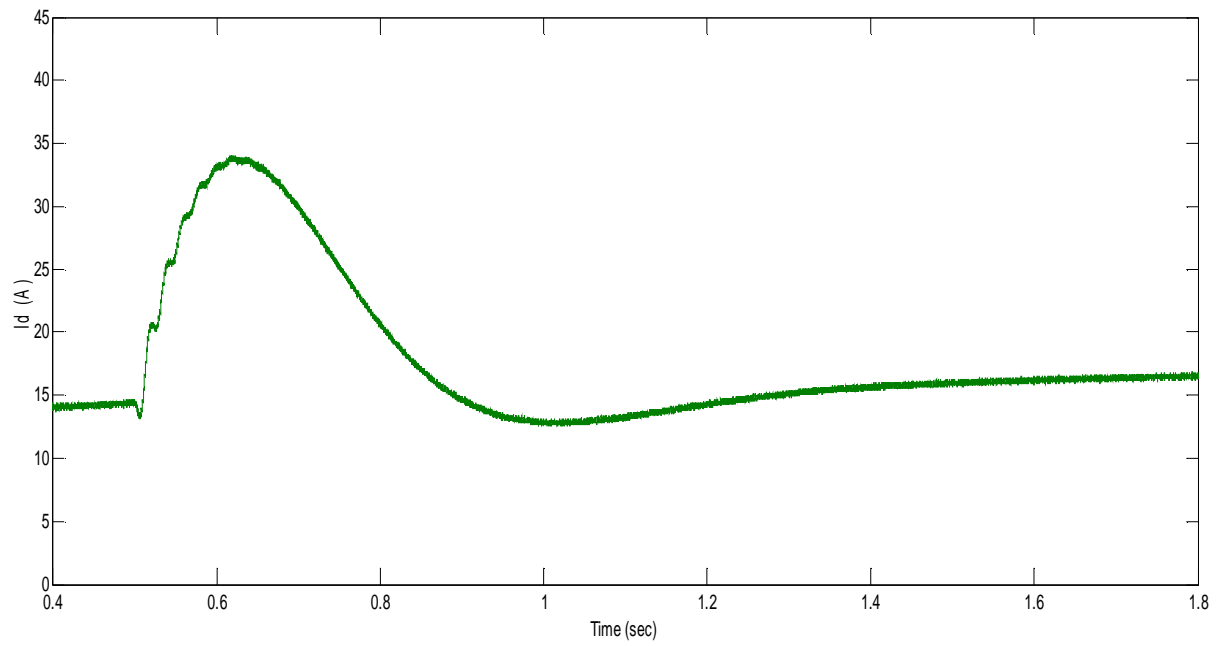
Σχήμα 6.2 – Διάγραμμα λειτουργίας του VISMA.

### 5.3 Πειράματα έλεγχου μοντέλου προσομοίωσης (VISMA)

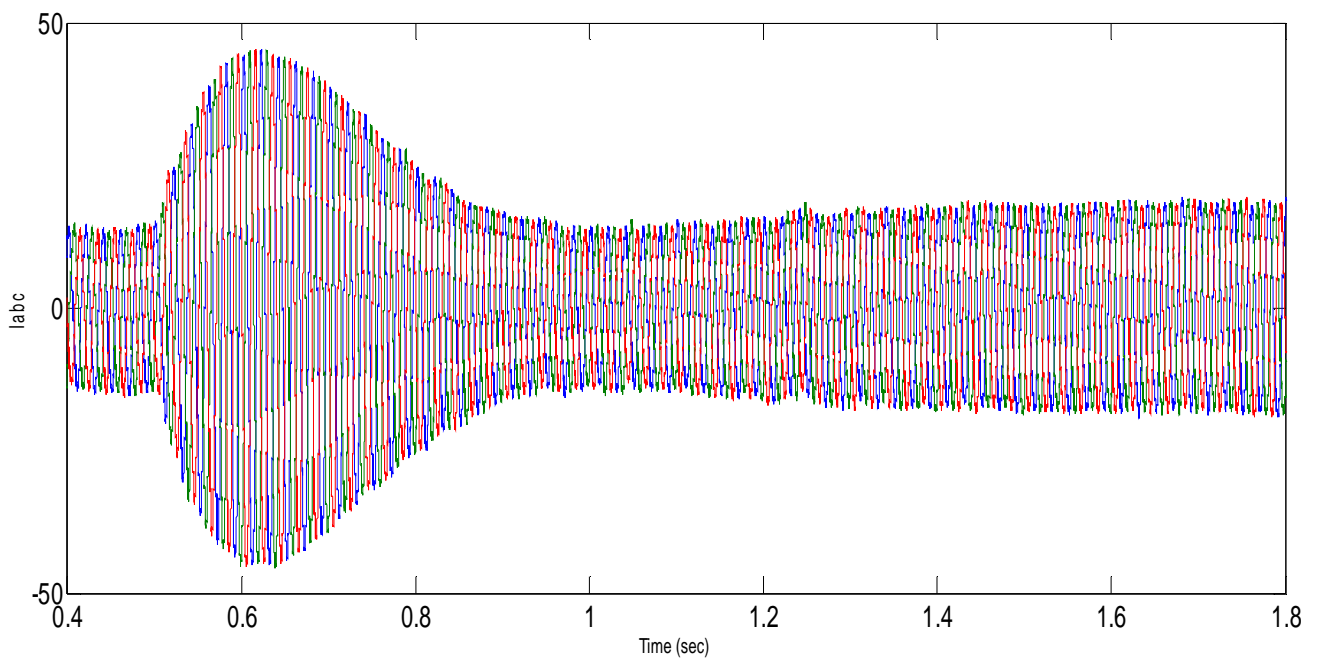
Αρχικά, παρουσιάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου κατά την πτώση της συχνότητας του δικτύου από τα 50Hz στα 49.5Hz. Την χρονική στιγμή 0,5sec επιβάλλαμε την πτώση της συχνότητας. Στα σχήματα 6.3 και 6.4 παρουσιάζονται οι μεταβολές που επιφέρει η μείωση της συχνότητας στα ρεύματα του στρεφόμενου πεδίου q-d. Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η τριφασική κυματομορφή του ρεύματος. Τα σχήματα 6.6 και 6.7 παρουσιάζουν την κυματομορφή του ρεύματος πριν και μετά την μείωση της συχνότητας αντίστοιχα.



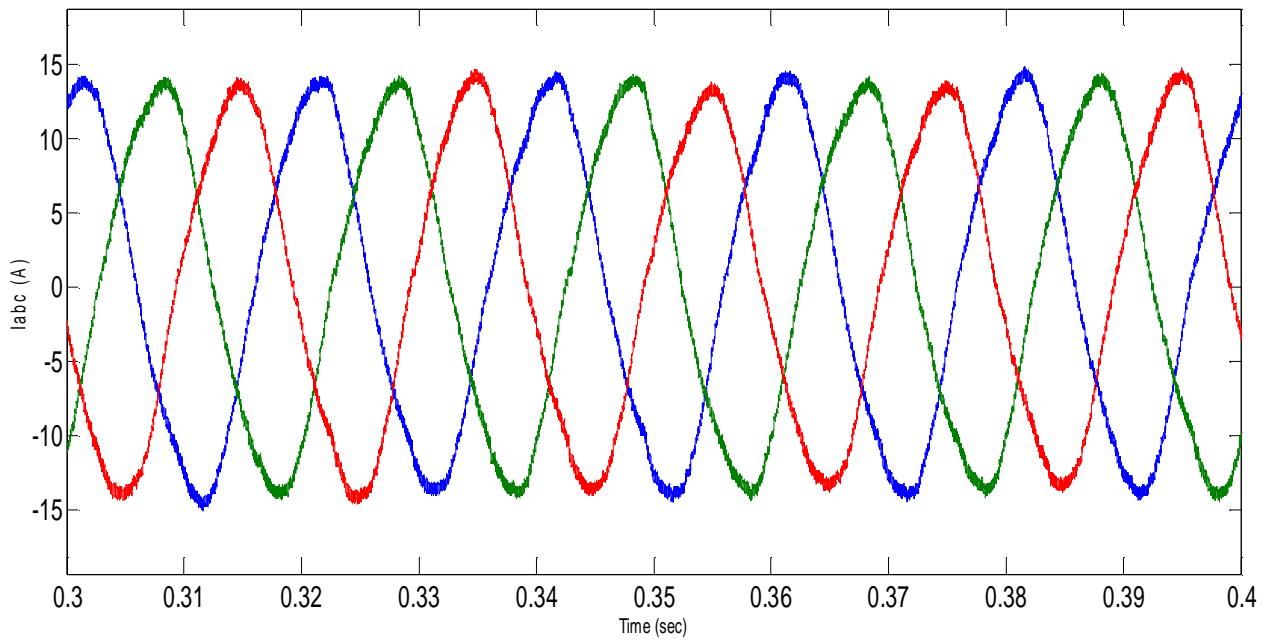
Σχήμα 6.3 – Αναπαράσταση ενεργού ρεύματος κατά την μείωση της συχνότητας  $J=2.1\text{kgm}^2$ .



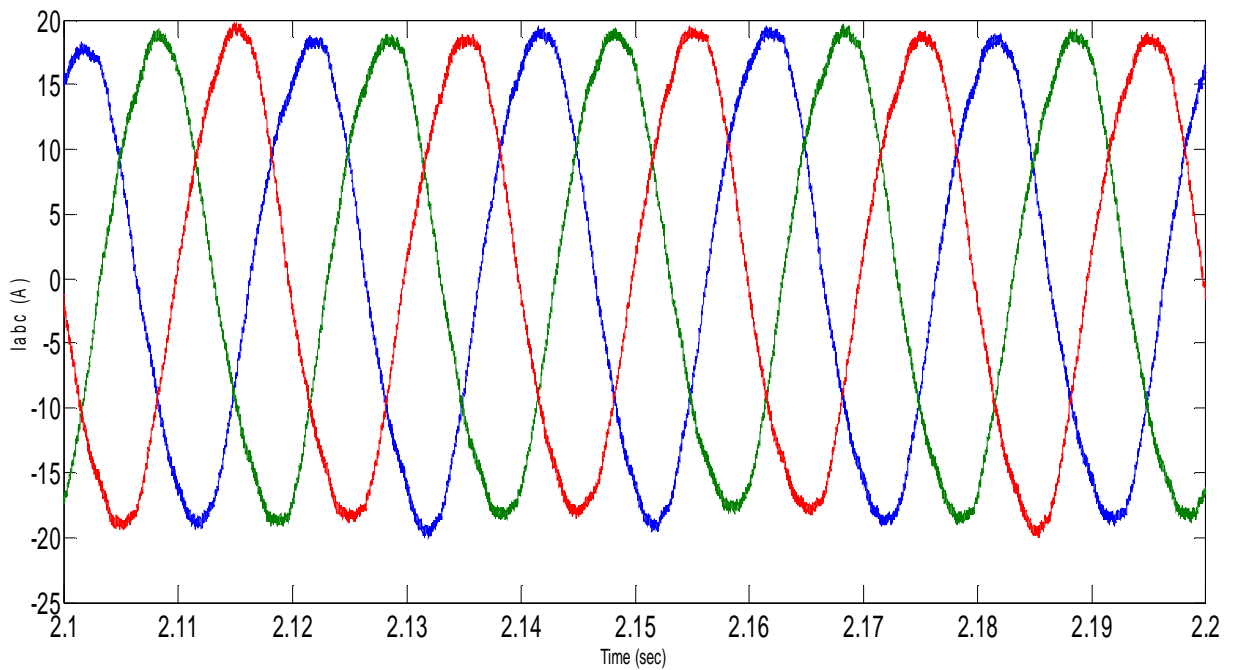
**Σχήμα 6.4 – Αναπαράσταση άεργου ρεύματος κατά την μείωση της συχνότητας  $J=2.1\text{kgm}^2$ .**



**Σχήμα 6.5 – Κυματομορφή ρεύματος στο επίπεδο abc  $J=2.1\text{kgm}^2$ .**

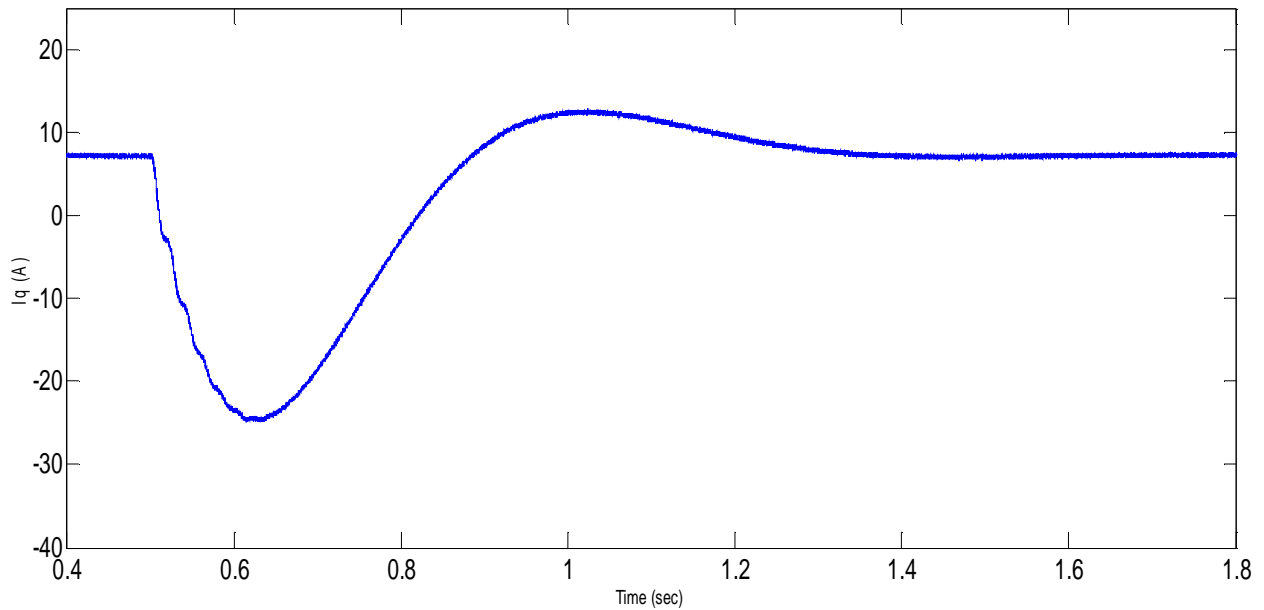


**Σχήμα 6.6 – Κυματομορφή ρεύματος πριν την πτώση της συχνότητας.**

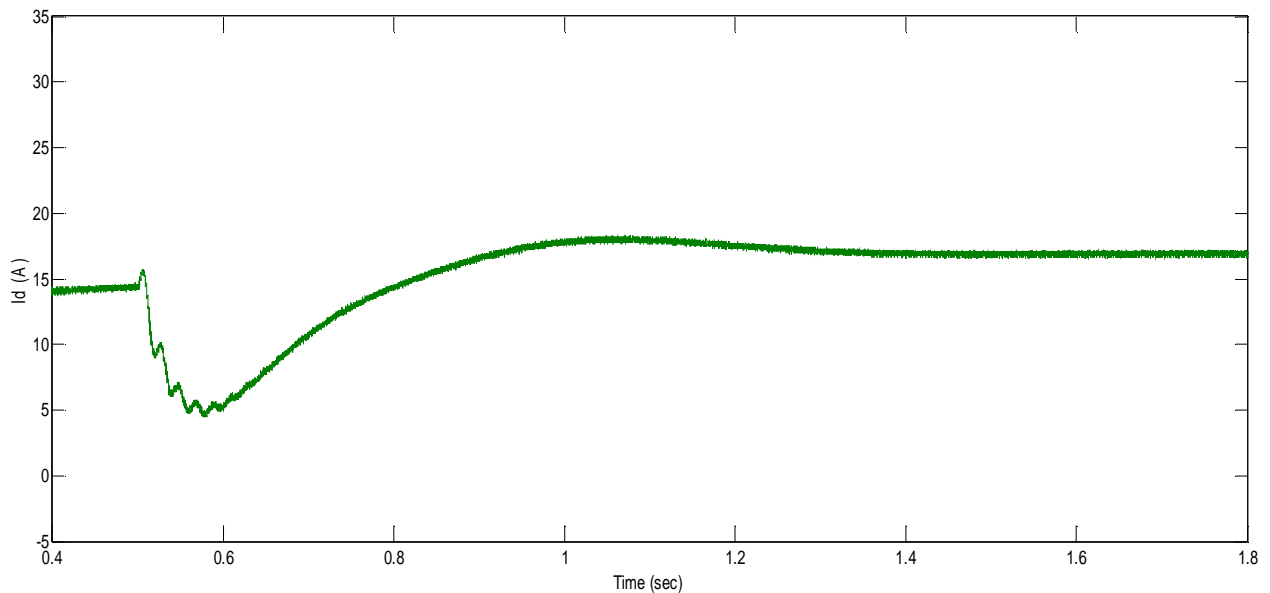


**Σχήμα 6.7 – Κυματομορφή ρεύματος μετά την πτώση της συχνότητας.**

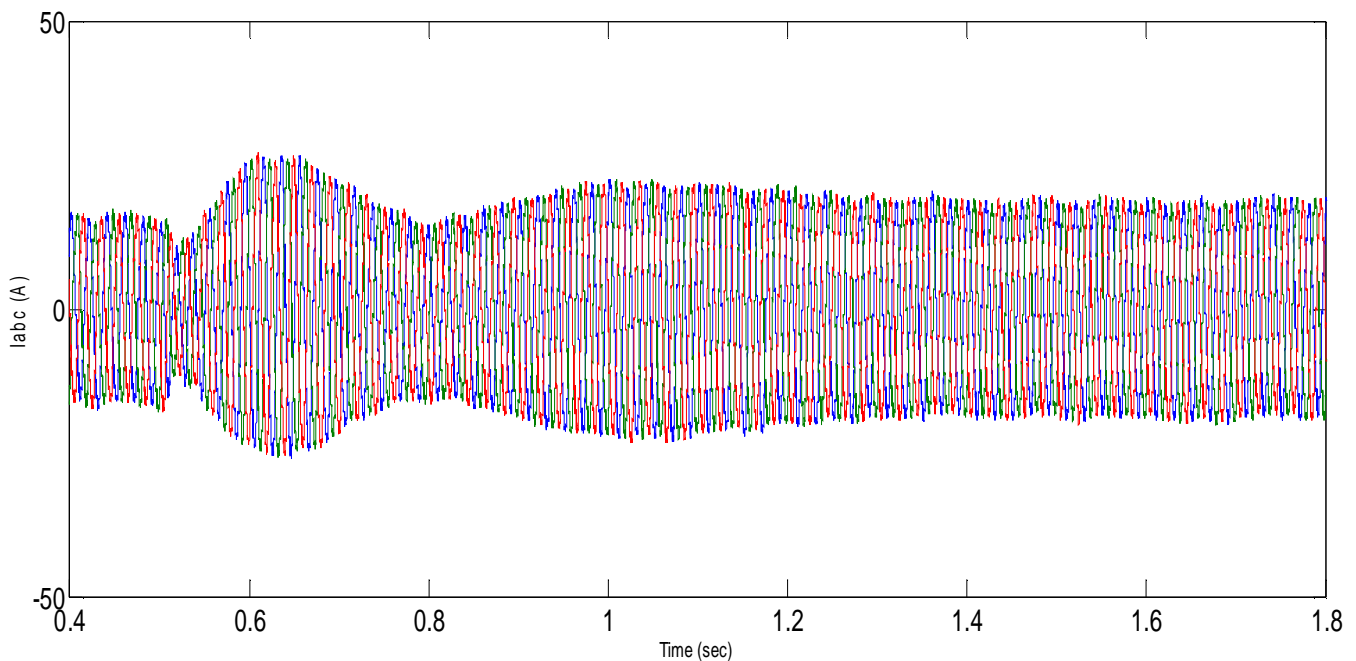
Τα σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζουν την συμπεριφορά του ρεύματος (ενεργού και άεργου αντίστοιχα) κατά την αύξηση της συχνότητας από τα 50Hz στα 50,5Hz. Συγκρίνοντας τα με τα σχήματα 6.3 και 6.4 παρατηρούμε ότι γίνεται αντίθετη μεταβολή στο μεταβατικό φαινόμενο. Το σχήμα 6.10 παρουσιάζει την τριφασική κυματομορφή του ρεύματος. Παρατηρούμε όπως και στο σχήμα 6.5 (μείωση συχνότητας) ότι το πλάτος του ρεύματος αλλάζει κατά τις μεταβολές της συχνότητας.



**Σχήμα 6.8 – Αναπαράσταση ρεύματος  $i_a$  κατά την αύξηση της συχνότητας.**

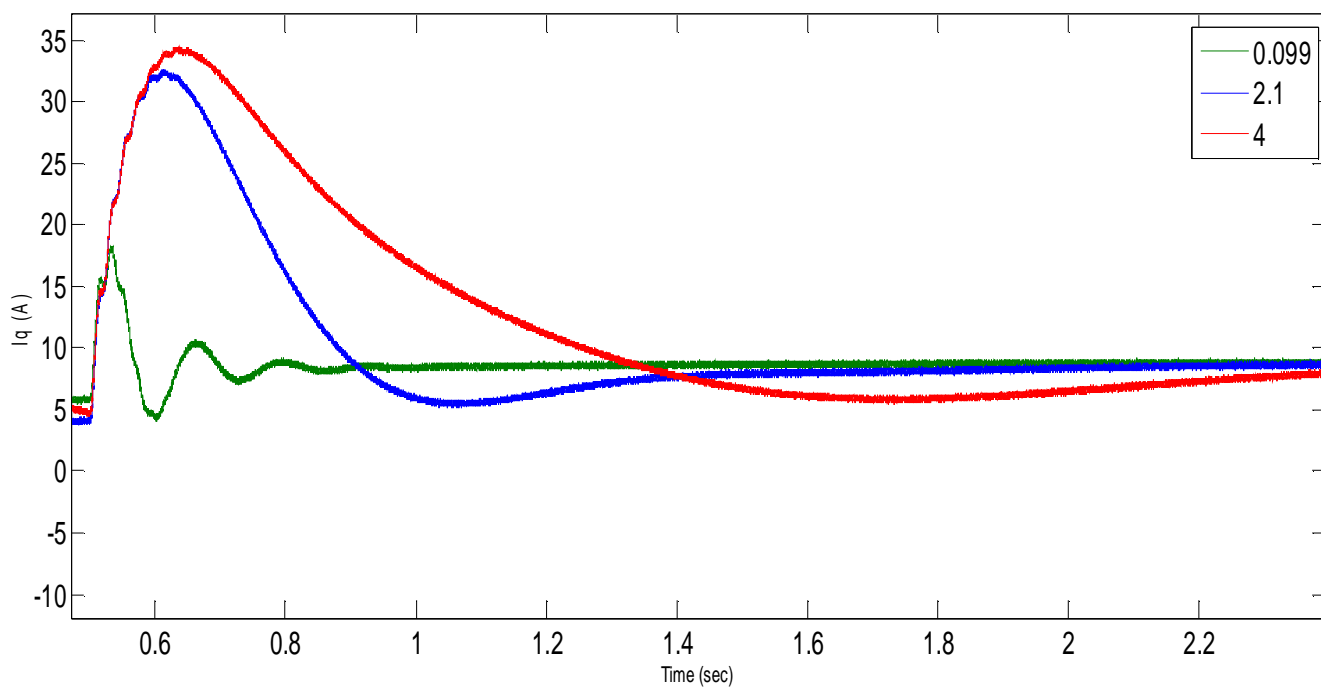


**Σχήμα 6.9 – Αναπαράσταση ρεύματος  $i_d$  κατά την αύξηση της συχνότητας.**

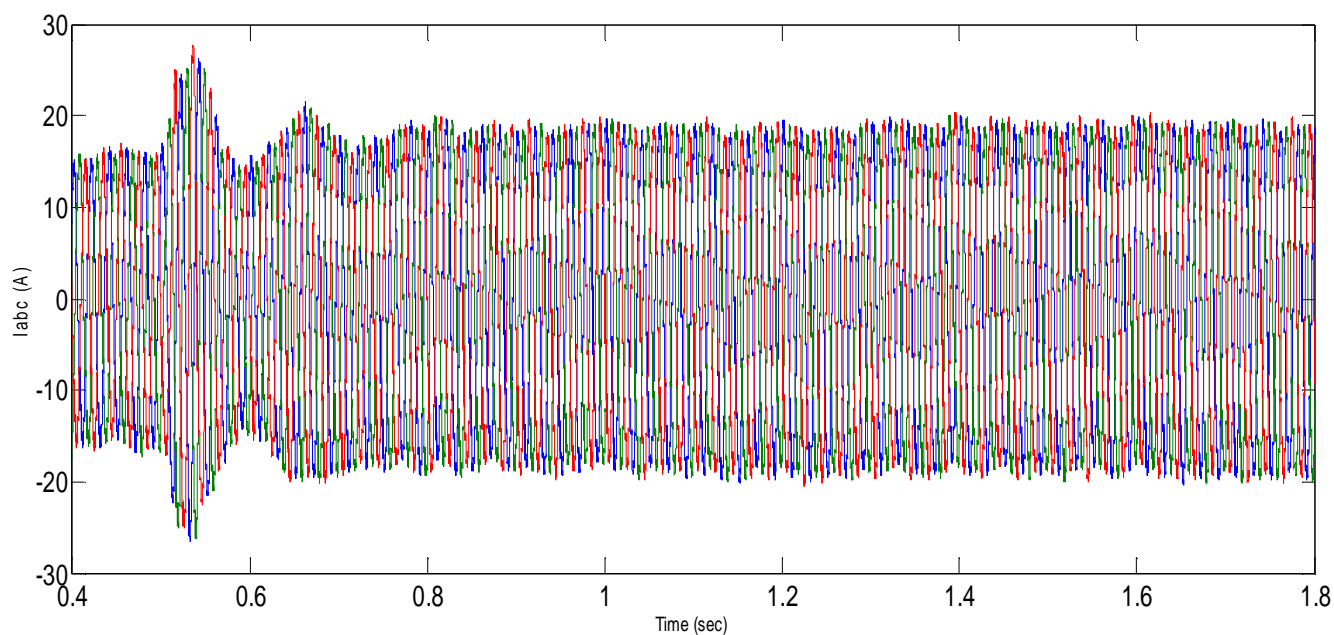


**Σχήμα 6.10 – Κυματομορφή ρεύματος στο επίπεδο abc κατά την αύξηση της συχνότητας  $J=2.1\text{kgm}^2$ .**

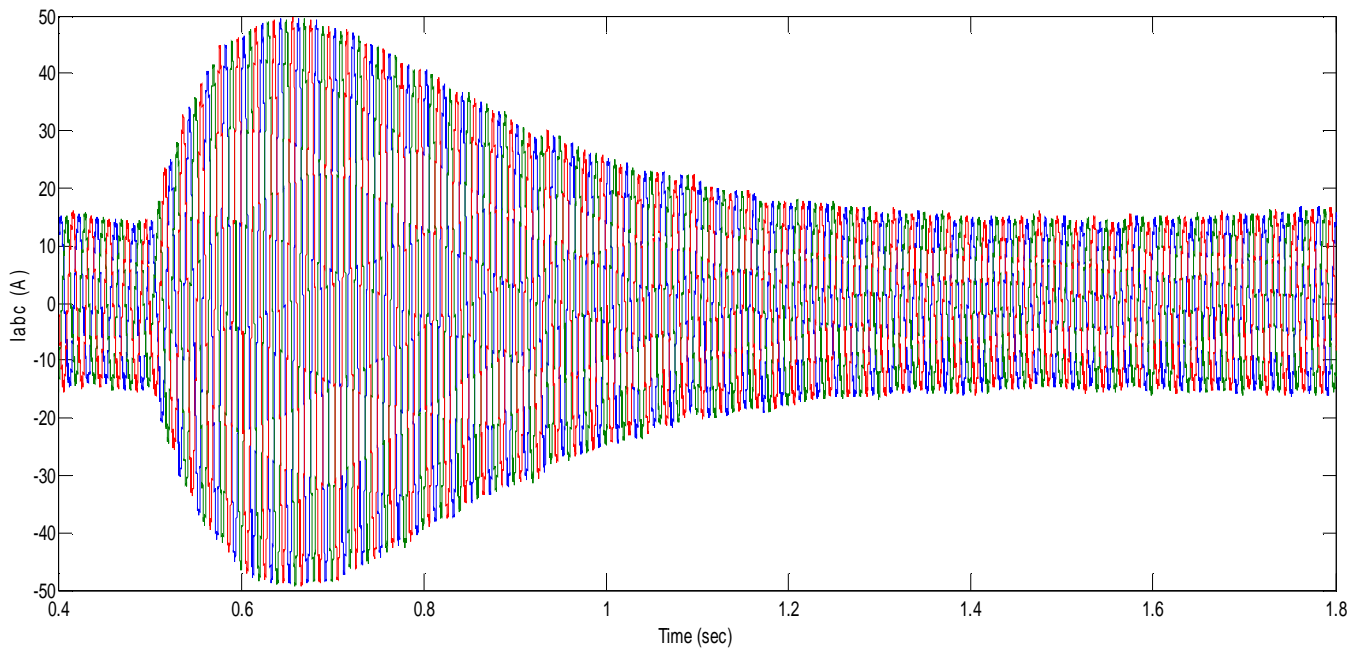
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η προσομοίωση για την μελέτη του συντελεστή εικονικής αδράνειας ( $J$ ) κατά την πτώση της συχνότητας στα 49.5Hz. Όπως αναπτύχθηκε και στην ενότητα 1.1.1 η εικονική αδράνεια χαρακτηρίζει την δυσκολία με την οποία αντιστέκεται μια σύγχρονη μηχανή στις μεταβολές των μεγεθών της. Δηλαδή όσο αυξάνεται η εικονική αδράνεια τόσο πιο αργή και ομαλή γίνεται η μεταβολή ενός μεγέθους από μια τιμή σε άλλη. Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ενεργού ρεύματος για τρεις ενδεικτικές διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας  $0.099\text{kgm}^2$  (πράσινο),  $2.1\text{kgm}^2$  (μπλε) και  $4\text{kgm}^2$  (κόκκινο). Μέσα από τα σχήματα μπορούμε να κατανοήσουμε το φαινόμενο αυτό και να εξάγουμε το συμπέρασμα για την ιδιότητα της εικονικής αδράνειας. Επίσης στα σχήματα 6.5, 6.12 και 6.13 παρουσιάζονται τα ρεύματα του μετατροπέα στο τριφασικό επίπεδο abc για διαφορετικές τιμές εικονικής αδράνειας. Το μεταβατικό φαινόμενο κατά την μεταβολή της συχνότητας διαρκεί περισσότερο σε μεγαλύτερη τιμή εικονικής αδράνειας. Παρατηρούμαι στο σχήμα 6.5 ( $J= 2.1\text{kgm}^2$ ) το μεταβατικό φαινόμενο τελειώνει λίγο μετά τα 1,1sec σε αντίθεση με το σχήμα 6.13 ( $J= 4\text{kgm}^2$ ) όπου επανερχόμαστε σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά τα 1,3sec. Αποδεικνύεται ότι το μεταβατικό φαινόμενο έχει την μικρότερη διάρκεια στο σχήμα 6.12 ( $J= 0,099\text{kgm}^2$ ) καθώς διαρκεί 0.3sec.



Σχήμα 6.11 – Έλεγχος εικονικής αδράνειας κατά την πτώση της συχνότητας.

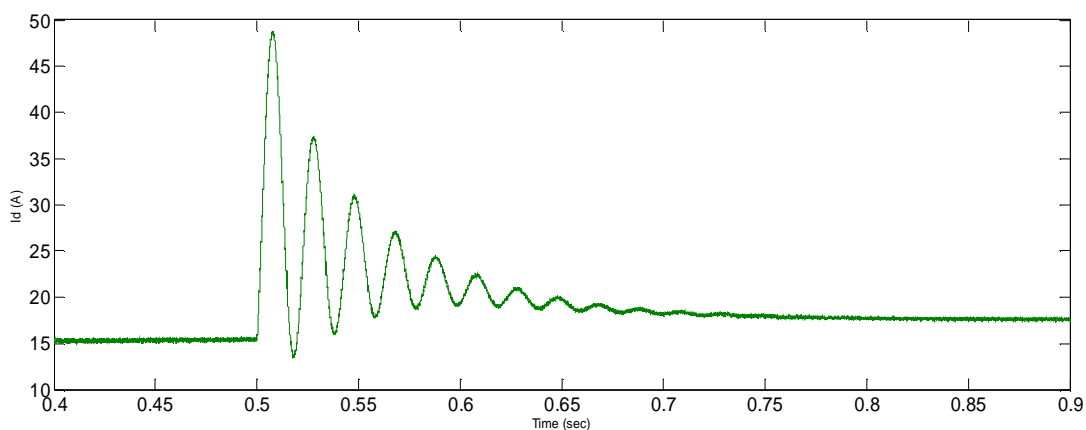


Σχήμα 6.12 – Κυματομορφή ρεύματος στο επίπεδο abc κατά την μείωση της συχνότητας  $J=0,099\text{kgm}^2$ .



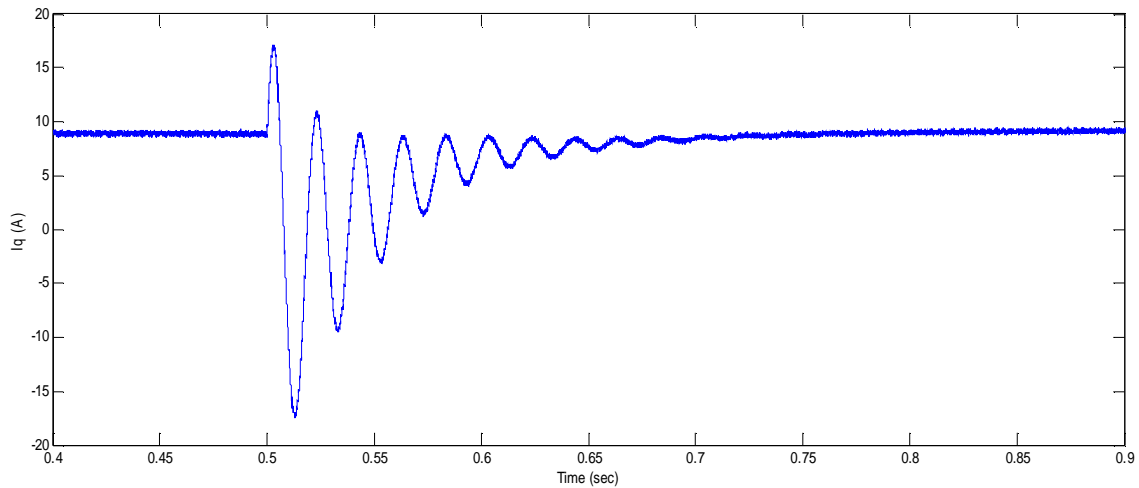
**Σχήμα 6.13 – Κυματομορφή ρεύματος στο επίπεδο abc κατά την μείωση της συχνότητας  $J=4\text{kgm}^2$ .**

Τέλος, παρουσιάζονται οι έλεγχοι που διενεργηθήκαν για να παρατηρήσουμε τι μεταβολές υπεισέρχονται στο μοντέλο μας κατά την πτώση της τάσης του δικτύου από 1αμ σε 0.9αμ. Στα σχήματα 6.14 και 6.15 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις οι οποίες δείχνουν τις μεταβολές του ρεύματος στο στρεφόμενο πεδίο q-d. Επίσης, κατά την χρονική στιγμή της πτώσης τάσης παρατηρούμε (σχήμα 6.15) ότι παρουσιάζεται κυρίως αύξηση του άεργου ρεύματος.



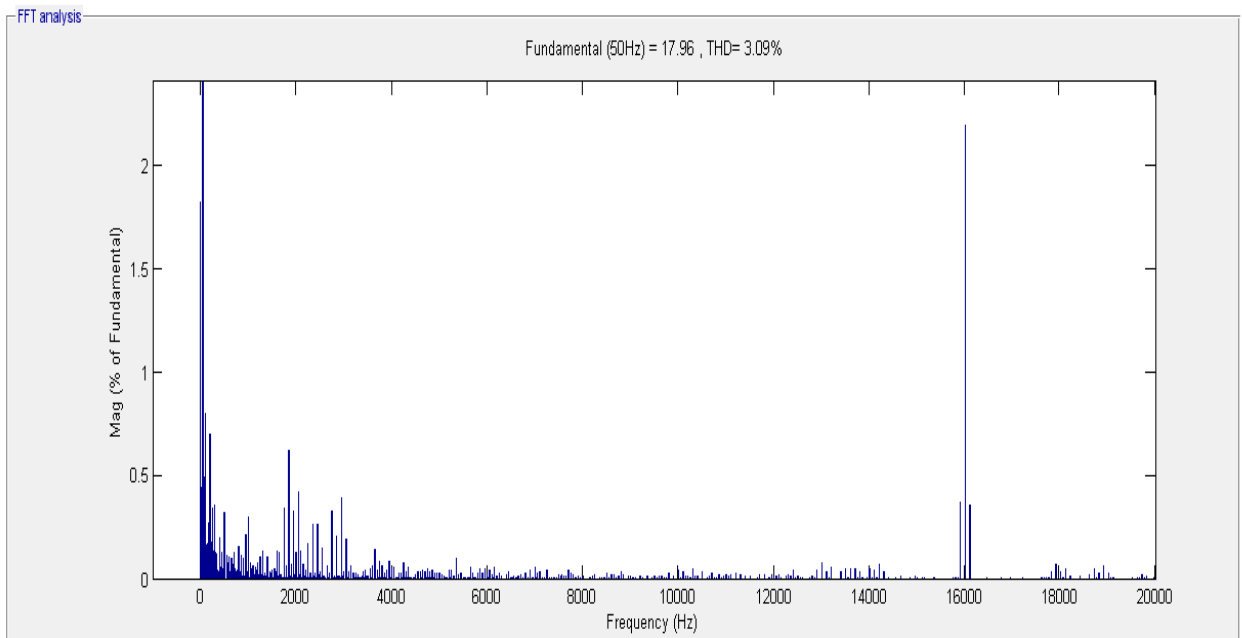
**Σχήμα 6.14 – Μεταβολή άεργου ρεύματος κατά την πτώση της τάσεως του δικτύου από 1αμ σε 0.9αμ.**





**Σχήμα 6.15 – Μεταβολή ενεργού ρεύματος κατά την πτώση της τάσεως του δικτύου από 1αμ σε 0.9αμ.**

Τέλος, παρουσιάζουμε στο σχήμα 6.16 το αρμονικό φάσμα που προκύπτει από την ανάλυση Fourier (FFT analysis). Η συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος (THD) του VISMA είναι 3.09%, το οποίο είναι επιθυμητό καθώς είναι μικρότερο του 5%, που προβλέπεται από τα διεθνή πρότυπα



**Σχήμα 6.16 – FFT analysis του ρεύματος του VISMA.**



# 6

---

## *Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις*

### *6.1 Συμπεράσματα*

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε και εξετάστηκε το μοντέλο των σύγχρονων εικονικών μηχανών (VISMA). Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε λόγω της συνεχιζόμενης αύξησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αύξηση αυτή, επιφέρει την μείωση των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών και συνάμα την μείωση της συνολικής αδράνειας του δικτύου. Η ιδέα της εικονικής σύγχρονης μηχανής στηρίζεται στην λειτουργία δύο εν σειρά ελεγκτών (τάσης και ρεύματος). Το VISMA έχει την δυνατότητα να μιμείται τα ηλεκτρικά, δυναμικά και μηχανικά χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης μηχανής.

Αρχικά, το VISMA αποτελείται από τον ελεγκτή ο οποίος στηρίζεται στο μαθηματικό μοντέλο των σύγχρονων μηχανών. Εκτενέστερη ανάλυση και πειράματα ελέγχου λειτουργίας αυτού του ελεγκτή παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Ο ελεγκτής αυτός δέχεται σαν δεδομένα εισόδου την τάση του δικτύου, την μηχανική ροπή και την τάση διεγέρσεως. Ακολούθως με την επίλυση των εξισώσεων της σύγχρονης μηχανής υπολογίζει τα ρεύματα στο στρεφόμενο επίπεδο q-d. Στη συνέχεια γίνεται η οδήγηση των ρευμάτων στον ελεγκτή ρεύματος του αντιστροφέα, ο οποίος υλοποιεί τα ρεύματα αυτά και τα τροφοδοτεί στο δίκτυο. Ανάλυση για την υλοποίηση του αντιστροφέα παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 3.

Η εικονική αδράνεια που παρέχει η εικονική σύγχρονη μηχανή επιδρά στα μεταβατικά φαινόμενα που παρουσιάζονται. Όσο μεγαλύτερη είναι η εικονική αδράνεια τόσο πιο αργά και ομαλά είναι τα μεταβατικά φαινόμενα. Μελετήσαμε το ρόλο της εικονικής αδράνειας μέσω του μοντέλου του VISMA που υλοποιήσαμε. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να δούμε πως επηρεάζει η εικονική αδράνεια τα μεταβατικά φαινόμενα κατά την αλλαγή ενός μεγέθους του δικτύου και ιδιαίτερα κατά τις αυξομειώσεις της συχνότητας. Πράγματι μέσα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 4 και 5 κατανοούμε την ιδιότητα της εικονικής αδράνειας.

Τέλος, το μοντέλο της εικονικής σύγχρονης μηχανής (VISMA) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να στηρίζει το δίκτυο μεταβατικά κατά τις μεταβολές της συχνότητας. Τα πειράματα ελέγχου συχνότητας παρουσιάζονται εκτενέστερα στις προσομοιώσεις που γίνονται στην ενότητα 5.3.

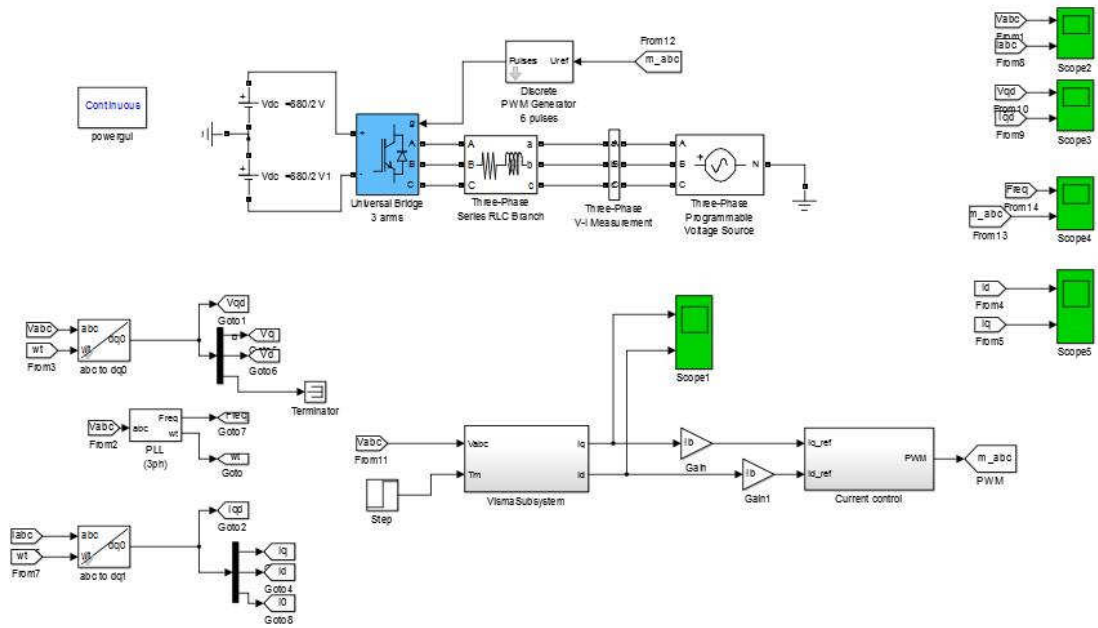
## 6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία, τα οποία είναι σημαντικό να διερευνηθούν περαιτέρω:

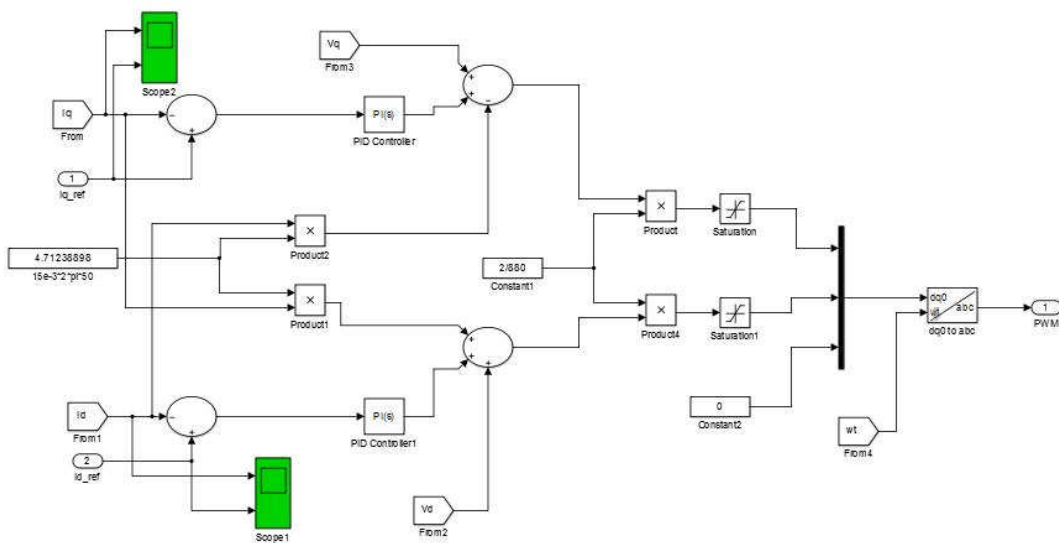
- Το μοντέλο της εικονικής σύγχρονης μηχανής που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιεί την λειτουργία της σύγχρονης μηχανής χωρίς να λαμβάνει υπόψη την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Η δυνατότητα αυτή είναι εύκολο να επεκταθεί στην παρούσα υλοποίηση καθώς επίσης και η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης μέσα από τις καμπύλες στατισμού.
- Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την ανάπτυξη και αξιολόγηση πολύπλοκων αλγορίθμων είναι η Hardware in the loop. Με αυτό τον τρόπο ο αλγόριθμος μπορεί να αξιολογηθεί σε συνθήκες πολύ κοντά στις πραγματικές (real time).
- Η συνεισφορά της εικονικής αδράνειας στην ευστάθεια του δικτύου έχει προβληματίσει τα τελευταία χρόνια τόσο την επιστημονική κοινότητα όσο και τους διαχειριστές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (TSO's). Η λεπτομερής διερεύνηση του ζητήματος σε μια πληθώρα πραγματικών εφαρμογών παραμένει ανοιχτό ερευνητικό ζήτημα.
- Η πειραματική μελέτη και άλλων μοντέλων εικονικών σύγχρονων μηχανών (synchronverters και VSG). Με την μελέτη των μοντέλων αυτών θα μπορούμε να αποφανθούμε αν η χρήση ενός πιο απλοποιημένου μοντέλου εικονικής σύγχρονης μηχανής θα μπορεί να στηρίζει τους μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας που είναι διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο.

# 7

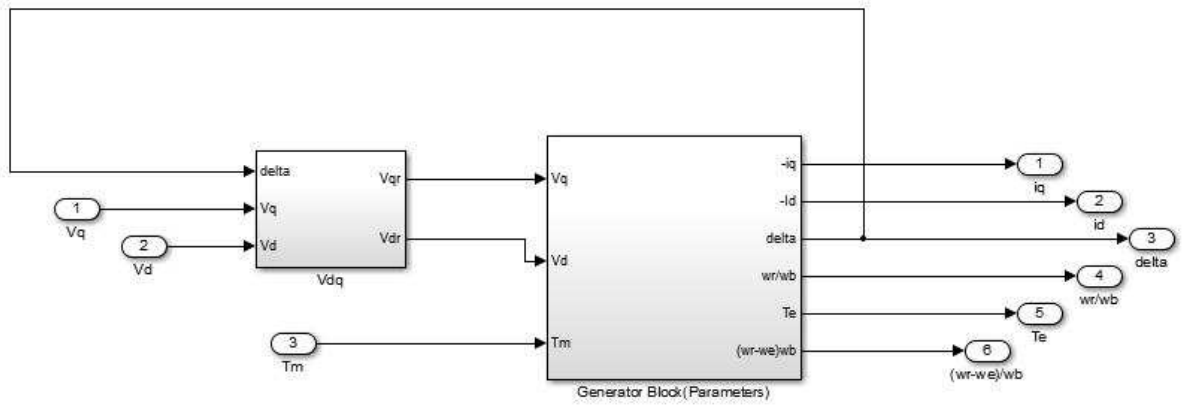
## Παράρτηματα



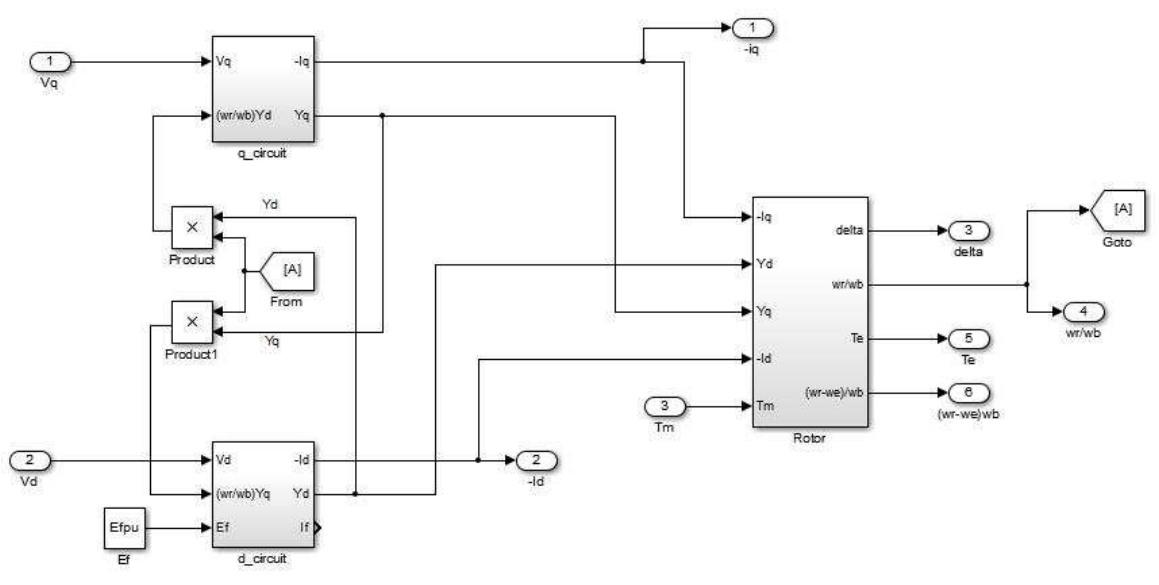
Σχήμα 7.1 – Μοντέλο Προσομοίωσης VISM.



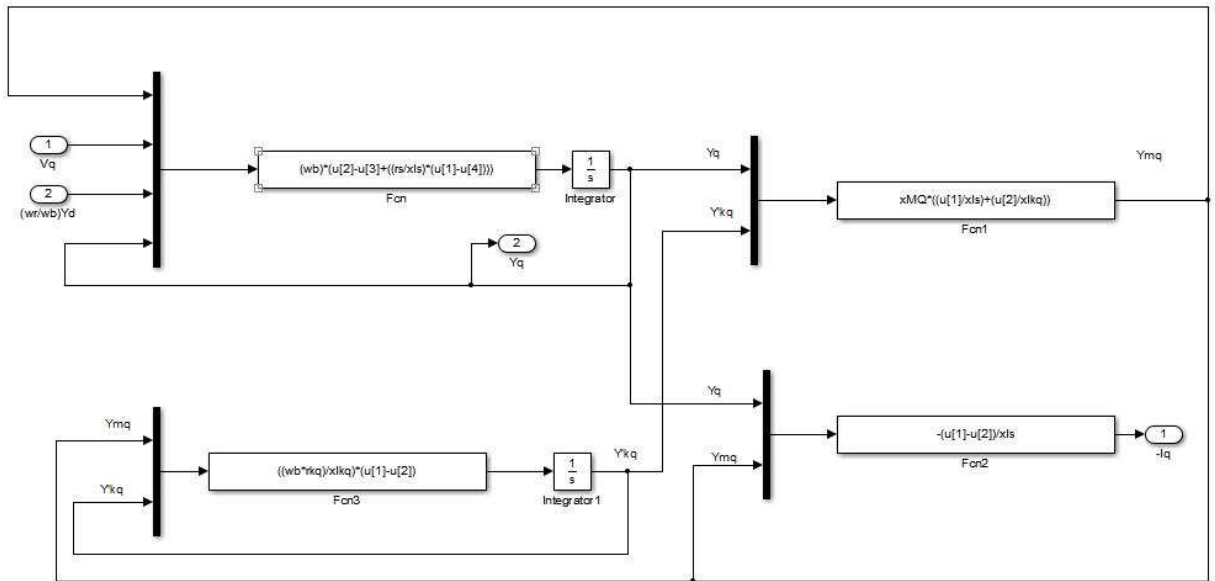
Σχήμα 7.2 – Εσωτερική δομή ελεγκτή ρεύματος.



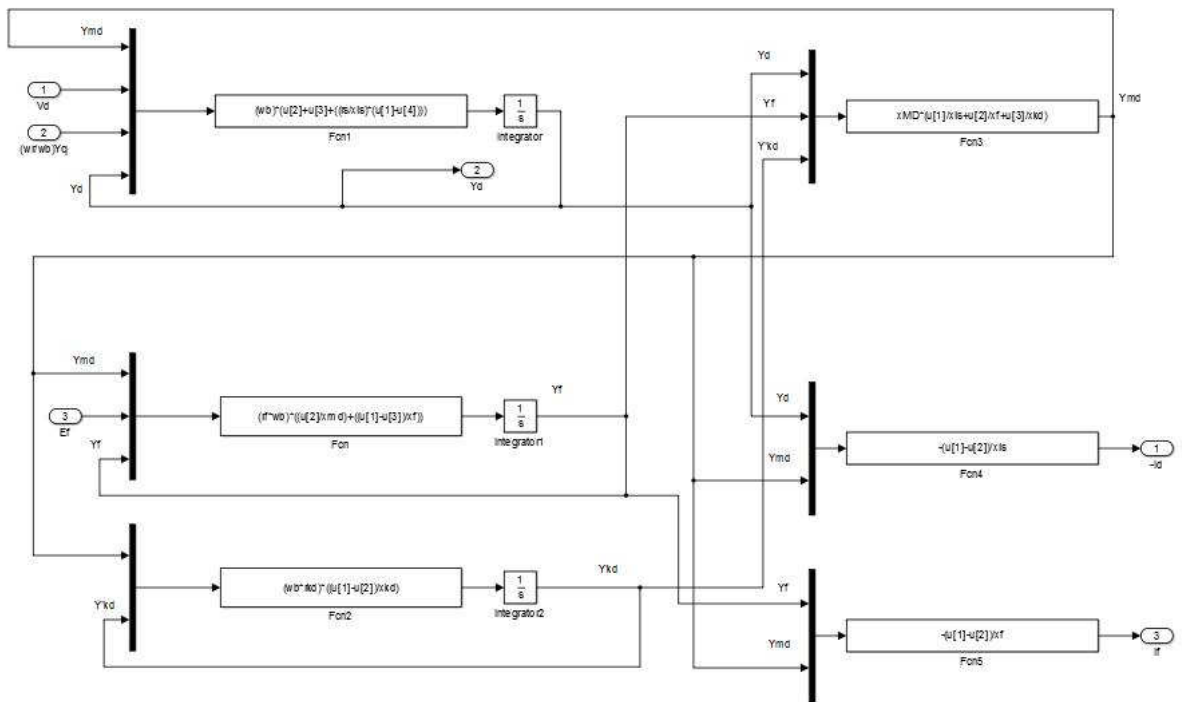
Σχήμα 7.3 – Εσωτερικό VISMA Subsystem.



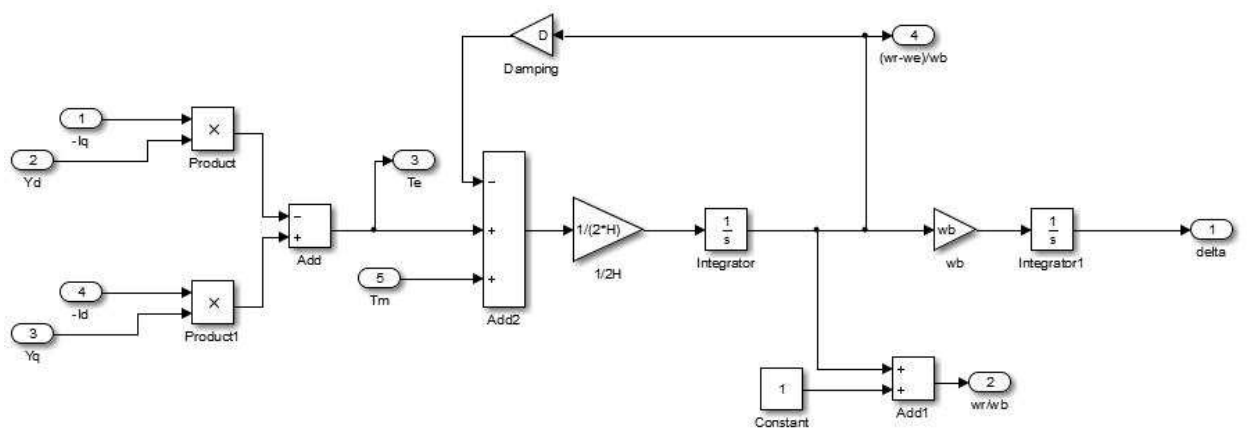
Σχήμα 7.4 – Εσωτερικό Generator Block.



Σχήμα 7.5 – Εσωτερικό q\_circuit.



Σχήμα 7.6 – Εσωτερικό d\_circuit.



Σχήμα 7.7 – Εσωτερικό Rotor.

## Matlab Script αρχικοποίησης

```
clear all;
clc;
```

```
Ts=1e-6; %Gia to discrete montelo
```

```
%Parametroi Sigxronis Mixanis se ana monada
```

```
rs= 0.0073
xls=0.013
xMQ=0.0113
xIkq=0.095
rkq=0.0043
rf=0.0231
xmd=2.687
xmq=1.087
xf=0.213
rkd=0.006
xkd=0.1379
xMD=0.0112
xd=xls+xmd %xreiazete gia ton ipologismo ton rown kata tin arxikopioisi
xq=xls+xmq %xreiazete gia ton ipologismo ton rown kata tin arxikopioisi
```

```
%Parametroi Diktiou
```

```
f=50 %sixnotita diktiou 50Hz
wb=2*pi*f;
```



```

Vb=400 %Basi Tasis 400V
Pb=10*(10^3) %Basi Energou Isxios 10kW
Ib=Pb/Vb %Reuma Basis
Xb=Vb/Ib
Sb=10*(10^3) % Sb = 10kVA
D=2 %Damping Coefficient
J=0.099 % Adraneia Mixanis

```

```

H = 0.5*J*wb*wb/Sb % Sintelestis adraneias sto ana monada sistima

```

```

%onomastiki leitourgia mixanis

```

```

P = 1 % Energos isxis monimi katastasi
Q = 0 % Aergos isxis monimi katastasi

```

```

Vt = 1 + 0*j % Termatiki Tasi
thetaeo = angle(Vt)
Vm = abs(Vt)
St = P+Q*j % Fainomeni Isxis

```

```

% It - phasor current of generator
% St - complex output power of generator
% Vt - terminal voltage phasor
% Eq - Voltage behind q-axis reactance

```

```

It = conj(St/Vt) % St=Vt.It*
Eq = Vt + (rs + j*xq)*It
delt = angle(Eq);

```

```

Eqo = abs(Eq)
I = It*(cos(delt) - sin(delt)*j)
Iqo = real(I)
Ido = -imag(I)
Efo = Eqo + (xd-xq)*Ido
lfo = Efo/xmd

```

```

Efpu=2.67

```

```

% Arxikes times peplegmenwn rown

```

```

Psiad0 = xmd*(-Ido + lfo)
Psiaq0 = xmq*(-Iqo)

```

```

Psiq0 = xls*(-Iqo) + Psiaq0;
Psid0 = xls*(-Ido) + Psiad0;
Psif0 = xf*lfo + Psiad0;
Psikq0 = Psiaq0;
Psikd0 = Psiad0;

```



## ***Βιβλιογραφία***

- [1] Ι. Α. Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β ‘ Μόνιμη Κατάσταση, Αθήνα 1991.
- [2] Βασιλείου Κ. Παπαδιά, Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας, Αθήνα 1985.
- [3] Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink, USA.
- [4] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and DC drive systems, Second Edition, USA.
- [5] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani Voltage-Sourced Converters in Power Systems Modeling, Control and Applications, USA.
- [6] Aravinda Perera, Virtual Synchronous Machine – based Power Control in Active Rectifiers for Micro Grids, Thesis NTNU – Trondheim, July 2012.
- [7] Christopher Pelezar, Mobile Virtual Synchronous Machine for Vehicle-to-Grid Applications, Dissertation TU Clausthal, March 2012.
- [8] Νίκος Ι. Μάργαρης, Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων, Θεσσαλονίκη.
- [9] Βασιλάκης Αθανάσιος, Μελέτη της συμπεριφοράς των Εικονικών Σύγχρονων Μηχανών στη στήριξη της Συχνότητας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ – Αθήνα, Οκτώβρης 2012 .
- [10] Πηγή Εικόνας: [el.wikipedia.org/Ηλεκτρικό Δίκτυο](http://el.wikipedia.org/Ηλεκτρικό_Δίκτυο).
- [11] Κυπριακός Οργανισμός Τυποποίησης (CYS), [www.cys.org.cy](http://www.cys.org.cy), Ενημερωτικές Εκδόσεις, Πράσινη Ενεργεια 2012.
- [12] Νικόλαος Α, Τσουρής, Ανάλυση ευστάθειας τάσης με την μέθοδο της συνέχειας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ – Αθήνα, Νοέμβρης 2007.
- [13] Phi-Long Nguyen, Qing-Chang Zhong, Frede Blaabjerg, Josep M. Guerrero, Synchronverters-based operation of STATCOM to mimic synchronous condensers, 7<sup>th</sup> IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012.
- [14] F. J. N. Martins, Virtual Synchronous Machines.
- [15] T. Vu Van, K. Visscher, J. Diaz, V. Karapanos, A Woyte, M. Albu, J. Bozelie, T. Loix, D. Federeniuc, Virtual Synchronous Generator: An Element of future grids.

[16] Yong Chen, Ralf Hesse, Dirk Turschner, Hans-Peter Beck, Investigation of the Virtual Synchronous machine in the island mode, 3<sup>rd</sup> IEEE PES Innovative smart grid technologies Europe, Berlin 2012.

[17] Qing-Chang Zong, George Weiss, Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators, IEEE transactions on industrial electronics, vol.58 no.4, April 2001.

[18] Hans\_Peter Beck, Ralf Hesse, Virtual Synchronous Machine, 9<sup>th</sup> International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation, Barcelona 2007.

[19] Yan Du, Jianhui Su, Meiqin Mao, Xiangzhen Yang, Autonomous Controller Based on synchronous Generator dq0 Model for Micro Drid Inverters, 8<sup>th</sup> International conference on Power Electronics – ECCE Asia 2011.