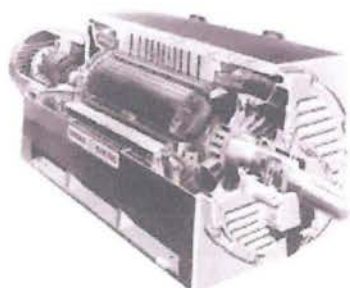




ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συγχρονη μηχανή και μεταβατικά φαινόμενα

ΜΑΡΙΑ Μ ΓΡΙΒΑ 31605

Επιβλέπων καθηγητής:

ΚΑΡΑΙΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ

Αθήνα, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2014



714
202

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δυναμική ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πεδίο της μελέτης των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Στην παρούσα πτυχιακή θα ασχοληθούμε με τη πλήρη περιγραφή της δομής και της λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής καθώς και με τη δυναμική ανάλυση της σύγχρονης μηχανής που συναντάμε στην μετατροπή μεγάλης ποσότητας μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Τα δυναμικά φαινόμενα είναι τα κάθε είδους βραχυκυκλώματα, η απότομη μεταβολή του φορτίου μιας συσκευής μετατροπής ενέργειας, μεταβολές στην κινητική κατάσταση, όπως εκκίνηση ή φρενάρισμα μιας ηλεκτρικής μηχανής, διακοπή της τάσεως τροφοδοσίας και άλλα παρόμοια. Αυτά που κυρίως θα μας απασχολήσουν στο μεγαλύτερο μέρος αυτής της πτυχιακής είναι τα βραχυκυκλώματα της σύγχρονης μηχανής.

Στη δυναμική κατάσταση αναπτύσσονται ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη, όπως ρεύματα και δυνάμεις που προκαλούν μεγάλη καταπόνηση του συστήματος, και πιθανόν, την καταστροφή του. Είναι λοιπόν σημαντικό, να γνωρίζουμε ποιοτικά τα διάφορα μεγέθη, ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε τα κατάλληλα μέτρα για την εξασφάλιση της κανονικής λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών.

Οι χαρακτηριστικές παράμετροι των μεταβατικών και υπομεταβατικών αντιδράσεων (και των σταθερών χρόνου) της σύγχρονης μηχανής, χρησιμοποιούνται εδώ και 75 χρόνια, ώστε να δίνουν μια πρώτη προσέγγιση του μεγέθους των ρευμάτων βραχυκυκλώματος καθώς και το ρυθμό με τον οποίο αυτά μειώνονται. Επιπροσθέτως, η γνώση των μεγεθών αυτών δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των μηχανικών καταπονήσεων των τυλιγμάτων του στάτη που είναι αποτέλεσμα των υπερβολικών ρευμάτων που διαρρέουν τη μηχανή κατά τη διάρκεια ηλεκτρικών διαταραχών που υφίστανται οι ακροδέκτες της.

Ο ακριβής υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκυκλώματος των σύγχρονων μηχανών είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί την επίλυση επιλεγμένων διαφορικών εξισώσεων.

Στόχος της παρούσας πτυχιακής είναι κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής, η μελέτη της συμπεριφοράς της σε περίπτωση μεταβατικών φαινομένων, καθώς, επίσης, ο προσδιορισμός των μεγεθών, των παραμέτρων και των σταθερών χρόνου της μηχανής, που καθορίζουν τη συμπεριφορά της, στην περίπτωση τέτοιων φαινομένων.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια εκτενής περιγραφή της δομής και της λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής, παρουσιάζοντας βήμα βήμα τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η λειτουργία της, στοιχεία απαραίτητα για την περαιτέρω κατανόηση της συμπεριφοράς της, σε μεταβατικές καταστάσεις.

Στο δεύτερο κεφάλαιο κάνουμε μια συνοπτική περιγραφή των διάφορων ειδών βραχυκυκλωμάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το μοντέλο της γεννήτριας για την περιγραφή της συμπεριφοράς της κατά τη διάρκεια τριφασικών, διφασικών και μονοφασικών με το έδαφος βραχυκυκλωμάτων. Παρατίθενται θεωρητική ανάλυση και προσδιορισμός των μεγεθών, των παραμέτρων και των σταθερών χρόνου της μηχανής, που καθορίζουν τη συμπεριφορά της, στην περίπτωση τέτοιων φαινομένων. Ενώ τέλος γίνεται μια θεωρητική προσέγγιση όσον αφορά το ρεύμα βραχυκυκλώματος που διαρρέει τη μηχανή κατά το μεταβατικό φαινόμενο.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζουμε τα συμπεράσματα της μελέτης μας.

Στην συγκεκριμένη εργασία αναλύουμε την δομή και την λειτουργία της σύγχρονης μηχανής. Αναφερόμενοι λοιπόν στον όρο "σύγχρονη μηχανή" περιγράφουμε την μηχανή τόσο σε λειτουργία γεννήτριας, όσο και σε κινητήρα. Έχοντας ως βασικό σκοπό τη μελέτη της σύγχρονης γεννήτριας (ή εναλλακτήρα) επικεντρωνόμαστε στη συνδεσμολογία της γεννήτριας. Έτσι στη μελέτη που ακολουθεί ο όρος σύγχρονη μηχανή "κρύβει" από πίσω και τις δύο λειτουργίες ενώ εκεί όπου διαφοροποιούνται θα προχωράμε σε ξεχωριστή ανάλυση της λειτουργίας με συνδεσμολογία γεννήτριας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. **Καραϊσά Πέτρο** για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα.

Μαρία Γρίβα

Αθήνα, Φεβρουάριος 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ

1.1	Δομή της σύγχρονης μηχανής.....	9
1.2	Αρχή λειτουργίας σύγχρονης μηχανής.....	11
1.3	Δημιουργία στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων σε μηχανές..	16
1.4	Επαγόμενες τάσεις στον στάτη.....	18
1.5	Αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα.....	20
1.6	Αυτεπαγωγές και αμοιβαίες επαγωγές σε σύγχρονη μηχανή.....	22
1.7	Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής με κυλινδρικό δρομέα.....	25
1.8	Σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους στο δρομέα.....	27
1.9	Μαγνητικός κορεσμός σε σύγχρονες μηχανές.....	31
1.10	Προσδιορισμός των παραμέτρων της ΣΜ από τα πειράματα βραχυκύκλωσης και εν κενώ λειτουργίας.....	32
1.11	Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....	35
1.12	Το πρόβλημα της ψύξης των σύγχρονων μηχανών.....	36
1.13	Ηλεκτρική ισχύς σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.....	37

Μηχανές με κυλινδρικό δρομέα.....	37
Μηχανές με έκτυπους πόλους.....	41
1.14 Χαρακτηριστικές μόνιμης κατάστασης λειτουργίας.....	43
1.15 Προσδιορισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΔΙΑΤΑΡΑΧΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....	50
3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής σε μεταβατικές καταστάσεις.Θεωρητική προσέγγιση σταθερών χρόνου.....	60
3.2 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ dq0.....	78
Π1.1 Οι μαθηματικές σχέσεις της σύγχρονης μηχανής στο σύστημα dq0.....	81

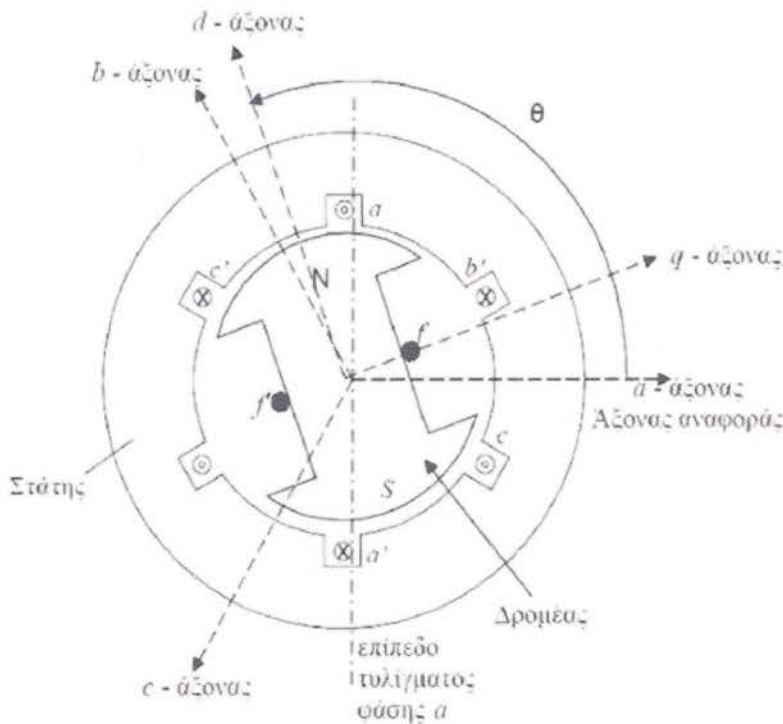
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ

1.1 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

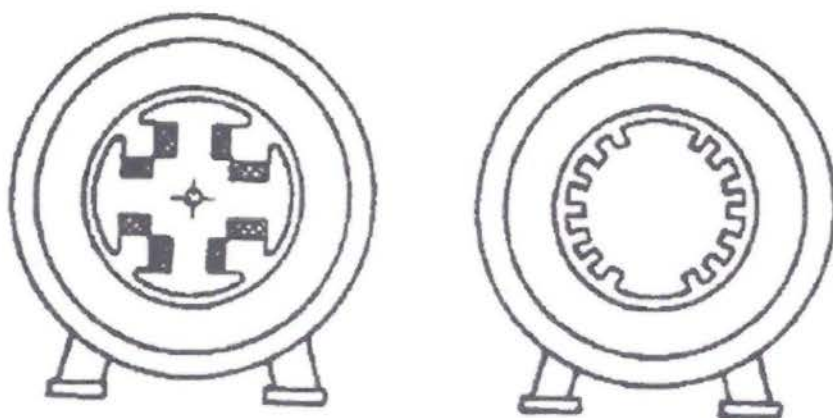
Η σύγχρονη μηχανή (synchronous machine) χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια αποτελεί μια από τις βασικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αφού είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς εναλλακτήρες, είναι σύγχρονες μηχανές που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Στο σχήμα 1-1 φαίνεται η σχηματική παράσταση της τομής μιας στοιχειώδους σύγχρονη μηχανής, όπου διακρίνονται τα δύο βασικά μέρη από τα οποία αυτή αποτελείται. Τον στάτη, που είναι το ακίνητο μέρος και το δρομέα, που είναι το περιστρεφόμενο μέρος.



Σχήμα 1-1 Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης μηχανής.

Ο στάτης είναι μια κοίλη κυλινδρική κατασκευή από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων που φέρει διαμήκεις αύλακες στην εσωτερική του επιφάνεια. Ο δρομέας είναι μια συμπαγής σιδηρομαγνητική κατασκευή που τοποθετείται στον άξονα της μηχανής και περιστρέφεται μέσα στο στάτη. Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής διακρίνουμε δυο είδη μηχανών, τη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα και τη μηχανή με έκτυπους πόλους. Ο συμπαγής δρομέας του πρώτου τύπου φέρει αύλακες, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης και προστατεύεται με σφήνες έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων. Ο δεύτερος τύπος μηχανών έχει εξέχοντες πόλους γύρω από τους οποίους τυλίγεται το τύλιγμα διέγερσης.



Σχήμα 1-2 Σχηματική παράσταση των δύο τύπων σύγχρονων μηχανών. Η πρώτη μηχανή φέρει δρομέα έκτυπου πόλου ενώ η δεύτερη δακτυλιοφόρου.

Ο δρομέας των σύγχρονων μηχανών και των δύο τύπων που αναφέρθηκαν παραπάνω φέρει το κύκλωμα διέγερσης (θα γίνει αναφορά στο κύκλωμα αυτό παρακάτω) αλλά και το τύλιγμα απόσβεσης. Αυτό αποτελείται από χάλκινες ράβδους (μπάρες), οι οποίες σε μηχανές με έκτυπους πόλους τοποθετούνται πάνω στα πέλματα των πόλων και συνδέονται με δακτυλίους βραχυκυκλώματος. Στο θεωρητικό μοντέλο της σύγχρονης μηχανής με το τύλιγμα απόσβεσης αντικαθίσταται από δύο βραχυκυκλωμένα τυλίγματα, εκ των οποίων, ο άξονας του ενός συμπίπτει με τον d -άξονα και ο άξονας του άλλου συμπίπτει με τον q -άξονα.

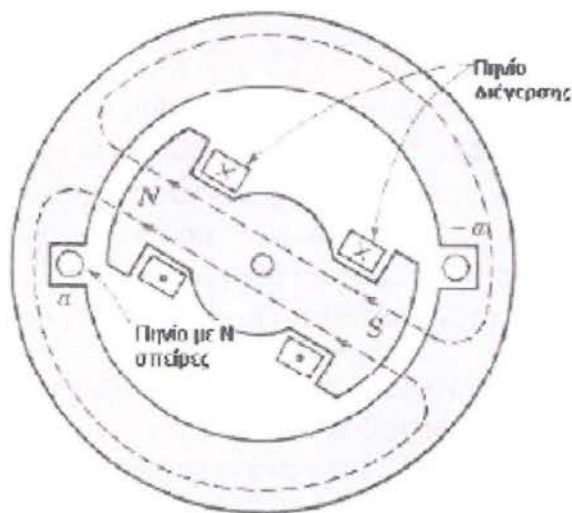
Το τύλιγμα απόσβεσης διαρρέεται από ρεύμα όταν έχουμε μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που το διαπερνά. Τέτοιες περιπτώσεις είναι βραχυκυκλώματα στον στάτη, μεταβολή της συχνότητας του δικτύου και μεταβολή της τάσης διέγερσης. Τάσεις επάγονται επίσης στο τύλιγμα απόσβεσης κατά τη διάρκεια μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα

ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα.

Κύριος σκοπός του τυλίγματος απόσβεσης είναι η μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων του δρομέα γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, οι οποίες μπορούν να προέρχονται από μεταβολές φορτίου (ηλεκτρικού ή μηχανικού) ή από μεταβολές της τάσης του σάτιη. Επίσης, βοηθάει την ασύγχρονη εκκίνηση των σύγχρονων κινητήρων, δηλαδή τη μετάβαση των κινούμενων μερών της μηχανής από την ακινησία μέχρι το σύγχρονο αριθμό στροφών. Ενώ τέλος, αποσβένει το αριστερόστροφο μαγνητικό πεδίο (πεδίο αρνητικής φοράς) στις σύγχρονες μονοφασικές μηχανές ή στην ασύμμετρη τριφασική φόρτιση των κανονικών μηχανών, το οποίο δρα αντίθετα προς το κανονικό (δεξιόστροφο) στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

1.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Η αρχή λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής μπορεί να αναλυθεί μέσω μια στοιχειώδους σύγχρονης μηχανής η τομή της οποίας φαίνεται στο Σχ. 1.3.



Σχ. 1.3 Στοιχειώδους Σύγχρονη Μηχανή

Η μηχανή έχει έναν δρομέα με έκτυπους πόλους στον οποίο υπάρχει ένα πηνίο το οποίο διαρρέεται από συνεχές (dc) ρεύμα, και το οποίο δημιουργεί δύο μαγνητικούς πόλους (τον βόρειο N, και νότιο S). Η μηχανή αυτή λέμε ότι είναι διπολική. Επειδή το ρεύμα στον δρομέα είναι συνεχές, η μαγνητική ροή που δημιουργείται από αυτό είναι σταθερή στο χρόνο και το πεδίο που

δημιουργείται μοιάζει με το πεδίο που θα δημιουργούσε μια ράβδος μόνιμου μαγνήτη.

Στην πλειονότητα των σύγχρονων μηχανών το κύκλωμα διέγερσης βρίσκεται στο δρομέα ενώ το κύκλωμα ισχύος στο στάτη. Το ίδιο συμβαίνει και με την στοιχειώδη μηχανή του Σχ. 1.3. Οι λόγοι για τους οποίους γίνεται αυτό είναι συνήθως πρακτικοί αφού είναι απλούστερο κατασκευαστικά να έχουμε στο κινούμενο μέρος της μηχανής το κύκλωμα χαμηλής ισχύος- δηλαδή το κύκλωμα διέγερσης- και στο σταθερό μέρος το κύκλωμα ισχύος.

Το συνεχές ρεύμα στο δρομέα παράγεται από μια πηγή συνεχούς τάσης η οποία είτε άμεσα είτε μέσω στρεφόμενων δακτυλιδιών συνδέεται με το πηνίο του δρομέα. Με διάφορες μεθόδους, τις οποίες θα εξετάσουμε σε άλλο κεφάλαιο, η τάση της dc πηγής μπορεί να μεταβάλλεται και επομένως να μεταβάλλεται και το ρεύμα στο πηνίο του δρομέα. Αλλάζοντας το ρεύμα στο πηνίο του δρομέα μπορούμε να αλλάξουμε την ένταση και την ροή του μαγνητικού πεδίου που αυτό δημιουργεί.

Στον στάτη υπάρχει ένα πηνίο συγκεντρωμένο στα δύο αυλάκια α και -α. Τα αυλάκια βρίσκονται γεωμετρικά σε απόσταση 180° . Οι σπείρες που σχηματίζουν το πηνίο βρίσκονται μέσα στα αυλάκια και είναι παράλληλες με τον άξονα της μηχανής.

Για να προχωρήσουμε κάνουμε την υπόθεση πως η κατανομή της μαγνητικής ροής από το πεδίο του δρομέα στο χώρο είναι ημιτονοειδής. Αυτή η υπόθεση δεν ισχύει για την στοιχειώδη μηχανή του σχήματος μας (έχουμε διπολική μηχανή έκτυπων πόλων με αποτέλεσμα η κατανομή να αποκλείνει αρκετά από την ημιτονοειδή) αλλά στην πράξη με κατάλληλη διαμόρφωση των πόλων του δρομέα η παραπάνω υπόθεση ισχύει με καλή προσέγγιση.

Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα η πεπλεγμένη με τον στάτη μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο. Λόγω της χρονικής μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στον στάτη επάγεται μία τάση η οποία μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Σε κάθε μία περιστροφή του δρομέα η τάση στον στάτη κάνει επίσης μια περιστροφή στο χρόνο. Η συχνότητα της τάσης σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (Hz) είναι η ίδια με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε περιστροφές ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή η ηλεκτρική συχνότητα της τάσης είναι συγχρονισμένη με την περιστροφική ταχύτητα του δρομέα. Από αυτό το γεγονός ονομάζεται η μηχανή «σύγχρονη». Έτσι μια σύγχρονη μηχανή δύο πόλων πρέπει να περιστρέφεται με 3000 στροφές ανά λεπτό (rpm) για να παράγει τάση συχνότητας 50Hz.

Σε μια μηχανή με P πόλους υπάρχουν P/2 ζεύγη πόλων και επομένως P/2 κύκλοι της μαγνητικής ροής σε κάθε περιστροφή του δρομέα. Η σχέση,

επομένως, μεταξύ ηλεκτρικών, θ_{el} και μηχανικών, θ_{mech} , γωνιών είναι

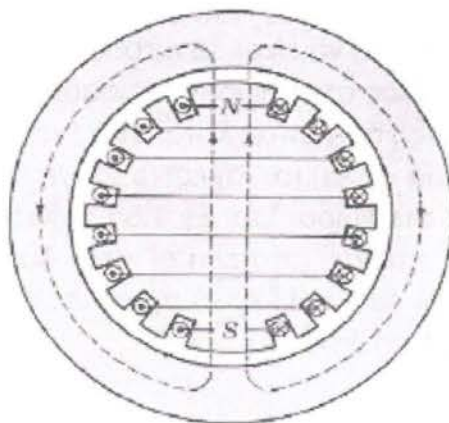
$$\theta_{el} = \frac{P}{2} \cdot \theta_{mech} \quad (1.1)$$

Η τάση που επάγεται στο πηνίο της φάσης του στάτη είναι εναλλάσσόμενη και κάνει έναν πλήρη κύκλο κάθε φορά που από το πηνίο περνάει ένα ζεύγος πόλων ή $(P/2)$ φορές σε κάθε περίπτωση του δρομέα. Έτσι η συχνότητα της επαγόμενης τάσης σε μία μηχανή με P πόλους θα είναι

$$f_{el} = \left(\frac{P}{2}\right) \cdot \left(\frac{n}{60}\right) Hz \quad (1.2)$$

όπου n είναι ο αριθμός των στροφών του δρομέα ανα λεπτό (rpm).

Οι δρομείς στα Σχ. 1.1 και 1.3 είναι δρομείς με έκτυπους (προεξέχοντες δηλαδή) πόλους. Στο Σχ. 1.4 φαίνεται ένας κυλινδρικός δρομέας με διανεμημένο τύλιγμα. Το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσεται σε πολλά αυλάκια έτσι ώστε η κατανομή στον χώρο της μαγνητικής ροής που παράγεται από το ρεύμα που το διαρρέει να είναι όσο το δυνατόν ημιτονοειδής. Ο δρομέας αυτός έχει δύο πόλους.



Σχ. 1.4 Κυλινδρικός δρομέας δύο πόλων με διανεμημένο τύλιγμα.

Από την σχέση (1.2) μπορούμε να καταλάβουμε γιατί ορισμένες σύγχρονες

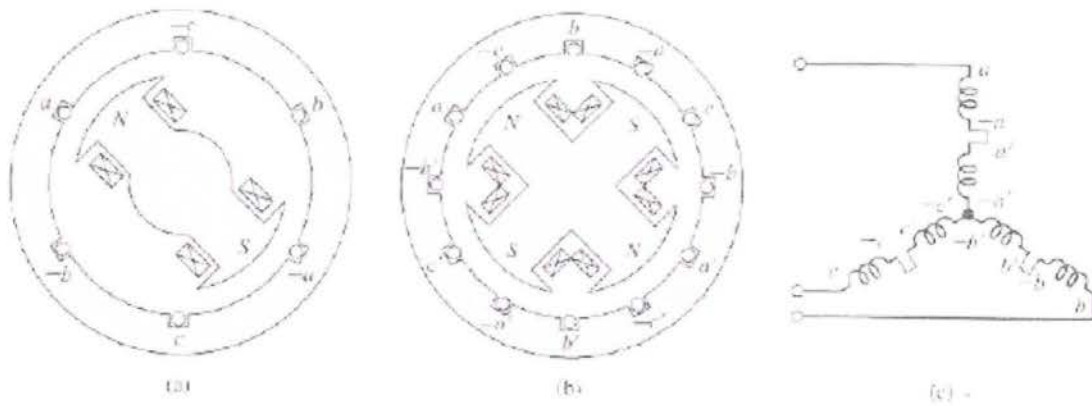
μηχανές κατασκευάζονται με δρομέα έκτυπων πόλων και άλλες με κυλινδρικό δρομέα. Τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζονται στα 50 ή 60 Hz. Μηχανές με έκτυπους πόλους χρησιμοποιούνται π.χ. σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια επειδή οι υδροστρόβιλοι στρέφονται σχετικά αργά και επομένως για να παραχθούν τα 50Hz απαιτούνται πολλοί πόλοι. Όταν ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος είναι πιο εύκολη η κατασκευή του δρομέα με έκτυπους πόλους.

Οι ατμοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι είναι μηχανές που εργάζονται αποδοτικά σε υψηλές στροφές. Για τον λόγο αυτό, οι σύγχρονες γεννήτριες που τους συνοδεύουν έχουν δρομείς με μικρό αριθμό πόλων-συνήθως δύο ή τέσσερις πόλους.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως οι διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής των δρομέων με έκτυπους ή όχι πόλους επηρεάζει και την γεωμετρία τους. Οι μεγάλες ταχύτητες περιστροφής έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες περιφερειακές ταχύτητες ($v = \omega \cdot r$) και επομένως μεγάλες φυγόκεντρες δυνάμεις οι οποίες θα μπορούσαν να προξενήσουν καταστροφές στο δρομέα όπως π.χ. την αποκόλληση των αγωγών από τα αυλάκια.

Για τον λόγο αυτό οι κυλινδρικοί δρομείς κατασκευάζονται με μικρή διάμετρο αλλά μεγάλο μήκος (αυτό γίνεται για να έχουν μεγάλη ισχύ που είναι σχεδόν ανάλογη με τον όγκο της μηχανής κάτι που θα αναφερθεί παρακάτω στο κεφάλαιο της ισχύος της μηχανής). Αντίθετα, οι δρομείς με έκτυπους πόλους κατασκευάζονται με μεγάλη διάμετρο και μικρό μήκος.

Επειδή στην πλειονότητά τους τα ηλεκτρικά συστήματα είναι τριφασικά, οι σύγχρονες γεννήτριες, με σπάνιες εξαιρέσεις, είναι τριφασικές μηχανές. Για την δημιουργία τριών συμμετρικών τάσεων οι οποίες διαφέρουν κατά 120° ηλεκτρικές, απαιτούνται, κατ'ελάχιστον, τρία πηνία στον στάτη οι μαγνητικοί άξονες των οποίων θα πρέπει να είναι μετατοπισμένοι κατά 120° ηλεκτρικές. Η σχηματική παράσταση μιας στοιχειώδους τριφασικής σύγχρονης μηχανής φαίνεται στο Σχ. 1.5a. Κάθε φάση αποτελείται από ένα συγκεντρωμένο πηνίο και έτσι έχουμε τρία πηνία (α, -α), (β, -β) και (γ, -γ) με τους μαγνητικούς άξονες τους να διαφέρουν 120° στο χώρο. Στο Σχ. 1.5b φαίνεται μια τετραπολική μηχανή κάθε φάση της οποίας αποτελείται από δύο πηνία, π.χ. η φάση α έχει τα πηνία (α, -α) και (α', -α'). Γενικά σε μια πολυπολική στοιχειώδη μηχανή απαιτούνται $(P/2)$ πηνία.



Σχ. 1.5 Σχηματική παράσταση τριφασικών μηχανών (α) δύο πόλων (β) τεσσάρων πόλων (γ) σύνδεση πηνίων σε αστέρα.

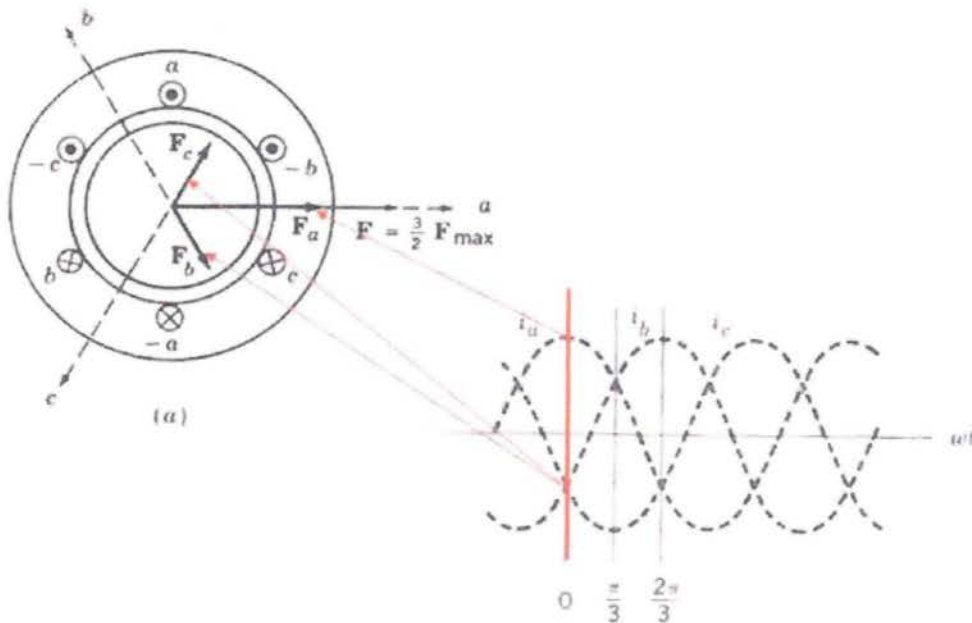
Όταν σε μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεθεί ηλεκτρικό φορτίο θα αναπτυχθούν ρεύματα στο στάτη. Όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, τα τρία συμμετρικά ρεύματα του στάτη δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού μέτρου το οποίο στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό το πεδίο αλληλεπιδρά με τον πεδίο του δρομέα-το οποίο επίσης στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα- και από την τάση τους να ευθυγραμμιστούν προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η ροπή αυτή είναι αντίθετη στην φορά περιστροφής και για να διατηρηθεί η κίνηση πρέπει μια πηγή μηχανικού έργου (ατμοστρόβιλος, υδροστρόβιλος, κλπ) να προσδίδει ισχύ στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτός είναι στην ουσία ο μηχανισμός μετατροπής της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική.

Όταν ένας σύγχρονος κινητήρας συνδεθεί στο δίκτυο τα ρεύματα του στάτη επίσης δημιουργούν ένα σταθερό σε μέτρο πεδίο που στρέφεται με τις σύγχρονες στροφές. Το πεδίο του δρομέα είναι επίσης σταθερό και στρέφεται και αυτό με τις σύγχρονες στροφές και έτσι αναπτύσσεται μια σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία είναι στην κατεύθυνση της περιστροφής. Η ροπή αυτή εξισορροπείται από την ροπή του φορτίου. Η περιστροφική ταχύτητα του σύγχρονου κινητήρα εξαρτάται μόνον από τον αριθμό των πόλων και από την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι, εφόσον η τάση έχει σταθερή συχνότητα, ο σύγχρονος κινητήρας θα έχει σταθερή ταχύτητα-σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

1.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΕΦΩΜΕΝΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΕΣ

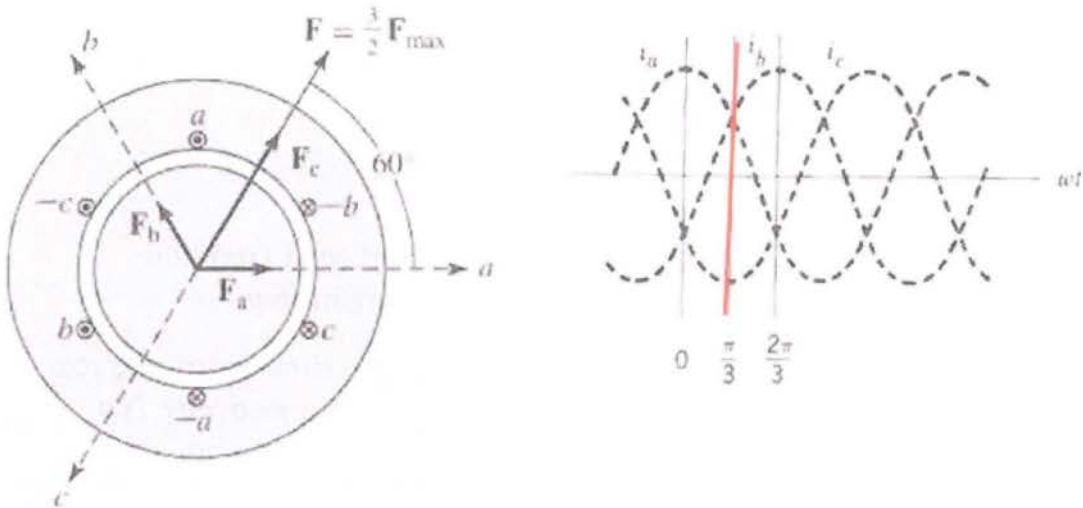
Για να εξετάσουμε την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από τρία συμμετρικά ρεύματα στο στάτη θα θεωρήσουμε μία τριφασική μηχανή δύο πόλων όπου το τυλίγμα κάθε φάσης είναι συγκεντρωμένο σε δύο αυλάκια και θα θεωρήσουμε ότι η ΜΕΔ από το ρεύμα κάθε φάσης είναι- παρά την παραδοχή του συγκεντρωμένου τυλίγματος-ημιτονοειδώς κατανομημένη στον χώρο.

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων κατασκευάζονται έτσι ώστε οι μαγνητικοί τους άξονες να είναι μετατοπισμένοι κατά 120° στον χώρο όπως φαίνεται στο Σχ.1.6. Αυτό, όπως θα αποδειχτεί, είναι απαραίτητο για την δημιουργία ενός σταθερού σε μέτρο συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου.

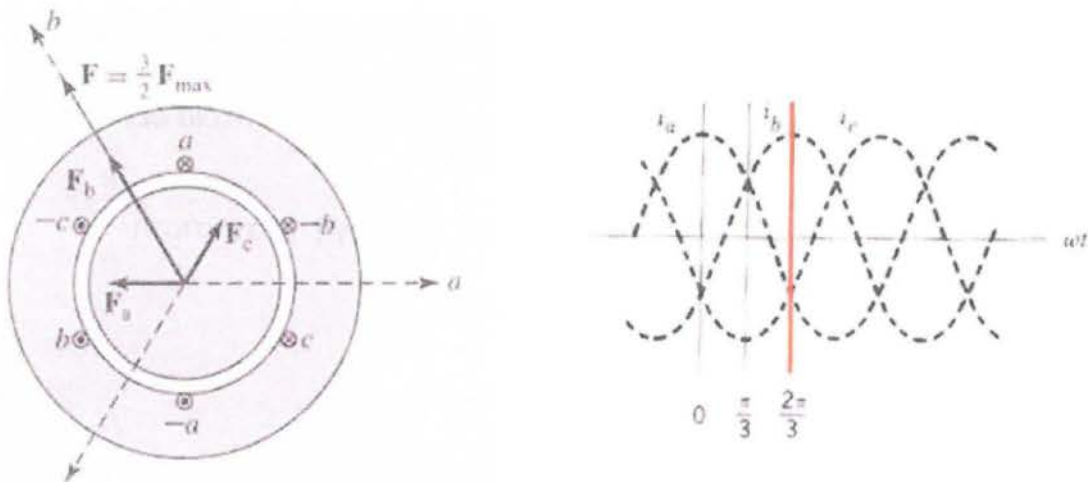


Σχ. 1.6 ΜΕΔ των τριών φάσεων την χρονική στιγμή t_0 .

Η συνιστάμενη μαγνητοεργική δύναμη (ΜΕΔ) είναι το διανυσματικό άθροισμα των τριών επιμέρους φασικών και την συγκεκριμένη χρονική στιγμή βρίσκεται στον μαγνητικό άξονα της φάσης a . Το μέτρο της είναι ίσο με $F_s=3/2F_{max}$ και όπως θα δείξουμε παραμένει σταθερό ενώ η θέση του μετακινείται στο χώρο.



Σχ 1.7 ΜΕΔ των τριών φάσεων τη χρονική στιγμή $\omega t=60^\circ$



Σχ 1.8 ΜΕΔ των τριών φάσεων τη χρονική στιγμή $\omega t=120^\circ$

Η συνιστάμενη ΜΕΔ έχει μέτρο ίσο με $F_s=3/2F_{max}$ και τις τρεις χρονικές στιγμές ενώ η θέση της μετακινείται στο χώρο.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η συνιστάμενη ΜΕΔ έχει σταθερό μέτρο αλλά η θέση της περιστρέφεται στο χώρο. Μετά από χρόνο $\omega t=2\pi$ η συνιστάμενη ΜΕΔ θα επιστρέψει στην αρχική της θέση, δηλαδή στον μαγνητικό άξονα της φάσης a . Έτσι σε έναν κύκλο του ρεύματος ($\omega t=2\pi$ στον χρόνο) η συνιστάμενη ΜΕΔ έκανε έναν κύκλο στον χώρο. Αυτό συμβαίνει σε μία μηχανή δύο πόλων. Σε μία μηχανή P πόλων η συνιστάμενη ΜΕΔ θα έκανε $2/P$ περιστροφές σε κάθε κύκλο του ρεύματος.

Από αναλυτική προσέγγιση προκύπτει ότι η συνισταμένη ΜΕΔ από τα τρία

ρεύματα του στάτη, σε μια θέση θ είναι

$$F(\theta, t) = 3/2 \cdot F_{\max} \cos(\theta - \omega t) \quad (1.3)$$

Δηλαδή η συνισταμένη ΜΕΔ είναι ένα κύμα με σταθερό μέτρο που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς στον χώρο με γωνιακή ταχύτητα ω .

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τρία συμμετρικά ρεύματα στον στάτη τα οποία ρέουν σε τρία συμμετρικώς διατεταγμένα τυλίγματα δημιουργούν ένα συνιστάμενο πεδίο το οποίο έχει σταθερό μέτρο και στρέφεται με την σύγχρονη μηχανική ταχύτητα. Είδαμε ότι και το πεδίο που δημιουργείται από το dc ρεύμα του δρομέα είναι σταθερό σε μέτρο και στρέφεται με την σύγχρονη μηχανική ταχύτητα. Αυτά τα δύο πεδία αλληλεπιδρούν (τείνουν να ευθυγραμμιστούν) με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μια σταθερή σε μέτρο ηλεκτρομαγνητική ροπή. Πρέπει να τονισθεί ότι τα μέτρα των πεδίων που προαναφέρθηκαν είναι σταθερά μόνο όταν η μηχανή λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση και έχει συμμετρικό ηλεκτρικό φορτίο. Σε μεταβατικές καταστάσεις ή σε ασύμμετρες φορτίσεις τα πεδία δεν είναι σταθερά όπως θα αναλυθεί σε άλλο κεφάλαιο.

Τα πεδία αυτά είναι υπεύθυνα για την επαγωγή στον στάτη εναλλασσόμενων τάσεων.

1.4 ΕΠΑΓΟΜΕΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΣΤΑΤΗ

Στα τυλίγματα του στάτη επάγονται τάσεις λόγω χρονικής μεταβολής της πεπλεγμένης με αυτά μαγνητικής ροής (από τη γνωστή σχέση $e = d\lambda/dt$). Για τον προσδιορισμό επομένως της επαγόμενης τάσης στο στάτη της σύγχρονης μηχανής θα πρέπει να προσδιορίσουμε την πεπλεγμένη ροή με κάθε τύλιγμα.

Η τάση e_a που επάγεται σε ένα τύλιγμα $p\chi$ της φάσης α προσδιορίζεται από τον νόμο του Faraday

$$e_a = d\lambda/dt$$

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι

$$e_a = -\omega_e \cdot k_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_p \cdot \sin(\omega_e t) \quad (1.4)$$

Η επαγόμενη τάση βλέπουμε ότι είναι ημιτονοειδής και έχει μέγιστη τιμή

$$E_{\max} = \omega_e \cdot k_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_p = 2 \cdot \pi \cdot f_e \cdot k_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_p \quad (1.5)$$

Ενώ η rms τιμή της είναι

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_e \cdot k_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_p \quad (1.6)$$

Όπου f_e είναι η συχνότητα της επαγόμενης τάσης.

Η 1.5 δείχνει ότι η περιστροφή του δρομέα (δηλαδή μία χωρική μεταβολή) επάγει μία χρονικά μεταβαλλόμενη τάση στο στάτη.

Για τον υπολογισμό της σχέσης 1.4 θεωρήθηκε στοιχειώδης μηχανή με τις εξής παραδοχές :συγκεντρωμένο πηνίο πλήρους βήματος στο στάτη, το ρεύμα στο πηνίο του δρομέα παράγει ημιτονοειδές κατανεμημένο πεδίο στο χώρο και ο δρομέας στρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω rad/s.

Για την ροή Φ_p :Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής η ροή Φ_p παράγεται απο το dc ρεύμα του δρομέα (αν η μηχανή λειτουργεί εν κενώ)και επομένως χρονικά σταθερή απο το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο(αν η μηχανή λειτουργεί υπό φορτίο)το οποίο είναι επίσης σταθερό.

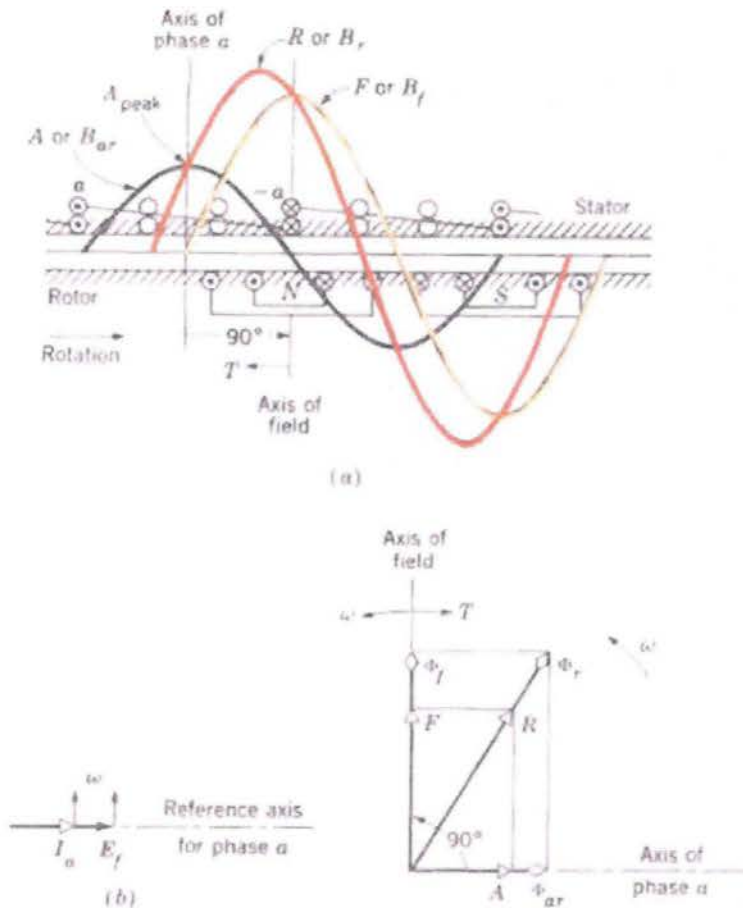
Στα διανεμημένα τυλίγματα, η τάση που επάγεται σε μία σπείρα ενός τυλίγματος διαφέρει σε φάση από την τάση που επάγεται σε μία άλλη σπείρα του ίδιου τυλίγματος επειδή οι σπείρες βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία στον χώρο. Έτσι η τάση ενός τυλίγματος δεν είναι πλέον το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων κάθε σπείρας αλλά είναι το διανυσματικό.

Ο συντελεστής λοιπόν k_w στη σχέση 1.4 υποδηλώνει ότι η τάση που θα επαχθεί σε ένα διανεμημένο τύλιγμα είναι κατά k_w φορές μικρότερη από ότι θα ήταν σε ένα συγκεντρωμένο τύλιγμα με ίδιο αριθμό σπειρών. Εξαιτίας της διαφοράς μεταξύ αλγεβρικού και διανυσματικού αθροίσματος. Όμως το διανεμημένο κλασματικό τύλιγμα έχει δύο ισχυρά πλεονεκτήματα: α) η παραγόμενη τάση από αυτό έχει πολύ λιγότερες αρμονικές από ότι στην περίπτωση του συγκεντρωμένου τυλίγματος και β) είναι πιο εύκολη η κατασκευή του διότι είναι πιο απλές οι συνδέσεις στις άκρες των τυλιγμάτων.

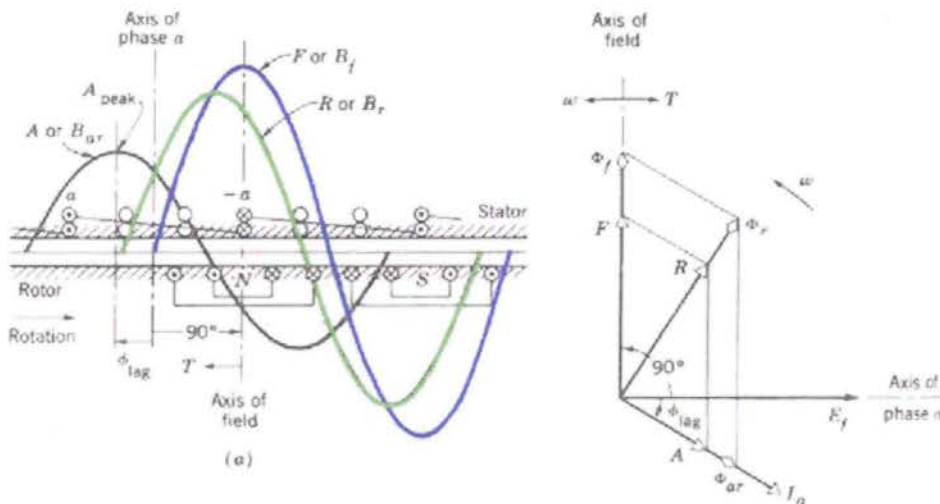
1.5 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ

Όπως είδαμε στην σύγχρονη μηχανή η οποία λειτουργεί υπό φορτίο αναπτύσσονται δύο στρεφόμενα πεδία τα οποία στρέφονται με την σύγχρονη μηχανική ταχύτητα και έχουν επίσης σταθερό μέτρο. Το ένα πεδίο δημιουργείται από το ρεύμα στον δρομέα και το άλλο δημιουργείται από τα τρία ρεύματα του στάτη τα οποία θεωρούμε συμμετρικά. Το πεδίο που δημιουργείται από τα ρεύματα του στάτη έχει μέτρο που εξαρτάται από το πλάτος των ρευμάτων η δε θέση του σε σχέση με το πεδίο του δρομέα εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου της μηχανής. Τα δύο αυτά πεδία αλληλεπιδρούν και τελικά έχουμε το συνιστάμενο πεδίο στο διάκενο της μηχανής. Η θέση του συνιστάμενου πεδίου στο διάκενο της μηχανής σε σχέση με το πεδίο του δρομέα εξαρτάται επίσης από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου αλλά και από το εάν η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια ή ως κινητήρας.

Θα παραθέσουμε 2 σχήματα όπου θα συμπεριλαμβάνονται σε κοινά διαγράμματα, τα διανύσματα τάσης και ρεύματος μιας φάσης (ως διανύσματα χρόνου) και τα διανύσματα ΜΕΔ και μαγνητικών ροών (ως διανύσματα χώρου) έτσι ώστε να βγάλουμε πιο εύκολα τα συμπεράσματά μας.



Σχ.1.9 Μαγνητικά πεδία σε σύγχρονη μηχανή όταν το ρεύμα στο στάτη είναι συμφασικό με την επαγόμενη τάση. F, A, R είναι οι ΜΕΔ του δρομέα, του στάτη και η συνιστάμενη αντίστοιχα. B_r, B_{ar} και B_f είναι οι πυκνότητες μαγνητικής ροής των πεδίων του δρομέα, του στάτη και του συνιστάμενου αντίστοιχα. Φ είναι οι αντίστοιχες μαγνητικές ροές. E_f είναι η επαγόμενη στο τύλιγμα της φάσης a τάση. I_a είναι το ρεύμα στην φάση a .



Σχ.1.10 Μαγνητικά πεδία σε σύγχρονη μηχανή όταν το ρεύμα στο στάτη έπεται της επαγόμενης τάσης κατά μια γωνία ϕ_{lag} .

Από τα δύο σχήματα παρατηρούμε ότι, στην κατεύθυνση της κίνησης, προηγείται το πεδίο του δρομέα ακολουθούμενο από το συνιστάμενο πεδίο και το πεδίο του στάτη. Μεταξύ του πεδίου του δρομέα και του συνιστάμενου πεδίου αναπτύσσεται μια ροπή με στόχο την ευθυγράμμισή τους. Η ροπή αυτή είναι αντίθετη με την φορά της κίνησης όπως φαίνεται στο Σχ. 1.9 και 1.10. Επομένως η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Στην περίπτωση όπου το φορτίο είναι επαγωγικό, δηλαδή το ρεύμα έπεται της αντίστοιχης επαγόμενης τάσης κατά μια γωνία ϕ_{lag} , φαίνεται στο Σχ. 1.10. Για το ίδιο ρεύμα δρομέα και στάτη όπως και στην προηγούμενη περίπτωση παρατηρούμε ότι η συνιστάμενη ΜΕΔ και μαγνητική ροή είναι μικρότερη. Αυτό, όπως θα δούμε αργότερα, ερμηνεύει και την μεταβολή της τάσης ακροδεκτών μιας σύγχρονης μηχανής όταν η διέγερσή της μένει σταθερή και το ρεύμα στο στάτη έχει σταθερό μέτρο αλλά διαφορετικό συντελεστή ισχύος.

Για την κατάσταση του κινητήρα συμβαίνει το αντίθετο από τη γεννήτρια, δηλαδή το συνιστάμενο πεδίο προηγείται του πεδίου του δρομέα και η ροπή που αναπτύσσεται μεταξύ τους είναι στην κατεύθυνση της κίνησης.

Συγκρίνοντας τις δύο καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής, δηλαδή λειτουργία ως γεννήτρια ή ως κινητήρας, βλέπουμε ότι εκείνο που διαφοροποιείται είναι η φορά του ρεύματος και επομένως η θέση της ΜΕΔ του πεδίου του στάτη ως προς το πεδίο του δρομέα. Η αντίστοιχη μετακίνηση της ΜΕΔ έχει σαν αποτέλεσμα το συνιστάμενο πεδίο να επιπορεύεται (γεννήτρια) ή να προπορεύεται (κινητήρας) του πεδίου του δρομέα και η ροπή να είναι κατά την φορά της κίνησης ή αντίθετη με αυτήν.

1.6 ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΕΣ ΚΑΙ ΑΜΟΙΒΑΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΕΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ

Στην ενότητα αυτή θα κάνουμε μια αναφορά στις αυτεπαγωγές και τις αμοιβαίες επαγωγές του στάτη και του δρομέα και θα ορίσουμε την σύγχρονη αυτεπαγωγή που εμφανίζεται στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της μηχανής.

Η πεπλεγμένη με το τύλιγμα κάθε φάσης του στάτη μαγνητική ροή και η πεπλεγμένη με το τύλιγμα του δρομέα μαγνητική ροή δίνεται, συναρτήσει των ρευμάτων, από τις σχέσεις:

$$\lambda_a = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + L_{af} \cdot i_f \quad (1.7)$$

$$\lambda_b = L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + L_{bf} \cdot i_f \quad (1.8)$$

$$\lambda_c = L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + L_{cf} \cdot i_f \quad (1.9)$$

$$\lambda_f = L_{fa} \cdot i_a + L_{fb} \cdot i_b + L_{fc} \cdot i_c + L_{ff} \cdot i_f \quad (1.10)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να βρεθεί η επαγόμενη στα τυλίγματα τάση με το νόμο του Faraday.

Ορίζουμε θ_m τη γωνία μεταξύ του μαγνητικού άξονα του δρομέα και του μαγνητικού άξονα της φάσης α .

Αυτεπαγωγή του δρομέα

Εαν ο δρομές είναι κυλινδρικός και εαν οι αρμονικές χώρου που εισάγονται από τα αυλάκια του στάτη αμεληθούν, τότε η αυτεπαγωγή του δρομέα είναι ανεξάρτητη της θέσης θ_m του δρομέα.

$$L_{ff} = L_{ff0} + L_{f\beta} \quad (1.11)$$

όπου αντιστοιχεί στη θεμελιώδη αρμονική χώρου της μαγνητικής ροής, ενώ αντιστοιχεί στη μαγνητική ροή σκέδασης, δηλαδή στην μαγνητική ροή που εμπλέκεται μόνο με το τύλιγμα του δρομέα και όχι με τα τυλίγματα του στάτη.

Σε μεταβατική ή ασύμμετρη λειτουργία, η πεπλεγμένη με το τύλιγμα του δρομέα ροή (1.10), μεταβάλλεται με το χρόνο και επομένως στο τύλιγμα του δρομέα επάγεται τάση πέραν της dc με την οποία αυτός τροφοδοτείται. Αυτή η επαγόμενη τάση έχει σημαντική επίδραση στην λειτουργία της μηχανής. Εάν όμως στο στάτη ρέουν τρία συμμετρικά ρεύματα τότε δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο με σταθερό μέτρο το οποίο στρέφεται με την σύγχρονη μηχανική ταχύτητα δηλαδή σε συγχρονισμό με τον δρομέα. Έτσι ο δρομέας δεν αντιλαμβάνεται μεταβολή της μαγνητικής ροής λόγω των ρευμάτων του στάτη και η επαγόμενη σε αυτόν τάση είναι μηδέν.

Αμοιβαία επαγωγή στάτη δρομέα.

Οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα μεταβάλλονται περιοδικά με την θέση του δρομέα και συγκεκριμένα με την ηλεκτρική γωνία θ_{me} .

$$\theta_{me} = P/2 \cdot \theta_m \quad (1.12)$$

$$L_{af} = L_{fa} = L_{af} \cos(\theta_{me}) \quad (1.13)$$

Αυτεπαγωγές και αμοιβαίες επαγωγές στο στάτη. Σύγχρονη αντίδραση.

Εάν ο δρομέας μιας σύγχρονης μηχανής είναι κυλινδρικός, η γεωμετρία του διακένου είναι ανεξάρτητη της θ_m υπό την προϋπόθεση ότι η επίδραση των αυλακιών του στάτη αμελείται. Τότε οι αυτεπαγωγές του στάτη είναι σταθερές και,

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{aa0} + L_{al} \quad (1.14)$$

όπου L_{aa0} είναι η αυτεπαγωγή που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη αρμονική στο χώρο, ενώ η L_{al} είναι η αυτεπαγωγή σκέδασης ενός τυλίγματος στο στάτη.

Οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των φάσεων είναι

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = -1/2 \cdot L_{aa0} \quad (1.15)$$

Έτσι η πεπλεγμένη με το τυλίγμα της φάσης α μαγνητική ροή προκύπτει

$$\lambda_{\alpha} = (3/2 \cdot L_{aa0} + L_{al}) \cdot i_{\alpha} + L_{af} \cdot i_f \quad (1.16)$$

Ορίζουμε την σύγχρονη αντίδραση ως

$$L_s = (3/2 \cdot L_{aa0} + L_{al}) \quad (1.17)$$

Από την (1.17) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η σύγχρονη αυτεπαγωγή είναι η φαινόμενη αυτεπαγωγή δηλαδή αυτή που ουσιαστικά «βλέπει» η φάση α σε συμμετρική τριφασική λειτουργία της μηχανής. Η L_s αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο, L_{aa0} , αντιπροσωπεύει την θεμελιώδη χωρική συνιστώσα της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από το ρεύμα της φάσης α και φτάνει μέχρι το διάκενο, δηλαδή συνεισφέρει στην συνιστάμενη μαγνητική ροή διακένου. Το δεύτερο μέρος, L_{al} , είναι η αυτεπαγωγή σκέδασης και αντιπροσωπεύει το μέρος της μαγνητικής της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από το ρεύμα της φάσης α και δεν φτάνει στο διάκενο δηλαδή εμπλέκεται μόνο με την φάση α. Το τρίτο μέρος, $1/2 L_{aa0}$, αντιπροσωπεύει το μέρος της συνιστάμενης μαγνητικής ροής διακένου που εμπλέκεται με την φάση α αλλά οφείλεται στα ρεύματα των φάσεων b και c. Καταλαβαίνουμε συνεπώς ότι η L_s δεν είναι κάποια φυσική αυτεπαγωγή ενός πηνίου αλλά μια έκφραση της συνισταμένης αντίδρασης και των τριών ρευμάτων του στάτη.

Στην ουσία στην πεπλεγμένη με τη φάση μαγνητική ροή συνεισφέρουν και τα ρεύματα των δύο άλλων φάσεων.

1.7 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΡΟΜΕΑ

Η τάση στους πόλους της φάσης α (φασική τάση) μιας σύγχρονης μηχανής είναι ίση με την επαγόμενη τάση στο τύλιγμα της φάσης α, την e_{af} (λέγεται και εσωτερική τάση) μείον την πτώση τάσης στην αντίδραση του τυλίγματος. Αυτό ισχύει εάν δεχθούμε σύμβαση γεννήτριας για την μηχανή. Σε σύμβαση κινητήρα, η τάση στους πόλους είναι το άθροισμα της ωμικής πτώσης τάσης και της επαγόμενης τάσης στο τύλιγμα. Εάν η μηχανή είναι αφόρτιστη ($i_a=0$) η τάση στους πόλους της είναι ίση με την εσωτερική τάση.

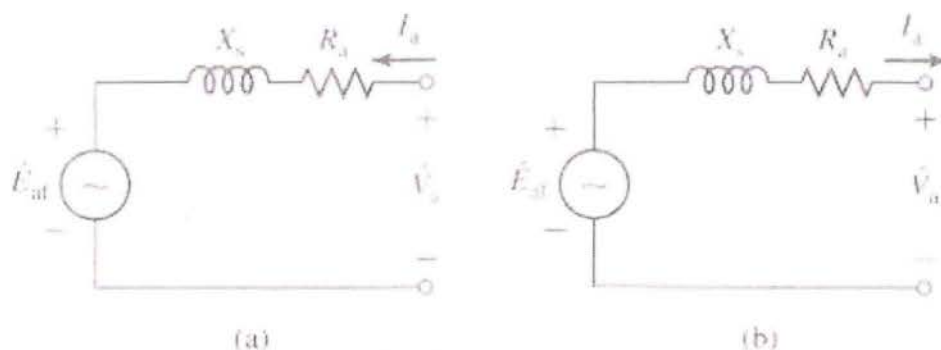
Εάν η μηχανή έχει φορτίο και θεωρήσουμε σύμβαση γεννήτριας, η τάση στους πόλους δίνεται από την πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση (R_a) και από την επαγόμενη στο τύλιγμα τάση

$$v_a = -d\lambda_a/dt - R_a \cdot i_a = e_{af} - L_s \cdot di_a/dt - R_a \cdot i_a \quad (1.18)$$

Εάν η μηχανή λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση όλα τα μεγέθη της (ρεύματα, τάσεις, μαγνητικές ροές) θα μεταβάλλονται ημιτονοειδώς. Έτσι τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να τις γράψουμε σε διανυσματική μορφή με βάση τις rms τιμές των αντίστοιχων μεγεθών.

$$\overline{V}_a = \overline{E}_{af} - jX_s \overline{I}_a - R_a \overline{I}_a \quad (1.19)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της σχέσης φαίνεται στο σχήμα 1.11



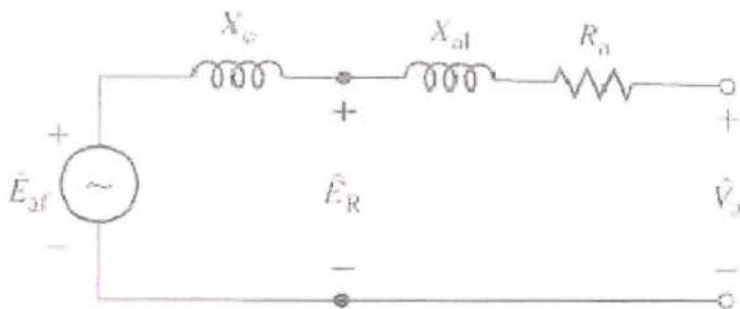
Σχ.1.11 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα (α)κινητήρας (b)γεννήτρια

Σε σύμβαση κινητήρα

$$\overline{V}_a = \overline{E}_{af} + jX_s \overline{I}_a + R_a \overline{I}_a \quad (1.20)$$

Πρέπει να τονισθεί ότι οι (1.19) και (1.20) είναι ισοδύναμες με την έννοια ότι η σύμβαση κινητήρα ή γεννήτριας είναι αυθαίρετη. Απλώς σε περίπτωση που η ενεργός ισχύς βγαίνει από την μηχανή (γεννήτρια) είναι σύνηθες να θεωρούμε το ρεύμα στον στάτη με την φορά του Σχ. 1.11b, ενώ αν η ενεργός ισχύς μπαίνει στην μηχανή (κινητήρας) θεωρούμε το ρεύμα στο στάτη με την φορά που φαίνεται στο Σχ.1.11α.

Μια άλλη προσέγγιση του ισοδύναμου κυκλώματος μιας σύγχρονης μηχανής με κυλινδρικό δρομέα φαίνεται στο σχήμα 1.12.



Σχ1.12 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα.

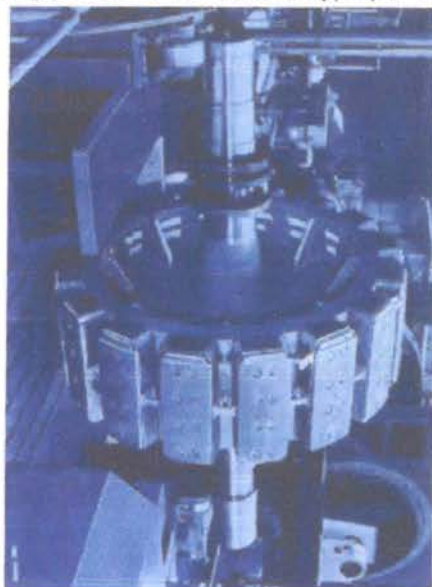
Στο συγκεκριμένο σχήμα η σύγχρονη αντίδραση έχει αναλυθεί στις συνιστώσες της. Η X_{af} είναι η αντίδραση σκέδασης και η X_s είναι η αντίδραση που αντιστοιχεί στην μαγνητική ροή στο διάκενο, από τα τρία ρεύματα του στάτη. Η τάση είναι η rms τιμή της τάσης που ουσιαστικά επάγεται στο τυλίγμα από την συνισταμένη ροή διακένου (η συνισταμένη ροή διακένου αποτελείται από την ροή λόγω του πεδίου του δρομέα και του πεδίου λόγω των ρευμάτων του στάτη) και για αυτόν το λόγο αναφέρεται και ως τάση διακένου (air-gap voltage). Η τάση που παίρνουμε στους ακροδέκτες της μηχανής είναι η μείον την πτώση τάσης στην αντίδραση σκέδασης και στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος.

Επειδή η X_s είναι πολύ μεγαλύτερη της R_a , η τελευταία μπορεί να παραληφθεί στους υπολογισμούς τάσεων και ρευμάτων με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής χωρίς να εισάγεται κάποιο σοβαρό λάθος. Η R_a λαμβάνεται πάντα υπόψιν στους υπολογισμούς των απωλειών της μηχανής.

1.8 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΕΚΤΥΠΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ ΣΤΟ ΔΡΟΜΕΑ

Σε μια μηχανή με κυλινδρικό δρομέα, το διάκενο είναι ομοιόμορφο. Αυτό σημαίνει ότι η μαγνητική ροή που παράγεται από κάποια ΜΕΔ (δηλαδή από κάποιο ρεύμα) κατανέμεται στο χώρο με τρόπο που δεν εξαρτάται από την θέση του δρομέα. Στη περίπτωση όμως που ο δρομέας έχει έκτυπους πόλους όπως στο Σχ. 1.13, το διάκενο δεν είναι ομοιόμορφο. Εκεί που προεξέχουν οι πόλοι το διάκενο είναι μικρότερο και επομένως η αντίσταση στην μαγνητική ροή είναι μικρότερη από ότι στις περιοχές μεταξύ των

πόλων όπου το διάκενο είναι μεγαλύτερο. Για τον λόγο αυτό η όποια μαγνητική ροή έχει σαν προτιμώμενο δρόμο τα σημεία που προεξέχουν οι πόλοι. Στη συνέχεια θα επικεντρώσουμε την ανάλυση σε μηχανές με δύο πόλους για λόγους απλότητας. Στις αντίστοιχες μηχανές μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συμβαίνουν τα αντίστοιχα για κάθε ζεύγος πόλων.

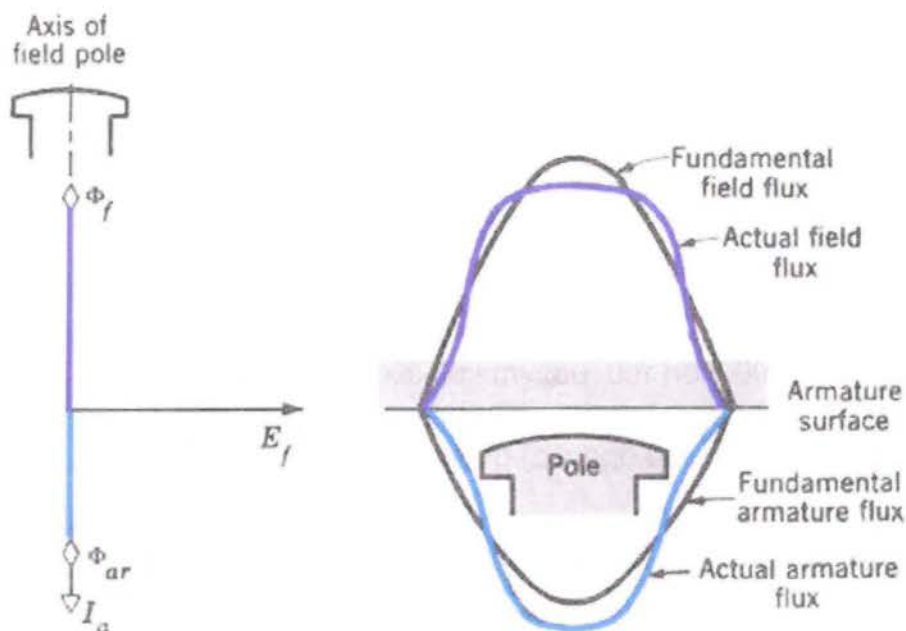


Σχ 1.13 δρομέας με έκτυπους πόλους

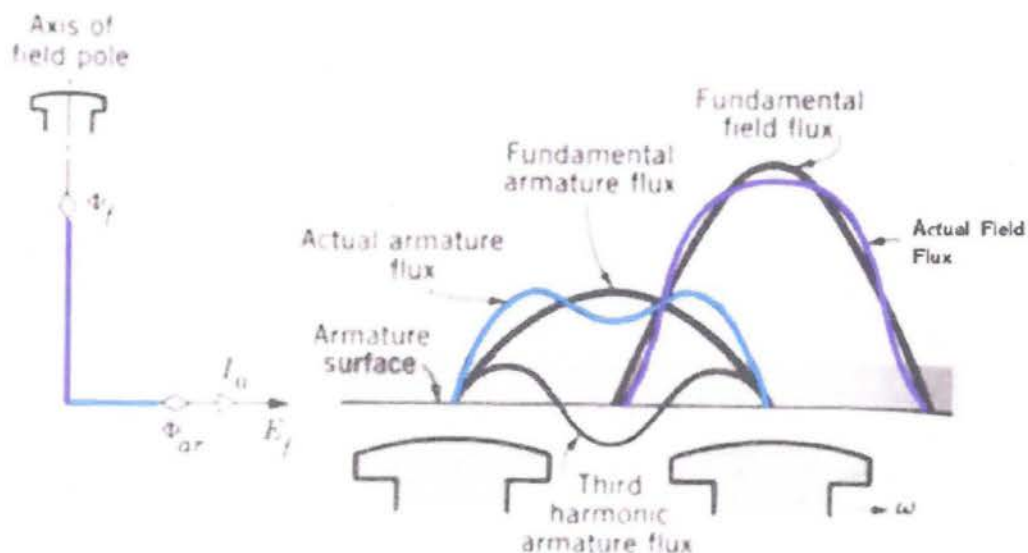
Σε μία διπολική μηχανή ο μαγνητικός άξονας του δρομέα είναι στην κατεύθυνση βόρειου-νότιου πόλου. Αυτή η κατεύθυνση ορίζεται σαν ευθύς άξονας (direct axis). Σε αυτόν τον άξονα είναι προσανατολισμένη και η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το ρεύμα του δρομέα. Ο κάθετος σε αυτόν άξονας, ο οποίος είναι στην κατεύθυνση του διακένου μεταξύ των πόλων, ορίζεται ως εγκάρσιος άξονας (quadrature axis).

Επειδή η επαγόμενη στα τυλίγματα του στάτη εσωτερική τάση, E_{af} , προκύπτει λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής του δρομέα, η τάση αυτή έπεται κατά 90° . Επομένως η E_{af} θα βρίσκεται στον εγκάρσιο άξονα. Αυτό είναι σημαντικό στοιχείο για την ανάλυση των διανυσμάτων τάσεων-ρευμάτων σε μια σύγχρονη μηχανή επειδή εντοπίζοντας την θέση του E_{af} εντοπίζεται αυτόματα η θέση του ορθού και εγκάρσιου άξονα. Στη συνέχεια, όπως θα δούμε, όλα τα μεγέθη τάσεων και ρευμάτων αναλύονται στις συνιστώσες τους στον ορθό και εγκάρσιο άξονα κάνοντας την ανάλυση απλούστερη.

Θα παραθέσουμε δύο σχήματα για να καταλάβουμε ευκολότερα τη μεταβολή της μαγνητικής ροής επομένως και της σύγχρονης αντίδρασης λόγω της ανομοιομορφίας των έκτυπων πόλων.



Σχ 1.14 μαγνητικές ροές σε μηχανή έκτυπων πόλων όταν το ρεύμα του στάτη έπεται της επαγόμενης τάσης κατά 90° .



Σχ 1.15 μαγνητικές ροές σε μηχανή έκτυπων πόλων όταν το ρεύμα του στάτη είναι συμφασικό της επαγόμενης τάσης.

Λόγω της ύπαρξης του κενού χώρου μεταξύ των έκτυπων πόλων, η μαγνητική αντίσταση στην περιοχή εκείνη είναι μεγαλύτερη. Επομένως η μαγνητική ροή από τα ρεύματα του στάτη (Σχ. 1.15) είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση που το ρεύμα του στάτη έπεται 90° της επαγόμενης τάσης (Σχ. 1.14). Άρα η φαινόμενη σύγχρονη αντίδραση του στάτη είναι μικρότερη

στην περίπτωση που το ρεύμα του στάτη είναι συμφασικό με την επαγόμενη τάση. Το τελευταίο προκύπτει από το γεγονός ότι μια αυτεπαγωγή συνδέεται με το ρεύμα και την ροή με την σχέση, $L = \Phi / I$.

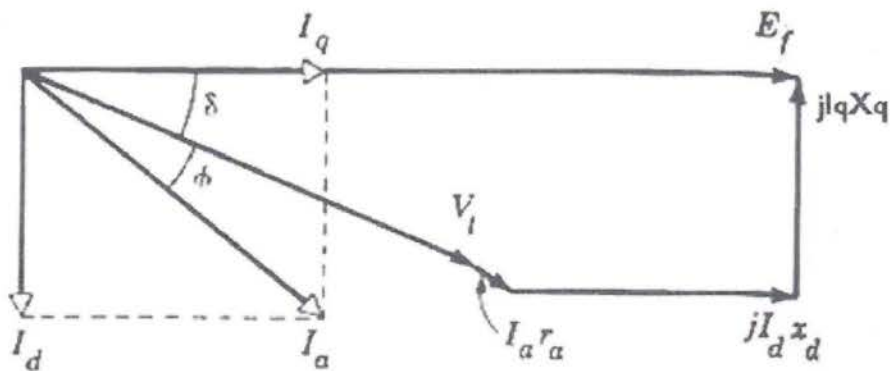
Επομένως σε μηχανές με έκτυπους πόλους η αντίδραση (X_s) του στάτη δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την θέση του δρομέα.

Για τον λόγο αυτό το ρεύμα του στάτη αναλύεται σε δύο συνιστώσες: μία συμφασική (I_q) με την επαγόμενη εσωτερική τάση (και επομένως κάθετη στην κατεύθυνση του μαγνητικού άξονα του δρομέα) και μία σε επιπορεία 90° (I_d) ως προς την επαγόμενη τάση (και επομένως στην κατεύθυνση του άξονα του δρομέα) όπως φαίνεται στο Σχ. 1.16.

Οι δύο συνιστώσες I_d , και I_q του ρεύματος του στάτη, δημιουργούν αντίστοιχα πτώσεις τάσης, $jI_d X_d$, και $jI_q X_q$ όπου ως X_d και X_q ορίζονται οι αντιδράσεις του στάτη στον ευθύ και εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις αυτές εμπεριέχουν την συνολική (λόγω και των τριών ρευμάτων του) αντίδραση που παρουσιάζει ο στάτης στις κατευθύνσεις των δύο αξόνων.

Η X_q είναι μικρότερη της X_d λόγω της μεγαλύτερης μαγνητικής αντίστασης κατά την διεύθυνση του εγκάρσιου άξονα. Και οι δύο αντιδράσεις επηρεάζονται από τον κορεσμό της μηχανής όπως και η X_s για τις μηχανές κυλινδρικού τομέα.

Έτσι λόγω των διαφορετικών αντιδράσεων του στάτη, σε μια μηχανή έκτυπων πόλων, δεν μπορούμε να την μοντελοποιήσουμε με ένα ισοδύναμο κύκλωμα όπως κάναμε για την μηχανή με κυλινδρικό δρομέα. Μπορούμε όμως να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα διανυσμάτων για τις τάσεις και τα ρεύματα όπως φαίνεται στο Σχ.1.16.



Σχ 1.16 διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων.

Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι ισχύει

$$\bar{E}_f = \bar{V}_t + r_a \bar{I}_a + jI_a X_d + jI_q X_q \quad (1.21)$$

όπου, E_f είναι η επαγόμενη εσωτερική τάση σε κάθε τύλιγμα του στάτη (φασική τάση), V_t είναι η τάση στους ακροδέκτες του στάτη (φασική επίσης τάση), και r_a είναι η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη.

Η ανάλυση των ρευμάτων μιας σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων στους δύο άξονες (τον ευθύ και τον εγκάρσιο) στάθηκε αφορμή για την γενικότερη ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών στο σύστημα dq0 (θα γίνει ανάλυση του σε άλλη ενότητα) με βάση το οποίο γίνεται σήμερα ο έλεγχός τους.

1.9 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

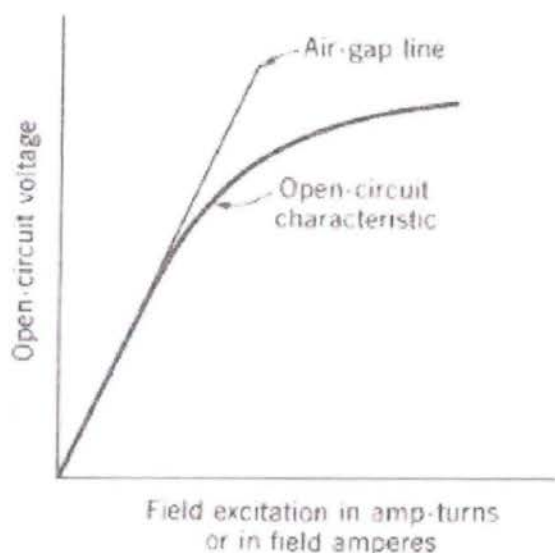
Η θεωρητική ανάλυση της σύγχρονης μηχανής που έγινε μέχρι εδώ βασίστηκε στην γραμμική σχέση μεταξύ μαγνητοεργετικών δυνάμεων και μαγνητικών ροών. Θεωρήθηκε ότι το μαγνητικό υλικό από το οποίο κατασκευάζεται τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας έχει μαγνητική διαπερατότητα πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του αέρα στο διάκενο και επομένως η ένταση των μαγνητικών πεδίων καθορίζεται από τον αέρα του διακένου.

Στην πραγματικότητα οι κατασκευαστές σύγχρονων μηχανών χρησιμοποιούν, για την κατασκευή του πυρήνα του δρομέα και του στάτη, μαγνητικά υλικά τα οποία έχουν μεγάλη αλλά πεπερασμένη-και όχι άπειρη-μαγνητική διαπερατότητα. Έτσι, είτε γενικά στην μηχανή είτε τοπικά σε ορισμένα σημεία της παρουσιάζονται φαινόμενα κορεσμού με αποτέλεσμα η γραμμική σχέση μεταξύ ΜΕΔ και μαγνητικών ροών να χάνεται. Τα σφάλματα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς που αφορούν μια σύγχρονη μηχανή όταν αμελούμε τον κορεσμό μπορεί να είναι μικρά ή μεγάλα και αυτό καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατασκευή της συγκεκριμένης μηχανής, δηλαδή, από την γεωμετρία του πυρήνα του στάτη και του δρομέα, από τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποίησε ο κατασκευαστής, από το μέγεθος του διακένου, και από το σχήμα και μέγεθος των αυλακιών του στάτη και του δρομέα.

Θα αναφέρουμε το παράδειγμα κορεσμού μεταξύ ρεύματος διέγερσης και επαγόμενης τάσης. Στην πραγματικότητα η σχέση μεταξύ ρεύματος διέγερσης και επαγόμενης τάσης-για μια μηχανή χωρίς ρεύμα στο στάτη- είναι όπως το σχ 1.17. Η χαρακτηριστική αυτή ονομάζεται και καμπύλη μαγνήτισης ή

χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος. Η καμπύλη αυτή δημιουργείται με μέτρηση του ρεύματος διέγερσης και της τάσης ανοικτού κυκλώματος για σταθερή ταχύτητα περιστροφής-συνήθως την ονομαστική.

Παρατηρούμε ότι μετά από κάποια τιμή του ρεύματος διέγερσης-ή της ΜΕΔ του δρομέα- η τάση ανοικτού κυκλώματος στο στάτη δεν αυξάνεται γραμμικά. Αυτό είναι το σημείο στο οποίο αρχίζει ο κορεσμός του πυρήνα του στάτη και του δρομέα.Εναλλακτικά μπορούμε να πούμε ότι-ενώ βρισκόμαστε στον κορεσμό- για αυξήσουμε την τάση στον στάτη θα πρέπει να αυξήσουμε δυσανάλογα πολύ το ρεύμα διέγερσης στο δρομέα της μηχανής.



Σχ 1.17 τυπική χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος σύγχρονης μηχανής.

Η απόκλιση της καμπύλης κορεσμού από την ευθεία διακένου είναι μια ένδειξη του βαθμού κορεσμού. Αν η μηχανή έχει φορτίο τότε η ύπαρξη ή όχι κορεσμού εξαρτάται από τη συνισταμένη ΜΕΔ του δρομέα και της ΜΕΔ των ρευμάτων του στάτη. Σε περιπτώσεις που το διάκενο δεν είναι ομοιόμορφο, όπως συμβαίνει στις μηχανές έκτυπων πόλων, οι υπολογισμοί δεν μπορούν να γίνουν με αναλυτικές εξισώσεις και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές πεπερασμένων στοιχείων. Αλλοιώσεις στην ομοιόμορφη κατανομή της μαγνητικής ροής προκαλούνται και από τα αυλάκια του στάτη.

1.10 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΣΜ ΑΠΟ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝ ΚΕΝΩ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Με τα πειράματα της εν κενώ λειτουργίας και βραχυκύκλωσης μπορούν να

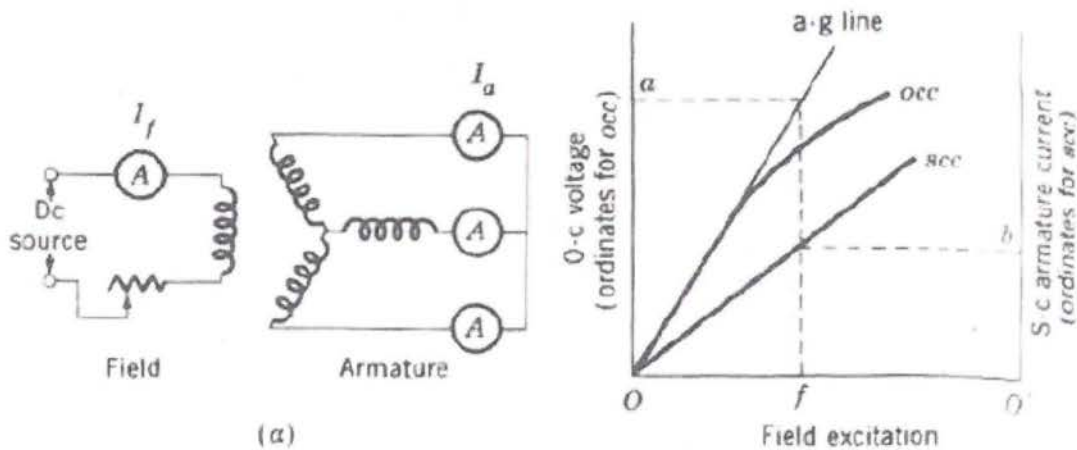
προσδιορισθούν: η κορεσμένη και ακόρεστη σύγχρονη αντίδραση της σύγχρονης μηχανής, οι απώλειες σιδήρου οι απώλειες χαλκού στο στάτη και η ισοδύναμη ωμική αντίσταση η στο στάτη.

Κατά το πείραμα της εν κενώ λειτουργίας η μηχανή στρέφεται με τις σύγχρονες στροφές χωρίς φορτίο στο στάτη ενώ το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται από μηδέν μέχρι τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του.

Κατά το πείραμα βραχυκύκλωσης η μηχανή είναι βραχυκυκλωμένη στο στάτη, στρέφεται με τις ονομαστικές στροφές και το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται από μηδέν μέχρι την τιμή εκείνη που το ρεύμα του στάτη θα γίνει ίσο με το ονομαστικό.

Με το πείραμα της εν κενώ λειτουργίας μπορούμε να προσδιορίσουμε τις απώλειες σιδήρου μιας σύγχρονης μηχανής. Αρχικά στρέφουμε την μηχανή στις ονομαστικές στροφές χωρίς διέγερση και βρίσκουμε τις απώλειες τριβών και αερισμού. Ενώ στη συνέχεια με διέγερση ίση με την ονομαστική, η ισχύς που μετράμε διαφέρει από την προηγούμενη κατά τις απώλειες τριβών και αερισμού (που παραμένουν σταθερές) και τις απώλειες σιδήρου. Οι απώλειες αυτές εμφανίζονται μόνο στο σίδηρο του στάτη και διαχωρίζονται σε απώλειες δινορευμάτων και απώλειες υστέρησης.

Κατά το πείραμα βραχυκύκλωσης, όπως προαναφέρθηκε, η μηχανή βραχυκυκλώνεται στο στάτη όπως σχηματικά φαίνεται στο Σχ 1.18 και η διέγερσή της μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι την τιμή εκείνη που το ρεύμα του στάτη γίνει ίσο με το μέγιστο επιτρεπτό.



Σχ 1.18 (α) Πείραμα βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής (β) Χαρακτηριστικές ανοικτού κυκλώματος, διακένου και βραχυκύκλωσης.

Επειδή οι ακροδέκτες του στάτη είναι βραχυκυκλωμένοι, όλη η επαγόμενη τάση αναλώνεται στην σύγχρονη αντίδραση και στην ωμική αντίσταση των

τυλιγμάτων.

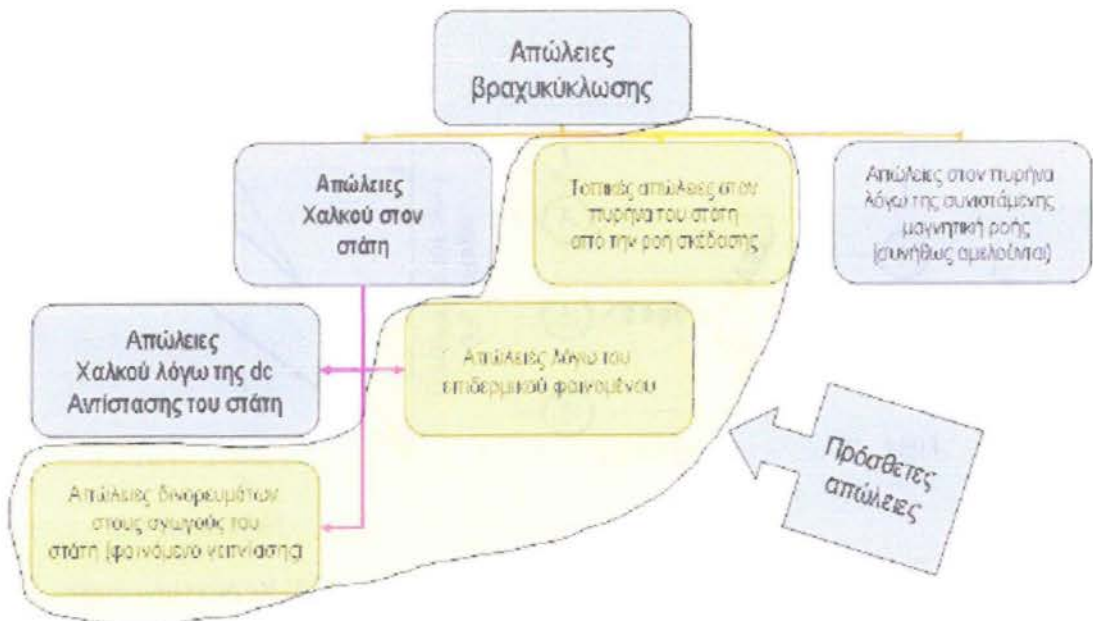
Από τις καμπύλες του Σχ 1.18β μπορούμε να υπολογίσουμε την σύγχρονη αντίδραση της μηχανής σε κορεσμένη και ακόρεστη κατάσταση.

Μετρώντας την μηχανική ισχύ κατά το πείραμα βραχυκύκλωσης, έχουμε τις απώλειες τριβών και αερισμού καθώς επίσης και τις απώλειες από τη ροή του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Τις απώλειες τριβών και αερισμού τις έχουμε μετρήσει και στο πείραμα της εν κενώ λειτουργίας χωρίς διέγερση. Αφαιρώντας τις από την μηχανική ισχύ που μετράμε στο πείραμα βραχυκύκλωσης παίρνουμε τις απώλειες που οφείλονται στη ροή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και ονομάζονται απώλειες βραχυκύκλωσης. Οι απώλειες βραχυκύκλωσης αποτελούνται από:

- Τις απώλειες χαλκού του στάτη
- Τις απώλειες του πυρήνα του στάτη λόγω της ροής σκέδασης
- Τις μικρές απώλειες πυρήνα (δινορευμάτων και υστέρησης) από τη μικρή συνισταμένη μαγνητική ροή.

Οι απώλειες χαλκού του στατη οφείλονται στη ροή του εναλλασσόμενου ρεύματος στα τυίγματα.

Διαγραμματικά η σύνθεση των απωλειών βραχυκύκλωσης φαίνεται στο Σχ 1.19



Σχ 1.19 Σύνθεση των απωλειών βραχυκύκλωσης.

1.11 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ο προσδιορισμός των απωλειών σε μια μηχανή είναι σημαντικός διότι (1) καθορίζεται το λειτουργικό κόστος της μηχανής, (2) καθορίζεται η έκκληση θερμότητας στη μηχανή και επομένως μπορεί να σχεδιαστεί το κατάλληλο είδος ψύξης και (3) προσδιορίζονται οι ισοδύναμες αντιστάσεις για να εφαρμοσθούν στο ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο της μηχανής επιτρέποντας έτσι την διενέργεια ακριβέστερων υπολογισμών των σημείων λειτουργίας της.

Ο βαθμός απόδοσης της σύγχρονης μηχανής-όπως και κάθε συστήματος μετατροπής ενέργειας- ορίζεται απο την

$$n = \frac{\text{ισχύς}_{\text{εξόδου}}}{\text{ισχύς}_{\text{εξόδου}} + \text{απώλειες}} \quad (1.22)$$

Στις σύγχρονες μηχανές υπολογίζονται συνήθως με μετρήσεις οι απώλειες και στην συνέχεια υπολογίζονται από την (1.22) ο βαθμός απόδοσης. Σε άλλα ενεργειακά συστήματα γίνεται μέτρηση της ισχύς εισόδου και εξόδου και με αφαίρεση προκύπτουν οι απώλειες.

Οι σύγχρονες μηχανές είναι αποδοτικά συστήματα μετατροπής ενέργειας. Ο βαθμός απόδοσής τους είναι μεγάλος στις περισσότερες περιοχές λειτουργίας τους. Όσο όμως μειώνεται η ισχύς εξόδου μειώνεται και ο βαθμός απόδοσης διότι οι απώλειες σιδήρου παραμένουν σταθερές αφού εξαρτώνται από την τάση λειτουργίας της μηχανής η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με την ονομαστική ακόμη και σε χαμηλές ισχύεις.

Μηχανές με πολλούς πόλους έχουν γενικά μικρότερο βαθμό απόδοσης από ότι οι μηχανές με λίγους πόλους. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ροή σκέδασης (και επομένως μεγαλύτερες απώλειες πυρήνα) αλλά και στις μεγαλύτερες ισοδύναμες ωμικές αντιστάσεις στα τυλίγματα για την ίδια ισχύ.

Εκτός από τις απώλειες χαλκού και σιδήρου στον στάτη σε μία σύγχρονη μηχανή υπάρχουν και οι απώλειες χαλκού στο δρομέα ($I_f^2 R_f$). Οι απώλειες αυτές οφείλονται μόνο στην dc αντίσταση των τυλιγμάτων του δρομέα.

Η ικανότητα μιας σύγχρονης μηχανής εξαρτάται από μηχανικούς και θερμικούς παράγοντες. Παραδείγματα μηχανικών παραγόντων είναι η αντοχή των εδράνων πάνω στα οποία περιστρέφεται και οι φυγόκεντρες δυνάμεις

που ασκούνται στο δρομέα κατά την περιστροφή του. Τέτοιοι παράγοντες καθορίζουν και την μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα της μηχανής.

Οι θερμικοί παράγοντες καθορίζονται από την αντοχή της μόνωσης της μηχανής. Ανάλογα με το υλικό με το οποίο κατασκευάζεται η μόνωση καθορίζεται και η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία σε αυτήν. Η ανύψωση της θερμοκρασίας προκαλείται από τις απώλειες της μηχανής. Επομένως το σύστημα ψύξης της μηχανής θα πρέπει να σχεδιαστεί ώστε οι απώλειες- σε διάφορα επίπεδα λειτουργίας- να απάγονται από την μηχανή με στόχο η θερμοκρασία της μόνωσής της να μην υπερβεί την μέγιστη επιτρεπτή. Η φόρτιση της μηχανής που μπορεί να διαρκεί για άπειρο χρονικό διάστημα χωρίς να καταπονεί την μόνωσή της ονομάζεται ονομαστική φόρτιση.

1.12 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

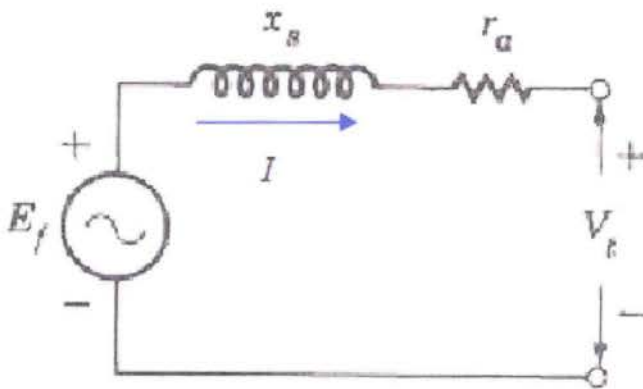
Το πρόβλημα της ψύξης των σύγχρονων μηχανών, ιδιαίτερα των στροβιλογεννητριών με μεγάλη ισχύ, είναι σύνθετο για τους ακόλουθους λόγους: οι απώλειες της μηχανής είναι συνάρτηση του όγκου της και επομένως μεταβάλλονται με τον κύβο των διαστάσεων ενώ η ικανότητα απαγωγής της θερμότητας των απωλειών εξαρτάται από την επιφάνεια της μηχανής δηλαδή από το τετράγωνο των διαστάσεών της. Είναι επομένως φανερό ότι απαιτείται εξαναγκασμένη ψύξη και αυτό αληθεύει ακόμη και για μηχανές μέσης ισχύος (μερικών MVA). Το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο διότι, λόγοι κόστους εγκατάστασης και μεταφοράς, επιβάλλουν την κατασκευή των μηχανών με όσο το δυνατόν πιο συμπαγή μορφή. Η συμπαγής μορφή όμως δυσκολεύει την λειτουργία του συστήματος ψύξης.

Ένα από τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται ευρέως, ειδικά σε στροβιλογεννήτριες, είναι το υδρογόνο σε αέρια μορφή.

Η ψύξη μπορεί να είναι είτε άμεση είτε έμμεση. Προτιμάται η άμεση ψύξη όπου το ψυκτικό μέσο κυκλοφορεί απευθείας μέσα στους αγωγούς. Ως αποτέλεσμα της άμεσης ψύξης η φόρτιση της μηχανής μπορεί- για το ίδιο φυσικό μέγεθος- να διπλασιασθεί σε σχέση με μια μηχανή με έμμεση ψύξη επειδή η άμεσα απαγόμενη θερμότητα των απωλειών δεν αυξάνει τόσο την θερμοκρασία της μόνωσης. Εκτός από το υδρογόνο, ως ψυκτικά μέσα χρησιμοποιούνται, ο αέρας και το νερό.

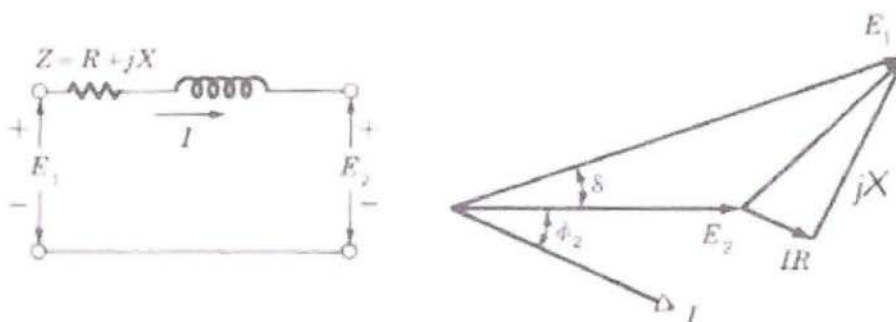
1.13 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ -ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟ ΔΡΟΜΕΑ

Η ηλεκτρική ισχύς, σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, σύγχρονων μηχανών (γεννητριών) με κυλινδρικό δρομέα μπορεί να βρεθεί με την βοήθεια του ισοδύναμου μονοφασικού κυκλώματος του Σχ. 1.20



Σχ 1.20 Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα σύγχρονης μηχανής(γεννήτριας) με κυλινδρικό δρομέα.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μεταφορά ισχύος γίνεται μεταξύ δύο τάσεων (E_f και V_t) ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλεται μια σύνθετη αντίδραση ($r_a + jx_s$). Έτσι, ο υπολογισμός της ισχύος είναι μέρος της γενικής περίπτωσης μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο τάσεων E_1 και E_2 μεταξύ των οποίων μεσολαβεί η σύνθετη αντίδραση Z όπως φαίνεται στο Σχ. 1.21.



Σχ 1.21 Μεταφορά ισχύος μεταξύ δύο κόμβων με τάσεις E_1, E_2 .

Όπως προαναφέρθηκε, η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη είναι πολύ μικρή σε σχέση με την σύγχρονη αντίδραση και επομένως μπορεί να αμεληθεί χωρίς να εισάγεται σημαντικό σφάλμα.

Για το Σχ1.20 η ισχύς στους ακροδέκτες της μηχανής δίνεται από τις

$$P = V_t I \cos \varphi \quad (1.23)$$

$$P = \frac{E_f V_t}{X_s} \sin \delta \quad (1.24)$$

Και η άεργος ισχύς από τις

$$Q = V_t I \sin \varphi \quad (1.25)$$

$$Q = \frac{E_f V_t}{X_s} \cos \delta - \frac{V_t^2}{X_s} \quad (1.26)$$

Για δεδομένη εσωτερική τάση E_f και τάση ακροδεκτών V_t η μέγιστη ισχύς της μηχανής, από την (1.23), προκύπτει για $\delta=90^\circ$:

$$P_{\max} = \frac{E_f V_t}{X_s} \quad (1.27)$$

Στην πραγματικότητα, για λόγους δυναμικής ευστάθειας της μηχανής, η επιτρεπτή γωνία φόρτισής της είναι συνήθως $\delta_{\max}=60^\circ-70^\circ$ δηλαδή αρκετά μικρότερη των 90° . Για δεδομένη μηχανή (επομένως δεδομένο X_s) η οποία συνδέεται σε άπειρο ζυγό (δηλαδή δεδομένο V_t) η μέγιστη ισχύς της μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας το E_f . Η αύξηση του E_f προϋποθέτει σχεδόν αναλογική αύξηση του ρεύματος διέγερσης, I_f . Το I_f δεν μπορεί όμως να αυξάνεται απεριόριστα διότι περιορίζεται από την θερμική αντοχή

του τυλίγματος του δρομέα.

Από την (1.24) παρατηρούμε ότι για θετικό δ , δηλαδή όταν η E_f προηγείται της V_t , η ισχύς είναι θετική και επομένως η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια μεταφέροντας ισχύ προς τους ακροδέκτες. Αντίστροφα, εάν $\delta < 0$, δηλαδή εάν η V_t προηγείται της E_f , τότε $P < 0$ και η μηχανή λειτουργεί ως σύγχρονος κινητήρας απορροφώντας ισχύ από τους ακροδέκτες. Βλέπουμε ότι η συμπεριφορά της μηχανής ως γεννήτριας ή ως κινητήρα εξαρτάται από μόνον από την προπορεία ή επιπορεία της E_f ως προς την V_t . Η φυσική ερμηνεία αυτής της παρατήρησης βασίζεται στην δομή των μαγνητικών πεδίων της μηχανής όπως αυτά εξετάστηκαν παραπάνω: η εσωτερική τάση E_f είναι αποτέλεσμα του μαγνητικού πεδίου του δρομέα ενώ η V_t είναι αποτέλεσμα του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου της μηχανής.

Είδαμε ότι, όταν το μαγνητικό πεδίο του δρομέα προηγείται του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια (επειδή τα δύο πεδία τείνουν να ευθυγραμμισθούν, πρέπει ένας κινητήριος μηχανισμός να κινεί τον δρομέα για να βρίσκεται αυτός σε προπορεία σε σχέση με το συνιστάμενο πεδίο και επομένως πρέπει να δίνουμε μηχανική ισχύ στον δρομέα-επομένως η μηχανή είναι γεννήτρια). Αντίστροφα, ένα μηχανικό φορτίο αναγκάζει τον δρομέα να επιπορεύεται του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από την (1.24) είναι ότι μια μεταβολή της ισχύος θα εκφρασθεί με μεταβολή της γωνίας δ εφόσον η E_f και η V_t δεν αλλάξουν. Αυτό ισχύει τόσο για λειτουργία γεννήτριας όσο και κινητήρα. Έτσι, μια μείωση της ισχύος θα εκφρασθεί ως μείωση της γωνίας δ (μείωση δηλαδή της γωνίας μεταξύ του πεδίου του δρομέα και του συνιστάμενου πεδίου) και αντίστροφα.

Εάν η ισχύς της μηχανής (είτε είναι γεννήτρια είτε είναι κινητήρας) είναι σταθερή και η μηχανή είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό (V_t σταθερό) τότε μια μεταβολή του ρεύματος διέγερσης θα προξενήσει μια αντίστοιχη μεταβολή της γωνίας δ τέτοια ώστε το γινόμενο $-E_f \sin \delta$ να μείνει σταθερό. Έτσι, μια αύξηση του ρεύματος διέγερσης (και επομένως της E_f) θα προκαλέσει μείωση της γωνίας δ και αντίστροφα. Αυτό είναι ένα λογικό συμπέρασμα αφού το κύκλωμα διέγερσης δεν μπορεί να επιδράσει στο κύκλωμα ισχύος, δηλαδή δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε την ενεργό ισχύ της μηχανής μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης το οποίο ανήκει σε ένα κύκλωμα χαμηλής ισχύος. Μεταβάλλοντας όμως το ρεύμα διέγερσης, θα δούμε, ότι μπορούμε να μεταβάλλουμε την άεργο ισχύ της μηχανής.

Ας θεωρήσουμε ότι η μηχανή του Σχ.1.20 λειτουργεί σε ένα σημείο όπου το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων είναι όπως στο Σχ.

1.22α. Σε αυτήν κατάσταση βλέπουμε ότι το E_f προηγείται του V_t και επομένως η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Επίσης παρατηρούμε ότι $E_f \cos\delta > V_t$. Από την (1.26) προκύπτει ότι $Q > 0$ που σημαίνει (με δεδομένη την φορά του ρεύματος στα Σχ. 1.20 και Σχ. 1.22α) ότι το φορτίο της μηχανής καταναλώνει επαγωγική άεργο ισχύ. Επομένως η μηχανή παράγει επαγωγική άεργο ισχύ (δηλαδή συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής). Αυτή η κατάσταση ονομάζεται υπερδιέγερση.

<p>Σχ 1.22α Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων σύγχρονης γεννήτριας σε υπερδιέγερση.</p>	<p>Σχ 1.22β Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων σύγχρονης γεννήτριας σε υποδιέγερση</p>

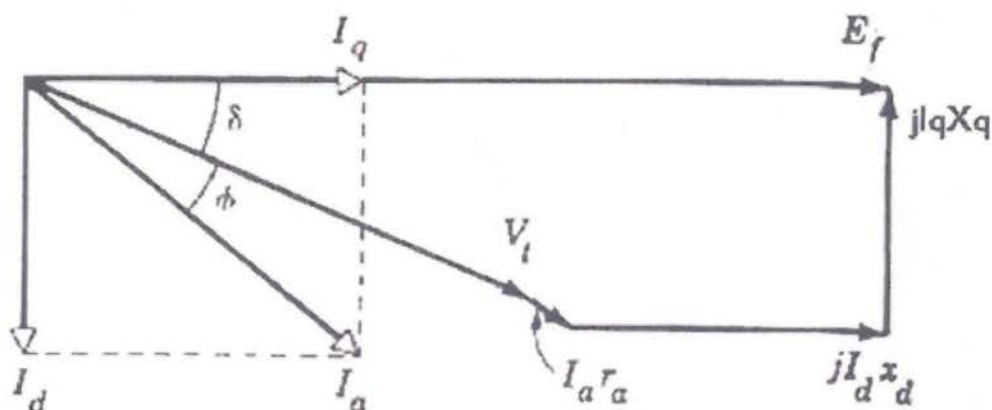
Έστω τώρα ότι η φόρτιση της μηχανής αλλάζει και το διανυσματικό διάγραμμα είναι όπως στο Σχ. 1.22β. Σε αυτήν την περίπτωση η E_f πάλι προηγείται της V_t και επομένως η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια όμως $E_f \cos\delta < V_t$. Από την (1.26) έχουμε ότι $Q < 0$ που σημαίνει ότι (με δεδομένη την φορά του ρεύματος στο Σχ. 1.20 και την θέση του στο Σχ. 1.22β) η μηχανή καταναλώνει επαγωγική άεργο ισχύ δηλαδή συμπεριφέρεται σαν πηνίο. Αυτό μπορεί να φανεί και από το φορτίο στους ακροδέκτες της μηχανής. Παρατηρώντας το Σχ. 1.22β βλέπουμε ότι το ρεύμα του φορτίου προηγείται της τάσης ακροδεκτών V_t , και επομένως το φορτίο έχει συμπεριφορά πυκνωτή. Άρα, η γεννήτρια έχει συμπεριφορά πηνίου. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται υποδιέγερση.

Παρατηρούμε από τα παραπάνω ότι μεταβάλλοντας το ρεύμα διέγερσης της μηχανής (είτε πρόκειται για γεννήτρια είτε για κινητήρα) μπορούμε να ελέγξουμε την άεργο ισχύ της. Αυτό είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύγχρονων σε σύγκριση με τις ασύγχρονες μηχανές, και για μεν την περίπτωση των σύγχρονων γεννητριών χρησιμοποιείται αυτό από τους διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων για την ρύθμιση της ηλεκτρικής τάσης, για δε την περίπτωση των σύγχρονων κινητήρων χρησιμοποιείται από τα εργοστάσια στα οποία είναι εγκατεστημένοι για την αντιστάθμιση της άεργης ισχύος σε αυτά.

ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕ ΕΚΤΥΠΟΥΣ ΠΟΛΟΥΣ

Στις μηχανές με έκτυπους πόλους είδαμε ότι δεν μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα ισοδύναμο κύκλωμα λόγω των διαφορετικών σύγχρονων αντιδράσεων στον ευθύ και στον εγκάρσιο άξονα. Το διανυσματικό διάγραμμα μιας σύγχρονης γεννήτριας επαναλαμβάνεται στο Σχ. 1.23.

Το ότι η μηχανή είναι γεννήτρια το αντιλαμβανόμαστε από το γεγονός ότι η εσωτερική τάση E_f προηγείται της τάσης ακροδεκτών V_t κατά την γωνία δ . Από το Σχ.1.23 και αμελώντας την αντίσταση, r_a , των τυλιγμάτων του στάτη προκύπτει η παρακάτω σχέση.



Σχ 1.23 Διανυσματικό φιάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων.

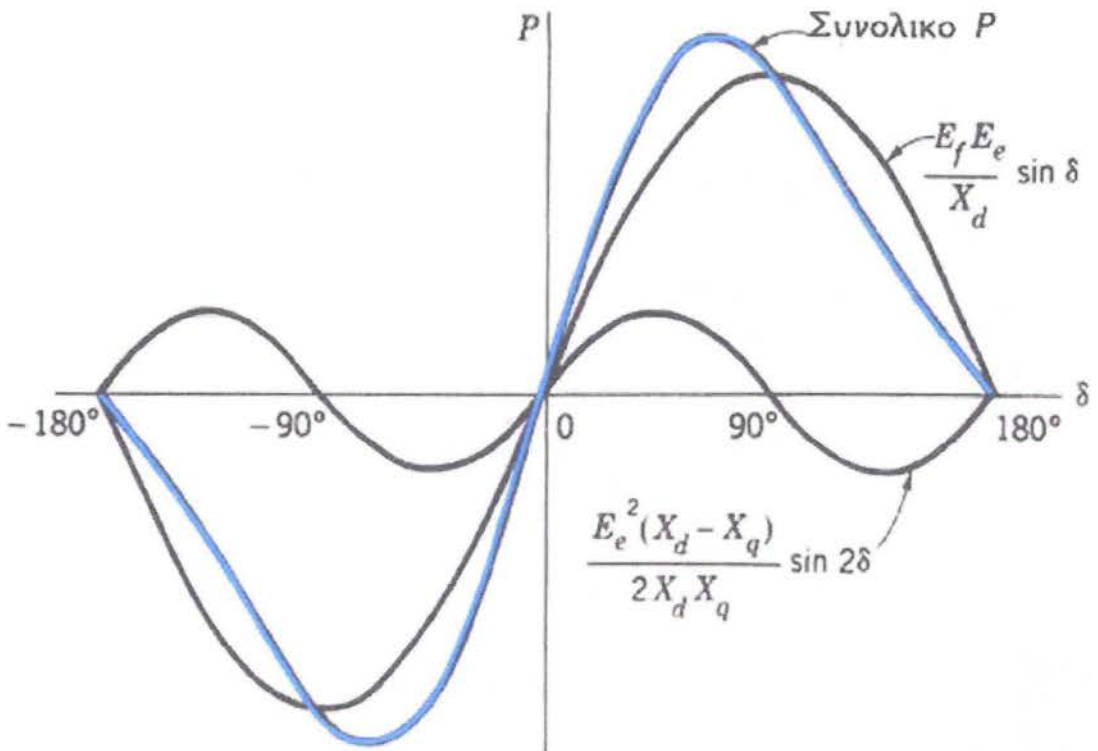
Η ισχύς στους ακροδέκτες της μηχανής είναι:

$$P = \frac{V_t E_f}{x_d} \sin \delta + V_t^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \sin 2\delta \quad (1.28)$$

Παρατηρούμε ότι η ισχύς στην σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους αποτελείται από δύο σκέλη εκ των οποίων το πρώτο είναι όμοιο με την ισχύ της σύγχρονης μηχανής κυλινδρικού δρομέα ενώ το δεύτερο σκέλος είναι ανεξάρτητο της εσωτερικής τάσης E_f και επομένως της διέγερσης. Το σκέλος αυτό ονομάζεται ισχύς αντίδρασης (reluctance power), μεταβάλλεται με το διπλάσιο της γωνίας φόρτισης και οφείλεται στην διαφορά μεταξύ των σύγχρονων αντιδράσεων στον ευθύ και εγκάρσιο άξονα. Η φυσική ερμηνεία

της είναι ότι η ροή στο διάκενο αναπτύσσει μια ροπή η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τους πόλους του δρομέα με την θέση της ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης. Σε μια μηχανή στην οποία $X_d = X_q$ (όπως δηλαδή σε μια μηχανή με κυλινδρικό δρομέα) δεν υπάρχει προτιμώμενη κατεύθυνση ευθυγράμμισης και επομένως δεν υπάρχει ο αντίστοιχος όρος στην ισχύ.

Στο Σχ.1.24 φαίνεται η σύνθεση της ισχύος μιας μηχανής έκτυπων πόλων σαν συνάρτηση της γωνίας δ . Θετικές γωνίες δ αντιστοιχούν σε γεννήτρια ενώ αρνητικές γωνίες δ σε κινητήρα.



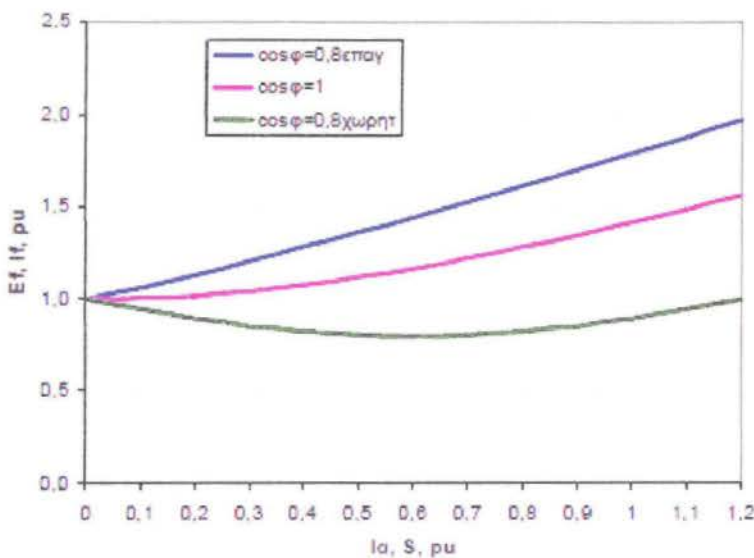
Σχ 1.24 Σύνθεση της ισχύος σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων.

Από το Σχ.1.24 παρατηρούμε ότι για την ίδια ισχύ P , μια μηχανή με έκτυπους πόλους θα λειτουργούσε σε μικρότερη γωνία φορτίου δ από ότι μια μηχανή με κυλινδρικό δρομέα εφόσον τα E_f και V_t είναι ίδια. Επίσης η μέγιστη ισχύς της μηχανής έκτυπων πόλων είναι λίγο μεγαλύτερη από την μέγιστη ισχύ της μηχανής με κυλινδρικό δρομέα για το ίδιο E_f και V_t . Το χαρακτηριστικό αυτό επηρεάζει την δυναμική συμπεριφορά της μηχανής κάνοντας τις μηχανές έκτυπων πόλων πιο στιβαρές (stiff). Μαθηματικά αυτό εκφράζεται με το ότι ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος με την γωνία φορτίου, $\frac{\partial P}{\partial \delta}$, είναι μεγαλύτερος στις μηχανές έκτυπων πόλων.

1.14 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι χαρακτηριστικές της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας περιγράφουν την σχέση μεταξύ του ρεύματος στάτη, της διέγερσης, της τάσης στους ακροδέκτες και της ισχύος μιας σύγχρονης μηχανής.

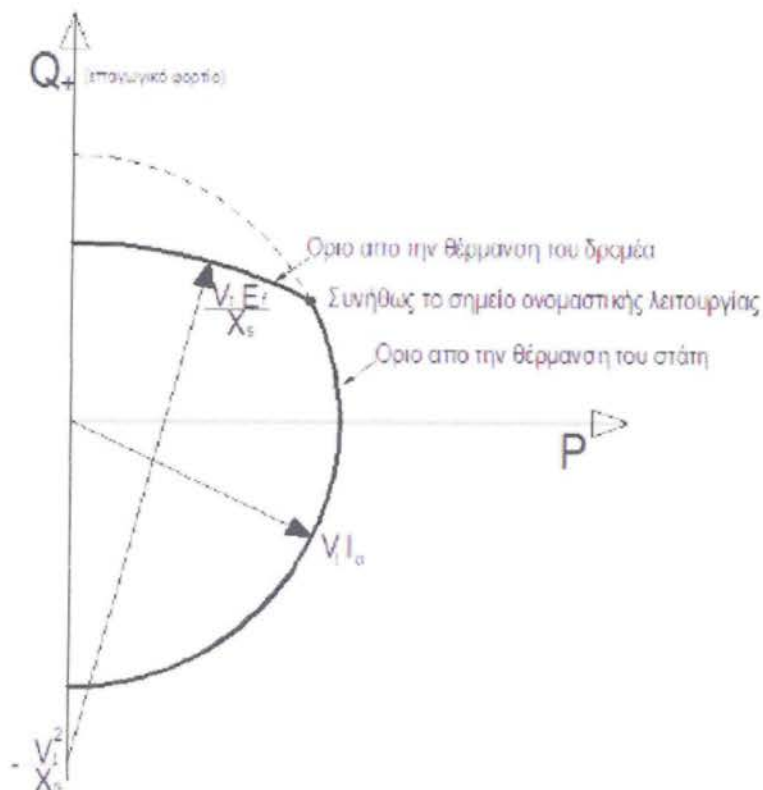
Έστω ότι μια σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό με τάση 1 pu και τον τροφοδοτεί με ενεργό και άεργο ισχύ. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες μιας γεννήτριας που δείχνουν την απαιτούμενη διέγερση σαν συνάρτηση του μεγέθους της φαινόμενης ισχύος φαίνονται στο Σχ. 1.25. Οι καμπύλες αυτές μπορεί να θεωρηθεί ότι δείχνουν και την απαιτούμενη διέγερση της μηχανής έτσι ώστε η τάση στους ακροδέκτες της να διατηρείται στο 1 pu όταν το μέγεθος του φορτίου μεταβάλλεται αλλά ο συντελεστής ισχύος του παραμένει συγκεκριμένος.



Σχ1.25 Συνδιαστικές καμπύλες σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικής δρομέας με $X_s=1\text{ pu}$ και τάση ακροδεκτών $V_t=1\text{ pu}$.

Η ικανότητα φόρτισης των σύγχρονων γεννητριών συνήθως καθορίζεται από την ονομαστική φαινόμενη ισχύ τους και τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος ο οποίος συνήθως είναι 0,8, 0,85 ή 0,9 επαγωγικός. Μέχρι αυτές τις συνθήκες φόρτισης οι απώλειες είναι μέσα στα όρια σχεδιασμού και επομένως η μηχανή δεν υπερθερμαίνεται. Η ενεργός ισχύς καθορίζεται από την ισχύ του κινητήριου μηχανισμού και είναι ένα μέρος της φαινόμενης ισχύος. Ελέγχοντας το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας μπορούμε να ελέγχουμε την τάση στους ακροδέκτες και να την διατηρούμε κοντά στην

ονομαστική της τιμή (με ανοχή $\pm 5\%$). Μεταβάλλοντας όμως το ρεύμα διέγερσης αλλάζει και η άεργος ισχύς και επομένως, για δεδομένη ενεργό ισχύ, η φαινόμενη ισχύς, δηλαδή το ρεύμα στο στάτη. Οι περιοχές ισχύος στις οποίες μπορεί να λειτουργεί η σύγχρονη γεννήτρια περιορίζονται από την θερμική αντοχή των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα δηλαδή από τα αντίστοιχα ρεύματα.



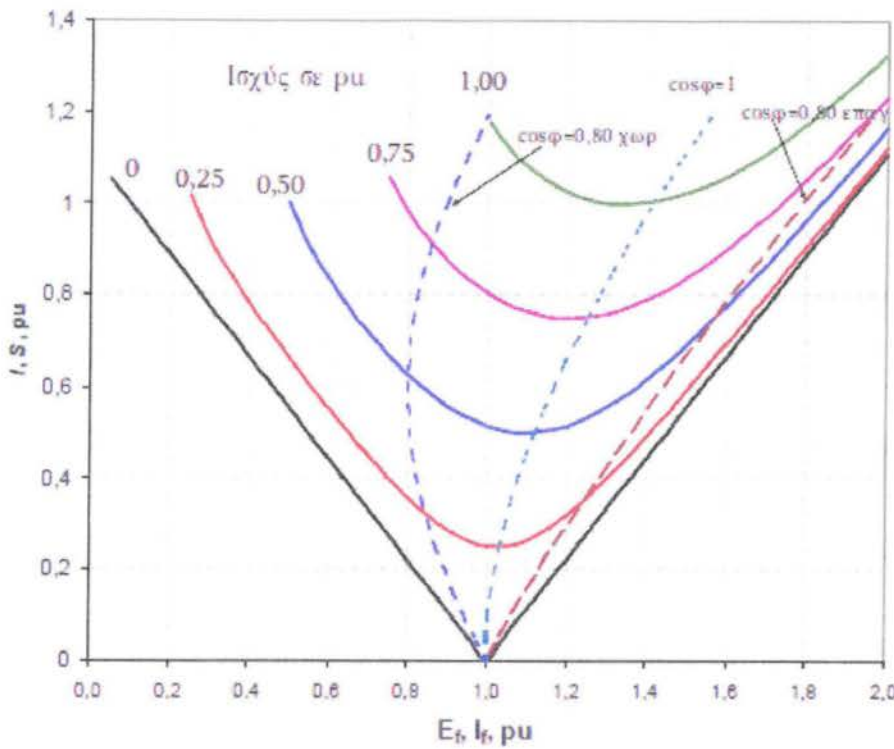
Σχ1.26 Κατασκευή ορίων λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας.

Ο κύκλος αυτός παριστάνει το όριο λειτουργίας το οποίο θέτει η μέγιστη επιτρεπτή τιμή του E_f , ή αλλιώς, η μέγιστη επιτρεπτή θερμότητα απωλειών στο δρομέα.

Η τομή των δύο κύκλων συνήθως ορίζεται από τους κατασκευαστές ως το σημείο ονομαστικής λειτουργίας.

Όταν μια σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ζυγό σταθερής τάσης και παρέχει σταθερή ενεργό ισχύ, η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης θα προκαλέσει μεταβολή της άεργης ισχύος και επομένως της φαινόμενης ισχύος και του συντελεστή ισχύος. Η μεταβολή της φαινόμενης ισχύος αντιστοιχεί, για σταθερή τάση ακροδεκτών, σε μεταβολή του ρεύματος στάτη. Οι καμπύλες που δείχνουν την μεταβολή του ρεύματος στάτη συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος

διέγερσης φαίνονται στο Σχ. 1.27. Οι καμπύλες αυτές, λόγω του σχήματός τους, ονομάζονται καμπύλες V.



Σχ1.27 Καμπύλες V σύγχρονης γεννήτριας. Οι συγκεκριμένες για τάση ακροδεκτών $V_t=1$ pu και $X_s=0.9$ pu

Οι γραμμές δείχνουν πως πρέπει να μεταβληθεί η διέγερση της μηχανής έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερός ο συντελεστής ισχύος καθώς μεταβάλλεται η ενεργός ισχύς.

1.15 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ

Ο προσδιορισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που αναπτύσσουν οι σύγχρονες μηχανές θα γίνει με την βοήθεια της συνενέργειας. Την ίδια την μηχανή μπορούμε να την δούμε είτε σαν ένα σύνολο πηνίων σε μαγνητική σύζευξη είτε να θεωρήσουμε τον στάτη σαν ένα ισοδύναμο μαγνήτη και τον δρομέα σαν έναν άλλο. Ο ισοδύναμος μαγνήτης του στάτη προκύπτει από την συνισταμένη ΜΕΔ και των τριών ρευμάτων του στάτη ενώ ο ισοδύναμος μαγνήτης του δρομέα προκύπτει από το ρεύμα διέγερσης.

Αρχικά θα αναλύσουμε την ροπή που παράγει μια διπολική μονοφασική μηχανή μέσα από τη μέθοδο των συζευγμένων πηνίων και έπειτα θα κάνουμε

σύγκριση με την παραγόμενη ροπή της τριφασικής μηχανής.

Την συνενέργεια την εκφράζουμε σαν συνάρτηση της μηχανικής γωνίας θ_m επειδή η ροπή προκύπτει από την μερική παράγωγο της συνενέργειας ως προς την μηχανική και όχι την ηλεκτρική γωνία.

$$T_{fld} = \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \theta_m} = -\frac{P}{2} L_{sr} i_s i_r \sin \theta_e \quad (1.29)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην (1.29) υποδηλώνει ότι η ροπή ασκείται προς την κατεύθυνση της ευθυγράμμισης των δύο μαγνητικών πεδίων δηλαδή της μείωσης της θ_m .

Με κάποιες αντικαταστάσεις η ροπή γίνεται

$$T_{fld} = -\frac{P}{4} L_{sr} \bar{F}_s I_r [\sin(2\omega_e t + \delta_e) + \sin \delta_e] \quad (1.30)$$

Παρατηρούμε ότι η ροπή αναλύεται σε δύο συνιστώσες από τις οποίες η μία έχει μέση τιμή μηδέν και μεταβάλλεται με συχνότητα $2\omega_e$ ενώ η άλλη συνιστώσα είναι σταθερή και ίση με

$$T_{aver} = -\frac{P}{4} L_{sr} \bar{F}_s I_r \sin \delta_e \quad (1.31)$$

Η οποία αποτελεί και την μέση τιμή της ροπής που ασκείται στο δρομέα.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ωφέλιμη (δηλαδή σταθερή) ροπή έχουμε μόνον από τα πεδία που στρέφονται σε συγχρονισμό.

Θεωρώντας τώρα μια τριφασική μηχανή με τρία συμμετρικά τυλίγματα στο στάτη και ένα τύλιγμα στο δρομέα καταλήγουμε για την ροπή στην

$$T_{fld} = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} L_{af} \bar{F}_s I_r \sin \delta_e \quad (1.32)$$

Παρατηρούμε ότι, αντίθετα με την μονοφασική μηχανή, η τριφασική αναπτύσσει σταθερή ηλεκτρομαγνητική ροπή εφόσον βέβαια στον στάτη έχουμε συμμετρικά τριφασικά ρεύματα. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο προτιμώνται οι τριφασικές μηχανές έναντι των μονοφασικών. Ουσιαστικά μονοφασικές μηχανές χρησιμοποιούνται μόνον όταν δεν υπάρχει τριφασικό δίκτυο.

Θα προχωρήσουμε σε ανάλυση της ροπής μέσα από την μέθοδο του

μαγνητικού πεδίου.

Έχουμε δει ότι τα τρία συμμετρικά ρεύματα στον στάτη μιας σύγχρονης μηχανής δημιουργούν ένα σταθερό σε μέτρο αλλά στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το dc ρεύμα στον δρομέα της σύγχρονης μηχανής δημιουργεί ένα σταθερό σε μέτρο πεδίο το οποίο στρέφεται λόγω της περιστροφής του δρομέα. Το στρεφόμενο πεδίο του στάτη και του δρομέα στρέφονται, στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, με τις σύγχρονες στροφές. Τα δύο αυτά πεδία μπορούμε να τα αναπαραστήσουμε με δύο μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι στρέφονται γύρω από κοινό άξονα.

Ο υπολογισμός της ροπής θα βασισθεί στην συνενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον όγκο του διακένου της μηχανής. Η συνενέργεια θα υπολογισθεί συναρτήσει των ΜΕΔ του στάτη και του δρομέα και συναρτήσει της γωνίας δ_{sr} . Η ροπή θα βρεθεί από την παράγωγο της συνενέργειας ως προς την δ_{sr} .

$$T = -\frac{P}{2} \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (1.33)$$

Η γωνία δ_{sr} είναι η ηλεκτρική γωνία στο χώρο μεταξύ της ΜΕΔ του δρομέα και του στάτη. Εάν η γωνία είναι θετική (δηλαδή η δρομέας προηγείται του στάτη) η ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει, από την (6.66), αρνητική και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Εάν η γωνία είναι αρνητική (δηλαδή ο δρομέας έπεται του στάτη) η ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει, από την (6.66), θετική και η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας.

Μία διαφορετική έκφραση της ροπής είναι συναρτήση της πυκνότητας μαγνητικής ροής.

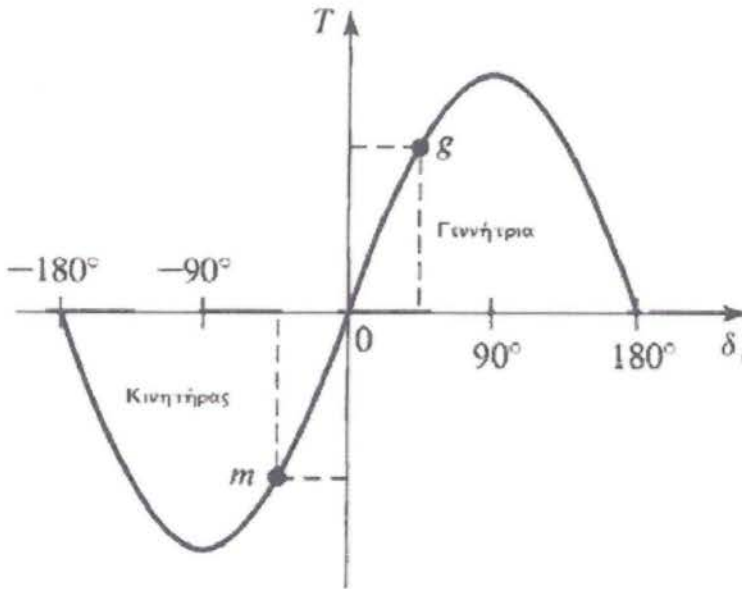
$$T = -\frac{P}{2} \frac{\pi D l}{2} F_r B_{sr} \sin \delta_r \quad (1.34)$$

Ενώ μπορεί να εκφραστεί και συναρτήση της μαγνητικής ροής.

$$T = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr} F_r \sin \delta_r \quad (1.35)$$

όπου, Φ_{sr} είναι η μαγνητική ροή ανά πόλο στο διάκενο, η οποία δημιουργείται από την συνιστάμενη δράση των ΜΕΔ του στάτη και του δρομέα.

Η μεταβολή της ροπής συναρτήσει της γωνίας ροπής ή γωνίας φορτίου, δ_r , φαίνεται στο Σχ.1.28 για σταθερό ρεύμα διέγερσης και σταθερή μαγνητική ροή στο διάκενο.



Σχ1.29 Χαρακτηριστική ροπής γωνίας-φορτίου σύγχρονης μηχανής.

Από το σχήμα μπορούμε να δούμε ότι π.χ. σε λειτουργία γεννήτριας, μια αύξηση της μηχανικής ροπής του στροβίλου θα πρέπει να αντισταθμιστεί με αντίστοιχη αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, δηλαδή με αύξηση της γωνίας δ_r .

Η μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή που μπορεί να αναπτύξει η μηχανή-για δεδομένη μαγνητική ροή διακένου και ρεύμα δρομέα- είναι για γωνία $\delta_r=90^\circ$. Η ροπή αυτή λέγεται ροπή ανατροπής (pull-out torque). Σε αυτήν την κατάσταση, μια αύξηση της ροπής του κινητήριου μηχανισμού δεν μπορεί να εξισορροπηθεί από μια αντίστοιχη αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Κατά το μεταβατικό φαινόμενο, η γωνία δ_r θα αυξηθεί πέρα από τις 90° και η ηλεκτρομαγνητική ροπή θα μειωθεί οδηγώντας με ακόμη μεγαλύτερη επιτάχυνση της μηχανής και περεταίρω αύξηση της γωνίας δ_r , κοκ. Η μηχανή τότε έχει χάσει τον συγχρονισμό με το δίκτυο και μπαίνει σε αστάθεια με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν πολύ μεγάλα ρεύματα στο στάτη και στο δρομέα. Τα συστήματα ασφαλείας της μηχανής δεν επιτρέπουν την λειτουργία σε αυτήν την κατάσταση, και έτσι η μηχανή αποσυνδέεται από το δίκτυο ενώ ταυτόχρονα δίνεται εντολή για σταμάτημα του κινητήριου μηχανισμού για να αποφευχθεί η επιτάχυνσή του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΙΑΤΑΡΕΧΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι σημαντικές διαταραχές που προκαλούνται στα ηλεκτρικά συστήματα χωρίζονται ανάλογα με τη διάρκειά τους στις κατηγορίες: 1. Υπερταχεία μεταβατικά φαινόμενα 2. Μέσης ταχύτητας μεταβατικά φαινόμενα 3. Βραδέα μεταβατικά φαινόμενα

1) υπερταχεία μεταβατικά φαινόμενα

Προκαλούνται από πτώση κεραυνών στις γραμμές μεταφοράς (άμεσα ή έμμεσα από επαγωγή) και από διακοπτικές λειτουργίες. Οι τιμές των ρευμάτων κυμαίνονται μεταξύ 5 -100 KA και έχουν διάρκεια από 20 μs μέχρι μερικά ms.Αυτός ο τύπος φαινομένων προκαλεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται περίπου με την ταχύτητα του φωτός κατά μήκος των γραμμών και προκαλεί ανακλώμενα κύματα και υπερτάσεις στο τέλος των γραμμών. Τα κύματα αυτά τα διοχετεύουμε στη γη με εκτροπείς κυμάτων ή αλεξικέραυνα.

2) μέσης ταχύτητας μεταβατικά φαινόμενα

Προκαλούνται από βραχυκυκλώματα τα οποία συμβαίνουν στις γραμμές μεταφοράς όταν διασπαστεί η μόνωση για διάφορους λόγους (πχ κυματικές υπερτάσεις, πτώση δέντρων, χιόνι στους αγωγούς). Έχουν διάρκεια γύρω στα 400 ms και τα περισσότερα είναι περιοδικού τύπου. Μπορούμε να τα χωρίζουμε στις πιο κάτω κατηγορίες:

- α. Μεταλλικό ή στέρεο συμμετρικό βραχυκύκλωμα και των τριών φάσεων
- β. Βραχυκύκλωμα δύο φάσεων με τη γη
- γ. Βραχυκύκλωμα μίας φάσης με τη γη

(με αυτήν την κατηγορία μεταβατικών φαινομένων θα ασχοληθούμε)

3) βραδέα μεταβατικά φαινόμενα- μεταβατική ευστάθεια

Προκαλούνται από βραχυκυκλώματα σε μιας ζωτικής σημασίας γραμμή .Τότε το ηλεκτρικό σύστημα υποβάλλεται σε μηχανικές ταλαντώσεις των δρομέων των σύγχρονων μηχανών που μπορούν να οδηγήσουν σε αποσυγχρονισμό μερικών ή όλων των μηχανών. Τέτοια περιστατικά οδηγούν σε μερική ή ολική διακοπή λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος, τότε λέμε ότι το σύστημα έφτασε στο όριο μεταβατικής ευστάθειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος καθορίζεται από την εσωτερική Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) των μηχανών του δικτύου, τις σύνθετες αντιστάσεις τους και τις σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των μηχανών και του σημείου βραχυκυκλώματος. Το ρεύμα μιας σύγχρονης μηχανής αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα και το ρεύμα μόνιμης κατάστασης διαφέρουν σημαντικά, λόγω της επίδρασης του ρεύματος του στάτη στη ροή. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος μεταβάλλεται σχετικά αργά από την αρχική του μέγιστη τιμή στη μικρότερη τιμή μόνιμης κατάστασης. Παρακάτω θα αναλύσουμε τους τύπους βραχυκυκλωμάτων καθώς και τα ρεύματα που προκαλούν τα σφάλματα αυτά.

Όταν συμβεί ένα βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες μια σύγχρονης μηχανής μεταξύ των οποίων επικρατεί μια τάση, εμφανίζεται ένα μεταβατικό φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου τα ρεύματα αποκτούν πολύ μεγάλες τιμές. Τη μέγιστη τιμή του ρεύματος μετά από ένα απότομο βραχυκύκλωμα μιας σύγχρονης μηχανής που είχε ονομαστική τάση στους ακροδέκτες της, ονομάζουμε κρουστικό ρεύμα βραχυκυκλώματος. Η τιμή αυτή εμφανίζεται όταν το βραχυκύκλωμα γίνει σε μια στιγμή, η οποία είναι η πλέον δυσμενής. Μετά από μερικά δευτερόλεπτα η μεταβατική κατάσταση τελειώνει και ακολουθεί η μόνιμη κατάσταση, όπου έχουμε το ρεύμα μόνιμης κατάστασης.

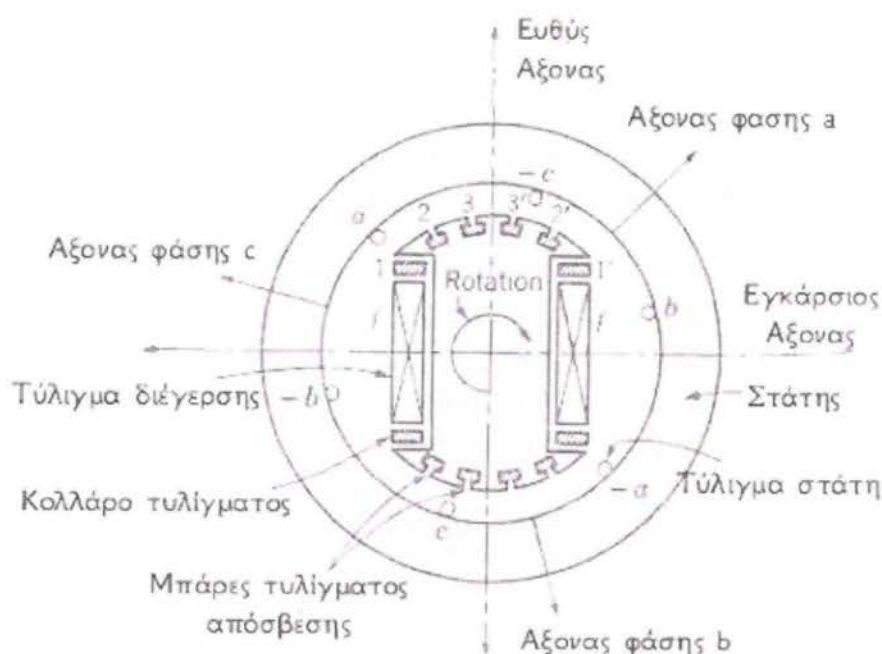
Η στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης μιας σύγχρονης γεννήτριας στους πρώτους κύκλους μετά την εκδήλωσή του είναι-όπως θα δούμε-πολύ μεγαλύτερη από την rms τιμή του μόνιμου ρεύματος βραχυκύκλωσης με την οποία ασχοληθήκαμε στο πείραμα βραχυκύκλωσης και από την οποία υπολογίζεται η σύγχρονη αντίδραση της μηχανής. Είναι σημαντικό να υπολογισθεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης και κατά τις πρώτες στιγμές της εκδήλωσής του, διότι η μεγάλη τιμή του καθορίζει τις δυνάμεις που ασκούνται στα τυλίγματα, στους ζυγούς, στα καλώδια και καθορίζει την διαστασιολόγησή τους. Επίσης, το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης καθορίζει την επιλογή των μέσων προστασίας (αυτόματοι διακόπτες, ρελαί, κλπ) τόσο της σύγχρονης μηχανής όσο και των άλλων στοιχείων του δικτύου.

Στην μηχανή μπορεί να συμβεί συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα ή ασύμμετρα βραχυκυκλώματα όπως είναι το μονοφασικό και το διφασικό. Στην αρχή θα εξετάσουμε, ποιοτικά και ποσοτικά, το τριφασικό βραχυκύκλωμα. Στην συνέχεια θα εξετασθούν τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα.

Την στιγμή που θα συμβεί ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες μιας σύγχρονης μηχανής, οι στιγμιαίες τιμές των τριών τάσεων, ακριβώς πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος, δεν είναι προφανώς ίσες μεταξύ τους.

Αποτέλεσμα αυτού είναι, τα τρία ρεύματα βραχυκύκλωσης στις αντίστοιχες φάσεις του στάτη, να διαφέρουν μεταξύ τους διότι προκαλούνται από διαφορετικές αρχικές τιμές τάσεων. Επειδή τα τρία ρεύματα του στάτη δεν δημιουργούν πλέον ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα, το συνιστάμενο πεδίο από τα ρεύματα αυτά δεν έχει πλέον σταθερό μέτρο αλλά μεταβάλλεται χρονικά. Συνέπεια αυτού είναι ότι ο δρομέας αντιλαμβάνεται πλέον μια χρονικά μεταβαλλόμενη ροή με αποτέλεσμα να επάγονται σε αυτόν τάσεις και ρεύματα τα οποία δεν υπήρχαν στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Σε μία μεταβατική κατάσταση, όπως το βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες μιας σύγχρονης μηχανής, διάφορα κυκλώματα, πέραν του κύριου κυκλώματος διέγερσης, που σχηματίζονται στο δρομέα δεν μπορούν να αγνοηθούν. Στο Σχ. 3.1 φαίνονται σχηματικά ορισμένα από αυτά τα κυκλώματα στον δρομέα μιας σύγχρονης γεννήτριας έκτυπων πόλων.



Σχ. 3.1 Κυκλώματα στο δρομέα σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων

Οι μπάρες 2-2' και 3-3' δημιουργούν τον κλωβό απόσβεσης στον ευθύ άξονα. Επίσης οι δακτύλιοι 1-1' γύρω από το κύριο τύλιγμα διέγερσης λειτουργούν σαν κλωβός απόσβεσης επίσης στον ευθύ άξονα .

Παρόμοια με τις μηχανές εκτύπων πόλων, και οι μηχανές με κυλινδρικό δρομέα μπορεί να κατασκευασθούν με επιπλέον τυλίγματα απόσβεσης στο δρομέα. Ειδικά στις μηχανές με κυλινδρικό δρομέα, ο σίδηρος του δρομέα που βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ των πόλων συμπεριφέρεται σαν τύλιγμα απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα (άξονας q).

Το κύριο τύλιγμα διέγερσης f-f (Σχ.3.1) διαρρέεται στη μεταβατική κατάσταση και από εναλλασσόμενο ρεύμα εκτός από το συνεχές που του επιβάλλει η εξωτερική dc πηγή. Οι κλωβοί απόσβεσης διαρρέονται επίσης από ρεύμα κατά την διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου.

Τα επαγόμενα στον δρομέα ρεύματα με την σειρά τους δημιουργούν επαγόμενες στον στάτη τάσεις και αλλάζουν τα ρεύματα του στάτη ανάλογα φυσικά και με το εξωτερικό κύκλωμα που είναι συνδεδεμένο σε αυτόν.

Έτσι σε μεταβατική κατάσταση την μηχανή πρέπει να την δούμε ως ένα σύνολο αμοιβαία συζευγμένων κυκλωμάτων όπου κάθε ένα κύκλωμα έχει την δική του αντίσταση και αυτεπαγωγή καθώς και μία αμοιβαία επαγωγή με κάθε ένα από τα υπόλοιπα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα.

Η ανάλυση του βραχυκυκλώματος γίνεται με την αναγωγή όλων των μεγεθών στο σύστημα dq0 διότι αρκετές μαθηματικές σχέσεις απλοποιούνται

όπως αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Ακόμη όμως και με τις ανωτέρω παραδοχές η τελική επίλυση των εξισώσεων είναι εφικτή μόνον με αριθμητικές μεθόδους μέσω υπολογιστή. Σήμερα υπάρχουν πολύ ακριβή μαθηματικά μοντέλα σύγχρονων μηχανών τα οποία επιβεβαιώνονται από τα πειραματικά αποτελέσματα.

Αμελώντας τις ωμικές αντιστάσεις και με την απουσία χωρητικότητων, η πεπλεγμένη μαγνητική ροή με ένα οποιοδήποτε κλειστό κύκλωμα του δρομέα πρέπει να μείνει σταθερή στην τιμή που είχε πριν την έναρξη του βραχυκυκλώματος. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι εάν η ροή άλλαζε, θα είχαμε εξ επαγωγής τάση στο κλειστό κύκλωμα, πράγμα που θα παραβίαζε των κανόνα του Kirchhoff.

Έτσι ένα βραχυκύκλωμα στον στάτη της μηχανής, το οποίο τείνει να αλλάξει την πεπλεγμένη μαγνητική ροή με ένα οποιοδήποτε κλειστό κύκλωμα του δρομέα, αντισταθμίζεται από την επαγωγή στο κλειστό κύκλωμα του δρομέα ενός ρεύματος, τέτοιου ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πεπλεγμένη ροή στην τιμή που είχε πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος.

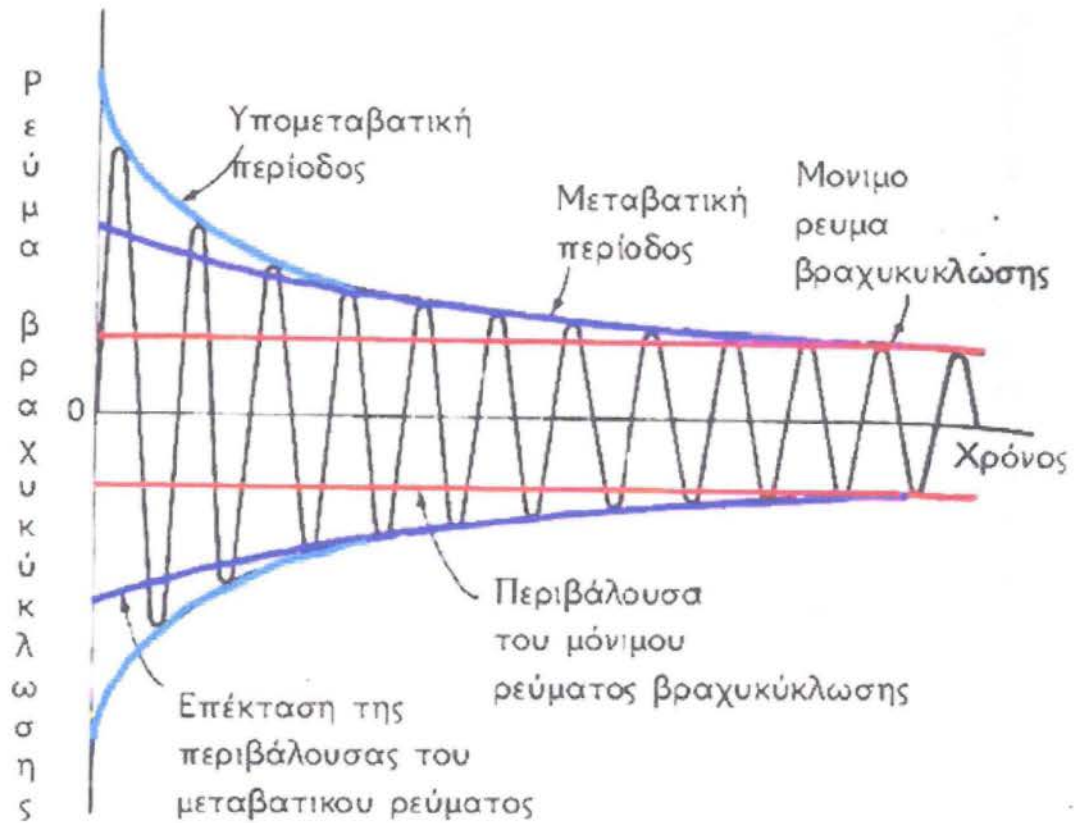
Ο υπολογισμός των ρευμάτων κατά την διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, ανάγεται στο να βρεθούν οι τιμές της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής πριν το μεταβατικό φαινόμενο. Εξισώνοντας την μαγνητική ροή μετά το μεταβατικό φαινόμενο με την ροή πριν το μεταβατικό φαινόμενο, μπορούν να βρεθούν τα ρεύματα.

Έτσι, οι αρχικές τιμές των ρευμάτων σε ένα μεταβατικό φαινόμενο υπολογίζονται θεωρώντας μία ομάδα επαγωγικών αντιδράσεων και μηδενικές αντιστάσεις ενώ ο ρυθμός απόσβεσης αυτών των αρχικών ρευμάτων καθορίζεται από χρονικές σταθερές που υπολογίζονται από τις ίδιες επαγωγικές αντιδράσεις αλλά και από τις αντιστάσεις των κυκλωμάτων. Με τον τρόπο αυτό οι αντιστάσεις εισέρχονται έμμεσα στους υπολογισμούς.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες μιας αφόρτιστης σύγχρονης γεννήτριας η οποία έχει στον δρομέα το κύριο τύλιγμα διέγερσης και ένα τύλιγμα απόσβεσης στον ευθύ (d) άξονα. Η κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε μια φάση θα μπορούσε να έχει την συμμετρική, ως προς τον άξονα του χρόνου, μορφή του Σχ.3.2. Θεωρούμε ότι η διέγερση της μηχανής, κατά την διάρκεια της εξέλιξης του βραχυκυκλώματος, διατηρείται σταθερή στην τιμή που είχε πριν την εκδήλωσή του.

Στο Σχ.3.2 μπορούμε να διακρίνουμε τις τρεις περιόδους κατά τις οποίες εξελίσσεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Κατά την πρώτη περίοδο,

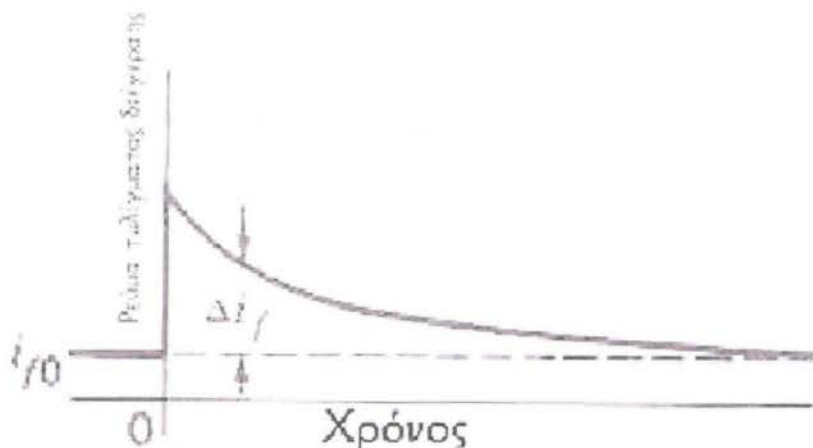
που ονομάζεται υπομεταβατική, και διαρκεί μερικούς κύκλους, το ρεύμα μειώνεται γρήγορα. Στην συνέχεια ακολουθεί η μεταβατική περίοδος η οποία διαρκεί σχετικά περισσότερο και το ρεύμα μειώνεται με μικρότερο ρυθμό. Τέλος έχουμε το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης το οποίο καθορίζεται από την σύγχρονη αντίδραση της μηχανής όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο για το πείραμα βραχυκύκλωσης.



Σχ.3.2 Συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης σε μια φάση μιας αρχικά αφόρτιστης σύγχρονης γεννήτριας.

Η πεπλεγμένη μαγνητική ροή με το κύκλωμα διέγερσης του δρομέα πρέπει να μείνει σταθερή και ίση με την τιμή της πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος. Αυτή η ροή καθορίζεται από την αυτεπαγωγή και το ρεύμα στον δρομέα αφού στον στάτη αρχικά δεν έχουμε ρεύμα επειδή η μηχανή θεωρείται αφόρτιστη.

Για να μείνει σταθερή αυτή η ροή, ενώ το ρεύμα του στάτη έχει αλλάξει μετά το βραχυκύκλωμα, θα πρέπει να επαχθεί στο τύλιγμα διέγερσης ένα επιπλέον ρεύμα. Το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης στον δρομέα μεγαλώνει έτσι ώστε να διατηρηθεί σταθερή η πεπλεγμένη με αυτό ροή όπως φαίνεται στο Σχ.3.3.



Σχ.3.3 Προσεγγιστική μορφή του ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης κατά το βραχυκύκλωμα. Πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος το ρεύμα ήταν i_0 .

Πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος, το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης ήταν i_0 . Με την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος στο χρόνο $t=0$, το ρεύμα πρέπει να αυξηθεί έτσι ώστε η πεπλεγμένη με τα τυλίγματα του στάτη ροή να μείνει ή ίδια όπως ακριβώς πριν το βραχυκύκλωμα.

Ο στάτης αντιλαμβάνεται το αυξημένο ρεύμα διέγερσης σαν επιπρόσθετη διέγερση με αποτέλεσμα η εσωτερική τάση που επάγεται στα τυλίγματα του στάτη να είναι μεγαλύτερη και επομένως και το ρεύμα των τυλιγμάτων του στάτη να είναι μεγαλύτερο. Αυτή η περίοδος είναι η μεταβατική. Το επιπρόσθετο ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης αποσβένεται με ρυθμό που καθορίζεται από την ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή του τυλίγματος του δρομέα. Με τον ίδιο ρυθμό αποσβένεται και το μεταβατικό ρεύμα στο στάτη (μπλε περιβάλλουσα στο Σχ.3.2).

Στον δρομέα και ειδικά στον ευθύ άξονα υπάρχει, όπως προαναφέρθηκε, και ένα τύλιγμα απόσβεσης. Η πεπλεγμένη με αυτό ροή πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος πρέπει να διατηρηθεί και την στιγμή ακριβώς μετά το βραχυκύκλωμα οπότε θα υπάρχει και ρεύμα στο στάτη (ο στάτης δεν έχει ρεύμα πριν το βραχυκύκλωμα). Για τον λόγο αυτό θα πρέπει στον κλωβό απόσβεσης να επαχθεί ρεύμα τέτοιο ώστε να διατηρηθεί ίδια η πεπλεγμένη μαγνητική ροή. Αυτό το ρεύμα, ο στάτης το αντιλαμβάνεται σαν επιπρόσθετη διέγερση με αποτέλεσμα να επάγεται σε αυτόν ακόμη μεγαλύτερη εσωτερική τάση και επομένως ρεύμα.

Αυτό είναι το ρεύμα της υπομεταβατικής περιόδου και είναι το μεγαλύτερο από τις τρεις περιόδους επειδή ο στάτης «βλέπει» τρία ρεύματα διέγερσης: το dc ρεύμα που υπήρχε και πριν το βραχυκύκλωμα, το ρεύμα που επάγεται στο κυρίως τύλιγμα διέγερσης και το ρεύμα που

επάγεται στον κλωβό απόσβεσης.

Το συμμετρικό, ως προς το χρόνο, ρεύμα βραχυκύκλωσης του Σχ.3.2 είναι μια ειδική περίπτωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ρεύματα των τριών φάσεων του στάτη παρουσιάζουν μία dc συνιστώσα όπως φαίνεται στο Σχ.3.4.



Σχ3.4 Ρεύματα βραχυκυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας για κάθε φάση, κατά την ανάπτυξη τριφασικού βραχυκυκλώματος.

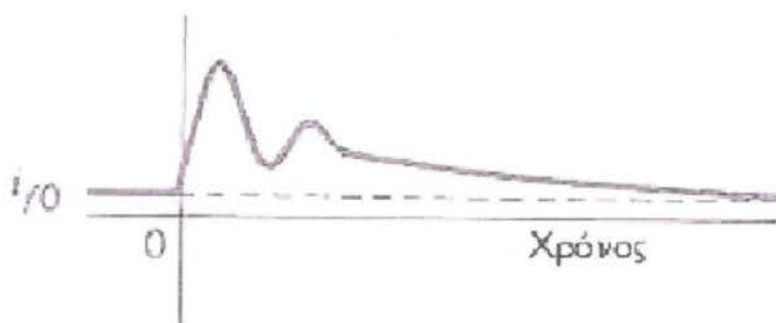
Η ύπαρξη της ddc συνιστώσας οφείλεται στην επαγωγική φύση της σύγχρονης γεννήτριας και εξηγείται πάλι με την αρχή της σταθερής πεπλεγμένης ροής για τα πηνία του στάτη.

Στην περίπτωση που η πεπλεγμένη ροή με μια φάση δεν είναι μηδέν την στιγμή του βραχυκυκλώματος, τότε πρέπει να αναπτυχθεί μια dc συνιστώσα στο ρεύμα για να διατηρήσει αυτήν την τιμή της ροής και μετά το βραχυκύκλωμα. Το μέγεθος της dc συνιστώσας εξαρτάται από την τιμή της

πεπλεγμένης ροής. Εάν η πεπλεγμένη ροή είναι μέγιστη την στιγμή του βραχυκυκλώματος, τότε η dc συνιστώσα γίνεται ίση με την μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την υπομεταβατική περίοδο.

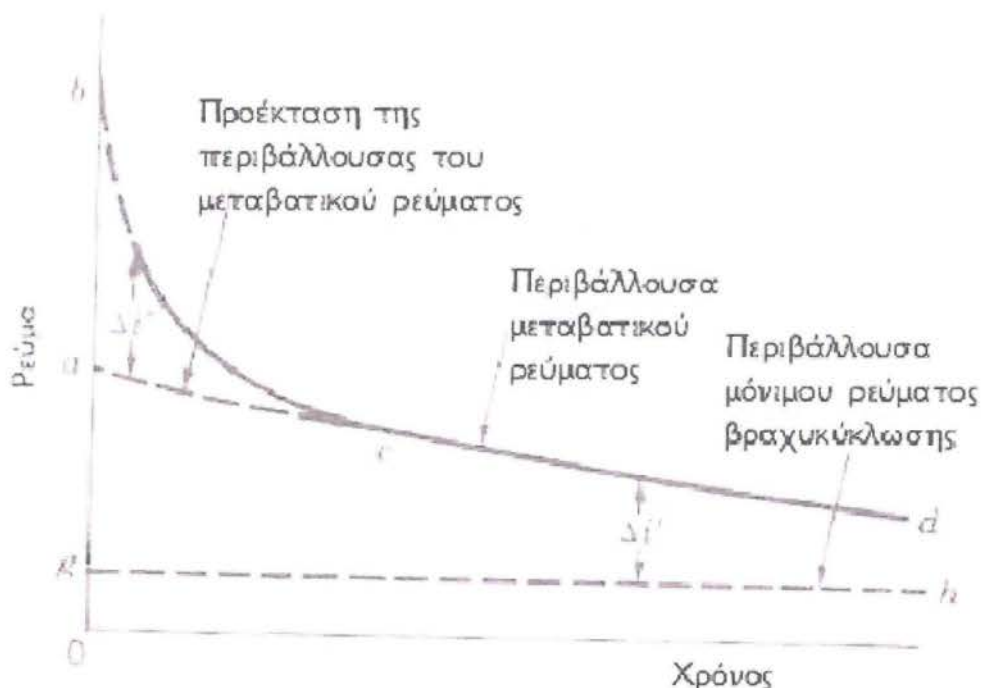
Η απόσβεση της dc συνιστώσας γίνεται με χρονική σταθερά που εξαρτάται από την αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και την αυτεπαγωγή τους. Η χρονική σταθερά (T_a) του στάτη ορίζεται σαν τον χρόνο που απαιτείται για να μειωθεί η τιμή της dc συνιστώσας στο $1/e$ της αρχικής της τιμής.

Η dc συνιστώσα του ρεύματος του στάτη δημιουργεί ένα σταθερό στον χώρο πεδίο το οποίο επάγει στον στρεφόμενο δρομέα ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στα 50Hz όπως φαίνεται στο Σχ.3.5. Επιπλέον, στο Σχ.3.5 παρατηρούμε ότι το ρεύμα δεν αλλάζει απότομα όπως είναι και φυσικό να συμβεί.



Σχ.3.5 Το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα στο στάτη.

Σύμφωνα με την προηγούμενη φυσική ερμηνεία, μπορούμε να περιγράψουμε την συμπεριφορά μιας αφόρτιστης ΣΜ σε βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της, με τρεις επαγωγικές αντιδράσεις και τρεις χρονικές σταθερές.



Σχ.3.6 Περιβάλλουσες ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Η μεταβατική σύγχρονη αντίδραση στον ευθύ άξονα (x'_d) ορίζεται έτσι ώστε να προσδιορίζει την αρχική τιμή I_0 της περιβάλλουσας του μεταβατικού ρεύματος (Σχ.3.6). Είναι ίση με την rms τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος δια $\sqrt{2}$. Ο συντελεστής $\sqrt{2}$ εμφανίζεται γιατί η acd περιβάλλει τις μέγιστες τιμές του ρεύματος. Εάν δηλαδή η ενεργός τιμή του εναλασσόμενου ρεύματος της γεννήτριας κατά την μεταβατική περίοδο ονομάζεται μεταβατικό ρεύμα (transient current) και συμβολίζεται με I' . Η μεταβατική αντίδραση ορίζεται με λόγο της τάσης που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας προς το μεταβατικό ρεύμα, από την εξίσωση

$$X' = \frac{E_f}{I'} \quad (3.1)$$

Η μεταβατική χρονική σταθερά (T'_d) ορίζεται από τον ρυθμό μείωσης της περιβάλλουσας acd . Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η περιβάλλουσα έτσι ώστε η διαφορά της ($\Delta i'$) με την περιβάλλουσα της μόνιμης κατάστασης να μειωθεί στο $1/e$ της αρχικής (I_0).

Η υπομεταβατική σύγχρονη αντίδραση στον ευθύ άξονα (x''_d) ορίζεται

έτσι ώστε να προσδιορίζει την αρχική τιμή O_b της περιβάλλουσας του υπομεταβατικού ρεύματος. Είναι ίση με την rms τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος δια $O_b/\sqrt{2}$. Ο συντελεστής $\sqrt{2}$ εμφανίζεται γιατί η bc περιβάλλει τις μέγιστες τιμές του ρεύματος. Εάν δηλαδή η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος της γεννήτριας κατά την υπομεταβατική περίοδο ονομάζεται υπομεταβατικό ρεύμα (subtransient current) και συμβολίζεται με I'' . Η υπομεταβατική αντίδραση ορίζεται με λόγο της τάσης που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας προς το υπομεταβατικό ρεύμα, από την εξίσωση

$$X'' = \frac{E_f}{I''} \quad (3.2)$$

Η υπομεταβατική χρονική σταθερά (T''_d) ορίζεται από τον ρυθμό μείωσης της περιβάλλουσας bc . Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να μειωθεί η περιβάλλουσα έτσι ώστε η διαφορά της ($\Delta i''$) με την περιβάλλουσα της μεταβατικής κατάστασης να μειωθεί στο $1/e$ της αρχικής (ab).

Οι αυτεπαγωγές που ορίστηκαν παραπάνω (x_d, x'_d, x''_d) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς απότομων μεταβολών φορτίου στα οποία συμπεριλαμβάνεται και το βραχυκύκλωμα. Αντίθετα, οι χρονικές σταθερές που προαναφέρθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων και όχι γενικά για απότομες μεταβολές φορτίου.

Εάν η μηχανή έχει φορτίο πριν την εμφάνιση ενός μεταβατικού φαινομένου, τότε συμμετέχει στο φαινόμενο και ο εγκάρσιος άξονας q . Αυτό συμβαίνει επειδή η ύπαρξη φορτίου συνεπάγεται ότι το I_q δεν είναι μηδέν και επομένως υπάρχει αρχικά πεπλεγμένη μαγνητική ροή και στον άξονα q . Και σε αυτήν την περίπτωση οι πεπλεγμένες ροές πρέπει να διατηρηθούν σταθερές πριν και μετά την διαταραχή.

Ορίζονται με αντίστοιχο τρόπο η υπομεταβατική επαγωγική αντίδραση (x''_q), η υπομεταβατική χρονική σταθερά T''_q , η μεταβατική επαγωγική αντίδραση (x'_q) και μεταβατική χρονική σταθερά T'_q .

Όπως είναι γνωστό στον εγκάρσιο άξονα δεν υπάρχει τύλιγμα διέγερσης. Υπάρχουν μόνον τυλίγματα απόσβεσης τα οποία δημιουργούνται είτε εσκεμμένα είτε προκύπτουν από τον τρόπο κατασκευής της μηχανής.

Σε ορισμένες μηχανές έκτυπων πόλων κατασκευάζεται εσκεμμένα κλωβός απόσβεσης στον άξονα q με μπάρες όπως και στον άξονα d . Σε αυτήν την περίπτωση τα επαγόμενα στον κλωβό ρεύματα έχουν υπομεταβατική συμπεριφορά (αποσβένονται πολύ γρήγορα) και για τον λόγο αυτό η

υπομεταβατική αντίδραση, x''_q είναι διακριτή ενώ η μεταβατική αντίδραση $x'_q = x_q$. Δηλαδή, ουσιαστικά, για τα φαινόμενα στον άξονα q μεταβαίνουμε από την υπομεταβατική κατεύθυνση στην μόνιμη κατάσταση χωρίς να μεσολαβεί η μεταβατική.

Στις μηχανές κυλινδρικού δρομέα ο σίδηρος του δρομέα που βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ των πόλων, δρα ως κύκλωμα στον q-άξονα. Σε αυτήν περίπτωση τα επαγόμενα στον κλωβό ρεύματα έχουν μεταβατική συμπεριφορά και για τον λόγο αυτό υπομεταβατική αντίδραση, $x''_q = x'_q$. Δηλαδή, ουσιαστικά, για τα φαινόμενα στον άξονα q δεν έχουμε υπομεταβατική κατάσταση.

3.1 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΕ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΧΡΟΝΟΥ.

Χρησιμοποιώντας την αρχή της σταθερής πεπλεγμένης ροής, μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις οι οποίες αντιστοιχούν στον ορισμό της μεταβατικής σύγχρονης αντίδρασης x'_d . Έτσι μπορεί να κατασκευασθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο περιγράφει την μηχανή στην μεταβατική κατάσταση.

Για να αναπαράγουμε τις συνθήκες που αντιστοιχούν στον συμβατικό ορισμό της x'_d , θα θεωρήσουμε –την υποθετική κατάσταση– όπου μία σύγχρονη μηχανή χωρίς φορτίο λειτουργεί σε ονομαστικές στροφές, με αρχικά μηδενικό ρεύμα διέγερσης και βραχυκυκλωμένο το τύλιγμα διέγερσης. Υποθέτουμε επίσης ότι στον άξονα d δεν υπάρχει κλωβός απόσβεσης. Τέλος θα θεωρήσουμε ότι επιβάλλεται απότομα ένα ρεύμα στον d-άξονα του στάτη. Σε αυτές τις συνθήκες μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση στο στάτη και διαιρώντας με το επιβαλλόμενο ρεύμα να προσδιορίσουμε την x'_d .

Η x'_d τελικά προκύπτει

$$x'_d = x_d - \frac{x_{\varphi d}^2}{x_{fl} + x_{\varphi d}} \quad (3.3)$$

Όπου x_{fl} είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα όταν αναφέρεται στο στάτη και $x_{\varphi d}$ είναι η αντίδραση μαγνήτισης στον άξονα d.

Μια άλλη έκφραση της x'_d είναι η ακόλουθη

$$x'_d = x_{al} + \frac{x_{\phi d} \cdot x_{fl}}{x_{fl} + x_{\phi d}} \quad (3.4)$$

Όπου x_{al} η αντίδραση σκέδασης του στάτη

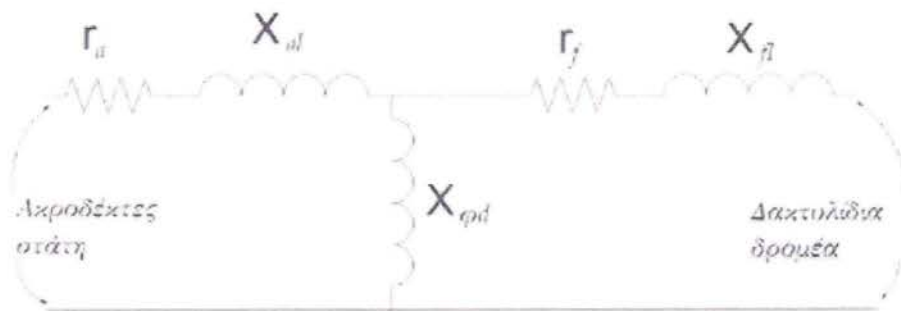
Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι η x'_d αποτελείται από την αντίδραση σκέδασης του στάτη συν την «τροποποιημένη» αντίδραση σκέδασης του δρομέα. Η (3.4) είναι η σχέση που συνήθως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της x'_d από τα στοιχεία σχεδιασμού της μηχανής.

Η rms τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης προκύπτει

$$I_d = \frac{E'_i}{x'_d} \quad (3.5)$$

από όπου φαίνεται ότι το ρεύμα βραχυκύκλωσης καθορίζεται όντως από την x'_d .

Από την (3.4) και το γεγονός ότι η σύγχρονη αντίδραση $x_d = x_{al} + x_{\phi d}$, μπορούμε να δούμε ότι το κύκλωμα του Σχ. 3.7 παριστάνει τόσο την x_d όσο και την x'_d .



Σχ.3.7 Ισοδύναμο κύκλωμα για την παράσταση των x_d , x'_d .

Όταν η μηχανή λειτουργεί με συμμετρικό φορτίο σε μόνιμη κατάσταση τα ρεύματα του στάτη δεν επιδρούν στον δρομέα και ο δρομέας φαίνεται από τον στάτη σαν ανοικτό κύκλωμα. Σε αυτήν την περίπτωση $x_d = x_{al} + x_{\phi d}$. Σε μεταβατική κατάσταση, τα ρεύματα του στάτη επάγουν ρεύματα στον δρομέα και αυτός φαίνεται σαν βραχυκυκλωμένος. Τότε η σύγχρονη αντίδραση είναι

ίση με την x_{ai} συν τον παράλληλο συνδυασμό $x_{fl}/x_{\varphi d}$ (τις ωμικές αντιστάσεις τις αμελούμε στις αρχικές καταστάσεις του βραχυκυκλώματος).

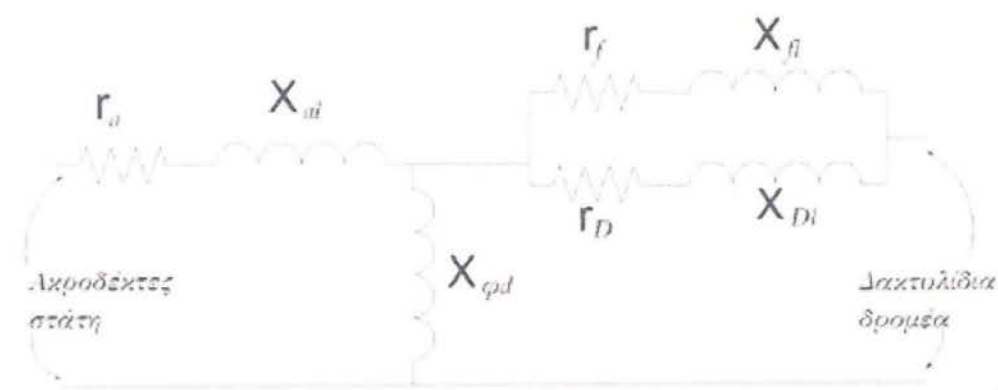
Η αντίστοιχη χρονική σταθερά δίνεται από τον τύπο

$$T'_d = T'_{d0} \frac{x'_d}{x_d} \quad (3.6)$$

όπου T'_{d0} η χρονική σταθερά ανοικτού κυκλώματος.

$$T'_{d0} = \frac{x_{fl} + x_{\varphi d}}{\omega r_f} \quad (3.7)$$

Η υπομεταβατική αντίδραση x_d'' και χρονική σταθερά T_d'' προσδιορίζονται από το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής (Σχ.3.8) στην υπομεταβατική φάση του βραχυκυκλώματος. r_D και x_{Dl} είναι η ωμική αντίσταση και αντίδραση σκέδασης αντίστοιχα του κλωβού στον άξονα d.



Σχ.3.8 Ισοδύναμο κύκλωμα για την παράσταση των x_d, x_d'' .

Στην υπομεταβατική φάση του βραχυκυκλώματος, ο στάτης και ο δρομέας είναι, ή φαίνονται, σαν βραχυκυκλωμένοι και η αντίδραση της μηχανής είναι η x_{ai} σε σειρά με τον παράλληλο συνδυασμό $x_{\varphi d}/x_{fl}/x_{Dl}$. Έτσι,

$$x_d'' = x_{ai} + \frac{1}{\frac{1}{x_{\varphi d}} + \frac{1}{x_{fl}} + \frac{1}{x_{Dl}}} \quad (3.8)$$

Η υπομεταβατική χρονική σταθερά T''_d δίνεται από τον τύπο

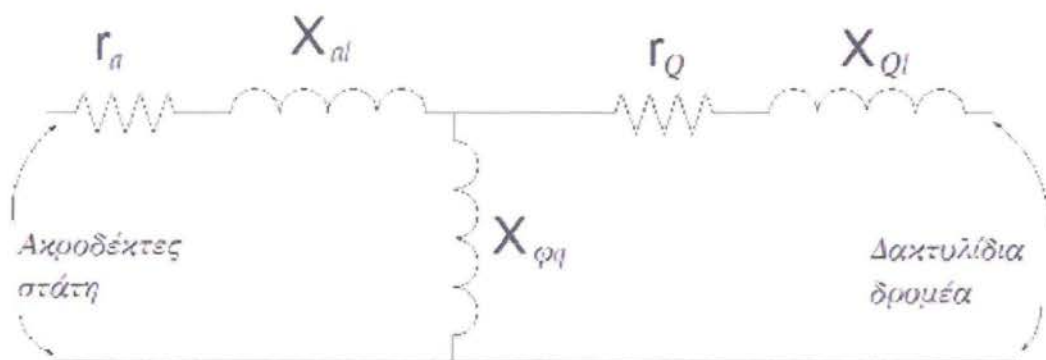
$$T''_d = \frac{x''_T}{\omega r_D} \quad (3.9)$$

όπου
$$x''_T = x_{Dl} + \frac{1}{\frac{1}{x_{\phi d}} + \frac{1}{x_{\phi l}} + \frac{1}{x_{al}}} \quad (3.10)$$

Η χρονική σταθερά T''_a του στάτη δίνεται από τον τύπο

$$T''_a = \frac{1}{\omega r_a} \frac{x''_d + x''_q}{2} \quad (3.11)$$

Η υπομεταβατική αντίδραση, x_q'' , της μηχανής μπορεί να προσδιορισθεί από το ισοδύναμο κύκλωμά της στον άξονα q, το οποίο φαίνεται στο Σχ.3.9 και είναι ανάλογο του ισοδύναμου κυκλώματος του Σχ.3.7 για τον άξονα d.



Σχ.3.9 Ισοδύναμο κύκλωμα για την παράσταση των x_q, x_q'' . r_Q και X_{Ql} είναι η ωμική αντίσταση και αντίδραση σκέδασης του κλωβού στον άξονα q.

Από το Σχ.3.9, η x_q'' είναι η x_{al} σε σειρά με τον παράλληλο συνδυασμό $x_{\varphi q} // x_{Ql}$, όπου x_{Ql} είναι η αντίδραση σκέδασης του κλωβού στον άξονα q.

Έτσι,

$$x_q'' = x_{al} + \frac{x_{\varphi q} \cdot x_{Ql}}{x_{Ql} + x_{\varphi q}} \quad (3.12)$$

Εάν γνωρίζουμε τις παραμέτρους $x_d, x_d', x_d'', T_d, T_d', T_d'', T_a$ μιας αρχικά αφόρτιστης μηχανής μπορούμε να προσδιορίσουμε την rms τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως εξής: Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από μια ac και μία dc συνιστώσα. Η ac συνιστώσα είναι ένα ημίτονο που φθίνει εκθετικά με την υπομεταβατική και μεταβατική χρονική σταθερά και καταλήγει στο μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η dc συνιστώσα-εφόσον υπάρχει- φθίνει εκθετικά με την T_a .

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν μπορούμε να εκφράσουμε την rms τιμή της ac συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης ως εξής:

$$I_{ac} = I_{ss} + (I' - I_{ss})e^{-t/T_d'} + (I'' - I')e^{-t/T_d''} \quad (3.13)$$

όπου

$$I_{ss} = \frac{E_f}{x_d} \quad \text{είναι το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης}$$

E_f είναι η τιμή της εσωτερικής τάσης πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος

$$I' = \frac{E_f}{x_d'} \quad \text{είναι το αρχικό μεταβατικό ρεύμα}$$

$$I'' = \frac{E_f}{x_d''} \quad \text{είναι το αρχικό υπομεταβατικό ρεύμα}$$

Είναι φανερό από την (3.13) ότι η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται με το χρόνο.

Εάν γνωρίζουμε την χρονική στιγμή στην οποία έγινε το βραχυκύκλωμα μπορούμε από την (3.13) να προσδιορίσουμε και την έκφραση για την dc συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Έτσι, εάν το βραχυκύκλωμα γίνεται την στιγμή $\omega t=0$, η dc (ή αλλιώς απεριοδική) συνιστώσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι

$$i_{ap}(t) = \frac{\sqrt{2}E_f}{x_d''} \cos \varphi \cdot e^{-t/T_a} \quad (3.14)$$

Η στιγμιαία τιμή του συνολικού ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι

$$i_{sc}(t) = \sqrt{2}E_f \cos(\omega t + \varphi) \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d}\right)e^{-t/T_d'} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'}\right)e^{-t/T_d''} \right] + \frac{\sqrt{2}E_f}{x_d''} \cos \varphi \cdot e^{-t/T_a} \quad (3.15)$$

Η αρχική τιμή του στιγμιαίου ρεύματος βρίσκεται από την (3.15) για $\omega t=0$. Η μέγιστη πιθανή βρίσκεται αν επιπλέον $\varphi=0^\circ$ και είναι

$$I_{kp} = \frac{2\sqrt{2}E_f}{x_d''} = 2\sqrt{2}I'' \quad (3.16)$$

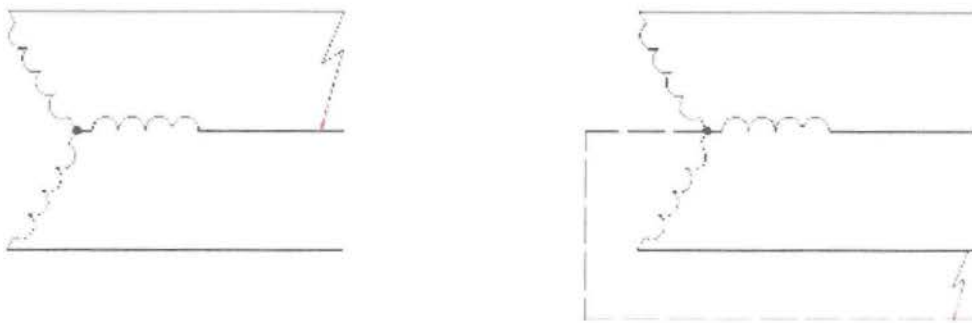
Αυτή η τιμή λέγεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και έχει σημασία γιατί προσδιορίζει τις μέγιστες δυνάμεις που θα ασκηθούν κατά το βραχυκύκλωμα. Επίσης καθορίζει την μηχανική ανοχή των ζυγών, των αυτόματων διακοπών και των ρελαί που συμμετέχουν στην προστασία των σύγχρονων μηχανών.

Η θερμική καταπόνηση των τυλιγμάτων, ζυγών, κλπ, κατά το βραχυκύκλωμα προσδιορίζεται από την rms τιμή του συνολικού ρεύματος βραχυκύκλωσης που είναι

$$I_{sc} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_{dc}^2} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_{ap}^2} \quad (3.17)$$

3.2 ΑΣΥΜΜΕΤΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Στην περίπτωση του μονοφασικού ή διφασικού βραχυκυκλώματος (Σχ.3.10) στους ακροδέκτες μιας σύγχρονης μηχανής, δεν δημιουργείται από τα ρεύματα του στάτη στρεφόμενο πεδίο αλλά μόνο τα στάσιμα πεδία της μιας ή των δύο φάσεων αντίστοιχα. Στην συνέχεια θα εξετάσουμε προσεγγιστικά το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης και θα το συγκρίνουμε με το αντίστοιχο του τριφασικού βραχυκυκλώματος για την ίδια διέγερση στην μηχανή. Θα θεωρήσουμε πάλι ότι πριν το βραχυκύκλωμα η μηχανή ήταν αφόρτιστη.



Στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα δημιουργείται ένα στάσιμο πεδίο από το ρεύμα της βραχυκυκλωμένης φάσης. Το πεδίο αυτό μπορεί να αναλυθεί σε δύο ίσου μεγέθους στρεφόμενα πεδία από τα οποία το ένα στρέφεται στην ίδια και το άλλο στην αντίθετη κατεύθυνση με τον δρομέα. Το μέτρο του καθενός από αυτά τα στρεφόμενα πεδία είναι το μισό του συνιστάμενου στάσιμου πεδίου. Για την ανάλυση του βραχυκυκλώματος κάνουμε την προσεγγιστική υπόθεση ότι το πεδίο του στάτη που στρέφεται με την ίδια φορά όπως ο δρομέας, εξισορροπεί ακριβώς το πεδίο του δρομέα.

Τελικά προκύπτει

$$I_{s1,1} = 3I_{s1,3} \quad (3.18)$$

όπου

$I_{s1,1}$: Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης στον στάτη κατά το μονοφασικό βραχυκύκλωμα

$I_{s1,3}$: Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης στον στάτη κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα

Δηλαδή το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα είναι τριπλάσιο του μόνιμου ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα.

Το πεδίο του στάτη που στρέφεται αντίθετα με το δρομέα έχει σχετική, με αυτόν, ταχύτητα ίση με δύο φορές την σύγχρονη ταχύτητα. Για τον λόγο αυτό επάγει στα κυκλώματα του δρομέα (στο κύριο τύλιγμα διέγερσης, στους κλωβούς απόσβεσης αλλά και στο σίδηρο του δρομέα) ρεύματα συχνότητας διπλάσιας από αυτήν των ρευμάτων του στάτη. Το πεδίο αυτών των ρευμάτων εξισορροπεί το αντίστροφα στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Πρέπει να τονισθεί ότι τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα έχουν σημαντικό μέγεθος λόγω της μεγάλης ολίσθησης ($s=2$) και για τον λόγο αυτό μπορεί να προκαλέσουν σημαντική υπερθέρμανση του δρομέα.

Κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα έχουμε το ίδιο ρεύμα στις δύο βραχυκυκλωμένες φάσεις ενώ η τρίτη φάση είναι εν κενώ. Τα πεδία των δύο βραχυκυκλωμένων φάσεων είναι, επομένως, ίσα αλλά διαφέρουν στο χώρο 120° .

Εάν $I_{1s,2}$ είναι το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα, τότε,

$$I_{1s,2} = \sqrt{3}I_{s1,3} \quad (3.19)$$

Έτσι, το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα είναι $\sqrt{3}$ φορές του αντίστοιχου τριφασικού βραχυκυκλώματος.

Η πρακτική σημασία του υπολογισμού των συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων είναι η ακόλουθη: Στο τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα έχουμε **και στις τρεις φάσεις** του στάτη μεγάλα αρχικά ρεύματα τα οποία προσδιορίζουν τις δυνάμεις που ασκούνται στα τυλίγματα, στους ζυγούς, κλπ κατά την υπομεταβατική και μεταβατική φάση του βραχυκυκλώματος. Υπενθυμίζεται ότι οι δυνάμεις είναι ανάλογες με το γινόμενο των ρευμάτων και επομένως είναι ιδιαίτερα μεγάλες επειδή και στις τρεις φάσεις έχουμε μεγάλα ρεύματα. Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μεγαλύτερο στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα και ιδιαίτερα στο μονοφασικό. Επομένως, τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα καθορίζουν την θερμική καταπόνηση της μηχανής και συνεπακόλουθα την αντοχή και ρύθμιση των μέσων προστασίας της (αυτόματοι διακόπτες, ρελέ, κλπ). Η αρχική τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στην περίπτωση των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων μπορεί να είναι εξίσου μεγάλη όπως

και στο συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα αλλά αυτό συμβαίνει μόνο σε μια ή δύο φάσεις και για τον λόγο αυτό δεν είναι καθοριστικό στον προσδιορισμό των δυνάμεων.

Όπως στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα έτσι και κατά την ασύμμετρη λειτουργία μιας σύγχρονης μηχανής αναπτύσσονται στο δρομέα ρεύματα στα 100Hz. Τα ρεύματα αυτά μπορεί να προκαλέσουν υπερθέρμανση του δρομέα (ανάπτυξη θερμότητας στην αντίσταση του κλωβού απόσβεσης και στα δακτυλίδια στις άκρες των πόλων). Για τον λόγο αυτό, οι κατασκευαστές προσδιορίζουν τον μέγιστο βαθμό ασύμμετρης φόρτισης μιας σύγχρονης μηχανής. Σε μεγάλες μηχανές εγκαθίστανται προστατευτικά ρελέ που ενεργοποιούνται από την αντίστροφη συνιστώσα των ρευμάτων και αποσυνδέουν την μηχανή.

Στην συνέχεια για καλύτερη κατανόηση των μεταβατικών φαινομένων θα παραθέσουμε ένα παράδειγμα για να δούμε τις κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη διάρκεια των τριών διαφορετικών περιπτώσεων βραχυκυκλωμάτων. Ενώ τέλος θα συγκρίνουμε τις διαφορετικές περιπτώσεις για να δούμε σε τι συμπεράσματα θα καταλήξουμε.

Παραδειγμα

Θα υπολογίσουμε τα ρεύματα βραχυκύκλωσης μιας σύγχρονης μηχανής, αρχικά αφόρτιστης, με ονομαστική ισχύ 2 MVA και ονομαστική τάση 690V. Η μηχανή έχει τα παρακάτω στοιχεία (σε παρένθεση οι τιμές σε $\mu\Omega$ με βάση τα ονομαστικά στοιχεία της μηχανής):

Ωμική αντίσταση στάτη: $r_a=2.04\text{m}\Omega$ (0,00855 $\mu\Omega$)

Ωμική αντίσταση τυλίγματος διέγερσης: $r_f=0.133\text{m}\Omega$ (0.00056 $\mu\Omega$)

Ωμική αντίσταση κλωβού στον άξονα d: $r_D=2.43\text{m}\Omega$ (0.01018 $\mu\Omega$)

Ωμική αντίσταση κλωβού στον άξονα q: $r_Q=2.43\text{m}\Omega$ (0.01018 $\mu\Omega$)

Αυτεπαγωγή σκέδασης στον στάτη: $L_{al}=0.139\text{mH}$ (0.1834 μH)

Αυτεπαγωγή σκέδασης του τυλίγματος διέγερσης: $L_{ff}=0.128\text{mH}$ (0.169 μH)

Αυτεπαγωγή σκέδασης του κλωβού στον άξονα d: $L_{Dl}=26.1\mu\text{H}$ (0.03438 μH)

Αυτεπαγωγή σκέδασης του κλωβού στον άξονα q: $L_{Ql}=0.714\text{mH}$ (0.943 μH)

Αυτεπαγωγή μαγνήτισης στο άξονα d: $L_{\phi d}=0.695\text{mH}$ (0.9166 μH)

Αυτεπαγωγή μαγνήτισης στο άξονα q: $L_{\phi q}=0.452\text{mH}$ (0.5958 μH)

Από τις παραπάνω τιμές μπορούμε να προσδιορίζουμε τις αντιδράσεις και χρονικές σταθερές της μηχανής στην υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμη κατάσταση βραχυκυκλώματος.

$$L_d = L_{al} + L_{\phi d} = 1.1 \text{ pu}$$

$$L_q = L_{al} + L_{\phi q} = 0.779 \text{ pu}$$

Από την (3.4) είναι $L'_d = 0,326 \text{ pu}$

Από την (3.8) είναι $L''_d = 0,211 \text{ pu}$

Από την (3.12) είναι $L''_q = 0,549 \text{ pu}$

Από την (3.7) είναι $T'_{d0} = 6,185 \text{ s}$ και από την (3.6) $T'_d = 1,833 \text{ s}$

Από τις (3.9) και (3.10) έχουμε $T''_d = 35.8 \text{ ms}$

Από την (3.11) είναι $T_a = 0,141 \text{ s}$.

Εάν το βραχυκύκλωμα συμβεί ενώ η τάση της μηχανής είναι $0,97 \text{ pu}$ (669.3 V_{rms} , πολική) τότε το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης (rms τιμή ή πλάτος) είναι,

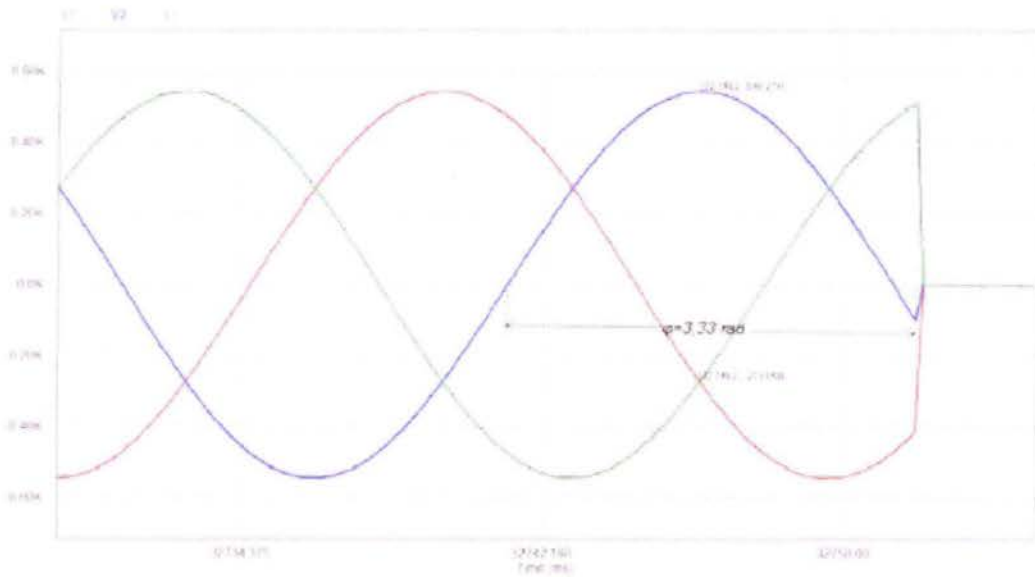
$$I_{ss} = \frac{V}{x_d} = \frac{0,97}{1,1} = 0,8815 \text{ pu}$$

Το μεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι $I' = \frac{V}{x'_d} = \frac{0,97}{0,326} = 2,974 \text{ pu}$

Το υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι $I'' = \frac{V}{x''_d} = \frac{0,97}{0,211} = 4,592 \text{ pu}$

Για τον προσδιορισμό της απεριοδικής συνιστώσας του ρεύματος βραχυκύκλωσης πρέπει να γνωρίζουμε την χρονική στιγμή που έγινε το βραχυκύκλωμα. Έστω, λοιπόν ότι το βραχυκύκλωμα έγινε 3.33 rad μετά τον θετικό μηδενισμό της τάσης της φάσης L2 όπως φαίνεται στο Σχ. Π3.1α. Το απεριοδικό ρεύμα της φάσης L2 θα δίνεται από την σχέση

(3.14) η οποία σε ρυθιά γίνει



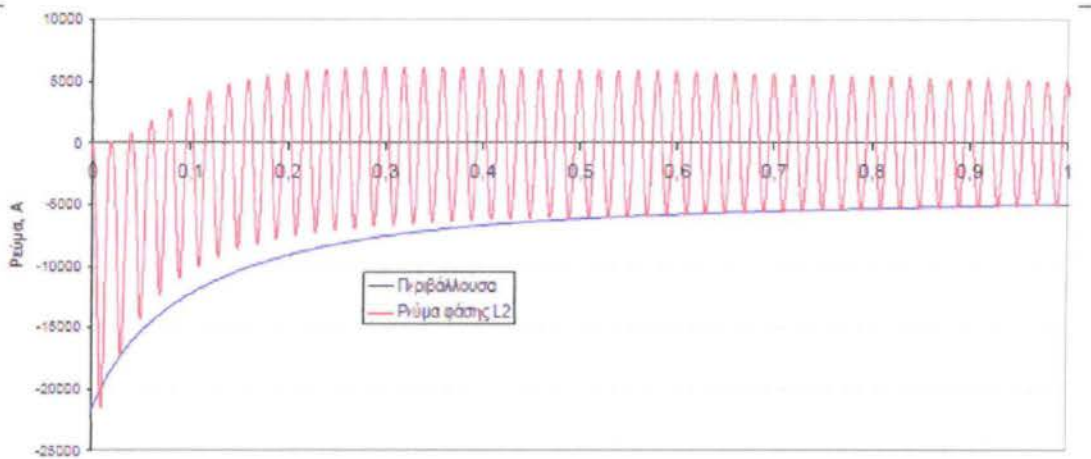
Σχ. Π1.1α Χρονική στιγμή που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα

$$i_{ap,L2}(t) = -\frac{0,97}{0,211} \cos(3,33rad) \cdot e^{-t/0,141}$$

Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει από το γεγονός ότι την στιγμή της βραχυκύκλωσης, η τάση L2 ήταν ήδη στον αρνητικό κύκλο της. Η περιβάλλουσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης της φάσης L2 υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση και την ac συνιστώσα της που δίνεται από την (3.15). Έτσι, η περιβάλλουσα είναι,

$$\begin{aligned} i_{sc,L2}(t) &= i_{ac,L2}(t) + i_{ap,L2}(t) = I_{ac} = -I_{ss} - (I' - I_{ss})e^{-t/T_d'} - (I'' - I')e^{-t/T_d''} + i_{ap,L2}(t) = \\ &= -0,8815 - (2,974 - 0,8815)e^{-t/1,833} - (4,592 - 2,974)e^{-t/0,0358} - \frac{0,97}{0,211} \cos(3,33rad) \cdot e^{-t/0,141} \end{aligned}$$

όπου το αρνητικό πρόσημο εμφανίζεται για τον λόγο που προαναφέρθηκε και για το γεγονός ότι η παραπάνω σχέση προσδιορίζει την κάτω περιβάλλουσα του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

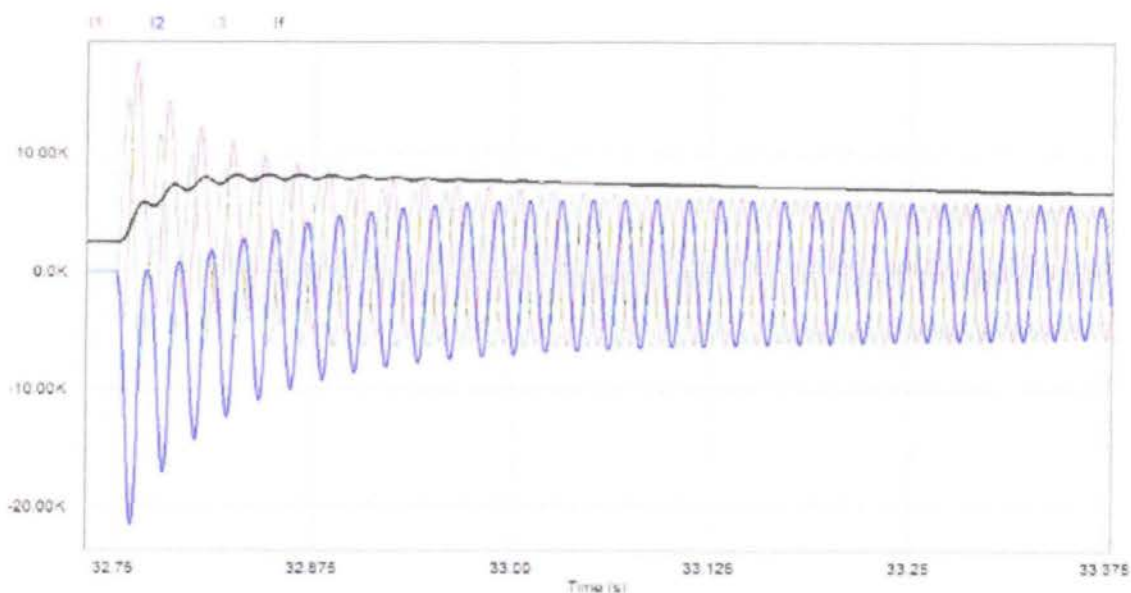


Σχ. Π3.1β Ρεύμα βραχυκύκλωσης στη φάση L2

Η διαφορά που παρατηρείται στην περιβάλλουσα στο χρονικό διάστημα 0-0,4s οφείλεται στην προσέγγιση στον υπολογισμό της T_a από την (3.11).

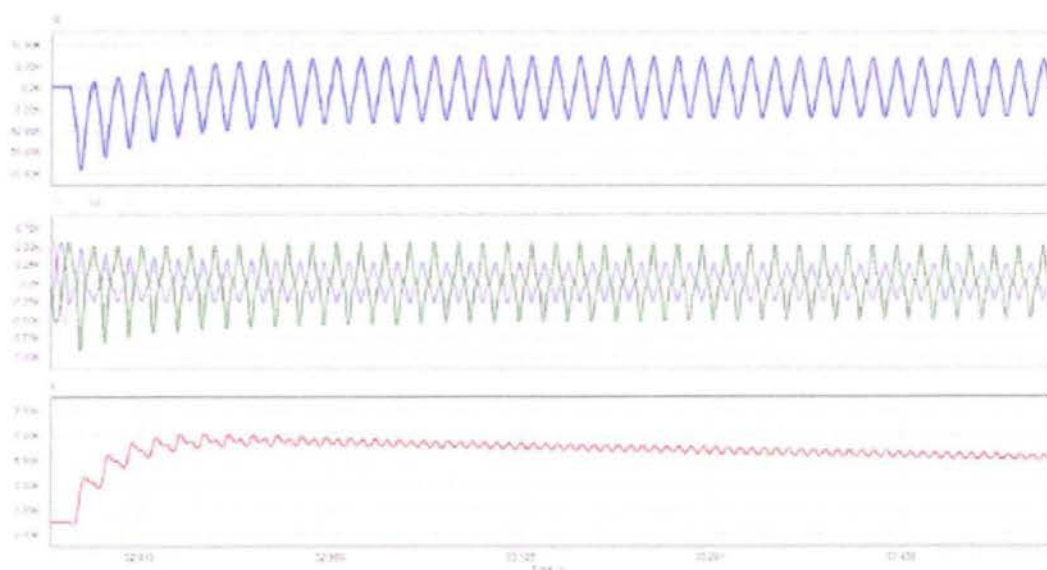
Επειδή την στιγμή της βραχυκύκλωσης της αρχικά αφόρτιστης μηχανής, η τάση της φάσης L2 ήταν περίπου μηδέν, η πεπλεγμένη με την φάση αυτή, μαγνητική ροή ήταν η μέγιστη (αρνητική μέγιστη) και για τον λόγο αυτό το ρεύμα βραχυκύκλωσης έχει την μέγιστη στιγμιαία τιμή του που προσδιορίζεται τόσο από την αρχική τιμή της περιβάλλουσας όσο και από την μέγιστη στιγμιαία τιμή.

Στο Σχ.Π3.1γ φαίνονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης και των τριών φάσεων όπου παρατηρούμε ότι η μέγιστη στιγμιαία τιμή των ρευμάτων στις φάσεις L1 και L3 είναι μικρότερη επειδή την στιγμή της βραχυκύκλωσης η πεπλεγμένη με τις φάσεις αυτές ροή δεν ήταν η μέγιστη. Επίσης φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος, I_r , στο τύλιγμα διέγερσης όπου παρατηρούμε και την επαγωγή εναλλασσόμενης συνιστώσας. Το μεταβατικό φαινόμενο θα εξαλειφθεί όταν το ρεύμα διέγερσης επανέλθει στην αρχική τιμή του. Το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται με την χρονική σταθερά T'_{d0} .



Σχ. Π3.1γ Ρεύματα βραχυκύκλωσης των τριών φάσεων. Ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης, I_e .

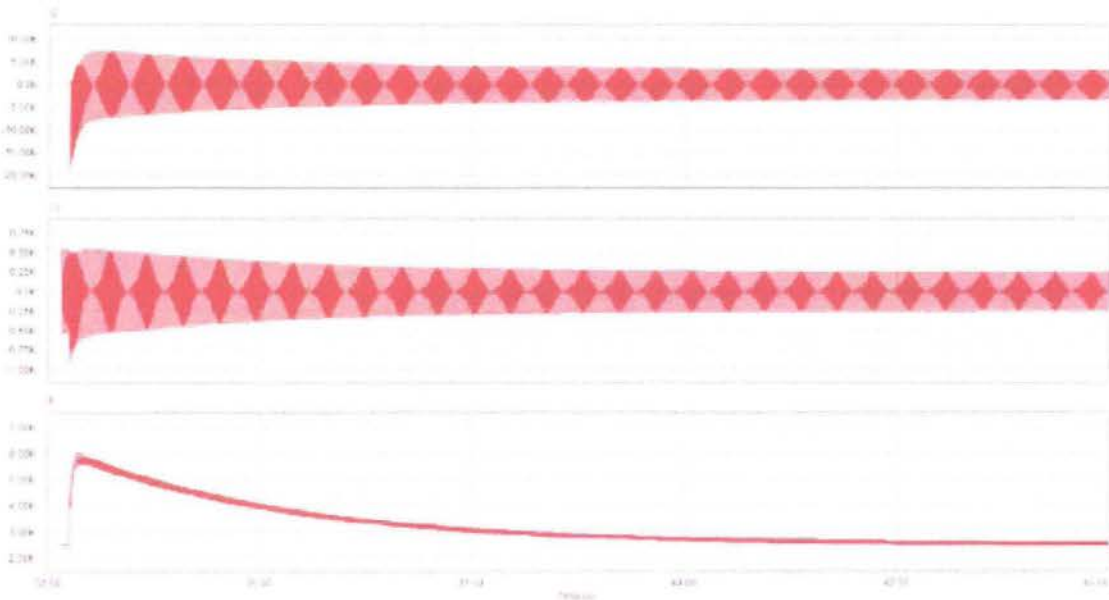
Ας υποθέσουμε τώρα ότι, αντί για τριφασικό, γίνεται βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσης L1 και L2 (χωρίς συμμετοχή της γης). Το βραχυκύκλωμα θεωρούμε ότι γίνεται την ίδια χρονική στιγμή όπως και στην περίπτωση του τριφασικού, δηλαδή $\varphi=3,33\text{rad}$ μετά τον θετικό μηδενισμό της τάσης L2. Στο Σχ. Π3.1δ βλέπουμε την αρχική μεταβολή του ρεύματος της φάσης L2 (της φάσης L1 είναι ίσο και αντίθετο ενώ της φάσης L3 είναι μηδέν), του ρεύματος διέγερσης και των τριών τάσεων του στάτη ως προς γη.



Σχ.Π3.1δ Ρεύμα της φάσης L2, του τυλιγματος διέγερσης και οι φασικές τάσεις κατά την διάρκεια διφασικού βραχυκυκλώματος.

Παρατηρούμε ότι το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι σχεδόν όσο και στο τριφασικό βραχυκύκλωμα μόνο που εδώ συμβαίνει στις δύο από τις τρεις φάσεις. Παρατηρούμε επίσης την εναλλασσόμενη συνιστώσα των 100Hz στο ρεύμα διέγερσης η οποία επάγεται λόγω του αντίστροφου συστήματος στο ρεύμα το στάτη. Μια σημαντική παρατήρηση είναι η σημαντική αύξηση της τάσης της φάσης L3 (της φάσης δηλαδή που δεν συμμετέχει στο βραχυκύκλωμα). Η αύξηση αυτή οφείλεται στην απότομη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης και επομένως της πεπλεγμένης με τη φάση αυτή μαγνητικής ροής του δρομέα. Η κοινή τάση των δύο βραχυκυκλωμένων φάσεων είναι μικρότερη από την αρχική τιμή τους λόγω της αντίδρασης του στάτη και του μεγάλου ρεύματος που διαρρέει αυτές της φάσεις.

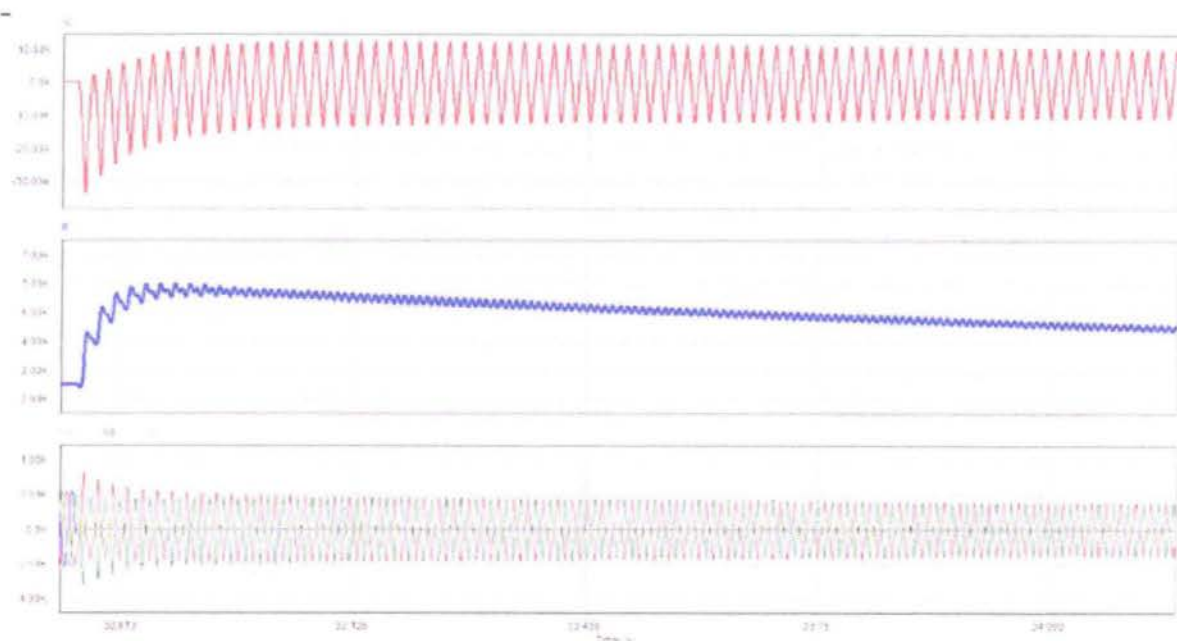
Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. Π3.1ε, μετά την εξάλειψη του μεταβατικού φαινομένου, είναι 2370 Arms(1.41pu). Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος ήταν 0,8815pu. Επομένως στο διφασικό βραχυκύκλωμα έχουμε $1.41/0,8815=1,6$ φορές μεγαλύτερο βραχυκύκλωμα. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την προσεγγιστική ανάλυση που κάναμε θα έπρεπε να είναι $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο.



Σχ.Π3.1ε Μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης στη φάση L2, και στο τύλιγμα διέγερσης. Η τάση της φάσεις L3 (που δεν συμμετέχει στο βραχυκύκλωμα)

Εάν υποθέσουμε τώρα ότι συμβαίνει μονοφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσης L2 και γης, την ίδια χρονική στιγμή όπως και στις προηγούμενες

περιπτώσεις, θα έχουμε τις μεταβολές του Σχ.Π3.1ζ



Σχ. Π3.1ζ Ρεύμα βραχυκύκλωσης της φάσης L2 και του τυλίγματος διέγερσης σε μονοφασικό βραχυκύκλωμα (L2-γη).Επίσης φαίνονται οι τρεις φασικές τάσεις.

Παρατηρούμε ότι το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι 33,36kA (14pu) δηλαδή σημαντικά μεγαλύτερο από ότι στο τριφασικό ή διφασικό βραχυκύκλωμα αλλά το ρεύμα υπάρχει μόνο σε μια φάση.Παρατηρούμε επίσης την συνιστώσα των 100Hz που επάγεται στο τύλιγμα διέγερσης λόγω του αντίστροφου συστήματος στο στάτη.Στην αρχική κατάσταση του μονοφασικού βραχυκυκλώματος βλέπουμε επίσης την σημαντική αύξηση της τάσης στις δύο μη βραχυκυκλωμένες φάσεις (L1 και L3) για τον λόγο που προαναφέρθηκε στο διφασικό βραχυκύκλωμα.

Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης μετά την εξάλειψη του μεταβατικού φαινομένου φαίνεται στο Σχ.Π3.1η και είναι 4097 Arms (2.45pu). Επομένως στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα έχουμε $2,45/0,8815=2,77$ φορές μεγαλύτερο ρεύμα σε σχέση με το τριφασικό βραχυκύκλωμα. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με την προσεγγιστική ανάλυση που κάναμε θα έπρεπε να είναι 3 φορές μεγαλύτερο.



Σχ.Π3.1η Μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης της φάσης L2 και του τυλίγματος διέγερσης. Επίσης φαίνεται η εξέλιξη των τριών φασικών τάσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μελετώντας την δυναμική ανάλυση των σύγχρονων μηχανών και ολοκληρώνοντας μια πλήρη θεωρητική περιγραφή των βραχυκυκλωμάτων που μπορούν να συμβούν σε αυτήν, οδηγούμαστε σε ορισμένα συμπεράσματα. Κατά τη δυναμική κατάσταση (κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος) αναπτύσσονται υπερβολικά μεγάλα ρεύματα που διαρρέουν τη μηχανή καταπονώντας τα συστήματα και προκαλώντας ενδεχομένως και τη ολική καταστροφή τους. Ο ακριβής υπολογισμός επομένως των ρευμάτων βραχυκύκλωσης των σύγχρονων μηχανών είναι σημαντικός καθώς καθορίζει τις δυνάμεις που ασκούνται στα τυλίγματα, στους ζυγούς, στα καλώδια και καθορίζει τη διαστασολόγησή τους. Παρ'όλα αυτά ο υπολογισμός του ρεύματος αυτού αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί την επίλυση πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων. Μέσα λοιπόν από τις χαρακτηριστικές παραμέτρους των μεταβατικών και υπομεταβατικών αντιδράσεων (και των σταθερών χρόνου) καθώς και μετά από κάποιες απλοποιήσεις, είδαμε μια θεωρητική προσέγγιση των ρευμάτων βραχυκυκλώματος. Αρχικά το ρεύμα βραχυκύκλωσης έχει πολύ μεγάλη τιμή ενώ μετά από μερικά δευτερόλεπτα η μεταβατική κατάσταση τελειώνει και οδηγούμαστε στο ρεύμα μόνιμης κατάστασης. Η κυματομορφή του ρεύματος τελικά μπορεί να διαιρεθεί προσεγγιστικά σε τρεις περιόδους. Η πρώτη περίοδος αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα ονομάζεται υπομεταβατική, όπου η στιγμιαία τιμή του ρεύματος μειώνεται πολύ γρήγορα. Στην συνέχεια έχουμε την μεταβατική περίοδο, το ρεύμα της γεννήτριας συνεχίζει τη μείωσή του, με μικρότερο όμως ρυθμό, μέχρι να οδηγηθεί στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Τότε, έχουμε το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης, το οποίο καθορίζεται από τη σύγχρονη αντίδραση της μηχανής. Τέλος, συγκρίνοντας τα τρία είδη βραχυκυκλώματος (τριφασικό, διφασικό, μονοφασικό) είδαμε μέσα από τους θεωρητικούς υπολογισμούς ότι το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα είναι τριπλάσιο του μόνιμου ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα. Ενώ, το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά το διφασικό βραχυκύκλωμα είναι $\sqrt{3}$ φορές του αντίστοιχου τριφασικού βραχυκυκλώματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen Umans, *Electric Machinery*, 6th edition, McGraw Hill, New York, 2003
- [2] St. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, fourth edition, McGraw-Hill, 2005.
- [3] Γ.Ξυπτερά, *Ηλεκτρικές Μηχανές, Τόμος II, Σύγχρονες Μηχανές*
- [4] Charles Hubert, *Electric Machines, Theory, Operation, Applications, Adjustment and Control*.
- [5] Ν.Α.Βοβός, *Ανάλυση Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, 2004.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

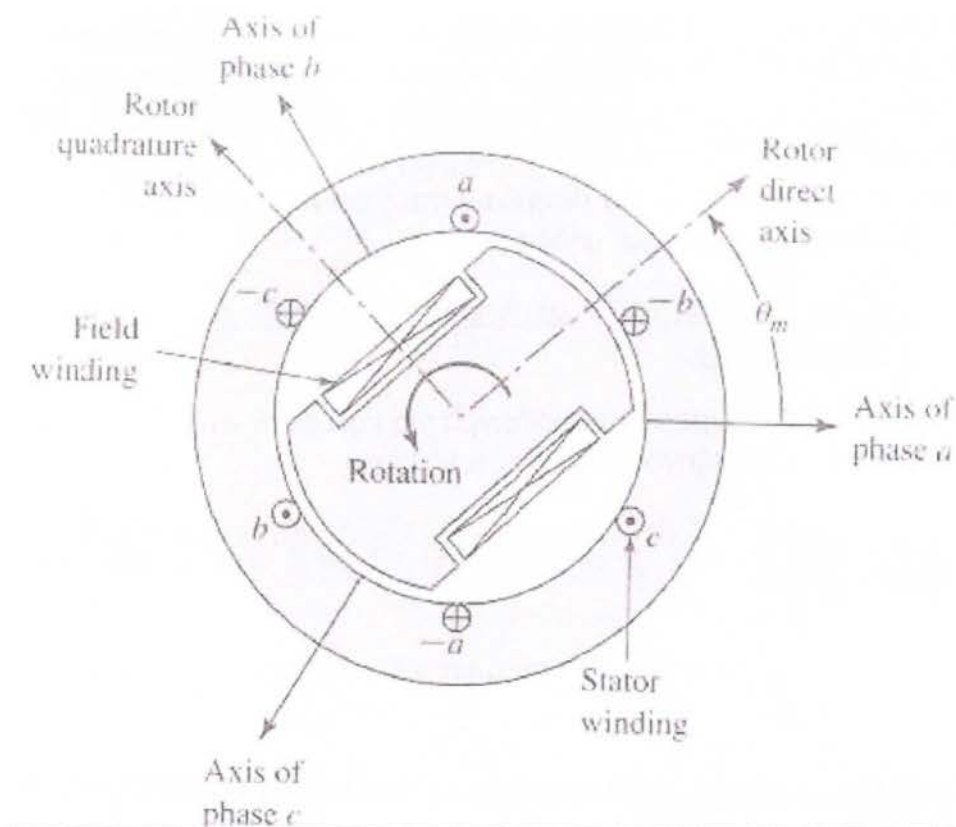
Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ dq0

Είδαμε ότι η ανάλυση των σύγχρονων μηχανών με έκτυπους πόλους έγινε πιο εύκολη με την ανάλυση των ρευμάτων και τάσεων του στάτη σε δύο άξονες: ο ένας άξονας είναι στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα (ευθύς άξονας, direct-axis) και ο άλλος είναι ο κάθετος σε αυτόν (εγκάρσιος άξονας, quadrature-axis). Η χρησιμότητα αυτής της ανάλυσης βασίζεται στο γεγονός ότι ενώ η αυτεπαγωγή του στάτη μεταβάλλεται με την θέση του δρομέα όταν αυτός είναι έκτυπος (και επομένως ασύμμετρος), οι μετασχηματισμένες ποσότητες του στάτη στους δύο άξονες του δρομέα περιστρέφονται με αυτόν και επομένως φαίνονται αμετάβλητες διότι οι μαγνητικοί δρόμοι φαίνονται επίσης αμετάβλητοι.

Γενικά η ανάλυση στους άξονες d,q, βρίσκει εφαρμογή και σε μεταβατικές καταστάσεις της σύγχρονης μηχανής (π.χ. βραχυκυκλώματα) διότι τότε, ακόμη και σε μηχανές με κυλινδρικό δρομέα, εμφανίζονται φαινόμενα εκτυπότητας, δηλαδή διαφορετικοί μαγνητικοί δρόμοι ανάλογα με την θέση του δρομέα.

Επίσης ο μετασχηματισμός dq0 εφαρμόζεται για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης των ΜΕΔ και μαγνητικών ροών του στάτη με τον δρομέα ανεξάρτητα από το εάν η μηχανή έχει έκτυπους πόλους ή όχι. Μετασχηματίζοντας τα μεγέθη του στάτη σε ένα σύστημα αξόνων το οποίο περιστρέφεται με τον δρομέα, τα μεγέθη αυτά φαίνονται ως σταθερά εάν η μηχανή βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Ο μετασχηματισμός βασίζεται στην ηλεκτρική γωνία θ_{me} μεταξύ των μαγνητικών αξόνων του δρομέα και της φάσης α του στάτη. Η γωνία αυτή είναι $\frac{P}{2}\theta_m$ όπου θ_m η μηχανική γωνία μεταξύ των προαναφερθέντων μαγνητικών αξόνων. Σε μια διπολική μηχανή όπως στο Σχ. Π.1, η ηλεκτρική και μηχανική ταυτίζονται.



Σχ. Π.1 Ιδανική σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους

Εάν S είναι ένα μέγεθος (τάση, ρεύμα, ροή) του στάτη, ο μετασχηματισμός του στο σύστημα dq0 δίνεται από την

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\Pi.1)$$

και ο αντίστροφος μετασχηματισμός

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me}) & 1 \\ \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta_{me} + 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} \quad (\Pi.2)$$

Η ποσότητα S_0 είναι η ομοπολική συνιστώσα του μετασχηματισμού και είναι αναγκαία για να επιτευχθεί ένας μονοσήμαντος μετασχηματισμός των τριών φασικών μεγεθών του στάτη. αντιστοιχεί σε συνιστώσες των ρευμάτων του στάτη που δεν παράγουν μαγνητική ροή στο διάκενο και επομένως δεν έχουν σύζευξη με τον δρομέα. Όπως φαίνεται από την (Π.1), σε περιπτώσεις συμμετρίας, η S_0 είναι μηδέν.

Πρέπει επίσης να τονισθεί ότι ο μετασχηματισμός dq0 εφαρμόζεται σε στιγμιαίες τιμές και όχι σε rms.

Στην συνέχεια παραθέτουμε ένα παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση του μετασχηματισμού ενώ τέλος εξηγούμε τα αποτελέσματα.

Παράδειγμα

Μια διπολική σύγχρονη μηχανή έχει συμμετρικά ρεύματα στον στάτη τα οποία έχουν την μορφή

$$i_a = \sqrt{2}I_a \cos \omega t \quad i_b = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t - 120^\circ) \quad i_c = \sqrt{2}I_a \cos(\omega t + 120^\circ)$$

Ο δρομέας στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα ω , και κατά την χρονική στιγμή $t=0$, ο μαγνητικός άξονάς του είναι ευθυγραμμισμένος με τον μαγνητικό άξονα της φάσης α . Να βρεθούν οι συνιστώσες των ρευμάτων του στάτη στους άξονες d, q.

Η γωνία μεταξύ του δρομέα και του μαγνητικού άξονα της φάσης α , σύμφωνα με τα δεδομένα, μπορεί να εκφρασθεί από την $\theta_{me} = \omega t$.

Από την Π.1 έχουμε

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_a \cos \omega t + i_b \cos(\omega t - 120^\circ) + i_c \cos(\omega t + 120^\circ)] = \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{2}I_a [\cos^2 \omega t + \cos^2(\omega t - 120^\circ) + \cos^2(\omega t + 120^\circ)] = \\ &= \sqrt{2}I_a \end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι το i_d είναι μια σταθερή ποσότητα ενώ τα i_a , i_b , i_c μεταβάλλονται χρονικά.

Παρόμοια,

$$\begin{aligned}i_q &= \frac{2}{3} \left[i_a \sin \omega t + i_b \sin(\omega t - 120^\circ) + i_c \sin(\omega t + 120^\circ) \right] = \\ &= -\frac{2}{3} \sqrt{2} I_a \left[\cos \omega t \sin \omega t + \cos(\omega t - 120^\circ) \sin(\omega t - 120^\circ) + \cos(\omega t + 120^\circ) \sin(\omega t + 120^\circ) \right] \\ &= 0\end{aligned}$$

Το αποτέλεσμα εξηγείται φυσικά ως εξής: Είναι γνωστό ότι τα τρία ρεύματα του στάτη-με την προϋπόθεση ότι είναι συμμετρικά-παράγουν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο στρέφεται με την σύγχρονη μηχανική ταχύτητα. Επειδή, στην συγκεκριμένη περίπτωση, η μηχανή είναι διπολική, η μηχανική και ηλεκτρική ταχύτητα περιστροφής ταυτίζονται. Έτσι το μαγνητικό πεδίο των ρευμάτων του στάτη στρέφεται με ταχύτητα, ω . Την χρονική στιγμή $t=0$ το ρεύμα της φάσης a είναι μέγιστο και επομένως το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο των τριών ρευμάτων βρίσκεται στον μαγνητικό άξονα της φάσης a . Την ίδια χρονική στιγμή θεωρήσαμε ότι ο δρομέας είναι επίσης ευθυγραμμισμένος με τον μαγνητικό άξονα της φάσης a . Επομένως το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο των ρευμάτων του στάτη είναι ευθυγραμμισμένο με τον δρομέα. Για τον λόγο αυτόν αναλύοντας τα ρεύματα του στάτη σε συνιστώσες $dq0$ προκύπτει ότι υπάρχει μόνο η συνιστώσα στον άξονα d ενώ $i_q=0$. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο των ρευμάτων του στάτη και ο δρομέας στρέφονται συγχρονισμένα με ταχύτητα ω . Άρα και κάθε χρονική στιγμή θα είναι $i_d = \sqrt{2} I_a$, $i_q=0$.

Π1.1 ΟΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ $dq0$.

Θα θεωρήσουμε μια ΣΜ με τρία τυλίγματα στο στάτη και ένα τύλιγμα (το τύλιγμα διέγερσης) στο δρομέα.

Οι σχέσεις ρευμάτων-πεπλεγμένων ροών σε μια σύγχρονη μηχανή, παρουσιάσθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά επαναλαμβάνονται και εδώ σε μορφή πίνακα.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{Π.3})$$

Οι αυτεπαγωγές και αμοιβαίες επαγωγές της μηχανής μπορούν τώρα να γραφούν συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας του δρομέα θ_{me} (είναι η γωνία μεταξύ των μαγνητικών αξόνων του δρομέα και της φάσης α του στάτη) ως εξής:

Οι αυτεπαγωγές του στάτη είναι

$$L_{aa} = L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cos 2\theta_{me} \quad (\text{Π.4})$$

$$L_{bb} = L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cos(2\theta_{me} + 120^\circ) \quad (\text{Π.5})$$

$$L_{cc} = L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cos(2\theta_{me} - 120^\circ) \quad (\text{Π.6})$$

Οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη είναι

$$L_{ab} = L_{ba} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta_{me} - 120^\circ) \quad (\text{Π.7})$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta_{me}) \quad (\text{Π.8})$$

$$L_{ac} = L_{ca} = -\frac{1}{2}L_{aa0} + L_{g2} \cos(2\theta_{me} + 120^\circ) \quad (\text{Π.9})$$

Η αυτεπαγωγή του τυλίγματος του δρομέα είναι

$$L_{ff} = L_{ff} \quad (\text{Π.10})$$

Οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ στάτη και δρομέα

$$L_{af} = L_{fa} = L_{af} \cos(\theta_{me}) \quad (\text{Π.11})$$

$$L_{bf} = L_{fb} = L_{af} \cos(\theta_{me} - 120^\circ) \quad (\text{Π.12})$$

$$L_{cf} = L_{fc} = L_{af} \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \quad (\text{Π.13})$$

Οι σχέσεις (Π.3) των πεπλεγμένων ροών γίνονται απλούστερες όταν μετασχηματισθούν στο σύστημα dq0. Ο μετασχηματισμός γίνεται εφαρμόζοντας την (Π.1) στις πεπλεγμένες ροές και στα ρεύματα της (Π.3). Μετά τους αλγεβρικούς υπολογισμούς (που είναι αρκετοί!) καταλήγουμε στις ακόλουθες σχέσεις:

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{af} i_f \quad (\text{Π.14})$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (\text{Π.15})$$

$$\lambda_f = \frac{3}{2} L_{af} i_d + L_{ff} i_f \quad (\text{Π.16})$$

$$\lambda_0 = L_0 i_0 \quad (\text{Π.17})$$

Όπου

$$L_d = L_{al} + \frac{3}{2} (L_{aa0} + L_{g2}) \quad (\text{Π.18})$$

$$L_q = L_{al} + \frac{3}{2} (L_{aa0} - L_{g2}) \quad (\text{Π.19})$$

$$L_0 = L_{al} \quad (\text{Π.20})$$

Οι αυτεπαγωγές L_d και L_q είναι οι αυτεπαγωγές της μηχανής στον ευθύ και εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα από τις οποίες προκύπτουν οι αντίστοιχες αντιδράσεις, X_d , X_q , τις οποίες είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η L_0

είναι η αντίδραση του στάτη της μηχανής στο ομοπολικό σύστημα.

Παρατηρούμε ότι οι αυτεπαγωγές των σχέσεων (Π.18)-(Π.20) δεν εξαρτώνται από την θέση του δρομέα. Επίσης και οι σχέσεις πεπλεγμένων ροών-ρευμάτων (Π.14)-(Π.17) δεν εξαρτώνται από την θέση του δρομέα. Αυτό είναι το πλεονέκτημα του μετασχηματισμού dq0 και για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται ευρέως.

Οι τάσεις (φασικές) στο στάτη και στο δρομέα σαν εκφράσεις της μεταβολής της πεπλεγμένης ροής δίνονται από τις

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (\text{Π.21})$$

$$v_b = R_a i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (\text{Π.22})$$

$$v_c = R_a i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (\text{Π.23})$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (\text{Π.24})$$

Ο μετασχηματισμός των σχέσεων αυτών στο σύστημα dq0 θα δώσει,

$$v_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{me} \lambda_q \quad (\text{Π.25})$$

$$v_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_{me} \lambda_d \quad (\text{Π.26})$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (\text{Π.27})$$

$$v_0 = R_a i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (\text{Π.28})$$

$$\text{με } \omega_{me} = d\theta_{me}/dt$$

Στις σχέσεις (Π.25),(Π.26) οι όροι $\omega_{me} \lambda_q$ και $\omega_{me} \lambda_d$ αντιστοιχούν στην λεγόμενη τάση λόγω ταχύτητας (speed voltage) και αντιπροσωπεύουν την επαγωγή τάσης στο στάτη λόγω της περιστροφής του δρομέα.

Κατά την χρήση των ανωτέρω εξισώσεων πρέπει να δίνεται προσοχή στα πρόσημα των τάσεων και ρευμάτων. Οι σχέσεις που αναφέρθηκαν εδώ αντιστοιχούν σε σύμβαση σύγχρονου κινητήρα, δηλαδή θεωρούμε ότι το ρεύμα του στάτη είναι θετικό όταν ρέει προς την μηχανή.

Για το πλήρες μοντέλο της σύγχρονης μηχανής πρέπει να βρούμε εκφράσεις για την ισχύ και την ροπή. Η στιγμιαία ισχύς στους ακροδέκτες της μηχανής δίνεται από την σχέση,

$$P_s = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{Π.29})$$

η οποία στο σύστημα dq0 μετασχηματίζεται στην,

$$P_s = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad (\text{Π.30})$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή προκύπτει από την ισχύ και από την μηχανική ταχύτητα.

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{\omega} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (\text{Π.31})$$

Από την (Π.31) βλέπουμε ότι η ροπή παράγεται από την υπέρθεση της αλληλεπίδρασης των εξής συνιστωσών: η ροή στον ευθύ άξονα παράγει ροπή μέσω της αλληλεπίδρασής της με το ρεύμα (και επομένως την ΜΕΔ) στον εγκάρσιο άξονα, ενώ η ροή στον εγκάρσιο άξονα παράγει ροπή μέσω της αλληλεπίδρασής της με το ρεύμα στον ευθύ άξονα.

Θεωρώντας την σύμβαση κινητήρα όπως προαναφέρθηκε, η ροπή της σχέσης (Π.31) δρα ως επιταχύνουσα για τον δρομέα. Εάν επιλέγαμε σύμβαση γεννήτριας η ροπή θα δρούσε ως επιβραδύνουσα για τον δρομέα.

