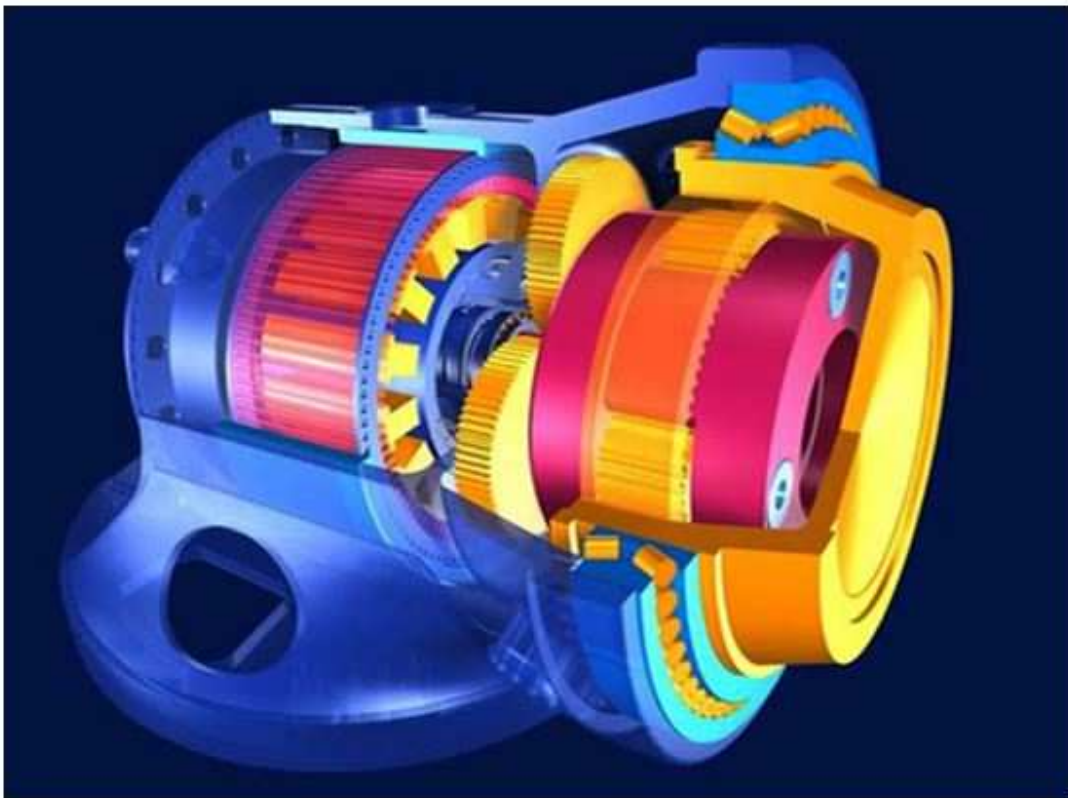


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
«Σύγχρονη Γεννήτρια»
«Synchronous Generator»



Όνοματεπώνυμο: Κωνσταντίνος Β. Δίπλας (Α.Μ. : 31745)

Εκπαιδευτικό ίδρυμα: Α.Ε.Ι. Πειραιά – Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών – Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

Επιβλέπων καθηγητής: Πέτρος Καραϊσάς

Εξεταστική επιτροπή: Βυλλιώτης Ηρακλής, Καμινάρης Σταύρος και Καραϊσάς Πέτρος

ΑΘΗΝΑ ΜΑΪΟΣ 2017

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος Σχημάτων	4
Κατάλογος Εικόνων	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	8
ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	8
Δομή Σύγχρονης Γεννήτριας	8
Ταχύτητα Περιστροφής	11
Παραγόμενη Τάση.....	12
Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας.....	13
Ανάλυση με Στρεφόμενα Διανύσματα	18
Ισχύς και Ροπή Σύγχρονης Γεννήτριας.....	19
Διάγραμμα Λειτουργίας Σύγχρονης Γεννήτριας	22
Σύγχρονη Γεννήτρια Έκτυπων Πόλων.....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	29
ΕΙΔΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ, ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ	29
Εισαγωγή	29
Απώλειες Χαλκού.....	30
Απώλειες Πυρήνα	31
Μηχανικές Απώλειες	35
Επιπρόσθετες Απώλειες Φορτίου	39
Καμπύλες Κορεσμού.....	39
Απόδοση.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	47
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	47
Παράμετροι Μόνιμης Κατάστασης	47
Σύγχρονη Αντίδραση d-άξονα	49

Σύγχρονη Αντίδραση q-άξονα	50
Ηλεκτρική Γωνία Φορτίου	56
Μεγέθη Αρνητικής Ακολουθίας	57
Μεγέθη Μηδενικής Ακολουθίας.....	59
Αντίδραση Potier	62
Προσδιορισμός Αντίδρασης Σκέδασης του Στάτη	63
Προσδιορισμός Ονομαστικού Ρεύματος Διέγερσης.....	66
Προσδιορισμός Εμπέδησης Εκκίνησης Σύγχρονων Κινητήρων	67
Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας.....	68
Λόγος Βραχυκυκλώματος	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	71
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (Matlab – Simulink)	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Κυλινδρικός δρομέας και δρομέας έκτυπων πόλων με δύο και τέσσερις πόλους.	10
Σχήμα 2: Καμπύλη μαγνήτισης ή χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος.	13
Σχήμα 3: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας και ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας ανά φάση.....	15
Σχήμα 4: Ισοδύναμα κυκλώματα σύγχρονης γεννήτριας η οποία είναι συνδεδεμένη σε αστέρα (α) και σε τρίγωνο (β).	17
Σχήμα 5: Διανυσματικά διαγράμματα σύγχρονης γεννήτριας για ωμικό, επαγωγικό και χωρητικό φορτίο.....	19
Σχήμα 6: Απλοποιημένο διανυσματικό διάγραμμα στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση οπλισμού (στάτη).	22
Σχήμα 7: Διάγραμμα λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας.	23
Σχήμα 8: Τομή σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων.	25
Σχήμα 9: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων.....	27
Σχήμα 10: Βρόχος υστέρησης	33

Σχήμα 11: Περιοχές Weiss με ευθυγραμμισμένες μαγνητικές ροπές μετά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.....	34
Σχήμα 12: Σύστημα περιστρεφόμενου άξονα και δακτυλίου στήριξης.	37
Σχήμα 13: Χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος.	41
Σχήμα 14: Χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού βραχυκυκλώματος.....	43
Σχήμα 15: Καμπύλες κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος.	44
Σχήμα 16: Μέθοδος προσδιορισμού της σύγχρονης αντίδρασης για τον q -άξονα.....	53
Σχήμα 17: Ο προσδιορισμός του ρεύματος στην περίπτωση ύπαρξης παραμένουσας τάσης.....	55
Σχήμα 18: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής στο οποίο παρουσιάζεται σχηματικά το πώς συνδέεται η ηλεκτρική γωνία φορτιού με τη σύγχρονη αντίδραση του q -άξονα.....	56
Σχήμα 19: Συνδεσμολογία για τον προσδιορισμό των μεγεθών μηδενικής ακολουθίας.	60
Σχήμα 20: Γραφικός προσδιορισμός της αντίδρασης Potier.	63

Σχήμα 21: Τοποθέτηση πηνίου ανίχνευσης το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίδρασης σκέδασης του σάτη.	65
Σχήμα 22: Προσδιορισμός ονομαστικού ρεύματος διέγερσης.....	67
Σχήμα 23: Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας.....	72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Τιμές της τάσης V_a στην προσομοίωση	73
Εικόνα 2: Τιμές της τάσης V_f στην προσομοίωση	75
Εικόνα 3: Τιμές της ταχύτητας του ρότορα στην προσομοίωση	76
Εικόνα 4: Τιμές του ρεύματος του στάτορα την προσομοίωση	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

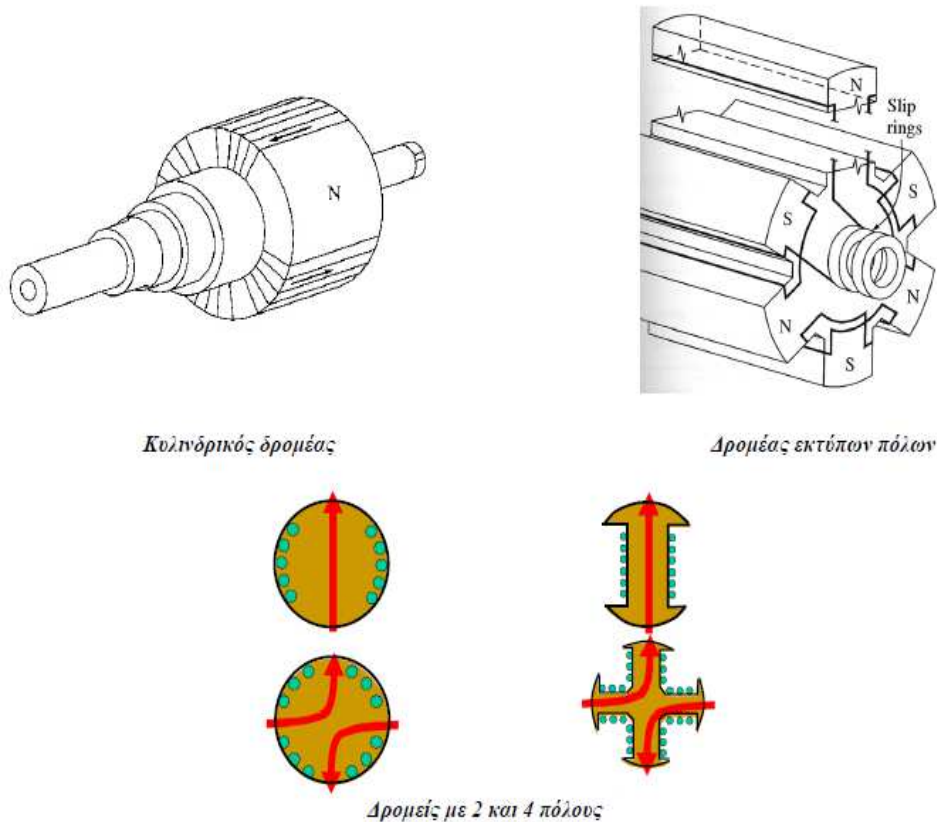
Δομή Σύγχρονης Γεννήτριας

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι μία σύγχρονη μηχανή η οποία έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για τη σημαντικότερη μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ είναι γνωστή και σαν εναλλακτήρας.

Για τη λειτουργία μίας σύγχρονης γεννήτριας βασική προϋπόθεση αποτελεί η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Ο δρομέας είναι ουσιαστικά ένας μεγάλος περιστρεφόμενος μαγνήτης ο οποίος καθώς περιστρέφεται, περιστρέφεται μαζί του και το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από το συνεχές ρεύμα. Με αυτό τον τρόπο επάγεται τριφασική τάση στο τύλιγμα του στάτη. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, όπου οι πόλοι του είναι στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνειά, είτε έκτυπων πόλων όπου οι πόλοι είναι διακριτοί. Στους κυλινδρικούς δρομείς υπάρχουν αυλακώσεις όπου είναι τοποθετημένα τα τυλίγματα και χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεννήτριες μέχρι και τέσσερις πόλους ενώ σε περιπτώσεις γεννητριών με περισσότερους πόλους προτιμώνται δρομείς έκτυπων πόλων. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται κυλινδρικοί δρομείς καθώς και δρομείς έκτυπων πόλων με δύο και τέσσερις πόλους.

Η τροφοδοσία του δρομέα με συνεχές ρεύμα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στον πρώτο τρόπο η τροφοδοσία επιτυγχάνεται από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος κάτι που σημαίνει ότι στον περιστρεφόμενο δρομέα προσαρμόζονται ψήκτρες και δακτυλίδια. Στον δεύτερο τρόπο η τροφοδοσία γίνεται από πηγή συνεχούς ρεύματος η οποία είναι τοποθετημένη στον άξονα της μηχανής. Στην πρώτη περίπτωση, το ένα άκρο του τυλίγματος του δρομέα είναι συνδεδεμένο με το ένα από τα δύο δακτυλίδια ενώ το άλλο άκρο είναι συνδεδεμένο με το δεύτερο δακτυλίδι. Οι ψήκτρες τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε στο κάθε δακτυλίδι να εφάπτεται από μία. Με αυτό τον τρόπο, συνδέοντας το θετικό άκρο της πηγής στη μία ψήκτρα και το αρνητικό άκρο της πηγής στην άλλη ψήκτρα γίνεται δυνατή η συνεχής τροφοδοσία του δρομέα. Στα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η φθορά των ψηκτρών και η σχετικά συχνή απαίτηση αντικατάστασής τους καθώς επίσης και οι σημαντικές απώλειες ισχύος οι οποίες οφείλονται στην πτώση τάσης στις ψήκτρες. Στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται διεγέρτριες μηχανές οι οποίες ουσιαστικά είναι μικρές γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος ώστε να τροφοδοτούν το δρομέα της γεννήτριας με συνεχές ρεύμα. Το κύκλωμα διέγερσης αυτών των μικρών γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτείται από το στάτη της κύριας γεννήτριας ενώ το κύκλωμα οπλισμού της είναι τοποθετημένο πάνω στον άξονα του δρομέα. Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται από τριφασικό ανορθωτή και εν συνεχεία το συνεχές ρεύμα το οποίο προκύπτει διαρρέει το κύκλωμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με αυτή τη μέθοδο

παρακάμπτονται τα μειονεκτήματα του πρώτου τρόπου τροφοδοσίας αφού πλέον δεν υπάρχει εμπλοκή μηχανικών τμημάτων.



Σχήμα 1: Κυλινδρικός δρομέας και δρομέας έκτυπων πόλων με δύο και τέσσερις πόλους.

Υπάρχει δυνατότητα πλήρους ανεξαρτητοποίησης της διαδικασίας τροφοδοσίας του δρομέα από εξωτερικές πηγές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή μίας προδιεγέρτριας μηχανής στο σύστημα η οποία ουσιαστικά είναι μία μικρή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος η οποία έχει μόνιμους μαγνήτες και εγκαθίσταται στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτή η μηχανή παράγει τριφασική τάση η οποία ανορθώνεται τροφοδοτώντας τη

διέγερση της διεγέρτριας και η οποία στη συνέχεια τροφοδοτεί το δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο η γεννήτρια δε χρειάζεται πλέον εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Εκτός από τον δρομέα, μία σύγχρονη γεννήτρια αποτελείται και από ένα άλλο κομμάτι το οποίο είναι γνωστό ως στάτης. Πρόκειται για ένα κοίλο κυλινδρικό εξάρτημα το οποίο είναι κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων. Στην εσωτερική του επιφάνεια υπάρχουν διαμήκεις αυλακώσεις οι οποίες χρησιμεύουν για την τοποθέτηση των τυλιγμάτων του στάτη.

Ταχύτητα Περιστροφής

Οι σύγχρονες γεννήτριες οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι οι συχνότητες των τάσεων τις οποίες παράγουν είναι σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σχετίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα του στάτη μέσω της σχέσης :

$$f_c = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad (1)$$

Όπου f_c η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

n_m η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min

P ο αριθμός των πόλων

Επειδή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου είναι ίδιες, η παραπάνω εξίσωση αποδίδει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται η μηχανή και της ηλεκτρικής της συχνότητας. Στην περίπτωση όμως που η εξίσωση (1) δεν επαληθεύεται η μηχανή αποσυγχρονίζεται πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει κίνδυνος βλαβών.

Παραγόμενη Τάση

Η τάση που επάγεται σε κάθε φάση μίας σύγχρονης μηχανής δίνεται από τη σχέση :

$$E_A = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_c \cdot \varphi \cdot f \quad (2)$$

Η σχέση (2) μπορεί να γραφεί με πιο απλό τρόπο ως εξής :

$$E_A = K \cdot \varphi \cdot \omega \quad (3)$$

Όπου φ είναι η μαγνητική ροή

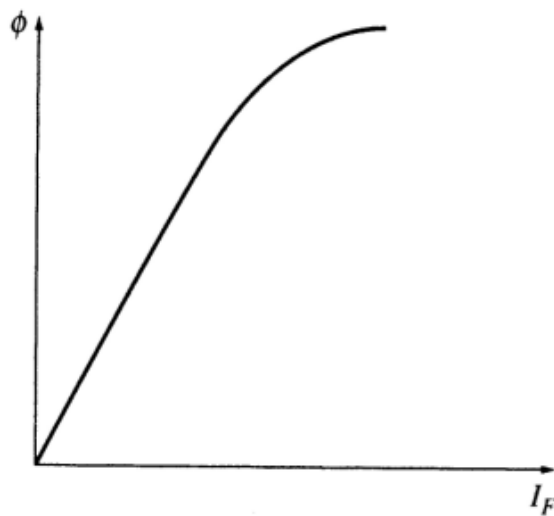
ω είναι η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

K είναι μία σταθερά η οποία εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής και δίνεται από τη σχέση :

$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (4) \quad \text{αν το } \omega \text{ δίνεται σε ηλεκτρικά rad/sec και}$$

$$K = \frac{N_c \cdot P}{\sqrt{2}} \quad (5) \quad \text{αν το } \omega \text{ δίνεται σε μηχανικά rad/sec.}$$

Η τάση E_A είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης I_F . Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η καμπύλη $\phi - I_F$ η οποία ονομάζεται καμπύλη μαγνήτισης ή χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος.



Σχήμα 2: Καμπύλη μαγνήτισης ή χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος.

Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Γεννήτριας

Η τάση η οποία αναπτύσσεται στα άκρα της μίας φάσης και η οποία παράγεται μέσα στη γεννήτρια εμφανίζεται σπάνια στα άκρα της μηχανής. Αντιθέτως είναι ίση με την τάση V_ϕ που αναπτύσσεται στα άκρα της μηχανής μονάχα στην περίπτωση που το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη είναι μηδέν.

Η E_A διαφοροποιείται από τη V_ϕ λόγω της παραμόρφωσης που υφίσταται το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής, το οποίο προκαλείται

από το ρεύμα του στάτη, λόγω των αυτεπαγωγών των αγωγών του στάτη, λόγω των αντιστάσεων των αγωγών του στάτη καθώς και λόγω του σχήματος που έχουν οι έκτυποι πόλοι του δρομέα. Το πρώτο φαινόμενο είναι γνωστό σαν αντίδραση τυμπάνου επειδή η τάση στα άκρα της γεννήτριας παραμορφώνεται από το τύλιγμα του τυμπάνου και είναι το κυριότερο αίτιο που η E_A διαφοροποιείται από τη V_ϕ . Η τάση V_ϕ δίνεται από τη σχέση :

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (6)$$

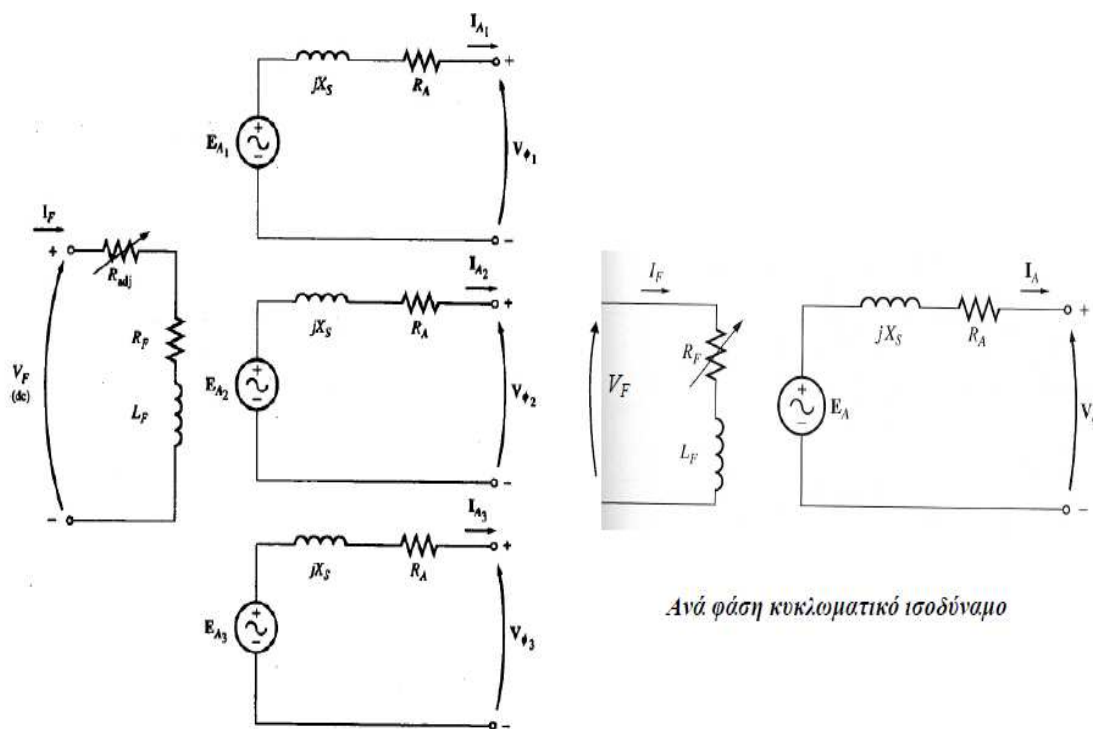
Όπου X_s είναι η σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας

R_A είναι η ωμική αντίσταση μίας φάσης

I_A είναι το ρεύμα μίας φάσης

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να παρασταθεί το ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης γεννήτριας όπου το τύλιγμα της διέγερσης μπορεί να αναπαρασταθεί από μία αντίσταση και μία αυτεπαγωγή (σχήμα 3). Το υπόλοιπο κύκλωμα αποτελείται από τα τμήματα τα οποία αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις τρεις φάσεις, όπου συμβαίνει η εμφάνιση της τάσης που παράγεται στο εσωτερικό της μηχανής, η εμφάνιση της σύγχρονης αντίδρασης καθώς και της ωμικής αντίστασης. Το γεγονός ότι η μοναδική διαφορά ανάμεσα στις τρεις φάσεις είναι η διαφορά φάσης κατά 120° που έχουν μεταξύ τους μπορεί

να οδηγήσει εναλλακτικά στη χρησιμοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος ανά φάση (σχήμα 3). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τάσεις και τα ρεύματα των φάσεων είναι ίσα αν και μόνο αν το φορτίο της γεννήτριας είναι συμμετρικό.



Πλήρες κυκλωματικό ισοδύναμο σύγχρονης γεννήτριας

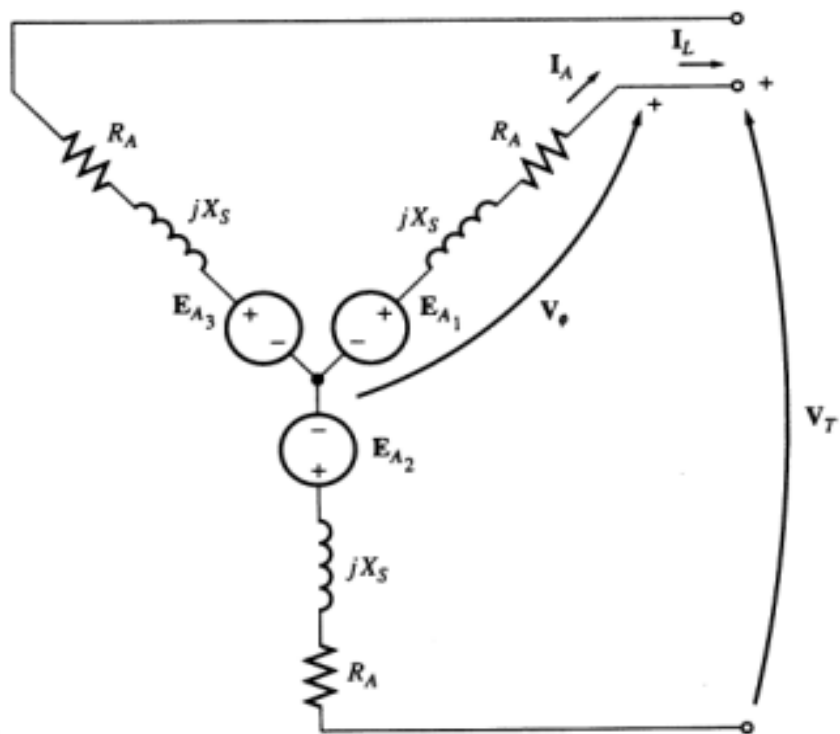
Σχήμα 3: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας και ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας ανά φάση.

Οι τρεις φάσεις μπορεί να είναι συνδεδεμένες είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο (σχήμα 4). Στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένες σε αστέρα, οι πολικές τάσεις δίνονται από τη σχέση :

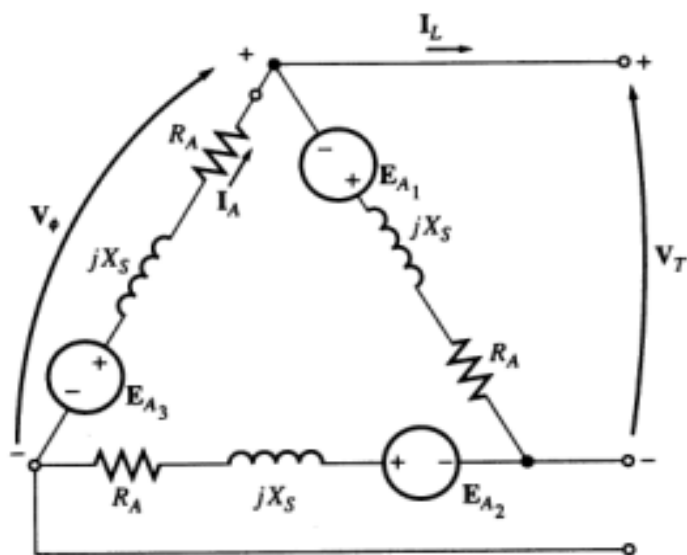
$$V_T = \sqrt{3} \cdot V_\phi \quad (7)$$

Ενώ στην περίπτωση που συνδέονται σε τρίγωνο ισχύει:

$$V_T = V_\varphi \quad (8)$$



(α)



(β)

Σχήμα 4: Ισοδύναμα κυκλώματα σύγχρονης γεννήτριας η οποία είναι συνδεδεμένη σε αστέρα (α) και σε τρίγωνο (β).

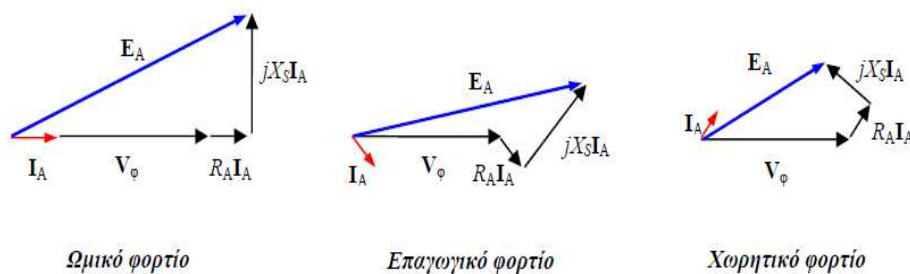
Ανάλυση με Στρεφόμενα Διανύσματα

Οι εναλλασσόμενες τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται στις σύγχρονες γεννήτριες είναι δυνατόν να εκφραστούν με στρεφόμενα διανύσματα τα οποία διαθέτουν πλάτος και φάση με αποτέλεσμα να μπορούν να σχεδιαστούν σε δύο διαστάσεις. Ένα τέτοιο διάγραμμα ονομάζεται διανυσματικό διάγραμμα και εκφράζει ουσιαστικά τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων και του ρεύματος I_A μίας σύγχρονης γεννήτριας.

Αν θεωρηθεί το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης γεννήτριας και ότι τροφοδοτεί ένα ωμικό (καθαρά) φορτίο R και παίρνοντας σαν αναφορά όλων των μεγεθών την τάση V_ϕ τότε το ρεύμα I_A θα είναι συμφασικό με την τάση V_ϕ αφού το φορτίο αντιστοιχεί σε πραγματικό αριθμό. Κατά αντίστοιχο τρόπο, εξαιτίας του ότι ο πολλαπλασιασμός με τη μιγαδική μονάδα σημαίνει στροφή του πολλαπλασιαζόμενου διανύσματος κατά 90° , η πτώση τάσης $jX_s I_A$ πρόκειται για ένα διάνυσμα το οποίο είναι κάθετο στο I_A . Έτσι, το διάνυσμα E_A αρχίζει από την αρχή του διανύσματος V_ϕ και τελειώνει στο τέλος του $jX_s I_A$ (σχήμα 5).

Στην περίπτωση επαγωγικού φορτίου η πτώση τάσης V_ϕ προηγείται του ρεύματος I_A ενώ αντίθετα, στην περίπτωση χωρητικού φορτίου η τάση έπεται του ρεύματος. Από τα διανυσματικά διαγράμματα βγαίνει το συμπέρασμα ότι για δεδομένη φασική τάση αλλά και ρεύμα οπλισμού είναι απαραίτητη η παραγωγή υψηλότερης τάσης E_A για την τροφοδοσία ενός επαγωγικού

φορτίου σε σύγκριση με ένα χωρητικό φορτίο. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα διέγερσης αφού ισχύει η σχέση (3). Ισοδύναμα, για ένα δεδομένο ρεύμα διέγερσης αλλά και φορτίου, η φασική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της γεννήτριας είναι μικρότερη στην περίπτωση των επαγωγικών φορτίων εν συγκρίσει με τα χωρητικά (σχήμα 5).



Σχήμα 5: Διανυσματικά διαγράμματα σύγχρονης γεννήτριας για ωμικό, επαγωγικό και χωρητικό φορτίο.

Ισχύς και Ροπή Σύγχρονης Γεννήτριας

Η εισερχόμενη ισχύς σε μια γεννήτρια είναι μηχανικής φύσης και δίνεται από τη σχέση :

$$P_{in} = \tau_{app} \omega_m \quad (9)$$

Εξαιτίας των απωλειών κατά την περιστροφή η μηχανική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική είναι σαφώς μικρότερη και ισούται με :

$$P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m = 3E_A I_A \cos\gamma \quad (10)$$

Όπου γ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των E_A και I_A .

Η ενεργός ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας σε πολικά μεγέθη δίνεται από την εξίσωση :

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos\theta \quad (11)$$

Και σε φασικά μεγέθη από την εξίσωση :

$$P_{out} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \cos\theta \quad (12)$$

Η άεργος εξερχόμενη ισχύς της γεννήτριας σε πολικά μεγέθη δίνεται από την εξίσωση :

$$Q_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \sin\theta \quad (13)$$

Και σε φασικά μεγέθη από την εξίσωση :

$$Q_{out} = 3 \cdot V_\phi \cdot I_A \cdot \sin\theta \quad (14)$$

Μία προσεγγιστική σχέση που έχει να κάνει με την ισχύ εξόδου μίας σύγχρονης γεννήτριας προκύπτει αν αγνοηθεί η τιμή της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη R_A σε περίπτωση που αυτή είναι πολύ μικρή. Σε αυτή

την περίπτωση, από το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας (σχήμα 6) προκύπτει ότι το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος ℓ είναι ίσο με :

$$\ell = E_A \cdot \sin\delta \quad (15)$$

όπως και :

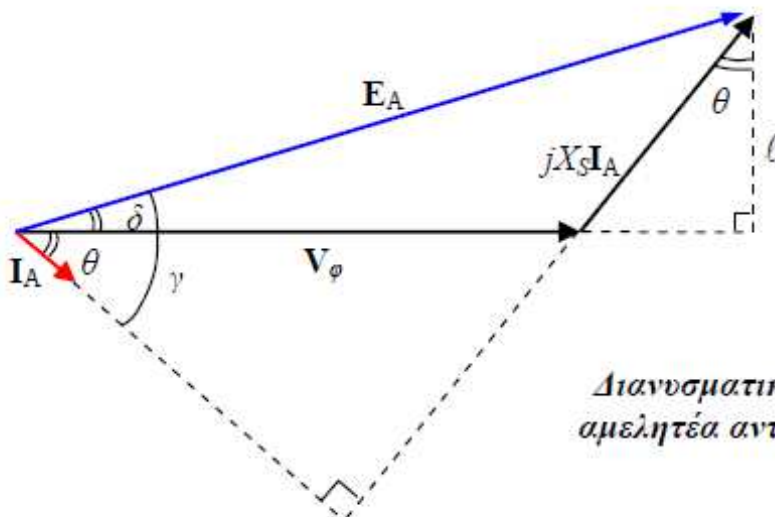
$$\ell = X_S \cdot I_A \cdot \cos\theta \quad (16)$$

Άρα :

$$I_A \cdot \cos\theta = \frac{E_A \cdot \sin\delta}{X_S} \quad (17)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (12) προκύπτει :

$$P = \frac{3 \cdot V_\phi \cdot E_A \cdot \sin\delta}{X_S} \quad (18)$$



Διανυσματικό διάγραμμα με αμελητέα αντίσταση οπλισμού

Σχήμα 6: Απλοποιημένο διανυσματικό διάγραμμα στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η αντίσταση οπλισμού (στάτη).

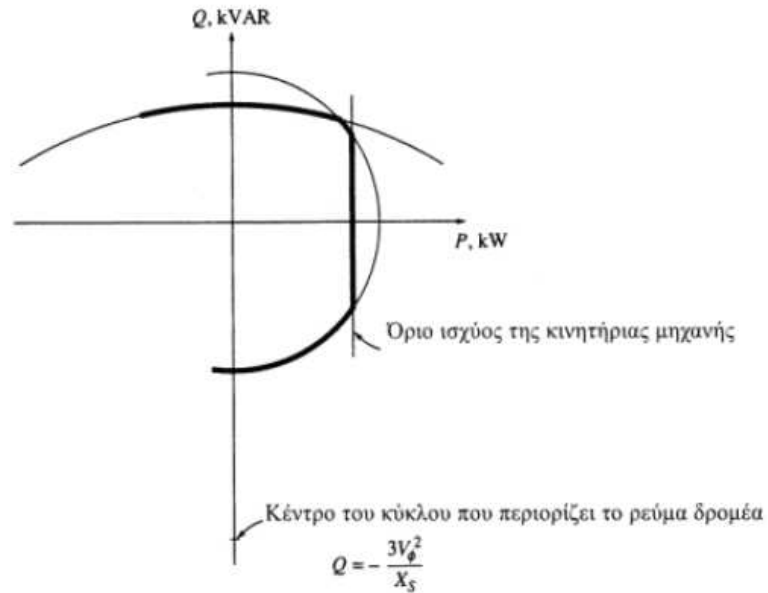
Η γωνία δ ονομάζεται γωνία ροπής ή ηλεκτρική γωνία φορτίου της μηχανής και προσδιορίζει τη μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος που μπορεί να προσφέρει η γεννήτρια. Αυτή η μέγιστη τιμή ισχύος είναι γνωστή σαν στατικό όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Στην πραγματικότητα οι μηχανές δουλεύουν μακριά από αυτό το όριο (η γωνία δ κυμαίνεται μεταξύ 15° και 20°).

Επίσης, επειδή ισχύει ότι $P_{conv} = \tau_{ind}\omega_m$, η επαγόμενη ροπή δίνεται από τη σχέση :

$$\tau_{ind} = \frac{3 \cdot V_\phi \cdot E_A \cdot \sin\delta}{\omega_m \cdot X_S} \quad (19)$$

Διάγραμμα Λειτουργίας Σύγχρονης Γεννήτριας

Το διάγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας είναι ουσιαστικά ο συνδυασμός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας που θέτουν τα κυκλώματα του δρομέα και του στάτη καθώς και τα όρια που τίθενται από κάποιους εξωτερικούς παράγοντες. Είναι η γραφική παράσταση της φαινόμενης ισχύος της μηχανής η οποία εξάγεται από το διανυσματικό της διάγραμμα, στο οποίο θεωρείται ότι η τάση V_ϕ είναι ίση με την ονομαστική τάση. Η ενεργός ισχύς τοποθετείται στον οριζόντιο άξονα και η άεργος ισχύς στον κατακόρυφο (σχήμα 7).



Σχήμα 7: Διάγραμμα λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας.

Στο σχήμα 7 το όριο ασφάλειας του ρεύματος του στάτη, το οποίο αντιστοιχεί στο ονομαστικό I_A , αντιπροσωπεύεται από τον κύκλο της ονομαστικής φαινόμενης ισχύος, ενώ το όριο του ρεύματος διέγερσης αντιπροσωπεύεται από τον κύκλο που αντιστοιχεί στο ονομαστικό I_F ή στην ονομαστική E_A . Τα σημεία τα οποία είναι στο εσωτερικό των δύο αυτών κύκλων αντιστοιχούν σε ασφαλή σημεία λειτουργίας. Σε αυτό το διάγραμμα περιλαμβάνεται επίσης και το όριο της μέγιστης ισχύος που προσφέρεται από την κινητήρια μηχανή.

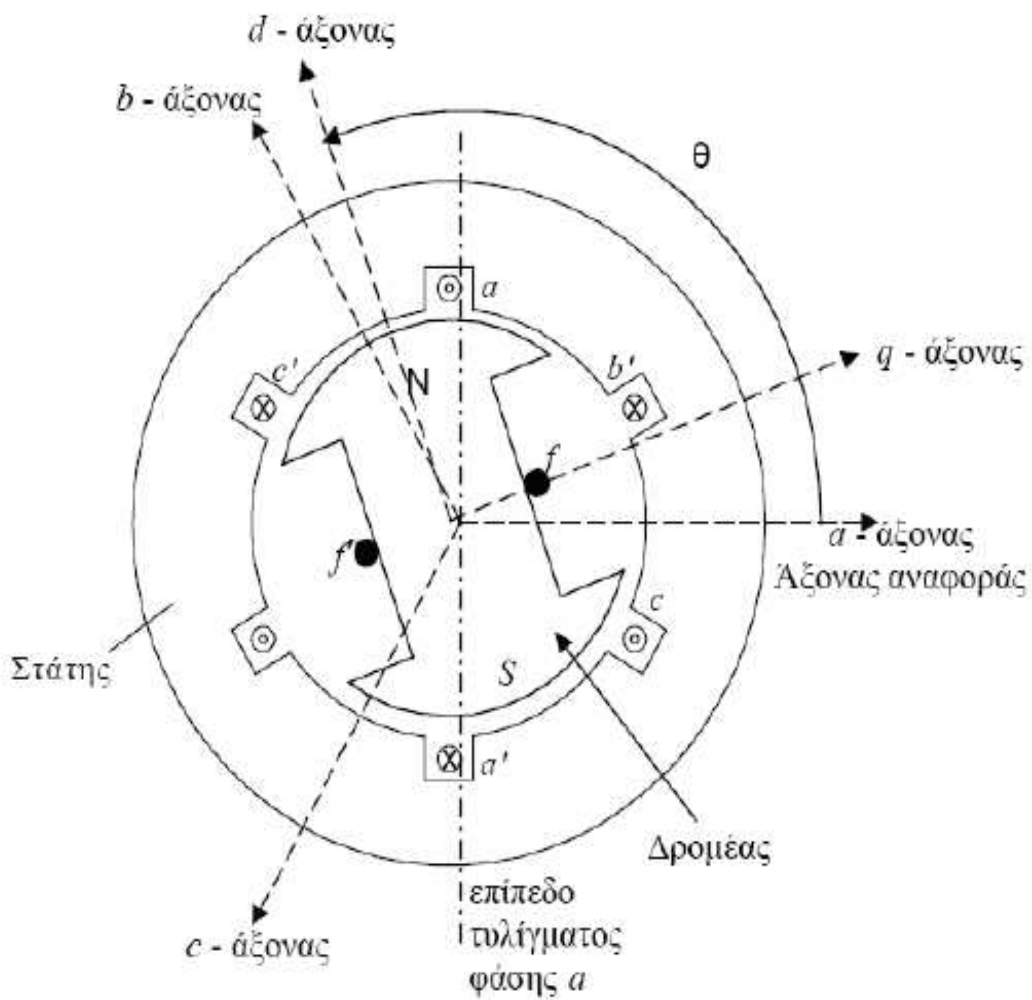
Σύγχρονη Γεννήτρια Έκτυπων Πόλων

Σε μία σύγχρονη γεννήτρια έκτυπων πόλων οφείλουν να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις της διακριτότητας των πόλων. Σε μεγάλο βαθμό η συμπεριφορά της είναι όμοια με τη συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας με κυλινδρικό δρομέα γι' αυτό και θα μελετηθούν μόνο τα νέα φαινόμενα που εισάγονται.

Στην περίπτωση έκτυπων πόλων το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι ίδιο παντού και γι' αυτό το λόγο γίνεται διάκριση σε δύο μαγνητικούς άξονες. Ο πρώτος άξονας είναι ο κατά μήκος άξονας με τον δείκτη d (direct axis) και ο δεύτερος άξονας είναι ο εγκάρσιος με τον δείκτη q (quadrature axis). Ο άξονας d συμπίπτει με τον άξονα ενός πόλου ενώ ο άξονας q είναι κάθετος προς τον d και βρίσκεται στο κενό ανάμεσα σε δύο πόλους όπως φαίνεται στο σχήμα 8.

Από την αναλογία των διακένων προκύπτει ότι η μαγνητική αντίσταση στον άξονα q είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τον άξονα d . Ο δρομέας έκτυπων πόλων περιστρέφεται συγχρονισμένα με τον άξονα του ρευματικού στρώματος του στάτη και αναλόγως τη μεταξύ τους θέση υπάρχει διαφορετικό μαγνητικό πεδίο του στάτη για την ίδια τιμή του ρεύματος. Επειδή το διάκενο δεν είναι σταθερό, το ρευματικό στρώμα δεν είναι ημιτονοειδώς κατανομημένο, αλλά συμβαίνουν αλλαγές στη μορφή του πεδίου για κάθε

διαφορετική τιμή του φορτίου αφού η θέση του δρομέα αλλάζει ως προς τον άξονα του ρευματικού στρώματος. Κάτι τέτοιο δε συμβαίνει στη σύγχρονη γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα αφού η μορφή του πεδίου μένει ίδια ανεξάρτητα από τη θέση που βρίσκεται ο δρομέας.



Σχήμα 8: Τομή σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων.

Κάνοντας ανάλυση του ρευματικού στρώματος σε δύο συνιστώσες γίνεται εύκολος ο υπολογισμός του πεδίου το οποίο προέρχεται από τα ρεύματα του στάτη. Η συνολική τάση δίνεται από τη σχέση :

$$V_{\varphi} = E_A + E_d + E_q \quad (20)$$

Όπου E_d είναι η συνιστώσα της τάσης λόγω της αντίδρασης οπλισμού στον άξονα d και E_q η συνιστώσα της τάσης λόγω αντίδρασης οπλισμού στον άξονα q, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις :

$$E_d = -j\chi_d I_d \quad (21)$$

$$E_q = -j\chi_q I_q \quad (22)$$

Έτσι η συνολική τάση στο στάτη θα είναι :

$$V_{\varphi} = E_A - j\chi_d I_d - j\chi_q I_q \quad (23)$$

Η αντίσταση και η αντίδραση του στάτη μπορούν να συμπεριληφθούν στις εξισώσεις αφού ισχύει :

$$X_d = \chi_d + X_A \quad (24)$$

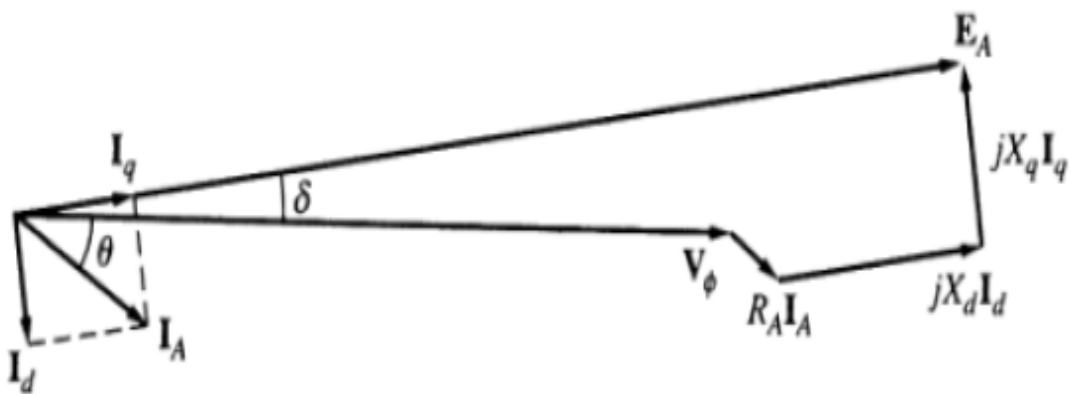
$$X_q = \chi_q + X_A \quad (25)$$

Η πτώση τάσης που συμβαίνει στο στην αντίσταση του τυλίγματος του στάτη ισούται με το γινόμενο της αντίστασης του τυλίγματος του στάτη και

του ρεύματος του I_A . Τελικά, η ολοκληρωμένη έκφραση της φασικής τάσης μιας σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων είναι η εξής :

$$V_\phi = E_A - jX_d I_d - jX_q I_q - R_A I_A \quad (26)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα 9. Στο συγκεκριμένο διανυσματικό διάγραμμα το ρεύμα του στάτη αναλύεται σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη και μία κάθετη στην E_A .



Σχήμα 9: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων.

Η ισχύς εξόδου μιας σύγχρονης γεννήτριας δίνεται από τη σχέση :

$$P = \frac{3V_\phi E_A}{X_d} \sin\delta + \frac{3V_\phi^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta \quad (27)$$

Ενώ η επαγόμενη ροπή υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi}E_A}{\omega_m X_d} \sin\delta + \frac{3V_{\phi}^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta \quad (28)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΔΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ, ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ

Εισαγωγή

Η απόδοση μια μηχανής εκφράζεται από το πηλίκο της ισχύος της οποίας εισέρχεται ως προς την ισχύ η οποία εξέρχεται. Όπως, στις μηχανές με μικρή ισχύ υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθεί απευθείας η ισχύς. Από την άλλη πλευρά, στις μηχανές με μεγάλη ισχύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συμβατική μέθοδος η οποία στηρίζεται στις διαχωρισμένες απώλειες. Εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος διότι σε αυτές τις μηχανές η μηχανική ισχύς δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί με ακρίβεια.

Τα είδη των απωλειών σε μια σύγχρονη μηχανή μπορεί να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- A) απώλειες χαλκού
- B) απώλειες πυρήνα
- Γ) μηχανικές απώλειες και
- Δ) επιπρόσθετες απώλειες φορτίου ή κατανεμημένες απώλειες

Απώλειες Χαλκού

Όταν γίνεται λόγος για απώλειες χαλκού ουσιαστικά πρόκειται για τις ωμικές απώλειες οι οποίες κάνουν την εμφάνιση τους στα τυλίγματα του στάτη (οπλισμός) και του δρομέα (πεδίο) στη μηχανή.

Οι απώλειες χαλκού του στάτη δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_a \quad (29)$$

όπου P_{SCL} είναι θερμική ισχύς σε W,

I_a είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει την κάθε φάση του στάτη σε A και

R_a είναι η αντίσταση κάθε φάσης του στάτη σε Ω.

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{RCL} = I_f^2 \cdot R_f \quad (30)$$

Όπου P_{SCL} θερμική ισχύς σε W,

I_f το ρεύμα το οποίο διαρρέει το τυλίγμα του πεδίου σε A και

R_f η αντίσταση του τυλίγματος του πεδίου σε Ω.

Απώλειες Πυρήνα

Όταν γίνεται λόγος για απώλειες πυρήνα ουσιαστικά πρόκειται για τις απώλειες που εμφανίζονται στα μεταλλικά μέρη της μηχανής και διαχωρίζονται στις απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορευμάτων.

A. Απώλειες Υστέρησης

Το μαγνητικό πεδίο και η μαγνητική επαγωγή συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$B = \mu \cdot H \quad (31)$$

Όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή σε T,

μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε H/m και

H είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε A/m.

Η σχέση ανάμεσα στην μαγνητική επαγωγή και το μαγνητικό πεδίο δεν είναι γραμμική πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η μαγνητική διαπερατότητα μεταβάλλεται συναρτήσει του μαγνητικού πεδίου H .

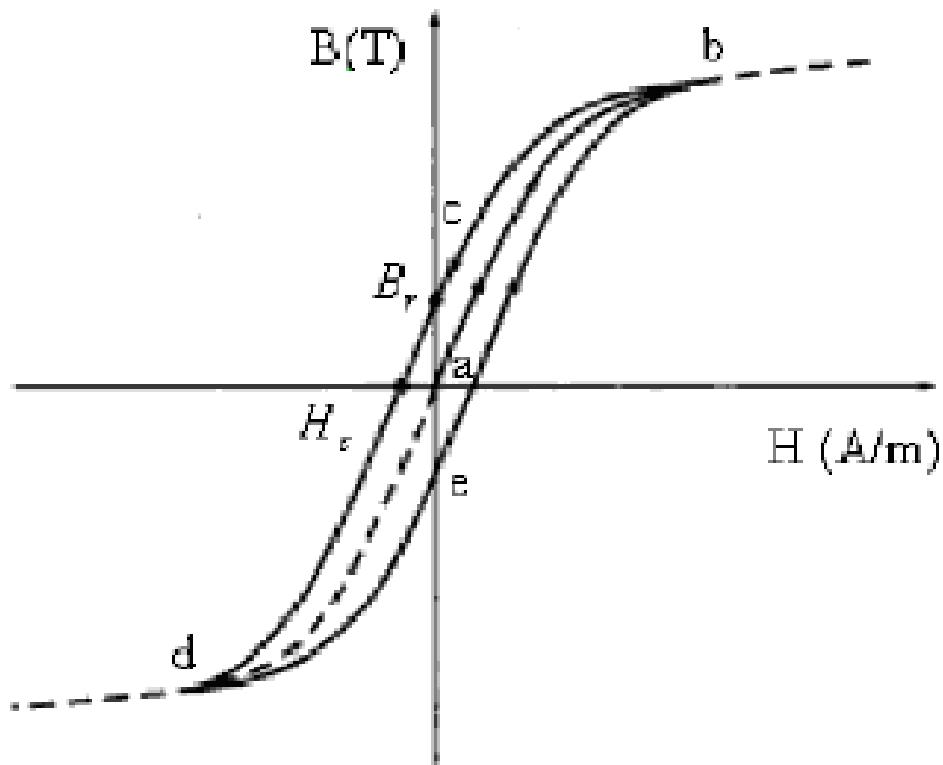
Η πραγματική σχέση ανάμεσα στην μαγνητική επαγωγή και στο μαγνητικό πεδίο σε ένα μαγνητικό υλικό εκφράζεται μέσω του βρόγχου υστέρησης. Θεωρώντας δεδομένο ότι η αρχική μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα είναι 0 και ενώ το ρεύμα αυξάνεται στην αρχή η μαγνητική επαγωγή εκφράζεται από την καμπύλη ab (σχήμα 10) η οποία είναι γνωστή με το όνομα «καμπύλη πρώτης μαγνήτισης». Καθώς το ρεύμα μειώνεται η μαγνητική επαγωγή μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο και εκφράζεται από

την καμπύλη bcd , ενώ όταν αυξάνεται και πάλι το ρεύμα εκφράζεται από την καμπύλη deb . Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι η μαγνητική επαγωγή, πέρα από την τιμή του ρεύματος, εξαρτάται και από την προϊστορία της (προγενέστερες τιμές της). Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται υστέρηση και η διαδρομή $bcdeb$ βρόχος υστέρησης.

Το φαινόμενο της υστέρησης είναι δυνατόν να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη την δομή του υλικού. Στο εσωτερικό των μετάλλων υπάρχουν μικρές μαγνητικές περιοχές οι οποίες ονομάζονται περιοχές Weiss. Όταν δεν εφαρμόζεται κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο οι μαγνητικές αυτές περιοχές είναι διατεταγμένες με τρόπο τυχαίο μέσα στο υλικό με αποτέλεσμα τα μαγνητικά τους πεδία να αλληλοεξουδετερώνονται. Όταν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο οι μαγνητικές περιοχές οι οποίες είναι προσανατολισμένες στην διεύθυνση του πεδίου μεγαλώνουν έναντι των περιοχών οι οποίες είναι προσανατολισμένες σε άλλες κατευθύνσεις. Η αύξηση των ατόμων που ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο είναι ο λόγος αύξησης της μαγνητικής ροής στο μέταλλο η οποία με την σειρά της αναγκάζει περισσότερα άτομα να ευθυγραμμιστούν με το εξωτερικό πεδίο κ.ο.κ. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται μέχρι που τελικά όλες οι περιοχές Weiss του μετάλλου ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο (σχήμα 11).

Όταν καταργηθεί το εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο η ευθυγράμμιση των περιοχών Weiss παραμένει. Για να γίνει η επαναφορά των πεδίων στην αρχική τυχαία κατάσταση όπου βρίσκονταν χρειάζεται επιπλέον

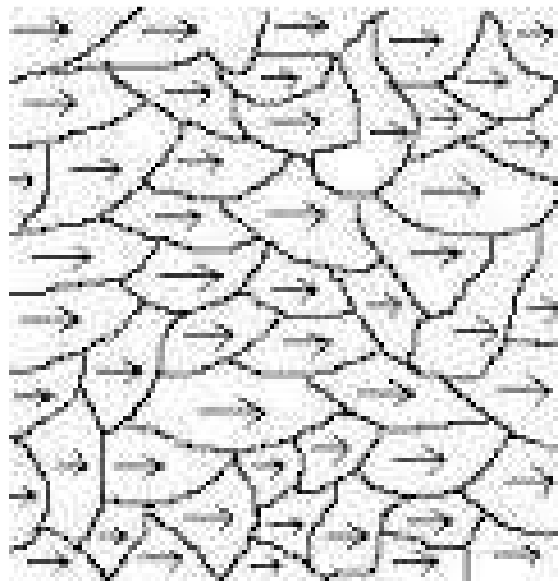
κατανάλωση ενέργειας. Σε διαφορετική περίπτωση το σιδηρομαγνητικό υλικό μετατρέπεται σε μόνιμο μαγνήτη.



Σχήμα 10: Βρόχος υστέρησης

Αυτή η ανάγκη για προσφορά ενέργειας που έχει σαν σκοπό την αλλαγή του βαθμού ευθυγράμμισης των μαγνητικών περιοχών δημιουργεί τις απώλειες υστέρησης. Συγκεκριμένα όταν στο σιδηρομαγνητικό υλικό εφαρμόζεται εναλλασσόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο τα εσωτερικά πεδία τείνουν να ευθυγραμμιστούν με αυτό με αποτέλεσμα να αλλάζουν διαρκώς

διεύθυνση. Οι απώλειες υστέρησης αποτελούν την ενέργεια η οποία δαπανάται για επαναπροσανατολιστούν οι μαγνητικές περιοχές. Ο υπολογισμός των απωλειών υστέρησης γίνεται από το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης όταν αυτός διαγράφεται μια φορά.



Σχήμα 11: Περιοχές Weiss με ευθυγραμμισμένες μαγνητικές ροπές μετά την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

B. Απώλειες Δινορευμάτων

Σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο στο σιδηρομαγνητικό πυρήνα προκαλείται ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο θέτει σε κίνηση τα ελεύθερα φορτία του πυρήνα με αποτέλεσμα την δημιουργία ρευμάτων που έχουν κλειστή τροχιά και είναι γνωστά σαν δινορεύματα. Οι απώλειες δινορευμάτων έχουν να κάνουν με την θερμότητα η οποία παράγεται εξαιτίας των δινορευμάτων και έχουν χαρακτήρα ωμικό. Η

ποσότητα ενέργειας που χάνεται λόγω των δινορευμάτων είναι ανάλογη με το μήκος της διαδρομής που διαγράφουν στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα.

Για την μείωση των απωλειών λόγω της ύπαρξης δινορευμάτων οι σιδηρομαγνητικοί πυρήνες χωρίζονται σε λεπτά φύλλα τα οποία ονομάζονται δυναμοελάσματα. Μεταξύ των δυναμοελασμάτων τοποθετούνται μονωτικές ρητίνες οι οποίες μειώνουν τις διαδρομές των δινορευμάτων. Η επίδραση των ρητινών αυτών στις μαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα είναι αμελητέα αφού έχουν μικρό πάχος ενώ αντίθετα, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην μείωση των απωλειών δινορευμάτων. Ένας άλλος τρόπος για να μειωθούν οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες εξαιτίας των δινορευμάτων είναι ο κατάλληλος συνδυασμός υλικών για την κατασκευή των σιδηρομαγνητικών πυρήνων. Ο σίδηρος χρησιμοποιείται ευρέως επειδή είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής εξαιτίας της μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας του κάτι το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή μαγνητική ζεύξη του στάτη και του δρομέα. Παρόλα αυτά η χρησιμοποίηση κραμάτων σιδήρου και πυριτίου είναι προτιμότερη γιατί με αυτόν τον τρόπο περιορίζονται όχι μόνο οι απώλειες λόγω ύπαρξης δινορευμάτων αλλά και οι απώλειες υστέρησης.

Μηχανικές Απώλειες

Οι μηχανικές απώλειες έχουν να κάνουν με τα μηχανικά φαινόμενα και οφείλονται είτε στην τριβή των τριβέων (bearings) στην μηχανή είτε στην

τριβή ανάμεσα στα κινούμενα μέρη της μηχανής και στον αέρα που βρίσκεται στο εσωτερικό της.

Σε μια σύγχρονη μηχανή υπάρχει περιστροφική τριβή ανάμεσα στο κινούμενο άξονα και στους δακτυλίους στήριξης του (σχήμα 12). Καθώς ο άξονας περιστρέφεται αναπτύσσεται τριβή ανάμεσα στα δύο σώματα εξαιτίας της επαφής τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας και κατά συνέπεια την φθορά των επιφανειών η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$V_W = \frac{K_W \cdot P \cdot L}{3 \cdot H} \quad (32)$$

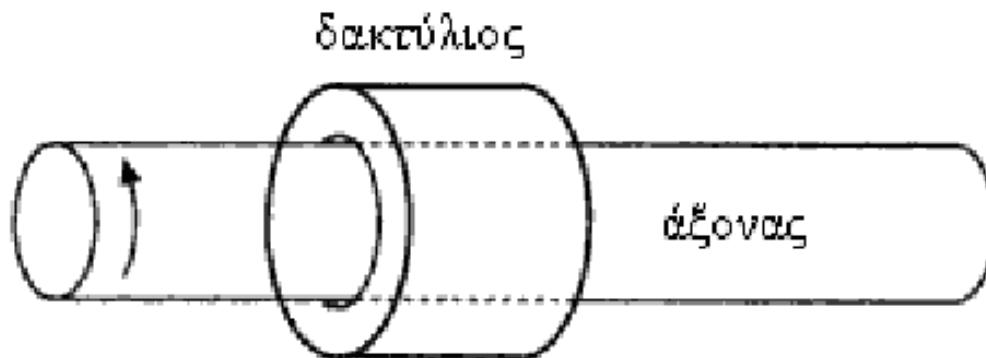
όπου V_W όγκος της φθοράς σε m^3 ,

K_W συντελεστής φθοράς,

P φορτίο του άξονα σε kg

L απόσταση ολίσθησης σε m και

H σκληρότητα του πιο μαλακού υλικού kg/m^2 .



Σχήμα 12: Σύστημα περιστρεφόμενου άξονα και δακτυλίου στήριξης.

Για την αποφυγή των ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων που προκαλεί η τριβή στις σύγχρονες μηχανές γίνεται χρήση λίπανσης μεταξύ των τριβόμενων επιφανειών. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο συντελεστής φθοράς. Πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει το πάχος στρώματος του λιπαντικού το οποίο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να εξασφαλίζει την ομαλή κίνηση του άξονα. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν περιορισμοί που έχουν να κάνουν με το φορτίο του άξονα. Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο τόσο περισσότερο συμπιέζεται το στρώμα λιπαντικού γεγονός που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση του ιξώδους λιπαντικού με αποτέλεσμα την τελική μείωση του πάχους του στρώματος λιπαντικού.

Η τριβή με ρευστό έχει να κάνει με την περίπτωση όπου μια κινούμενη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με ένα ρευστό . Σε μια σύγχρονη μηχανή ο δρομέας έρχεται σε επαφή με τον αέρα που υπάρχει στο διάκενο με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τριβής στην μεταξύ τους διεπιφάνεια.

Η ροπή της τριβής δίνεται από την σχέση:

$$M_f = C_f \cdot \rho \cdot \pi \cdot \omega^2 \cdot r^4 \cdot l \quad (33)$$

Όπου M_f η ροπή της τριβής της επιφάνειας του δρομέα με τον αέρα σε $N \cdot m$,

C_f συντελεστής τριβής,

ρ πυκνότητα του αέρα kg/m^3 ,

ω γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε rad/s ,

r ακτίνα του δρομέα σε m και

l αξονικό μήκος του διακένου σε m.

Ο συντελεστής τριβής είναι καθαρός αριθμός και δίνεται από την σχέση:

$$C_f = \frac{2 \cdot \tau}{\rho \cdot u^2} \quad (34)$$

Όπου τ πίεση συνάφειας στην επιφάνεια του δρομέα σε N/m^2 και

u η περιφερειακή ταχύτητα του δρομέα σε m/s .

Η πίεση συνάφειας εξαρτάται από την ροή του αέρα μέσα στο διάκενο και συγκεκριμένα εξαρτάται από το εάν αυτή είναι ομαλή ή τριβώδης. Με λίγα λόγια η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας του δρομέα και της επιφάνειας καθώς και οι απώλειες που προκαλούνται εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρομέα, την ταχύτητα του, την κατάσταση της επιφάνειας τους (τραχύτητα), τον τρόπο ροής και τις ιδιότητες του αέρα.

Επιπρόσθετες Απώλειες Φορτίου

Με τον όρο επιπρόσθετες απώλειες φορτίου εννοούνται οι απώλειες εκείνες που δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες. Αυτές οι επιπρόσθετες απώλειες για τις περισσότερες μηχανές θεωρούνται ως περίπου το 1% του πλήρους φορτίου. Κατά κύριο λόγο οφείλονται στις διακυμάνσεις της μαγνητικής ροής οι οποίες παρατηρούνται στα δόντια το στάτη, του δρομέα αλλά και στο διάκενο. Σε δευτερεύοντα λόγο οφείλονται στην λεγόμενη μαγνητική ροή σκέδασης η οποία ουσιαστικά είναι η ροή που δεν συμβάλει στην μαγνητική ζεύξη δρομέα και στάτη. Εξαιτίας αυτής της ροής συμβαίνει επαγωγή παρασιτικών ρευμάτων σε μεταλλικά τμήματα του κινητήρα με τον ίδιο ακριβώς μηχανισμό που επάγονται δινορεύματα στον δρομέα εξαιτίας της κύριας μαγνητικής ροής. Η επιπρόσθετες απώλειες φορτίου αναπτύσσονται κατά κύριο λόγο σε περιοχές κοντά στα άκρα του κινητήρα στους αγωγούς του δρομέα και του στάτη, στα έδρανα και στον σίδηρο κοντά στο διάκενο. Η ποσοτικοποίηση τους είναι δυνατό να γίνει πειραματικά.

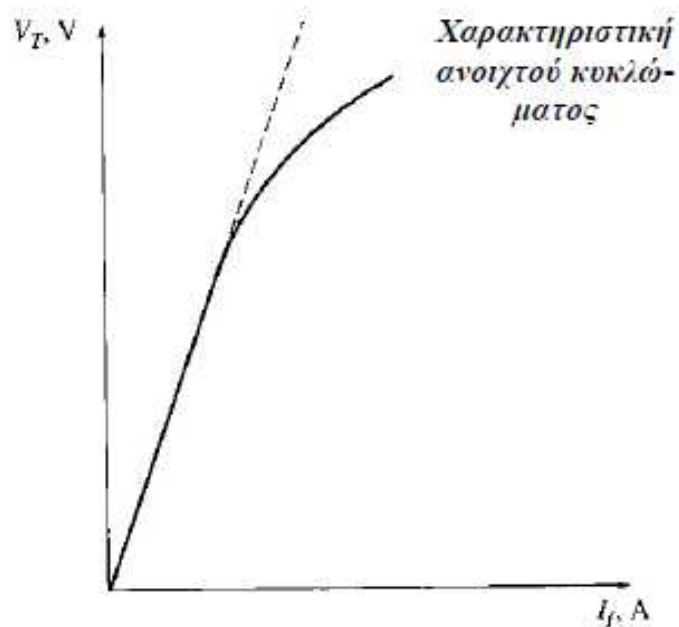
Καμπύλες Κορεσμού

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τη λειτουργία μίας σύγχρονης γεννήτριας σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμά της είναι η σχέση ρεύματος

διέγερσης – τάσης, η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη και η σύγχρονη αντίδραση. Για τον προσδιορισμό τους ακολουθούνται δύο διαφορετικές τεχνικές. Η πρώτη είναι με το πείραμα ανοιχτού κυκλώματος και η δεύτερη με το πείραμα βραχυκύκλωσης.

A. Πείραμα Ανοιχτού Κυκλώματος

Η γεννήτρια περιστρέφεται σε ονομαστική ταχύτητα χωρίς να είναι συνδεδεμένο σε αυτήν κάποιο φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι η τάση V_{ϕ} στα άκρα μίας φάσης θα είναι ίση με την τάση E_A , αφού το ρεύμα I_A θα είναι μηδενικό. Με αυτό τον τρόπο, μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη ανοιχτού κυκλώματος η οποία είναι ευθεία γραμμή για μικρές τιμές του ρεύματος διέγερσης και έως ότου αρχίσουν να εμφανίζονται τα φαινόμενα κορεσμού (σχήμα 13).



Σχήμα 13: Χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος.

Για να παραχθεί ο συγκεκριμένος τύπος καμπύλης θα πρέπει οι μετρήσεις για τα σημεία να ληφθούν με συγκεκριμένο τρόπο. Συγκεκριμένα :

- Έξι σημεία θα πρέπει να ληφθούν για τάση μέχρι το 60% της ονομαστικής με το πρώτο από αυτά να είναι για μηδενική διέγερση.
- Το λιγότερο δέκα σημεία για τάση μεταξύ 60% και 110% της ονομαστικής με βήμα τουλάχιστον 5%.
- Τουλάχιστον δύο σημεία για τιμές τάσης άνω του 110% και το ένα από αυτά να είναι στο 120% του ονομαστικού ρεύματος διέγερσης για εν κενό λειτουργία.

Για την ορθότερη λήψη των παραπάνω μετρήσεων, το σωστότερο είναι η γεννήτρια να λειτουργεί για κάποια λεπτά σε κάθε τιμή τάσης έτσι ώστε η ταχύτητα να σταθεροποιείται στο σύγχρονο αριθμό στροφών την εκάστοτε φορά. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα σφάλματα από τις μεταβολές της διέγερσης και της ταχύτητας.

B. Πείραμα Βραχυκύκλωσης

Αν βραχυκυκλωθούν τα άκρα των φάσεων τότε η τάση V_ϕ θα είναι μηδέν και έτσι θα ισχύει :

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S} \quad (35)$$

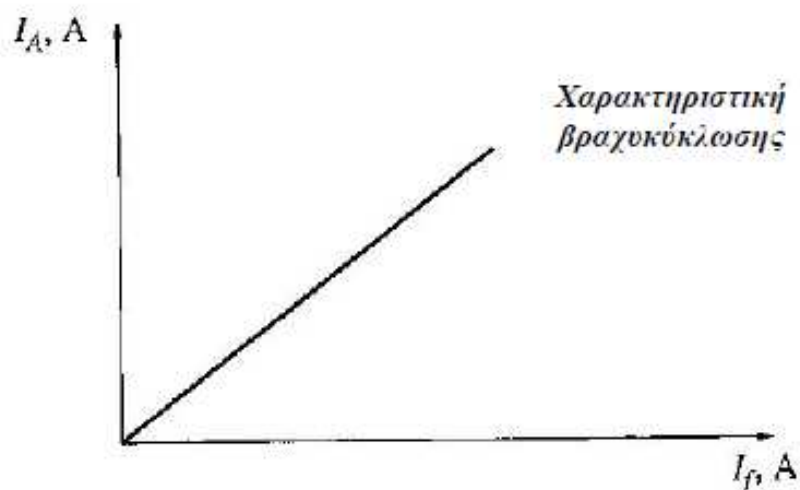
Το μέτρο του ρεύματος του οπλισμού θα δίνεται από την εξίσωση :

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{(R_A^2 + jX_S^2)}} \quad (36)$$

Με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης καταγράφεται η χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού βραχυκυκλώματος η οποία είναι μία ευθεία. Ο λόγος που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι γιατί το μαγνητικό πεδίο του δρομέα εξουδετερώνεται από αυτό του στάτη και το συνολικό πεδίο (το άθροισμά τους δηλαδή) έχει μικρή τιμή με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται κορεσμός (σχήμα 14).

Οι μετρήσεις που θα πρέπει να ληφθούν ώστε να κατασκευαστεί πειραματικά η καμπύλη κορεσμού βραχυκυκλώματος θα πρέπει να είναι μετρήσεις από το 125% έως το 25% του ονομαστικού ρεύματος τυλίγματος

του στάτη με βήμα 25%. Για να ελεγχθεί η συμμετρία των φάσεων θα πρέπει να ληφθούν μετρήσεις για τα ρεύματα και των τριών φάσεων. Οι μετρήσεις του ρεύματος θα πρέπει να γίνουν ξεκινώντας από τη μέγιστη και πηγαίνοντας προς την ελάχιστη τιμή της διέγερσης για το λόγο ότι η μέγιστη τιμή του ρεύματος του τυλίγματος του στάτη είναι απαραίτητο να καταγραφεί πρώτη ώστε να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία του τυλίγματος.



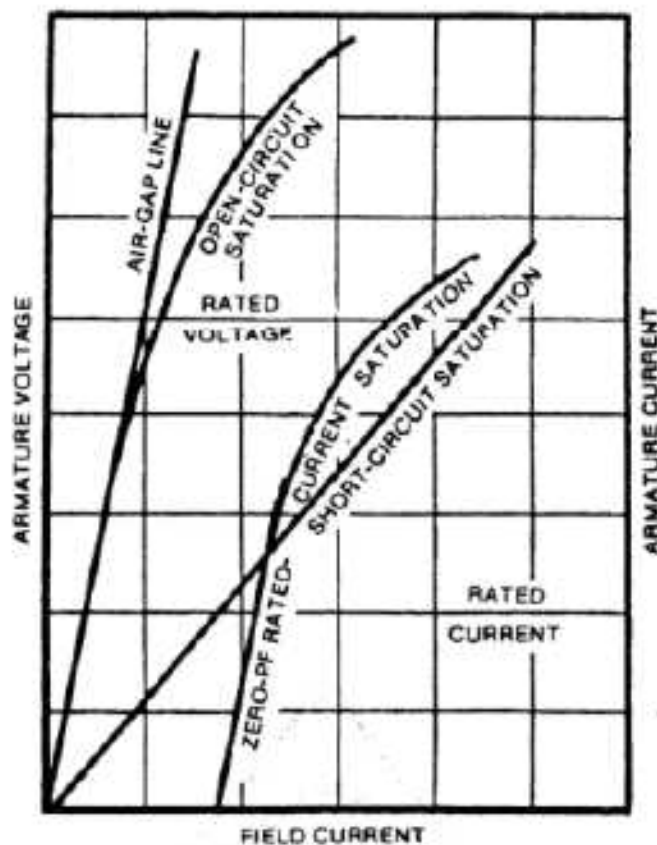
Σχήμα 14: Χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού βραχυκυκλώματος.

Αν η τιμή της αντίστασης R_A θεωρηθεί αμελητέα τότε μπορεί να γίνει εκτίμηση της σύγχρονης αντίδρασης από τη σχέση :

$$X_S \cong \frac{E_A}{I_A} \quad (37)$$

Στην παραπάνω σχέση, ο αριθμητής προκύπτει από τη χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος ενώ ο παρονομαστής προκύπτει από

χαρακτηριστική καμπύλη κορεσμού βραχυκυκλώματος. Όσο για τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης R_A γίνεται, όταν η γεννήτρια δε βρίσκεται σε λειτουργία, να εφαρμοστεί πηγή συνεχούς τάσης στα τυλίγματα. Έτσι, επειδή η χρήση συνεχούς τάσης αποκλείει την επίδραση της σύγχρονης αντίδρασης, μετρώντας το ρεύμα που προκύπτει σε αυτή την κατάσταση υπολογίζεται η R_A . Στο σχήμα 15 παρουσιάζονται πειραματικές καμπύλες κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 15: Καμπύλες κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος.

Απόδοση

Η απόδοση μία γεννήτριας (αλλά και μίας μηχανής γενικότερα) ορίζεται ως το πηλίκο της εξερχόμενης ισχύος προς την εισερχόμενη. Άρα :

$$efficiency (\%) = \frac{output}{input} \cdot 100 \quad (38)$$

Όπου efficiency είναι η συνολική απόδοση της γεννήτριας

output είναι η εξερχόμενη ισχύς και

input είναι η εισερχόμενη ισχύς.

Με τη χρήση ενός δυναμόμετρου επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή μέτρηση της εισερχόμενης ισχύος σε μία σύγχρονη γεννήτρια ή της εξερχόμενης ισχύος από ένα κινητήρα. Για να εξαλείφει η πιθανότητα πτώσης τάσης στο εξωτερικό καλώδιο, θα πρέπει ο μετασχηματιστής τάσης να συνδεθεί στους ακροδέκτες της μηχανής.

Εκτός από την απόδοση, υπάρχει και η συμβατική απόδοση η οποία για γεννήτρια ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$efficiency (\%) = \frac{losses}{(output+losses)} \cdot 100 \quad (39)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις παραπάνω σχέσεις οι απώλειες, η εισερχόμενη και η εξερχόμενη ισχύς πρέπει να είναι στις ίδιες μονάδες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Παράμετροι Μόνιμης Κατάστασης

Σε μία σύγχρονη γεννήτρια τα διάφορα μεγέθη μεταβάλλονται αναλόγως με τον κορεσμό των μαγνητικών κυκλωμάτων, ενώ για τους υπολογισμούς γίνεται χρήση των κορεσμένων αλλά και των μη κορεσμένων τιμών. Παρακάτω αναφέρονται μεγέθη εκ των οποίων κάποια προκύπτουν μετά τη διεξαγωγή πειραμάτων στην μόνιμη κατάσταση.

1. X_{du} είναι η μη κορεσμένη αντίδραση (σύγχρονη) του d-άξονα.
2. X_{ds} είναι μία κορεσμένη τιμή (συγκεκριμένη) της X_{du} . Εξαρτάται από την τάση των ακροδεκτών της σύγχρονης γεννήτριας, από τον συντελεστή ισχύος καθώς και από τη φαινόμενη ισχύ σε MVA.
3. X_{adu} είναι η σύγχρονη, μη κορεσμένη, αμοιβαία αντίδραση του d-άξονα. Πρόκειται ουσιαστικά για το ποσοστό της X_{du} το οποίο είναι δυνατό να κορεστεί και δίνεται από την εξίσωση :

$$X_{du} = X_{adu} + X_{\sigma} \quad (40)$$

Όπου X_{σ} είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας.

4. X_{ads} είναι η κορεσμένη τιμή της αμοιβαίας σύγχρονης αντίδρασης του d-άξονα. Πρόκειται για το ποσοστό της X_{ds} που είναι κορεσμένο και δίνεται από τη σχέση :

$$X_{ds} = X_{ads} + X_{\sigma} \quad (41)$$

5. X_q είναι η σύγχρονη αντίδραση του q-άξονα.
6. X_{qs} είναι η σύγχρονη αντίδραση του q-άξονα όπως αυτή προκύπτει πειραματικά.
7. δ είναι η ηλεκτρική γωνία φορτίου.
8. X_2 είναι η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας.
9. R_2 είναι η αντίσταση αρνητικής ακολουθίας.
10. X_0 είναι η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας.
11. R_0 είναι η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας.
12. X_p είναι η αντίδραση Potier.
13. I_{fn} είναι το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης.
14. Z_{st} είναι η εμπέδηση εκκίνησης των σύγχρονων κινητήρων.
15. R_1 είναι η αντίσταση θετικής ακολουθίας
16. SCR είναι ο λόγος βραχυκυκλώματος.

Σύγχρονη Αντίδραση d-άξονα

Στις συνηθισμένου σχεδιασμού γεννήτριες, το μέτρο της σύγχρονης αντίδρασης και το μέτρο της σύγχρονης εμπέδησης του d-άξονα είναι σχεδόν ίσα, πράγμα που σημαίνει ότι τα δύο αυτά μεγέθη μπορούν να λάβουν την ίδια τιμή. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της καμπύλης κορεσμού βραχυκυκλώματος και της καμπύλης κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος μπορεί να προκύψει η μη κορεσμένη τιμή της σύγχρονης εμπέδησης του d-άξονα.

Η σύγχρονη αντίδραση μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της σχέσης :

$$X_{du} = \frac{I_{FSI}}{I_{FG}} (42)$$

Όπου I_{FSI} είναι το ρεύμα πεδίου το οποίο αντιστοιχεί στο ρεύμα βάσης του τυλίγματος του στάτη στην καμπύλη κορεσμού βραχυκυκλώματος και

I_{FG} είναι το ρεύμα πεδίου το οποίο αντιστοιχεί στην τάση βάσης.

Ενώ γενικά για τη σύγχρονη αντίδραση ισχύει ότι :

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma (43)$$

Όπου X_{ad} είναι το κορεσμένο ποσοστό της X_d .

Ως συνεπαγωγή θα ισχύει η σχέση (40) και όταν θα έχει κορεστεί η X_{ad} θα ισχύει η (41).

Σύγχρονη Αντίδραση q-άξονα

Δεν υπάρχει σαφής ορισμός της σύγχρονης αντίδρασης του q-άξονα ούτε για την κορεσμένη αλλά ούτε και για τη μη κορεσμένη τιμή της. Η αιτία είναι ότι ο ορισμός δεν προκύπτει από το πείραμα σύμφωνα με το οποίο προσδιορίζεται αλλά προκύπτει από το ονομαστικό ρεύμα του τυλίγματος του στάτη. Η συνηθισμένη υπόθεση που γίνεται είναι ότι :

$$X_q = X_{aq} + X_\sigma \quad (44)$$

Όπου X_{aq} ποσοστό της X_q που είναι δυνατό να κορεστεί.

Σαν συνεπαγωγή θα ισχύει :

$$X_{qu} = X_{aqu} + X_\sigma \quad (45)$$

Ενώ όταν η X_{aq} θα έχει κορεστεί θα ισχύει ότι :

$$X_{qs} = X_{aqs} + X_\sigma \quad (46)$$

Για να προσδιοριστεί πειραματικά η X_{qs} θα πρέπει ο δρομέας να περιστρέφεται με μία ταχύτητα η οποία να διαφέρει πολύ λίγο σε σχέση με το σύγχρονο αριθμό στροφών (λιγότερο του 1%). Επίσης θα πρέπει, από τη μία το τύλιγμα πεδίου να είναι ανοιχτοκυκλωμένο και από την άλλη το τύλιγμα του στάτη να τροφοδοτείται από πηγή τριφασική θετικής ακολουθίας

ονομαστικής συχνότητας. Η τιμή της τάσης τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι μεταξύ 1% και 20% της ονομαστικής.

Τα μεγέθη τα οποία πρέπει να καταγράφονται είναι η τάση και το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη αλλά και η τάση που αναπτύσσεται κατά μήκος του ανοιχτοκυκλωμένου τυλίγματος πεδίου. Τα πιο ακριβή αποτελέσματα τα παρέχουν οι παλμογράφοι. Από τη στιγμή που οι τάσεις και τα ρεύματα στις τρεις φάσεις είναι συμμετρικά αρκεί μόνο η χρήση μίας τάσης και ενός ρεύματος. Στο σχήμα 16 απεικονίζεται γραφικά η μέθοδος η οποία ονομάζεται πείραμα ολίσθησης. Η ολίσθηση ορίζεται ως το πηλίκο της συχνότητας που επάγεται στο τύλιγμα του πεδίου προς τη συχνότητα της τάσης η οποία τροφοδοτείται στο τύλιγμα του στάτη.

Σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα του δρομέα εξαιτίας της επίδρασης των έκτυπων πόλων και των ρευμάτων που επάγονται στο τύλιγμα απόσβεσης με αποτέλεσμα την παραγωγή μίας ροπής ώθησης (pulsating torque). Σε αυτές τις περιπτώσεις χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μία σειρά μετρήσεων με εκκίνηση τη μικρότερη δυνατή ολίσθηση στην οποία είναι δυνατό η ταχύτητα να διατηρηθεί σταθερή και να γίνουν συνολικά τουλάχιστον τρία ακόμα πειράματα για μεγαλύτερες ολισθήσεις.

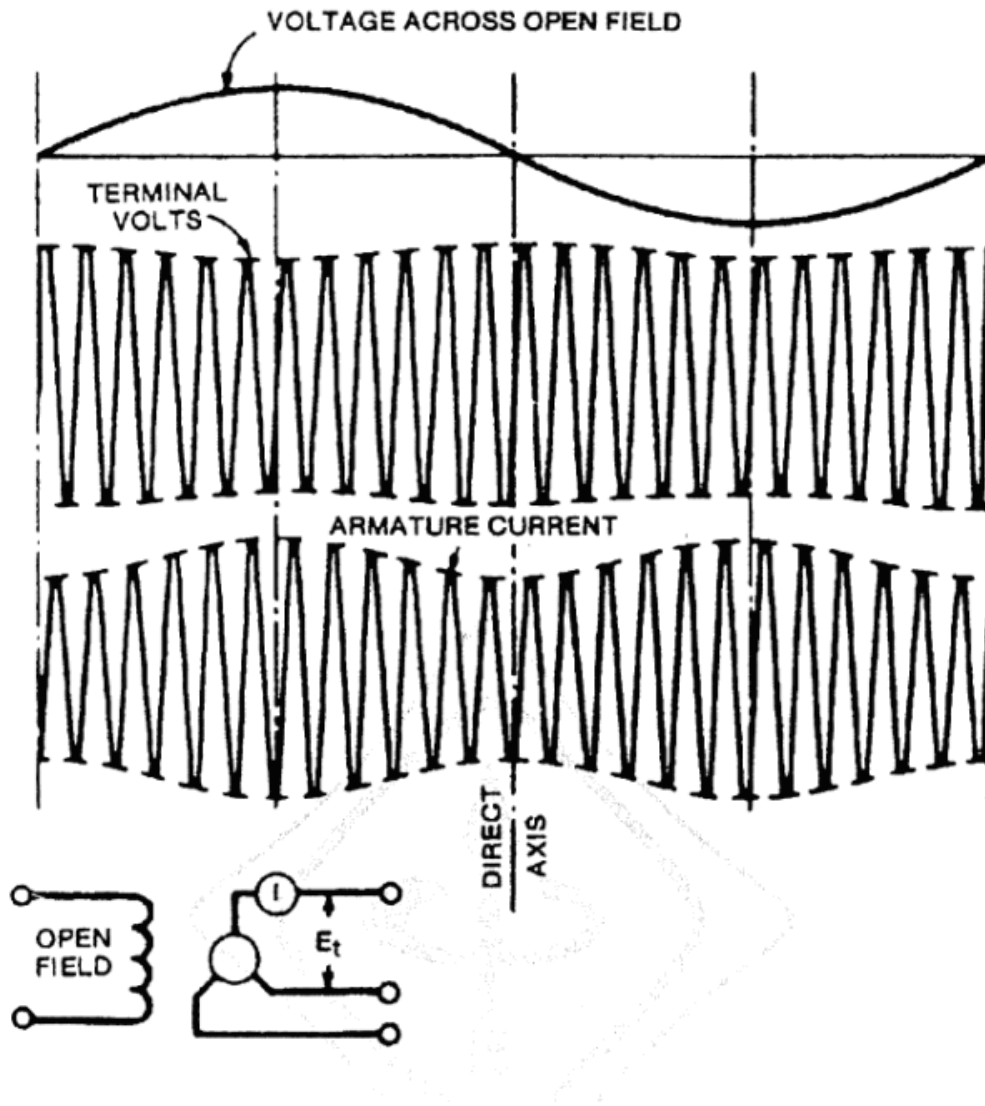
Αν η ολίσθηση είναι σε ικανοποιητικό βαθμό μικρή και η ταχύτητα παραμένει σταθερή τότε τα όργανα θα ακολουθούν πιστά (ανάλογα και με τη διακριτική τους ικανότητα) τις μεταβολές στο ρεύμα και στην τάση και έτσι θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της σύγχρονης

αντίδρασης. Θα πρέπει επίσης, να ληφθούν μετρήσεις του ρεύματος και της τάσης όταν το ρεύμα λάβει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές του.

Οι ελάχιστοι αλλά και οι μέγιστοι λόγοι της τάσης του τυλίγματος προς το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη προκύπτουν όταν είναι πολύ μικρή η ολίσθηση. Από τους λόγους αυτούς μπορούν να προέλθουν συγκεκριμένες κορεσμένες τιμές της σύγχρονης αντίδρασης του d-άξονα (X_{ds}) και του q-άξονα (X_{qs}) όπως αυτές προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις :

$$X_{ds} = \frac{E_{MAX}}{I_{MIN}} \quad (47)$$

$$X_{qs} = \frac{E_{MIN}}{I_{MAX}} \quad (48)$$



Σχήμα 16: Μέθοδος προσδιορισμού της σύγχρονης αντίδρασης για τον q-άξονα.

Για να προκύψουν πιο ακριβή αποτελέσματα οι τιμές αυτές δεν πρέπει να θεωρηθούν τελικές. Η ακριβέστερη μέθοδος είναι ο προσδιορισμός της σύγχρονης αντίδρασης του d-άξονα όπως αυτός περιγράφεται στην αντίστοιχη

παραπάνω ενότητα και να γίνει ο προσδιορισμός των τιμών της σύγχρονης αντίδρασης του q-άξονα με βάση τις παρακάτω εξισώσεις :

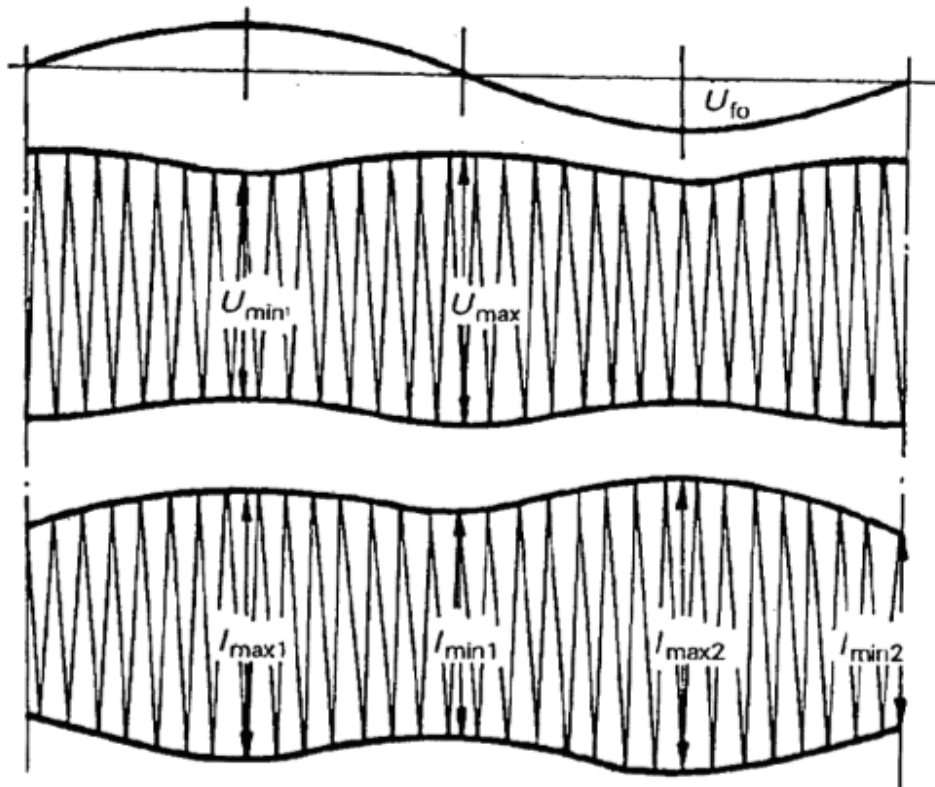
$$I_{MAX} = \sqrt{I_{\alpha v}^2 - \left(\frac{U_{res}}{X_d}\right)^2} \quad (49)$$

Όπου $I_{\alpha v}$ είναι το ημίθροισμα δύο συνεχόμενων μέγιστων τιμών του ρεύματος σε p.u.

U_{res} είναι η παραμένουσα τάση η οποία μετριέται πριν τη διεξαγωγή του πειράματος και κυμαίνεται μεταξύ 10% και 30% της τάσης που τροφοδοτούνται οι ακροδέκτες του στάτη.

$$I_{MIN} = \sqrt{I_{\alpha v}^2 - \left(\frac{U_{res}}{X_d}\right)^2} \quad (50)$$

Όπου $I_{\alpha v}$ είναι το ημίθροισμα δύο συνεχόμενων ελάχιστων τιμών του ρεύματος σε p.u.



Σχήμα 17: Ο προσδιορισμός του ρεύματος στην περίπτωση ύπαρξης παραμένουσας τάσης.

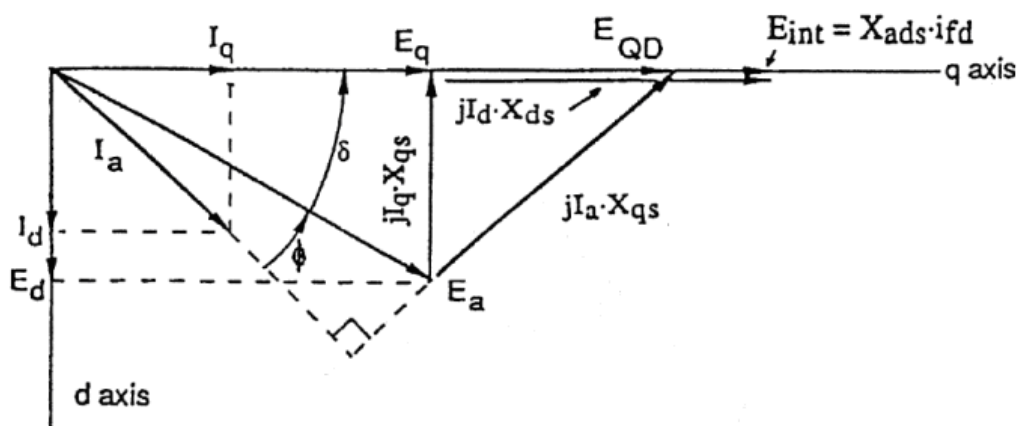
Ο προσδιορισμός της τελικής (μη κορεσμένης) τιμής της σύγχρονης αντίδρασης του q-άξονα δίνεται από τη σχέση :

$$X_{qu} = X_{du} \cdot \frac{X_{qs}}{X_{ds}} \quad (51)$$

Σε περίπτωση που η ολίσθηση δεν είναι αρκετά μικρή τα ρεύματα στο τύλιγμα απόσβεσης θα προκαλέσουν σημαντικό σφάλμα.

Ηλεκτρική Γωνία Φορτίου

Σε μία γεννήτρια είναι σημαντικό, για τη διερεύνηση διαφόρων τύπων ευστάθειας λειτουργίας, να υφίσταται η ακριβής γνώση της ηλεκτρικής γωνίας φορτίου. Το σχήμα 18 δείχνει με ποιο τρόπο είναι δυνατό να προσδιοριστεί η ηλεκτρική γωνία φορτίου δ αν είναι γνωστή η τιμή της X_{qs} (κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντίδρασης του q-άξονα).



Σχήμα 18: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής στο οποίο παρουσιάζεται σχηματικά το πώς συνδέεται η ηλεκτρική γωνία φορτίου με τη σύγχρονη αντίδραση του q-άξονα.

Ο υπολογισμός της ηλεκτρικής γωνίας φορτίου γίνεται από τη σχέση :

$$\delta = \tan^{-1} \cdot \frac{I_a \cdot X_{qs} \cdot \cos \varphi}{E_a + I_a \cdot X_{qs} \cdot \sin \varphi} \quad (52)$$

Όπου I_a είναι το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη

E_a είναι η τάση του τυλίγματος του στάτη

φ είναι η γωνία του συντελεστή ισχύς της γεννήτριας

Μεγέθη Αρνητικής Ακολουθίας

Η παρουσία αρμονικών στο ρεύμα του τυλίγματος του στάτη είναι δυνατόν να αλλάξει τη βασική συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας της τάσης χωρίς όμως να διαφοροποιείται και η βασική συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας του ρεύματος. Έτσι η ύπαρξη των αρμονικών στο ρεύμα του τυλίγματος του στάτη θα επηρεάσει την αντίδραση αρνητικής ακολουθίας. Τέτοιες επιδράσεις εμφανίζονται εντονότερα σε γεννήτριες με έκτυπους πόλους που δεν έχουν τύλιγμα απόσβεσης ή που το τύλιγμα απόσβεσης δεν είναι συνδεδεμένο μεταξύ των πόλων. Αντίθετα, στις γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα αυτές οι επιδράσεις είναι πολύ μικρές (σχεδόν αμελητέες). Τα μεγέθη αρνητικής ακολουθίας μπορούν να προσδιοριστούν από το παρακάτω πείραμα.

Η μηχανή λειτουργεί στο σύγχρονο αριθμό στροφών έχοντας βραχυκυκλωμένο το τύλιγμα πεδίου και ενώ τροφοδοτούνται συμμετρικά τριφασικά ημιτονοειδή ρεύματα αρνητικής ακολουθίας στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Για να προσδιοριστεί η τιμή της αντίδρασης αρνητικής ακολουθίας που αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα, θα πρέπει το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας να ρυθμιστεί έως ότου γίνει ίσο με το ονομαστικό της γεννήτριας και να γίνουν στη συνέχεια δύο πειράματα για μεγαλύτερες και μικρότερες τιμές ρεύματος της ονομαστικής. Επειδή το συγκεκριμένο πείραμα προξενεί

την ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών θερμοκρασιών στο δρομέα της γεννήτριας είναι αναγκαίο να ολοκληρωθεί στο συντομότερο δυνατό χρόνο.

Θα πρέπει να υπολογίζονται τα φασικά ρεύματα, η ηλεκτρική εισερχόμενη ισχύς και οι πολικές τάσεις στους ακροδέκτες. Αν οι τάσεις ή τα ρεύματα περιέχουν αρμονικές πάνω από κάποιο συγκεκριμένο ποσοστό θα χρειαστεί να ληφθούν μετρήσεις με τη βοήθεια παλμογράφου. Αυτό σημαίνει ότι τα ρεύματα ίσως χρειαστεί να εφαρμοστούν για μερικά δευτερόλεπτα παραπάνω πριν γίνει η καταγραφή των παλμογραφημάτων. Στη συνέχεια πρέπει να γίνει ανάλυση της κυματομορφής για τη βασική και την τρίτη αρμονική. Αν η ενεργός τιμή τους είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ενεργό τιμή της βασικής αρμονικής είναι αναγκαίο να γίνει εισαγωγή υπολογισμού σφάλματος.

Η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Z_2 = \frac{E}{I} \quad (53),$$

Όπου Z_2 είναι η εμπέδηση αρνητικής ακολουθίας

E είναι ο μέσος όρος των ενεργών τιμών της βασικής συνιστώσας από τις τρεις πολικές τάσεις

I είναι ο μέσος όρος των ενεργών τιμών της βασικής συνιστώσας από τα τρία φασικά ρεύματα

$$R_2 = \frac{P}{I^2} \quad (54)$$

Όπου R_2 είναι η αντίσταση αρνητικής ακολουθίας

P είναι η εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύς με βάση την τριφασική ισχύ

Τελικά η αντίδραση αρνητικής ακολουθίας προκύπτει από την εξίσωση :

$$X_2 = \sqrt{(Z_2^2 - R_2^2)} \quad (55)$$

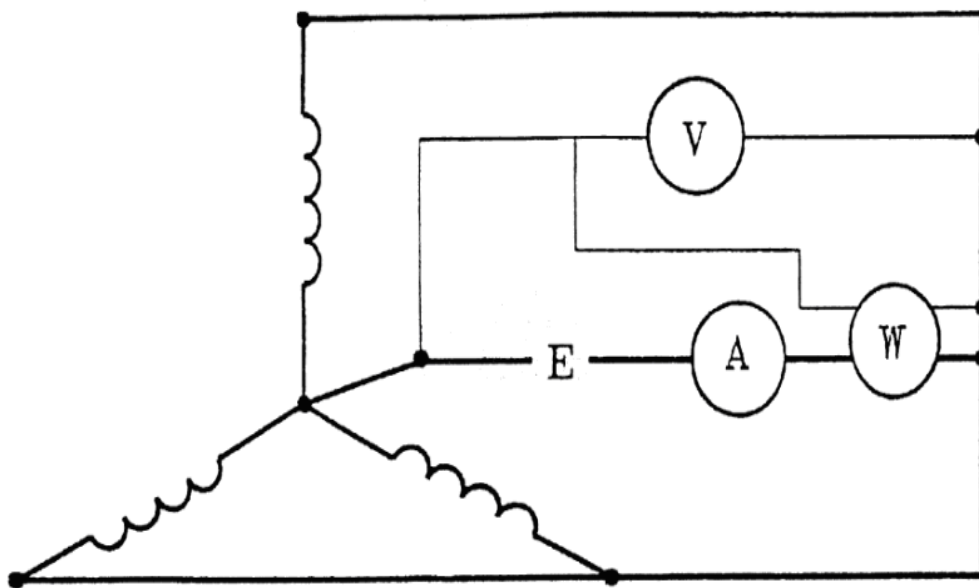
Μεγέθη Μηδενικής Ακολουθίας

Για ρεύματα τα οποία είναι ίσα ή και μικρότερα του ονομαστικού η μεταβολή της αντίδρασης μηδενικής ακολουθίας συναρτήσει του ρεύματος είναι συνήθως ελάχιστη. Αν όμως η μεταβολή της σε συνάρτηση με το πειραματικό ρεύμα είναι αισθητή τότε πρέπει να σχεδιαστεί συναρτήσει του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας και ονομαστικής τιμής του ρεύματος. Από την καμπύλη αυτή μπορεί να βρεθεί η τιμή της αντίδρασης η οποία αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα.

Η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας αλλάζει ελάχιστα σε συνάρτηση με το ρεύμα και έχει νόημα στη μοναδική περίπτωση που τα τυλίγματα του στάτη της γεννήτριας είναι σε συνδεσμολογία αστέρα. Σε περίπτωση όμως που η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας μεταβάλλεται, η τιμή η οποία αντιστοιχεί στην τιμή του ονομαστικού ρεύματος προσδιορίζεται από τη γραφική

παράσταση της αντίστασης μηδενικής ακολουθίας σαν συνάρτηση του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας επιλέγοντας την τιμή εκείνη του ρεύματος η οποία αντιστοιχεί στην τιμή του ονομαστικού ρεύματος.

Ο προσδιορισμός των μεγεθών μηδενικής ακολουθίας γίνεται πειραματικά, συνδέοντας τους ακροδέκτες των τυλιγμάτων όπως στην κανονική λειτουργία αλλά με μοναδική διαφορά ότι οι ακροδέκτες των τριών φάσεων θα πρέπει να συνδεθούν έτσι ώστε οι τρεις φάσεις να είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Στη συνέχεια μεταξύ των ακροδεκτών των φάσεων και των ακροδεκτών των ουδέτερων γίνεται εφαρμογή εναλλασσόμενης μονοφασικής τάσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 19.



Σχήμα 19: Συνδεσμολογία για τον προσδιορισμό των μεγεθών μηδενικής ακολουθίας.

Η εμπέδηση μηδενικής ακολουθίας υπολογίζεται από τη σχέση :

$$Z_0 = \frac{3 \cdot E}{I} \quad (56)$$

Όπου E είναι η τάση με την οποία διεξάγεται το πείραμα με βάση μονοφασική τάση

I είναι το συνολικό ρεύμα του πειράματος με βάση το πολικό ρεύμα.

Η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας στις περισσότερες των περιπτώσεων θεωρείται ίση με την εμπέδηση μηδενικής ακολουθίας. Για μικρές μηχανές όμως ή σε περιπτώσεις στις οποίες η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη είναι μεγάλη ενώ η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας είναι μικρή χρειάζεται να γίνει διόρθωση η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$X_0 = Z_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P}{E \cdot I}\right)^2} \quad (57)$$

Όπου P είναι η μέτρηση του βαττομέτρου με βάση μονοφασική ισχύ που αντιστοιχεί σε τιμές του I και της E οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της Z₀.

Η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας δίνεται από την εξίσωση :

$$R_0 = \frac{3 \cdot P}{I^2} \quad (58)$$

Όπου P είναι η πειραματική ισχύς με βάση μονοφασική ισχύ

I είναι το συνολικό πειραματικό ρεύμα με βάση το πολικό ρεύμα.

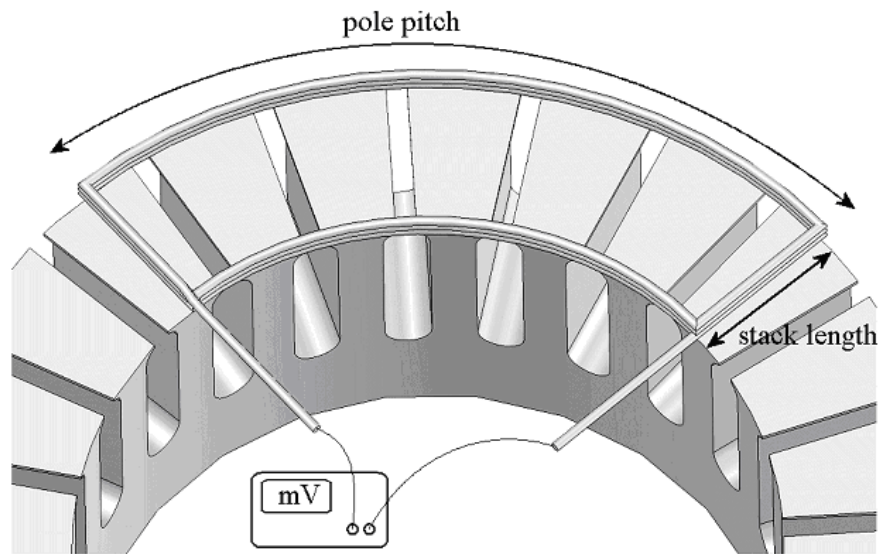
Αντίδραση Potier

Η αντίδραση Potier (X_p) μπορεί να οριστεί ως η ισοδύναμη αντίδραση που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αντί της αντίδρασης σκέδασης του στάτη με σκοπό να υπολογιστεί η διέγερση φόρτισης με τη μέθοδο Potier. Είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την πραγματική τιμή της αντίδρασης σκέδασης του στάτη και λαμβάνει υπόψη την επιπλέον σκέδαση του τυλίγματος πεδίου στη φόρτιση αλλά και την υπερδιεγερμένη περιοχή.

Η τιμή της λαμβάνεται από τις καμπύλες κορεσμού βραχυκυκλώματος και ανοιχτού κυκλώματος καθώς και από το ρεύμα διέγερσης το οποίο αντιστοιχεί στις ονομαστικές τιμές της τάσης και του ρεύματος του τυλίγματος του στάτη που αφορούν μηδενικό συντελεστή ισχύος. Στο σχήμα 20 φαίνονται οι καμπύλες κορεσμού βραχυκυκλώματος και ανοιχτού κυκλώματος καθώς επίσης και το σημείο A. Η τεταγμένη του σημείου A αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της τάσης ενώ η τετμημένη αντιστοιχεί στο ρεύμα διέγερσης και αντιστοιχεί στις ονομαστικές τιμές της τάσης και του ρεύματος του τυλίγματος του στάτη στην περίπτωση μηδενικού συντελεστή ισχύος. Το ρεύμα διέγερσης i_{fk} αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα βραχυκυκλώματος ενώ το ευθύγραμμο τμήμα HG είναι η πτώση τάσης στην αντίδραση Potier για ονομαστικό ρεύμα.

βήμα όπως φαίνεται και από το σχήμα 21. Τα άκρα του πηνίου, τα οποία στηρίζονται σε καλώδια, θα πρέπει να επεκτείνονται με κατεύθυνση τον άξονα της μηχανής κατά μήκος των ακτίνων που έχουν τα εξωτερικά τμήματα των δοντιών έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από τη ροή σκέδασης που αναπτύσσεται στην εξωτερική πλευρά των τυλιγμάτων του στάτη. Σε περίπτωση που ο στάτης διαθέτει κλασματικό αριθμό αυλακώσεων ανά κάθε πόλο και φάση τότε το πλάτος του πηνίου ανίχνευσης θα πρέπει να ισούται με το μεγαλύτερο συνολικό αριθμό αυλακώσεων οι οποίες περικλείουν το πολικό βήμα.

Συνεχίζοντας, το τύλιγμα του στάτη συνδέεται με μία πηγή τάσης όπου γίνεται καταγραφή των μετρήσεων για την εφαρμοζόμενη τάση (U), την εισερχόμενη ισχύ (P), την τάση του πηνίου ανίχνευσης (U_c) και το ρεύμα μαγνήτισης του τυλιγματος του στάτη (I).



Σχήμα 21: Τοποθέτηση πηνίου ανίχνευσης το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίδρασης σκέδασης του στάτη.

Από την πειραματική διαδικασία που περιγράφηκε, η αντίδραση σκέδασης του στάτη μπορεί να προκύψει αφαιρώντας την αντίδραση λόγω ροής στο κενό (X_b) που βρίσκεται πάνω από την ενεργή επιφάνεια του τυλίγματος του στάτη από την αντίδραση του τυλίγματος του στάτη (X_a). Έτσι έχουμε:

$$X_{\sigma} = X_a - X_b \quad (59)$$

$$X_a = \sqrt{(Z^2 - R^2)} \quad (60)$$

$$X_b = \frac{U_c}{I} \cdot \frac{N \cdot K_w}{N_c} \quad (61)$$

Με

$$Z = \frac{U}{I} \quad \text{και} \quad R = \frac{P}{I^2}$$

Όπου N είναι ο αριθμός των συνδεδεμένων σπειρών σε σειρά για κάθε κύκλωμα μίας φάσης του τυλίγματος του στάτη

N_c είναι ο αριθμός των σπειρών που έχει το πηνίο ανίχνευσης

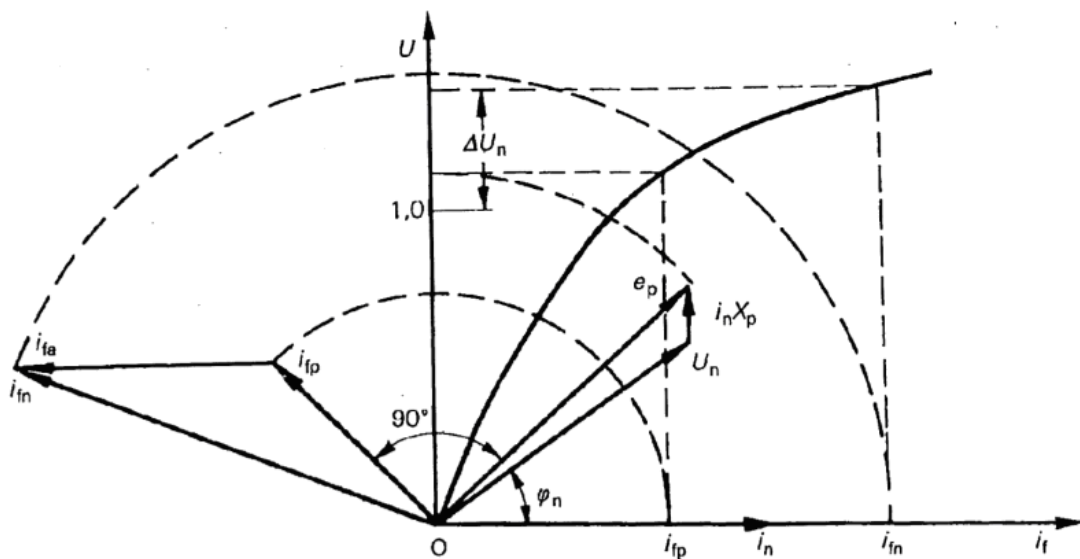
k_w είναι ο συντελεστής του τυλίγματος του στάτη.

Προσδιορισμός Ονομαστικού Ρεύματος Διέγερσης

Για τον προσδιορισμό του ονομαστικού ρεύματος διέγερσης χρειάζονται οι καμπύλες κορεσμού βραχυκυκλώματος και ανοιχτού κυκλώματος καθώς και η τιμή της αντίδρασης Potier (X_p).

Από το σχήμα 22 φαίνεται ότι το διάνυσμα i_n του ονομαστικού ρεύματος του τυλίγματος του στάτη τοποθετείται στον άξονα των τετμημένων και το διάνυσμα u_n της ονομαστικής τάσης σχεδιάζεται με γωνία (θετική) φ_n του συντελεστή ισχύος. Το διάνυσμα $i_n \times X_p$ είναι η πτώση τάσης στην αντίδραση του Potier. Το διανυσματικό άθροισμα μεταξύ της πτώσης τάσης στην αντίδραση του Potier και της ονομαστικής τάσης δίνει το διάνυσμα e_p το οποίο είναι η τάση εξεπαγωγής. Το i_{fa} είναι η συνιστώσα του ρεύματος διέγερσης και ουσιαστικά είναι η διαφορά μεταξύ του ρεύματος διέγερσης η οποία αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή του ρεύματος του τυλίγματος του στάτη στην καμπύλη κορεσμού βραχυκύκλωσης και του ρεύματος διέγερσης το

οποίο αντιστοιχεί στην πτώση τάσης της αντίδρασης Potier λόγω του ονομαστικού ρεύματος του τυλίγματος του στάτη πάνω στην καμπύλη κορεσμού ανοιχτού κυκλώματος. Τελικά το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης i_{fn} είναι το διανυσματικό άθροισμα μεταξύ των διανυσμάτων i_{fa} και i_{fp} .



Σχήμα 22: Προσδιορισμός ονομαστικού ρεύματος διέγερσης.

Προσδιορισμός Εμπέδησης Εκκίνησης Σύγχρονων Κινητήρων

Το πείραμα που πρέπει να γίνει για να επιτευχθεί ο προσδιορισμός της αρχικής εμπέδησης εκκίνησης των σύγχρονων κινητήρων περιγράφεται παρακάτω.

Ο δρομέας διατηρείται με μηχανικό τρόπο ακίνητος και εφαρμόζεται τριφασική τάση στο τύλιγμα του στάτη αφού πρώτα έχει βραχυκυκλωθεί το τύλιγμα διέγερσης. Η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να έχει ονομαστική τιμή. Η

εφαρμοζόμενη τάση θα πρέπει να περιορίζεται χρονικά (συνήθως κάτω από δέκα δευτερόλεπτα) με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή των μετρήσεων χωρίς να λαμβάνει χώρα η υπερθέρμανση των τμημάτων του δρομέα. Οι μετρήσεις που καταγράφονται είναι το ρεύμα και η τάση των τριών φάσεων του τυλίγματος του στάτη αλλά και της εισερχόμενης ισχύος.

Η αρχική εμπέδηση εκκίνησης σύγχρονων κινητήρων όπως αυτή προσδιορίζεται από το παραπάνω πείραμα δίνεται από τη σχέση :

$$Z_{st} = \frac{U}{I_{av}} \quad (62)$$

Όπου U είναι η εφαρμοζόμενη πολική τάση και

I_{av} είναι ο μέσος όρος των τριών φασικών ρευμάτων στη μόνιμη κατάσταση.

Αντίσταση Θετικής Ακολουθίας

Η αντίσταση θετικής ακολουθίας R_1 μπορεί να οριστεί ως το πηλίκο της βασικής συνιστώσας της τάσης θετικής ακολουθίας η οποία αντιστοιχεί ουσιαστικά στις απώλειες του φορτίου του τυλίγματος του στάτη αλλά και στις απώλειες στους αγωγούς λόγω της θετικής ημιτονοειδούς συνιστώσας του

ρεύματος του τυλίγματος του στάτη, προς την τιμή του συγκεκριμένου ρεύματος καθώς η γεννήτρια κινείται με το σύγχρονο αριθμό στροφών.

Στην περίπτωση που χρειάζεται να υπολογιστούν οι συνολικές απώλειες του στάτη για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, είναι απαραίτητη η χρήση της αντίστασης θετικής ακολουθίας στους υπολογισμούς. Αυτή δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$R_1 = R_a + \frac{W_{LO} \cdot 10^3}{3 \cdot I_N^2} \quad (63)$$

$$R_1 = \frac{1}{Z_N} \left(R_a + \frac{W_{LO} \cdot 10^3}{3 \cdot I_N^2} \right) \quad (64)$$

Όπου R_a είναι η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη για κάθε φάση σε Ω

W_{LO} είναι οι επιπρόσθετες απώλειες φορτίου με βάση το πολικό ρεύμα σε kW

I_N είναι το πολικό ρεύμα βάσης σε A

Z_N είναι η εμπέδηση βάσης του τυλίγματος του στάτη σε Ω

Λόγος Βραχυκυκλώματος

Για να προσδιοριστεί ο λόγος βραχυκυκλώματος είναι απαραίτητες οι τιμές των ρευμάτων πεδίου οι οποίες προέρχονται από την καμπύλη κορεσμού

ανοιχτού κυκλώματος καθώς και από τη διαδικασία προσδιορισμού της σύγχρονης αντίδρασης του d-άξονα. Δίνεται από την εξίσωση :

$$SCR = \frac{I_{FNL}}{I_{FSI}} \quad (65)$$

Όπου I_{FNL} είναι το ρεύμα πεδίου για ονομαστική τάση στο κενό (για ονομαστική συχνότητα)

I_{FSI} είναι το ρεύμα πεδίου για ονομαστικό ρεύμα του τυλίγματος του στάτη σε μόνιμο τριπολικό βραχυκύκλωμα (για ονομαστική συχνότητα)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

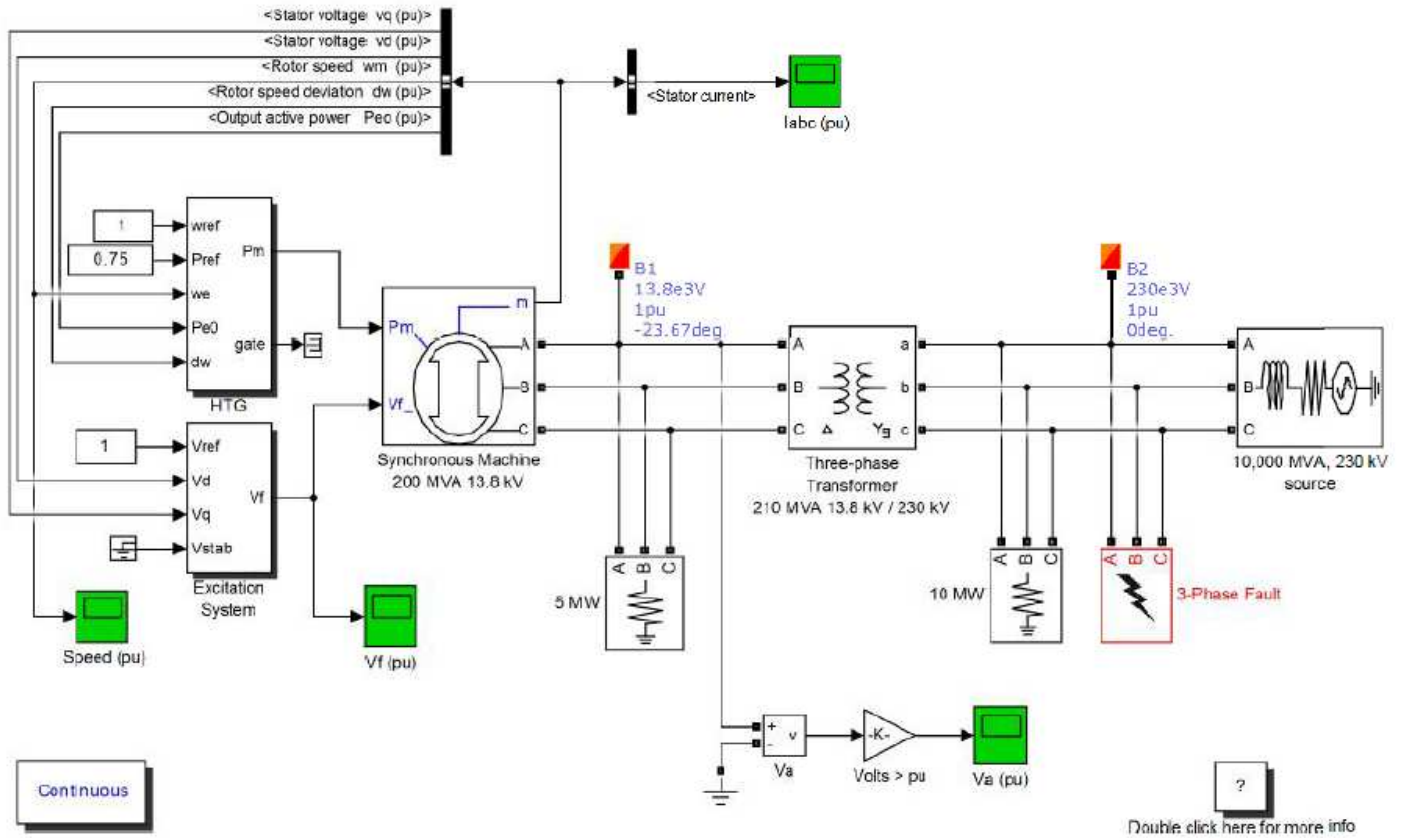
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (Matlab – Simulink)

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε μια υλοποίηση προσομοίωσης της λειτουργίας μας σύγχρονης γεννήτριας με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink από το Matlab.

Η υλοποίηση της εν λόγω γεννήτριας παρουσιάζεται στο Σχήμα 23. Όπως φαίνεται από το σχήμα, πρόκειται για τριφασική γεννήτρια που δουλεύει στα 200MVA, 13.8kV, στις 112.5 rpm, και είναι συνδεδεμένη σε δίκτυο 230 kV, 10.000 MVA μέσω ενός μετασχηματιστή Delta – Wye 210 MVA.

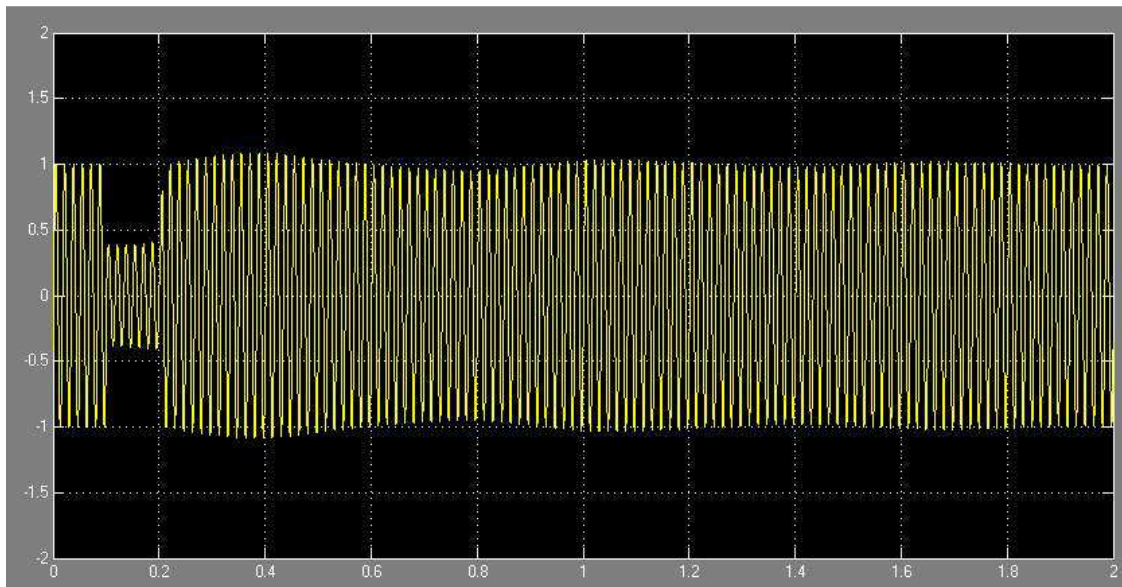
Με βάση το πώς έχει σχεδιαστεί το εν λόγω σύστημα, καθώς λαμβάνει χώρα η προσομοίωση, τη στιγμή $t = 0.1 \text{ sec}$ ένα σφάλμα πραγματοποιείται, στον δίαυλο των 230 kV. Μετά από 6 κύκλους λειτουργίας, το σφάλμα εξαλείφεται ($t = 0.2 \text{ sec}$). Στη συνέχεια, θα μελετήσουμε με λίγο περισσότερη λεπτομέρεια τον τρόπο λειτουργίας και τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

Synchronous Machine



Σχήμα 23: Το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας

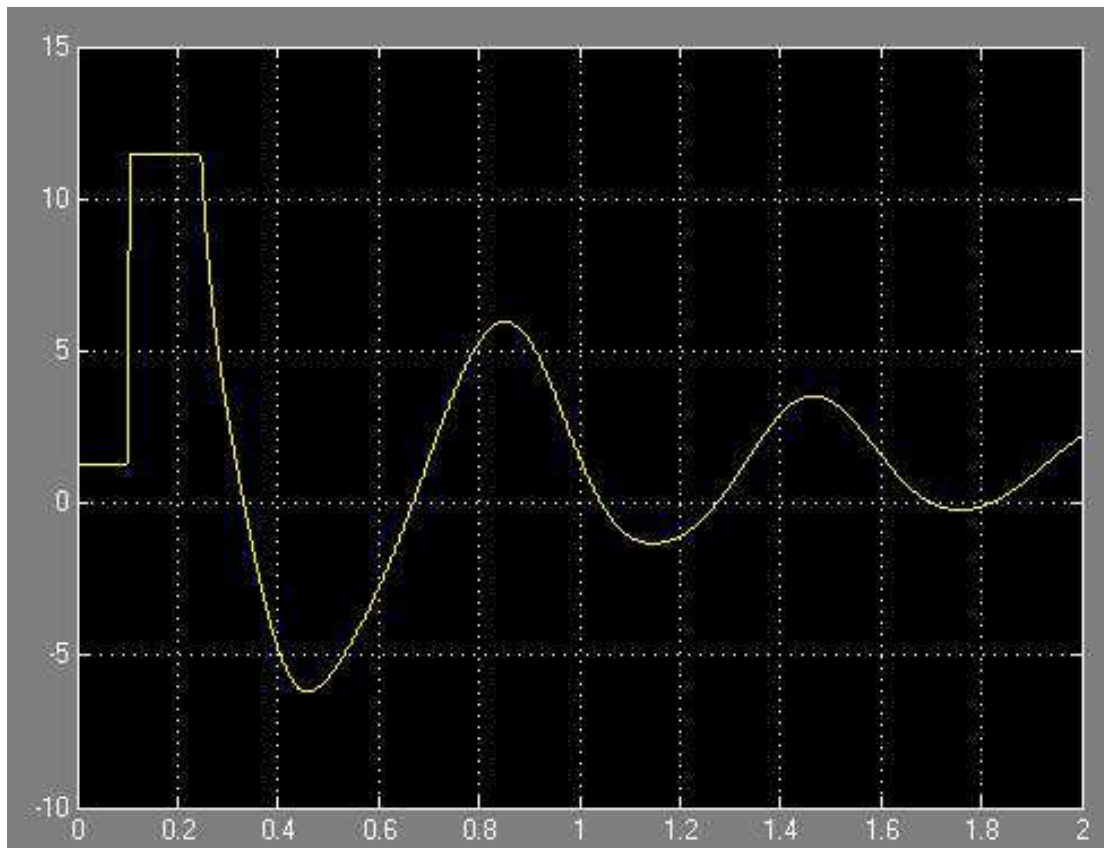
Η πρώτη κατά σειρά εικόνα, δείχνει τις τιμές της τάσης V_a όπως φαίνεται αυτή στο σχήμα 23. Η προσομοίωση, όπως φαίνεται και στην Εικόνα, διαρκεί συνολικά δύο δευτερόλεπτα. Στο σχήμα βλέπουμε πως πρόκειται για τάση με πλάτος 1 V, το οποίο όμως επηρεάζεται από το σφάλμα που λαμβάνει χώρα την στιγμή $t = 0.1 \text{ sec}$. Συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι το πλάτος του σήματος μειώνεται περίπου στο 40% της αρχικής τιμής, περίπου στα 0.4 V. Παρατηρούμε επίσης πως μετά τη χρονική στιγμή $t = 0.2$, το σήμα επανέρχεται σταδιακά στην αρχική του μορφή.



Εικόνα 1: Τιμές της τάσης V_a στην προσομοίωση

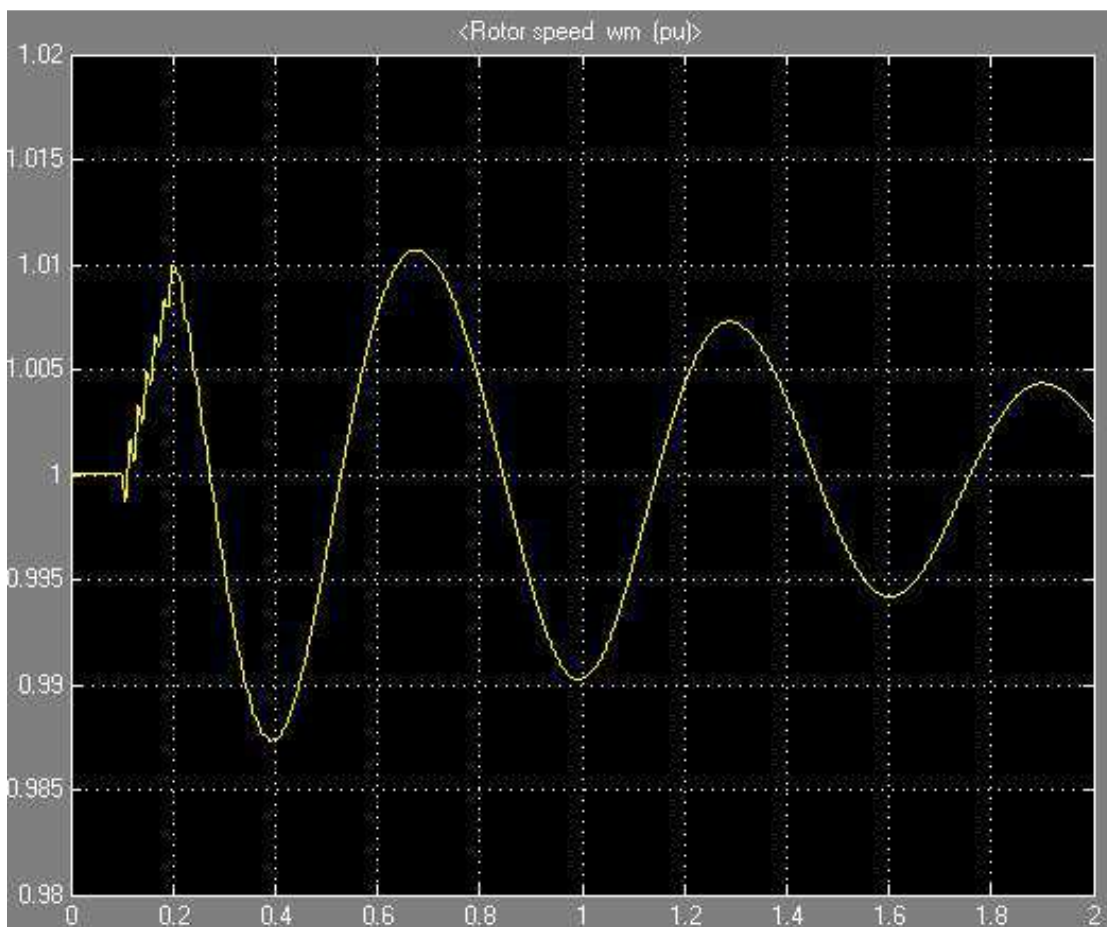
Η επόμενη εικόνα, δείχνει τις τιμές της τάσης V_f όπως φαίνεται αυτή στο σχήμα 23. Στο σχήμα βλέπουμε πως πρόκειται για πού αρχικά φτάνει σε μια τιμή της τάξης των 12 Volt, και μένει εκεί σταθερά για ένα διάστημα περίπου 0.2 δευτερολέπτων (από το 0.1 ως το 0.3 περίπου).

Εν συνέχεια, το σήμα έχει μια φθίνουσα ημιτονική μορφή, με πλάτος που ξεκινά από τα 5 περίπου Volt και μειώνεται σταδιακά, φτάνοντας περίπου στο 1 Volt στο τέλος της προσομοίωσης. Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως το σήμα έχει ένα offset dc, της τάξης περίπου του 1^{ος} Volt.



Εικόνα 2: Τιμές της τάσης V_f στην προσομοίωση

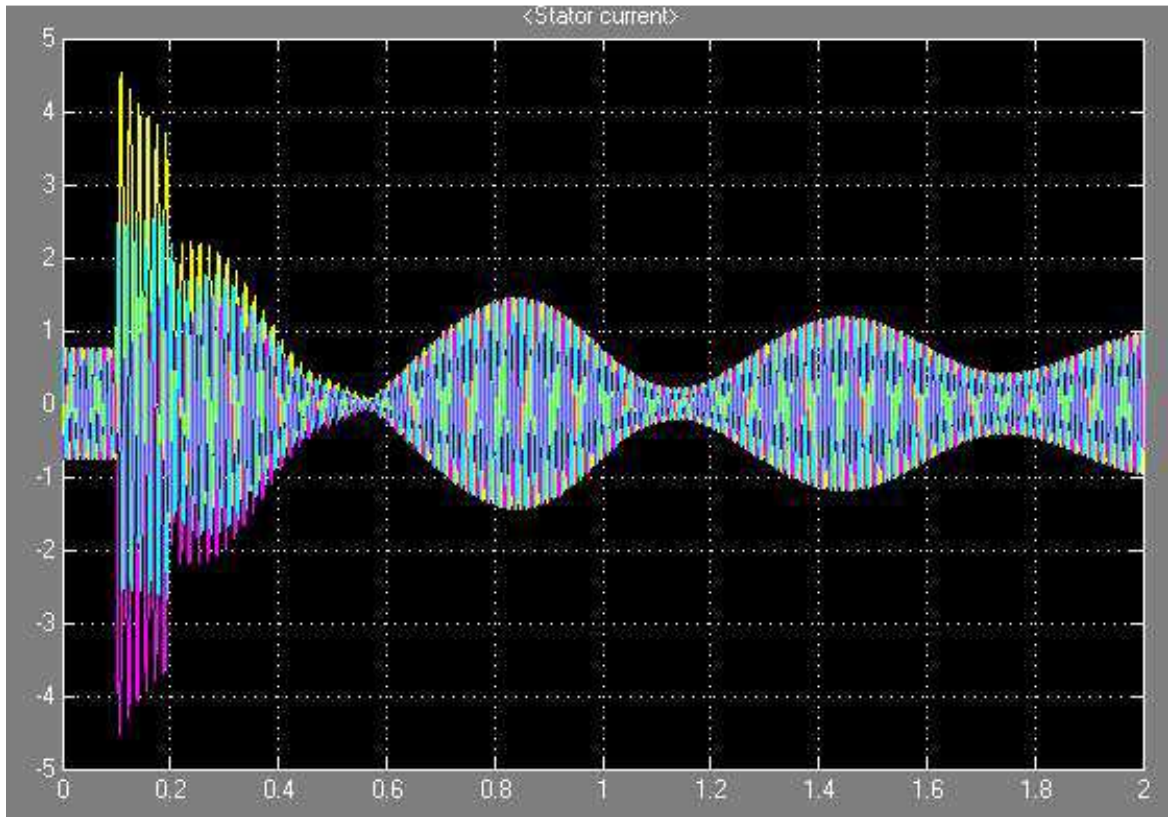
Στην επόμενη Εικόνα βλέπουμε την ταχύτητα του ρότορα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Πρόκειται για ένα σήμα που ξεκινά από την τιμή 1, και τη στιγμή που λαμβάνει χώρα το σφάλμα ($t = 0.1$) αυξάνεται με μορφή πριονωτού σήματος κατά 1% περίπου, μέχρι τη στιγμή $t = 0.2$ που το σφάλμα αντιμετωπίζεται. Από εκείνη τη στιγμή και μετά, το σήμα έχει ημιτονική μορφή με πλάτος που φθίνει, ξεκινώντας από τιμές της τάξης του 0.01 και φτάνοντας με τη λήξη της προσομοίωσης σε τιμές κάτω του 0.005.



Εικόνα 3: Τιμές της ταχύτητας του ρότορα στην προσομοίωση

Τέλος, η τελευταία κατά σειρά εικόνα δείχνει το ρεύμα στον στάτη. Μέχρι τη στιγμή που λαμβάνει χώρα το σφάλμα, το σήμα αυτό έχει σταθερό πλάτος της τάξης περίπου των 0.8 Volt. Ακριβώς τη στιγμή $t = 0.1$ που συμβαίνει το σφάλμα, το ρεύμα στον στάτη αυξάνεται ξεπερνώντας τα 4 Volt, και το πλάτος του μειώνεται σταδιακά μέχρι τα 2 Volt τη στιγμή $t = 0.2$.

Από εκείνη τη στιγμή και μετά, το σήμα έχει μια περιβάλλουσα περίπου ημιτονικής μορφής, με πλάτος ελαφρώς μειούμενο, από τα 2 Volt μέχρι το 1 Volt περίπου, στην λήξη της προσομοίωσης.



Εικόνα 4: Τιμές του ρεύματος του στάτορα την προσομοίωση

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] St. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC Εκδόσεις Τζιόλα
- [2] Αθ. Σαφάκας, Ηλεκτρικές Μηχανές Β Πανεπιστήμιο Πατρών
- [3] Π. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, Εκδόσεις Τζιόλα
- [4] Γ.Β. Γιαννακόπουλος, Ν.Α. Βοβός, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
- [5] Αθ. Σαφάκας, Δυναμική Ηλεκτρομηχανικών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [6] Ν.Α. Βοβός, Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers Guide Std 115, Test procedures for synchronous machines, 1995
- [8] International Electrotechnical Commission 34-4, Rotating electrical machines, 1985
- [9] Ν. Σπύρου, Ιδιότητες των Ηλεκτροτεχνικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών