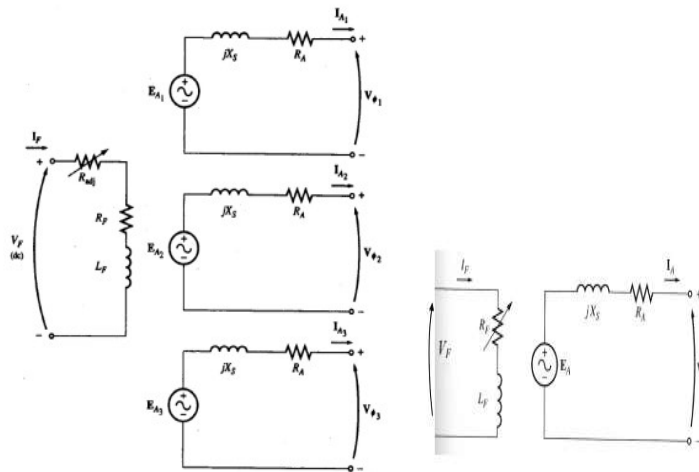




Διπλωματική Εργασία

Μελέτη Σύγχρονης Τριφασικής Γεννήτριας



Όνοματεπώνυμο Φοιτητή: Καλογιάννης Δημήτριος

Α.Μ. Φοιτητή: 45751

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κος ΚΑΡΑΪΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024





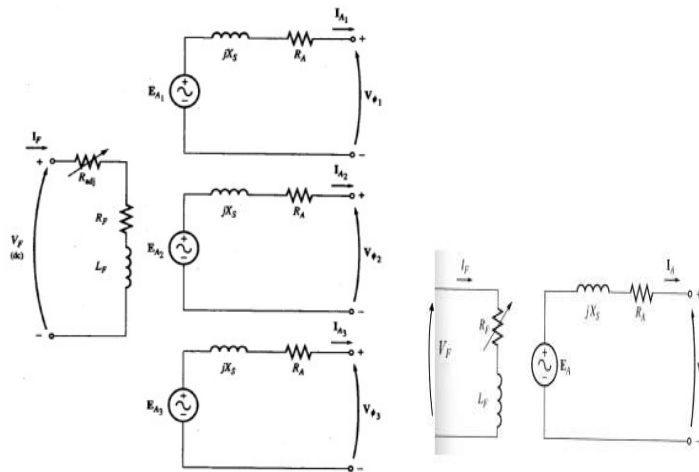
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL &
ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Study of the Synchronous Three-Phase Generator



Student: Kalogiannis Dimitrios

Registration Number: 45751

Supervisor:

Petros Karaisas

Associate Professor

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2024

ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Δημήτριος Καλογιάννης

2

Ψηφιακή Βεβαίωση Εγγράφου

Μπορείτε να ελέγξετε την ισχύ του εγγράφου
σκανάροντας το QR code ή εισάγοντας τον κωδικό
στο docs.gov.gr/validate



Κωδικός εγγράφου: iYzDg6NvphRwVθcL5-n34Q

: 2/73

Η διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Πέτρος Καραϊσάς, Αναπληρωτής Καθηγητής	Παντελής Μαλατέστας, Επίκουρος Καθηγητής	Ολυμπιάδα Συγγερίδου, Λέκτορας
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)



Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Δημήτριος Καλογιάννης,

Ιανουάριος, 2024

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δημήτριος Καλογιάννης του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 45751 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 11/1/2024 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

Δημήτριος Καλογιάννης



Ευχαριστίες

Η παρούσα βιβλιογραφική έρευνα εκπονήθηκε από το φοιτητή Καλογιάννη Δημήτρη του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023 υπό την επίβλεψη του καθηγητή Κο Καραϊσάς Πέτρος.

Θα ήθελα, λοιπόν, με τη σειρά μου να εκφράσω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου στον καθηγητή μου για την ανάθεση του θέματός μου, την πολύτιμη βοήθειά του, το ενδιαφέρον του αλλά και το χρόνο που διέθεσε με σκοπό την διεκπεραίωση της παρούσας έρευνας. Θα ήθελα επιπρόσθετα να τον ευχαριστήσω για τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και αποτέλεσαν αρωγό στο να με βοηθήσουν να διεκπεραιώσω τη παρούσα συγγραφή.



Περίληψη

Η σύγχρονη μηχανή είναι από καιρό η πιο σημαντική από τις ηλεκτρομηχανικές συσκευές μετατροπής ισχύος, διαδραματίζοντας βασικό ρόλο τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και σε ορισμένες ειδικές εφαρμογές μετάδοσης κίνησης. Η παρούσα συγγραφική προσπάθεια περιγράφει τα επιτεύγματα της σύγχρονης γεννήτριας χρονολογικά από την αρχή μέχρι σήμερα με προοπτική σε ένα δυναμικό μέλλον με εφαρμογές ειδικότερα της σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας σε πολλούς τομείς.

Λέξεις – Κλειδιά: σύγχρονη τριφασική γεννήτρια, ηλεκτρική ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας



Abstract

The synchronous motor has long been the most significant kind of the electromechanical power conversion devices, playing a key role in both the electric power generation and some special motion transmission applications. The present thesis describes the achievements of the synchronous generator chronologically, from its beginning to the present day with a perspective on a dynamic future with applications of the synchronous three-phase generator in particular throughout many fields.

Keywords: synchronous three-phase generator, electricity, renewable energy sources



Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Σχημάτων	10
Εισαγωγή	11
Κεφάλαιο 1: Σύγχρονες Γεννήτριες	14
1.1 Ορισμός Σύγχρονης Γεννήτριας.....	14
1.2 Σύγχρονη Γεννήτρια Vs. Γεννήτρια Επαγωγής.....	14
1.3 Διαφορά Μεταξύ Εναλλάκτη και Γεννήτριας	16
1.4 Κατασκευή Σύγχρονης Γεννήτριας	17
1.5 Εφαρμογές Σύγχρονης Γεννήτριας.....	18
1.6 Αρχή λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών	18
1.7 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.....	19
1.8 Χαρακτηριστικές λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας.....	23
1.9 Προσδιορισμός παραμέτρων μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος.....	25
1.10 Αυτόνομη λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας.....	27
1.11 Τρόπος διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών	30
Κεφάλαιο 2: Σύγχρονη Τριφασική Γεννήτρια	34
Εισαγωγικά.....	34
2.1 Η Ιστορία της Τριφασικής Ηλεκτρικής Γεννήτριας.....	34
2.2 Λειτουργία μιας Τριφασικής Ηλεκτρικής Γεννήτριας	34
2.3 Ενδιαφέροντα Γεγονότα Σχετικά με την Τριφασική Ηλεκτρική Ενέργεια	35
2.4 Μονοφασικός Ηλεκτρισμός Έναντι Τριφασικής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	36
2.5 Εφαρμογές Τριφασικής Γεννήτριας	37
2.6 Κύρια Πλεονεκτήματα Σύγχρονης Τριφασικής Γεννήτριας	37
2.7 Υπολογισμοί Τριφασικών Συστημάτων	38
2.8 Στάτης Γεννήτριας.....	42
2.9 Ρότορας γεννήτριας	43
2.10 Διαφορές μεταξύ στάτη και ρότορα	45
2.11 Σύστημα διέγερσης.....	46
Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση με Μελέτη Περίπτωσης Προσομοίωσης Τριφασικής Ηλεκτρομαγνητικής Μεταβατικής Διαδικασίας Βραχυκυκλώματος Σύγχρονης Γεννήτριας.....	48
3.1 Τριφασική ανάλυση βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας	48
3.2 Τριφασική προσομοίωση βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας	52



3.2.1 Τριφασικό μοντέλο βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας	52
3.3. Ρύθμιση παραμέτρων μοντέλου προσομοίωσης.....	52
3.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης	53
3.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων Μελέτης Περίπτωσης	57
Κεφάλαιο 4: Εικονικές σύγχρονες γεννήτριες: Μια έρευνα και νέες προοπτικές	58
4.1 Βασικές αρχές και έννοιες.....	58
4.2 Ρόλος των VSG	60
4.3 Νέες Προοπτικές VSG	63
4.3.1. Βελτίωση τεχνικών υπολογιστών και τεχνολογικών μετρήσεων	64
4.3.2 Βελτίωση εργαλείων μοντελοποίησης και ανάλυσης.....	65
4.3.3 Ανάπτυξη αποτελεσματικών έξυπνων και ισχυρών αλγορίθμων ελέγχου VSG	66
4.3.4 Συντονισμός μεταξύ VSG και SGs και αναθεώρηση των υφιστάμενων πρότυπα	66
Επίλογος.....	70
Βιβλιογραφικές Αναφορές	71



Πίνακας Σχημάτων

Σχ. 1. Ενσωμάτωση της ηλεκτρονικής διεπαφής ισχύος κατανεμημένης παραγωγής στο μελλοντικό σύστημα ισχύος.....	9
Σχ. 2: Επαγωγική Γεννήτρια.....	13
Σχ. 3: Σύγχρονη Γεννήτρια	14
Σχ.4: Μορφή σύγχρονης γεννήτριας.....	15
Σχ. 5. Διαμόρφωση σύγχρονης γεννήτριας με το τύλιγμα διέγερσης συνεχούς ρεύματος στο στάτη και τριφασικό τύλιγμα στο δρομέα.....	17
Σχ.6: Διπολικός ρότορα να περιστρέφεται μέσα σε έναν στάτη 3ων φάσεων.....	19
Σχ.7: Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.....	20
Σχ.8: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων σύγχρονης γεννήτριας με: (α) Ωμικό φορτίο, (β) Επαγωγικό φορτίο, (γ) Χωρητικό φορτίο.....	21
Σχήμα 9: Χαρακτηριστική V-I _G (τάσης- ρεύματος τυμπάνου) σύγχρονης γεννήτριας.....	22
Σχ.10 Χαρακτηριστική V-I _G σύγχρονης μηχανής.....	23
Σχ. 11 (α) Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος (β) Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης.....	24
Σχ. 12: Διαγράμματα για την σχέση φορτίου - συντελεστή ισχύος.....	27
Σχ. 13: Σύστημα Τριφασικής Ενέργειας.....	36
Σχ. 14: Σύστημα με σύνθετες αντιστάσεις Z _p και το ουδέτερο καλώδιο που συνδέει τα n και n' αντιπροσωπεύεται από την σύνθετη αντίσταση Z _n	37
Σχ. 15: Υπολογισμός I _a εφαρμόζοντας το μονοφασικό κύκλωμα.....	39
Σχ. 16 Μοντέλο προσομοίωσης τριφασικού βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας.....	49
Σχ. 17. Το διάγραμμα κυματομορφής του ρεύματος ευθύγραμμου άξονα στάτη.....	50
Σχ. 18. Η κυματομορφή του ρεύματος εγκάρσιας άξονα του στάτη.....	51
Σχ. 19. Το διάγραμμα κυματομορφής του ρεύματος διέγερσης i _f	52
Σχ. 20. Η κυματομορφή προσομοίωσης του ρεύματος του στάτη i _a , i _b , i _c κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας.....	53
Σχ. 21. Ένα γενικό σχήμα για τα επίπεδα ελέγχου MGs.....	57
ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία , Δημήτριος Καλογιάννης	10

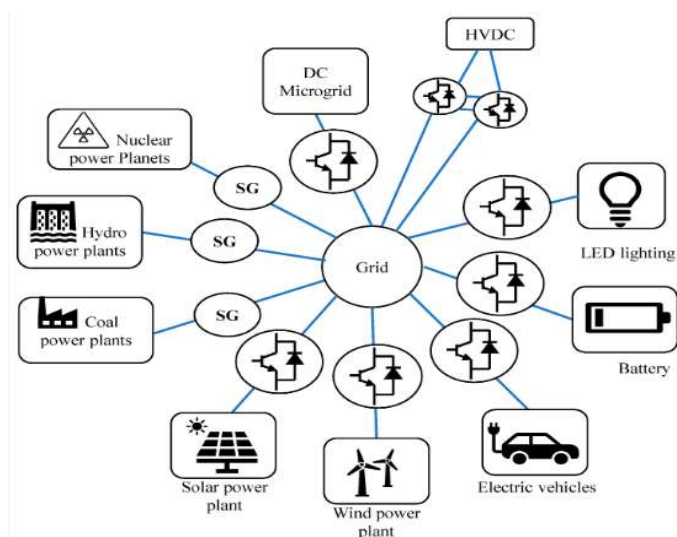


Εισαγωγή

Το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει επεκταθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, όπως αποδεικνύεται από τους αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, την περιορισμένη προσβασιμότητα στα ορυκτά καύσιμα και την ανάγκη κάλυψης της αυξανόμενης παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας.

Το 2021, η παγκόσμια ικανότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξήθηκε σε περίπου 3146 GW, όπου τα ηλιακά φωτοβολταϊκά και η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευαν το 90% της νέας δυναμικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η μη προβλεψιμότητα και η αβεβαιότητα των ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, μπορεί να αποτελέσουν ουσιαστικό πρόβλημα στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από τη διακοπτόμενη λειτουργία τους, ενσωματώνονται μέσω κυκλωμάτων κλιματισμού ισχύος που τα αποσπούν από το δίκτυο ισχύος (WEC, 1993). Χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, οι ΑΠΕ και τα φορτία ενσωματώνονται στο δίκτυο σε ένα μελλοντικό σύστημα ισχύος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.



Σχ. 1. Ενσωμάτωση της ηλεκτρονικής διεπαφής ισχύος κατακεντρωμένης παραγωγής στο μελλοντικό σύστημα ισχύος



Κατά συνέπεια, όταν οι συμβατικές γεννήτριες αλλάζουν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η αποτελεσματική αδράνεια του ηλεκτρικού δικτύου μειώνεται. Όταν χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για την αποκατάσταση μιας κλασικής σύγχρονης γεννήτριας, η σταθερότητα, η απόδοση και η ποιότητα βελτιώνονται. Η διαχείριση ενέργειας μαζί με διαφορετικές πηγές, από την άλλη πλευρά, είναι ένα σημαντικό πρόβλημα στο σχεδιασμό και την παρακολούθηση του συστήματος.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο σε μεγάλη κλίμακα προκαλεί ανησυχίες σχετικά με τη σταθερότητα της συχνότητας. Αυτό είναι ένα από τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα της ενσωμάτωσης ενός σημαντικού αριθμού μη σύγχρονων γεννητριών στο δίκτυο. Η χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος επιτρέπει την αποσύνδεση των πηγών και των φορτίων, με αποτέλεσμα τη μείωση της αδράνειας του δικτύου ισχύος (Βουρνάς & Κονταξής, 2010). Σε περίπτωση ανισορροπίας ισχύος, αυτή η πτώση οδηγεί σε μια ταχεία μετατόπιση στις αποκλίσεις συχνότητας και συχνότητας, η οποία επηρεάζει επίσης σημαντικά τη σταθερότητα συχνότητας του συστήματος.

Οι προκλήσεις που έρχονται με τις αλλαγές στα νέα συστήματα ισχύος είναι οι εξής (Γιαννακόπουλος & Βοβός, 2017):

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις ελέγχου ηλεκτρονικών ισχύος των μετατροπέων dc-ac έχουν γρήγορη δυναμική. Ωστόσο, η σύγχρονη μηχανή έχει αργή δυναμική και σημαντική αδράνεια. Σε μια σημαντική διείσδυση κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, η ισοδύναμη περιστροφική αδράνεια του δικτύου θα μειωθεί σημαντικά. Η σταθερότητα της συχνότητας θα υποφέρει ως αποτέλεσμα αυτού.

Η διακοπόμενη ισχύς που παρέχεται θα παρέχεται γρήγορα στο δίκτυο χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα γρήγορης απόκρισης των μετατροπέων dc-ac. Από αυτές τις αλληλεπιδράσεις θα προκύψει αστάθεια στη συχνότητα, τη γωνία και την τάση. Ομοίως, τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος μεγάλου μεγέθους και οι παράλληλοι μετατροπείς είναι δύσκολο να εξερευνηθούν, ιδιαίτερα όταν οι κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι και οι μετατροπείς DC-AC έχουν συγκρίσιμη δυναμική. Οι κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι, από την άλλη πλευρά, συνήθως ελέγχονται από ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και ως εκ τούτου δεν



μπορούν να αποσταλούν. Ως αποτέλεσμα, αυτοί οι μετατροπείς DC-AC δεν είναι σε θέση να προσφέρουν επαρκή ρεζέρβα για τη διατήρηση της συχνότητας δικτύου.

Για να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις που προκαλούνται από την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές συνδεδεμένη στο δίκτυο, η εικονική αδράνεια (VI) αναπτύσσεται και διερευνάται εντατικά στους παραδοσιακούς μετατροπείς. Το VI χρησιμοποιεί διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) για να προσομοιώσει μαθηματικά την απόκριση αδράνειας μιας τυπικής σύγχρονης μηχανής (SM). Για την ιδέα ενός μετατροπέα βασισμένου σε VI, με σκοπό την εξομοίωση της αδράνειας ενός παραδοσιακού συστήματος ισχύος, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός αλγορίθμων ελέγχου, ΑΠΕ, συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και ηλεκτρονικών ισχύος.

Η παρούσα ανασκόπηση διερευνά και αναλύει τις δυνατότητες της σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας για κάθε χρήση στο ηλεκτρικό δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη ζήτηση για αδράνεια για καλύτερη διαχείριση συχνοτήτων καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ. Ο κύριος στόχος της ανασκόπησης είναι να παρέχει μια χρήσιμη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι σύγχρονες εφαρμογές μπορούν να ρυθμίζουν και να σταθεροποιούν την ποιότητα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας που κυριαρχούνται από ΑΠΕ.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή του περιεχομένου της έννοιας «Σύγχρονες Γεννήτριες» με αναφορά στην αρχή λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών, στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας, στις χαρακτηριστικές λειτουργίες της σύγχρονης γεννήτριας, στο προσδιορισμό παραμέτρων μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος, στην αυτόνομη λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας καθώς και στο τρόπο διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετάται συγκεκριμένα η Σύγχρονη Τριφασική Γεννήτρια με προσδιορισμό των παραμέτρων τριφασικής γεννήτριας. Αναφορές θα γίνουν στη σύγχρονη γεννήτρια υψηλής τάσης, στο στάτη και στο ρότορα της γεννήτριας αλλά και στο σύστημα διέγερσης.

Πριν τα συμπεράσματα, θα υπάρξει βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό τη καταγραφή προσφάτων μελετών για τη σύγχρονη τριφασική γεννήτρια.



Κεφάλαιο 1: Σύγχρονες Γεννήτριες

1.1 Ορισμός Σύγχρονης Γεννήτριας

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι ένα ηλεκτρικό μηχάνημα που μετατρέπει τη μηχανική ισχύ από έναν κύριο κινητήρα σε ηλεκτρική ισχύ AC σε μια συγκεκριμένη τάση και συχνότητα. Ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί πάντα με μια σταθερή ταχύτητα που ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα.

Η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί με βάση την αρχή των νόμων του Faraday της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή δηλώνει την ηλεκτροκινητική δύναμη που προκαλείται στο πηνίο του οπλισμού εάν περιστρέφεται στο ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο (Βουρνάς & Κονταξής, 2010). Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο θα δημιουργηθεί επίσης εάν το πεδίο περιστραφεί και ο αγωγός ακινητοποιηθεί. Έτσι, η σχετική κίνηση μεταξύ του αγωγού και του πεδίου επάγει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον αγωγό. Το σχήμα κύματος της επαγόμενης τάσης είναι πάντα μια ημιτονοειδής καμπύλη.

1.2 Σύγχρονη Γεννήτρια Vs. Γεννήτρια Επαγωγής

Οι μηχανές AC μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν ως μηχανές επαγωγής και σύγχρονες μηχανές. Και ως εκ τούτου, οι γεννήτριες AC ως σύγχρονες γεννήτριες (συνήθως αναφέρονται ως εναλλάκτες) και γεννήτριες επαγωγής (ή ασύγχρονες γεννήτριες).

Υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των αρχών λειτουργίας σύγχρονων και επαγωγικών μηχανών (Γιαννακόπουλος & Βοβός, 2017):

1. Αναλυτικότερα, σε μια σύγχρονη γεννήτρια, η κυματομορφή της παραγόμενης τάσης συγχρονίζεται (αντιστοιχεί άμεσα) με την ταχύτητα του δρομέα. Η συχνότητα εξόδου μπορεί να δοθεί ως $f = N * P / 120 \text{ Hz}$. όπου N είναι η ταχύτητα του ρότορα σε rpm και P είναι ο αριθμός των πόλων.

Στην περίπτωση των επαγωγικών γεννητριών, η συχνότητα της τάσης εξόδου ρυθμίζεται από το σύστημα ισχύος, στο οποίο είναι συνδεδεμένη η γεννήτρια επαγωγής. Εάν η γεννήτρια επαγωγής παρέχει αυτόνομο φορτίο, η συχνότητα εξόδου



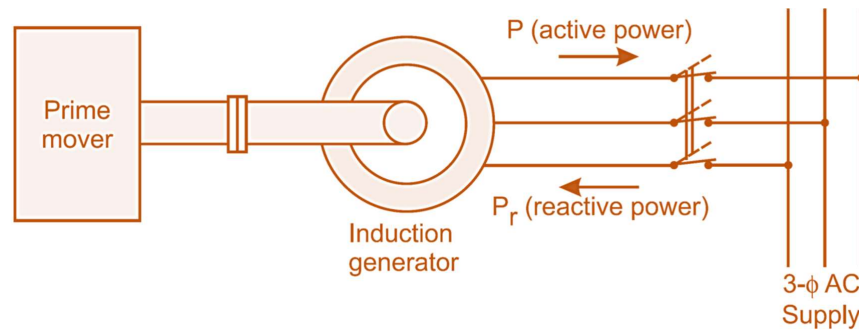
θα είναι ελαφρώς χαμηλότερη (κατά 2 ή 3%) από αυτή που υπολογίζεται από τον τύπο $f = N \cdot P / 120$.

2. Απαιτείται ξεχωριστό σύστημα διέγερσης DC σε έναν εναλλάκτη (σύγχρονη γεννήτρια).

Η γεννήτρια επαγωγής παίρνει άεργο ισχύ από το σύστημα ισχύος για διέγερση πεδίου. Εάν μια γεννήτρια επαγωγής προορίζεται να παρέχει αυτόνομο φορτίο, πρέπει να συνδεθεί μια συστοιχία πυκνωτών για την παροχή ισχύος.

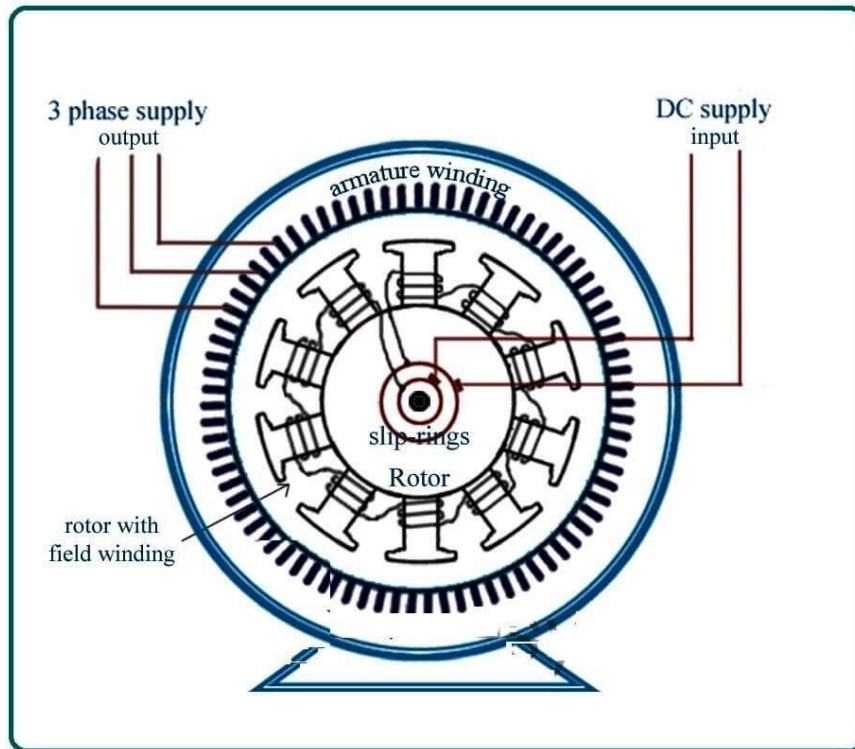
Η κατασκευή της γεννήτριας επαγωγής είναι λιγότερο περίπλοκη καθώς δεν απαιτεί διάταξη δακτυλίου ολίσθησης. Στη δε σύγχρονη γεννήτρια απαιτείται διάταξη δακτυλίου ολίσθησης για την παροχή συνεχούς τάσης στον ρότορα για διέγερση.

Οι βασικές διαφορές μεταξύ επαγωγικών γεννητριών και σύγχρονων γεννητριών μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητές από τα σχήματα που φαίνονται παρακάτω.



Σχ. 2: Επαγωγική Γεννήτρια





Σχ. 3: Σύγχρονη Γεννήτρια

1.3 Διαφορά Μεταξύ Εναλλάκτη και Γεννήτριας

Η κύρια διαφορά μεταξύ του εναλλάκτη και της γεννήτριας είναι ότι στον εναλλάκτη ο οπλισμός είναι ακίνητος και το σύστημα πεδίου περιστρέφεται ενώ στη γεννήτρια ο οπλισμός περιστρέφεται και το πεδίο είναι ακίνητο. Ο οπλισμός του εναλλάκτη είναι τοποθετημένος στο στατικό στοιχείο που ονομάζεται στάτης και έχουμε περιέλιξη πεδίου σε ένα περιστρεφόμενο στοιχείο. Ενώ η σύνδεση μιας γεννήτριας είναι ακριβώς το αντίστροφο (Γιαννακόπουλος & Βοβός, 2012).

Περαιτέρω, ο εναλλάκτης και η γεννήτρια λειτουργούν με βάση την αρχή του νόμου Faraday της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η γεννήτρια επάγει τόσο το εναλλασσόμενο όσο και το συνεχές ρεύμα και ο εναλλάκτης παράγει μόνο εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο ρότορας της γεννήτριας τοποθετείται μέσα στο ακίνητο μαγνητικό πεδίο. Το ακίνητο μαγνητικό πεδίο παράγεται από τους μαγνητικούς

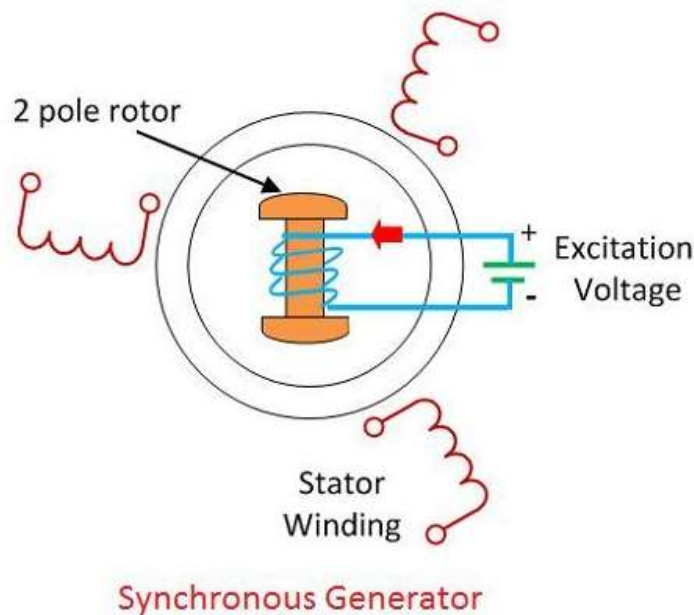


πόλους. Ο ρότορας κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τέμνει τη μαγνητική γραμμή δύναμης που προκαλεί το ρεύμα στο καλώδιο (Βουρνάς & Κονταξής, 2010).

Κάθε μισή περιστροφή του ρότορα αλλάζει την κατεύθυνση του ρεύματος που προκαλεί το εναλλασσόμενο ρεύμα. Για τη λήψη του εναλλασσόμενου ρεύματος, τα άκρα του κυκλώματος συνδέονται απευθείας με το φορτίο. Αλλά για την παραγωγή του συνεχούς ρεύματος, τα άκρα του καλωδίου συνδέονται με τον μεταγωγέα. Ο μεταγωγέας μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα.

1.4 Κατασκευή Σύγχρονης Γεννήτριας

Ο ρότορας και ο στάτης είναι το περιστρεφόμενο και το ακίνητο τμήμα της σύγχρονης γεννήτριας. Είναι τα εξαρτήματα παραγωγής ενέργειας της σύγχρονης γεννήτριας. Ο ρότορας έχει τον πόλο πεδίου και ο στάτης αποτελείται από τον αγωγό σπλισμού (Καρναβάς κ.ά., 2022). Η σχετική κίνηση μεταξύ του ρότορα και του στάτη επάγει την τάση μεταξύ του αγωγού (Σχ.4).



Σχ.4: Μορφή σύγχρονης γεννήτριας



1.5 Εφαρμογές Σύγχρονης Γεννήτριας

Οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες έχουν πολλά πλεονεκτήματα στην παραγωγή, μετάδοση και διανομή. Οι μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται στο πυρηνικό, θερμικό και υδροηλεκτρικό σύστημα για την παραγωγή των τάσεων.

Η σύγχρονη γεννήτρια με ονομαστική ισχύ 100MVA χρησιμοποιεί στο σταθμό παραγωγής. Ο μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος 500MVA χρησιμοποιείται στους υπερθερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη βαριά παραγωγή ενέργειας, ο στάτης της σύγχρονης γεννήτριας σχεδιάζει για ονομαστικές τάσεις μεταξύ 6,6 kV έως 33 kV (Wang et al., 2012).

1.6 Αρχή λειτουργίας σύγχρονων γεννητριών

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας διενεργείται κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τα οποία μεταξύ τους είναι ανεξάρτητα, και αφορούν αυτό του τυλίγματος διέγερσης και εκείνου του τυλίγματος του επαγωγίμου.

Ο ρότορας και ο στάτης είναι το περιστρεφόμενο και το ακίνητο τμήμα της σύγχρονης γεννήτριας. Είναι τα εξαρτήματα παραγωγής ενέργειας της σύγχρονης γεννήτριας. Ο ρότορας έχει τον πόλο πεδίου και ο στάτης αποτελείται από τον αγωγό σπλισμού. Η σχετική κίνηση μεταξύ του ρότορα και του στάτη επάγει την τάση μεταξύ του αγωγού (Καρναβάς κ.ά., 2022).

Αναλυτικότερα, στη σύγχρονη γεννήτρια, το πρώτο πεδίο τυλίγματος διέγερσης βρίσκεται συνήθως στο δρομέα ενώ αντίστοιχα, το τυλίγμα επαγωγίμου στο στάτη. Το τυλίγμα διέγερσης διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, αλλά με τη προϋπόθεση ότι στρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα, το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι στρεφόμενο.

Το αντίστοιχο τυλίγμα επαγωγίμου βρίσκεται στο στάτη και περιλαμβάνεται από τρία τυλίγματα κατανεμημένα στο χώρο κατά 120 μοίρες ενώ τα ρεύματα που τα διαρρέουν είναι επαγωγίμου ρεύματος συγκεκριμένης ηλεκτρικής συχνότητας.

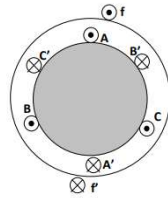
Με τη σειρά του, το προκύπτον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι στρεφόμενο στο χώρο με ταχύτητα που ισούται με την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων. Είναι εύλογο να



αναφερθεί ότι, για να διατηρηθεί η περιστροφική κίνηση απαιτείται τα δύο πεδία να μετακινήθουν με την ίδια ταχύτητα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων, τάσεων, ΜΕΔ κ.λπ. (γενικά των Η/Μ πεδίων) με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για την περίπτωση των σύγχρονων μηχανών είναι (Βουρνάς & Κονταξής, 2010):

$$f = \frac{p \cdot n}{2 \cdot 60}$$

Παρουσιάζεται, βέβαια, και η περίπτωση τυλίγματος του στάτη σε συνεχές ρεύμα ως εναλλακτική διαμόρφωση σύγχρονης μηχανής με πολύ πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Σε αυτή τη μορφή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του στάτη δεν κινείται, οπότε για να διατηρηθεί η λειτουργία της μηχανής οφείλει και το αντίστοιχο πεδίο του δρομέα να μην κινηθεί (Καρναβάς κ.ά., 2022). Με την προϋπόθεση, λοιπόν, ότι ο δρομέας θα στραφεί με τη σύγχρονη μηχανική ταχύτητα, η μη κίνηση του πεδίου του ολοκληρώνεται εάν το τριφασικό συμμετρικό σύστημα ρευμάτων που κυκλοφορούν στο τριφασικό τύλιμά του δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με την αντίθετη σύγχρονη ταχύτητα από την αντίστοιχη μηχανική (Σχ.5).



Σχ. 5. Διαμόρφωση σύγχρονης γεννήτριας με το τύλιγμα διέγερσης συνεχούς ρεύματος στο στάτη και τριφασικό τύλιγμα στο δρομέα

1.7 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας

Η επαγωγή τάση είναι η εσωτερική παραγόμενη τάση που παράγεται σε μια φάση μιας σύγχρονης γεννήτριας. Αν το μηχανήμα δεν είναι συνδεδεμένο σε φορτίο (δεν ρέει ρεύμα οπλισμού), η τάση ακροδεκτών θα είναι ισοδύναμη στην τάση που προκαλείται στα πηνία του στάτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει ροή ρεύματος στα πηνία του στάτη, επομένως δεν υπάρχουν απώλειες. Όταν υπάρχει



φορτίο συνδεδεμένο στη γεννήτρια, θα υπάρχουν διαφορές μεταξύ τους. Αυτές οι διαφορές οφείλονται σε (Wang et al., 2012):

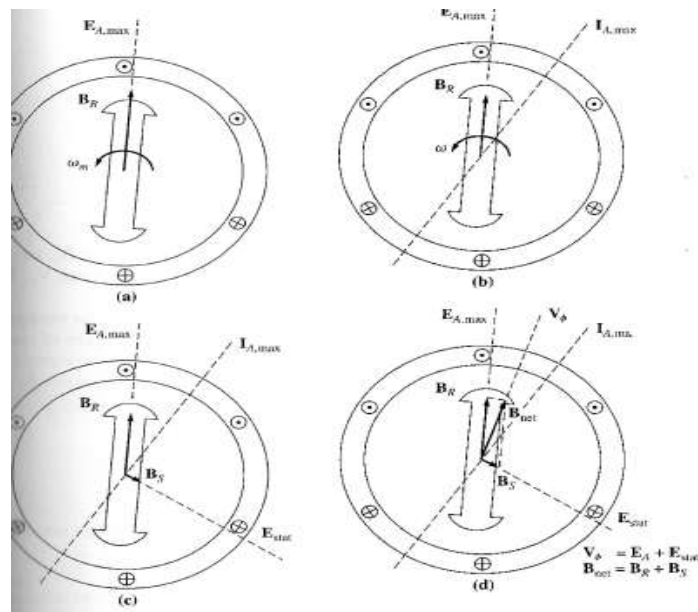
- παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου του διακένου αέρα από το ρεύμα που ρέει στον στάτη που ονομάζεται επαγωγική αντίδραση.
- αυτοεπαγωγή του πηνίου οπλισμού
- αντίσταση των πηνίων οπλισμού
- επίδραση των μορφών του ρότορα των πόλων.

Διερευνώντας τους παραπάνω παράγοντες, δύναται να αντλήσουμε ένα μηχανικό μοντέλο από αυτούς.

Επαγωγική Αντίδραση

Όταν ο ρότορας περιστρέφεται, προκαλείται επαγωγική τάση στις περιελίξεις του στάτη. Εάν προσαρτηθεί ένα φορτίο στους ακροδέκτες της γεννήτριας, ρέει ρεύμα. Αλλά μια ροή ρεύματος στάτη 3ων φάσεων θα παράγει ένα μαγνητικό δικό του πεδίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο του στάτη θα παραμορφώσει το αρχικό μαγνητικό πεδίο του ρότορα, αλλάζοντας τη προκύπτουσα τάση φάσης. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *επαγωγική αντίδραση* επειδή το ρεύμα οπλισμού (στάτη) επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο, το οποίο το παρήγαγε αρχικά.





Σχ.6: Διπολικός ρότορα να περιστρέφεται μέσα σε έναν στάτη 3ων φάσεων

όπου (α) περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τα εσωτερικά παραγόμενα επαγωγική τάση, (β) η τάση που προκύπτει παράγει μια καθυστερημένη ροή ρεύματος όταν συνδέεται με καθυστερημένο φορτίο., (γ) το ρεύμα του στάτη το παράγει δικό του μαγνητικό πεδίο BS το οποίο παράγει το δικό της E_{stat} στο περιελίξεις στάτορα., (δ) το πεδίο B_s προστίθεται στο B_R παραμορφώνοντάς το σε B_{net}. Η τάση E_{stat} προσθεται στην επαγωγική τάση, παράγοντας V_φ στην έξοδο της φάσης.

Αυτοεπαγωγή και αντίσταση των πηνίων οπλισμού

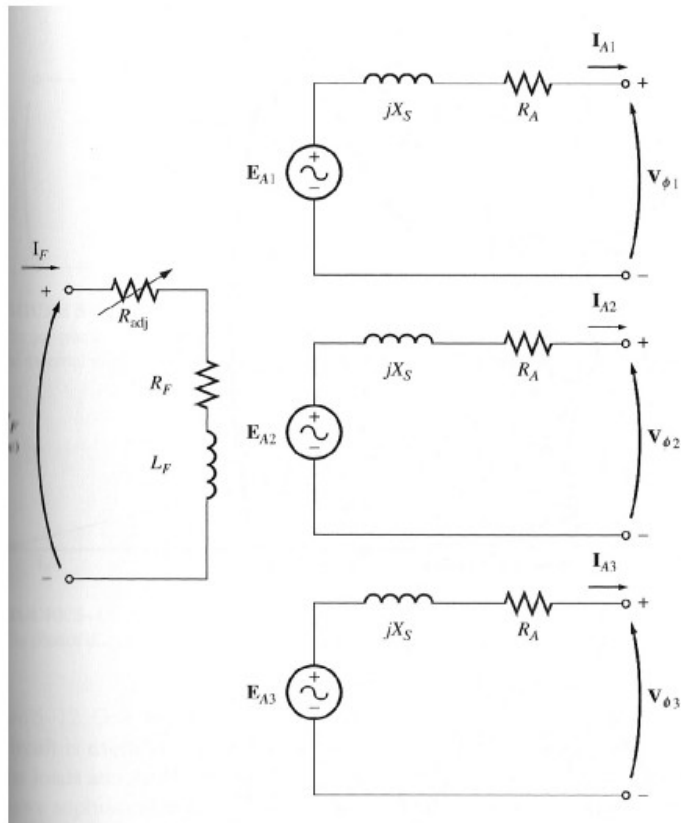
Εάν η αυτοεπαγωγή του στάτη ονομάζεται L_A (αντίδραση X_A) ενώ η αντίσταση του στάτη ονομάζεται R_A, τότε η συνολική διαφορά μεταξύ E_A και V_φ είναι:

$$\begin{aligned} V_{\phi} &= E_A - jX I_A - jX_A I_A - R_A I_A \\ &= E_A - jX_S I_A - R_A I_A \end{aligned}$$

όπου $X_S = X + X_A$

Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται παρακάτω:





Σχ.7: Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας

Μια πηγή συνεχούς ρεύματος τροφοδοτεί το κύκλωμα πεδίου του δρομέα, το οποίο διαμορφώνεται από την αυτεπαγωγή του πηνίου και την αντίσταση σε σειρά. Σε σειρά με R_F είναι μια ρυθμιζόμενη αντίσταση R_{adj} που ελέγχει τη ροή του πεδίου ρεύματος. Το υπόλοιπο του ισοδύναμου κυκλώματος αποτελείται από τα μοντέλα για κάθε φάση. Κάθε φάση έχει μια εσωτερική παραγόμενη τάση με σειριακή αυτεπαγωγή X_S (αποτελούμενη από το άθροισμα της αντίδρασης οπλισμού και την αυτεπαγωγή του πηνίου) και μια αντίσταση σειράς R_A .

Εάν οι 3 φάσεις είναι συνδεδεμένες σε Y ή Δ (σύνδεση), η τάση ακροδεκτών μπορεί να βρεθεί ως εξής (Βουρνάς & Κονταξής, 2010):



$$V_T = \sqrt{3}V_\phi$$

$$V_T = V_\phi$$

Ιδανικά, η τάση ακροδεκτών και για τις 3 φάσεις θα πρέπει να είναι ίδια αφού υποθέτουμε ότι το φορτίο που συνδέεται είναι ισορροπημένο. Εάν δεν είναι ισορροπημένο, απαιτείται μια πιο εις βάθος τεχνική.

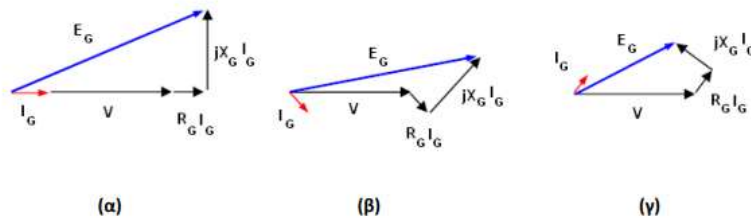
1.8 Χαρακτηριστικές λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας

Το μηχάνημα που παράγει τριφασική ηλεκτρική ενέργεια από μηχανική ισχύ ονομάζεται εναλλάκτης ή σύγχρονη γεννήτρια. Οι εναλλάκτες είναι η κύρια πηγή όλης της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουμε. Αυτά τα μηχανήματα είναι οι μεγαλύτεροι μετατροπείς ενέργειας που έχουν βρεθεί στον κόσμο.

Με εφαρμογή του Νόμου Τάσεων Kirchhoff (NTK) στο κύκλωμα, προκύπτουν οι σχέσεις τάσης-ρεύματος της σύγχρονης γεννήτριας:

$$\vec{E}_G = \vec{V} + (R_G + jX_G)\vec{I}_G$$

Η παραπάνω εξίσωση απεικονίζεται και διανυσματικά στο παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα του Σχ. 8, για τις περιπτώσεις λειτουργίας με επαγωγικό συντελεστή ισχύος (η τάση ακροδεκτών προηγείται του ρεύματος τυμπάνου), με χωρητικό και με συντελεστή ισχύος που ισούται με την μονάδα (ωμικό φορτίο).

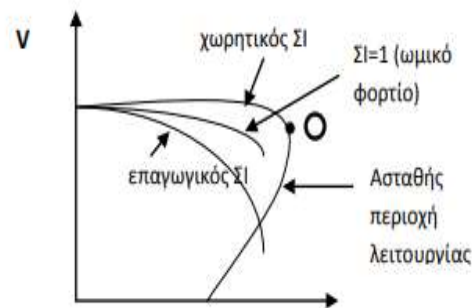


Σχ.8: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων σύγχρονης γεννήτριας με:

(α) Ωμικό φορτίο, (β) Επαγωγικό φορτίο, (γ) Χωρητικό φορτίο



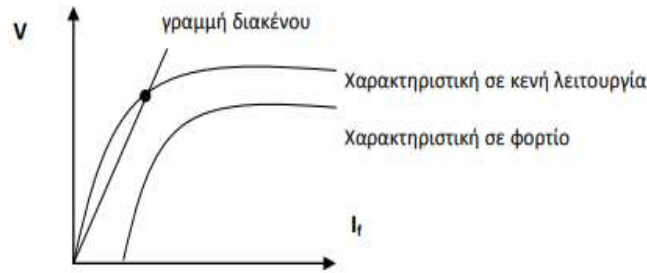
Ακολουθώντας, στο Σχ. 8 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές V-IG (τάσης- ρεύματος τυμπάνου) σύγχρονης γεννήτριας για διαφορετικούς συντελεστές ισχύος. Μελετώντας το Σχ.9 παρατηρούμε ότι αυξανόμενου του ρεύματος τυμπάνου, η τάση ακροδεκτών πέφτει σε ωμική και επαγωγική φόρτιση. Ειδικότερα, στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης, η πτώση τάσης είναι συγκριτικά μεγαλύτερη. Σε αντίθετη περίπτωση του χωρητικού φορτίου, η τάση ακροδεκτών έχει αυξητικές τάσεις. Ωστόσο, από το σημείο «Ο» και μετά, ο μηχανισμός πτώσης τάσης, καθίσταται μη ευσταθής και έτσι έχουμε κατάρρευση τάσης, αφού τώρα με μειούμενο ρεύμα τυμπάνου, μειώνεται η τάση. Εν κατακλείδι, η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας σε αυτήν την περιοχή πρέπει να αποφεύγεται.



Σχήμα 9: Χαρακτηριστική V-I_a (τάσης- ρεύματος τυμπάνου) σύγχρονης γεννήτριας

Στο επόμενο Σχ. 10, παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη που συσχετίζει την τάση ακροδεκτών με το ρεύμα διεγέρσης. Παρατηρώντας, ειδικά τη χαρακτηριστική κενής λειτουργίας, παρουσιάζεται το φαινόμενο κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής να αντανακλάται στη σχέση αυτή, καθώς από κάποιο σημείο (το αποκαλούμενο «γόνατο», ή «σημείο θλάσης» της χαρακτηριστικής) και μετά, όσο και να αυξηθεί το ρεύμα διεγέρσης, η τάση ακροδεκτών της μηχανής διατηρείται πρακτικά αμετάβλητη (Μαλατέστας, 2013). Ωστόσο, η περιοχή έως το γόνατο είναι κατά προσέγγιση γραμμική, η οποία προσεγγίζεται από τη γραμμή διακένου, δηλ. τη γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη που συνδέει την αρχή των αξόνων με το γόνατο.





Σχ.10 Χαρακτηριστική V-I σύγχρονης μηχανής

1.9 Προσδιορισμός παραμέτρων μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος

Εφόσον έχει μελετηθεί προηγουμένως το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας, επισημαίνονται οι παράγοντες που δύναται να επηρεάζουν τη λειτουργία αυτής. Σε αυτούς συγκαταλέγονται η σχέση ρεύματος διέγερσης – τάσης E_G , η σύγχρονη αντίδραση και η αντίσταση του τυλίγματος οπλισμού.

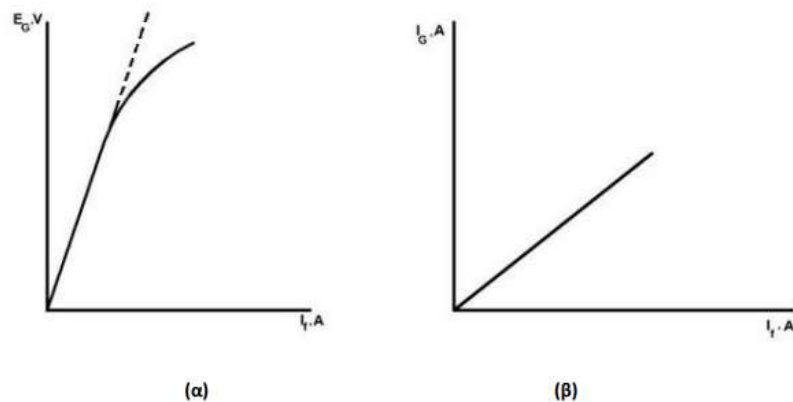
Σε αυτή την υποενότητα θα παρατεθεί μία μεθοδολογία που είναι γενική για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων μίας (μη ιδανικής) πηγής τάσης. Η μεθοδολογία αυτή με τη σειρά της αναφέρεται στον υπολογισμό του μέτρου της επαγωγικής αντίδρασης του τυμπάνου (Μαλατέστας, 2013; Βουρνάς & Κονταξής, 2010):

A) με μη λειτουργία της μηχανής, ωμομετρείται το τύλιγμα τυμπάνου. Με αυτό το τρόπο προσδιορίζεται το ωμικό μέρος της συνολικής σύνθετης αντίστασης, ή αλλιώς η ωμική αντίσταση τυλίγματος R_G . Ακόμη, μπορεί να μετρηθεί η ωμική αντίσταση R_G με την εφαρμογή σταθερής τάσης στα τυλίγματα. Έτσι, μετρώντας το ρεύμα που προκύπτει υπολογίζεται η R_G , καθώς η χρήση συνεχούς τάσης αποκλείει την επίδραση της σύγχρονης αντίδρασης.

B) εφόσον υπάρχει κενή λειτουργία, χωρίς να είναι συνδεδεμένο στη γεννήτρια κάποιο φορτίο, αυτή με τη σειρά της περιστρέφεται με ονομαστική ταχύτητα, οπότε η τάση V στα άκρα μιας φάσης θα ισούται με την E_G . Με αυτό τον τρόπο, μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης, παρουσιάζεται η καμπύλη E_G-I_f , δηλ. η χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος (βλ. Σχ 11). Μάλιστα, η τελευταία είναι ευθεία γραμμή για μικρές τιμές του ρεύματος διέγερσης, μέχρι να αρχίσουν να εμφανίζονται



τα φαινόμενα κορεσμού. Συνεπώς, από τη χαρακτηριστική αυτή, προκύπτει η τιμή της E_G .



Σχ. 11 (α) Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος (β) Χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης

Γ) με τη γεννήτρια να φτάνει στις ονομαστικές της στροφές, εφαρμόζεται τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης. Έχοντας βραχυκύκλωμα, η τάση στους ακροδέκτες είναι μηδενική $V=0$ και το $I_G=I_{βραχ.}$ προσδιορίζεται παρεμβάλλοντας αμπερόμετρα στις τρεις φάσεις.

Εφόσον, μεταβληθεί το ρεύμα διέγερσης καταγράφεται η καμπύλη $I_G - I_f$ που είναι η χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης (βλ. Σχ.11) και παριστάνεται με μια ευθεία γραμμή. Η καμπύλη βραχυκύκλωσης έχει μια τέτοια μορφή διότι το μαγνητικό πεδίο του στάτη πρακτικά εξουδετερώνει το πεδίο του δρομέα, με αποτέλεσμα το συνολικό πεδίο να έχει μικρή τιμή. Έτσι, δεν εμφανίζεται κορεσμός και η εξεταζόμενη μεταβολή παραμένει γραμμική. Επομένως, από τη χαρακτηριστική βραχυκύκλωσης προκύπτει η τιμή του I_G για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης.

Επομένως για συγκεκριμένο ρεύμα διέγερσης I_f μπορούν να προσδιοριστούν με βάση τα παραπάνω διαγράμματα οι τιμές E_G και I_G .

Εφαρμόζοντας το τριπολικό βραχυκύκλωμα στη γεννήτρια, η τάση των ακροδεκτών του τυλίγματος είναι μηδέν, από εφαρμογή Νόμου Τάσης Kirchhoff στο στοιχειώδη βρόχο προκύπτει ότι:



$$\begin{aligned}\tilde{E}_G &= \tilde{V} + (R_G + jX_G)\tilde{I}_G \Rightarrow \text{για } \tilde{V} = 0 \\ \tilde{E}_G &= (R_G + jX_G)\tilde{I}_G \Rightarrow X_G \text{ που } Z_G = R_G + jX_G \\ Z_G &= \frac{\tilde{E}_G}{\tilde{I}_G}\end{aligned}$$

Γνωρίζοντας της τιμή του μέτρου της σύνθετης αντίστασης του τυλίγματος στον στάτη και έχοντας υπολογίσει την ωμική αντίσταση προκύπτει:

$$\begin{aligned}Z_G &= \sqrt{R_G^2 + X_G^2} \Rightarrow \\ X_G &= \sqrt{\left(\frac{E_G}{I_G}\right)^2 - R_G^2}\end{aligned}$$

1.10 Αυτόνομη λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας

Με την αυξανόμενη διείσδυση του υβριδικού μικροδικτύου AC/DC στα συστήματα ισχύος, προκαλείται μείωση αδράνειας του μικροδικτύου. Πολλοί μελετητές έχουν προτείνει την ιδέα μιας εικονικής σύγχρονης γεννήτριας, η οποία επιτρέπει στους μετατροπείς του μικροδικτύου να διαθέτουν τα χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης γεννήτριας, παρέχοντας έτσι υποστήριξη αδράνειας για το μικροδίκτυο. Ωστόσο, τα προβλήματα της ταλάντωσης και της ανισορροπίας της ενεργού ισχύος θα ήταν σοβαρά όταν λειτουργήσουν πολλαπλές εικονικές σύγχρονες γεννήτριες (VSG) στο μικροδίκτυο (Karapanos et al., 2011).

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, προτάθηκε μια στρατηγική αυτόνομου ελέγχου συχνότητας ισχύος βασισμένη σε VSG, η οποία όχι μόνο κατανέμει ανεξάρτητα τη χωρητικότητα του δικτύου ισχύος ανάλογα με τη χωρητικότητα φορτίου, αλλά επίσης καταστέλλει αποτελεσματικά την ταλάντωση ενεργού ισχύος.

Επιπλέον, καθιερώνοντας ένα δυναμικό μοντέλο μικρού σήματος του μικροδικτύου, επαληθεύεται η δυναμική σταθερότητα της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου στο μικροδίκτυο και αποκαλύπτεται περαιτέρω ο ηγετικός ρόλος του VSG και του φίλτρου στη δυναμική σταθερότητα των μικροδικτύων (Karapanos et al., 2010).



Τέλος, η σκοπιμότητα και η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου επικυρώνονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Μελετώντας την συμπεριφορά μιας σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί αυτόνομα και τροφοδοτεί κάποιο φορτίο παρατηρείται ότι η συμπεριφορά της γεννήτριας υπό φορτίο διαφοροποιείται ανάλογα με το συντελεστή ισχύος του φορτίου καθώς και με το αν η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει από μόνη της ή σε συνδυασμό με άλλες σύγχρονες γεννήτριες. Παρόλα αυτά, με σκοπό να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά αυτόνομης λειτουργίας μίας γεννήτριας θα πρέπει να εξετασθεί όταν αυτή βρίσκεται υπό φορτίο.

Δεδομένου ότι η ταχύτητα της γεννήτριας είναι σταθερή, και ότι όλα τα χαρακτηριστικά της εξόδου απορρέουν από την υπόθεση της σταθερής ταχύτητας, θα θεωρηθεί επίσης σταθερή, η μαγνητική ροή της διέγερσης στη γεννήτρια. Ο εναλλακτήρας έχει σταθερή την ταχύτητα του, τη μαγνητική ροή του πεδίου του δρομέα και αμετάβλητα στοιχεία διέγερσης δηλαδή σταθερό πλάτος επαγόμενης τάσης. Συνεπώς, μελετάται η μεταβολή της τάσης εξόδου κατά την αύξηση του ρεύματος του φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις (Karapanos et al., 2011;2010; Μαλατέστας, 2013):

Αρχικά, η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε ωμικό φορτίο όπου παρατηρείται μικρή μείωση της U_a ως προς την E_f .

Η ακόλουθη αναφέρεται σε επαγωγικό φορτίο όπου παρατηρείται σημαντική μείωση της U_a ως προς την E_f .

Τελευταία περίπτωση αναφέρεται σε χωρητικό φορτίο, όπου παρατηρείται ελάχιστη μείωση ή και αύξηση της U_a ως προς την E_f .

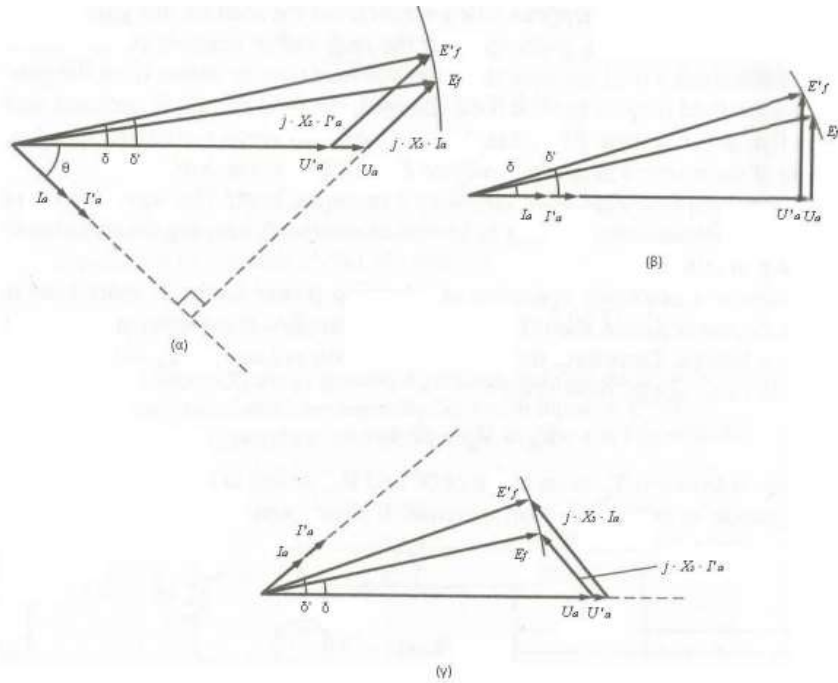
Καθώς η γεννήτρια είναι να παράγει σταθερή τάση στην έξοδό της, ανεξάρτητα από το συνδεδεμένο φορτίο, αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί διορθώνοντας κάθε φορά την τιμή της τάσης, μέσω του ρεύματος διέγερσης. Η αύξηση στο φορτίο μίας γεννήτριας μεταφράζεται ως αύξηση της πραγματικής ή της άεργου ισχύς η οποία προέρχεται από την γεννήτρια. Μια τέτοια αύξηση του φορτίου αυξάνει το ρεύμα φορτίου που προέρχεται από την γεννήτρια. Επειδή η αντίσταση του πεδίου δεν έχει υποστεί



αλλαγές, το ρεύμα του πεδίου είναι σταθερό, ως εκ τούτου η μαγνητική ροή Φ είναι σταθερή. Δεδομένου ότι η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή, το μέγεθος της εσωτερικής τάσης είναι σταθερό ($E_f = K \cdot \Phi \cdot \omega = \text{σταθερό}$).

Με την E_f να είναι σταθερή, αλλάζοντας το φορτίο, δημιουργούνται διανυσματικά διαγράμματα, τα οποία δείχνουν την αύξηση στο φορτίο, διατηρώντας τους περιορισμούς της γεννήτριας. Εξετάζοντας μία γεννήτρια, η οποία λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μεταπορείας (lagging), επισημαίνεται ότι εάν αυξηθεί το φορτίο στον ίδιο συντελεστή ισχύος, τότε το I_a αυξάνεται αλλά η γωνία θ μεταξύ I_a και U_a παραμένει ίδια. Δηλαδή, η τάση αντίδρασης οπλισμού (επαγωγική) $j \cdot X_s \cdot I_a$ έχει μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με πριν αλλά έχει ίδια γωνία.

Εφόσον $E_f = U_a + j \cdot X_s \cdot I_a$ ή $E_f = U_a + H \cdot j \cdot X_s \cdot I_a$ πρέπει να εκτείνεται μεταξύ της U_a και της E_f σε γωνία 0° . Όπου, η E_f πρέπει να έχει το ίδιο μέτρο όπως πριν από την αύξηση του φορτίου. Αποτυπώνοντας όλα τα παραπάνω σε ένα διανυσματικό διάγραμμα, υπάρχει μόνο ένα σημείο στο οποίο η τάση αντίδρασης οπλισμού είναι παράλληλη στην αρχική, ενώ αυξάνεται σε μέγεθος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο (Σχ. 12 α).



Σχ. 12: Διαγράμματα για την σχέση φορτίου - συντελεστή ισχύος

Στη συνέχεια, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το φορτίο, η τάση U_a μειώνεται απότομα. Θεωρώντας ότι η γεννήτρια λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 1, αυξάνοντας το φορτίο και κρατώντας σταθερό τον συντελεστή ισχύος παρατηρείται μία μικρή μείωση στην U_a (Σχήμα 12 β).

Τέλος, όταν η γεννήτρια λειτουργεί με συντελεστή ισχύος προπορείας (leading), αν αυξηθεί το φορτίο στον ίδιο συντελεστή ισχύος, η τάση αντίδρασης του οπλισμού βρίσκεται εκτός της προηγούμενης τιμής της με αποτέλεσμα η U_a να αυξάνεται (Σχήμα 12 γ). Έτσι, έχουμε μία αύξηση στην τάση εξόδου.

Έτσι, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα (Μαλατέστας, 2013; Karapanos et al., 2011):

- 1) Εάν αυξηθούν τα επαγωγικά φορτία σε μία γεννήτρια, η τάση εξόδου θα μειωθεί σημαντικά.
- 2) Εάν αυξηθούν τα ωμικά φορτία σε μία γεννήτρια, η τάση εξόδου θα μειωθεί ελάχιστα.
- 3) Εάν αυξηθούν τα χωρητικά φορτία σε μία γεννήτρια, η τάση εξόδου θα αυξηθεί.

1.11 Τρόπος διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών

Για να υπάρξει διέγερση της σύγχρονης γεννήτριας απαιτείται να τροφοδοτηθεί το σύστημα με συνεχές ρεύμα. Ως πηγή τάσης ως επί το πλείστον τοποθετείται μια ειδική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η λεγόμενη διεγέρτρια. Η εκάστοτε με τη σειρά της συνδέεται αμέσως με την σύγχρονη γεννήτρια είτε στον άξονα αυτής είτε με μίαντα.

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο μετατροπέας διεγέρσεως καθώς δεν είναι δυνατή η κατασκευή μηχανών συνεχούς ρεύματος αντιστοίχου ισχύος και αριθμού στροφών ανά λεπτό. Οι συγκεκριμένοι τοποθετούνται όπου υφίστανται πολύ χαμηλός αριθμός rpm άρα η διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος έχει πολύ μεγάλες διαστάσεις.



Ο μετατροπέας διεγέρσεως με τη σειρά του αποτελείται από κινητήρα επαγωγής συζευγμένο μηχανικά με γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία τροφοδοτεί το συνεχές ρεύμα για την διέγερση. Ως πηγή τάσεως για την κίνηση του κινητήρα επαγωγής του μετατροπέα διεγέρσεως είναι η σύγχρονη μηχανή ή το δίκτυο εξυπηρέτησης του σταθμού παραγωγής (Benrani & Hiyama, 2011). Κάποιες φορές χρησιμοποιείται ίδια τριφασική γεννήτρια, η οποία συνδέεται απευθείας με την σύγχρονη μηχανή και ονομάζεται αξονική γεννήτρια. Μια μέθοδος βέβαια δαπανηρή αλλά ασφαλή.

Τα πρόσφατα χρόνια, η ισχύς διέγερσης αποκτάται μέσω ελεγχόμενων ή μη ελεγχόμενων ανορθωτών. Έτσι, ως πηγή εναλλασσομένου ρεύματος λαμβάνεται το δίκτυο ή η αξονική γεννήτρια. Αφού οι ανορθωτικές διατάξεις βρίσκονται στον δρομέα, το σύστημα διέγερσης είναι χωρίς δακτυλίους. Ανάλογα με την προέλευση της χρησιμοποιούμενης πηγής της ισχύος διέγερσης τα συστήματα αυτά διακρίνονται ως εξής (Hackbart, 2016):

- 1) Αυτοδιέγερση που λαμβάνει χώρα όταν το ρεύμα διέγερσης είναι από την ίδια την γεννήτρια ή το δίκτυο το οποίο τροφοδοτεί.
- 2) Ίδια διέγερση όταν η γεννήτρια διεγείρεται από ιδιαίτερη μηχανή η οποία ζευγνύεται μηχανικά με αυτή.
- 3) Ξένη διέγερση όταν η γεννήτρια διεγείρεται από ανεξάρτητη πηγή.

Η διέγερση των σύγχρονων γεννητριών απαιτείται να ρυθμίζεται συνεχώς με συστήματα ελέγχου ώστε να κρατείται μέσα σε όρια το επίπεδο τάσεως ή ισολογισμός της άεργου ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο τροφοδοτεί η γεννήτρια.

Παρακάτω, προς κατανόηση όλων των προαναφερόμενων, παρουσιάζονται περιγραφικά μερικά συστήματα διέγερσης (Hackbart, 2016; Pepermans et al., 2015):

- 1) *Σύστημα διέγερσης με αυτοδιεγερόμενη διεγέρτρια.* Το αναφερόμενο σύστημα αφορά αυτοδιεγερόμενη διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος και ηλεκτρομηχανικό ρυθμιστή R, με σκοπό να τοποθετεί ή να αφαιρεί αντίσταση στο σύστημα διέγερσης της διεγέρτριας με αποτέλεσμα τον έλεγχο του ρεύματος διέγερσης της σύγχρονης



γεννήτριας. Ο ρυθμιστής παρουσιάζεται να ενεργοποιείται από σήμα της τάσεως που παράγεται από την γεννήτρια μέσω αρνητικής ανατροφοδότησης. Από την δυναμική συμπεριφορά της μηχανής συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται το σύστημα αυτό να έχει πολύ βραδεία απόκριση.

2) *Σύστημα διέγερσης με διεγέρτρια διεγερόμενη από βοηθητική γεννήτρια.* Το αναφερόμενο σύστημα έχει μια κύρια διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος και μια βοηθητική διεγέρτρια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, παρέχοντας την διέγερση της διεγέρτριας και η οποία είναι συνήθως συζευγμένη στον άξονα με την κύρια διεγέρτρια. Η βοηθητική διεγέρτρια ως αυτοδιεγερόμενη δημιουργεί μία πηγή κατά προσέγγιση σταθερής τάσεως. Ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμιστής επεμβαίνει στο κύκλωμα διέγερσης της κύριας διεγέρτριας. Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνονται ταχύτερες αποκρίσεις.

3) *Σύστημα διέγερσεως με Amplidyne.* Ο ηλεκτρομηχανικός ρυθμιστής σε πιο σύγχρονα συστήματα αντικαθίσταται από ηλεκτρονικά στοιχεία επειδή η σύγκριση της επιθυμητής τιμής και της υπάρχουσας τιμής εκτελείται σε πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος, είναι αναγκαία η ενίσχυση του σήματος εξόδου στο επίπεδο της ισχύος της διέγερσεως. Η ενίσχυση διενεργείται σε διάφορες βαθμίδες με μία προενίσχυση, η οποία με τη σειρά της δέχεται το σήμα εξόδου και επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρονικού ή μαγνητικού ενισχυτή. Το σύστημα αυτό αποτελείται από κύρια διεγέρτρια η οποία διεγείρεται από Amplidyne.

Το τύλιγμα ελέγχου τροφοδοτείται από ένα προενισχυτή Π. Αν οι απαιτήσεις ενίσχυσης είναι μικρές, τότε το Amplidyne αντικαθίσταται από απλή στρεφόμενη μηχανή συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, αν η στρεφόμενη μηχανή αποφευχθεί δύναται να χρησιμοποιείται στην θέση του Amplidyne μαγνητικός ενισχυτής, με τον προενισχυτή να είναι επίσης μαγνητικός ενισχυτής.

4) *Σύστημα διέγερσης με ελεγχόμενους ανορθωτές.* Η εφαρμογή της μηχανής συνεχούς ρεύματος ως κύριας διεγέρτριας έχει κάποια σημεία με ευπάθεια όπως ο συλλέκτης και οι δακτύλιοι ολίσθησης. Για να αποφευχθεί η μηχανής συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται το σύστημα διέγερσης με ελεγχόμενους ανορθωτές που τροφοδοτούν απευθείας το τύλιγμα διέγερσης της σύγχρονης μηχανής. Για πηγή τάσης χρησιμοποιείται είτε το δίκτυο, είτε η αξονική γεννήτρια (πολυφασική σύγχρονη



μηχανή πεπλατυσμένης μορφής). Η διέγερση της κρατείται σταθερή. Επίσης, η αξονική γεννήτρια μπορεί να είναι μηχανή μαγνητικής αντιστάσεως. Ο έλεγχος της διεγέρσεως της σύγχρονης μηχανής επιτυγχάνεται με παρέμβαση στις εσχάρες των ανορθωτών. Η απόκριση του συστήματος αυτού είναι ταχύτατη. Μια εναλλακτική μορφή του συστήματος αυτού λαμβάνεται όταν χρησιμοποιηθούν μη ελεγχόμενοι ανορθωτές οπότε ο έλεγχος της διέγερσης επιτυγχάνεται μέσω της διέγερσης της αξονικής γεννήτριας. Αυτή έχει τους πόλους στον στάτη ενώ ο δρομέας με το τύλιγμα τυμπάνου συναρμολογείται μετά των ανορθωτών πάνω στον άξονα της σύγχρονης μηχανής.

5) *Η αυτοδιεγερόμενη σύγχρονη μηχανή.* Το ρεύμα διέγερσης απομονώνεται μόνο από την αντίσταση του κυκλώματος διέγερσης (ανάλογο της τάσεως ακροδεκτών της μηχανής). Υπό κενό φορτίο προσδιορίζεται το σημείο λειτουργίας της μηχανής ως τομή των χαρακτηριστικών κενού φορτίο της μηχανής και του κυκλώματος διέγερσης. Ο μηχανισμός αυτοδιέγερσης, μέχρι το σημείο λειτουργίας είναι αυτός όπως και στην γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση, εκκινεί από την τάση του παραμένουτος μαγνητισμού για να καταλήξει στο σημείο λειτουργίας. Υπό φορτίο όμως λόγω της αντίδρασης τυμπάνου η τάση ακροδεκτών επηρεάζεται ισχυρά από το φορτίο εφόσον το ρεύμα διέγερσης παραμένει σταθερό. Έτσι με ωμικό ή ωμικοεπαγωγικό φορτίο υφίστανται χαρακτηριστικές ρεύματος τάσεως με ισχυρή πτώση οπότε η γεννήτρια καθίστανται πρακτικώς άχρηστη. Έτσι, η διάταξη αυτή πρέπει να αντισταθμιστεί έτσι ώστε το ρεύμα διέγερσης που προκύπτει να είναι τέτοιο ώστε η τάση ακροδεκτών να παραμένει σταθερή ανεξάρτητα του είδους και του μεγέθους του φορτίου. Η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται με κατάλληλη ανατροφοδότηση σημάτων τόσο από την τάση ακροδεκτών όσο και από το ρεύμα του φορτίου.



Κεφάλαιο 2: Σύγχρονη Τριφασική Γεννήτρια

Εισαγωγικά

Ο τριφασικός ηλεκτρισμός είναι η πιο κοινή μορφή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές σύγχρονες χώρες. Μια ηλεκτρική γεννήτρια και οι γεννήτριες diesel χρησιμοποιούν και οι δύο τριφασική ηλεκτρική ενέργεια για να δημιουργήσουν ενέργεια.

Με τριφασική ισχύ, κάθε σήμα φάσης απέχει 120 ηλεκτρικούς βαθμούς μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να προσφέρει πιο αποτελεσματική χρήση ενέργειας και να μειώσει τη φθορά στις συσκευές του σπιτιού, επειδή δεν χρειάζεται να εργάζονται τόσο σκληρά όταν συνδέονται με αυτό το είδος παροχής. Οι κατοικίες συνήθως λαμβάνουν μονοφασική υπηρεσία, ενώ οι εμπορικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν συνήθως ένα τριφασικό σύστημα για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στη λειτουργία.

Τα πλεονεκτήματα του τριφασικού ηλεκτρισμού είναι ότι μπορεί να μεταδοθεί σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις από μια μονοφασική, είναι πιο αποδοτική και παρέχει καλύτερη ποιότητα ισχύος. Αυτή η τεχνολογία έχει γίνει κυρίαρχη σε όλο τον κόσμο.

2.1 Η Ιστορία της Τριφασικής Ηλεκτρικής Γεννήτριας

Ο τριφασικός ηλεκτρισμός αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1880.

Η τριφασική ισχύς είναι ένα σύστημα που λειτουργεί στέλνοντας τάση και ρεύματα εκτός φάσης σε τρία καλώδια. Ως σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, επιτρέπει την αποτελεσματική χρήση μετασχηματιστών, οι οποίοι ενισχύουν την υψηλή τάση από τις γραμμές μεταφοράς για να τροφοδοτούν τα σπίτια με ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλότερο κόστος από ό,τι παρέχουν τα παραδοσιακά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Μειώνουν ξανά το ίδιο δυναμικό προτού παραδώσουν τοπικά παραγόμενους χυμούς σε μεμονωμένα καταστήματα μέσω δικτύων διανομής (Βουρνάς & Κονταξής, 2010).

2.2 Λειτουργία μιας Τριφασικής Ηλεκτρικής Γεννήτριας

Όσον αφορά τη λειτουργία της τριφασικής γεννήτριας, πρέπει να ειπωθεί ότι η δομή αυτής της συσκευής δεν διαφέρει πολύ από άλλους τύπους γεννητριών και δεν παρατηρείται μια ξεχωριστή δομή. Η μόνη διαφορά μεταξύ αυτών των τύπων γεννήτριας είναι η ίδια η γεννήτριά της.



Αυτό σημαίνει ότι η πηγή της κινητήριας ισχύος σε μια τριφασική γεννήτρια είναι ίδια με τους κινητήρες diesel, βενζίνης ή αερίου και δεν υπάρχει διαφορά σε αυτόν τον τομέα.

Αλλά το κύριο σημείο διαφοράς της γεννήτριας είναι ότι από την περιστροφή του κινητήρα, αντί να δημιουργείται μονοφασική γεννήτρια, θα δημιουργηθεί τριφασική γεννήτρια.

Σε μια τριφασική γεννήτρια, βλέπουμε τη χρήση τριφασικής γεννήτριας αντί για μονοφασική γεννήτρια, και ως αποτέλεσμα αυτής της διαφοράς, παρατηρείται επίσης μια εμφανή διαφορά στην ισχύ εξόδου. Η έξοδος ισχύος είναι μια τριφασική γεννήτρια τριών συρμάτων και το σχήμα εξόδου είναι διαφορετικό (Καρναβάς κ.ά., 2022).

Στην περίπτωση του ίδιου του πίνακα διανομής, λόγω της υψηλότερης τάσης εξόδου, υπάρχουν διαφορές των οποίων η πλήρης ανασκόπηση δεν μελετάται λεπτομερώς στο παρόν κείμενο. Ωστόσο, γενικά, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα σημεία σχετικά με μια τριφασική γεννήτρια (Oliveira et al., 2012):

- Η τάση εξόδου μιας τριφασικής γεννήτριας είναι συνήθως στην περιοχή άνω των 480volts.
- Η ισχύς που παράγεται από αυτόν τον τύπο γεννήτριας είναι πιο κατάλληλη για χρήση σε διάφορους τύπους μετασχηματιστών και η τάση της μπορεί εύκολα να αυξηθεί ή να μειωθεί σε χαμηλότερο επίπεδο.
- Οι τριφασικές γεννήτριες, ενώ καθιστούν δυνατή την παραγωγή περισσότερης τάσης, συνήθως ζυγίζουν λιγότερο υπό ίσες συνθήκες και είναι καλύτερες σε μέγεθος και τιμή από τις μονοφασικές γεννήτριες.
- Η διάρκεια ζωής των τριφασικών γεννητριών είναι συνήθως μεγαλύτερη από τους μονοφασικούς τύπους και επομένως οι πιθανότητες βλάβης ή βλάβης της τριφασικής γεννήτριας είναι κάπως μικρότερες.

2.3 Ενδιαφέροντα Γεγονότα Σχετικά με την Τριφασική Ηλεκτρική Ενέργεια

1) Τριφασική ισχύς πρέπει να παράγεται ως τριφασική παροχή, ωστόσο μπορεί να χωριστεί σε τρεις ανεξάρτητες μονοφασικές παροχές όταν χρειάζεται.



2) Οι ηλεκτρικές γεννήτριες δημιουργούν αυτό το είδος ηλεκτρισμού περιστρέφοντας πηνία μέσα σε μαγνήτες σε υψηλές ταχύτητες.

3) Ορισμένος εξοπλισμός, αξιόλογος εξοπλισμός βιομηχανικής ποιότητας, απαιτεί τριφασική ισχύ για να λειτουργήσει ως αποτέλεσμα αυτού.

2.4 Μονοφασικός Ηλεκτρισμός Έναντι Τριφασικής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα τριφασικά συστήματα τροφοδοσίας είναι λίγο πιο περίπλοκα από τα μονοφασικά. Ένα σύστημα τριών συρμάτων αποτελείται από ένα καλώδιο με δύο ξεχωριστούς κλώνους και χρησιμοποιείται ως συνολική γείωση ή επιστρέφει τη διαδρομή εάν οποιοδήποτε μέρος του κυκλώματος απαιτεί απομόνωση από άλλα τμήματα. Σε ένα μονοφασικό σύστημα τροφοδοσίας, η τάση μπορεί να φτάσει έως και τα 230 Volt. Αλλά σε τριφασικές συνδέσεις, μπορεί να μεταφέρει πάνω από 415 βολτ. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι ένα πλεονέκτημα επειδή μπορεί να μεταφέρει περισσότερη ισχύ μέσω του ίδιου μεγέθους καλωδίου (Best et al., 2010). Οι ηλεκτρικές γεννήτριες και οι γεννήτριες diesel χρησιμοποιούν και οι δύο τριφασικό ρεύμα. Είναι σημαντικό για όλες τις γεννήτριες να διασφαλίζουν επαρκή συντήρηση και επισκευή.

Η κύρια διαφορά μεταξύ μονοφασικής και τριφασικής ισχύος είναι ο αριθμός των φάσεων που εμπλέκονται στη μετάδοσή της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με μονοφασική ισχύ, η τάση ποικίλλει ανάλογα με ένα μόνο «πόδι» ενός τυπικού τριφασικού συστήματος. Αντίθετα, η τριφασική τάση ποικίλλει ανά σκέλος ανά πάσα στιγμή.

Ένα τριφασικό τροφοδοτικό είναι πιο αξιόπιστο από ένα μονοφασικό γιατί επιτρέπει τη μεταφορά ενέργειας σε περίπτωση που συμβεί οτιδήποτε σε ένα καλώδιο. Ένα παράδειγμα θα ήταν εάν κοπεί το καλώδιο του δικτύου, αντί να κοπεί όλη η ηλεκτρική ενέργεια ταυτόχρονα, όπως με δύο ή τέσσερα καλώδια (ή φάσεις), αποσυνδέεται μόνο η συγκεκριμένη φάση, οπότε δεν υπάρχει πλήρης διακοπή. Ωστόσο, τα εξαρτήματα παραμένουν λειτουργικά ενώ άλλα δεν λειτουργούν μέχρι να γίνουν επισκευές (Maljkovic et al., 2013).



2.5 Εφαρμογές Τριφασικής Γεννήτριας

Η τριφασική γεννήτρια είναι ιδανική για βιομηχανική χρήση, διότι εκτός από το γεγονός ότι πολλές μεγάλες βιομηχανικές συσκευές λειτουργούν μόνο με αυτόν τον τύπο ισχύος, η ίδια η τάση και η συχνότητα εξόδου είναι σε καλύτερη κατάσταση.

Λόγω των χαρακτηριστικών της τριφασικής γεννήτριας, είναι δυνατή η παραγωγή σταθερής ισχύος χωρίς μικρές διακοπές με τη βοήθεια αυτής της γεννήτριας.

Οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται επίσης σε άλλα κέντρα, όπως τα κέντρα δεδομένων, και δεν είναι η μόνη πηγή τριφασικής γεννήτριας υψηλής τάσης.

Αυτή η έλλειψη ακαταστασίας έχει βοηθήσει να δικαιολογηθεί η χρήση αυτού του τύπου γεννήτριας σε ηλεκτρονικά και υπολογιστές. Στον αγροτικό τομέα, παρατηρείται ευρεία χρήση τριφασικών γεννητριών.

Για παράδειγμα, ορισμένοι τύποι αντλιών απαιτούν τριφασική ισχύ για να λειτουργήσουν και θα υπάρξει πρόβλημα με αυτήν την κατάσταση χωρίς να υπάρχει γεννήτρια.

2.6 Κύρια Πλεονεκτήματα Σύγχρονης Τριφασικής Γεννήτριας

Το μεγάλο πλεονέκτημα μιας τριφασικής γεννήτριας έναντι μιας μονοφασικής γεννήτριας είναι η τιμή της τάσης της, καθώς οι μονοφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται γενικά για την τροφοδοσία οικιακού εξοπλισμού και οι τριφασικές γεννήτριες, στις περισσότερες περιπτώσεις, τροφοδοτούν μεγάλο εξοπλισμό. Ένα από τα κύρια διακριτικά χαρακτηριστικά των μονοφασικών και τριφασικών συστημάτων είναι ότι τα τριφασικά συστήματα έχουν μικρότερες ποσότητες αλουμινίου ή χαλκού για να παράγουν ακριβώς την ίδια ισχύ με ένα σετ μονοφασικής γεννήτριας.

Επομένως, όταν προσδιορίζεται μια γεννήτρια για έναν πελάτη, η επιλογή μεταξύ μονοφασικής και τριφασικής βασίζεται στα φορτία που θα πρέπει να παρέχει αυτή η γεννήτρια.

Ως κύρια πλεονεκτήματα της τριφασικής γεννήτριας αναφέρονται (Βουρνάς & Κονταξής, 2010; Γιαννακόπουλος & Βοβός, 2017):

- ✓ Μεταξύ δύο εξαρτημάτων εξοπλισμού με την ίδια ισχύ, η τριφασική γεννήτρια είναι μικρότερη και ελαφρύτερη.



- ✓ Αυτός ο τύπος γεννήτριας είναι πιο αποτελεσματικός στην παροχή ενέργειας. Είναι το πιο χρησιμοποιημένο παγκοσμίως.
- ✓ Καθώς η ροπή αυτών των γεννητριών είναι σταθερή και υφίστανται λιγότερους κραδασμούς, η συνολική στιγμιαία ισχύς είναι επίσης σταθερή, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υφίσταται διακυμάνσεις.
- ✓ Οι περιελίξεις των τριφασικών γεννητριών χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικά.
- ✓ Καθώς τροφοδοτούνται από τρεις φάσεις, οι τριφασικοί κινητήρες δεν χρησιμοποιούν άλλους τύπους συσκευών.
- ✓ Σε αυτές τις γεννήτριες η συνολική ισχύς δεν είναι ποτέ μηδενική.

Γενικά, σε τομείς που χρειάζονται συνεχή και άψογη παροχή ρεύματος και που βασίζονται σε απαιτητικό εξοπλισμό και κινητήρες υψηλής ισχύος, οι τριφασικές γεννήτριες είναι επιβεβλημένες.

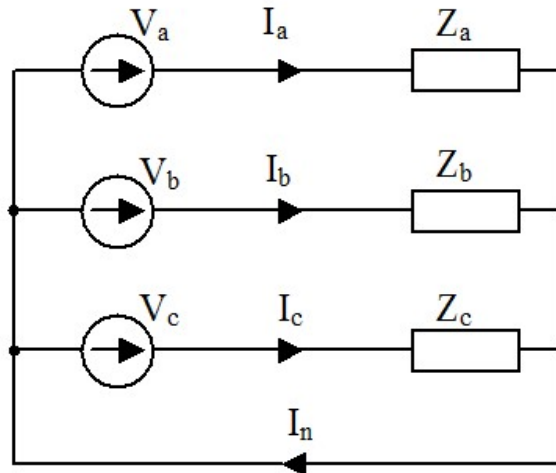
Για να ανταποκριθούν σε αυτές τις αυστηρότερες ανάγκες, οι συσκευές που χρησιμοποιούν τριφασική τάση διαθέτουν ένα σύστημα ικανό να διασφαλίζει και να υποστηρίζει αποτελεσματική τροφοδοσία ρεύματος.

Εάν το σύστημα ισχύος επιδιώκεται να ανταποκρίνεται σε μεγάλες αποστάσεις, η επιλογή θα πρέπει επίσης να πέσει σε αυτόν τον τύπο γεννήτριας. Έτσι, θα υπάρχει μια αποτελεσματική λύση με μεγάλη ενεργειακή απόδοση.

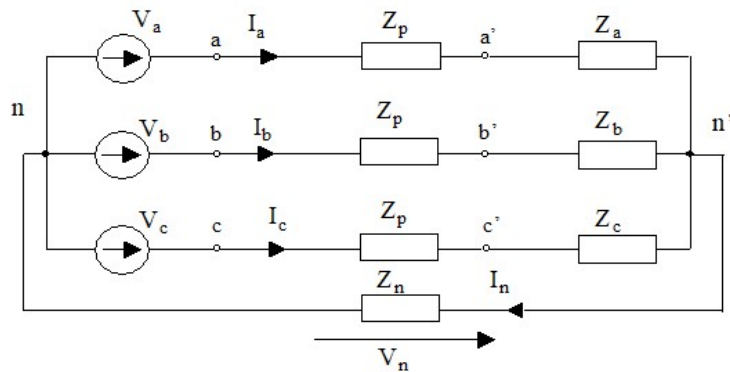
2.7 Υπολογισμοί Τριφασικών Συστημάτων

Όταν οι τρεις φάσεις του φορτίου δεν είναι πανομοιότυπες, δημιουργείται ένα μη ισορροπημένο σύστημα. Ένα μη ισορροπημένο σύστημα συνδεδεμένο με Υ φαίνεται στο Σχ.13 Το σύστημα περιέχει τέλεια αγωγή σύρματα που συνδέουν την πηγή με το φορτίο. Εδώ εξετάζεται μια πιο ρεαλιστική περίπτωση όπου τα καλώδια αντιπροσωπεύονται από σύνθετες αντιστάσεις Z_r και το ουδέτερο καλώδιο που συνδέει τα n και n' αντιπροσωπεύεται από την σύνθετη αντίσταση Z_n (Σχ.14).





Σχ. 13: Σύστημα Τριφασικής Ενέργειας



Σχ. 14: Σύστημα με σύνθετες αντιστάσεις Z_p και το ουδέτερο καλώδιο που συνδέει τα n και n' αντιπροσωπεύεται από την σύνθετη αντίσταση Z_n

Χρησιμοποιώντας τον κόμβο n ως σημείο αναφοράς, εκφράζουμε τα ρεύματα I_a , I_b , I_c και I_n ως προς την τάση του κόμβου V_n :



$$I_a = \frac{V_a - V_n}{Z_a + Z_p}$$

$$I_b = \frac{V_b - V_n}{Z_b + Z_p}$$

$$I_c = \frac{V_c - V_n}{Z_c + Z_p}$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n}$$

Ως εκ τούτου, λαμβάνουμε την εξίσωση κόμβου:

$$\frac{V_n}{Z_n} - \frac{V_a - V_n}{Z_a + Z_p} - \frac{V_b - V_n}{Z_b + Z_p} - \frac{V_c - V_n}{Z_c + Z_p} = 0$$

Επίλυση αυτής της εξίσωσης για το V_n , έχουμε:

$$V_n = \frac{\frac{V_a}{Z_a + Z_p} + \frac{V_b}{Z_b + Z_p} + \frac{V_c}{Z_c + Z_p}}{\frac{1}{Z_n} + \frac{1}{Z_a + Z_p} + \frac{1}{Z_b + Z_p} + \frac{1}{Z_c + Z_p}}$$

Οι παραπάνω σχέσεις μας δίνουν τη δυνατότητα να διατυπώσουμε μια μέθοδο για την ανάλυση τριφασικών συστημάτων. Η μέθοδος αποτελείται από τρία βήματα ως εξής:

- Προσδιορίζεται αρχικά το V_n
- Υπολογίζονται τα ρεύματα I_a , I_b , I_c και I_n
- Παρουσιάζονται οι τάσεις φάσης και γραμμής χρησιμοποιώντας τους νόμους του Kirchhoff και του Ohm.

Όταν αφαιρεθεί το ουδέτερο καλώδιο, το σύστημα περιέχει τρία καλώδια σύνδεσης και ονομάζεται σύστημα τριών συρμάτων. Σε μια τέτοια περίπτωση, ορίζεται

$$|Z_n| \rightarrow \infty$$



σε:

$$V_n = \frac{\frac{V_a}{Z_a + Z_p} + \frac{V_b}{Z_b + Z_p} + \frac{V_c}{Z_c + Z_p}}{\frac{1}{Z_a + Z_p} + \frac{1}{Z_b + Z_p} + \frac{1}{Z_c + Z_p}} .$$

Το ισορροπημένο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση του μη ισορροπημένου συστήματος, όπου $Z_a = Z_b = Z_c = Z$. Έτσι, έχουμε:

$$V_n = \frac{\frac{1}{Z + Z_p} (V_a + V_b + V_c)}{\frac{3}{Z + Z_p}} = 0 .$$

Κατά συνέπεια, οι σχέσεις μειώνονται σε:

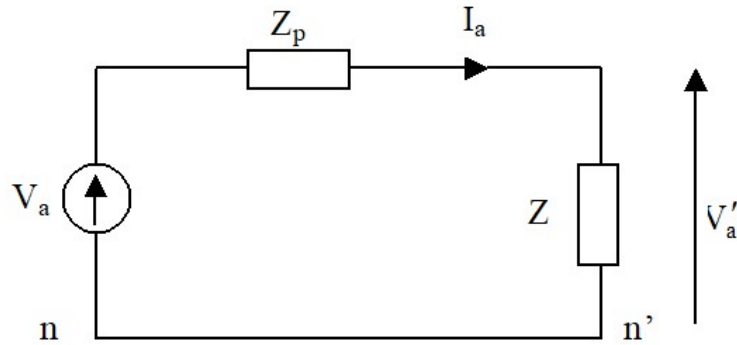
$$I_a = \frac{V_a}{Z + Z_p}$$

$$I_b = \frac{V_b}{Z + Z_p}$$

$$I_c = \frac{V_c}{Z + Z_p} .$$

Ως εκ τούτου, πρέπει να υπολογίσουμε το I_a , το οποίο μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας το μονοφασικό κύκλωμα που φαίνεται στο Σχ.15.



Σχ. 15: Υπολογισμός I_a εφαρμόζοντας το μονοφασικό κύκλωμα

Αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση ενός ισορροπημένου τριφασικού συστήματος μπορεί να περιοριστεί στην ανάλυση ενός μονοφασικού συστήματος, όπως απεικονίζεται παραπάνω.

2.8 Στάτης Γεννήτριας

Ο στάτης ή αλλιώς στάτορας είναι το ακίνητο τμήμα περιστροφικών ηλεκτρομαγνητικών συσκευών όπως ο εναλλάκτης, ο ηλεκτροκινητήρας ή η γεννήτρια. Μπορεί να δει κανείς τον όρο "στάτης" να χρησιμοποιείται εναλλακτικά με τον «εναλλάκτη» ή τη «γεννήτρια», παρόλο που αποτελεί μόνο ένα μέρος αυτών των συσκευών (Καρναβάς κ.ά, 2022).

Η βασική του κατασκευή αποτελείται από το εξωτερικό πλαίσιο, το πυρήνα και τις περιελίξεις.

Το εξωτερικό πλαίσιο του στάτη παρέχει υποστήριξη για τον πυρήνα του. Ο πυρήνας του στάτη είναι τυπικά λεπτός, τα χαλύβδινα ελάσματα εισάγονται με την περιέλιξη του στάτη και το τύλιγμα του στάτη (ή το πηνίο του στάτη) είναι κατασκευασμένο από μονωμένο χάλκινο σύρμα (Καρναβάς κ.ά, 2022).

Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί, ο πυρήνας του στάτη και η περιέλιξη του στάτη γίνονται ηλεκτρομαγνήτης.

Μελετώντας αυτό το ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο, παρατηρείται ότι η ενέργεια ρέει μέσω του στάτη προς και από έναν περιστρεφόμενο ρότορα.



Ο στάτης είναι πάντα ακίνητος ενώ ο ρότορας περιστρέφεται, είτε μέσα του είτε γύρω του. Με αυτόν τον τρόπο, ο στάτης μπορεί να λειτουργήσει ως (Βουρνάς & Κονταξής, 2010):

- περιέλιξη πεδίου (πηνίο πεδίου ή μαγνήτης πεδίου), όπου το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη οδηγεί τον οπλισμό του ρότορα για να δημιουργήσει κίνηση.
- οπλισμός, όπου τα πηνία κινούμενου πεδίου στον ρότορα επηρεάζουν τον στάτη για να δημιουργήσει μια έξοδο.

Σε κοινά μηχανήματα, ο στάτης λειτουργεί ως (Βουρνάς & Κονταξής, 2010):

- ηλεκτρικός κινητήρας: σε έναν κινητήρα (κινητήρα AC ή κινητήρα συνεχούς ρεύματος), η περιέλιξη του πεδίου του στάτη δημιουργεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο για να κινήσει τον περιστρεφόμενο ρότορα, παράγοντας την κίνηση εργασίας.
- εναλλάκτης ή γεννήτρια: σε αυτές τις συσκευές, ο στάτης μετατρέπει το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του ρότορα σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Ο στάτης δεν περιορίζεται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, αν και η δομή του μπορεί να είναι λίγο διαφορετική σε άλλα συστήματα. Στα υδροδυναμικά συστήματα (όπως ένας μετατροπέας ροπής), ο στάτης καθοδηγεί τη ροή ρευστού προς ή από τον περιστρεφόμενο ρότορα του στροβίλου του συστήματος.

Και σε ορισμένες συσκευές, ο στάτης είναι μια διάταξη μόνιμου μαγνήτη αντί για ένα ηλεκτρικό πηνίο. Αυτό μπορεί κανείς να το δει και σε ορισμένους τύπους κινητήρων εκκίνησης αυτοκινήτου.

Ο στάτης, ανεξαρτήτως από ποια πτυχή χρήσης μεταφράζεται, είναι προφανές ότι είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική λειτουργία οποιουδήποτε ηλεκτροκινητήρα.

2.9 Ρότορας γεννήτριας

Ο ρότορας είναι το κινούμενο μέρος σε ένα ηλεκτρομαγνητικό σύστημα του κινητήρα, της γεννήτριας και ενός εναλλάκτη. Αναφέρεται, επίσης και ως περιστρεφόμενος μαγνητικός πυρήνας. Σε έναν εναλλάκτη, περιλαμβάνει μόνιμους μαγνήτες που κινούνται περίπου στις σιδερένιες πλάκες του στάτη για να παράγουν ένα AC (εναλλασσόμενο ρεύμα). Χρησιμοποιεί την υπάρχουσα κίνηση για τη



λειτουργία του. Η περιστροφή αυτού μπορεί να συμβεί λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μαγνητικών πεδίων και των περιελίξεων που δημιουργούν ροπή στην περιοχή του άξονα (Oliveira et al., 2012).

Σε έναν τριφασικό επαγωγικό κινητήρα, μόλις εφαρμοστεί AC στον ρότορα, τότε οι περιελίξεις του στάτη ενισχύονται για να δημιουργήσουν μια περιστροφική μαγνητική ροή. Η ροή δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο διάκενο αέρα μεταξύ του στάτη και του ρότορα για να προκαλέσει μια τάση για τη δημιουργία ρεύματος σε όλες τις ράβδους. Το κύκλωμα αυτού μπορεί να βραχυκυκλωθεί και η ροή του ρεύματος θα είναι στους αγωγούς.

Η πράξη της περιστροφικής ροής και του ρεύματος δημιουργεί μια δύναμη για τη δημιουργία ροπής για την εκκίνηση του κινητήρα. Ο ρότορας σε έναν εναλλάκτη μπορεί να σχεδιαστεί με ένα συρμάτινο πηνίο που περικλείεται στην περιοχή ενός πυρήνα σιδήρου.

Το μαγνητικό εξάρτημα αυτού μπορεί να κατασκευαστεί με τα ελάσματα του χάλυβα για να βοηθήσει τη σφράγιση της σχισμής του αγωγού σε ακριβή μεγέθη και σχήματα. Κάθε φορά που το ρεύμα διαρρέεται στο πηνίο σε ένα μαγνητικό πεδίο, τότε δημιουργεί ένα ρεύμα πεδίου στην περιοχή του πυρήνα (Γιαννακόπουλος & Βοβός, 2017).

Η ένταση του ρεύματος πεδίου ελέγχει κυρίως το επίπεδο ισχύος στο μαγνητικό πεδίο. Το συνεχές ρεύμα οδηγεί το ρεύμα πεδίου προς την κατεύθυνση του πηνίου του σύρματος μέσω ενός σετ δακτυλίων ολίσθησης.

Παρόμοια με οποιονδήποτε μαγνήτη, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται θα περιλαμβάνει δύο πόλους. Η κατεύθυνση του κινητήρα δεξιόστροφα μπορεί να ελεγχθεί μέσω των μαγνητικών πεδίων που είναι σταθερά σε αυτό το σχέδιο, το οποίο επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί αριστερόστροφα.

Οι ρότορες ταξινομούνται σε διαφορετικούς τύπους όπως άκαμπτος τύπος, τύπος προεξέχοντος πόλου, στροφέιο κλουβιού σκίουρου, τύπος wound, κοκ. Αναλυτικότερα (Oliveira et al., 2012; Piroi et al., 2014):

Ο *άκαμπτος ρότορας* είναι ένας μηχανικός τύπος περιστρεφόμενου συστήματος. Ο ρότορας σαν αυθαίρετος μπορεί να είναι μια τρισδιάστατη άκαμπτη συσκευή. Μπορεί



να ρυθμιστεί στο διάστημα χρησιμοποιώντας τρεις γωνίες, που ονομάζονται γωνίες Euler. Ο γραμμικός τύπος είναι ένας ειδικός άκαμπτος τύπος που χρησιμοποιεί απλώς δύο γωνίες για να εξηγήσει. Για παράδειγμα, στο διατομικό μόριο, υπάρχουν πολλά γενικά μόρια που υπάρχουν με τρισδιάστατη, όπως η αμμωνία του νερού ή το μεθάνιο. Εδώ το νερό είναι ασύμμετρου τύπου, η αμμωνία είναι ο συμμετρικός τύπος και κατά τα άλλα το μεθάνιο είναι σφαιρικό.

Ο *ρότορας στροφέιο κλουβί σκίουρου* είναι το περιστροφικό μέρος στον επαγωγικό κινητήρα του στροφέιου κλουβιού σκίουρου. Είναι ένα είδος κινητήρα AC και περιλαμβάνει πλαστικοποιήσεις από χάλυβα σε σχήμα κυλίνδρου.

Ο *ρότορας wound* είναι τύπου κυλινδρικού πυρήνα, σχεδιασμένο με χαλύβδινη πλαστικοποίηση και περιλαμβάνει υποδοχές για τη συγκράτηση των συρμάτων που απέχουν ίσα μεταξύ τους και συνδέονται σε διαμόρφωση Υ. Οι ακροδέκτες αυτών των περιελίξεων αφαιρούνται για να συνδεθούν με τους τρεις δακτύλιους ολίσθησης στον άξονα.

Οι δακτύλιοι ολίσθησης επιτρέπουν εξωτερικές αντιστάσεις 3ων φάσεων που συνδέονται σε σειρά με τις περιελίξεις για να παρέχουν τον έλεγχο της ταχύτητας.

Οι εξωτερικές αντιστάσεις μετατρέπονται σε ένα κλάσμα του ρότορα για να δημιουργήσουν μια τεράστια ροπή κατά την εκκίνηση του κινητήρα. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται, τότε η αντίσταση μπορεί να μειωθεί στο μηδέν.

Ο *ρότορας προεξέχοντος πόλου* περιλαμβάνει τον αριθμό των προβαλλόμενων πόλων που είναι διατεταγμένοι σε έναν μαγνητικό τροχό. Στην κατασκευή, οι στύλοι μπορούν να προεξέχουν προς τα έξω που είναι σχεδιασμένο με τις χαλύβδινες ελασματοποιήσεις. Αυτοί οι τύποι ρότορες περιλαμβάνουν το μικρότερο αξονικό μήκος και τη μεγάλη διάμετρο. Γενικά, χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές μηχανές με εύρος στροφών 100 RPM-1500 RPM.

2.10 Διαφορές μεταξύ στάτη και ρότορα

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να ληφθούν υπόψη κατά τη σύγκριση στάτη και ρότορα, όπως κίνηση, εξαρτήματα, μόνωση, παροχή, διάταξη περιελίξης, απώλεια τριβής κ.λπ. Κάθε μία από αυτές τις παραμέτρους μπορεί να επηρεάσει τη διαφορά μεταξύ στάτη και ρότορα με συγκεκριμένο τρόπο.



Οι κύριες ωστόσο, διαφορές μεταξύ του στάτη και του ρότορα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

Στάτης	Ρότορας
Είναι το ανενεργό τμήμα	Είναι το περιστροφικό τμήμα
Περιλαμβάνει πυρήνα στάτορα, εξωτερικό πλαίσιο και περιέλιξη	Περιλαμβάνει περιέλιξη και πυρήνα
Χρησιμοποιεί τριφασική παροχή	Χρησιμοποιεί τροφοδοσία DC
Η διάταξη περιέλιξης είναι πολύπλοκη	Η διάταξη περιέλιξης είναι απλή
Η μόνωση είναι περισσότερη	Η μόνωση είναι λιγότερη
Η απώλεια τριβής είναι υψηλή	Η απώλεια τριβής είναι χαμηλή
Η ψύξη είναι εύκολη	Η ψύξη είναι δύσκολη

Πηγή: Ιδίου δημιουργία

2.11 Σύστημα διέγερσης

Σύστημα διέγερσης σε μια ηλεκτρική μηχανή σημαίνει παραγωγή μαγνητικής ροής με διέλευση ρεύματος στην περιέλιξη του πεδίου. Για να διεγείρεται η περιέλιξη πεδίου στον ρότορα της σύγχρονης μηχανής απαιτείται συνεχές ρεύμα. Έτσι, έχουμε (Salah et al., 2014; Piroi et al., 2014):

Σύστημα διέγερσης σε σύγχρονες μηχανές μικρού μεγέθους

Για σύγχρονες μηχανές μικρού μεγέθους (κινητήρας ή γεννήτριας), το συνεχές ρεύμα παρέχεται στην περιέλιξη του πεδίου του δρομέα από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, γνωστή ως διεγέρτης. Ο διεγέρτης είναι τοποθετημένος στον άξονα της σύγχρονης μηχανής. Η έξοδος συνεχούς ρεύματος του διεγέρτη τροφοδοτείται στην περιέλιξη πεδίου της σύγχρονης μηχανής μέσω δακτυλίων ολίσθησης.



Σύστημα διέγερσης σε σύγχρονες μηχανές μεσαίου μεγέθους

Για σύγχρονες μηχανές μεσαίου μεγέθους, χρησιμοποιούνται διεγέρτες εναλλασσόμενου ρεύματος αντί για διεγέρτες συνεχούς ρεύματος. Οι διεγέρτες AC είναι γεννήτριες AC τριών φάσεων. Η έξοδος του διεγέρτη εναλλασσόμενου ρεύματος διορθώνεται και δίνεται στην περιέλιξη του πεδίου του ρότορα της σύγχρονης μηχανής μέσω βουρτσών και δακτυλίων ολίσθησης.

Σύστημα διέγερσης σύγχρονες μηχανές μεγάλου μεγέθους

Για σύγχρονες μηχανές μεγάλου μεγέθους, οι απαιτήσεις διέγερσης γίνονται πολύ μεγάλες. Το πρόβλημα της μεταφοράς τόσο μεγάλης ποσότητας ισχύος μέσω συρόμενων επαφών υψηλής ταχύτητας γίνεται τρομερό. Επομένως, σε σύγχρονες μηχανές μεγάλου μεγέθους, χρησιμοποιούνται συστήματα διέγερσης χωρίς ψήκτρες.

Ένας διεγέρτης χωρίς ψήκτρες είναι μια μικρή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος απευθείας συζευγμένης με το κύκλωμα πεδίου στον στάτορα και το κύκλωμα οπλισμού στον ρότορα. Η τριφασική έξοδος του διεγέρτη AC διορθώνεται με τη βοήθεια ανορθωτή στερεάς κατάστασης.

Η ανορθωμένη έξοδος συνδέεται απευθείας με το τύλιγμα πεδίου της σύγχρονης μηχανής που εξαλείφει τη χρήση δακτυλίων ολίσθησης. Λόγω της απουσίας δακτυλίων ολίσθησης, το σύστημα διέγερσης χωρίς ψήκτρες απαιτεί λιγότερη συντήρηση. Επίσης, χρησιμοποιεί ανορθωτή στερεάς κατάστασης, επομένως μειώνεται και η απώλεια ισχύος.



Κεφάλαιο 3: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση με Μελέτη Περίπτωσης Προσομοίωσης Τριφασικής Ηλεκτρομαγνητικής Μεταβατικής Διαδικασίας Βραχυκυκλώματος Σύγχρονης Γεννήτριας

Η σύγχρονη γεννήτρια, όπως προαναφέρθηκε, είναι ο βασικός εξοπλισμός του σύγχρονου συστήματος ισχύος. Σε περίπτωση σφάλματος τριφασικού βραχυκυκλώματος, η μεταβατική διαδικασία της σύγχρονης γεννήτριας έχει σημαντική επίδραση στην ασφαλή λειτουργία και προστασία της σύγχρονης γεννήτριας. Μετά τη μεγάλη διαταραχή του συστήματος ισχύος, η σύγχρονη γεννήτρια βιώνει την ηλεκτρομαγνητική μεταβατική διαδικασία και την ηλεκτρομηχανική μεταβατική διαδικασία.

Μελετώντας την ηλεκτρομαγνητική μεταβατική διαδικασία της σύγχρονης γεννήτριας παρατηρούμε ότι η διακύμανση της τελικής τάσης, του ρεύματος του στάτη, του ρεύματος διέγερσης, της γωνίας ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής της σύγχρονης γεννήτριας πρέπει να μελετηθούν στην ηλεκτρομαγνητική μεταβατική διαδικασία (Petru & Mazon, 2014). Ως μελέτη περίπτωσης θα επιλεγθεί ένα μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας που είναι ενσωματωμένο σε περιβάλλον προσομοίωσης.

3.1 Τριφασική ανάλυση βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας

Στη περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας, η κανονική λειτουργία και η κατάσταση σφάλματος λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας μπορούν να υπερτεθούν και να επιλυθούν. Αυτό ισοδυναμεί με την προσθήκη μιας τριφασικής τάσης ίσης και αντίστροφης προς την τάση ακροδέκτη της γεννήτριας στην κανονική λειτουργία της γεννήτριας στη θύρα της γεννήτριας. Μετά την προσθήκη τριφασικής τάσης και στα δύο άκρα της περιέλιξης του στάτη, προκειμένου να διατηρηθεί η αλυσίδα ροής της περιέλιξης αμετάβλητη, παράγεται στιγμιαίο ρεύμα στην περιέλιξη του στάτη (Petru & Mazon, 2014). Η διάσπαση αυτών των ρευμάτων έχει ως εξής: οι συνιστώσες διπλασιασμού συνεχούς ρεύματος και συχνότητας του στάτη εξασθενούν στο μηδέν τη στιγμή του βραχυκυκλώματος και το στοιχείο AC του στάτη εξασθενεί σταδιακά από την αρχική τιμή και τελικά εξασθενεί στη σταθερή τιμή. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος του ρότορα θα αποσυντεθεί στο μηδέν, αφήνοντας μόνο το DC του ρότορα.



Καθώς περνά ο καιρός, το ελεύθερο ρεύμα που εμφανίζεται στην κατάσταση βραχυκυκλώματος θα μηδενιστεί λόγω της αντίστασης του στάτη και του ρότορα. Η σταθερά χρόνου θα καθορίσει την εξασθένηση των εξαρτημάτων ρεύματος κάθε περιέλιξης. Όσο μεγαλύτερη είναι η σταθερά χρόνου, τόσο πιο αργή είναι η εξασθένηση και όσο μικρότερη η σταθερά χρόνου, τόσο πιο γρήγορη είναι η εξασθένηση στη σύγχρονη γεννήτρια, υπάρχουν περιελίξεις στον στάτη και τον ρότορα και η σταθερά χρόνου της περιέλιξης σχετίζεται με την επαγωγή, τότε η σταθερά χρόνου εκφράζεται ως ο λόγος της τιμής της επαγωγής περιέλιξης προς την αντίσταση περιέλιξης.

Η μεταβατική διαφορική εξίσωση της περιέλιξης εξηγείται από τον αρνητικό αριθμό του λόγου της αντίστασης της περιέλιξης προς την επαγωγή της περιέλιξης, δηλαδή τη χαρακτηριστική ρίζα της διαφορικής εξίσωσης. Όταν υπάρχει μαγνητική σύζευξη σε γειτονικές περιελίξεις, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αμοιβαία επαγωγή για τον υπολογισμό της σταθεράς χρόνου, διαφορετικά θα επηρεάσει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος (Maljkovic et al., 2013).

Υπό την προϋπόθεση της διασφάλισης της σύνδεσης σταθερής ροής, μελετώντας το ελεύθερο ρεύμα που παράγεται κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι σύμφωνα με τη σταθερά χρόνου διέγερσης του ρότορα T_d , μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι εξασθενεί σύμφωνα με τη σταθερά χρόνου της περιέλιξης διέγερσης που οι συνιστώσες DC και διπλασιασμού συχνότητας των περιελίξεων του στάτη αντιστοιχούν στις θεμελιώδεις συνιστώσες συχνότητας του ρεύματος του δρομέα.

Η χρονική σταθερά τ προσδιορίζεται από τον λόγο της επαγωγής της περιέλιξης του στάτη προς την αντίσταση λαμβάνοντας υπόψη την αμοιβαία επαγωγή της περιέλιξης διέγερσης. Όταν αυτή η μαγνητική ροή διέρχεται από τον διαμήκη άξονα του ρότορα, η ισοδύναμη αντίδραση της περιέλιξης του στάτη είναι X_d . όταν διέρχεται από τον οριζόντιο άξονα, είναι X_q . Η διαδικασία υπολογισμού του ρεύματος του στάτη και του ρότορα έχει ως εξής, πρώτα υπολογίζεται η συνιστώσα του άξονα d , q του ρεύματος του στάτη και στη συνέχεια υπολογίζεται το ρεύμα του ρότορα με την ενσωμάτωση του τύπου (Petru & Mazon, 2014).



Η συνιστώσα του άξονα d του ρεύματος του στάτη είναι:

$$i_d = \frac{E_q[0]}{X_d} + \left(\frac{E'_q[0]}{X'_d} - \frac{E_q[0]}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \left(\frac{E_q[0]}{X_d} - \frac{E_q[0]}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right) - \frac{V[0]}{X'_q} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cos(\omega t + \delta_0). \quad (1)$$

Η συνιστώσα του άξονα q του ρεύματος του στάτη είναι:

$$i_q = -\frac{E'_d[0]}{X'_q} \exp\left(-\frac{t}{T'_q}\right) + \frac{V[0]}{X'_q} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \sin(\omega t + \delta_0). \quad (2)$$

Μέσω του μετασχηματισμού φινιρίσματος του παραπάνω τύπου, το ρεύμα στην περίελιξη του ρότορα μπορεί να ληφθεί όπως φαίνεται στην Εξ. (3):

$$i_f = i_f[0] + \left[\frac{X_{ad}X_D V[0] \cos \delta_0}{(X_f X_D - X_{ad}^2) X'_d} - \frac{(X_d - X'_d) V[0] \cos \delta_0}{X_{ad} X'_d} \right] \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \frac{(X_d - X'_d) V[0] \cos \delta_0}{X_{ad} X'_d} \exp\left(-\frac{t}{T_d}\right) - \frac{X_{ad} X_D V[0]}{(X_f X_D - X_{ad}^2) X'_d} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cos(\omega t + \delta_0). \quad (3)$$

ένα ρεύμα φάσης του στάτη είναι:



$$\begin{aligned}
 ia = & -\frac{E_q[0]}{X_d'} \cos(\omega t + a_0) - \left(\frac{E_q[0]}{X_d'} - \frac{E_q'[0]}{X_d'} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_d'}\right) \cos(\omega t + a_0) \\
 & - \left(\frac{E_q[0]}{X_d'} - \frac{E_q'[0]}{X_d'} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_d'}\right) \cos(\omega t + a_0) - \frac{E_d''}{X_q'} \exp\left(-\frac{t}{T_q'}\right) \sin(\omega t + a_0) \\
 & + \frac{V[0]}{2} \left(\frac{1}{X_d'} + \frac{1}{X_q'} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cos(\delta - a_0) \\
 & + \frac{V[0]}{2} \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_q'} \right) \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cos(2\omega t + \delta + a_0),
 \end{aligned}$$

όπου:

X_d είναι η σύγχρονη αντίδραση του ευθύ άξονα περιέλιξης του στάτη (διαμήκης άξονας).

X_q είναι η σύγχρονη αντίδραση του εγκάρσιου άξονα περιέλιξης στάτορα (εγκάρσιος άξονας).

X_l είναι η αντίδραση αντίδρασης οπλισμού μεταξύ των περιελίξεων του διαμήκους άξονα.

X_{ad} είναι η αντίδραση του διαμήκους άξονα του ρότορα της γεννήτριας.

X_{aq} είναι η αντίδραση του οριζόντιου άξονα του ρότορα της γεννήτριας.

X_d, X_q αντιπροσωπεύουν την αντίδραση των περιελίξεων αποσβεστήρα d και q.

X_d είναι η μεταβατική αντίδραση του διαμήκους άξονα.

X_q είναι η δευτερεύουσα μεταβατική αντίδραση στον διαμήκη άξονα.

E_q' είναι η παροδική ηλεκτροκινητική δύναμη του εγκάρσιου άξονα.

E_q'' είναι η δευτερεύουσα μεταβατική ηλεκτροκινητική δύναμη του εγκάρσιου άξονα.

E_d είναι η μεταβατική ηλεκτροκινητική δύναμη του διαμήκους άξονα.

$E_q[0]$ είναι η στιγμιαία ηλεκτροκινητική δύναμη χωρίς φορτίο πριν από βραχυκύκλωμα.

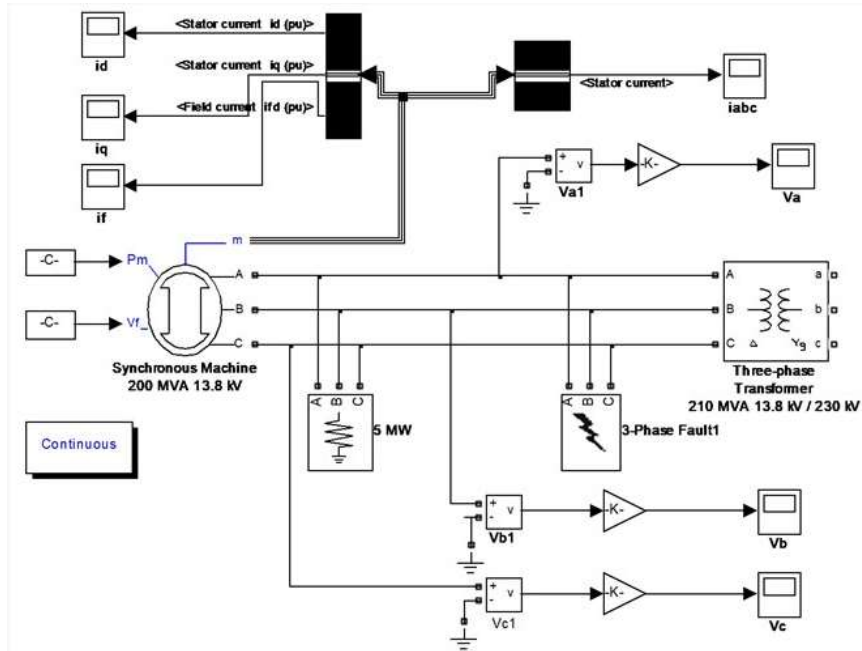
$V[0]$ είναι η τάση ακροδεκτών πριν από το βραχυκύκλωμα.



3.2 Τριφασική προσομοίωση βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας

3.2.1 Τριφασικό μοντέλο βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας

Ένα τριφασικό μοντέλο προσομοίωσης βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας έχει δημιουργηθεί σε περιβάλλον προσομοίωσης. Το μοντέλο φαίνεται στο Σχ. 16 Με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink από το Matlab:



Σχ. 16 Μοντέλο προσομοίωσης τριφασικού βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας

3.3. Ρύθμιση παραμέτρων μοντέλου προσομοίωσης

Οι βασικές παράμετροι της σύγχρονης γεννήτριας είναι οι εξής (Spunei & Piroi, 2012):

ονομαστική ισχύς είναι

$$P_N = 200 \text{ MW}, U_N = 13.8 \text{ kV}, f =$$

$$50 \text{ Hz}, x_d = 1.0, x'_d = 0.3, x''_d = 0.21, x_q = 0.6, x'_q = 0.31, x_1 = 0.15, T'_d = 1.64 \text{ s}, T''_d = 0.34 \text{ s}, T''_{q0} = 1.4 \text{ s}, R_s = 0.005.$$

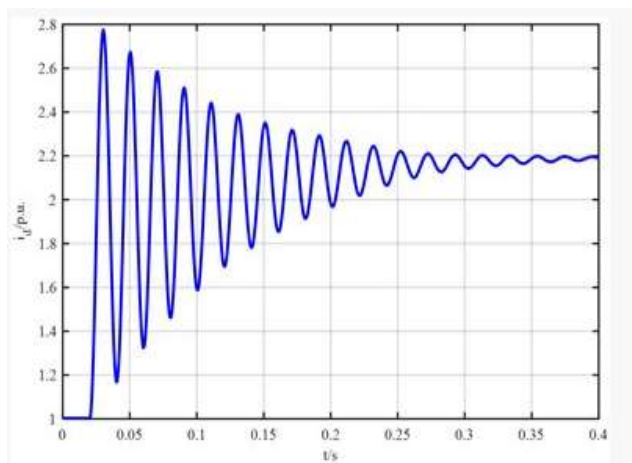


Καθιερώνεται το μοντέλο προσομοίωσης και τροποποιούνται οι παράμετροι προσομοίωσης. Μέσω της μονάδας Powergui, ο χρόνος σφάλματος ορίζεται σε 0,02025s, το βήμα προσομοίωσης είναι 0,01s, ο χρόνος προσομοίωσης ορίζεται σε 1s και ο αλγόριθμος ode23tb επιλέγεται για την επίλυση του προβλήματος (Spruij & Piroi, 2012).

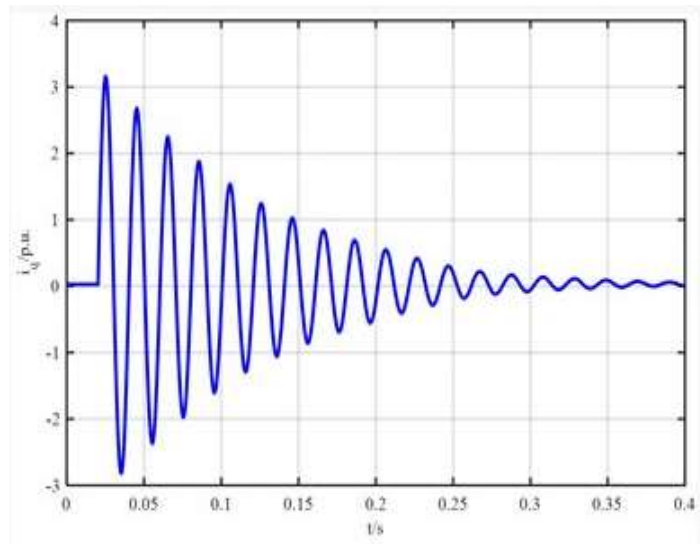
3.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Η κυματομορφή του ρεύματος άμεσου άξονα του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στο Σχ. 17. Μπορεί να φανεί από το Σχ. 2 ότι το ρεύμα απευθείας άξονα του στάτη αυξάνεται απότομα τη στιγμή του τριφασικού βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας και του Το μέγιστο πλάτος ρεύματος είναι 9 p.u., Αφού φτάσει στο μέγιστο ρεύμα, το πλάτος εξασθενεί γρήγορα με σταθερά χρόνο και τελικά εξασθενεί στο 0 p.u.

Η κυματομορφή του ρεύματος εγκάρσιας άξονα του στάτη i_q στο Σχ. 18 δείχνει ότι όταν συμβαίνει τριφασικό βραχυκύκλωμα σε τριφασική συσκευή σφάλματος, το ρεύμα διασταύρωσης του στάτη αυξάνεται γρήγορα στο πλάτος ρεύματος, το μέγιστο ρεύμα είναι 3,02 p.u., τότε εξασθενεί γρήγορα προς τα πάνω και προς τα κάτω σε μηδενική τιμή, και το ρεύμα εγκάρσιας άξονα του στάτη εξασθενεί στο 0 p.u. λόγω αντίστασης.



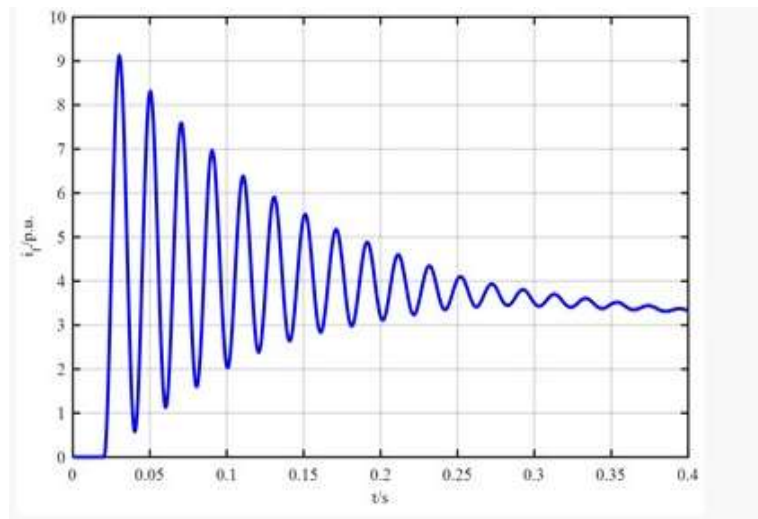
Σχ. 17. Το διάγραμμα κυματομορφής του ρεύματος ευθύγραμμου άξονα στάτη



Σχ. 18. Η κυματομορφή του ρεύματος εγκάρσιας άξονα του στάτη

Η κυματομορφή του ρεύματος διέγερσης i_f φαίνεται στο Σχ. 19. Τη στιγμή του βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας, το ρεύμα διέγερσης δεν διασπάται για ένα χρονικό διάστημα μετά το σφάλμα και αυξάνεται γρήγορα στην τρέχουσα τυπική τιμή 2.8, που οφείλεται στην εξασθένηση του ρεύματος περιέλιξης απόσβεσης. Προκειμένου να διατηρηθεί η διατήρηση της ροής, η περιέλιξη διέγερσης αυξάνει το ρεύμα και το ρεύμα διέγερσης συνεχίζει να διασπάται αφού αυξηθεί στο πλάτος, αλλά δεν θα εξασθενήσει στο 0.

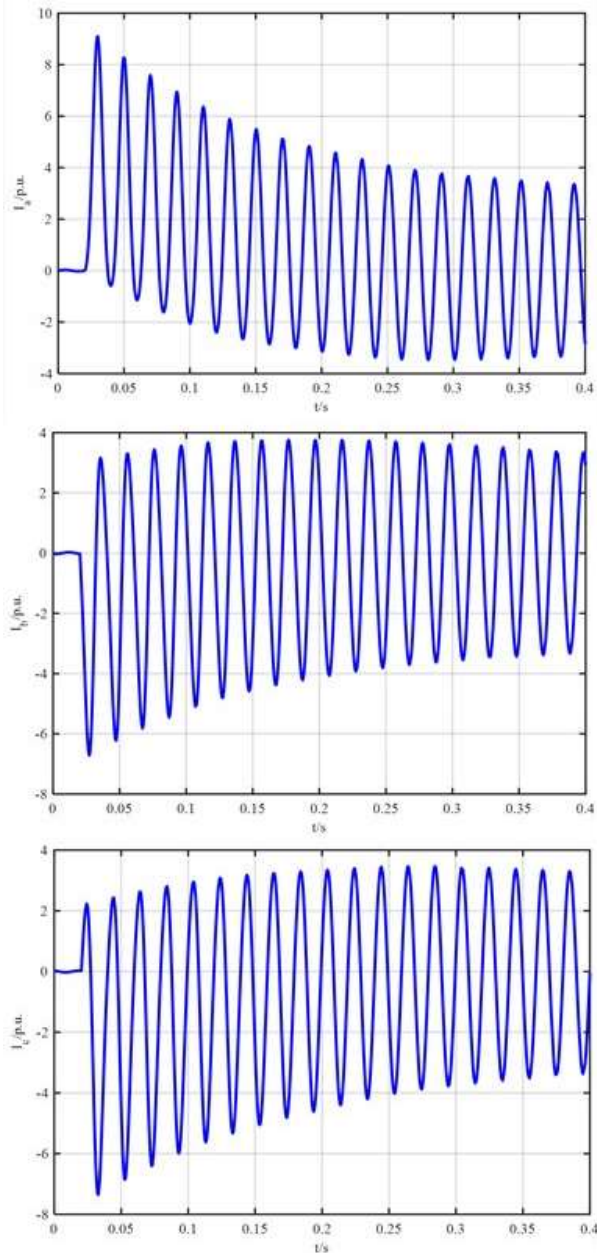




Σχ. 19. Το διάγραμμα κυματομορφής του ρεύματος διέγερσης i_f

Η τριφασική κυματομορφή ρεύματος του στάτη όταν η σύγχρονη γεννήτρια είναι βραχυκυκλωμένη φαίνεται στο Σχ. 20. Το πλάτος της τριφασικής κυματομορφής είναι ίσο και η διαφορά φάσης είναι 120 μοίρες πριν από την αστοχία. Σε περίπτωση σφάλματος βραχυκυκλώματος τριών φάσεων, η κυματομορφή του ρεύματος φάσης a μετακινείται πρώτα στον άξονα συντεταγμένων y στον θετικό μισό άξονα και μετά σταδιακά μετακινείται στον άξονα συντεταγμένων y στον αρνητικό μισό άξονα. Η κατεύθυνση κίνησης της β φάσης και της γ φάσης είναι αντίθετη από αυτή μιας φάσης. Το τριφασικό πλάτος είναι ίσο, η διαφορά φάσης εξακολουθεί να είναι 120 μοίρες και το τριφασικό ρεύμα του στάτη τελικά εξασθενεί στην τιμή σταθερής κατάστασης (Zhu & Jin, 2013).





Σχ. 20. Η κυματομορφή προσομοίωσης του ρεύματος του στάτη i_a , i_b , i_c κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας



3.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων Μελέτης Περίπτωσης

Από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι όταν η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί κανονικά, δεν υπάρχουν ρεύματα άμεσου άξονα και τετράγωνου άξονα. Τη στιγμή του βραχυκυκλώματος, τα ρεύματα κάθετου άξονα και οριζόντιου άξονα αυξάνονται σταδιακά και αποσυντίθενται μετά από ένα χρονικό διάστημα μετά από βραχυκύκλωμα (Zhao & Feng, 2010). Το ρεύμα συνεχούς άξονα αυξάνεται ταχύτερα από το ρεύμα του άξονα τετραγωνισμού και η εξασθένηση είναι επίσης πιο αργή από τον άξονα τετραγωνισμού.

Ταυτόχρονα, το ρεύμα διέγερσης όχι μόνο δεν εξασθενεί αλλά αυξάνεται απότομα μετά από βραχυκύκλωμα. Το κύριο αποτέλεσμα είναι ότι το συνεχές ρεύμα εξασθενεί γρήγορα. Η περιέλιξη διέγερσης εξασθενεί το συνεχές ρεύμα και αυξάνει το ρεύμα διέγερσης για να αντισταθμίσει την εξασθένηση του ρεύματος συνεχούς ρεύματος, διατηρώντας έτσι τη διατήρηση της ροής (Zhao & Feng, 2010). Τη στιγμή του βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας, το ρεύμα του στάτη περιέχει τρία στοιχεία: θεμελιώδη συχνότητα, συχνότητα DC και στοιχείο διπλασιασμού συχνότητας.

Όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα βραχυκυκλώματος τριών φάσεων, το ρεύμα φάσης A αυξάνει πρώτα την κυματομορφή και μετά σταδιακά κινείται προς τα κάτω λόγω εξασθένησης, ενώ η κυματομορφή του ρεύματος φάσης B, Γ είναι αντίθετη από το ρεύμα της φάσης A. Το πλάτος του τριφασικού ρεύματος είναι ίσο, η διαφορά φάσης είναι αμετάβλητη, Η τριφασική τάση του στάτη μειώνεται απευθείας στο μηδέν από την τιμή πριν από τη στιγμή βραχυκυκλώματος (Zhao & Feng, 2010).

Γενικά, το τριφασικό βραχυκύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας έχει επίδραση στην τάση και το ρεύμα, γεγονός που κάνει την τάση να πέφτει απευθείας στο μηδέν. Για το ρεύμα, η διαδικασία είναι πιο περίπλοκη, αλλά το συνολικό ρεύμα αυξάνεται.

Το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης που μελετήθηκε προηγουμένως είναι βολικό για την τροποποίηση διαφόρων παραμέτρων αντίδρασης και σταθερών χρόνου της σύγχρονης γεννήτριας και μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια την ηλεκτρομαγνητική μεταβατική διαδικασία της σύγχρονης γεννήτριας. Δίνονται οι



εκφράσεις του ρεύματος του στάτη και του ρεύματος του ρότορα της σύγχρονης γεννήτριας, οι οποίες θέτουν τα θεμέλια για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την επίδραση διαφόρων αντιδράσεων στο ρεύμα βραχυκυκλώματος (Zhu & Jin, 2013).

Κεφάλαιο 4: Εικονικές σύγχρονες γεννήτριες: Μια έρευνα και νέες προοπτικές

4.1 Βασικές αρχές και έννοιες

Η ιδέα του VSG βασίζεται αρχικά στην αναπαραγωγή της δυναμικής ιδιότητας μιας πραγματικής σύγχρονης γεννήτριας (SG) για την ισχύ μονάδων DG/ΑΠΕ που βασίζονται σε ηλεκτρονικά, προκειμένου να κληρονομήσουν τα πλεονεκτήματα ενός SG στη βελτίωση της σταθερότητας. Η αρχή του VSG μπορεί να είναι εφαρμόζεται είτε σε μία μόνο DG είτε σε ομάδα DG. Ο πρώτος αίτηση μπορεί να είναι πιο κατάλληλη για μεμονωμένους ιδιοκτήτες DG, ενώ η δεύτερη εφαρμογή είναι πιο οικονομική και ευκολότερη έλεγχος από την πλευρά του χειριστή του δικτύου (Albu et al., 2011).

Η δυναμική ιδιότητες ενός SG παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής ενεργών και άεργος ισχύς, εξάρτηση της συχνότητας του δικτύου από τον ρότορα ταχύτητα, και τονίζοντας την περιστρεφόμενη μάζα και τις περιελίξεις απόσβεσης αποτέλεσμα καθώς και σταθερή λειτουργία με υψηλό επίπεδο παραλληλισμού.

Το VSG αποτελείται από αποθήκευση ενέργειας, μετατροπέα και χειριστήριο μηχανισμός. Το VSG βρίσκεται συνήθως μεταξύ ένα δίαυλο DC/πηγή/DG και το δίκτυο. Το VSG εμφανίζει την πηγή DC σε το πλέγμα ως SG ως προς την ιδιότητα αδράνειας και απόσβεσης.

Στην πραγματικότητα, η εικονική αδράνεια προσομοιώνεται στο σύστημα ελέγχοντας την ενεργή ισχύ μέσω του μετατροπέα σε αντίστροφη αναλογία της ταχύτητας του ρότορα. Εκτός από το θόρυβο υψηλότερης συχνότητας λόγω εναλλαγή των τρανζίστορ ισχύος του μετατροπέα, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ της ηλεκτρικής εμφάνισης ενός ηλεκτρομηχανικού SG και ηλεκτρικό VSG, από την άποψη του δικτύου (Albu et al., 2011).

Δεδομένου ότι το VSG θα πρέπει να μπορεί να εγχύει ή να απορροφά ισχύ, το ονομαστική κατάσταση φόρτισης (SOC) της αποθήκευσης ενέργειας στο VSG θα



πρέπει να λειτουργεί στο 50% περίπου της ονομαστικής του χωρητικότητας σε ακίνητη κατάσταση. Οι καταστάσεις λειτουργίας VSG μπορούν να οριστούν με βάση σχετικά με την κατάσταση SOC σύμφωνα με το καθορισμένο κάτω και άνω όρια (π.χ. 20% και 80% της μέγιστης χρέωσης. Όταν η SOC είναι μεταξύ περίπου αυτών των ορίων, το VSG λειτουργεί στην ενεργό του (VSG), όταν η ενέργεια στο σύστημα υπερβαίνει, το VSG είναι εργασία στη λειτουργία εικονικής φόρτωσης. Τα όρια μπορούν να καθοριστούν με βάση τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας (Karapanos et al., 2010).

Δεδομένου ότι, στην πραγματικότητα ο αρχικός ρυθμός αλλαγής συχνότητας παρέχει απλώς ένα σήμα σφάλματος (με ισορροπία μηδέν), θα ανταλλάσσεται ισχύς μόνο κατά τη μεταβατική κατάσταση χωρίς απαραίτητα να επιστρέψει πίσω τη συχνότητα του πλέγματος στην ονομαστική τιμή.

Σε αυτό το ζήτημα, θα πρέπει να προστεθεί ένα τμήμα πτώσης συχνότητας (KP). Το KP μιμείται το φαινόμενο περιελίξεων αποσβεστήρα σε ένα SG, και αντιπροσωπεύει τη γραμμική απόσβεση. Πρέπει να επιλεγεί έτσι ότι το PVSG να είναι ίσο με την ονομαστική ισχύ του VSG όταν η απόκλιση συχνότητας είναι στην καθορισμένη μέγιστη τιμή.

Στην πραγματικότητα, η συχνότητα του δικτύου και η πτώση της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να είναι μειώνεται αυξάνοντας την εικονική μάζα αλλά τις σύγχρονες μονάδες μπορεί να τείνει σε ταλάντωση τροχού πόλου. Θεωρώντας απλώς ότι η εικονική αδράνεια (KI) μειώνει τη μέγιστη απόκλιση της ταχύτητας του ρότορα μετά από μια διαταραχή (Βουρνάς & Κονταξής, 2010). Ωστόσο η φυσική συχνότητα και ο λόγος απόσβεσης του συστήματος μπορεί να μειωθεί.

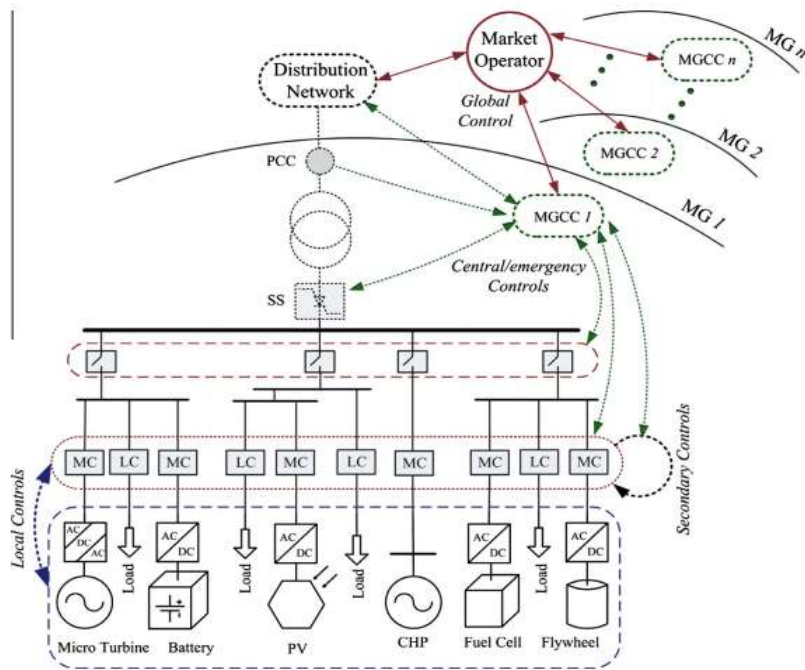
Συνοπτικά, η εικονική μάζα αντισταθμίζει τις πτώσεις συχνότητας δικτύου και ο εικονικός αποσβεστήρας καταστέλλει την ταλάντωση του πλέγματος έτσι αυτά τα χαρακτηριστικά είναι εξίσου αποτελεσματικές με τις ηλεκτρομηχανικές σύγχρονες μηχανές. Το KP και το KI είναι αρνητικά σταθερά κέρδη και θα πρέπει να καθοριστούν έτσι ότι το VSG ανταλλάσσει τη μέγιστη ενεργή του ισχύ όταν αλλάζει η μέγιστη καθορισμένη διακύμανση συχνότητας και ρυθμός συχνότητας.



4.2 Ρόλος των VSG

Ο έλεγχος είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες για την ανάπτυξη ενός συστήματος MG (Motor-Generator). Ένα MG έχει μια ιεραρχική δομή ελέγχου με διαφορετικά στρώματα. Απαιτεί αποτελεσματική χρήση προηγμένου ελέγχου τεχνικές σε όλα τα επίπεδα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι MGs θα έπρεπε να μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα αλλά και να αλληλεπιδρούν με το κύριο πλέγμα. Σε λειτουργία απομόνωσης (island mode), για να αντιμετωπισθούν οι παραλλαγές και να εκτελεσθεί ρύθμιση ενεργού ισχύος/συχνότητας και ρύθμιση άεργου ισχύος/τάσης, τα MG πρέπει να χρησιμοποιήσουν κατάλληλους βρόχους ελέγχου (Nica & Enache, 2007).

Σε αυτή τη λειτουργία, το MG λειτουργεί σύμφωνα σύμφωνα με τα διαθέσιμα πρότυπα και οι υφιστάμενοι έλεγχοι πρέπει να είναι κατάλληλες εργασίες για την παροχή των απαιτούμενων ενεργών και αντιδραστικών ισχύος καθώς και να παρέχει σταθερότητα τάσης και συχνότητας. Ένα γενικό σχέδιο για τα χειριστήρια λειτουργίας σε ένα MG φαίνονται στο Σχ. 21.



Σχ. 21. Ένα γενικό σχήμα για τα επίπεδα ελέγχου MGs.



Παρόμοια με τα συμβατικά συστήματα ισχύος, ένα MG μπορεί να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας διάφορους βρόχους ελέγχου. Οι βρόχοι ελέγχου στα MG μπορεί να ταξινομηθούν κυρίως σε τέσσερα επίπεδα ελέγχου: τοπικό, δευτερεύον, κεντρικό/έκτακτης ανάγκης και παγκόσμιος έλεγχος. Ο τοπικός έλεγχος ασχολείται με τον αρχικό και κύριο έλεγχο, όπως βρόχοι ελέγχου ρεύματος και τάσης στις μικροπηγές (Albu et al., 2011). Ο δευτερεύων έλεγχος διασφαλίζει ότι η συχνότητα και η μέση απόκλιση τάσης του MG ρυθμίζεται προς το μηδέν μετά από κάθε αλλαγή φορτίου ή παροχής. Είναι επίσης υπεύθυνο για τις εσωτερικές βοηθητικές υπηρεσίες.

Ο κεντρικός/έκτακτης έλεγχος εκτελείται από το MGCC που διασυνδέεται επίσης μεταξύ του MG και άλλων MG ως ανώτερα δίκτυα διανομής (όπως το κύριο δίκτυο). Αυτό το επίπεδο ελέγχου καλύπτει όλα τα πιθανά συστήματα ελέγχου έκτακτης ανάγκης και τα ειδικά σχέδια προστασίας για τη διατήρηση της σταθερότητας και της διαθεσιμότητας του MG στο πρόσωπο απρόβλεπτων. Οι έλεγχοι έκτακτης ανάγκης εντοπίζουν κατάλληλα προληπτικά και διορθωτικά μέτρα που μετριάζουν τις επιπτώσεις των κρίσιμων απρόβλεπτα. Ο παγκόσμιος έλεγχος συντονίζει τις μονάδες MGCC σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο MGs. Ο παγκόσμιος έλεγχος ως συγκεντρωτικός έλεγχος επιτρέπει τη λειτουργία της MG σε βέλτιστο οικονομικό σημείο και οργανώνει τη σχέση μεταξύ MG και του δικτύου διανομής καθώς και άλλα συνδεδεμένα MG. Σε αντίθεση με τον τοπικό έλεγχο, λειτουργώντας χωρίς επικοινωνία, ο παγκόσμιος έλεγχος μπορεί να χρειάζεται κανάλια επικοινωνίας (Sohn et al., 2013).

Κατά τη λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο, όλοι οι DG και οι μετατροπείς στο MG χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό σήμα του δικτύου ως αναφορά για την τάση και συχνότητα. Σε αυτήν τη λειτουργία, δεν είναι δυνατή η επισήμανση της συνεισφοράς VSG στην αδράνεια του δικτύου, λόγω διαφορών στο μέγεθος του συστήματος. Ωστόσο, στη λειτουργία απομόνωσης (island mode), οι DG χάνουν αυτήν την αναφορά. Σε αυτή την περίπτωση οι DG μπορούν να χρησιμοποιούν τις μονάδες VSG και μπορούν να συντονίζουν για τη διαχείριση τους, ταυτόχρονη λειτουργία χρησιμοποιώντας μία από τις αποτελεσματικές τεχνικές ελέγχου όπως έλεγχος κοινής χρήσης ρεύματος/τροφοδοσίας και γενικευμένες τεχνικές ελέγχου πτώσης συχνότητας και τάσης (Albu et al., 2011).



Η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ισχύος είναι μία από αυτές τις πιο σημαντικές απαιτήσεις των νησιωτικών τρόπων λειτουργίας. Στη λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο, το MG ανταλλάσσει ισχύ σε ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο για να καλύψει την ισορροπία, ενώ στη λειτουργία island, η MG θα πρέπει να καλύψει την ισορροπία για την τοπική προσφορά και ζήτηση χρησιμοποιώντας τη μείωση της παραγωγής ή την απόρριψη φορτίου.

Κατά τη λειτουργία απομόνωσης (island mode), εάν υπάρχουν τοπικές αλλαγές φορτίου, τοπικά οι DG είτε θα αυξήσουν είτε θα μειώσουν την παραγωγή τους για να διατηρήσουν σταθερό το ενεργειακό ισοζύγιο, όσο το δυνατόν περισσότερο. Σε μια island λειτουργία, ένα MG λειτουργεί αυτόνομα, επομένως πρέπει να έχει αρκετή τοπική παραγωγή για την κάλυψη των απαιτήσεων, τουλάχιστον για την κάλυψη των ευαίσθητων φορτίων. Σε αυτή τη λειτουργία, τα συστήματα VSG ενδέχεται να έχουν σημαντικό ρόλο για διατήρηση της ενεργού και άεργου ισχύος (Albu et al., 2011). Χωρίς VSG, οι DG μονάδες ενδέχεται να μην ανταποκριθούν. Αυτό δεν είναι πρόβλημα στη λειτουργία που συνδέεται με το δίκτυο, γιατί σε αυτήν την κατάσταση, το κύριο πλέγμα αντισταθμίζει τις αυξήσεις ή μειώσεις του φορτίου.

Αμέσως μετά τη λειτουργία απομόνωσης (island mode), η τάση, η γωνία φάσης και η συχνότητα σε κάθε DG στο MG αλλάζουν. Για παράδειγμα, η τοπική συχνότητα θα μειωθεί εάν το MG εισάγει ισχύ από το κεντρικό δίκτυο σε λειτουργία συνδεδεμένο στο δίκτυο, αλλά θα αυξηθεί εάν το MG εξάγει ισχύ στο κύριο δίκτυο στη λειτουργία που συνδέεται με το δίκτυο.

Η διάρκεια της λειτουργίας απομόνωσης (island mode), θα εξαρτηθεί από το μέγεθος των συστημάτων αποθήκευσης. Σε αυτή την περίπτωση έχουν μέγεθος ώστε να διατηρούν την ενεργειακή ισορροπία του δοκιμασμένου δικτύου για λίγα λεπτά. Ο έλεγχος VSG για τις λειτουργίες απομόνωσης (island mode), και σύνδεσης στο δίκτυο είναι διαφορετικοί, καθώς η λειτουργία απομόνωσης (island mode), πρέπει να ορίσει τη δική της συχνότητα και τάση για τη διατήρηση της λειτουργίας (Albu et al., 2011). Όταν το κύριο πλέγμα έχει επιστρέψει στο κανονική λειτουργία, η συχνότητα και η τάση του μικροδικτύου πρέπει να συγχρονιστεί και στη συνέχεια να επανασυνδεθεί στο κύριο δίκτυο.



4.3 Νέες Προοπτικές VSG

Σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής χύδην, στους οποίους κυριαρχούν οι σύγχρονες μηχανές, οι μονάδες καταναμημένης γεννήτριας (DG) έχουν είτε πολύ μικρή ή καθόλου περιστρεφόμενη μάζα και ιδιότητες απόσβεσης. Με την αύξηση του επιπέδου διείσδυσης των DG, αυξάνεται η επίδραση της χαμηλής αδράνειας και της απόσβεσης στη σταθερότητα του δικτύου και στη δυναμική απόδοση. Μια λύση για τη βελτίωση της σταθερότητας ενός τέτοιου δικτύου είναι η παροχή εικονικής αδράνειας από εικονικές σύγχρονες γεννήτριες (VSG) που μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας μαζί με έναν μετατροπέα ισχύος και έναν κατάλληλο μηχανισμό ελέγχου (Karapanos et al., 2010).

Εισαγωγικά, η χωρητικότητα των εγκατεστημένων καταναμημένων γεννητριών που βασίζονται σε μετατροπείς (DG) στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ραγδαία και στοχεύει υψηλό επίπεδο διείσδυσης για τις επόμενες δύο δεκαετίες.

Για παράδειγμα, μόνο στην Ιαπωνία, η ηλεκτρική ενέργεια φωτοβολταϊκών 14,3GW σχεδιάζεται να συνδεθεί στο δίκτυο έως το 2020 και θα αυξηθεί στα 53 GW έως το 2030. Σε ευρωπαϊκές χώρες, ΗΠΑ, Κίνα και Ινδία, επίσης, υπάρχουν σημαντικοί στόχοι θεωρούνται για χρήση των DG και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα συστήματα ισχύος τους έως τις επόμενες δύο δεκαετίες (Karapanos et al., 2011).

Σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής χύδην, στους οποίους κυριαρχεί η σύγχρονη μηχανή, οι μονάδες DG /ΑΠΕ έχουν είτε πολύ μικρή είτε καθόλου περιστρεφόμενη μάζα (που είναι η κύρια πηγή αδράνειας) και ιδιότητα απόσβεσης. Η εγγενής κινητική ενέργεια (αδράνεια ρότορα) και η ιδιότητα απόσβεσης (λόγω μηχανικής τριβής και ηλεκτρικών απωλειών σε περιελίξεις στάτη, πεδίου και αποσβεστήρα) των χύδην σύγχρονων γεννητριών παίζουν σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα του δικτύου.

Με την αύξηση του επιπέδου διείσδυσης των DG/ΑΠΕ, αυξάνεται η επίδραση της χαμηλής αδράνειας και της απόσβεσης στη δυναμική απόδοση και τη σταθερότητα του δικτύου. Αύξηση τάσης λόγω αντίστροφης ισχύος από φωτοβολταϊκές παραγωγές, υπερβολική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο λόγω πλήρους παραγωγής από τις DG/ΑΠΕ, διακυμάνσεις ισχύος λόγω μεταβλητής φύσης των ΑΠΕ



και υποβάθμιση της ρύθμισης συχνότητας (ειδικά στα νησιωτικά μικροδίκτυα) μπορεί να θεωρηθεί ως κάποια αρνητικά αποτελέσματα του αναφερόμενου ζητήματος.

Μια λύση για τη σταθεροποίηση ενός τέτοιου πλέγματος είναι η παροχή πρόσθετης αδράνειας, ουσιαστικά. Μια εικονική αδράνεια μπορεί να δημιουργηθεί για DG/ΑΠΕ χρησιμοποιώντας βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας μαζί με έναν μετατροπέα/μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος και έναν κατάλληλο μηχανισμό ελέγχου. Αυτή η έννοια είναι γνωστή ως εικονική σύγχρονη γεννήτρια (VSG) ή εικονική σύγχρονη μηχανή (VISMA) (Karapanos et al., 2010).

Στη συνέχεια, οι μονάδες θα λειτουργούν σαν μια σύγχρονη γεννήτρια, παρουσιάζοντας ιδιότητα αδράνειας και απόσβεσης των συμβατικών σύγχρονων μηχανών για μικρά χρονικά διαστήματα (σε αυτή την εργασία, η σημείωση "VSG" χρησιμοποιείται για την αναφερόμενη έννοια). Ως αποτέλεσμα, η έννοια της εικονικής αδράνειας μπορεί να παρέχει τη βάση για τη διατήρηση μεγάλου μεριδίου DG/ΑΠΕ στα μελλοντικά δίκτυα χωρίς να διακυβεύεται η σταθερότητα του συστήματος.

Η χρήση σημαντικού αριθμού VSG στα συστήματα ισχύος προσθέτει εκ νέου τεχνικές προκλήσεις. Καθώς η ηλεκτρική βιομηχανία επιδιώκει να ενσωματώσει αξιόπιστα μεγάλες ποσότητες DG/ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε ρυθμιζόμενο περιβάλλον, θα απαιτηθεί σημαντική προσπάθεια για να μπορέσουν να φιλοξενούν και να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις εγκατεστημένες μονάδες VSG (Karapanos et al., 2011).

Μια βασική πτυχή είναι ο τρόπος χειρισμού των αλλαγών στην τοπολογία που προκαλούνται από τη διεύθυνση πολλών VSG ως νέες συσκευές ελέγχου στο δίκτυο και πώς να κάνει κανείς το ηλεκτρικό δίκτυο ισχυρό και ικανό να επωφεληθεί της πιθανής ευελιξίας των κατανεμημένων VSG. Για παράδειγμα, παρουσιάζονται εν συντομία ορισμένες σημαντικές προκλήσεις και ένα πεδίο για περαιτέρω έρευνα.

4.3.1. Βελτίωση τεχνικών υπολογιστών και τεχνολογικών μετρήσεων

Η ικανότητα του VSG να ανταποκρίνεται στις γρήγορες αλλαγές συχνότητας δικτύου εξαρτάται από προϋπάρχουσες γνώσεις για τη λειτουργία του δικτύου και μετρήσεις



συχνότητας σε πραγματικό χρόνο. Τα πιο κρίσιμα για την ποιότητα του αλγορίθμου VSG είναι το μπλοκ εκτίμησης συχνότητας και η κατάσταση εκτίμησης χρέωσης.

Οποιαδήποτε βελτίωση στις μεθόδους ελέγχου VSG χρειάζεται καλύτερο υπολογισμό συχνότητας και/ή βελτιωμένο φιλτράρισμα και μονάδες ανίχνευσης στην πλατφόρμα υλικού VSG. Οι προσπάθειες σχεδιασμού πιο ευέλικτων και αποτελεσματικών VSG στοχεύουν στην ανάπτυξη υπολογιστικών τεχνικών και παρακολούθηση/μέτρηση τεχνολογίες για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης (Maljkovic et al., 2013). Οι προηγμένες υπολογιστικές μέθοδοι για την πρόβλεψη της κατάστασης του δικτύου και οι βελτιωμένες τεχνολογίες μέτρησης ανοίγουν νέους τρόπους ελέγχου του σύστημα ισχύος μέσω μονάδων VSG.

Όπως αναφέρθηκε, η ακρίβεια στην παρακολούθηση συχνότητας εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο PLL και αυτό το ζήτημα επηρεάζει άμεσα την απόδοση του VSG. Για αυτό το λόγο απαιτείται να αναπτυχθεί μια πιο ακριβή εναλλακτική λύση για να είναι σημαντικό το PLL. Όμως, σε αυτή την περίπτωση η καθυστέρηση που επιβάλλεται από τα φίλτρα και τα υπάρχοντα κανάλια μέτρησης θα πρέπει να παρατηρηθεί προσεκτικά. Η καθυστέρηση, ειδικά στα κανάλια ADC και DAC, είναι ένας σημαντικός λόγος υποβάθμισης της απόδοσης του VSG και ακόμη και ανακρίβειών στα περιβάλλοντα προσομοίωσης (Hackbart, 2016). Μια σχετικά μεγάλη χρονική σταθερά μπορεί να έχει καθυστέρηση στην ώρα έναρξης. Όπως ήδη εξηγήθηκε η εκκίνηση χρόνος έγχυσης ισχύος από το VSG καθώς και ο χρόνος διάρκειας της παροχής ισχύος είναι πολύ σημαντική για να αποκτηθεί μια επιθυμητή δυναμική εκτέλεση.

Ο σχεδιασμός πιο ακριβούς και ευαίσθητης αλλαγής συχνότητας δικτύου και ο ρυθμός ανιχνευτών αλλαγής συχνότητας απαιτούν εκτενή έρευνα για να ενσωματωθεί επεξεργασία σήματος, προσαρμοστικές στρατηγικές, αναγνώριση προτύπων και έξυπνα χαρακτηριστικά. Για προηγμένο υπολογιστικός αλγόριθμος απαιτούνται επίσης γρήγορες συσκευές μέτρησης υλικού για την πραγματοποίηση βέλτιστα/προσαρμοστικά σχήματα VSG για σύγχρονα δίκτυα ισχύος.

4.3.2 Βελτίωση εργαλείων μοντελοποίησης και ανάλυσης

Η πλήρης κατανόηση των θεμάτων αξιοπιστίας μέσω αποτελεσματικών τεχνικών μοντελοποίησης/συγκέντρωσης είναι ζωτικής σημασίας για τον εντοπισμό μιας



ποικίλων τρόπων με τους οποίους τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να φιλοξενήσουν τη μεγάλη κλίμακα ενσωμάτωση των VSG στο μέλλον. Απαιτείται ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο δυναμικής απόκρισης συχνότητας προκειμένου να γίνει ανάλυση και σύνθεση VSG σε α δίκτυο με υψηλό βαθμό διείσδυσης DG/ΑΠΕ.

Μια σωστή δυναμική μοντελοποίηση και συνάθροιση των μονάδων VSG, για απόδοση και μελέτες σταθερότητας, είναι ένα βασικό ζήτημα για την κατανόηση του δυναμικού αντίκτυπου των VSG και προσομοίωση των λειτουργιών τους σε νέο περιβάλλον.

4.3.3 Ανάπτυξη αποτελεσματικών έξυπνων και ισχυρών αλγορίθμων ελέγχου VSG

Μπορεί να απαιτείται πρόσθετη ευελιξία από διάφορα VSG, έτσι ώστε ο διαχειριστής του συστήματος να μπορεί να συνεχίσει να εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα. Η συμβολή των VSG στη συχνότητα εργασίας ρύθμισης αναφέρεται στην ικανότητα αυτών των μονάδων να ρυθμίζουν τις ρυθμίσεις της ισχύς εξόδου, με κατάλληλη ενέργεια ελέγχου. Πιο αποτελεσματικά, απαιτούνται πρακτικοί αλγόριθμοι και μεθοδολογίες ελέγχου. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για συντονισμό του χρονισμού και του μεγέθους της εκφόρτισης κινητικής ενέργειας με τα χαρακτηριστικά των συμβατικών SG (Karapanos et al., 2011).

4.3.4 Συντονισμός μεταξύ VSG και SGs και αναθεώρηση των υφιστάμενων πρότυπα

Σε περίπτωση υποστήριξης συστήματος συχνότητας, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των μονάδων VSG είναι η δυνατότητα γρήγορης έγχυσης ενεργού ισχύος τους. Μετά από ανισορροπία ισχύος, η ενεργή ισχύς που παράγεται από τα VSG αλλάζει γρήγορα για να ανακτήσει τη συχνότητα του συστήματος μετά από μια διαταραχή. Καθώς αυτή η αυξημένη/μειωμένη ισχύς μπορεί να διαρκέσει μόνο για λίγα δευτερόλεπτα, τα συμβατικά SG θα πρέπει τελικά να αναλάβουν τη τεράστια αλλαγή ζήτησης μετατοπίζοντας τη γενιά τους για να αντισταθμιστεί η ανισορροπία ισχύος. Αλλά η γρήγορη έγχυση ισχύος από τα VSG μπορεί επιβραδύνουν σε κάποιο βαθμό την απόκριση των συμβατικών SG (Maljkovic et al., 2013). Για να αποφευχθεί αυτή η



ανεπιθύμητη ενέργεια, ο συντονισμός μεταξύ των VSG, απαιτεί συμβατικά SG στον έλεγχο συχνότητας δικτύου (Karapanos et al., 2011).

Πρότυπα που σχετίζονται με τη συνολική αξιόπιστη απόδοση της ισχύος όπως έχει θεσπιστεί από τεχνικές επιτροπές, οντότητες αξιοπιστίας, ρυθμιστικοί φορείς και οργανισμοί, διασφαλίζουν την ακεραιότητα του ηλεκτρικού συστήματος που διατηρείται για αξιόπιστα απρόοπτα και συνθήκες λειτουργίας. Υπάρχουν κάποιες αρχές που πρέπει να τηρηθούν υπόψη στη μελλοντική ανάπτυξη προτύπων στο σύστημα MG παρουσία DG/APE και μονάδων VSG. Τα πρότυπα πρέπει να είναι ολοκληρωμένα, διαφανή και σαφή για την αποφυγή παρερμηνειών. Οι διαδικασίες και τα πρότυπα διασύνδεσης θα πρέπει να βελτιωθούν για την αντιμετώπιση της ρύθμισης συχνότητας, του πραγματικού ελέγχου ισχύος και απόκριση αδράνειας και πρέπει να εφαρμόζονται με συνεπή τρόπο σε όλες τις τεχνολογίες DG.

Τα πρότυπα εξοπλισμού που εστιάζονται στην αξιοπιστία πρέπει επίσης να αναπτυχθούν περαιτέρω για να διευκολυνθεί η αξιόπιστη ενσωμάτωση πρόσθετων VSG στο ηλεκτρικό δίκτυο. Από την άποψη της αξιοπιστίας του συστήματος δικτύου, απαιτείται ένα σύνολο διαδικασιών και προτύπων διασύνδεσης που να ισχύουν εξίσου για όλους τους πόρους παραγωγής διασύνδεσης με το δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων VSG (Maljkovic et al., 2013). Απαιτείται περαιτέρω εργασία για την τυποποίηση των βασικών απαιτήσεων σε αυτές τις διασυνδέσεις διαδικασίες και πρότυπα, όπως η ικανότητα του κατόχου των VSG να παρέχουν αδρανειακή απόκριση.

Για να επιτραπεί η αυξημένη διείσδυση των VSG, ενδέχεται να απαιτείται αλλαγή στην πολιτική αποθεματικών κανονισμών. Προς αυτή την κατεύθυνση, εκτός από τις πολιτικές απορρύθμισης, η ποσότητα και η θέση των μονάδων VSG, η τεχνολογία λειτουργίας και το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του δικτύου πρέπει να θεωρούνται ως σημαντικές τεχνικές πτυχές. Επιπλέον, η ενημέρωση των υφιστάμενων επιπέδων ελέγχου συχνότητας σχετικά με την οικονομική αξιολόγηση/ανάλυση των τιμών ρύθμισης συχνότητας και άλλα θέματα όπως ποσοτικοποίηση του αποθεματικού περιθωρίου λόγω της αύξησης διείσδυσης των VSG αποτελούν ορισμένες σημαντικές ερευνητικές ανάγκες (Karapanos et al., 2010).

En κατακλείδι,



Με την αύξηση του επιπέδου διείσδυσης των DG, ο αντίκτυπος είναι από τη μία η μειωμένη επίδραση της αδράνειας και της απόσβεσης στη σταθερότητα του δικτύου και από την άλλη, η αύξηση απόδοσης δυναμικής συχνότητας. Μια λύση προς τη σταθερότητα είναι η βελτίωση τέτοιων δικτύων με τη παροχή εικονικής αδράνειας από VSG που μπορεί να δημιουργηθεί, χρησιμοποιώντας βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας μαζί με έναν μετατροπέα ισχύος και έναν κατάλληλο μηχανισμό ελέγχου.

Με αυτές τις αναφορές αποδεικνύεται ότι η εικονική αδράνεια μπορεί να θεωρηθεί ως μια αποτελεσματική λύση για να υποστηρίξει τον κύριο έλεγχο συχνότητας και να αντισταθμίσει τις γρήγορες αλλαγές συχνότητας. Με έγχυση ενεργού ισχύος από τα VSG σε χρονική κλίμακα από εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου έως λίγα δευτερόλεπτα μετά από μια σοβαρή διαταραχή φορτίου/παραγωγής, μπορεί να υπάρξει υποστήριξη των συμβατικών στοιχείων παραγωγής κατά την ενεργοποίηση του πρωτογενούς αποθεματικού τους (Karapanos et al., 2011). Τα VSG μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τα άλλα στοιχεία SGs κατά την ενεργοποίηση του πρωτογενούς αποθεματικού τους. Στη διάρκεια της πτώσης συχνότητας, η μονάδα VSG συμπεριφέρεται ως εικονική αδράνεια από τη δυναμική του συστήματος.

Στη παρούσα ενότητα γίνεται λοιπόν, μια επισκόπηση των βασικών θεμάτων στην ενσωμάτωση του VSG στα μικροδίκτυα και τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και τις περιοχές εφαρμογής τους που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σήμερα. Τέλος, επισημαίνεται η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με πιο ευέλικτα και αποτελεσματικά VSG. Μερικά σημαντικά επίσης θέματα για περαιτέρω έρευνα αναφέρονται όπως: βελτίωση τεχνικών υπολογιστών και τεχνολογιών μέτρησης, βελτίωση μοντελοποίησης και εργαλεία ανάλυσης, ανάπτυξη αποτελεσματικών έξυπνων και ισχυρών VSG αλγόριθμων ελέγχου, συντονισμός μεταξύ VSG και SGs και αναθεώρηση των υφιστάμενων προτύπων που δύναται να συμβούν. Η αύξηση του ΚΡ και του ΚΙ σημαίνει ότι θα υπάρχει περισσότερη ισχύς να εγχέεται ή να απορροφάται για την ίδια ποσότητα απόκλισης συχνότητας και ρυθμού μεταβολής συχνότητας, αντίστοιχα (Hackbart, 2016).

Σε μια πραγματική σύγχρονη γεννήτρια, η ενέργεια που καταναλώνεται από την απόσβεση, απορροφάται από την αντίσταση των περιελίξεων απόσβεσης. Ωστόσο, στην περίπτωση του VSG, αυτή η διακύμανση ισχύος θα πρέπει να απορροφηθεί από



τη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας για την εξισορρόπηση των δυνάμεων του δικτύου. Για την επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης σημαντικές παράμετροι είναι η μέγιστη ισχύς των φορτίων μέσα στο εξεταζόμενο πλέγμα, η δύναμη της ελεγχόμενης γενιάς μονάδων, ο χρόνος αντίχρευσσης, ο έλεγχος καθυστέρησης καθώς και η μέγιστη συνολική καθυστέρηση χρόνου απόκρισης.

Όπως αναφέρθηκε, η αύξηση του ΚΙ παρέχει υψηλότερο ποσό ισοδύναμης αδράνειας για το VSG, ωστόσο υπάρχει ένα όριο. Αυτό το όριο επιβάλλεται κυρίως από τη χωρητικότητα του μετατροπέα και την ακρίβεια PLL. Η χωρητικότητα του μετατροπέα δεν έχει την ικανότητα υπερφόρτωσης ενός σύγχρονου μηχανήματος (Hackbart, 2016).

Έτσι, ένας υψηλός παράγωγος όρος οδηγεί σε μεγαλύτερη ισχύ υπερβαίνοντας τη διάρκεια μεταβατικών περιόδων (αποκλίσεις συχνότητας) και ο μετατροπέας πρέπει να υποστεί σημαντική υπερφόρτωση. Η ακρίβεια στην παρακολούθηση συχνότητας εξαρτάται από τους χρησιμοποιούμενους βρόχους κλειδώματος φάσης (PLL).

Επομένως, η βέλτιστη τιμή του παραγωγού όρου μπορεί να ληφθεί από την αντιστάθμιση μεταξύ της εικονικής αδράνειας, της χωρητικότητας υπερφόρτωσης του μετατροπέα, και τα χαρακτηριστικά PLL.



Επίλογος

Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι ο πάροχος ενέργειας στα συστήματα ισχύος, των οποίων η απόδοση ελέγχου θα καθορίσει άμεσα την ασφάλεια και τη σταθερότητα της κατάστασης λειτουργίας σε ένα σύστημα ισχύος. Ως εκ τούτου, υπάρχει μεγάλη σημασία για την ανίχνευση της κατάστασης λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών.

Η παρούσα εργασία εστίασε στη σύγχρονη τριφασική γεννήτρια, περιγράφοντας την αρχή λειτουργίας και των χαρακτηριστικών καθώς και την εφαρμογή αυτών. Απώτερος στόχος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και των αναφορών αυτής ήταν η κατανόηση των λειτουργικών και μηχανικών πλεονεκτημάτων μιας τριφασικής γεννήτριας, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή αυτής που λειτουργεί καλύτερα για τη χρήση που θα επιλεγθεί.

Μάλιστα, η εργασία εισάγει συστηματικά τις σημαντικές τεχνολογίες σχεδιασμού και εφαρμογής του συστήματος διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του τριφασικού κυκλώματος ανορθωτή γέφυρας, του ανορθωτή διόδου για ξεχωριστή διέγερση, του συστήματος διέγερσης χωρίς ψήκτρες και του συστήματος διέγερσης στατικής αυτοδιέγερσης. Συνδυάζει συζητήσεις για συγκεκριμένα θέματα και βασικές θεωρίες, παρέχοντας μια λεπτομερή περιγραφή των θεωριών που είναι απαραίτητες για τις σύγχρονες τριφασικές γεννήτριες ειδικότερα, στην ανάλυση συστημάτων διέγερσης.

Ακόμη καταγράφεται ότι η μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο δίκτυο αναδιαμορφώνει το ενεργειακό τοπίο και μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη λειτουργία και τη σταθερότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ζητήματα που προκύπτουν από το εξελισσόμενο ενεργειακό τοπίο είναι προκλητικά, αλλά όχι ανυπέρβλητα. Οι εικονικές σύγχρονες μηχανές (VSM) έχουν προταθεί ως μια φιλική προς το δίκτυο προσέγγιση για τη βιώσιμη ενσωμάτωση των ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας στο δίκτυο (Driesen & Visscher, 2018). Μέσα από το τελευταίο κεφάλαιο παρέχεται μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση των VSM τελευταίας τεχνολογίας που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Περαιτέρω, συζητά μερικές από τις προκλήσεις που θα προκύψουν από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας. Εν τέλει, προτείνονται πιθανές λύσεις με βάση γνώσεις που προέρχονται από εκτεταμένη ακαδημαϊκή έρευνα και έργα επίδειξης από τον κλάδο της ενέργειας.



Βιβλιογραφικές Αναφορές

Βουρνάς, Κ. & Κονταξής, Γ. (2010). *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

Γιαννακόπουλος, Γ.Β. & Βοβός, Ν.Α. (2017). *Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Πάτρα: Εκδόσεις Ζήτη.

Γιαννακόπουλος, Γ.Β. & Βοβός, Ν.Α. (2012). *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Πάτρα: Εκδόσεις Ζήτη.

Καρναβάς, Γ.Α., Πολύζος, Ν.Π., Ταρχανίδης, Κ., Κακκαλής, Ι. & Χατζηανδρέογλου, Χ. (2022). *Σχεδίαση Ολοκληρωμένης Πρακτικής Διάταξης Ελέγχου Διέγερσης Σύγχρονης Γεννήτριας για Λειτουργία σε Απομακρυσμένο Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής*. Εγχειρίδιο ΤΕΙ Πειραιά.

Μαλατέστας, Π. (2013). *Ηλεκτρικές Μηχανές*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2^η Έκδοση.

Albu, M., Calin, M., Federenciu, D. & Diaz, J. (2011). The measurement layer of the virtual synchronous generator operation in the field test. In: Applied measurements for power systems (AMPS), 2011 IEEE International Workshop on, 2011; 2011. p. 85–9.

Albu, M., Visscher, K., Creanga, D., Nechifor, A. & Golovanov, N. (2019). *Storage selection for DG applications containing virtual synchronous generators*. In: PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, p. 1–6.

Bevrani, H. & Hiyama, T. (2011). *Intelligent automatic generation control*. NY, USA: CRC Press.

Best, R.J., Morrow, D.J. & Crossley, P.A. (2010). Current transients in the small salient-pole alternator during sudden short-circuit and synchronisation events. *IET Electric Power Applications*, 4 (9), 687-700.

Driesen, J. & Visscher, K. (2018). Virtual synchronous generators. In: *Power and energy society general meeting – conversion and delivery of electrical energy in the 21st century*.



Hackbart, M. (2016). Novel approach to calculate electrical currents in stator-, field- and damper-windings at three-phase sudden short-circuit for large synchronous generators. *Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 133 (2), 112-120.

Karapanos, V., de Haan, S. & Zwetsloot, K. (2011). Real time simulation of a power system with VSG hardware in the loop. In: IECON 2011 – 37th annual conference on IEEE industrial electronics society, 3748–54.

Karapanos, V., Yuan, Z. & de Haan, S. (2010). *SOC maintenance and coordination of multiple VSG units for grid support and transient stability*. In: 3rd VSYNC workshop. Cheia, Romania.

Maljkovic, Z., Zarko, D. & Stipetic, S. (2013). *Unsymmetrical load of a three-phase synchronous generator*. University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing.

Nica, C. & Enache, M.A. (2007). Experimental study of three-phase synchronous generator-rectifier system," *Electrical Machines and Power Electronics*, 2007. ACEMP '07. International Aegean Conference, 325-331.

Oliveira, M.O., Bretas, A.S., Garcia, F.H., Walantus, L.A., Munoz, H.E., Perrone, O.E. & Reversat, J.H. (2012). Design and Analysis of Brushless Self-Excited Three-Phase Synchronous Generator. *European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality*, 1 (10), 1659-1664.

Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R. & D'Haeseleer, W. (2015). Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33 (6), 787–98.

Petru, L. & Mazen, G. (2014). Experimental Stand for the Study of a Three-Phase Synchronous Generator with Permanent Super Magnets. *Procedia Engineering*, 69 (2), 231 – 236.

Piroi, I., Elisabeta, S. & Piroi, F. (2014). Experimental measurements of the rotor oscillations in an synchronous generator during the three-phased sudden short-circuit test. *International Conference on Applied and Theoretical Electricity*, 125-136.



Salah, M., Bacha, K., Chaari, A. & Benbouzid, M. (2014). Brushless Three-Phase Synchronous Generator Under Rotating Diode Failure Conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29 (3), 594-601.

Sohn, J., Hong, S. & Sunwoo, M. (2013). Alternator torque model based on equivalent circuit of synchronous generator for electric power management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62 (8), 3593-3602.

Spuneci, E. & Piroi, I. (2012). Comparative analysis between stationary and dynamic parameters of a synchronous generator, with the main variable of the air gap magnetic induction. *International Conference on Applied and Theoretical Electricity*, 128-131.

Wang, J.X., Zobaa, A.F. & Bie, Z.H. (2012). From mathematical analysis to experimental calculation: teaching three-phase short-circuits of a synchronous generator. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 49 (4), 444-463.

World Energy Council (WEC). (1993). *Renewable Energy Resources: Opportunities and Constraints 1990–2020*; Technical Report; World Energy Council: London, UK.

Zhao, L. & Feng, Y. (2010). Simulation and analysis of short circuit in 1000 MW synchronous generator based on Simulink/SPS module. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*.

Zhu, Y.N. & Jin, J.X. (2013). Simulation analysis of a synchronous generator system under fault conditions. *International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, 180-184.

