

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ»

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ ΛΑΠΠΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ιωάννης Προυσαλίδης
Επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι παρούσες σε κάθε πλοίο, από την τροφοδότηση συστημάτων επικοινωνίας, δικτύων ασφαλείας, συστημάτων πλοήγησης και φυσικά των εγκαταστάσεων στους χώρους ενδιαιτήσης. Επίσης κινούν αντλίες, ανεμιστήρες, βίτσια ρυμούλκησης μέχρι και ολόκληρο το πλοίο σε σύγχρονα πλοία υψηλής τεχνολογίας. Συνιστούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια διαφορά μεταξύ ναυτιλιακών ηλεκτρικών συστημάτων και επίγειων, είναι η μικρή διαδρομή μεταξύ του σημείου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και καταναλωτών. Υψηλά φορτία σε μικρής έκτασης δίκτυο επιβάλλουν ειδικές προκλήσεις ασφαλείας για ένα μηχανικό.

Μέχρι το 1940 οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις σε ένα πλοίο ήταν συνεχούς ρεύματος με τάση 110 V ή 220 V. Σήμερα είναι εναλλασσομένου ρεύματος και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα. Στις μέρες μας η συχνότητα και η τάση στα πιο διαδεδομένα συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος είναι 60Hz/440V, 60Hz/110V. Όσον αφορά τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος, υπάρχουν δύο ή τρεις αγωγοί με το μεσαίο αγωγό μονωμένο. Τα δίκτυα μονοφασικού εναλλασσομένου έχουν δύο αγωγούς, ενώ τα δίκτυα τριφασικού εναλλασσομένου έχουν τρεις ή τέσσερις αγωγούς με τον ουδέτερο αγωγό γειωμένο. Οι εγκαταστάσεις εναλλασσομένου ρεύματος έχουν μικρότερο βάρος, κόστος και αξιοπιστία σε σχέση με τις εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος. Είναι όμως πιο επικίνδυνες καθώς το εναλλασσόμενο ρεύμα, ειδικά σε υψηλές συχνότητες, όπου γίνεται θανατηφόρο από τα 60 V, σε σχέση με το συνεχές που ακόμη και στα 220 V δεν είναι θανατηφόρο.

Οι κύριες γεννήτριες πρέπει να αποδίδουν ισχύ που να μπορεί να καλύπτει όλα τα φορτία του πλοίου στη δυσμενέστερη περίπτωση. Για λόγους ασφαλείας ένα καράβι έχει δύο κύριες ηλεκτρογεννήτριες στο μηχανοστάσιο και μία ασφαλείας εκτός μηχανοστασίου, η οποία συνήθως κινείται από έναν πετρελαιοκινητήρα (κινητήρα diesel).

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	σελ 6
Κεφάλαιο 1: Βασικές έννοιες πάνω στις σύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενης τάσης	σελ 8
1.1: Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία	σελ 8
1.2: Αρχή λειτουργίας μηχανών εναλλασσόμενης τάσης	σελ 8
1.2.1: Εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας	σελ 8
1.2.2: Επαγωγή περιστρεφόμενων μαγνητικών πεδίων	σελ 14
1.3: Σύγχρονη ταχύτητα	σελ 16
1.4: Επαγωγή τριφασικής τάσης στο στάτη	σελ 21
1.5: Επαγόμενη ροπή σε βρόχο που διαρρέεται από ρεύμα	σελ 22
Κεφάλαιο 2: Σύγχρονοι κινητήρες	σελ 27
2.1: Εισαγωγή	σελ 27
2.2: Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα	σελ 28
2.3: Φορτίο άξονα και γωνία ροπής	σελ 28
2.4: Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ) και τάση αντίδρασης οπλισμού	σελ 30
2.5: Ισοδύναμο κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα	σελ 32
2.6: Εξίσωση ισχύος σύγχρονου κινητήρα	σελ 35
2.7: Σύγχρονος κινητήρας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας	σελ 36
2.8: Επίδραση των μεταβολών του ρεύματος διέγερσης σε έναν σύγχρονο κινητήρα	σελ 38
Κεφάλαιο 3: Σύγχρονη γεννήτρια	σελ 41
3.1: Αρχή λειτουργίας	σελ 41
3.2: Μετάβαση από κινητήρα σε γεννήτρια	σελ 42
3.3: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας	σελ 45
3.4: Εξίσωση ισχύος σύγχρονης γεννήτριας	σελ 46
3.5: Φορτίο-συντελεστής ισχύος	σελ 47

Κεφάλαιο 4: Παραλληλισμός γεννητριών	σελ 48
4.1: Γενικές αρχές.	σελ 48
4.2: Διαδικασία παραλληλισμού	σελ 48
4.3: Καμπύλες συχνότητας –ισχύος και πολικής τάσης-άεργης ισχύος	σελ 50
4.4: Μεταβίβαση ισχύος μεταξύ παραλληλισμένων γεννητριών	σελ 53
4.5: Συμπέρασμα	σελ 56
Κεφάλαιο 5: Βασικές αρχές επαγωγικών κινητήρων	σελ 57
5.1: Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα με τύλιγμα απόσβεσης	σελ 57
5.2: Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός επαγωγικού κινητήρα	σελ 58
Κεφάλαιο 6: Πείραμα	σελ 62
6.1: Σκοπός του πειράματος	σελ 62
6.2: Περιγραφή εξοπλισμού	σελ 62
6.3: Διάταξη παραλληλισμού	σελ 67
6.4 Περιγραφή πειράματος	σελ 68
6.4.1: Περιγραφή διαδικασίας	σελ 68
6.4.2: Παρουσίαση αποτελεσμάτων κι ανάλυσή τους	σελ 71
6.4.2.1: Η χρονική περίοδος πριν το παραλληλισμό	σελ 72
6.4.2.2: Η χρονική περίοδος κατά τον παραλληλισμό	σελ 75
6.4.2.3: Η χρονική περίοδος μετά την παύση του επαγωγικού κινητήρα	σελ 79
Βιβλιογραφία	σελ 85

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ηλεκτρικές μηχανές καλούνται οι συσκευές που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Μια τέτοια συσκευή όταν χρησιμοποιείται για την μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ονομάζεται γεννήτρια ενώ όταν μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας. Έτσι επειδή οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή μπορεί να μετατρέψει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις, είναι δυνατόν κάθε τέτοια μηχανή να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Οι δύο βασικές κατηγορίες που χωρίζονται οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι οι σύγχρονες μηχανές και οι επαγωγικές μηχανές. Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος, ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών γεννητριών και κινητήρων παράγεται επαγωγικά στα τυλίγματα διέγερσής τους.

Στα πλαίσια της διπλωματικής, θα πραγματοποιηθεί εργαστηριακή άσκηση με αντικείμενο μελέτης τις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος μιας και είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος που συναντάται στη ναυτιλία. Ειδικότερα, θα πραγματοποιηθεί παράλληλη σύνδεση δύο γεννητριών και στη συνέχεια θα αποσυνδεθεί ο επαγωγικός κινητήρας που κινεί τη μία από τις δύο, οπότε και θα παρατηρηθεί το φαινόμενο αντιστροφής λειτουργίας της. Καθώς θα συντηρείται η λειτουργία της από την άλλη γεννήτρια που είναι παραλληλισμένη, χωρίς τη παροχή μηχανικής ενέργειας από τον κινητήρα, η συσκευή θα μετατρέπει πλέον ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Θα τελεί λειτουργία κινητήρα.

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής δίδεται το θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από τη λειτουργία των σύγχρονων μηχανών και της διαδικασίας παραλληλισμού τους. Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας αφιερώνεται στη βασική θεωρία πίσω από την λειτουργία των σύγχρονων μηχανών ενώ στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα χαρακτηριστικά σύγχρονων κινητήρων και σύγχρονων γεννητριών εκατέρωθεν. Στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία παραλληλισμού δύο σύγχρονων γεννητριών.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής καταγράφεται πλήρως το πείραμα. Θα πραγματοποιηθεί η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, θα γίνει αναφορά στα χαρακτηριστικά και το ρόλο κάθε επιμέρους στοιχείου του τεχνικού εξοπλισμού και τέλος παράθεση, ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 1 Βασικές έννοιες πάνω στις σύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενης τάσης

1.1 Βασικά κατασκευαστικά στοιχεία.

Δρομέας(ρότορας). Το στρεφόμενο τμήμα στο εσωτερικό μιας ηλεκτρικής μηχανής. Καλείται και οπλισμός ή τύμπανο της μηχανής.

Στάτης ή στάτορας. Είναι το εξωτερικό περίβλημα της μηχανής και η στήριξη των πόλων και των τυλιγμάτων διέγερσης, αλλά και τμήμα του μαγνητικού κυκλώματος καθώς φέρει το επονομαζόμενο τύλιγμα οπλισμού, ή τύλιγμα τυμπάνου, ή επαγωγικό τύλιγμα.

Πόλοι. Κατασκευαστικά κομμάτια του δρομέα. Είναι σχεδιασμένοι ώστε να προκαλούν τη μέγιστη δυνατή ροή στο τύλιγμα οπλισμού του στάτη. Κάθε πόλος αποτελείται από τον πυρήνα και το πέδιλο. Ο πυρήνας περιβάλλεται από το τύλιγμα διέγερσης, το οποίο είναι τοποθετημένο έτσι ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά βόρειος και νότιος πόλος.

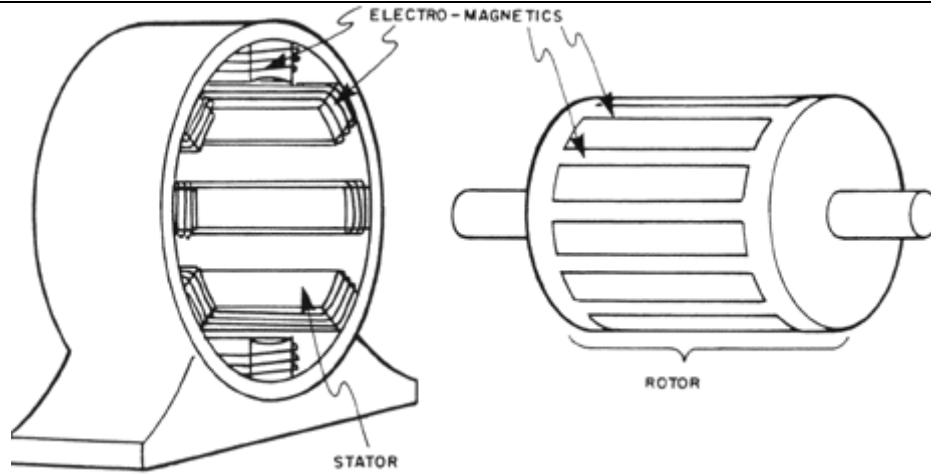
Συλλέκτης. Ο συλλέκτης συνίσταται από ένα κύλινδρο, στην περιφέρεια του οποίου υπάρχουν σφηνοειδείς τομείς από χαλκό, μονωμένους μεταξύ τους.

Ψήκτρες. Κατασκευάζονται από μαλακό άνθρακα και επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν χαμηλή τριβή. Οι ψήκτρες τοποθετούνται στη περιφέρεια του συλλέκτη.

1.2 Αρχή λειτουργίας μηχανών εναλλασσόμενης τάσης

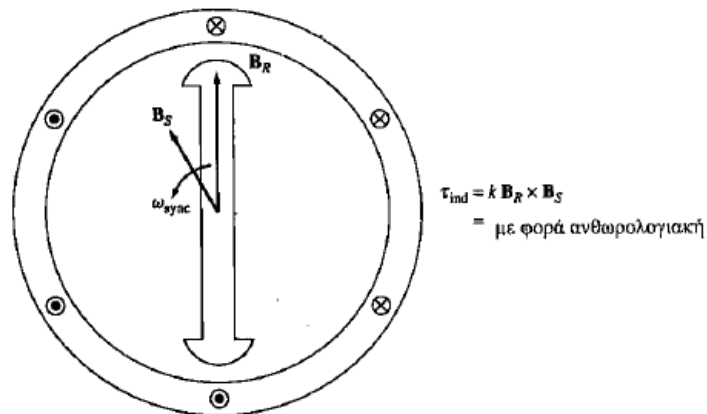
1.2.1 Εισαγωγή στις αρχές λειτουργίας.

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος είναι κινητήρες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική και γεννήτριες που μετατρέπουν την κινητική σε ηλεκτρική. Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ γεννήτριας και κινητήρα είναι η κατεύθυνση στη ροή μετατροπής ενέργειας. Συχνά χρησιμοποιείται η ίδια διάταξη και για τις δύο περιπτώσεις καθώς με αναστροφή της ροής της ενέργειας η γεννήτρια μετατρέπεται σε κινητήρα.



Σήμα 1.1 Απλοποιημένο μοντέλο, μιας ηλεκτρικής μηχανής.

Ασχέτως από τη ροή της ενέργειας, η λειτουργία όλων των εναλλασσόμενων ή αλλιώς, τύπου AC ηλεκτρικών μηχανών στηρίζεται στην αλληλεπίδραση δύο περιστρεφόμενων μαγνητικών πεδίων. Του μαγνητικού πεδίου B_S που επάγεται από τη τροφοδότηση του κυκλώματος του στάτη, του τυλίγματος οπλισμού, με τριφασική εναλλασσόμενη τάση, και του μαγνητικού πεδίου B_R που επάγεται από την περιστροφή του δρομέα καθώς το κύκλωμά του, το τύλιγμα διέγερσης, τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης.



Σήμα 1.2 Απεικόνιση των δύο μαγνητικών επαγωγών και της ροπής που επάγουν. B_R η μαγνητική επαγωγή του δρομέα, B_S η μαγνητική επαγωγή του στάτη.

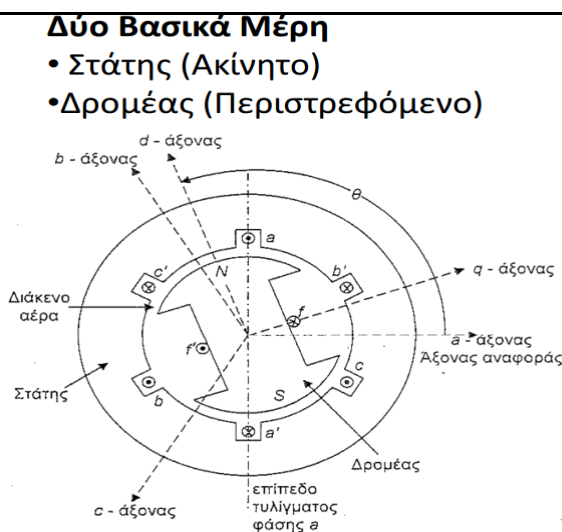
Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενης τάσης συναντώνται σε δύο κύριες μορφές. Σύγχρονες και ασύγχρονες ή επαγωγικές. Στις σύγχρονες μηχανές το ρεύμα που διαρρέει το δρομέα, καλούμενο και ρεύμα διέγερσης παράγεται από ανεξάρτητη

πηγή συνεχούς ρεύματος ενώ στις ασύγχρονες το ίδιο ρεύμα παράγεται επαγωγικά στο τύλιγμα του δρομέα.

Στη σύγχρονη γεννήτρια, το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με συνεχή τάση και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται, επάγεται τριφασική εναλλασσόμενη τάση στο τύλιγμα οπλισμού. Ανάλογα, στο σύγχρονο κινητήρα, αν το τύλιγμα οπλισμού τροφοδοτηθεί με τριφασική εναλλασσόμενη τάση, παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής, το οποίο αλληλεπιδρώντας με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα θα παράξει στρεπτική ροπή στον άξονα της μηχανής. Η ταχύτητα περιστροφής της μαγνητικής ροής, καλείται σύγχρονη ταχύτητα. Στις σύγχρονες μηχανές αυτή είναι ίση με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και καθώς η ταχύτητα του δρομέα είναι σε αναλογία με τη συχνότητα του ρεύματος διεγέρσεως, οι σύγχρονες μηχανές καθίστανται πιο εύκολες στον έλεγχο και τη χρήση. Υφίσταται μια ευθεία αντιστοιχία ανάμεσα στα βασικά μεγέθη που περιγράφουν μια σύγχρονη μηχανή, μια αντιστοιχία που θα φανεί κατά την ανάλυσή τους. **Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφεται με ταχύτητα ίδια με την μηχανική ταχύτητα που περιστρέφεται ο δρομέας και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα καθορίζεται από τη συχνότητα του ρεύματος διέγερσης.**

1.2.2 Επαγωγή περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ότι αν το τύλιγμα οπλισμού τροφοδοτηθεί με τριφασικό σύστημα εναλλασσομένων τάσεων, τάσεις που έχουν το ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120° στο εσωτερικό της μηχανής αναπτύσσεται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους.

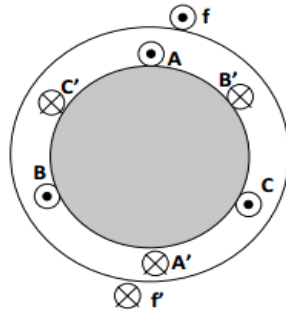


Τυλίγματα Στάτη:

-Διευθετούνται σε 3 συμμετρικές ζώνες που απέχουν μεταξύ τους στο χώρο 120° (a, b, c)

Σχήμα 1.3 Τοποθέτηση των τυλιγμάτων του στάτη συμμετρικά γύρω από διπολικό δρομέα.

Για να φανεί ο τρόπος με τον οποίο η τροφοδότηση του τυλίγματος οπλισμού με τριφασική εναλλασσόμενη τάση επάγει περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους, θα μελετηθεί η απλούστερη εκδοχή, κατά την οποία ο στάτης έχει μόνο τρία τυλίγματα, που απέχουν μεταξύ τους 120 μηχανικές μοίρες και κάθε τύλιγμα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα της ίδιας μέσης τιμής και της ίδιας συχνότητας με διαφορά φάσης 120 ηλεκτρικές μοίρες. Η διάταξη φαίνεται στα σχήματα 1.3 και 1.4.



Σχήμα 1.4 Τοποθετημένα τα τυλίγματα του στάτη σε απόσταση 120 μηχανικών μοιρών, και οι φορές των ρευμάτων.

Η εξίσωση του ρεύματος που διαρρέει το κάθε τύλιγμα δίνεται από τον τύπο.

$$I_{a\acute{a}}(t) = I_M \sin \omega t \quad (1.1)$$

$$I_{b\acute{b}}(t) = I_M \sin (\omega t - 120^\circ) \quad (1.2)$$

$$I_{c\acute{c}}(t) = I_M \sin (\omega t - 240^\circ) \quad (1.3)$$

Όπου,

$I_{x\acute{x}}$, στιγμιαία τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον εκάστοτε αγωγό $X\acute{X}$ σε χρονική στιγμή t [A]

I_M , το μέτρο του εναλλασσομένου ρεύματος που διαρρέει τον κάθε αγωγό [A]

ω , η ηλεκτρική συχνότητα της τριφασικής τάσης που τροφοδοτεί τα τυλίγματα του στάτη [rad/sec]

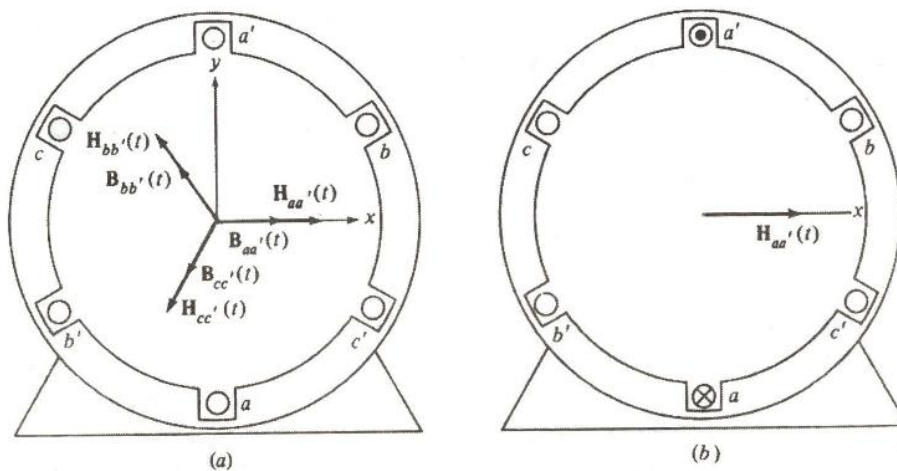
Το ρεύμα της συστάδας aa' έχει κατεύθυνση από το a στο a' , και παράγει μαγνητικό πεδίο στον στάτη με ένταση:

$$H_{a\acute{a}}(t) = H_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad (1.4)$$

Όπου:

$H_{x\acute{x}}$, η ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί γύρω του, αγωγός $X\acute{X}$ σε στιγμή t [Wb]

H_M , το μέτρο του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου [Wb]



Σχήμα 1.5 (α) Απλός τριφασικός στάτης. Τα ρεύματα των αγωγών εισέρχονται από τα μη τονούμενα άκρα των συστάδων του και εξέρχονται από τα τονούμενα. Καταγράφονται οι εντάσεις των πεδίων που παράγει κάθε συστάδα. (β) Η ένταση του πεδίου $H_{α\acute{\alpha}}(t)$ που παράγει το ρεύμα της συστάδας $α\acute{\alpha}$.

Η φορά του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου ορίζεται σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Η γωνία του διανύσματος της έντασης μαγνητικού πεδίου, είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα με τη διεύθυνση αναφοράς (x) που έχει οριστεί. Να σημειωθεί πως το μέτρο του διανύσματος μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο και μόνο η διεύθυνση και φορά μένουν σταθερά. Εντελώς ανάλογα τα διανύσματα των εντάσεων $H_{b\acute{b}}$ και $H_{c\acute{c}}$ δίνονται από τις σχέσεις,

$$H_{b\acute{b}}(t) = H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (1.5)$$

$$H_{c\acute{c}}(t) = H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (1.6)$$

Είναι προφανές από τις εξισώσεις πως σε μία δεδομένη στιγμή, τα μέτρα των εντάσεων δεν είναι τα ίδια ούτε και οι κατευθύνσεις τους. Καθώς μεταβάλλονται ημιτονοειδώς, σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή το μέτρο κάθε διανύσματος προπορεύεται από το προηγούμενο κατά 120° και υστερεί από το επόμενο κατά 120° .

Οι μαγνητικές επαγωγές των πεδίων προκύπτουν από τις εντάσεις από τον τύπο $B=\mu H$. Έτσι οι μαγνητικές επαγωγές που παράγουν τα προαναφερθέντα ρεύματα θα είναι:

$$B_{a\acute{a}} = B_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad (1.7)$$

$$B_{b\acute{b}} = B_M \sin (\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (1.8)$$

$$B_{c\acute{c}} = B_M \sin (\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (1.9)$$

Όπου:

$B_{X\acute{X}}$, η μαγνητική επαγωγή του πεδίου γύρω από τον αγωγό $X\acute{X}$ μια στιγμή t [T]

B_M , το μέτρο του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής γύρω από αγωγό $X\acute{X}$, όπως προκύπτει από τη σχέση $B_M = \mu H_M$ [T]

ω , η ηλεκτρική συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης [rad/sec]

Για τον υπολογισμό της συνισταμένης μαγνητική επαγωγή, θεωρείται μία δεδομένη χρονική στιγμή, υπολογίζονται τα μέτρα των τριών επαγωγών και θα αθροιστούν τα διανύσματα. Θα θεωρηθεί χρονική στιγμή $t=0$, οπότε οι μαγνητικές επαγωγές θα είναι οι εξής,

$$B_{a\acute{a}} = 0 \quad (1.10)$$

$$B_{b\acute{b}} = B_M \sin (-120^\circ) \angle 120^\circ \quad (1.11)$$

$$B_{c\acute{c}} = B_M \sin (-240^\circ) \angle 240^\circ \quad (1.12)$$

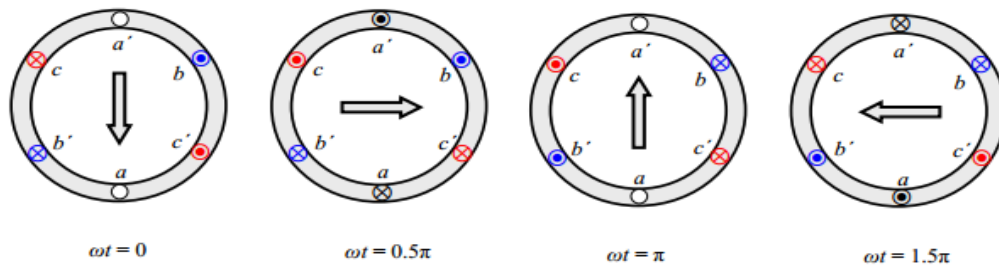
$$\begin{aligned} B_s &= B_{a\acute{a}} + B_{b\acute{b}} + B_{c\acute{c}} = 0 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} B_M\right) \angle 120^\circ + \frac{\sqrt{3}}{2} B_M \angle 240^\circ = \\ &= 1,5 B_M \angle -90^\circ \end{aligned} \quad (1.13)$$

Αν εξεταστεί η περίπτωση για $\omega t=90^\circ$ το αποτέλεσμα που θα προκύψει από τις πράξεις θα είναι

$$B_s = 1,5 B_M \angle 0^\circ \quad (1.14)$$

Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής παραμένει σταθερό, ενώ το διάνυσμα περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ίση με τη γωνιακή ταχύτητα του εναλλασσομένου ρεύματος (εδώ η ηλεκτρική συχνότητα και η

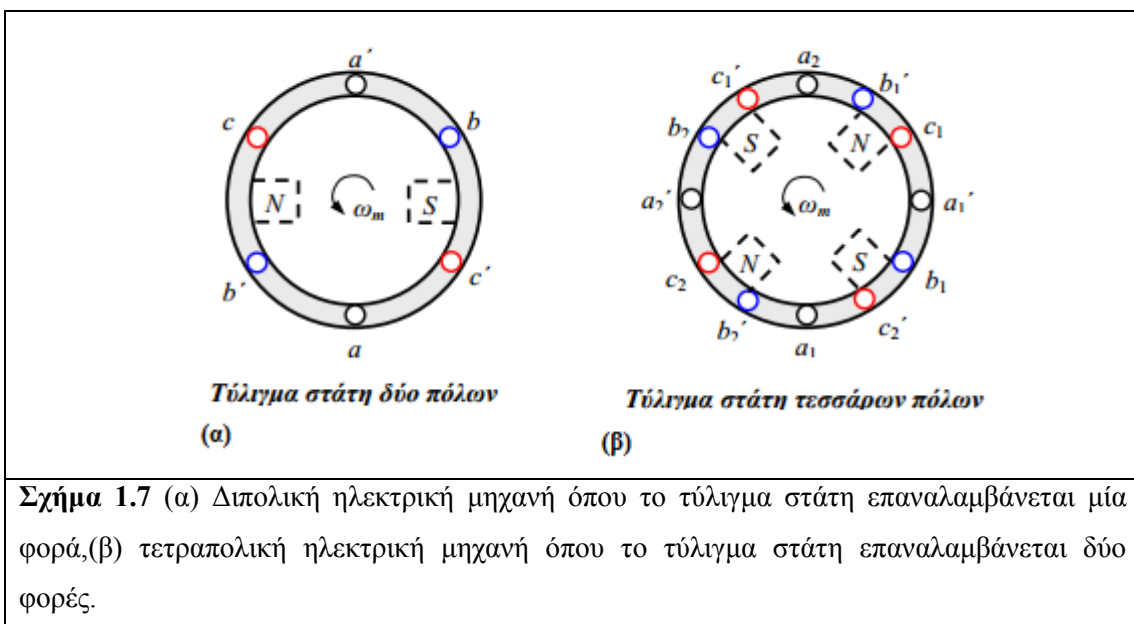
μηχανική ταχύτητα περιστροφής συμπίπτουν), με φορά αντίθετη αυτής της φοράς των δεικτών του ρολογιού.



Σχήμα 1.6 Απεικόνιση του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μαζί με τις αντίστοιχες διευθύνσεις των ρευμάτων.

1.3 Σύγχρονη ταχύτητα.

Η ταχύτητα περιστροφής του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου, η *σύγχρονη ταχύτητα*, είναι ευθέως ανάλογη με τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, και αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των ζευγών των πόλων, ή αλλιώς τον αριθμό των φορών που επαναλαμβάνεται η διαδοχή των τυλιγμάτων του στάτη. Η σειρά διαγραφής των τυλιγμάτων είναι διπολικού στάτη είναι $a - c' - b - a' - c - b'$. Στην περίπτωση που αυτή η σειρά επαναλαμβάνονταν δύο φορές, η σειρά διαγραφής θα ήταν τότε $a - c' - b - a' - c - b' - a - c' - b - a' - c - b'$. Δηλαδή δύο φορές η προηγούμενη σειρά. Όταν σε αυτό το τύλιγμα εφαρμοστεί τριφασικό σύστημα τάσεων, στο εσωτερικό του θα παράγονται δύο βόρειοι και δύο νότιοι πόλοι.



Σχήμα 1.7 (α) Διπολική ηλεκτρική μηχανή όπου το τύλιγμα στάτη επαναλαμβάνεται μία φορά, (β) τετραπολική ηλεκτρική μηχανή όπου το τύλιγμα στάτη επαναλαμβάνεται δύο φορές.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, στη διάρκεια μιας ηλεκτρικής περιόδου, ο ένας από τους δύο πόλους θα διαγράψει το μισό της περιμέτρου του στάτη. Δηλαδή όταν διαγράφεται ηλεκτρική γωνία 360° , η αντίστοιχη μηχανική θα είναι 180° . Η μαθηματική έκφραση της σύγχρονης ταχύτητας θα είναι

$$n_s = \frac{f_s}{P/2} = \frac{2 \times f_s}{P} \quad (r/s) \quad (1.15)$$

$$n_s = \frac{120 \times f_s}{P} \quad (r/min) \quad (1.16)$$

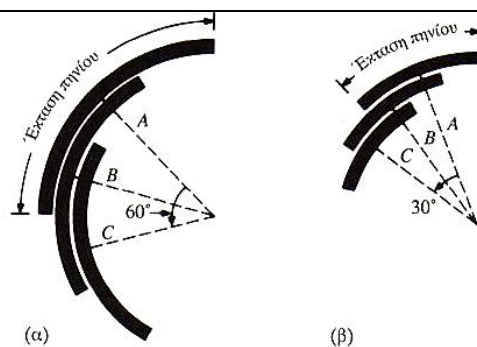
Όπου:

f_s , συχνότητα της τριφασικής τροφοδοσίας [r/sec]

n_s , σύγχρονη ταχύτητα [r/min]

P , ο αριθμός των πόλων που διαμορφώνεται από το τύλιγμα του στάτη

Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας της περιστρεφόμενης ροής και του αριθμού των πόλων του στάτη, γίνεται εύκολα αντιληπτή από το παρακάτω σχήμα, συγκρίνοντας τις μηχανικές μοίρες του κυκλικού τόξου που διανύθηκε από τη ροή σε κινητήρες με διαφορετικό αριθμό πόλων στάτη. Στο παρακάτω σχήμα, το κυκλικό τόξο που διανύθηκε από το περιστρεφόμενο πεδίο ενός τετραπολικού κινητήρα είναι διπλάσιο από αυτό ενός οκταπολικού κινητήρα, υποθέτοντας ίδια συχνότητα δικτύου και ίδια χρονική περίοδο.



Σχήμα 1.8 Έκταση πηνίου για (α) τετραπολικό τύλιγμα, (β) οκταπολικό τύλιγμα.

Σημειώνεται ότι για μια τετραπολική μηχανή, μια περιστροφή του δρομέα προκαλεί δύο πλήρεις κύκλους της ροής που περνά μέσα από το πλαίσιο του πηνίου.

Ισχύει ένας κύκλος ανά ζεύγος πόλων. Μία εξαπολική μηχανή θα παράγει για παράδειγμα τρεις κύκλους ανά περιστροφή. Η εξίσωση θα γραφτεί ως εξής:

$$f = \frac{Pn}{2} \quad (1.17)$$

Όπου:

f, συχνότητα (Hz)

P, ο αριθμός των πόλων

n, ταχύτητα περιστροφής (r/s)

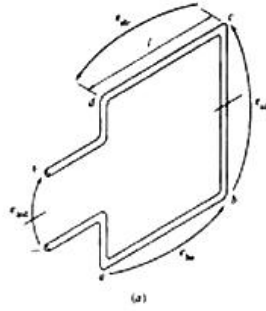
Η σύγχρονη ταχύτητα ενός κινητήρα μπορεί να αλλάξει αλλάζοντας τον αριθμό των πόλων του στάτη, ή αλλάζοντας τη συχνότητα τάσης τροφοδοσίας, ή ακόμη και με ταυτόχρονη εφαρμογή και των δύο.

Σε μία ασύγχρονη μηχανή όσο αυτή σηκώνει φορτίο στον άξονά της, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα είναι πάντοτε μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα, καθώς οι μηχανές αυτές στηρίζονται στην εξ επαγωγής διέγερση του δρομέα. Απαραίτητη προϋπόθεση να υπάρχει αυτή είναι η έστω και ελάχιστη διαφορά περιστροφής μεταξύ του πεδίων στάτη και δρομέα. Σε μία σύγχρονη όμως μηχανή, στην ομαλή κατάσταση λειτουργίας ο δρομέας θα περιστρέφεται μαζί με τη μαγνητική ροή.

1.4 Επαγωγή τριφασικής τάσης στο στάτη.

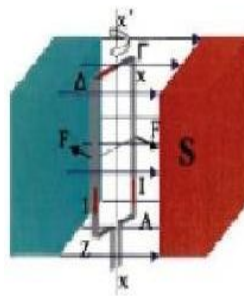
Όπως ακριβώς ένα τριφασικό σύστημα τάσεων όταν εφαρμοστεί στον στάτη της μηχανής, προκαλεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό, έτσι και η εφαρμογή ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της σύγχρονης μηχανής παράγει σύστημα τριφασικών τάσεων εξ επαγωγής στα τυλίγματα του στάτη.

Ως πρώτο παράδειγμα ένας δρομέας που τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης και δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο, περιστρέφεται μέσα σε ένα ακίνητο αγώγιμο πλαίσιο. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας περιστρέφεται και το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής, διάνυσμα με διεύθυνση ακτινική και με φορά προς το στάτη. Αν τοποθετηθούν τρία αγώγιμα πλαίσια στο στάτη, με μηχανική γωνία 120° , θα αναπτυχθούν τάσεις εξ επαγωγής στα άκρα των πλαισίων, τάσεις που θα έχουν το ίδιο μέτρο και διαφορά φάσης 120° .



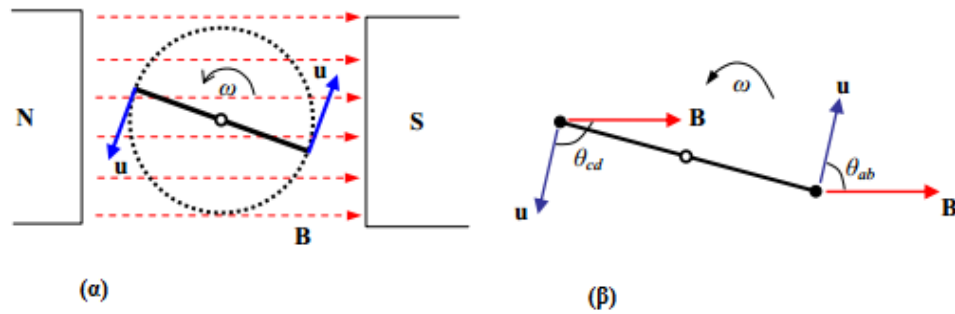
Σχήμα 1.9 Τύλιγμα δρομέα

Το σχήμα 1.10 παρουσιάζει μια απλή μηχανή που αποτελείται από έναν μεγάλο στατικό μαγνήτη που δημιουργεί ένα σταθερό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο καθώς και έναν περιστρεφόμενο βρόχο μέσα στο πεδίο αυτό. Το περιστρεφόμενο τμήμα αντιπροσωπεύει το δρομέα της μηχανής και ο στατικός μαγνήτης το στάτη.



Σχήμα 1.10 Τετραγωνικός βρόχος περιστρεφόμενος σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο.

Εάν ο δρομέας αυτής της μηχανής περιστρέφεται, θα έχουμε επαγωγή τάσης στο βρόχο. Για να οριστεί το μέγεθος και η μορφή της τάσης, θα εξεταστεί κάθε πλευρά του βρόχου χωριστά και θα αθροιστούν όλες οι τάσεις που επάγονται. Ο βρόχος θεωρείται τετραγωνικός, και οι προσανατολισμοί των πλευρών του και της κίνησής τους φαίνεται στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.11 (α)Περιστρεφόμενος βρόχος μέσα σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο,(β) απεικόνιση των διανυσμάτων ταχύτητας

Εάν θεωρηθεί το μαγνητικό πεδίο ακίνητο και αντιθέτως θεωρηθεί πως το αγώγιμο πλαίσιο περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, τότε το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής που σαρώνει κατά τη κίνησή του αγωγός ανά δεδομένη στιγμή t δίνεται από τη σχέση:

$$B = B_M \cos(\omega_m t - a) \quad (1.18)$$

Όπου:

B , η μαγνητική επαγωγή του πεδίου γύρω από αγωγό μια στιγμή t [T]

B_M , το μέτρο του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής γύρω από αγωγό που συνδέεται με συνεχή τάση, όπως προκύπτει από τη σχέση $B_M = \mu H_M$ [T].

ω_m , είναι η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του κινούμενου δρομέα [rad/sec]

Η σχέση για την τάση που επάγεται στα άκρα του πλαισίου είναι:

$$e = (v \times B)l \quad (1.19)$$

όπου :

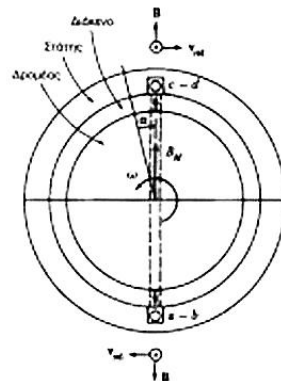
v , η περιστροφική ταχύτητα του αγωγού [m/sec]

B , η μαγνητική επαγωγή πεδίου [T]

l =το μήκος του αγωγού [m]

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται σε αγωγό στρεφόμενο σε μαγνητικό πεδίο, όμως στη περίπτωση μιας σύγχρονης μηχανής είναι το μαγνητικό πεδίο που στρέφεται και όχι ο αγωγός. Τα αποτελέσματα που δίνει η σχέση είναι σωστή αν θεωρηθεί σύστημα

αναφοράς το πεδίο οπότε είναι το πλαίσιο που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα. Η συνολική τάση που επάγεται στα άκρα του πλαισίου είναι το άθροισμα των τάσεων που επάγεται σε κάθε μια από τις πλευρές του. Το πλαίσιο στο εσωτερικό της μηχανής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.12 Τα διανύσματα των μαγνητικών επαγωγών στις πλευρές της συστάδας και οι ταχύτητες κάθε πλευράς. Αναφορά της κίνησης ορίζεται ο δρομέας που θεωρείται ακίνητος.

Πλευρά ΑΓ. Σε αυτή τη πλευρά, είναι $\alpha=180^\circ$ και αφού το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής έχει ακτινική διεύθυνση, το διάνυσμα της ταχύτητας του πλαισίου και το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής σχηματίζουν γωνία 90° και το διάνυσμα $v \times B$ έχει την ίδια φορά με το μήκος l . Οπότε:

$$e_{AG} = (v \times B)l = -vB_M l \cos(\omega_m t - 180^\circ) \text{ [V]} \quad (1.20)$$

Πλευρά ΓΔ. Η τάση εξ επαγωγής στα άκρα του διαστήματος είναι μηδενική καθώς τα διανύσματα $v \times B$ και l , είναι κάθετα μεταξύ τους.

Οπότε :

$$e_{GD} = (v \times B)l = 0 \text{ [V]} \quad (1.21)$$

Πλευρά ΔΖ. Σε αυτήν τη πλευρά $\alpha=0^\circ$. Η γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα B και v είναι 90° και το διάνυσμα $v \times B$ έχει την ίδια φορά με το l .

Οπότε:

$$e_{DZ} = (v \times B)l = vB_M l \cos\omega_m t \text{ [V]} \quad (1.22)$$

Πλευρά ΖΑ. Η τάση που επάγεται στα άκρα του τμήματος είναι μηδενική καθώς τα διανύσματα $v \times B$ και l , είναι κάθετα μεταξύ τους.

Οπότε :

$$e_{ZA} = (v \times B)l = 0 \text{ [V]} \quad (1.23)$$

Τελικά η συνολικά επαγόμενη τάση στα άκρα του απλού αγώγιμου πλαισίου είναι $e_{ind} = e_{AG} + e_{AZ} = 2vB_M I \cos\omega_m t$ [V] (1.24)

Αυτή η σχέση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω, καθώς η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι $v = r\omega_m$, η μαγνητική ροή που διέρχεται από την εκ περιστροφής επιφάνεια του πλαισίου είναι ίση με $\Phi = 2rIB_M$ και συγχρόνως η ηλεκτρική και η μηχανική γωνιακή ταχύτητα συμπίπτουν καθώς ο στάτης που εξετάζεται έχει μόνο δύο πόλους δηλαδή $\omega_m = \omega_e = \omega$. Άρα η συνολικά επαγόμενη τάση στα άκρα του απλού αγώγιμου πλαισίου θα είναι :

$$e_{ind} = \Phi\omega\cos\omega t[V] \quad (1.25)$$

Η σχέση αναφέρεται στην επαγόμενη τάση στα άκρα ορθογωνίου πλαισίου, που αποτελείται από έναν αγωγό. Αν το περιστρεφόμενο πλαίσιο αποτελείται από N_c αγωγούς τότε η σχέση για την επαγόμενη τάση γράφεται:

$$e_{ind} = N_c\Phi\omega\cos\omega t[V] \quad (1.26)$$

Φαίνεται επομένως, πως η επαγόμενη τάση στα άκρα του τυλίγματος μια απλής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ημιτονοειδή με πλάτος που εξαρτάται από τη ροή ' Φ ' στο εσωτερικό της μηχανής, από τη γωνιακή ταχύτητα ' ω ' του δρομέα και από μια σταθερά που εκφράζει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής δηλαδή,

$$e_{ind} = N_c\Phi\omega\cos\omega t \quad (1.27)$$

Αν αντί για ένα πλαίσιο, στο στάτη υπάρχουν τρία αγώγιμα πλαίσια με γωνιακή διαφορά 120° , τότε θα αναπτυχθούν τρεις εναλλασσόμενες τάσεις. Η μέγιστη τιμή που παίρνει η κάθε μία είναι $E_{max} = N_c\Phi\omega$ και καθώς η γωνιακή ταχύτητα συνδέεται με τη συχνότητα $\omega = 2\pi f$, η εξίσωση αυτή γράφεται $E_{max} = 2\pi N_c\Phi f$. Επομένως η ενεργός τιμή της τάσης που επάγεται στο κύκλωμα ενός στάτη με τριφασικό τύλιγμα δίνεται από τη σχέση

$$E_A = 2\pi N_c\Phi f[V] \quad (1.28)$$

Η ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα εξόδου της μηχανής εξαρτάται από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του στάτη (από το αν είναι συνδεδεμένα σε αστέρα, ή σε τρίγωνο). Αν τα τυλίγματα είναι συνδεδεμένα σε αστέρα, η τάση στα άκρα της

μηχανής είναι $\sqrt{3}E_A$, αν όμως είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο τότε η τάση στα άκρα της μηχανής ισούται με E_A .

1.4 Ολίσθηση και γωνία ροπής.

Η ελάχιστη διαφορά μεταξύ της ταχύτητας της περιστρεφόμενης ροής και της ταχύτητας του δρομέα, ή αλλιώς η διαφορά περιστροφής μεταξύ πεδίου στάτη και πεδίου δρομέα, φαινόμενο που αναφέρθηκε κατά την ανάλυση της σύγχρονης ταχύτητας, αυτή η διαφορά καλείται *ταχύτητα ολίσθησης*, και ο λόγος της προς τη σύγχρονη ταχύτητα καλείται ολίσθηση.

$$n = n_s - n_r \quad (1.29)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1.30)$$

Όπου :

n = ταχύτητα ολίσθησης [r/min]

n_s = σύγχρονη ταχύτητα [r/min]

n_r = ταχύτητα δρομέα [r/min]

s = ολίσθηση [pu]

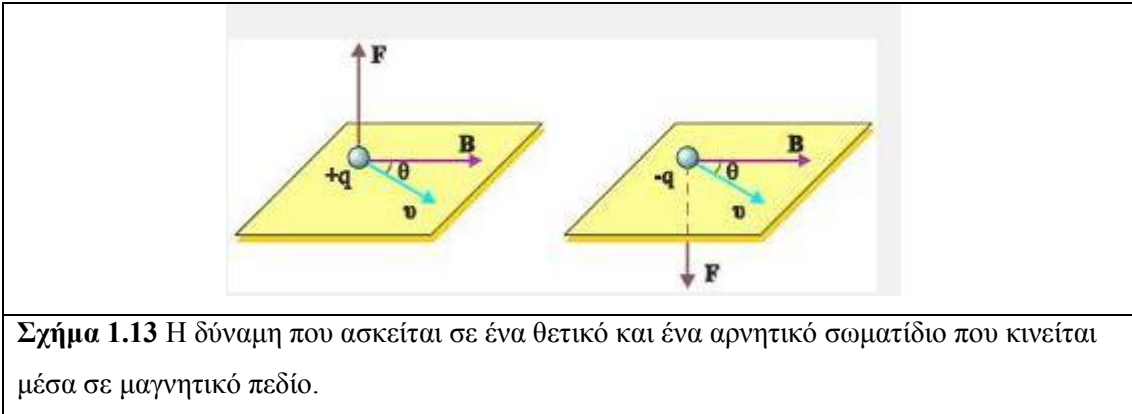
Η ολίσθηση όπως εκφράζεται στην τελευταία σχέση, ονομάζεται ανά-μονάδα ολίσθηση (pu). Η ολίσθηση εξαρτάται από το μηχανικό φορτίο που έχει συνδεθεί στον άξονα του δρομέα (υποθέτοντας σταθερή τάση και σταθερή συχνότητα τροφοδοσίας). Αυξάνοντας το φορτίο του άξονα, ελαττώνεται η ταχύτητα του δρομέα, κατά συνέπεια αυξάνεται και η ολίσθηση.

Η διαφορά μεταξύ ταχύτητας δρομέα και σύγχρονη ταχύτητας είναι αναγκαία συνθήκη για τη λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών αλλά εφαρμόζεται και στην εκκίνηση των σύγχρονων καθώς και στη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας όταν έχω αλλαγή φορτίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι μαγνήτες του δρομέα αλλάζουν γωνιακή θέση σε σχέση με την περιστρεφόμενη μαγνητική ροή, και παρουσιάζουν μια γωνία καθυστέρησης δ . Η γωνία δ εκφραζόμενη σε ηλεκτρικές μοίρες καλείται *γωνία ισχύος*, *γωνία φορτίου* ή *γωνία ροπής*.

1.5 Επαγόμενη ροπή σε βρόχο που διαρρέεται από ρεύμα.

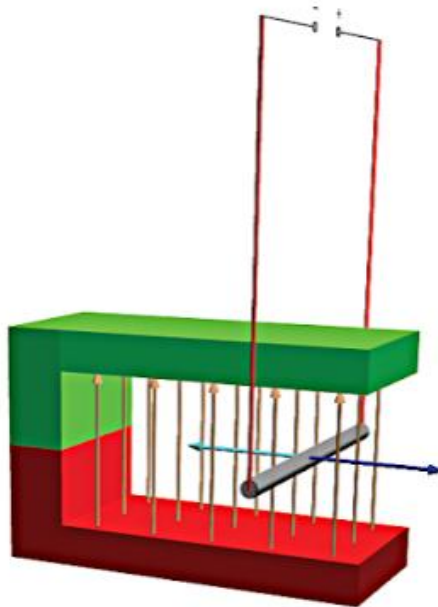
Αφού αναπτύχθηκε η μεθοδολογία για την παραγωγή καθ' ενός από τα δύο μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό μιας σύγχρονης μηχανής, θα σχολιαστεί η επαγόμενη ροπή από τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Ένα φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο, δε δέχεται καμία δύναμη. Όταν όμως το σωματίδιο αυτό κινηθεί προς μία κατεύθυνση θα εκτραπεί από την αρχική του πορεία, καθώς πλέον ασκείται δύναμη πάνω του. **Μόνο τα κινούμενα φορτία αλληλεπιδρούν με στατικά μαγνητικά πεδία.** Η δύναμη αυτή ονομαζόμενη δύναμη Lorentz, έχει βρεθεί να εξαρτάται από, την ένταση του μαγνητικού πεδίου, το ηλεκτρικό φορτίο q του σωματιδίου και το διάνυσμα της ταχύτητας του φορτίου σε σχέση με το δυναμικό πεδίο.



Σχήμα 1.13 Η δύναμη που ασκείται σε ένα θετικό και ένα αρνητικό σωματίδιο που κινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

Αν αντί για ένα φορτισμένο σωματίδιο, είναι ένας αγωγός ο οποίος καθώς διαρρέεται από ρεύμα, κινηθεί στο εσωτερικό μαγνητικού πεδίου, τότε η δύναμη που ασκείται πάνω του θα είναι το μακροσκοπικό αποτέλεσμα της δύναμης που ασκείται σε κάθε φορτισμένο σωματίδιο που κινείται μαζί με τον αγωγό. Η δύναμη αυτή γνωστή και ως δύναμη Laplace, και αποτελεί υποπερίπτωση της δύναμης Lorentz. Η μαθηματική της έκφραση είναι, $d\vec{F}_L = Id\vec{l} \times \vec{B}$.



Σχήμα 1.14 Ρευματοφόρος αγωγός μέσα σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Η φορά της δύναμης Laplace, είναι αντίθετη προς το αίτιο που τη δημιουργεί, για αυτό και εμφανίζεται αντίρροπη του διανύσματος της ταχύτητας του αγωγού.

Δίνεται η γενική περίπτωση, όπου ο βρόχος του δρομέα σχηματίζει γωνία θ ως προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο για χρονική στιγμή t , και ρεύμα i διαρρέει το βρόχο. Σύμφωνα με τον κανόνα του Laplace, η δύναμη που ασκείται σε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα και κινείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, δίνεται από το γινόμενο:

$$F = i(L \times B) \quad (1.31)$$

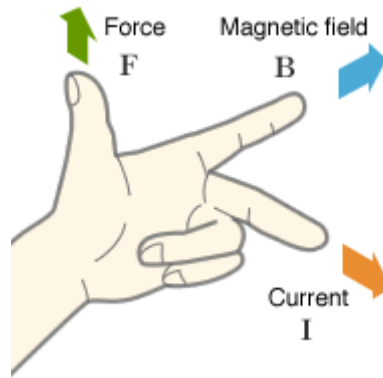
Όπου

F , η δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στον κινούμενο αγωγό, [N]

i , η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό[A]

L , το διάνυσμα που έχει μέτρο ίσο με το μήκος του αγωγού και κατεύθυνση την κατεύθυνση ροής του ρεύματος[m].

B , το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής[T]



Σχήμα 1.15 Ο εμπειρικός κανόνας του δεξιού χεριού, για την εύρεση των διανυσμάτων

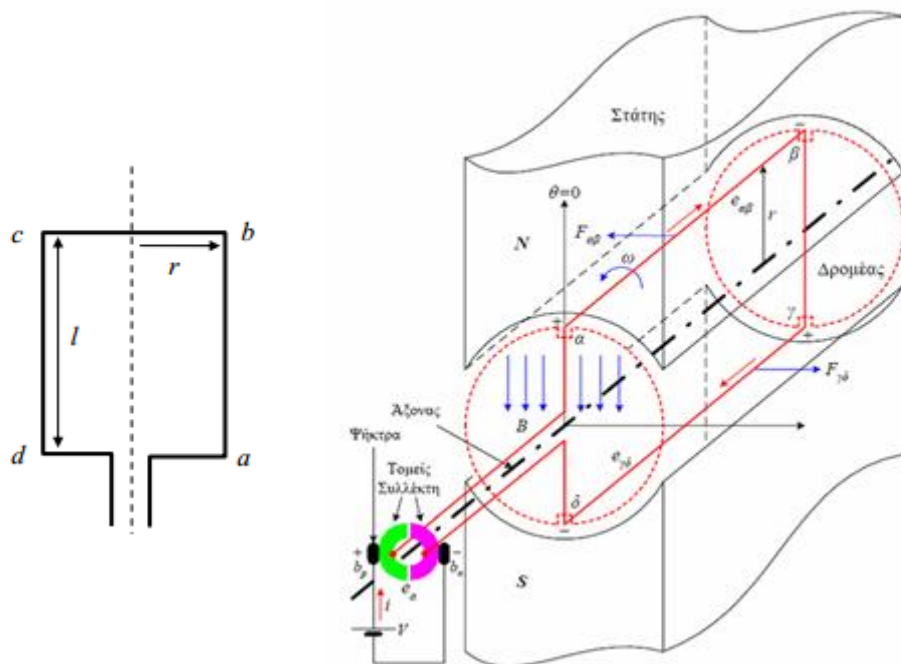
Το μέτρο της ροπής σε κάθε πλευρά δίνεται από:

$$\tau = (\text{δύναμη που εφαρμόζεται}) \times (\text{κάθετη απόσταση}) = F(r \sin \theta) = rF \sin \theta \text{ [Nm]} \quad (1.33)$$

όπου:

‘ θ ’ είναι η γωνία μεταξύ του διανύσματος r και του διανύσματος F , [rad]

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται τετραγωνικός βρόχος που διαρρέεται από ρεύμα I , που περιστρέφεται μέσα σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 1.16 Τα διανύσματα των μαγνητικών επαγωγών στις πλευρές της συστάδας και οι ταχύτητες κάθε πλευράς.

Πλευρά ab. Στη πλευρά αυτή, η κατεύθυνση του ρεύματος είναι προς το εσωτερικό της σελίδας, ενώ το μαγνητικό πεδίο B δείχνει προς τα δεξιά. Το εξωτερικό γινόμενο $L \times B$ δείχνει προς τα κάτω, επομένως:

$$F = i(L \times B) = iLB \text{ με φορά προς τα κάτω[N]} \quad (1.34)$$

Η ροπή που παράγεται είναι :

$$\tau_{ab} = Fr \sin \theta_{ab} = rilB \sin \theta_{ab} [\text{Nm}] \quad (1.35)$$

Πλευρά bc. Στην πλευρά αυτή, η κατεύθυνση του ρεύματος βρίσκεται στο επίπεδο της σελίδας, ενώ το μαγνητικό πεδίο B δείχνει προς τα δεξιά. Η ποσότητα $L \times B$ δείχνει στο εσωτερικό της σελίδας. Επομένως η επαγόμενη δύναμη σε αυτή την πλευρά είναι:

$$F = i(L \times B) = iLB \text{ με φορά προς το εσωτερικό της σελίδας[N]} \quad (1.36)$$

Καθώς όμως το διάνυσμα F είναι παράλληλο προς τον άξονα περιστροφής του πλαισίου, η ροπή που αναπτύσσεται είναι μηδενική άρα:

$$\tau_{bc} = 0 \quad (1.37)$$

Πλευρά cd. Στην πλευρά αυτή, η κατεύθυνση του ρεύματος είναι προς το εξωτερικό της σελίδας, ενώ το μαγνητικό πεδίο B δείχνει προς τα δεξιά. Η ποσότητα $L \times B$ δείχνει στο εξωτερικό της σελίδας, επομένως η επαγόμενη δύναμη σε αυτή την πλευρά είναι:

$$F = i(L \times B) = iLB \text{ με φορά προς τα πάνω} \quad (1.38)$$

Η ροπή που παράγεται έχει μέτρο :

$$\tau_{cd} = Fr \sin \theta_{cd} = rilB \sin \theta_{cd} \quad (1.38)$$

Πλευρά da. Στην πλευρά αυτή, η κατεύθυνση του ρεύματος είναι στο επίπεδο της σελίδας, ενώ το μαγνητικό πεδίο B δείχνει προς τα δεξιά. Η ποσότητα $L \times B$ δείχνει προς τα πάνω, επομένως η επαγόμενη δύναμη σε αυτή την πλευρά είναι:

$$F = i(L \times B) = iLB \text{ με φορά προς το εξωτερικό της σελίδας} \quad (1.39)$$

Καθώς όμως η δύναμη στρέψης και ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλοι η στρεπτική ροπή που θα παράγεται θα είναι μηδενική, δηλαδή :

$$\tau_{da} = 0 \quad (1.40)$$

Η ολική επαγόμενη στρεπτική ροπή θα είναι το άθροισμα των ροπών σε καθεμία από τις πλευρές του:

$$\tau_{ind} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da} = rilB\sin\theta_{ab} + rilB\sin\theta_{cd} \quad (1.41)$$

Καθώς $\theta_{ab} = \theta_{cd}$ η επαγόμενη ροπή γίνεται :

$$\tau_{ind} = 2rilB\sin\theta \quad (1.42)$$

Να σημειωθεί πως η ροπή είναι μέγιστη όταν το επίπεδο του βρόχου είναι παράλληλο προς τη μαγνητική επαγωγή, και μηδενική όταν είναι κάθετη.

Η τελευταία εξίσωση μπορεί να εκφραστεί και μέσω των μαγνητικών επαγωγών B_S και B_R . Η στρεπτική ροπή που παράγεται από την αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών επαγωγών συνιστά το εξωτερικό γινόμενο τους

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S \quad (1.43)$$

Από την τριγωνομετρία εξάγεται πως η γωνία θ' μεταξύ των δύο διανυσμάτων είναι η ίδια με τη γωνία θ στην εξίσωση. Εάν εφαρμοστεί η εξίσωση αυτή στο παράδειγμα που εξετάστηκε έχουμε διάνυσμα ροπής με κατεύθυνση στο εσωτερικό της σελίδας, και μέτρο που δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau_{ind} = kB_R B_S \sin\theta \quad (1.44)$$

Το εν κατακλείδι συμπέρασμα είναι πως, η επαγόμενη ροπή στο βρόχο είναι **ανάλογη με τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου του βρόχου, τη δύναμη του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και του ημιτόνου της μεταξύ τους γωνίας**. Γενικά η ροπή σε κάθε πραγματική μηχανή εξαρτάται από τους εξής τέσσερις παράγοντες:

1. Τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου του δρομέα
2. Τη δύναμη του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη
3. Το ημίτονο της μεταξύ τους γωνίας
4. Σταθερά που εκφράζει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής

Η επαγόμενη ροπή τείνει να ευθυγραμμίσει τα δύο μαγνητικά πεδία, κάνοντας το δρομέα να περιστρέφεται ώστε να προλάβει τη περιστρεφόμενη ροή. Αυτή είναι και η βασική αρχή λειτουργίας όλων των κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Σύγχρονοι κινητήρες.

2.1 Εισαγωγή

Ο σύγχρονος ηλεκτροκινητήρας είναι μια ηλεκτρική μηχανή που χρησιμοποιείται για την μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική με τη βοήθεια ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Εκτός αν προσδιορίζεται, όταν εξετάζεται η συμπεριφορά των διαφόρων τύπων κινητήρων, θεωρείται πως η μηχανή έχει συνδεθεί με μια ιδανική πηγή ενέργειας απεριόριστης χωρητικότητας και μηδενικής σύνθετης αντίστασης. Η πηγή αυτή καλείται άπειρος ζυγός και στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Η τάση και η συχνότητα του άπειρου ζυγού παραμένουν σταθερές και δεν επηρεάζονται από το επίπεδο ισχύος που απορροφάται από ή τροφοδοτείται στον άπειρο ζυγό.



Σχήμα 2.1. Εναλλασσόμενος κινητήρας τριών πόλων.

Ο στάτης ενός τριφασικού σύγχρονου κινητήρα, καλείται και οπλισμός. Όταν τροφοδοτείται από μία τριφασική παροχή τάσης, αναπτύσσει στρεφόμενο πεδίο, με τον τρόπο που περιγράφηκε. Στο εσωτερικό του στάτη, βρίσκεται ο περιστρεφόμενος δρομέας, ο οποίος φέρει πάνω του πηνία, που έχουν τυλιχτεί, ή βρίσκονται μέσα σε αύλακες. Όταν τροφοδοτούνται από μια πηγή σταθερής τάσης, δημιουργούν ηλεκτρομαγνήτες οι οποίοι κλειδώνουν σε συγχρονισμό με τους πόλους αντίθετης πολικότητας, στο στάτη. Τα τυλίγματα διέγερσης, όπως ονομάζονται τα τυλίγματα του δρομέα, συνδέονται εν σειρά, ή σε εν σειρά-παράλληλους συνδυασμούς ώστε να παρέχουν εναλλασσόμενους βόρειους και νότιους πόλους.

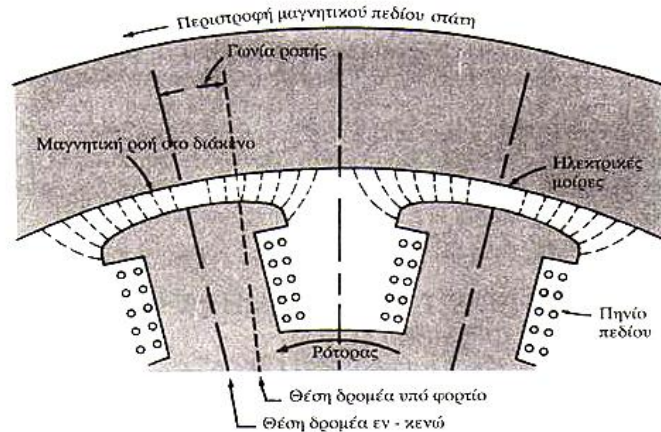
2.2 Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα.

Κατά την εκκίνηση, ο δρομέας αφήνεται να επιταχύνει μέχρι τη μέγιστη ταχύτητά του. Σε αυτή τη ταχύτητα περιστροφής, η ολίσθηση είναι πολύ μικρή, και η περιστρεφόμενη μαγνητική ροή του στάτη προπορεύεται ελάχιστα σε σχέση με τον περιστρεφόμενο δρομέα. Στη συνέχεια τροφοδοτείται συνεχές ρεύμα στα μαγνητικά τυλίγματα του δρομέα, διαμορφώνοντας εναλλασσόμενους βόρειους και νότιους πόλους οι οποίοι κλειδώνουν το δρομέα σε περιστροφικό συγχρονισμό με τους αντίστοιχους αντίθετους πόλους της περιστρεφόμενης ροής. Σε αυτό το σημείο η ολίσθηση είναι μηδενική και όλες οι σχετικές λειτουργίες επαγωγικού κινητήρα σταματούν και η μηχανή λειτουργεί σε σύγχρονη ταχύτητα $n_s = \frac{120 f}{P}$.

Στην περίπτωση που ο δρομέας τροφοδοτηθεί με συνεχές ρεύμα και ενεργοποιηθούν οι μαγνήτες πριν η μηχανή να φτάσει στη μέγιστη ταχύτητα, ο δρομέας πιθανόν δε θα συγχρονιστεί. Αυτό θα έχει συνέπεια, κάθε φορά που ένας πόλος της περιστρεφόμενης μαγνητικής ροής περνά μπροστά από έναν πόλο του δρομέα, θα εμφανίζεται μεταξύ τους μαγνητική έλξη ή απώθηση. Η κατάσταση αυτή ανώμαλης λειτουργίας καλείται *λειτουργία ολίσθησης πόλων*. Σύγχρονοι κινητήρες χωρίς ενσωματωμένα συστήματα εκκίνησης, δε τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα, πριν επιταχυνθούν σχεδόν έως τη σύγχρονη ταχύτητα μέσω ενός βοηθητικού κινητήρα ή στροβίλου. Κανένα φορτίο δε συνδέεται κατά τη περίοδο επιτάχυνσης. Όταν πλησιάσει τη σύγχρονη ταχύτητα, τα μαγνητικά τυλίγματα τροφοδοτούνται και το ρεύμα πεδίου ρυθμίζεται ώστε να επάγει στο στάτη, τάση σχεδόν ίση με τη παρεχόμενη τάση. Στη κατάσταση αυτή η ολίσθηση σχεδόν μηδενίζεται.

2.3 Φορτίο άξονα και γωνία ροπής.

Ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί στην ίδια μέση ταχύτητα για όλες τις τιμές φορτίου, από την εν-κενώ λειτουργία, μέχρι το μέγιστο φορτίο. Όταν όμως το φορτίο μεταβάλλεται, ο κινητήρας επιβραδύνει ή επιταχύνει όσο χρειάζεται ώστε να επιτρέπει στο δρομέα να αλλάξει τη γωνιακή του θέση σε σχέση με την περιστρεφόμενη ροή του στάτη, ώστε να αυξηθεί ή να μειωθεί η στρεπτική ροπή που παράγεται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των περιστρεφόμενων πεδίων, στρεπτική, ροπή αναγκαία ώστε να σηκωθεί το φορτίο. Μετά ο κινητήρας επανέρχεται πάλι στην αρχική ταχύτητα.



Σχήμα 2.1 Στιγμιότυπο κινητήρα που λειτουργεί εν κενώ στη σύγχρονη ταχύτητα, μαζί με φορτίο όπου παρουσιάζει ελαφρά υστέρηση από το περιστρεφόμενο πεδίο στάτη.

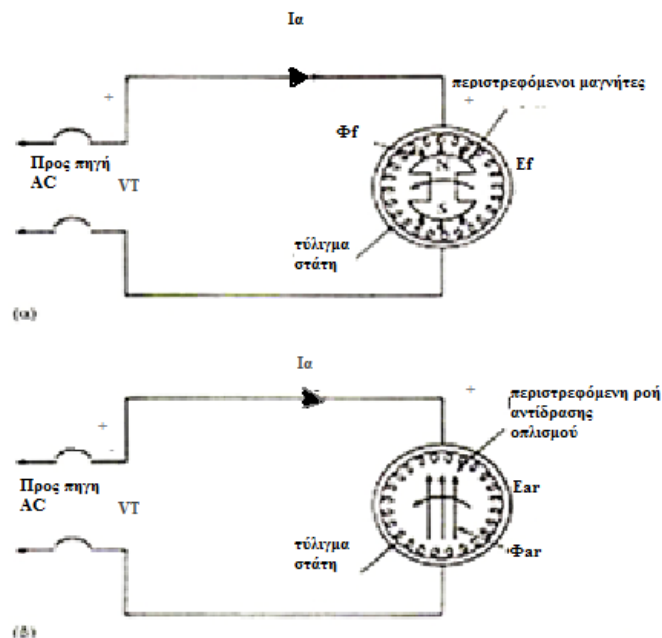
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, όσο ο κινητήρας λειτουργεί εν-κενώ, λειτουργεί σε σύγχρονη ταχύτητα. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει τη θέση των περιστρεφόμενων μαγνητών σε σχέση με την περιστρεφόμενη μαγνητική ροή του στάτη.

Κάθε φορά που το φορτίο στον άξονα της μηχανής αλλάζει, ο δρομέας σταματά να περιστρέφεται σε συγχρονισμό με την περιστρεφόμενη ροή και οι μαγνήτες του δρομέα αλλάζουν τη γωνιακή τους θέση σε σχέση με την ροή. Παρουσιάζεται έτσι μια γωνία υστέρησης ' δ '. Η γωνία δ εκφράζεται σε ηλεκτρικές μοίρες, και έχει ήδη οριστεί ως γωνία ισχύος, γωνία φορτίου ή γωνία ροπής.

Ειδικά για την περίπτωση αύξησης του φορτίου, όπου έχω επιβράδυνση της μηχανής και ο κινητήρας αυξάνει την μεταφορέα του σε σχέση με την περιστρεφόμενη ροή, η γωνία ισχύος δ , και η επαγόμενη ροπή θα αυξηθούν. Καθώς όμως η αύξηση της ροπής επιταχύνει και πάλι τον κινητήρα, αυτός θα αποκτήσει τη σύγχρονη του ταχύτητα. Τελικά με διαρκώς αυξανόμενο φορτίο, φτάνει ένα σημείο, όπου επιπλέον φόρτιση του κινητήρα, δε μπορεί να υποστηριχτεί από επιπλέον αύξηση της μαγνητικής ροπής, με αποτέλεσμα ο δρομέας να μη μπορεί να συγχρονιστεί με την περιστρεφόμενη ροή. Η κρίσιμη τιμή της ροπής που προκαλεί ένα κινητήρα να αποσυγχρονιστεί καλείται **ροπή ανατροπής**.

2.4 Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ) και τάση αντίδρασης οπλισμού.

Η ροή διακένου σε ένα σύγχρονο κινητήρα περιλαμβάνει τη περιστρεφόμενη **μαγνητική ροή πεδίου** (Φ_f) λόγω του συνεχούς ρεύματος DC (I_f) στους περιστρεφόμενους μαγνήτες του δρομέα, και την περιστρεφόμενη ροή οπλισμού γνωστή ως **ροή αντίδρασης οπλισμού** (Φ_{ar}), η οποία προκαλείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που διαρρέει τις τρεις φάσεις οπλισμού στα τυλίγματα του στάτη. Το μέτρο και το όρισμα της ροής αντίδρασης οπλισμού εξαρτάται από το αντίστοιχο μέτρο και ορίσματα του ρεύματος οπλισμού. Τόσο η ροή μαγνήτη όσο και η ροή αντίδρασης οπλισμού περιστρέφονται με την ίδια φορά και στη σύγχρονη ταχύτητα σε σχέση με τα τυλίγματα του οπλισμού.



Σχήμα 2.2 Οι ΗΕΔ που επάγονται από τα συνισταμένα μαγνητικά πεδία του στάτη: (α) λόγω της περιστρεφόμενης μαγνητικής ροής πεδίου, (β) λόγω της περιστρεφόμενης ροής αντίδρασης οπλισμού.

Οι περιστρεφόμενες ροές Φ_f και Φ_{ar} παράγουν τάσεις ταχύτητας στους αγωγούς του δρομέα. Οι ρευματοφόροι αγωγοί του δρομέα καθώς κινούνται κάτω από την επίδραση της ροπής στρέψεως του κινητήρα, αναπτύσσουν εσωτερικά ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις με φορά αντίθετη στη φορά του συνεχούς ρεύματος που ήδη τους διαρρέει. Για αυτό και οι δυνάμεις αυτές λέγονται αντί-ηλεκτρεγερτικές

καθώς αντιτίθενται στη κίνηση, ελαττώνοντας τη τιμή του ρεύματος που προκαλεί τη κίνηση του δρομέα. Συγκεκριμένα η μαγνητική ροή πεδίου Φ_f επάγει την τάση ταχύτητας που ονομάζεται αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΑΗΕΔ) ή τάση διέγερσης E_f . Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται αυτή αντιτίθεται στην εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση. Είναι σημαντικό να καταχωρηθεί πως η ΑΗΕΔ, δεν συνιστά δύναμη καθ' αυτή με τη συμβατική έννοια, αλλά συνιστά τάση που μετράται στους αγωγούς του δρομέα. Αυτή η τάση έχει βρεθεί να είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής πεδίου και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

$$E_f = n_s \Phi_f k_f \quad (2.1)$$

Όπου:

E_f , Τάση διέγερσης/φάση [V]

n_s , σύγχρονη ταχύτητα [r/min]

Φ_f , μαγνητική ροή πόλων [Wb]

k_f , σταθερά

Καθώς η τάση διέγερσης E_f οφείλεται στη μαγνητική ροή πεδίου Φ_f , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την περιστροφή του δρομέα και εντέλει από το ρεύμα διέγερσης, η τάση διέγερσης τελικά είναι συνάρτηση μόνο του ρεύματος διέγερσης για μια δεδομένη ταχύτητα. Η ΑΗΕΔ παίζει ένα σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα, χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, και μπορεί να είναι μικρότερη, ίση ή μεγαλύτερη από την εφαρμοζόμενη τάση στο στάτη.

Η περιστρεφόμενη μαγνητική ροή αντίδρασης οπλισμού Φ_{ar} που σαρώνει κυκλικά τις σπείρες του στάτη, όπως απεικονίστηκε στο σχήμα 2.2, επάγει μια τάση ταχύτητας γνωστή ως αντίδραση οπλισμού. Η τάση αντίδρασης οπλισμού εκφρασμένη συναρτήσει της μαγνητικής ροής αντίδρασης οπλισμού είναι,

$$E_{ar} = n_s \Phi_{ar} K_a \quad (2.2)$$

Όπου:

E_{ar} , η τάση αντίδρασης οπλισμού [V]

Φ_{ar} , η μαγνητική ροή αντίδρασης οπλισμού [Wb]

n_s , η σύγχρονη ταχύτητα [r/min]

K_a , σταθερά που εξαρτάται από τα μηχανικά στοιχεία του κινητήρα

Η μαγνητική ροή αντίδρασης οπλισμού, όπως αναμένεται αφού εμφανίζεται στα τυλίγματα του στάτη, είναι ανάλογη του ρεύματος οπλισμού. Η τάση αντίδρασης οπλισμού μπορεί επομένως να προσεγγιστεί και να εκφραστεί συναρτήσει του ρεύματος οπλισμού και μιας φανταστική αντίδρασης οπλισμού. Άρα:

$$E_{ar} = I_a j X_{ar} \quad (2.3)$$

Όπου:

I_a , ρεύμα οπλισμού [A]

X_{ar} , φανταστική αντίδραση οπλισμού [Ω /φάση]

2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα.

Έστω E_f η τάση στα άκρα της μιας φάσης του τυλίγματος οπλισμού, που παράγεται στο εσωτερικό της γεννήτριας. Αυτή η τάση σπάνια εμφανίζεται στα άκρα της μηχανής. Αντίθετα είναι ίση με την τάση στα άκρα της μηχανής V_T μόνο όταν το ρεύμα οπλισμού I_a της γεννήτριας είναι μηδενικό. Η ανάλυση των αιτιών που διαφοροποιούν την E_f από την V_T οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου της σύγχρονης γεννήτριας.

Οι λόγοι που ισχύει αυτή η διαφοροποίηση είναι οι εξής:

1. Η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη. Το φαινόμενο καλείται αντίδραση οπλισμού.
2. Οι αυτεπαγωγές των αγωγών του στάτη.
3. Οι αντιστάσεις των αγωγών του στάτη.
4. Το σχήμα των έκτυπων πόλων του δρομέα.

Εδώ θα αναλυθούν οι επιπτώσεις των τριών πρώτων παραγόντων, και οι επιπτώσεις του σχήματος των εκτύπων πόλων θα αγνοηθούν.

Ο πρώτος και πιο σημαντικός παράγοντας είναι η αντίδραση οπλισμού X_{ar} , που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η πτώση τάσης που προκαλεί είναι

ανάλογη του ρεύματος οπλισμού I_a , και έπεται αυτού κατά 90° . Η πτώση τάσης που οφείλεται σε αυτή είναι ίση με $E_{ar} = I_a jX_{ar}$.

Όμως εκτός από την αντίδραση οπλισμού, αυτεπαγωγές και ωμικές αντιστάσεις εμφανίζουν και τα ίδια τα τυλίγματα του στάτη. Συμβολίζοντας με X_l την αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη και με R_a την ωμική του αντίδραση, η διαφορά μεταξύ πολικής τάσης και ΑΗΕΔ γράφεται:

$$V_T = I_a R_a + I_a jX_l + I_a jX_{ar} + E_f \quad (2.4)$$

E_f , Τάση διέγερσης/φάση [V]

R_a , αντίσταση οπλισμού [Ω /φάση]

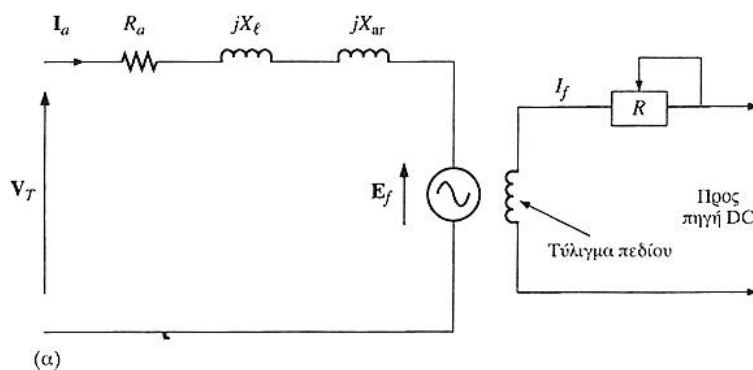
X_l , αντίδραση σκέδασης οπλισμού [Ω /φάση]

X_{ar} , φανταστική αντίδραση οπλισμού [Ω /φάση]

I_a , ρεύμα οπλισμού (A)

V_T , εφαρμοζόμενη τάση/φάση (V)

Το μοντέλο του ισοδύναμου κυκλώματος μιας φάσης του οπλισμού ενός σύγχρονου κινητήρα δίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όλες οι τιμές δίνονται ανά φάση. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων του Kirchhoff, $V_T = I_a R_a + I_a jX_l + I_a jX_{ar} + E_f$.



Σχήμα 2.2 Μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος για μια φάση του οπλισμού σύγχρονου κινητήρα

Καθώς οι αντιδράσεις οπλισμού και αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων του στάτη εκφράζονται μέσω αντιδράσεων, αυτές συνδυάζονται σε μια μόνο αντίδραση που καλείται σύγχρονη αντίδραση. Η σύγχρονη αντίδραση μιας μηχανής ορίζεται:

$$X_s = X_l + X_{ar} \quad (2.5)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.5) στην (2.4) έχω την εξίσωση:

$$V_T = I_a R_a + I_A j X_s + E_f. \quad (2.6)$$

Περαιτέρω απλοποίηση στον τύπο γίνεται με συγχώνευση των ωμικών και επαγωγικών αντιδράσεων του τυλίγματος οπλισμού σε μία σύγχρονη σύνθετη αντίσταση Z_s . Οπότε η σχέση γράφεται:

$$V_T = E_f + I_A Z_s \quad (2.7)$$

Όπου:

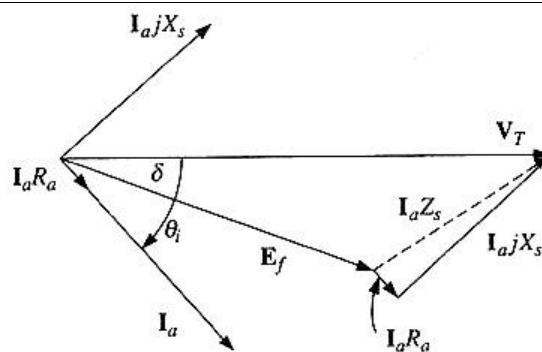
E_f , Τάση διέγερσης/φάση [V]

Z_s , σύγχρονη σύνθετη αντίσταση (Ω /φάση)

I_A , ρεύμα οπλισμού (A)

V_T , εφαρμοζόμενη τάση/φάση (V)

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι διανυσματικές συνιστώσες και πλήρης διανυσματικός υπολογισμός της V_T .



Σχήμα 2.3 Διανυσματικό διάγραμμα του ισοδύναμου κυκλώματος για μια φάση σύγχρονου κινητήρα

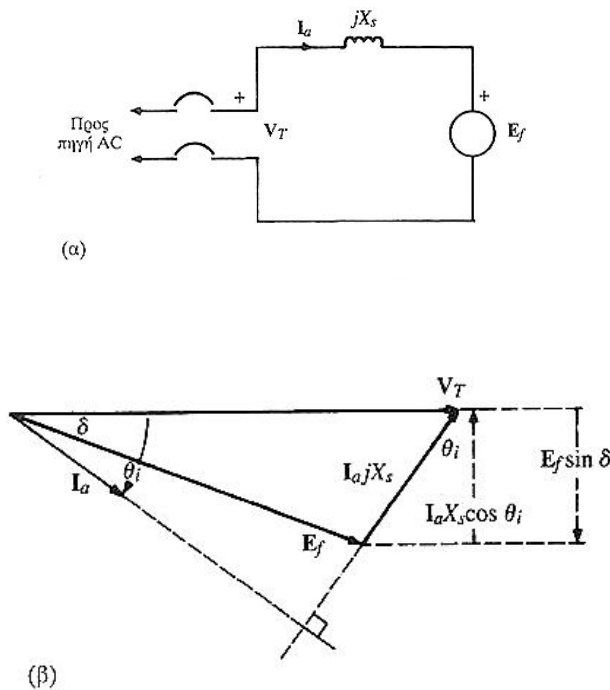
Η φασική γωνία δ της τάσης διέγερσης στο σχήμα είναι ίση με τη γωνία ροπής, είναι αυτή που αποκαλείται γωνία φορτίου ή γωνία ισχύος.

2.6 Εξίσωση ισχύος σύγχρονου κινητήρα.

Συνήθως η ωμική αντίσταση οπλισμού R_a ενός σύγχρονου κινητήρα είναι σχετικά ασήμαντη συγκρινόμενη με τη σύγχρονη αντίδρασή X_s , με αποτέλεσμα η εξίσωση (2.7) να μπορεί να προσεγγισθεί ικανοποιητικά ως εξής:

$$V_T = E_f + I_a j X_s \quad (2.8)$$

Παρατίθεται το ισοδύναμο κύκλωμα και το διανυσματικό διάγραμμα που αντιστοιχούν στην εξίσωση (2.8). Χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς των σύγχρονων κινητήρων καθώς ο κινητήρας ανταποκρίνεται στις μεταβολές του φορτίου και/ή στις μεταβολές της διέγερσης του πεδίου.



Σχήμα 2.4 (α) Ισοδύναμο κύκλωμα, (β) διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα όπου η ωμική αντίσταση οπλισμού λαμβάνεται ως αμελητέα.

Από τη γεωμετρία του παραπάνω σχήματος, και συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη πως δύο γωνίες, που οι πλευρές τους είναι κάθετες μεταξύ τους, είναι ίσες, λαμβάνεται η εξής σχέση:

$$I_a X_s \cos \theta_i = -E_f \sin \delta \quad (2.9)$$

Αν πολλαπλασιάσουμε τα δύο μέλη της εξίσωσης με V_T , και μεταφερθεί η σύγχρονη αντίδραση από το άλλο σκέλος:

$$V_T I_A \cos \theta_i = \frac{-V_T E_f}{X_s} \sin \delta \quad (2.10)$$

Το αριστερό σκέλος της εξίσωσης συνιστά έκφραση της ενεργού ισχύος εισόδου, επομένως:

$$P_{in,1\phi} = V_T I_a \cos \theta_i \quad (2.11)$$

ή

$$P_{in,1\phi} = \frac{-V_T E_f}{X_s} \sin \delta \quad (2.12)$$

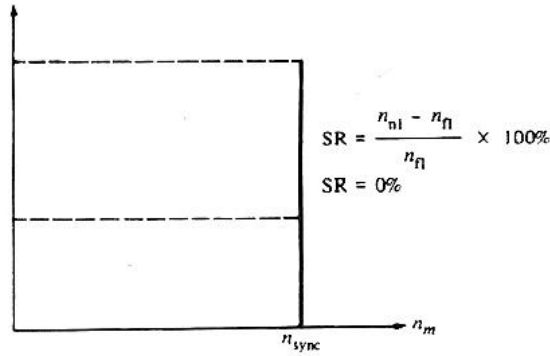
Συνεπώς για ένα τριφασικό σύγχρονο κινητήρα:

$$P_{in} = 3 \times V_T I_a \cos \theta_i = 3 \times \frac{-V_T E_f}{X_s} \sin \delta \quad (2.13)$$

Η σχέση (2.13) καλείται **εξίσωση ισχύος σύγχρονης μηχανής**. Φαίνεται πως για σταθερή πηγή τάσης και συχνότητας, η ισχύς ενός κινητήρα εκφράζεται συναρτήσει της τάσης διέγερσης και της γωνίας ισχύος, και μάλιστα βρίσκεται σε ευθεία αναλογία με τα μεγέθη αυτά.

2.7 Σύγχρονος κινητήρας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Οι σύγχρονοι κινητήρες τροφοδοτούν συνήθως φορτία που απαιτούν περιστροφή με σταθερή ταχύτητα. Καθώς ο κινητήρας συνδέεται στον άπειρο ζυγό, του οποίου η τάση και η συχνότητα παραμένουν σταθερές και ανεξάρτητες από την ισχύ στην έξοδο του κινητήρα. Τονίζεται πως η ταχύτητα του κινητήρα προσδιορίζεται από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας και δεν εξαρτάται καθόλου από το φορτίο του. Η χαρακτηριστική ροπής- ταχύτητας του σύγχρονου κινητήρα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα.

Παρατηρείται ότι η ταχύτητα ενός σύγχρονου κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι πάντα σταθερή, από το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο έως το σημείο της μέγιστης ροπής (ροπή ανατροπής).

Η εξίσωση της ροπής που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο στρεφόμενων πεδίων σε μια μηχανή εναλλασσομένου ρεύματος έχει βρεθεί να είναι η εξής:

$$\tau_{in} = kB_R \times B_S \quad (2.14)$$

$$\tau_{in} = kB_R B_S \sin \delta \quad (2.15)$$

Όπου:

τ_{in} , η επαγόμενη στρεπτική ροπή που αναπτύσσεται εσωτερικά της μηχανής από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα [Nm]

B_R , το μαγνητικό πεδίο του δρομέα [W]

B_S , το μαγνητικό πεδίο του στάτη [W]

k , σταθερά που εκφράζει τα μηχανικά στοιχεία του κινητήρα

Καθώς όμως η μετατρεπόμενη από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή ισχύς εκφράζεται ποσοτικά από τη σχέση (2.13) ως $P_{conv} = 3 \times \frac{V_T E_f}{X_S} \sin \delta$ και ισχύει πως για περιστρεφόμενο στοιχείο η ισχύς, δίνεται συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας και της στρεπτικής ροπής από τον τύπο, $P = \tau \times \omega$, βγαίνει η σχέση για τη ροπή του σύγχρονου κινητήρα,

$$\tau_{ind} = 3 \times \frac{V_T E_f \sin \delta}{\omega_m X_S} \quad (2.16)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η μέγιστη ροπή αναπτύσσεται όταν $\delta=90^\circ$ οπότε $\sin \delta = 1$, αν και η ροπή ενός πραγματικού κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι δύο με τρεις φορές μικρότερη από τη μέγιστη ροπή. Αν η ροπή του κινητήρα ξεπεράσει την ροπή ανατροπής, το πεδίο του στάτη και το συνολικό μαγνητικό πεδίο B_{net} , δε μπορούν πλέον να συγκρατήσουν το δρομέα της μηχανής. Ο δρομέας αρχίζει να επιβραδύνεται και το πεδίο του μένει πολύ πίσω από το πεδίο του στάτη. Ειδικότερα, κάθε φορά που το πεδίο του στάτη υπερβαίνει κατά μια περιστροφή το πεδίο του δρομέα, η φορά της επαγόμενης ροπής αλλάζει πρόσημο. Αυτές οι απότομες και πολύ μεγάλες αλλαγές στη ροπή προκαλούν ισχυρές δονήσεις στον κινητήρα και αναφέρονται ως απώλειες συγχρονισμού. Αν δεν αποσυνδεθεί ο κινητήρας σε αυτό το σημείο θα έχουμε την καταστροφή του καθώς θα δέχεται στην είσοδό του ενέργεια που δε θα μπορεί να μετατρέψει σε μηχανική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή θα μετατραπεί σε θερμότητα που θα οδηγήσει τελικά στην κατάρρευσή του.

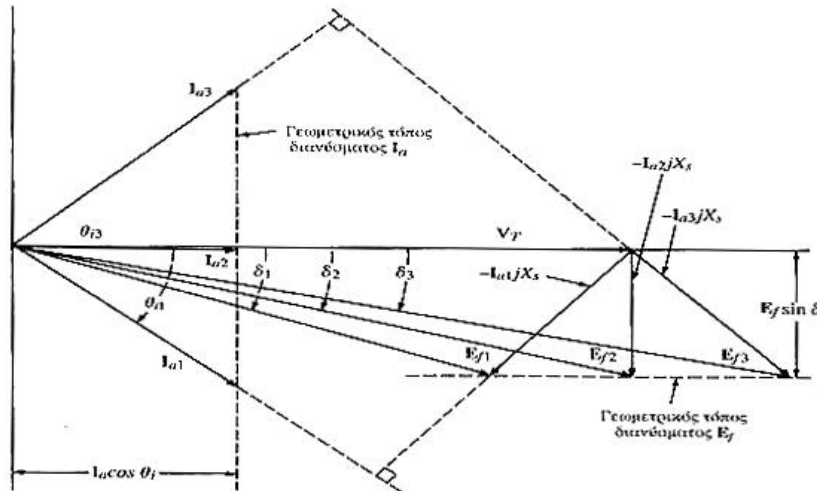
Επίσης από την εξίσωση (2.16) φαίνεται, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα διέγερσης I_f , οπότε και η ΑΗΕΔ E_f , τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη ροπή που παράγεται. Το συμπέρασμα είναι πως για μεγάλο ρεύμα διέγερσης η λειτουργία του κινητήρα γίνεται πιο ευσταθής.

2.8 Επίδραση των μεταβολών του ρεύματος διέγερσης σε έναν σύγχρονο κινητήρα

Έχει αποδειχθεί από τη σχέση (2.1) ότι η τάση διεγέρσεως εξαρτάται μονάχα από τη περιστρεφόμενη μαγνητική ροή πεδίου Φ_f η οποία με τη σειρά της εξαρτάται μονάχα από την ένταση του συνεχούς ρεύματος I_f που τροφοδοτείται ο στάτης. Οποιαδήποτε αύξηση του ρεύματος διέγερσης προκαλεί αύξηση της τάσης διεγέρσεως E_f , αλλά να σημειωθεί πως η ισχύς εξόδου του κινητήρα δεν επηρεάζεται καθόλου. Η ισχύς εξόδου μεταβάλλεται μόνο με τη μεταβολή της ροπής φορτίου. Καθώς η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης δε μεταβάλλει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, ενώ η ροπή του φορτίου θεωρείται σταθερή είναι προφανές ότι η ισχύς εξόδου του δεν αλλάζει καθόλου. Επίσης η τάση εισόδου V_T είναι σταθερή αφού η τροφοδοσία του στάτη παραμένει σταθερή.

Υποθέτοντας ένα σταθερό φορτίο η ισχύς του κινητήρα παραμένει σταθερή. Αυτό σημαίνει, και συμπεραίνεται και από την εξίσωση ισχύος (2.13), πως η τιμή του

$E_f \sin \delta$ παραμένει σταθερή. Μικρή αύξηση στη τάση διεγέρσεως, προκαλεί μια προσωρινή αύξηση του $E_f \sin \delta$ και ο δρομέας επιταχύνει. Για να μπορεί όμως η αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα να παραμείνει σταθερή, ο δρομέας αλλάζει τη γωνιακή του θέση, η γωνία ροπής δ αυξάνει μέχρι το $E_f \sin \delta$ να έχει την ίδια τιμή μόνιμης κατάστασης, οπότε και ο δρομέας λειτουργεί και πάλι στη σύγχρονη ταχύτητα. Οι μεταβολές στις γωνιακές θέσεις μεταξύ δρομέα και περιστρεφόμενης ροής στάτη, γίνονται σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Το παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα παραθέτει την επίδραση μεταβολών στη διέγερση πεδίου.



Σχήμα 2.6 Διανυσματικό διάγραμμα που δείχνει την επίδραση των μεταβολών στη διέγερση πεδίου του ρεύματος οπλισμού.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του άκρου του διανύσματος E_f είναι μια ευθεία παράλληλη στο διάνυσμα V_T .

$$E_{f1} \sin \delta_1 = E_{f2} \sin \delta_2 = E_{f3} \sin \delta_3 = E_f \sin \delta$$

Όμοια από την εξίσωση ισχύος συνεπάγεται:

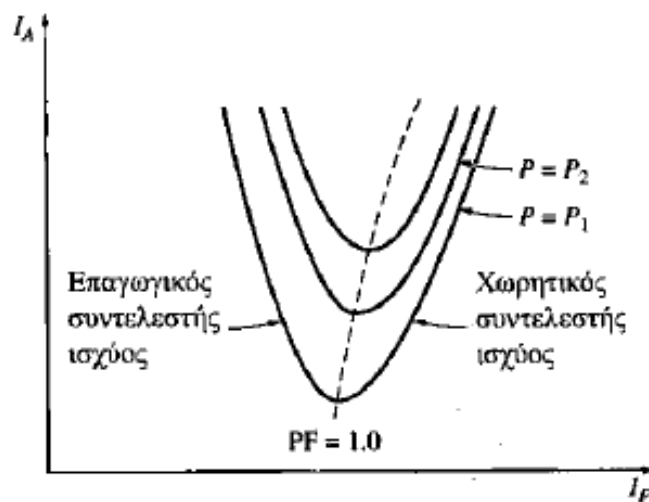
$$I_{a1} \cos \theta_{i1} = I_{a2} \cos \theta_{i2} = I_{a3} \cos \theta_{i3} = I_a \cos \theta_i$$

Η παραπάνω σχέση εκφράζεται σχηματικά στο διάγραμμα, όπου ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του ρεύματος στάτη, είναι μια ευθεία κάθετη στο διάνυσμα V_T .

Γενικά παρατηρείται ότι καθώς η E_f αυξάνεται, το ρεύμα οπλισμού I_a αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται ξανά. Όταν η E_f παίρνει μικρές τιμές το ρεύμα του οπλισμού είναι επαγωγικό και ο κινητήρας είναι, για το δίκτυο που τροφοδοτεί, ένα επαγωγικό φορτίο που καταναλώνει άεργο ισχύ Q . Σε αυτές τις συνθήκες λέμε

πως ο κινητήρας λειτουργεί με υποδιέγερση. Με τη συνεχόμενη αύξηση του ρεύματος I_f , θα έρθει η στιγμή όπου στο διανυσματικό διάγραμμα το ρεύμα I_a και η τάση V_T θα ευθυγραμμιστούν και ο κινητήρας θα φαίνεται σαν ωμικό φορτίο. Τέλος ακόμη μεγαλύτερη αύξηση του ρεύματος διέγερσης μετατρέπει το ρεύμα οπλισμού του κινητήρα σε χωρητικό και τον ίδιο τον κινητήρα σε χωρητικό φορτίο που προσφέρει άεργο ισχύ στο δίκτυο τροφοδοσίας του. Στην κατάσταση αυτή λέμε πως ο κινητήρας λειτουργεί με υπερδιέγερση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, σε κατάσταση υπερδιέγερσης, $|E_f| > |V_T|$.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η V χαρακτηριστική καμπύλη του σύγχρονου κινητήρα η οποία παρουσιάζει το ρεύμα οπλισμού I_a συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης I_f . Οι V χαρακτηριστικές ενός κινητήρα είναι άπειρες και η καθεμία τους αντιστοιχεί σε διαφορετικό ποσοστό κατανάλωσης ενεργού ισχύος. Στο χαμηλότερο σημείο της καμπύλης αυτής δηλαδή στο ελάχιστο ρεύμα οπλισμού αντιστοιχίζεται η περίπτωση που ο κινητήρας καταναλώνει αποκλειστικά άεργο ισχύ.



Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη που εμφανίζει το ρεύμα οπλισμού σε σχέση με τις μεταβολές στο ρεύμα διέγερσης.

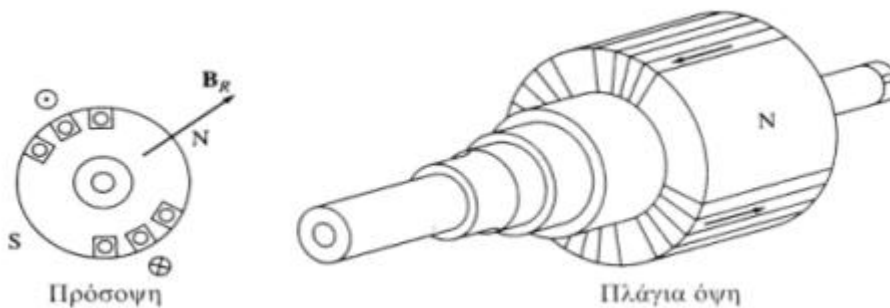
Συμπεραίνεται πως ρυθμίζοντας το ρεύμα διέγερσης I_f μπορούμε να ρυθμίσουμε την άεργο ισχύ που παρέχει ή καταναλώνει από το δίκτυο ένας σύγχρονος κινητήρας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Σύγχρονη γεννήτρια

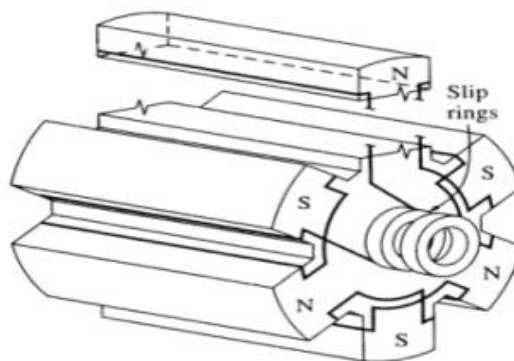
3.1 Αρχή λειτουργίας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες, γνωστές και ως εναλλακτήρες, ή γεννήτριες AC, συνιστούν τις κύριες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο και κυμαίνονται σε μέγεθος από κλάσματα kVA έως 1500 MVA. Η κατασκευή τους είναι ίδια με αυτή των σύγχρονων κινητήρων, καθώς η ουσιαστική διαφοροποίηση είναι στη ροή μετατροπής ενέργειας. Η γεννήτρια αντίθετα από τον κινητήρα μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ισχύ. Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητων μεταξύ τους, αυτού του τυλίγματος διέγερσης με το αντίστοιχο του επαγωγικού τυλίγματος.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία της γεννήτριας είναι η τροφοδοσία του κυλινδρικού δρομέα με συνεχές ρεύμα από εξωτερική πηγή και η περιστροφή του από εξωτερική κινητήρια δύναμη, όπως ένας ατμοστρόβιλος, με αποτέλεσμα να γίνεται ένας περιστρεφόμενος ηλεκτρομαγνήτης.



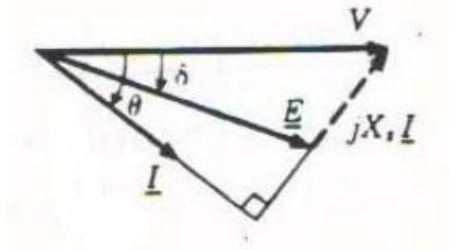
Σχήμα 3.1 Κυλινδρικός δρομέας σύγχρονης γεννήτριας δύο πόλων



Σχήμα 3.2 Δρομέας εκτύπων πόλων σύγχρονης γεννήτριας έξι πόλων

3.2 Μετάβαση από κινητήρα σε γεννήτρια.

Η σύγχρονη μηχανή είναι συνδεδεμένη με τον άπειρο ζυγό, ενώ ο δρομέας τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και περιστρέφεται από μια εξωτερική παροχή στρεπτικής ισχύος. Το διανυσματικό διάγραμμα παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα σύμφωνα με όσα είναι γνωστά για τους σύγχρονους κινητήρες.



Σχήμα 3.3 Διανυσματικό διάγραμμα μιας φάσης σύγχρονου κινητήρα

Ισχύει η σχέση

$$V_T = E_f + I_a jX_s \quad (3.1)$$

Όπου:

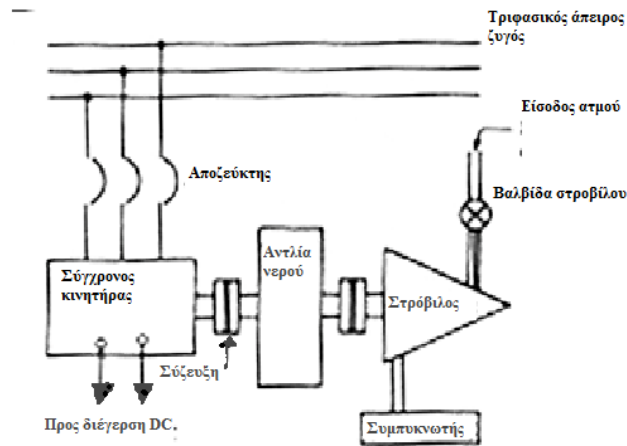
E_f , Τάση διέγερσης/φάση [V]

X_s , σύγχρονη αντίδραση [Ω /φάση]

I_a , ρεύμα οπλισμού [A]

V_T , εφαρμοζόμενη τάση/φάση [V]

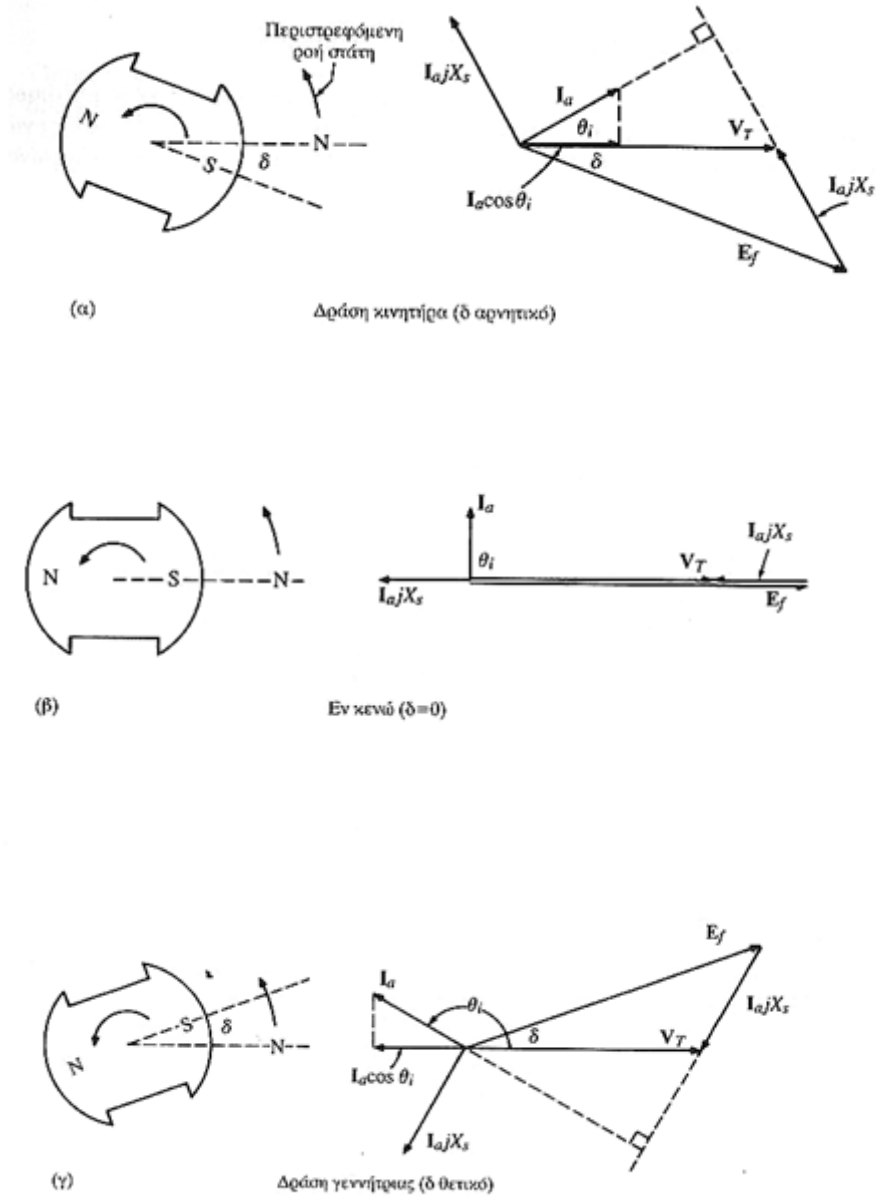
Παρατίθεται το παράδειγμα όπου ένας σύγχρονος κινητήρας είναι συνδεδεμένος με τον άπειρο ζυγό, και ο άξονάς του είναι συνδεδεμένος με ένα σύστημα παροχής στρεπτικής ροπής, όπου στη περίπτωση συνίσταται από μια αντλία νερού και ένα στρόβιλο. Η σχεδίαση είναι τέτοια ώστε ο στρόβιλος να στρέφεται με την ίδια φορά με αυτή του σύγχρονου κινητήρα. Όταν η βαλβίδα είναι κλειστή, και δε προσκρούει καθόλου ατμός στα περύγια του στροβίλου, η ο κινητήρας οδηγεί την αντλία και το στρόβιλο σε σύγχρονη ταχύτητα.



Σχήμα 3.4 Σύγχρονος κινητήρας συζευγμένος με σύστημα παροχής μηχανικής ενέργειας (αντλία νερού-ατμοστρόβιλος)

Η εισαγωγή μικρής ποσότητας ατμού στο ατμοστρόβιλο, ανοίγοντας σταδιακά τη βαλβίδα του έχει αποτέλεσμα ο ατμοστρόβιλος να αναλαμβάνει μέρος του φορτίου που σηκώνει ο κινητήρας, που συνεπάγεται μείωση της γωνίας ισχύος του κινητήρα. Αν η εισροή ατμού αυξηθεί με το άνοιγμα της βαλβίδας, ο ατμοστρόβιλος θα μεταφέρει ολόκληρο το φορτίο του κινητήρα, με αποτέλεσμα ο δεύτερος να λειτουργεί εν κενώ και η γωνία ισχύος να είναι μηδενική. Περαιτέρω αύξηση στην εισροή ατμού θα επιφέρει αύξηση στη γωνία ισχύος προς τη θετική κατεύθυνση. Να σημειωθεί πως καθ' όλη τη πορεία μετάβασης από δράση κινητήρα σε δράση γεννήτριας, η μηχανή περιστρέφεται στη σύγχρονή της ταχύτητα.

Στο παρακάτω σχήμα, δίνονται στροβοσκοπικά στιγμιότυπα ενός διπολικού δρομέα, και τα αντίστοιχα διανυσματικά διαγράμματα, για δράση κινητήρα, για εν-κενώ λειτουργία καθώς και για δράση γεννήτριας.



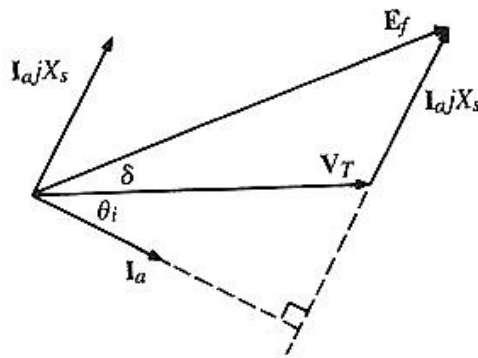
Σχήμα 3.5 Θέση δρομέα σε σχέση με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα για κάθε μία από τις τρεις καταστάσεις λειτουργίας.

Όταν η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας (γωνία ισχύος δ αρνητική), οδηγείται από την τάση του κοινού ζυγού και η τάση διέγερσης E_f είναι μια ΑΗΕΔ και είναι μικρότερη από την πολική τάση V_T , όπως έχει ήδη αναλυθεί και η μηχανή απορροφά ισχύ. Όταν η μηχανή λειτουργεί εν κενώ η γωνία ισχύος δ είναι μηδενική και το μέτρο της τάσης διέγερσης E_f είναι ίσο με την $|V_T + I_A j X_S|$. Ομως όταν η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, η γωνία ισχύος δ , είναι θετική και η τάση διέγερσης E_f γίνεται πηγή τάσης, και αντιστρέφεται η ενεργή συνιστώσα του ρεύματος $I_A j X_S$

3.3 Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας.

Το διανυσματικό διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της διαδικασίας εκκίνηση για τη σύγχρονη γεννήτρια, μολονότι σωστό, δε χρησιμοποιείται σε αυτή τη μορφή κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς μιας σύγχρονης γεννήτριας, γιατί τότε θα έπρεπε να δουλεύουμε με αρνητικό συντελεστή ισχύος. Όταν πρόκειται για σύγχρονη γεννήτρια, η τάση διέγερσης E_f συμπεριφέρεται ως πηγή τάσης ενώ η τάση του κοινού ζυγού V_T συμπεριφέρεται ως πτώση τάσης. Οι μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν τα φυσικά μεγέθη που περιγράφουν τη λειτουργία μιας γεννήτριας μεταφέρονται αυτούσιες από τη μελέτη του σύγχρονου κινητήρα με μόνη διαφορά τη φορά του ρεύματος οπλισμού I_a .

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται το διανυσματικό διάγραμμα που προτιμάται για τη μελέτη σύγχρονης γεννήτριας.



Σχήμα 3.6 Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας

$$V_T = E_F - I_a j X_s \quad (3.1)$$

Όπου:

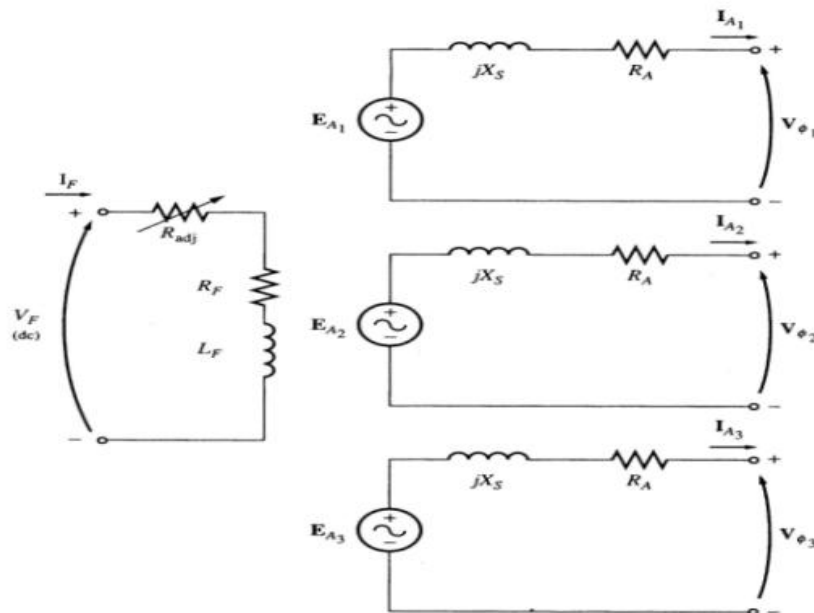
$$V_T = \text{τάση εξόδου/φάση [V]}$$

$$E_F = \text{τάση διέγερσης/φάση [V]}$$

$$I_a = \text{ρεύμα οπλισμού/φάση [A]}$$

$$X_s = \text{σύγχρονη αντίδραση/φάση [\Omega]}$$

Η διαφορά μεταξύ της εξίσωσης για δράση κινητήρα και της εξίσωσης (3.1) είναι η αντιστροφή του ρεύματος οπλισμού I_a . Η επαγόμενη τάση E_f , που εμφανίζεται στα άκρα κάθε φάσης της γεννήτριας σπάνια ισούται με την τάση στους ακροδέκτες V_T λόγω της αντίδρασης οπλισμού που εμφανίζεται όταν ρεύμα διαρρέει το τύλιγμα οπλισμού.



Σχήμα 3.7 Πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας

Η αντίδραση οπλισμού οφείλεται στο ρεύμα I_a που διαρρέει το κύκλωμα του στάτη όταν κάποιο φορτίο είναι συνδεδεμένο με τη γεννήτρια. Το ρεύμα αυτό, όπως κάθε ρεύμα, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο και αλληλεπιδρά με το αρχικό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Στην περίπτωση όπου η μηχανή δεν έχει συνδεδεμένο φορτίο, η παραγόμενη τάση οφείλεται αποκλειστικά στο πεδίο του δρομέα οπότε το ρεύμα οπλισμού I_a θα είναι μηδενικό και η τάση στους ακροδέκτες θα είναι ίση με $V_T = E_f$. Στην περίπτωση όμως, όπου έχω συνδεδεμένο φορτίο, η τάση που θα εμφανίζεται στους ακροδέκτες της μηχανής θα είναι V_T , μικρότερη από την E_f .

3.4 Εξίσωση ισχύος σύγχρονης γεννήτριας.

Οι εξισώσεις που αναφέρονται στην ισχύ εισόδου για ένα σύγχρονο κινητήρα, έχουν εφαρμογή και στις σύγχρονες γεννήτριες. Η μόνη διαφορά έγκειται στη φορά της ηλεκτρικής ισχύος. Οπότε:

$$P_{in,1\varphi} = \frac{-V_T E_f}{X_s} \sin \delta \text{ (δράση κινητήρα)} \quad (3.3)$$

$$P_{out,1\varphi} = \frac{+V_T E_f}{X_s} \sin \delta \text{ (δράση γεννήτριας)} \quad (3.4)$$

3.5 Φορτίο-συντελεστής ισχύος.

Η τάση στους ακροδέκτες μιας γεννήτριας επηρεάζεται σημαντικά από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου. Η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία των δικτύων που υποστηρίζονται από μια εναλλασσόμενη γεννήτρια, ωμικά, επαγωγικά και χωρητικά φορτία, έχει ως αποτέλεσμα ένα μέσο συντελεστή ισχύος 80% επαγωγικό. Εάν ένας εναλλακτήρας έχει σχεδιαστεί για να τροφοδοτεί μόνο ένα φορτίο μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, η τάση γεννήτριας που θα αναφέρεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του θα αντιστοιχεί στην τιμή των ονομαστικών kVA με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Η ενέργεια που τροφοδοτείται σε μία γεννήτρια από μια κινητήρια μηχανή, πρέπει να επαρκεί για να καλύψει το ηλεκτρικό φορτίο που η γεννήτρια τροφοδοτεί. Μία γεννήτρια μπορεί να μεταφέρει τα ίδια kVA ισχύος για διαφορετικές τιμές συντελεστή ισχύος, η κινητήρια μηχανή τροφοδοτεί όμως μόνο ενεργό ισχύ. Στις συνήθεις συνθήκες όπου μια γεννήτρια τροφοδοτεί δίκτυο με συντελεστή ισχύος 80% επαγωγικό, η μέγιστη ισχύς που θα απαιτηθεί από την κινητήρια μηχανή θα ισούται με τα ονομαστικά kVA της μηχανής επί το συντελεστή ισχύος 0,80. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως δεν απαιτείται η εγκατάσταση μιας κινητήριας μηχανής αρκετά μεγάλης ώστε να παρέχει τα ονομαστικά kVA σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Κεφάλαιο 4 Παραλληλισμός γεννητριών.

4.1 Γενικές αρχές.

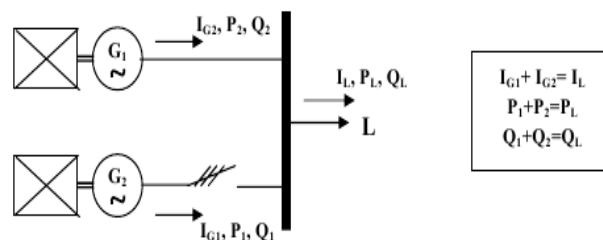
Η πιο συνηθισμένη περίπτωση χρήσης μιας γεννήτριας είναι η παράλληλη σύνδεση δύο ή περισσότερων σύγχρονων γεννητριών για την τροφοδοσία φορτίων. Δύο ή περισσότερες γεννήτριες που λειτουργούν παράλληλα, παρέχουν οικονομία λειτουργίας και ευελιξία στον προγραμματισμό εργασιών συντήρησης, καθώς μπορεί να απομακρυνθεί μία γεννήτρια από το δίκτυο χωρίς επιπτώσεις. Ομοίως καθώς το φορτίο του ζυγού μειώνεται, μία ή περισσότερες μηχανές μπορούν να αποσυνδεθούν από τον άπειρο ζυγό, επιτρέποντας στις υπόλοιπες μηχανές να λειτουργούν με υψηλότερες αποδόσεις. Για να πληρούνται οι προϋποθέσεις παραλληλισμούς ώστε να μην προκληθεί κάποια βλάβη στις γεννήτριες ή έχω διακοπή της τροφοδοσίας του φορτίου, πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις.

- Τα πλάτη των πολικών τάσεων στα άκρα των γεννητριών να είναι τα ίδια
- Η διαδοχή των φάσεων να είναι η ίδια
- Να μην υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων τάσεων
- Η συχνότητα των γεννητριών να είναι η ίδια.

Οι προς παραλληλισμό μηχανές πρέπει να έχουν την ίδια διαδοχή φάσης γιατί σε αντίθετη περίπτωση θα υπάρξει σοβαρή ζημιά στις μηχανές και στον περιφερειακό εξοπλισμό. Οι περισσότεροι σύγχρονοι σταθμοί παραγωγής έχουν αυτόματους συγχρονιστές οι οποίοι αυτόματα συγχρονίζουν τη γεννήτρια με το ζυγό.

4.2 Διαδικασία παραλληλισμού.

Στο παρακάτω σχήμα έχω δύο γεννήτριες που τροφοδοτούν ένα σύστημα καταναλωτών.



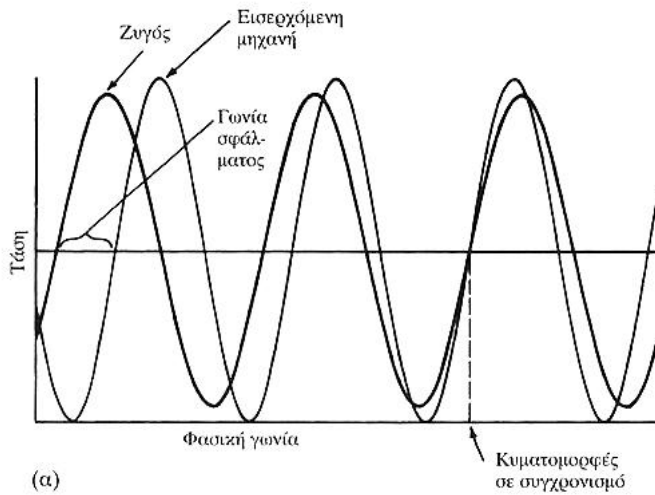
Σχήμα 4.1 Απλοποιημένο μονογραμμικό διάγραμμα για σύστημα δύο γεννητριών

Η γεννήτρια G1, η οποία είναι συνδεδεμένη με έναν κινητήρα που της παρέχει τη μηχανική ισχύ, αποδίδει ενεργό και άεργο ισχύ σε ένα σύστημα καταναλωτών. Έστω η γεννήτρια G2 που πρόκειται να συνδεθεί στο σύστημα. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής.

1. Ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας προς παραλληλισμό (G2) ,ενώ ταυτόχρονα μετριέται η πολική τάση V_T , στην έξοδό της ώστε να είναι ίση με την αντίστοιχη πολική τάση της γεννήτριας G1 και του άπειρου ζυγού.
2. Συγκρίνεται η σειρά διαδοχής των φάσεων των δύο γεννητριών χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Μία από αυτές είναι και η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε και στο πείραμα, συνδέοντας τρεις λάμπες φωτισμού στα άκρα του ανοιχτού διακόπτη.
3. Ρυθμίζεται η συχνότητα της προς παραλληλισμό γεννήτριας έτσι ώστε να είναι λίγο μεγαλύτερη από τη συχνότητα της υπάρχουσας γεννήτριας και του άπειρου ζυγού.

Η γεννήτρια G2 συνδέεται όταν κλείνει ο διακόπτης, εκείνη τη στιγμή οι τάσεις των δύο γεννητριών είναι ίδιες οπότε θα αλληλοακυρώνονται, και η τάση στους ακροδέκτες του διακόπτη θα είναι μηδενική. Οι δύο γεννήτριες θα κλειδώσουν σε περιστροφικό συγχρονισμό. Η κυματομορφή τάσης της εισερχόμενης μηχανής τη στιγμή που κλείνει ο αποζεύκτης κυκλώματος, είναι συμφασική με την τάση του ζυγού.

Η συχνότητα της εισερχόμενης τάσης πρέπει να είναι ένα κλάσμα του Hz υψηλότερη από την συχνότητα του ζυγού, ώστε να διασφαλιστεί ότι θα μπορεί να αναλάβει φορτίο τη στιγμή που θα παραλληλιστεί. Αν δεν ισχύει αυτή η συνθήκη, και η συχνότητα της εισερχόμενης μηχανής είναι χαμηλότερη από τη συχνότητα του ζυγού, η γεννήτρια θα δράσει ως κινητήρας τη στιγμή που θα κλείσει ο αποζεύκτης του κυκλώματος. Αυτή η συνθήκη φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, όπου η κυματομορφή της εισερχόμενης τάσης ολισθαίνει πίσω από την κυματομορφή τάσης του ζυγού.



Σχήμα 4.2 Κυματομορφές τάσης του ζυγού και της εισερχόμενης γεννήτριας, με την εισερχόμενη μηχανή σε ελαφρώς υψηλότερη τάση και ελαφρώς υψηλότερη συχνότητα.

4.3 Καμπύλες συχνότητας–ισχύος, και, πολικής τάσης–άεργης ισχύος.

Η πηγή μηχανικής ενέργεια μιας γεννήτριας είναι η κινητήρια μηχανή της που μπορεί να είναι ένας αμοστρόβιλος, ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης ή κάποια άλλη πηγή παροχής. Ανεξάρτητα από το είδος τους, οι μηχανές αυτές παρουσιάζουν παρόμοιο τρόπο συμπεριφοράς. Η αύξηση της ισχύος που προσφέρουν στη γεννήτρια προκαλεί μείωση της ταχύτητας περιστροφής της. Η μείωση αυτή δεν είναι κατά κανόνα γραμμική, αλλά συνήθως εισάγεται στο σύστημα ένας μηχανισμός ελέγχου που κάνει τη μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη να γίνεται ομαλά.

Ο μηχανισμός αυτός έχει τη δυνατότητα να δίνει στην ταχύτητα της κινητήριας μηχανής κάποια φθίνουσα χαρακτηριστική με μικρή κλίση, καθώς το φορτίο της γεννήτριας αυξάνεται. Αυτή η πτώση ταχύτητας της κινητήριας μηχανής περιγράφεται από την εξίσωση.

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Όπου:

n_{nl} , η ταχύτητα της γεννήτριας χωρίς φορτίο [r/min]

n_{fl} , η ταχύτητα της γεννήτριας υπό πλήρες φορτίο [r/min]

Στις περισσότερες των περιπτώσεων η πτώση της ταχύτητας των γεννητριών, είναι 2% με 4%.

Καθώς η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας συνδέεται με την ηλεκτρική της συχνότητα μέσω της σχέσης (1.15) $f_e = \frac{n_m P}{120}$, συνεπάγεται πως και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας θα συνδέεται με την ηλεκτρική της συχνότητα. Η σχέση μεταξύ ισχύος και ηλεκτρικής συχνότητας εκφράζεται ποσοτικά με την εξίσωση.

$$P = S_P(f_{nl} - f_{sys}) \quad (4.2)$$

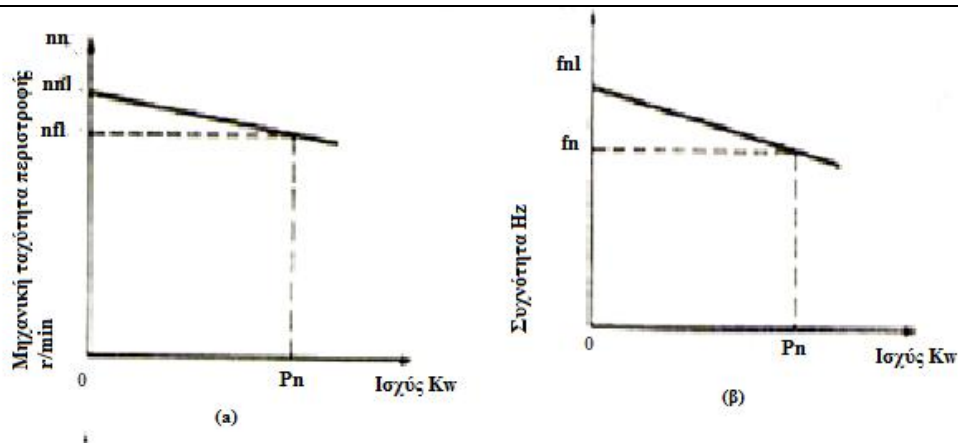
Όπου:

P , η ισχύς εξόδου της γεννήτριας [Kw ή Mw]

S_P , η κλίση της καμπύλης [kw/Hz ή σε MW/Hz]

f_{nl} , η συχνότητα της γεννήτριας που αντιστοιχεί στη λειτουργία χωρίς φορτίο [r/min]

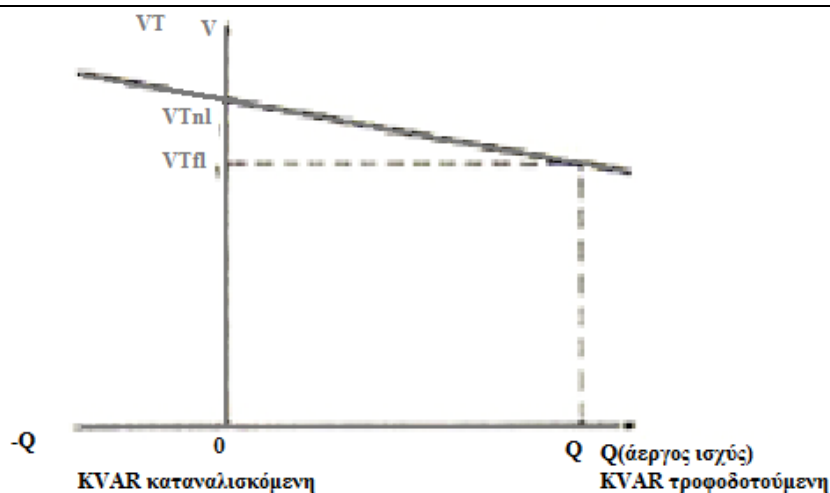
f_{sys} , η συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας [r/min]



Σχήμα 4.3 (α) Χαρακτηριστική ταχύτητας-ισχύος, (β) χαρακτηριστική συχνοτητας-ισχύος

Η κλίση της καμπύλης καλείται, **βαθμός αναλογίας** ή **στατισμός**. Μια παρόμοια εξίσωση περιγράφει τη σχέση άεργης ισχύος-πολικής τάσης V_T . Η εισαγωγή επαγωγικού φορτίου στα άκρα μιας γεννήτριας επιφέρει μείωση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας ενώ η εισαγωγή χωρητικού φορτίου αυξάνει την τάση στα άκρα της γεννήτριας. Είναι δυνατόν να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της άεργης ισχύος

συναρτήσει της τάσης V_T , η οποία θα είναι φθίνουσα όπως ακριβώς αυτή μεταξύ της ισχύος και της συχνότητας.

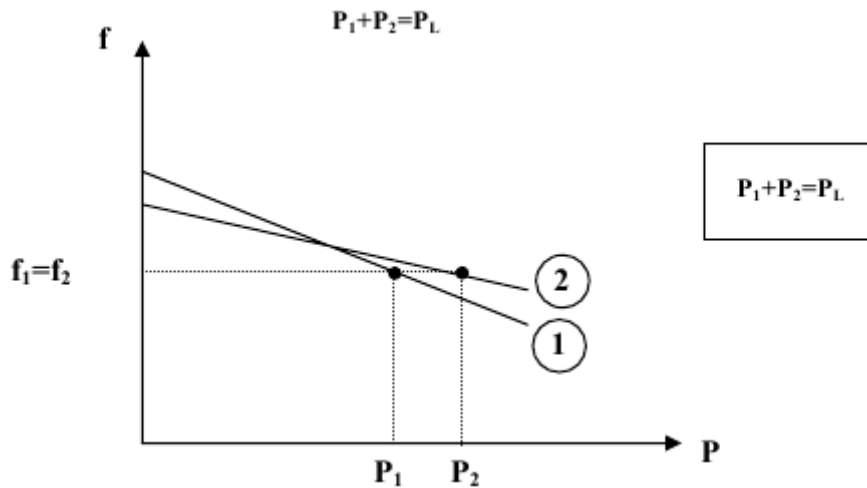


Σχήμα 4.4 Χαρακτηριστική πολικής τάσης-άεργης ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Αυτή η χαρακτηριστική δεν είναι απαραίτητα γραμμική αλλά συνήθως οι σταθεροποιητές τάσης που συνεργάζονται με τις γεννήτριες μπορούν να προσφέρουν αυτή τη δυνατότητα. Η μετακίνηση της παραπάνω καμπύλης προς τα πάνω ή προς τα κάτω γίνεται με τη μεταβολή της τάσης της γεννήτριας στην αφόρτιστη λειτουργία. Οι χαρακτηριστικές ισχύος-συχνότητας και άεργης ισχύος-πολικής τάσης είναι σημαντικές κατά την παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών.

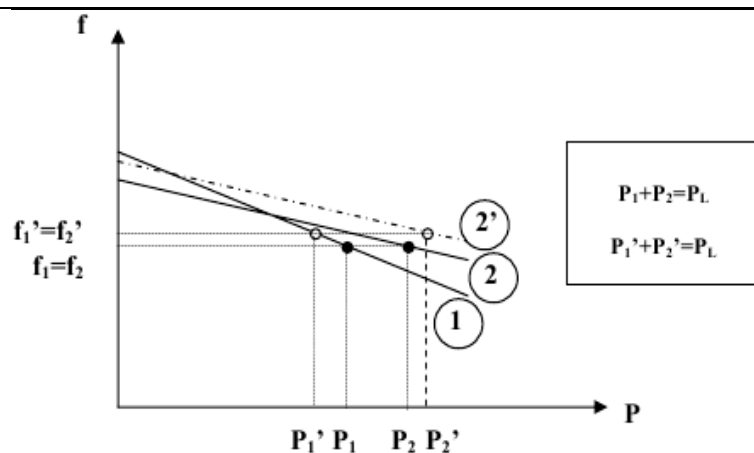
Πρέπει να επισημανθεί πως στην αυτόνομη λειτουργία μιας γεννήτριας, η ενεργός και η άεργος ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας εξαρτώνται αποκλειστικά από το φορτίο. Στο παραλληλισμό δύο ή περισσότερων γεννητριών, είναι δυνατός ο έλεγχος της συνολικής ισχύος που παρέχει η κάθε γεννήτρια. Σε αυτή την περίπτωση, μεταβάλλοντας την συχνότητα λειτουργίας της γεννήτριας μεταβάλλεται η ενεργός ισχύς που παρέχει, ενώ μέσω του ρεύματος διέγερσης ελέγχεται η άεργος ισχύς που παρέχει.

Κατά την παράλληλη λειτουργία των δύο γεννητριών, η τάση και η συχνότητα είναι κοινή, και συνιστούν την τάση και συχνότητα του δικτύου. Γνωρίζοντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες των δύο γεννητριών υπολογίζεται η κοινή τάση και συχνότητα που θα έχουν για το απαιτούμενο φορτίο.



Σχήμα 4.3 Χαρακτηριστικές συχνότητας-ισχύος γεννητριών σε παραλληλισμό.

Στην περίπτωση αύξησης της αποδιδόμενης ισχύς στους καταναλωτές από μέρος της μίας γεννήτριας, χωρίς να αλλάζει η συνολικά απορροφημένη ισχύς από το δίκτυο, οδηγεί σε συγχρονισμό των γεννητριών σε νέα τιμή συχνότητας.



Σχήμα 4.4 Συγχρονισμός των δύο γεννητριών σε νέα τιμή συχνότητας

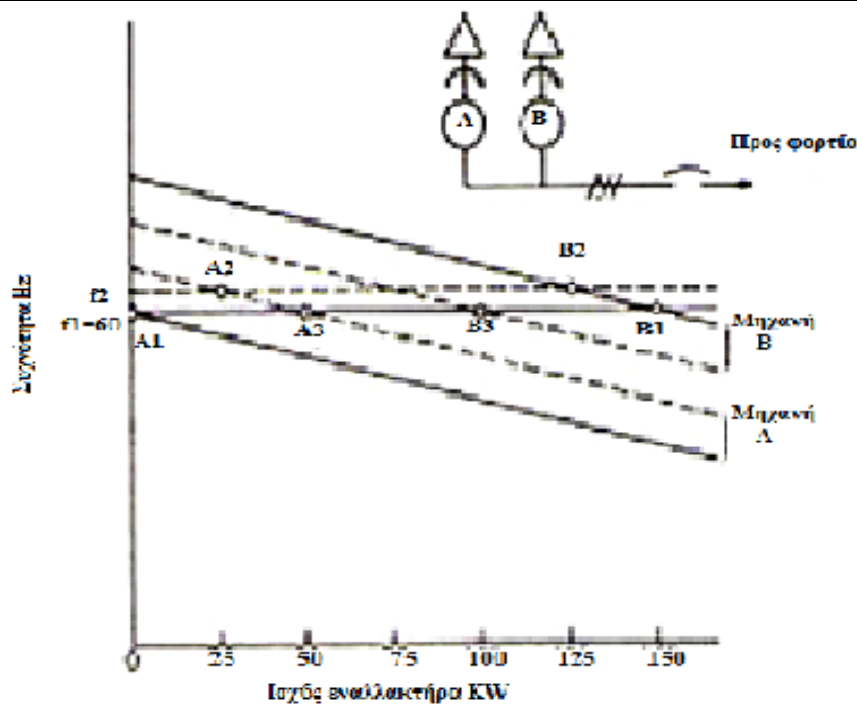
4.4 Μεταβίβαση ισχύος μεταξύ παραλληλισμένων γεννητριών.

Αν είναι γνωστές οι κλίσεις των καμπύλων συχνότητας-ισχύος 'f-P' και οι συχνότητες αφόρτιστης λειτουργίας των χαρακτηριστικών ενεργού ισχύος-συχνότητας των δύο γεννητριών, τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός της ενεργού και άεργου ισχύος που προσφέρει η κάθε μία. Η μεταβίβαση ενεργούς ισχύος από τη μία καμπύλη στην άλλη, συντελείται με εκατέρωθεν παράλληλη μετατόπιση των καμπύλων συχνότητας-ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ρύθμισης της τιμής που

συχνότητα στην καινούργια κοινή χαρακτηριστική που εξασφαλίζει ότι η συνολικά προσφερόμενη ισχύ θα είναι ίση με την απαιτούμενη, στην καινούρια συχνότητα η δεύτερη γεννήτρια θα πρέπει και αυτή να αλλάξει το ποσό προσφερόμενης ισχύος.

Ο επιμερισμός του φορτίου που τοποθετείται στο ζυγό μεταξύ των γεννητριών σε παραλληλισμό καθορίζεται από τις κλίσεις των χαρακτηριστικών καμπύλων συχνότητας-ισχύος. Για να μεταφερθεί ένα μέρος του φορτίου από μια γεννήτρια στην άλλη απαιτείται μετατόπιση ενέργειας μεταξύ των κινητήριων μηχανών τους. Η γεννήτρια που αναλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου στο ζυγό, θα έχει μεγαλύτερη εισερχόμενη ενέργεια από την κινητήρια μηχανή της. Αυτό επιτυγχάνεται με ανύψωση της εν-κενώ σύγχρονης ταχύτητάς. Ομοίως η γεννήτρια που πρέπει να χάσει μέρος του φορτίου, θα δεχθεί λιγότερη ενέργεια από το στρόβιλο που κινεί τον άξονά της, και αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της εν-κενώ σύγχρονης ταχύτητάς της.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται γραφικά η μεταφορά φορτίου μεταξύ δύο γεννητριών, με όμοιες χαρακτηριστικές. Έχει σημασία το στοιχείο ότι οι χαρακτηριστικές τους είναι όμοιες, καθώς μηχανές με όμοια φθίνουσες κλίσεις ρυθμιστή, επιμερίζουν μεταξύ τους ισόποσα όλες τις αυξήσεις ή τις μειώσεις στο φορτίο, ανεξάρτητα από τα ονομαστικά μεγέθη ισχύος κάθε μίας ή του αριθμού μηχανών σε παραλληλισμό. Η μηχανή 'B' φέρει ένα φορτίο 150 Kw στα 60 Hz. Η μηχανή 'A' έχει μόλις παραλληλιστεί και δε φέρει φορτίο. Οι αρχικές συνθήκες υποδηλώνονται με το δείκτη '1' και τις συνεχόμενες γραμμές. Οι ενδιάμεσες συνθήκες όπου έχει μεταφερθεί το μισό από το απαιτούμενο φορτίο και το σύστημα λειτουργεί σε υψηλότερη από τα 60Hz συχνότητα, συμβολίζονται με δείκτη '2' και διακεκομμένες γραμμές. Η τελική κατάσταση όπου έχει επιτευχθεί ο επιμερισμός του φορτίου και το σύστημα λειτουργεί στην κανονική του συχνότητα συμβολίζεται με δείκτη '3'.



Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση μεταφοράς φορτίου μεταξύ μηχανών με όμοιες χαρακτηριστικές ελεγκτή

Για να μεταφέρουμε μέρος του φορτίου από τη μηχανή 'B' στη μηχανή 'A' χωρίς να αλλάξει μόνιμα η συχνότητα του συστήματος απαιτείται ρύθμιση και των δύο χαρακτηριστικών. Θέλουμε στην τελική κατάσταση το σύστημα να λειτουργεί σε συχνότητα 60 Hz, και η μηχανή 'A' να σηκώνει 50 Kw και η μηχανή 'B' 100 Kw. Για να μεταφερθούν τα 50 Kw στη μηχανή 'A' πρώτα ανυψώνεται η εν-κενώ ταχύτητά της οπότε μετακινείται παράλληλα ολόκληρη η χαρακτηριστική της, μέχρι να μεταφερθεί το μισό από το μεταφερόμενο φορτίο 50 Kw. Αφού μεταφερθούν τα 25 Kw από τη μηχανή 'B', η μηχανή αυξάνει επίσης την ταχύτητά της χωρίς όμως μετατόπιση της χαρακτηριστικής της. Το σύστημα λειτουργεί τώρα σε υψηλότερη της αρχικής συχνότητας. Για να ολοκληρωθεί η μεταφορά, υποβιβάζεται η χαρακτηριστική της 'B' μεταφέρονται τα εναπομείναντα 25 Kw στη μηχανή 'A' και η συχνότητα του συστήματος πέφτει στην αρχική τιμή των 60 Hz.

Στην περίπτωση που έχω σύγχρονες γεννήτριες σε παραλληλισμό με ανόμοιες χαρακτηριστικές, δεν επιμερίζουν τις αυξήσεις ή μειώσεις του φορτίου του ζυγού ισόποσα όπως στο παράδειγμα. Η μηχανή με τη μικρότερη φθίνουσα κλίση αναλαμβάνει μεγαλύτερο μερίδιο της μεταβολή του φορτίου του ζυγού.

4.5 Συμπέρασμα.

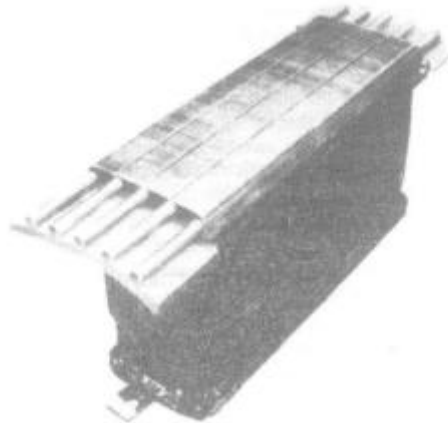
Συνοψίζοντας τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος δύο γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα, εμφανίζονται οι εξής κοινοτοπίες.

- Η συνολική ενεργός ισχύς που προσφέρουν οι δύο γεννήτριες περιορίζεται από το γεγονός ότι η ισχύς που παράγουν μαζί, θα πρέπει να είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο του συστήματος.
- Η ρύθμιση της πραγματικής ισχύος που παράγει η κάθε γεννήτρια, πραγματοποιείται με αύξηση της συχνότητας αφόρτιστης λειτουργίας στη μια γεννήτρια και ταυτόχρονη μείωση της στην άλλη.
- Η ενεργός ισχύς που προσφέρει η γεννήτρια, της οποίας αυξάνεται η συχνότητα αφόρτιστης λειτουργίας, αυξάνεται. Το αντίστροφο ισχύει για την άλλη.
- Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος δε μεταβάλλεται από την ταυτόχρονη μείωση ή αύξηση της συχνότητας αφόρτιστης λειτουργίας των δύο γεννητριών.

Κεφάλαιο 5 Βασικές αρχές επαγωγικών κινητήρων.

5.1 Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα με τύλιγμα απόσβεσης.

Έχει περιγραφεί το θεωρητικό υπόβαθρο για την εκκίνηση ενός σύγχρονου κινητήρα. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται ποικίλει ανάλογα το μέγεθος και τη χρήση της μηχανής. Η πιο διαδεδομένη όμως μέθοδος εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα είναι η εισαγωγή στο δρομέα του, τυλιγμάτων απόσβεσης. Πρόκειται για αγωγίμες ράβδους που τοποθετούνται σε εγκοπές του δρομέα και βραχυκυκλώνονται στα άκρα του μέσω μεγάλων δακτυλίων.

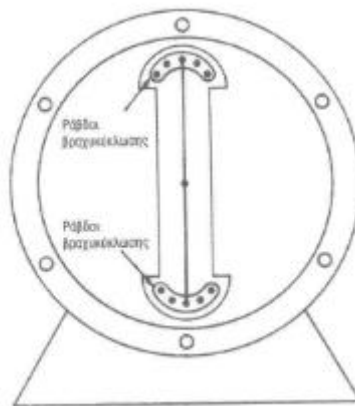


Σχήμα 5.1 Φωτογραφία του πόλου μια σύγχρονης μηχανής όπου διακρίνονται τα τυλίγματα απόσβεσης πάνω στο πέλμα του πόλου.

Η εισαγωγή των τυλιγμάτων απόσβεσης γίνεται με σκοπό την ασφαλή και σίγουρη εκκίνηση του κινητήρα βελτιώνοντας την ευστάθεια της μηχανής και αυτό γίνεται εφικτό αξιοποιώντας το πεδίο που αναπτύσσουν τα τυλίγματα απόσβεσης το οποίο σε μια σύγχρονη μηχανή **δε πρέπει σε καμία περίπτωση να ταυτίζεται με το πεδίο δρομέα B_R** . Το πεδίο του στάτη B_S ενός σύγχρονου κινητήρα περιστρέφεται πάντα με τη σύγχρονη ταχύτητα. Όταν και η ταχύτητα του δρομέα, και κατ' επέκταση του πεδίου του δρομέα, είναι ίση με τη σύγχρονη, στα άκρα των τυλιγμάτων απόσβεσης δεν εμφανίζεται καμία τάση. Όταν όμως ο δρομέας υστερεί σε σχέση με το πεδίο του στάτη, στα άκρα των τυλιγμάτων απόσβεσης εμφανίζεται τάση. Το ρεύμα που διαρρέει σε αυτή την περίπτωση τα τυλίγματα, παράγει μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με το πεδίο του στάτη και προσπαθεί να επιταχύνει το δρομέα. Αντιστρόφως ανάλογα, όταν ο δρομέας προπορεύεται του πεδίου του στάτη, εξ αιτίας των τυλιγμάτων απόσβεσης και του πεδίου που παράγουν, η ροπή που εμφανίζεται σε αυτά μειώνει την ταχύτητα του δρομέα.

Η διαδικασία εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα με αυτή τη μέθοδο ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Αρχικά το τύλιγμα διέγερσης αποσυνδέεται απ' τη συνεχή τροφοδοσία του και τα άκρα του βραχυκυκλώνονται.
2. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται με τριφασική πηγή τάσης και ο δρομέας αρχίζει να επιταχύνεται καθώς τα τυλίγματα απόσβεσης αναπτύσσουν πεδίο το οποίο αλληλεπιδρά με το περιστρεφόμενο πεδίο του στάτη, παρέχοντας την απαραίτητη στρεπτική ροπή για την περιστροφή του δρομέα. Καθώς ο κινητήρας δε φορτίζεται η ταχύτητά του πλησιάζει τη σύγχρονη.
3. Το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται με πηγή συνεχούς τάσης. Αναπτύσσεται το πεδίο δρομέα κατά τα γνωστά. Πεδία δρομέα-στάτη συγχρονίζονται. Σε αυτό το σημείο είναι δυνατή η σύνδεση φορτίου στο κινητήρα και η λειτουργία του σε κανονικές συνθήκες



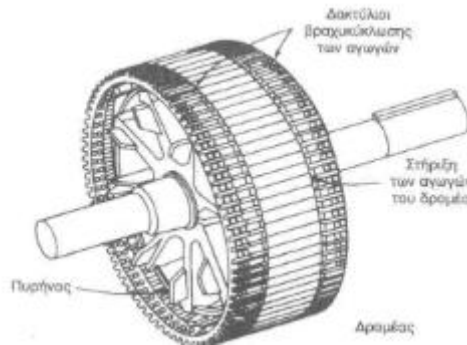
Σχήμα 5.2 Σκαρίφημα σύγχρονης μηχανής δύο πόλων όπου φαίνονται τα τυλίγματα απόσβεσης στο δρομέα.

5.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός επαγωγικού κινητήρα.

Τα τυλίγματα απόσβεσης ενώ χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των σύγχρονων κινητήρων, λειτουργούν τόσο αποδοτικά που κατασκευάστηκαν κινητήρες χωρίς κύκλωμα διέγερσης στο δρομέα, όπου το πεδίο που εμφανίζεται στα τυλίγματα απόσβεσης είναι αρκετό να επιταχύνει το δρομέα μέχρι τη σύγχρονη ταχύτητα. Οι κινητήρες αυτοί καλούνται επαγωγικοί, και η βασική

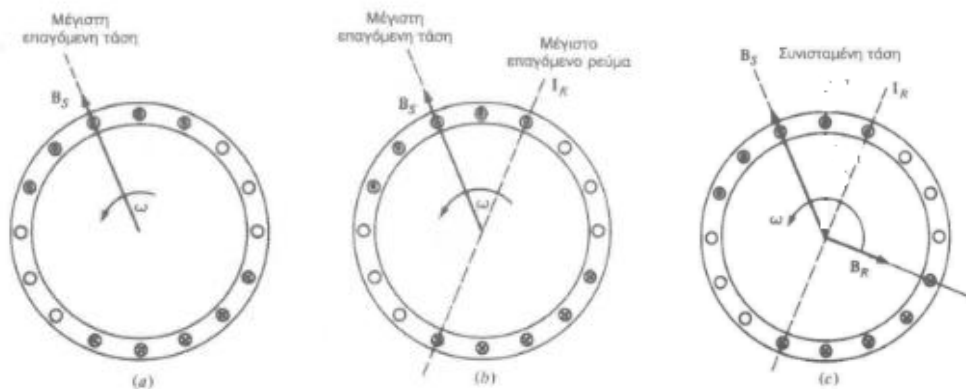
κατασκευαστική τους διαφορά από τους σύγχρονους, είναι η παντελής έλλειψη τυλίγματος διέγερσης στο σώμα του δρομέα, κάνοντας περιττή τη χρήση της εξωτερικής πηγής τροφοδοσίας με συνεχή τάση. Ο δρομέας ξεκινά να επιταχύνεται άμεσα με την τροφοδοσία του τυλίγματος στάτη.

Οι επαγωγικοί κινητήρες παρουσιάζουν ίδια δομή στάτη με μια σύγχρονη μηχανή, ενώ οι δρομείς τους έχουν αρκετά διαφοροποιημένη δομή. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι δρομέων, δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού και δακτυλιοφόρος δρομέας.



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού

Η λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων είναι η ίδια με την λειτουργία των τυλιγμάτων απόσβεσης στις σύγχρονες μηχανές. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού όπου στο στάτη εφαρμόζεται τριφασικό σύστημα τάσεων.



Σχήμα 5.4 (α) Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη B_s επάγει τάση στις ράβδους του δρομέα. (β) Η τάση εξ επαγωγής παράγει ρεύμα στο δρομέα που έπειτα της μέγιστης τάσης εξαιτίας της αυτεπαγωγής που παρουσιάζει ο δρομέας. (γ) Το ρεύμα του δρομέα παράγει το μαγνητικό πεδίο δρομέα B_R που σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο B_s παράγουν ανθρωλογιακή ροπή περιστροφής στο εσωτερικό της μηχανής.

Το πεδίο του στάτη περιστρέφεται με ανθωρολογιακή φορά και με σύγχρονη ταχύτητα $n_s = \frac{120 \times f_s}{p}$. Η τάση εξ επαγωγής στα άκρα ενός αγωγού το δρομέα δίνεται από τη εξίσωση:

$$e_{ind} = (v \times B)l \quad (5.1)$$

v , η περιστροφική ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου [m/sec]

B , η μαγνητική επαγωγή πεδίου [T]

l = το μήκος του αγωγού [m]

Η τάση αυτή στα άκρα του δρομέα επάγεται από τη σχετική κίνηση του δρομέα σε σχέση με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ταχύτητα του δρομέα δε μπορεί να ισοσκελίσει τη σύγχρονη ταχύτητα. Μικρή υστέρηση είναι αναγκαία, ώστε να υφίσταται σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Το ρεύμα που επάγεται από τη σχετική κίνηση των ράβδων μέσα στη στρεφόμενη μαγνητική ροή του στάτη, προκαλεί Laplace την εμφάνιση δύναμης F Laplace, που περιστρέφει το δρομέα.

$$F = i(L \times B) \quad (5.2)$$

Όπου

F , η δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στον κινούμενο αγωγό, [N]

i , η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό [A]

L , το διάνυσμα που έχει μέτρο ίσο με το μήκος του αγωγού και κατεύθυνση την κατεύθυνση ροής του ρεύματος [m].

B , το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής [T]

Τελικά το επαγόμενο ρεύμα στις ράβδους απόσβεσης παράγει μαγνητική επαγωγή B_s η οποία σε συνδυασμό με την στρεφόμενη μαγνητική επαγωγή του στάτη παράγει την αναγκαία στρεπτική ροπή για την κίνηση του δρομέα.

Τελικά η επαγόμενη στρεπτική ροπή δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S \quad (5.3)$$

B_R , το μαγνητικό πεδίο του δρομέα [W]

B_S , το μαγνητικό πεδίο του στάτη [W]

k ,σταθερά που εκφράζει τα μηχανικά στοιχεία του κινητήρα

Σε περίπτωση που ο δρομέας κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, δεν εμφανίζεται η τάση εξ επαγωγής e_{ind} στα τυλίγματα απόσβεσης, οι αγωγοί του δε θα διαρρέονται από ρεύμα και ο δρομέας δεν αναπτύσσει το αναγκαίο για τη παραγωγή στρεπτικής ροπής μαγνητικό πεδίο. Ο δρομέας αναγκαστικά θα επιβραδυνόταν. **Ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη, χωρίς όμως ποτέ να την φτάνει απόλυτα.**

Κεφάλαιο 6 Πείραμα.

6.1 Σκοπός του πειράματος.

Σκοπός του πειράματος σε πρώτη φάση, είναι ο επιτυχής παραλληλισμός δύο σύγχρονων γεννητριών, με χρήση απλής διάταξης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Μετά τον επιτυχή παραλληλισμό θα αποσυνδεθεί από τη τροφοδοσία η κινητήρια μηχανή της μίας από τις δύο γεννήτριες, ενώ η δεύτερη γεννήτρια θα συνεχίσει να λειτουργεί ως έχει. Οι δύο σύγχρονες μηχανές θα λειτουργούν εν παραλλήλω, με τη μηχανή που αποσυνδέθηκε από τη κινητήρια της διάταξη να τελεί πλέον λειτουργία κινητήρα, καθώς στρέφει τον άξονά της δεχόμενη ενέργεια από την δεύτερη σύγχρονη γεννήτρια. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος λαμβάνονται μετρήσεις βασικών ηλεκτρικών μεγεθών, με χρήση παλμογράφου και πολυμέτρου.

6.2 Περιγραφή εξοπλισμού.

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο μικρές πανομοιότυπες γεννήτριες με τάση εξόδου $V_{ac}=8-9.5$ V, συνδεδεμένες η κάθε μία με ένα επαγωγικό ηλεκτροκινητήρα ονομαστικής ισχύος 250 W. Παρακάτω απεικονίζονται οι ηλεκτρικές μηχανές καθώς και η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το παραλληλισμό τους.



Σχήμα 6.1 α) επαγωγικός ηλεκτροκινητήρας β) σύγχρονη γεννήτρια



Σχήμα 6.2 Απεικόνιση της γεννήτριας προς παραλληλισμό, σημειώνονται οι φάσεις (α,β,γ)

Ο τύπος της σύγχρονης γεννήτριας A1271R 100a magneti mareli, τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα 12V και αποδίδει εναλλασσόμενο ρεύμα με $V_{\pi} = 14V$.

Ο τύπος του επαγωγικού κινητήρα είναι τετραπολικός Siemens D-91056 Erlongen. Το κύκλωμα οπλισμού τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 Hz και η ονομαστική αποδιδόμενη ισχύς είναι στα 0,25 kw με συντελεστή ισχύος $\Sigma I = 0,78$. Η σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο (1.16) $n_s = \frac{120 \times f_s}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ } r/min$. Οι ονομαστικές στροφές που αποδίδει ο κινητήρας στον άξονά του δίδονται από τον κατασκευαστή να είναι $1350 \text{ } r/min$. Η ολίσθηση υπολογίζεται από τον τύπο (1.30) $s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 1350}{1500} = 0,1 \text{ (pu)}$.

Παρακάτω παρατίθεται πίνακας με τα ονομαστικά στοιχεία του κινητήρα. Παρουσιάζονται οι ονομαστικές ενεργές τιμές για συνδεσμολογία τριγώνου και αστέρα στο κύκλωμα οπλισμού, καθώς και το εύρος που επιτρέπεται από τον κατασκευαστή.

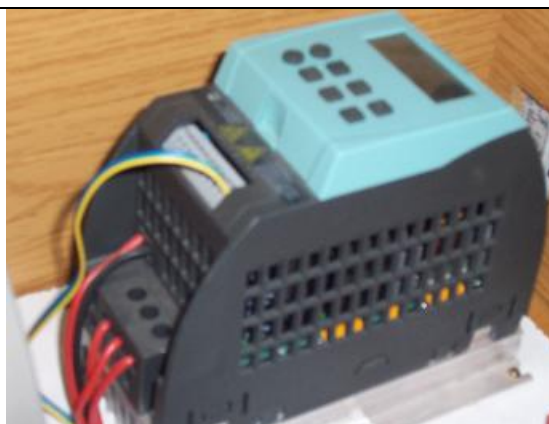
	Συνδεσμολογία	Συνδεσμολογία
	Δ	Υ
V(v)	230	400
I(A)	1,34	0,77
εύρος V (v)	220-240	380-420
εύρος I (A)	1,40-1,35	0,81-0,78

Για να είναι δυνατός ο παραλληλισμός των γεννητριών χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αυτοσχέδια διάταξη με έξι ωμικά φορτία και ένα διακόπτη παραλληλισμού.



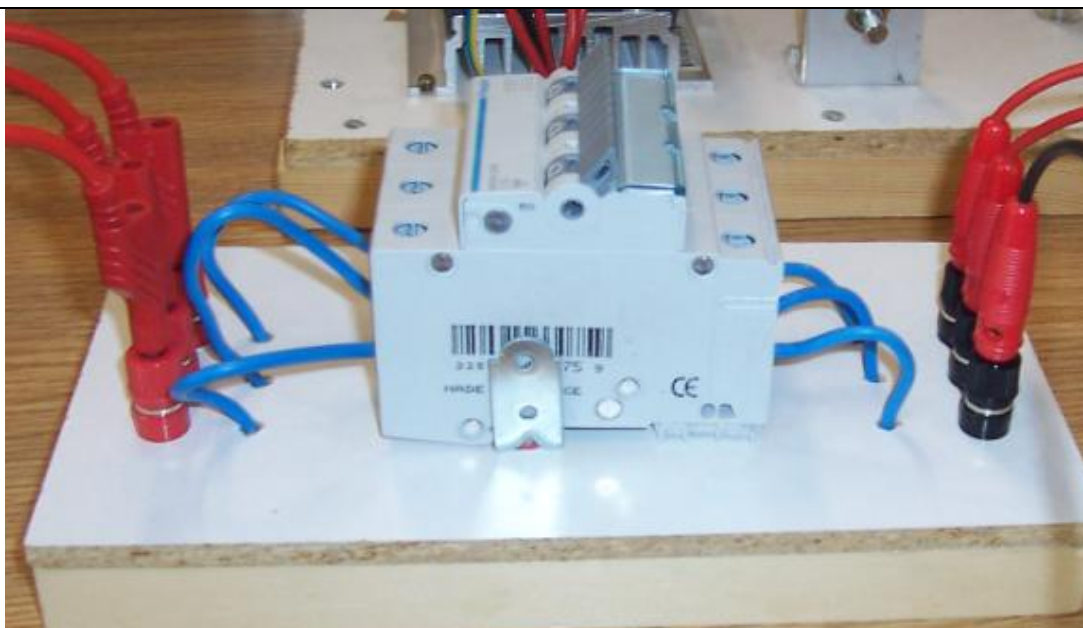
Σχήμα 6.3 Αυτοσχέδια διάταξη ελέγχου των συνθηκών παραλληλισμού

Οι στροφές του επαγωγικού ηλεκτροκινητήρα ρυθμίζονται, ελέγχοντας τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος του κυκλώματος σπλισμού του. Για την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα μέχρι τη σύγχρονη ταχύτητα 50 Hz, και έλεγχο της περιστροφή του δρομέα του κινητήρα με σταθερή γωνιακή ταχύτητα καθ' όλη τη πορεία του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν δύο μονάδες VFD inverter. Οι κινητήρες επαγωγής τραβάνε πολύ ρεύμα από το δίκτυο κατά την εκκίνηση. Ο inverter είναι αναγκαίος για την ομαλή εκκίνηση τους. Παίρνουν μονοφασικό εναλλασσόμενο και αποδίδουν τριφασικό εναλλασσόμενο.



Σχήμα 6.4 VFD Inverter. Μετατρέπει πρώτα το μονοφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου σε συνεχές και το αποδίδει τελικά 3-φασικό εναλλασσόμενο επιθυμητής συχνότητας.

Για την ακαριαία απότομη διακοπή λειτουργίας του ενός επαγωγικού κινητήρα, μετά τον επιτυχή παραλληλισμό των δύο γεννητριών, παρεμβάλλεται διακόπτης μεταξύ του τυλίγματος σπλισμού και του VFD inverter.



Σχήμα 6.5 Διακόπτης τροφοδοσίας τριφασικής τάσης, παρεμβάλλεται μεταξύ του inverter και του επαγωγικού ηλεκτροκινητήρα.

Το συνεχές ρεύμα διέγερσης για τα τυλίγματα διέγερσης των δύο σύγχρονων γεννητριών παρέχεται από δύο τροφοδοτικά πάγκου D.C 0-30 V,0-5 A.



Σχήμα 6.6 Τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος 5A 30V LED HY3005

Οι στιγμιαίες τιμές τάσης της γεννήτριας που θα παρέχει την άεργη ισχύ στην μηχανή που θα αντιστρέψει τη λειτουργία της από σύγχρονη γεννήτρια σε σύγχρονο κινητήρα μετά την αποσύνδεση από την κινητήρια της διάταξη, μετρήθηκε με παλμογράφο, ενώ τα πολικά μεγέθη γραμμής στις εξόδους των γεννητριών μετρήθηκαν με πολύμετρο. Ο παλμογράφος θα καταγράψει στιγμιαίες τιμές τάσης στο πεδίο χρόνου, ενώ το πολύμετρο θα καταγράψει ενεργές τιμές των πολικών μεγεθών στο πεδίο χρόνου.



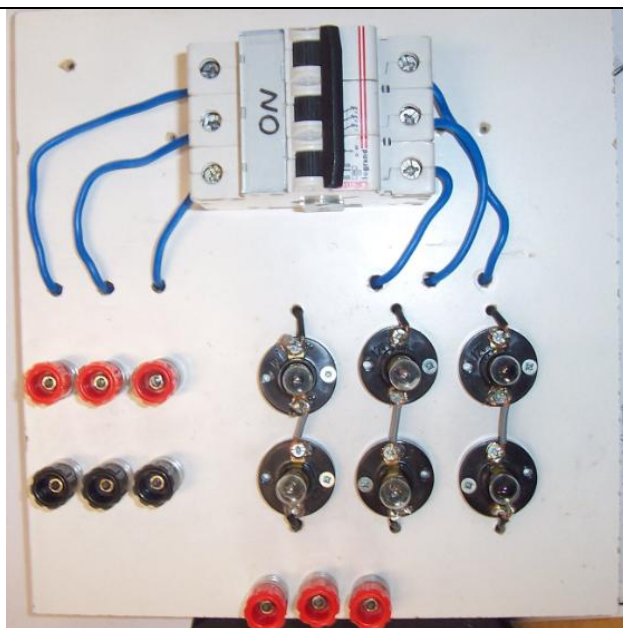
Σχήμα 6.6 α) Παλμογράφος β) πολύμετρα

Η χρήση του πολυμέτρου έχει κάποια χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται. **Το κυριότερο είναι πως το πολύμετρο αποδίδει μετρήσεις ακολουθώντας τη σύμβαση του φορτίου. Οι τιμές που καταγράφει είναι θετικές όταν φορτίο καταναλώνεται και αρνητικές όταν φορτίο παράγεται.** Αυτό έχει όμως την εξής αντίφαση σε σχέση με τον συντελεστή ισχύος $\Sigma I = \cos\phi$, ενός κυκλώματος εναλλασσομένου ρεύματος. Υπενθυμίζεται πως ο συντελεστής ισχύος είναι ως μετρήσιμο μέγεθος πάντα θετικός. Για να υπάρχει όμως μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη λειτουργία του κυκλώματος του αποδίδεται πρόσημο ανάλογα με μέτρο της γωνίας ϕ . Από τη θεωρία καταχωρείται, πως ο συντελεστής ισχύος είναι θετικός όταν το κύκλωμα τελεί λειτουργία πυκνωτή (χωρητικός χαρακτήρας) οπότε το ρεύμα προηγείται της τάσης στο διανυσματικό διάγραμμα και αρνητικός όταν τελεί λειτουργία πηνίου (επαγωγικός χαρακτήρας) και το ρεύμα έπεται της τάσης .

Καθώς όμως το πολύμετρο ακολουθεί τη σύμβαση του φορτίου, στις περιπτώσεις που η υπό μελέτη μηχανή θα καταναλώνει άεργη ισχύ, οπότε και σύμφωνα με τη θεωρία θα έχει επαγωγικό χαρακτήρα και ο συντελεστής ισχύος θα είναι αρνητικός, το πολύμετρο αντιθέτως θα καταγράφει θετικές τιμές συντελεστή. Η παρατήρηση αυτή θα φανεί χρήσιμη στην ανάλυση των αποτελεσμάτων παρακάτω

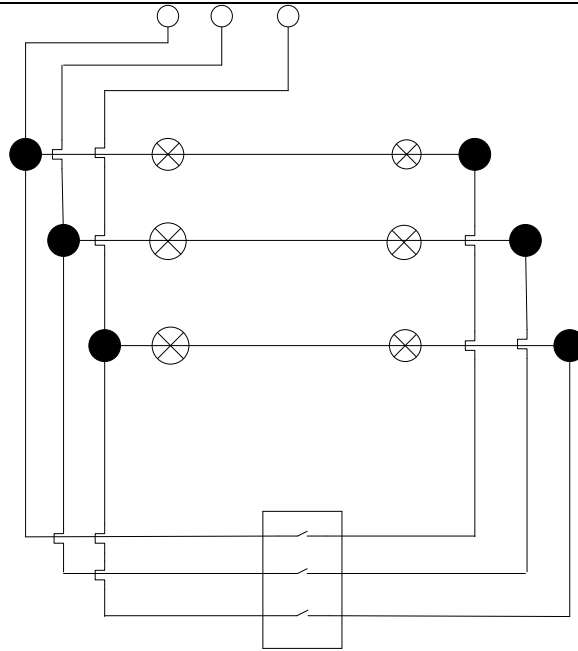
6.3 Διάταξη παραλληλισμού.

Για να είναι εφικτός ο παραλληλισμός δύο γεννητριών πρέπει να ισχύουν ορισμένες βασικές συνθήκες, όπως έχουν επισημανθεί στο κεφάλαιο 4.1. Τα πλάτη των πολικών τάσεων πρέπει να είναι τα ίδια, η διαδοχή φάσεων να ταυτίζεται, να μην υφίσταται διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων τάσεων και η συχνότητα των υπό παραλληλισμό γεννητριών να είναι κοινή. Σε κάθε άλλη περίπτωση ο παραλληλισμός δεν είναι εφικτός. Για αυτό και χρησιμοποιείται η απλή αυτοσχέδια διάταξη του παρακάτω σχήματος, διάταξη που συναντάται σε όλους τους εργαστηριακούς εξοπλισμούς. Το κύκλωμα απαρτίζεται από έξι λαμπτήρες πυρακτώσεως, εννέα μπόρνες από τις οποίες οι έξι είναι μπόρνες εισόδου που συνδέουν τις γεννήτριες με τους λαμπτήρες, και τρεις είναι εξόδου για την σύνδεση φορτίου με το κύκλωμα. Τέλος τοποθετείται κι ένας διακόπτης, όπου όταν κλείνει βραχυκυκλώνει το κύκλωμα παρακάμπτοντας τις ωμικές αντιστάσεις των λαμπτήρων, παραλληλίζοντας τις δύο γεννήτριες.



Σχήμα 6.7 Αυτοσχέδια διάταξη παραλληλισμού

Η διάταξη κατασκευάστηκε με κοινά ηλεκτρολογικά υλικά εύκολα διαθέσιμα και το διάγραμμά της είναι το ακόλουθο.

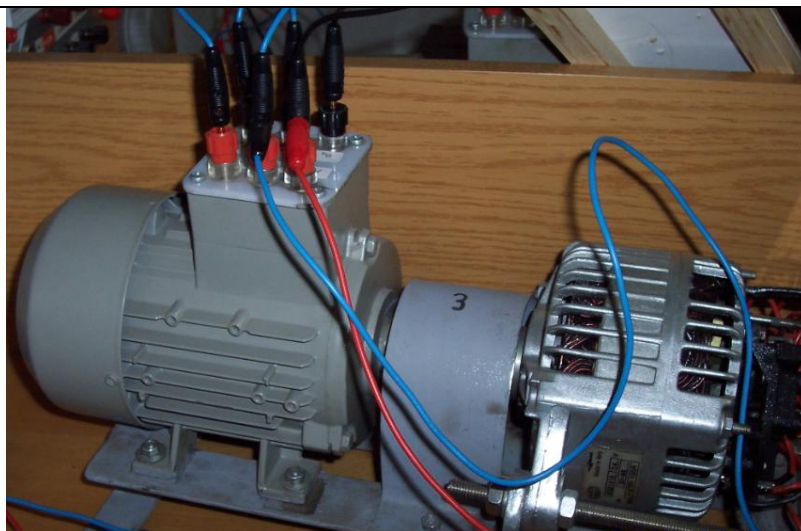


Σχήμα 6.8 Ηλεκτρολογικό διάγραμμα διάταξης παραλληλισμού

6.4 Περιγραφή πειράματος.

6.4.1 Περιγραφή της διαδικασίας

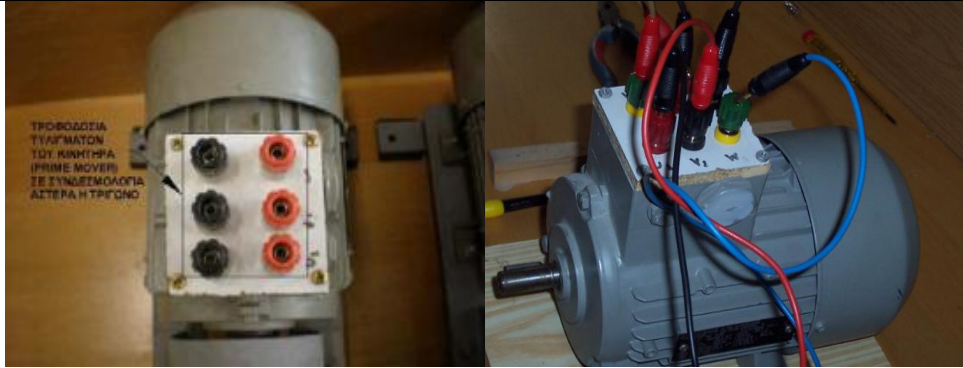
Σε πρώτη φάση συνδέονται οι άξονες των δύο επαγωγικών κινητήρων με τους άξονες των σύγχρονων γεννητριών.



Σχήμα 6.9 Σύνδεση επαγωγικού κινητήρα με σύγχρονη γεννήτρια.

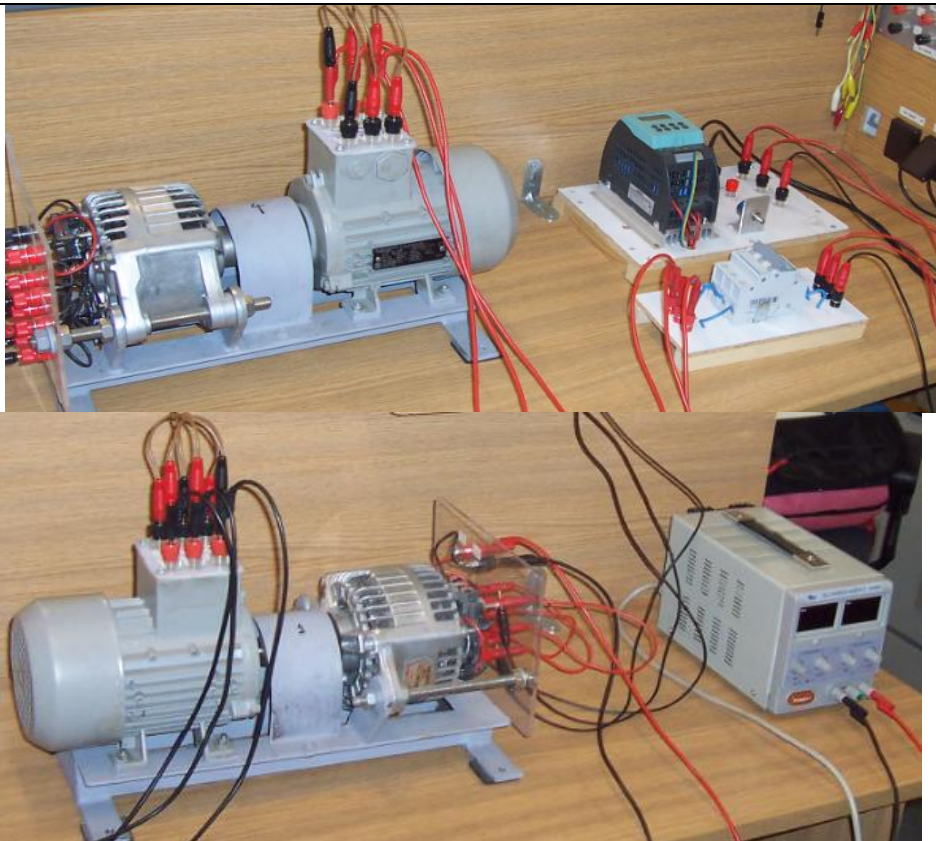
Το επόμενο βήμα είναι να συνδεθούν τα τροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος με το τύλιγμα των γεννητριών και οι δύο VFD inverters με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, και

στη συνέχεια η σύνδεση σε αστέρα με το τριφασικό τύλιγμα του κάθε επαγωγικού κινητήρα. Ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα αρχίζει να περιστρέφεται και σταθερά αυξάνεται η συχνότητα του inverter μέχρι τη τελική τιμή 50 Hz.



Σχήμα 6.10 Απεικόνιση της συνδεσμολογίας τριγώνου που χρησιμοποιείται στο τύλιγμα οπλισμού του ηλεκτροκινητήρα και της σύνδεσης με τον VFD inverter

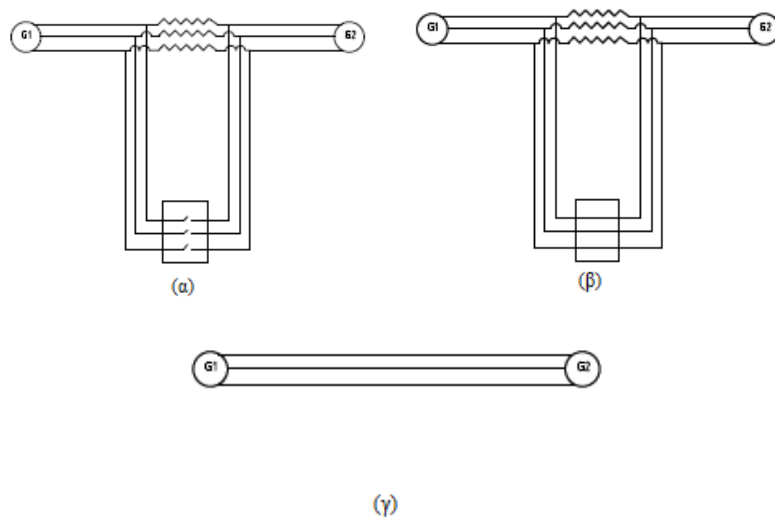
Η τελική μορφή σύνδεσης του κινητήρα και της γεννήτριας, καθώς κι η ολοκληρωμένη διάταξη, πριν το παραλληλισμό παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 6.11 Ολοκληρωμένες οι δύο διατάξεις πριν τη μεταξύ τους σύνδεση μέσω της διάταξης παραλληλισμού

Ακολουθεί σύνδεση των γεννητριών με το κύκλωμα παραλληλισμού. Το κύκλωμα μας επιτρέπει να παρατηρούμε τις χρονικές στιγμές που οι δύο γεννήτριες είναι σε συγχρονισμό φάσεων, ώστε κλείνοντας εκείνη τη στιγμή το διακόπτη, να τεθούν σε παράλληλη λειτουργία. Πριν το παραλληλισμό ο κάθε ωμικός καταναλωτής (λαμπτήρας) έχει από τη μία άκρη την τάση που παράγεται στην έξοδο μιας φάσης της μίας γεννήτριας και από την άλλη άκρη την τάση που παράγεται στην έξοδο μιας φάσης της άλλης γεννήτριας.

Τίθενται σε λειτουργία οι inverters σε συχνότητα 50 HZ, και καθώς οι δρομείς περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα, οι τάσεις που παράγονται στην έξοδο κάθε γεννήτριας, θα έχουν ίδιο μέτρο και συχνότητα. Στη διάρκεια που λειτουργούν και οι δύο μηχανές, οι λαμπτήρες αναβοσβήνουν ανά ζεύγη ασυγχρόνιστα. Τη χρονική στιγμή που είναι σβηστοί, οι φάσεις κάθε γεννήτριας, μία προς μία, είναι σε συγχρονισμό, και οι εκατέρωθεν συνδεδεμένες τάσεις είναι στο ίδιο σημείο της ημιτονοειδούς καμπύλης. Τη στιγμή αυτή κατεβαίνει ο διακόπτης της διάταξης παραλληλισμού για να συγχρονιστούν οι δύο γεννήτριες.



Σχήμα 6.12 Διάγραμμα των δύο γεννητριών (α) πριν το παραλληλισμό (β) τη στιγμή που κλείνει ο διακόπτης και βραχυκυκλώνονται (γ) οι γεννήτριες παραλληλισμένες

Αφού έχει επιτελεστεί ο παραλληλισμός, ακολουθεί η αποσύνδεση του inverter, στη πρώτη διάταξη όπου έχουμε τη γεννήτρια 'G1'. Διακόπτεται η παροχή μηχανικής ενέργειας στη γεννήτρια, και καταγράφεται η αντιστροφή της λειτουργίας

της καθώς περιστρέφει το κοινό με τον επαγωγικό κινητήρα χωρίς μηχανική υποστήριξη.

Καθώς οι γεννήτριες λειτουργούν εν-παραλλήλω, όταν αποσυνδέεται ο inverter από το κινητήρα E2, ο επαγωγικός κινητήρας παύει την λειτουργία του και σταματά να τροφοδοτεί τη γεννήτρια G2. Καθώς όμως είναι σε παραλληλισμό με την δεύτερη γεννήτρια G1, τροφοδοτείται το κύκλωμα οπλισμού, φάση προς φάση με τάση από εκείνη, συντηρώντας τη περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Ο δρομέας της γεννήτριας G2 κατά τη παύση του επαγωγικού κινητήρα, τείνει να ρίξει τις στρόφες του αλλά καθώς γίνεται αυτό το μαγνητικό πεδίο του δρομέα του αρχίζει να ολισθαίνει σε σχέση με τη περιστρεφόμενη μαγνητική ροή του στάτη. Η περιστρεφόμενη ροή διατηρείται καθώς όπως αναφέρθηκε το κύκλωμα οπλισμού είναι παραλληλισμένο με το τριφασικό κύκλωμα της εταιράς γεννήτριας, η οποία συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά. Η μαγνητική επαγωγή λόγω περιστρεφόμενης ροής στη μηχανή G2, αλληλεπιδρά με τη μαγνητική επαγωγή του δρομέα ο οποίος συνεχίζει να διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και να συντηρεί τη μαγνητική επαγωγή του. Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι η αλληλεπίδραση των δύο επαγωγών επάγει στρεπτική ροπή επιτρέποντας στο δρομέα να συνεχίσει την περιστροφή του. Καθώς όμως γεννήτρια και επαγωγικός κινητήρας είναι συζευγμένος σε κοινό άξονα, είναι η γεννήτρια που παρέχει τη μηχανική ισχύ για να συντηρηθεί η περιστροφή του άξονα. **Λειτουργεί πλέον η γεννήτρια G2 ως κινητήρας.**

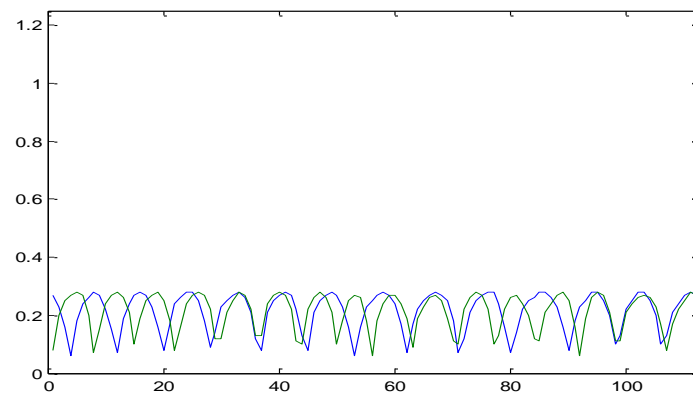
6.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και ανάλυση τους.

Το πείραμα χωρίζεται σε τρεις χρονικές περιόδους.

- Η χρονική περίοδος πριν το παραλληλισμό. Οι δύο γεννήτριες λειτουργούν συνδεδεμένες μέσω της διάταξης παραλληλισμού χωρίς να έχουν συγχρονιστεί. Οι λαμπτήρες αναβοσβήνουν ασυγχρόνιστα.
- Η χρονική περίοδος μετά τον παραλληλισμό. Βραχυκυκλώνεται η σύνδεση μεταξύ των γεννητριών, οι μηχανές παραλληλίζονται, οι λαμπτήρες εμφανίζονται σβηστοί.
- Η χρονική περίοδος μετά την εκκίνηση του κινητήρα. Παύση του VFD Inverter, και μεταστροφή της λειτουργίας της γεννήτριας G2 από γεννήτρια σε κινητήρα. Οι λαμπτήρες παραμένουν σβηστοί.

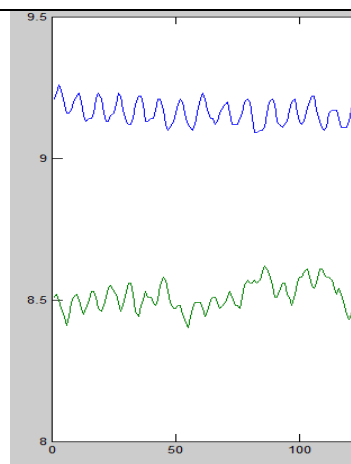
6.4.2.1 Η χρονική περίοδος πριν το παραλληλισμό.

Κατά τη λειτουργία των γεννητριών χωρίς να είναι παραλληλισμένες, οι μηχανές λειτουργούν εν κενώ φορτίο. Καταγράφονται όμως μικρές ενεργές τιμές εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς έχω τάση που καταναλώνεται στα καλώδια σύνδεσης και στους λαμπτήρες οι οποίοι αναβοσβήνουν ασυγχρόνιστα ανά ζεύγη καθώς οι δύο γεννήτριες παρουσιάζουν διαφορά φάσης.



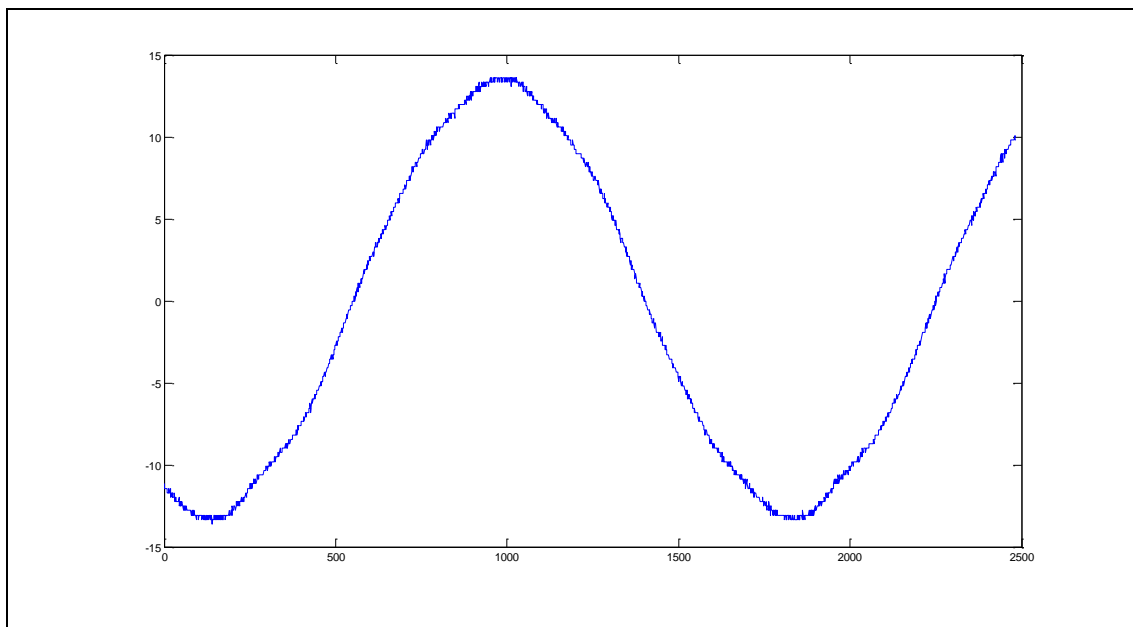
Σχήμα 6.13 Ενεργές τιμές έντασης, με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1, ενώ με πράσινο η γεννήτρια G2.

Παρακάτω παρατίθεται οι ενεργές τιμές πολιικής τάσης για τις δύο γεννήτριες. Η γεννήτρια G1 καταγράφεται με γαλάζιο χρώμα, ενώ με πράσινο καταγράφεται η γεννήτρια G2. Η γεννήτρια G1 καταγράφει ελαφρώς υψηλότερες τιμές, διαφοροποίηση που μπορεί να οφείλεται σε μικρές διαφοροποιήσεις στις καλωδιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεσή της με το κύκλωμα.



Σχήμα 6.14 Ενεργές τιμές πολιικής τάσης, με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1, ενώ με πράσινο η γεννήτρια G2.

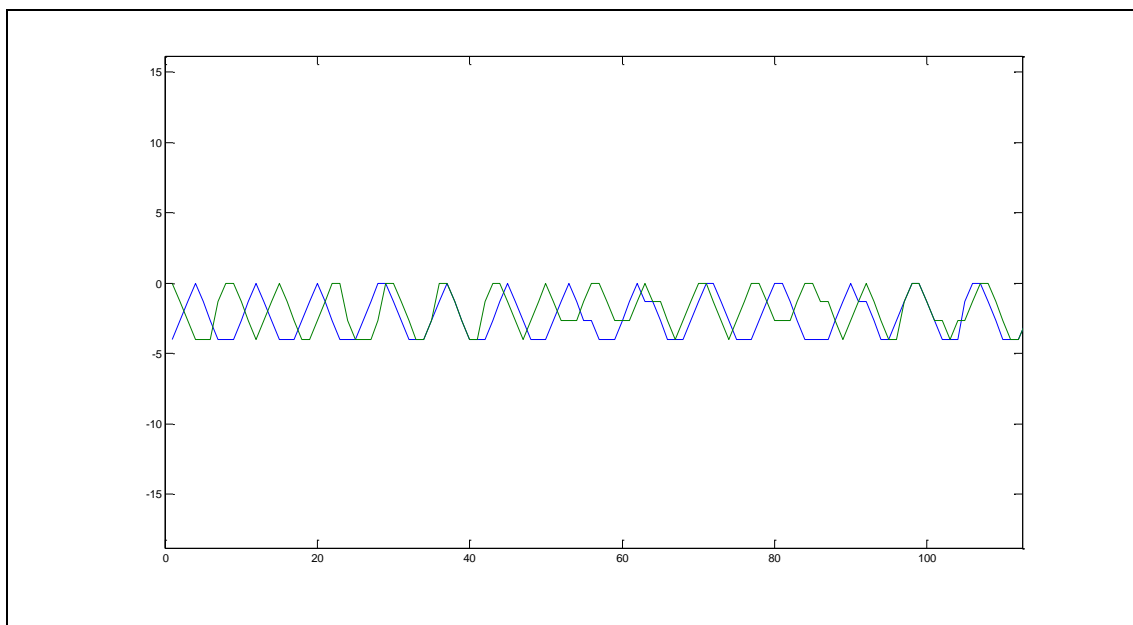
Παρακάτω παρατίθεται η καμπύλη της εναλλασσόμενης τάσης για τη γεννήτρια G1 πριν το παραλληλισμό.



Σχήμα 6.15 Ημιτονοειδής κατανομή στιγμιαίων τιμών τάσης για τη γεννήτρια G1

Ο παλμογράφος καταγράφει ημιτονοειδή πολική τάση με πλάτος $V_{\pi} = 13,4V$. Σύμφωνα με τον τύπο που συνδέει το πλάτος ημιτονοειδούς τάσης με την ενεργό τιμή της, $V_{rms} = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{2}} = 9.48V$. Η τιμή που υπολογίζεται αριθμητικά είναι πολύ κοντά στο εύρος των ενεργών τιμών που καταγράφει το πολύμετρο.

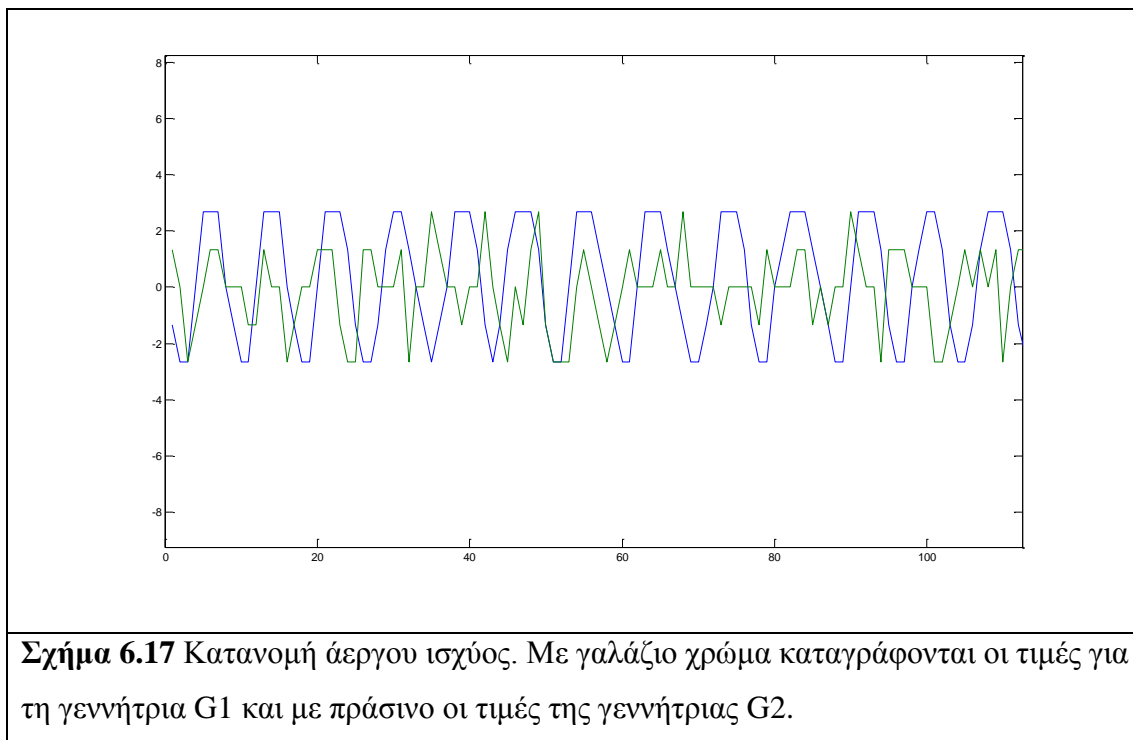
Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές ενεργού ισχύος για τις δύο γεννήτριες.



Σχήμα 6.16 Η κατανομή ενεργού ισχύος P. Με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1 ενώ με πράσινο οι τιμές της γεννήτριας G2.

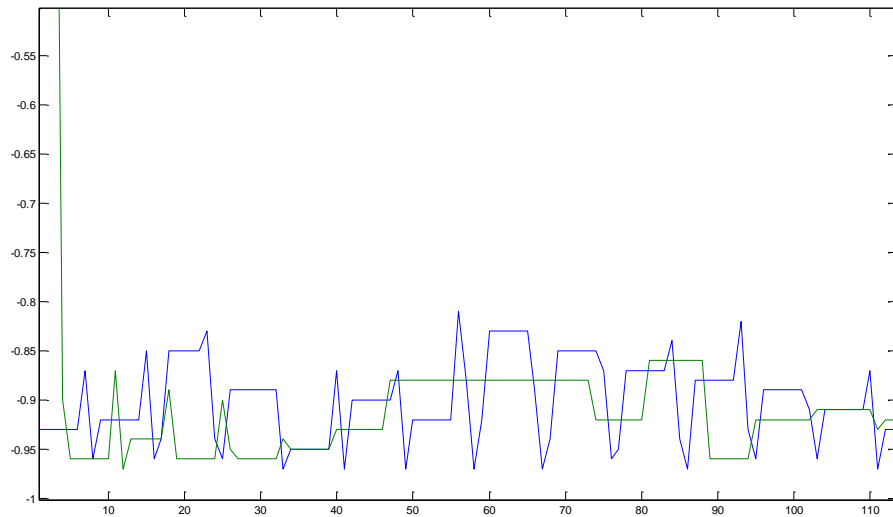
Σε αυτή τη φάση του πειράματος και οι δύο γεννήτριες εργάζονται εν κενώ. Δε λαμβάνει καμία παραγωγή ενεργού ισχύος εκτός από ότι καταναλώνεται στις ωμικές αντιστάσεις των καλωδιώσεων και των λαμπτήρων στη διάταξη παραλληλισμού.

Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές άεργου ισχύος που καταναλώνεται κατά τη πρώτη φάση του πειράματος.



Το πολύμετρο καταγράφει μικρές τιμές άεργου ισχύος..

Στο τελευταίο για αυτή τη φάση του πειράματος διάγραμμα καταγράφονται οι τιμές του συντελεστή ισχύος.

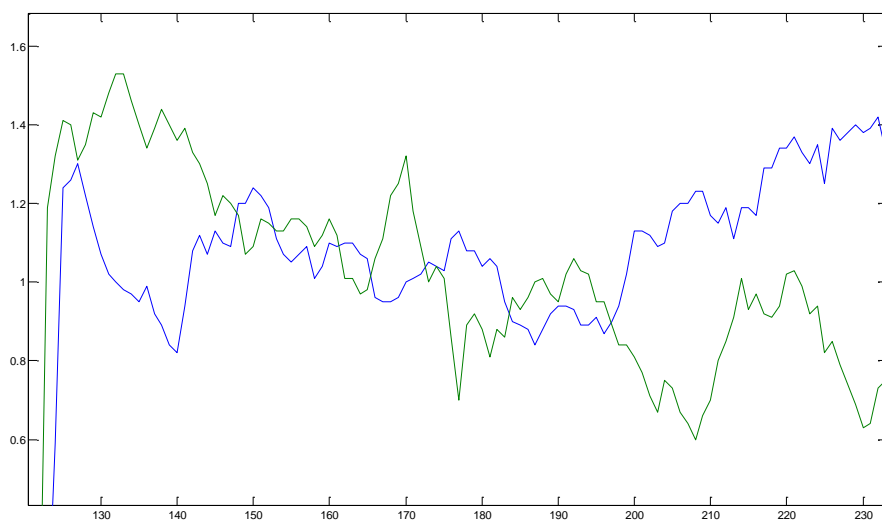


Σχήμα 6.18 Οι τιμές του συντελεστή ισχύος ΣΙ. Με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές για τη γεννήτρια G1 και με πράσινο χρώμα οι τιμές για τη γεννήτρια G2.

Παρατηρείται πως καθώς οι γεννήτριες λειτουργούν εν κενώ, και οι δύο μηχανές παρουσιάζουν έντονα χωρητικό χαρακτήρα. Η άεργη ισχύς που παράγεται αποθηκεύεται με μορφή ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό των μηχανών για να επιστρέψει στο σύστημα.

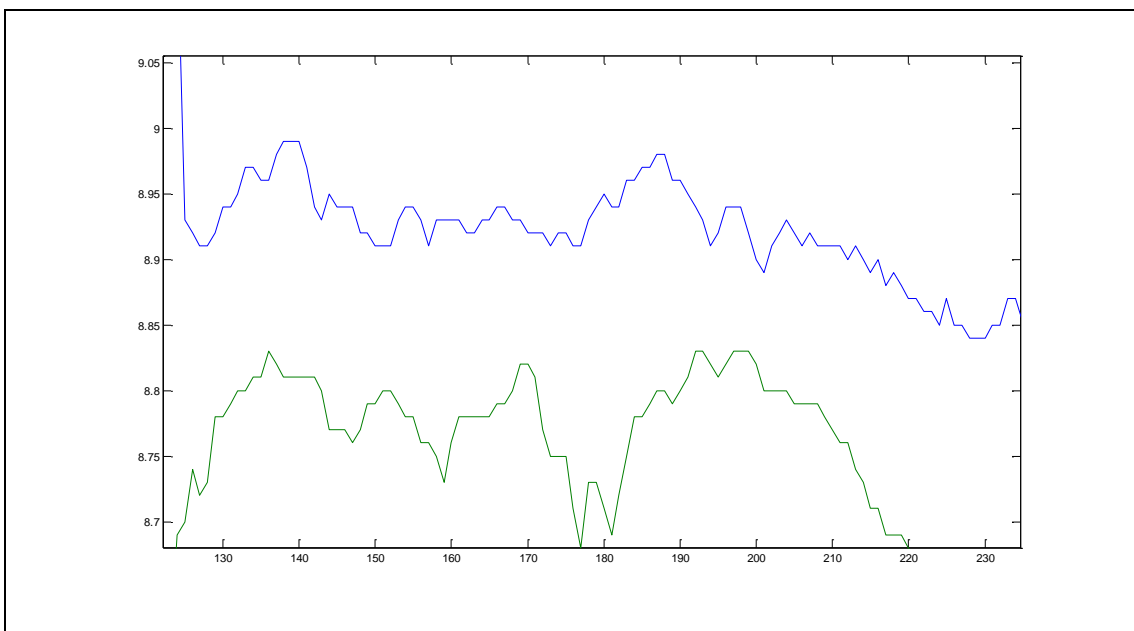
6.4.2.2 Η χρονική περίοδος μετά το παραλληλισμό.

Την κατάλληλη στιγμή που και τα τρία ζεύγη των λαμπτήρων στη διάταξη παραλληλισμού είναι σβηστά, βραχυκυκλώνουμε τις δύο γεννήτριες, οι οποίες μετά λειτουργούν σε συγχρονισμό. Παρατίθενται οι ενεργές τιμές έντασης για τις δύο μηχανές.



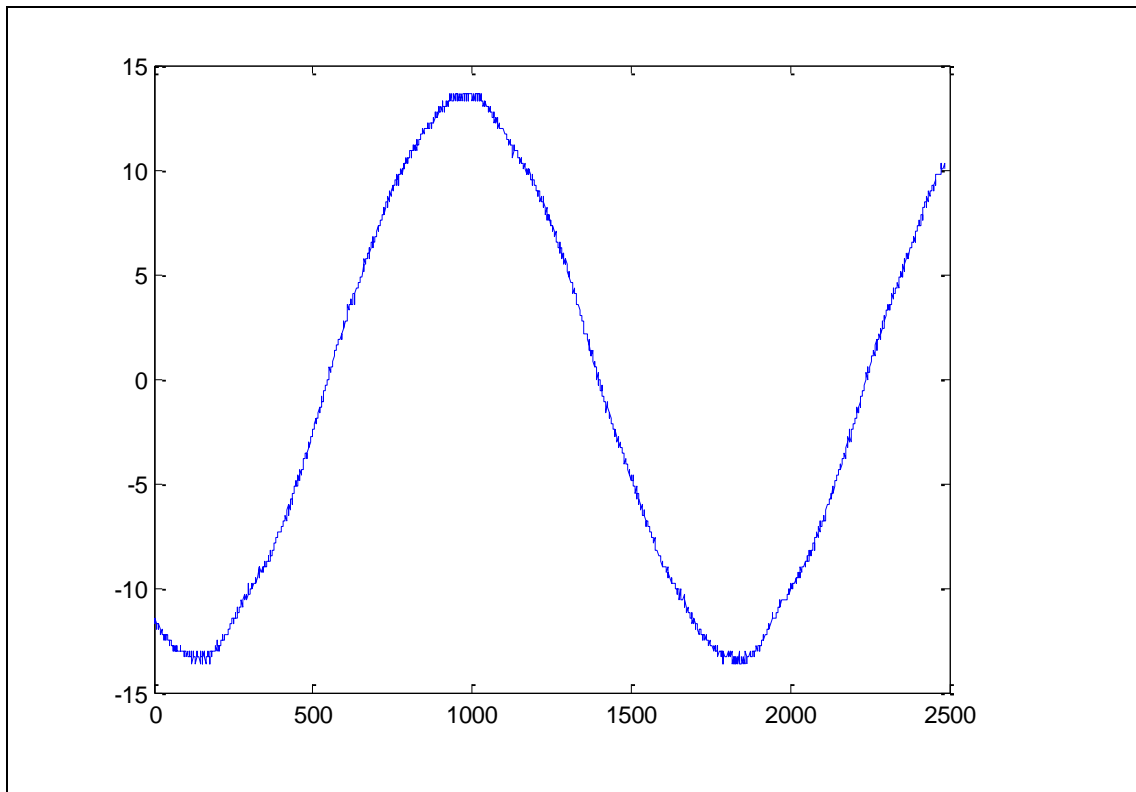
Σχήμα 6.19 Ενεργές τιμές έντασης γραμμής, με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1, ενώ με πράσινο η γεννήτρια G2.

Καταγράφεται μικρή αύξηση των ενεργών τιμών εναλλασσόμενης τάσης, αύξηση που αποδίδεται στην παρεμβολή των ωμικών αντιστάσεων του διακόπτη παραλληλισμού μεταξύ των μηχανών. Γενικά τα ρεύματα παίρνουν τις ίδιες τιμές και για τις δύο γεννήτριες. Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται οι ενεργές τιμές των τάσεων κατά την παράλληλη λειτουργία τους. Παρατηρείται πως κατά την παράλληλη λειτουργία, οι τάσεις εξόδου των δύο μηχανών συγκλίνουν σε σχέση με τη προηγούμενη φάση του πειράματος. Σε ιδανικές συνθήκες θα υπήρχε ταύτιση των τιμών, αλλά όπως έχει σημειωθεί, μικρές διαφοροποιήσεις στις ωμικές αντιστάσεις που συναντάει το ρεύμα στην έξοδο των γεννητριών όπως το μήκος των καλωδίων σύνδεσης, επιφέρουν τέτοιες αποκλίσεις.



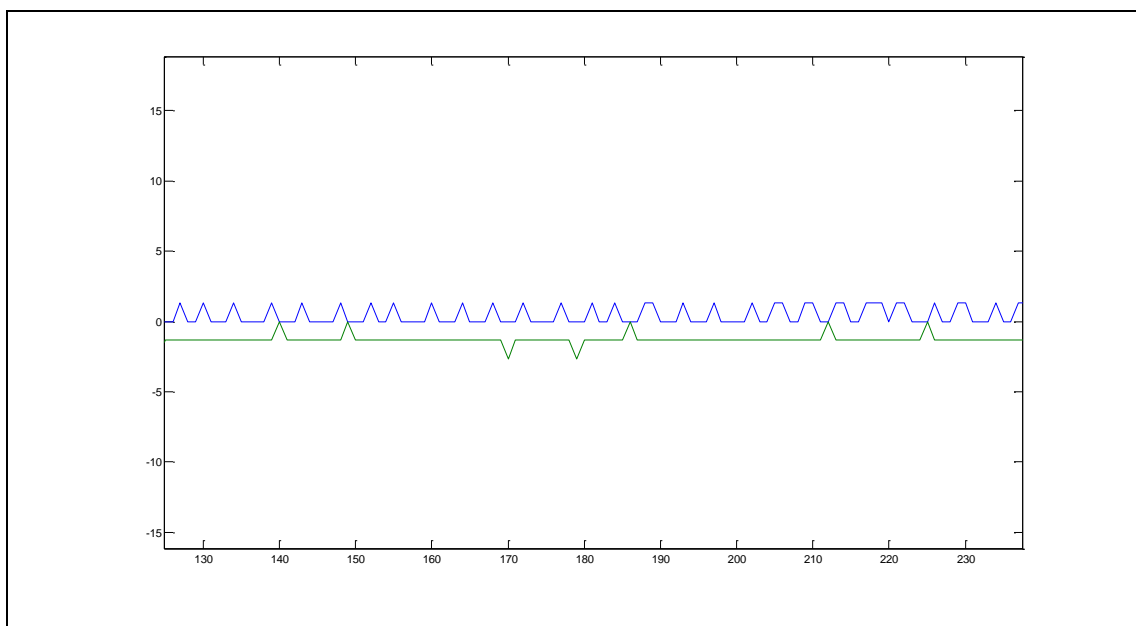
Σχήμα 6.20 Ενεργές τιμές πολικής τάσης, με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1, ενώ με πράσινο η γεννήτρια G2.

Παρακάτω παρατίθεται η καμπύλη της εναλλασσόμενης τάσης για τη γεννήτρια G1 κατά τον παραλληλισμό.



Σχήμα 6.21 Ημιτονοειδής κατανομή στιγμιαίων τιμών τάσης για τη γεννήτρια G1

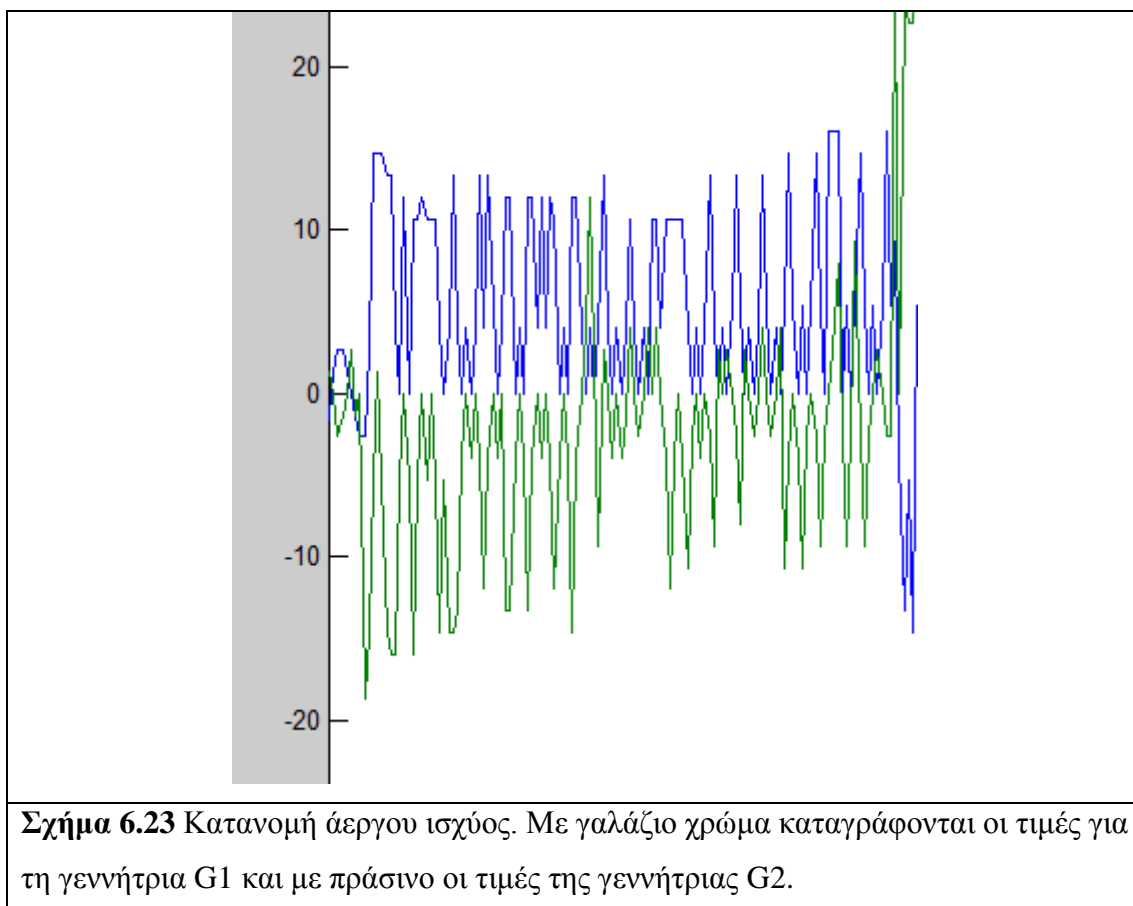
Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές ενεργού ισχύος για τις δύο γεννήτριες.



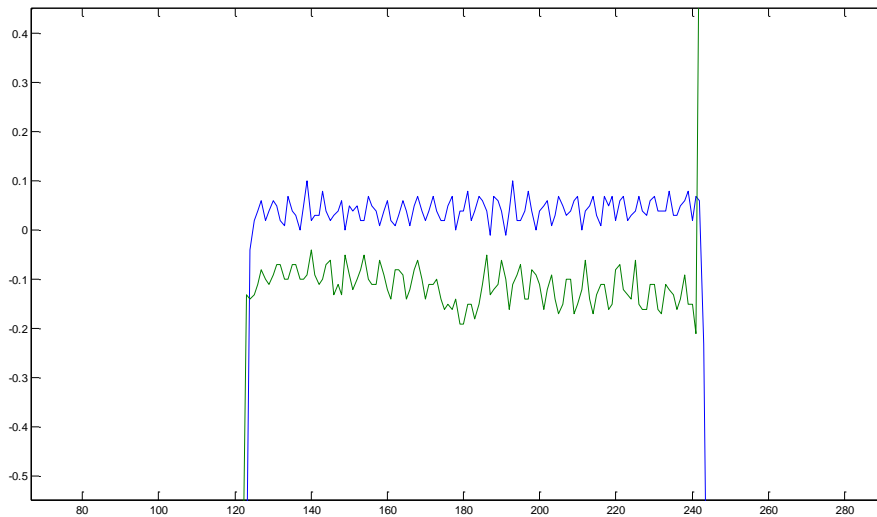
Σχήμα 6.22 Η κατανομή ενεργού ισχύος P. Με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1 ενώ με πράσινο οι τιμές της γεννήτριας G2.

Σε αυτή τη φάση του πειράματος, πέρα από κάποιες περιρρέουσες ωμικές αντιδράσεις δε λαμβάνει καμία παραγωγή ενεργού ισχύος. Η μικρή μεταφορά

ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια G2 στη γεννήτρια G1 οφείλεται σε πολύ μικρή διαφορά φάσης μεταξύ των δύο εναλλασσομένων τάσεων, όπου η τάση της γεννήτριας G2 προπορεύεται ελάχιστα της τάσης της γεννήτριας G1. Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρείται και στην παραγωγή άεργου ισχύος, με την γεννήτρια G1 να καταναλώνει άεργο ισχύ, που παράγεται στις γεννήτρια G2.



Στο τελευταίο για αυτή τη φάση του πειράματος διάγραμμα καταγράφονται οι τιμές του συντελεστή ισχύος.

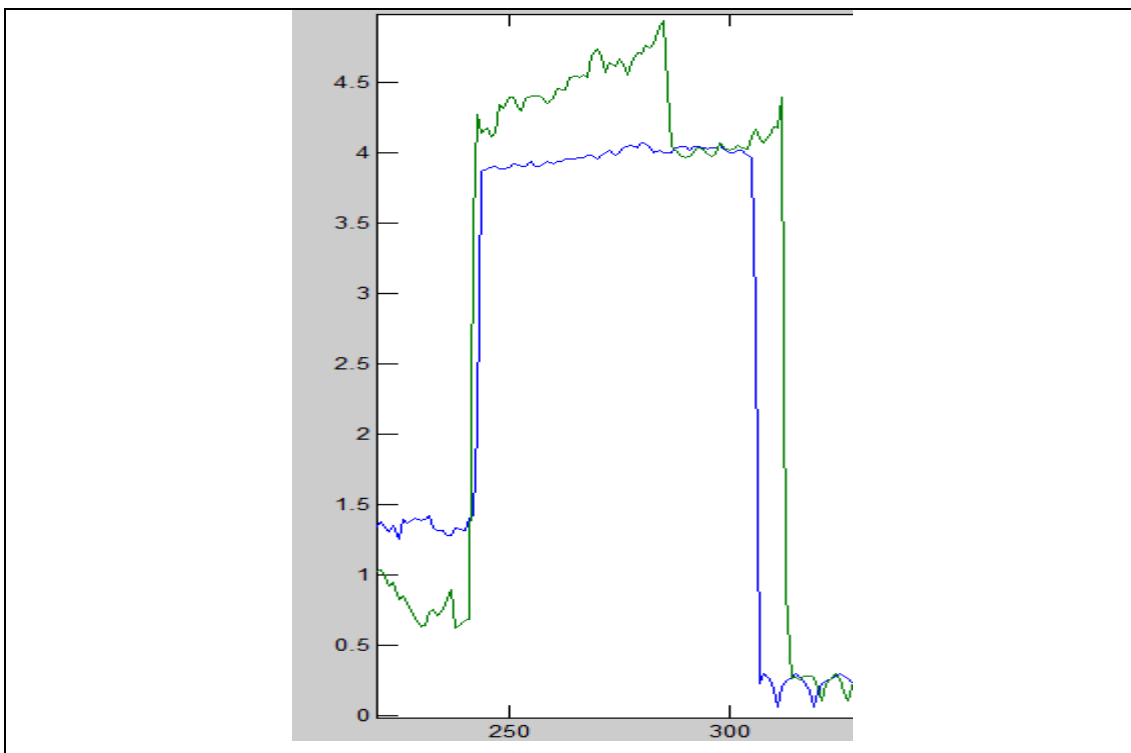


Σχήμα 6.24 Οι τιμές του συντελεστή ισχύος ΣΙ. Με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές για τη γεννήτρια G1 και με πράσινο χρώμα οι τιμές για τη γεννήτρια G2.

Παρατηρείται πως οι δύο μηχανές διαφοροποιούνται ως προς τη συμπεριφορά τους. Η γεννήτρια G2, καταγράφει αρνητικό συντελεστή ισχύος ενώ η γεννήτρια G1 θετικό συντελεστή. Σύμφωνα με τη **σύμβαση του φορτίου**, που αναφέρθηκε για της μετρήσεις του πολυμέτρου, η γεννήτρια G1 παρουσιάζει ελαφρά επαγωγικό χαρακτήρα καθώς είναι εκείνη που καταναλώνει άεργο ισχύ, ενώ η γεννήτρια G2 χωρητικό καθώς στους οπλισμούς της παράγεται και αποθηκεύεται αυτή η ισχύ προτού αποδοθεί στο σύστημα .

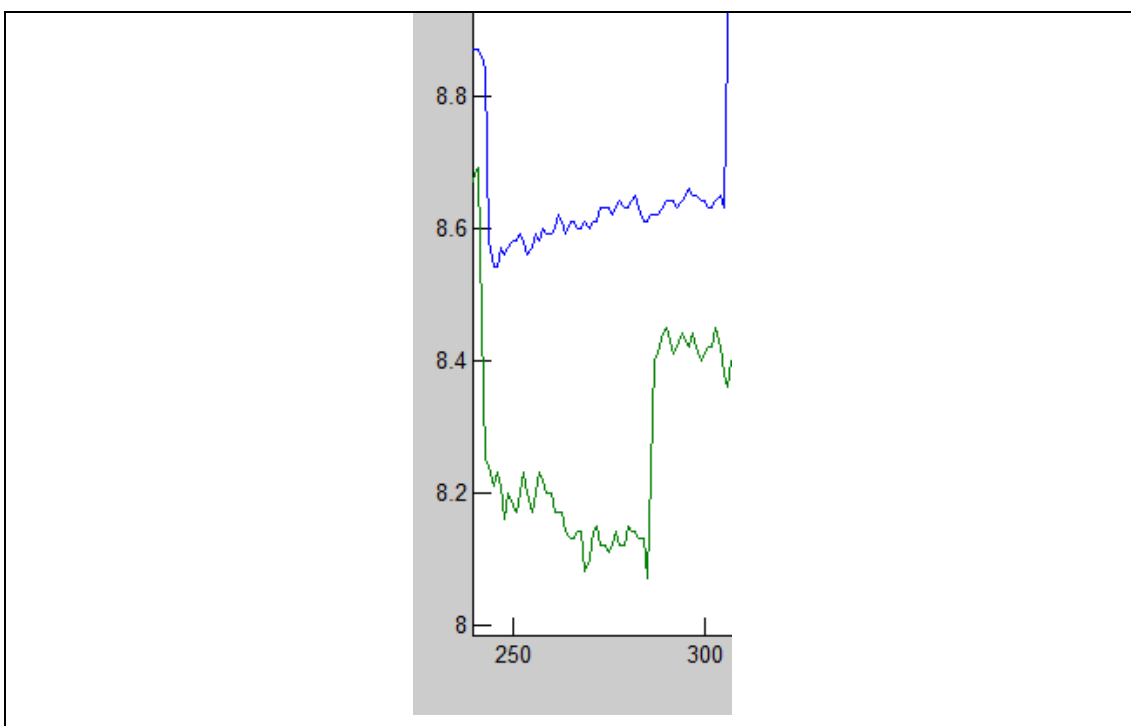
6.4.2.3 Η χρονική περίοδος μετά την εκκίνηση του κινητήρα.

Κλείνει ο διακόπτης τροφοδοσίας τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης και παύει η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα E2. Πλέον ο άξονας του κινητήρα καταχωρείται ως πρόσθετο φορτίο και για να μπορέσει το σύστημα να τον υποστηρίξει εμφανίζεται αύξηση στα πολικά μεγέθη έντασης και στις δύο μηχανές καθώς και στα διαγράμματα ισχύος, μαζί με συνεπαγόμενη πτώση στα πολικά μεγέθη της τάσης εξόδου. Στο παρακάτω διάγραμμα ενεργών τιμών πολικής έντασης, καταγράφεται η αύξηση στις εξόδους και των δύο μηχανών.



Σχήμα 6.25 Ενεργές τιμές πολικής έντασης, με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1, ενώ με πράσινο η γεννήτρια G2.

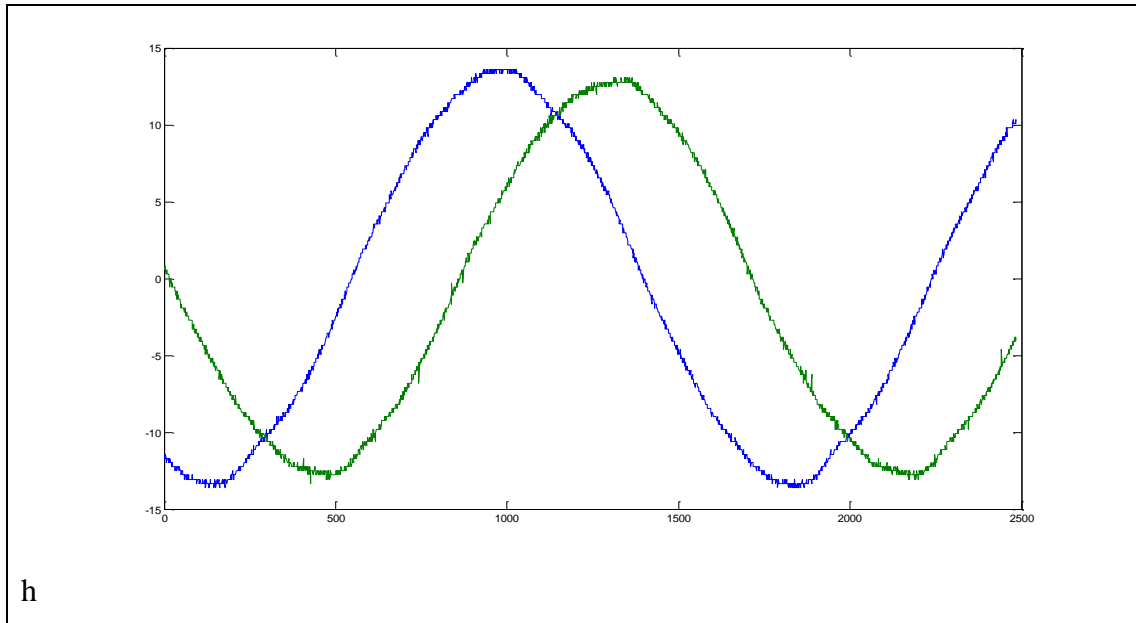
Ακολουθεί το διάγραμμα ενεργών τιμών πολικής τάσης των δύο μηχανών.



Σχήμα 6.25 Ενεργές τιμές πολικής τάσης, με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές της γεννήτριας G1, ενώ με πράσινο η γεννήτρια G2.

Η γεννήτρια G1 εμφανίζει ενεργές τιμές πολικής τάσης γύρω από την τιμή $V_{rms}=8,6\text{ V}$.

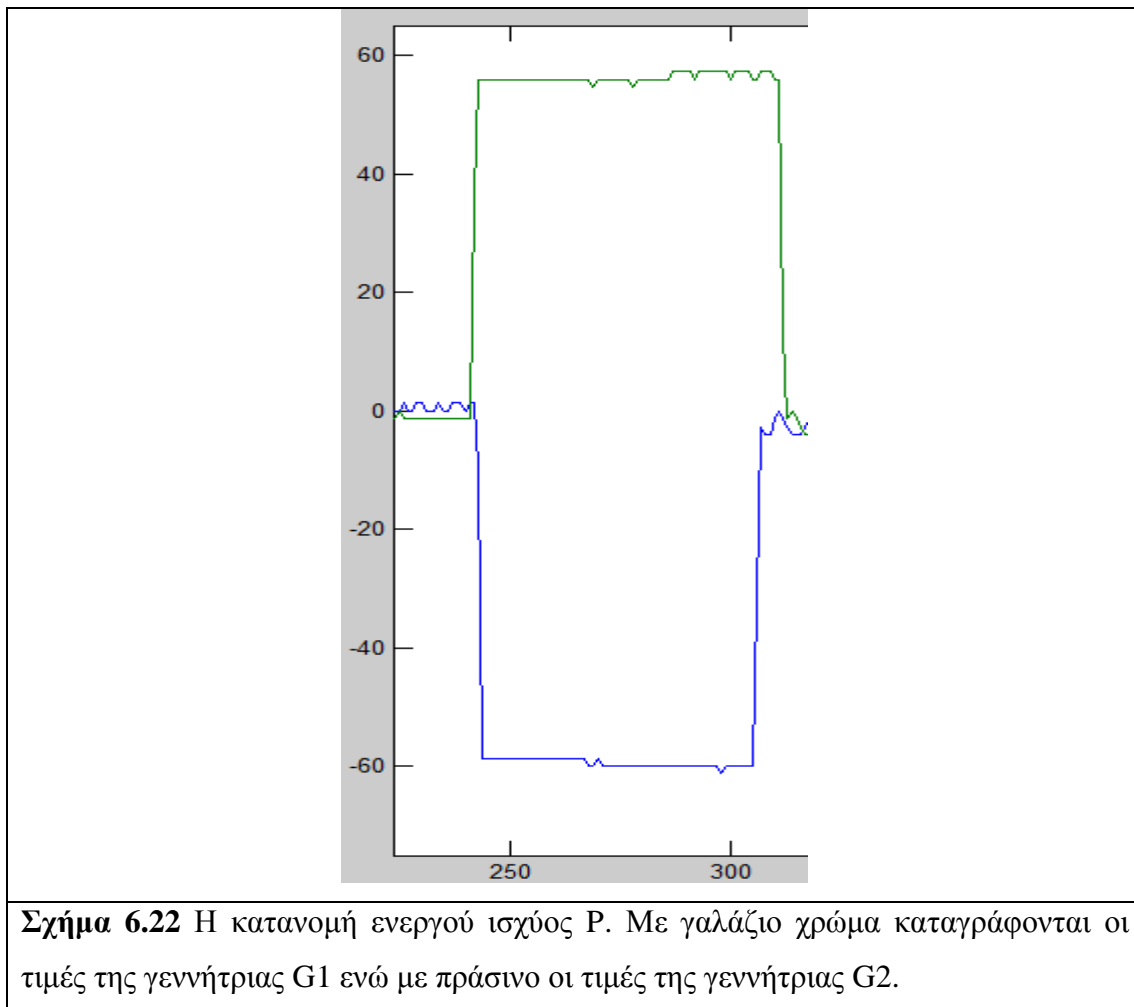
Παρακάτω παρατίθεται η καμπύλη της εναλλασσόμενης τάσης για τη γεννήτρια G1 κατά τον παραλληλισμό και κατά την διακοπή του inverter.



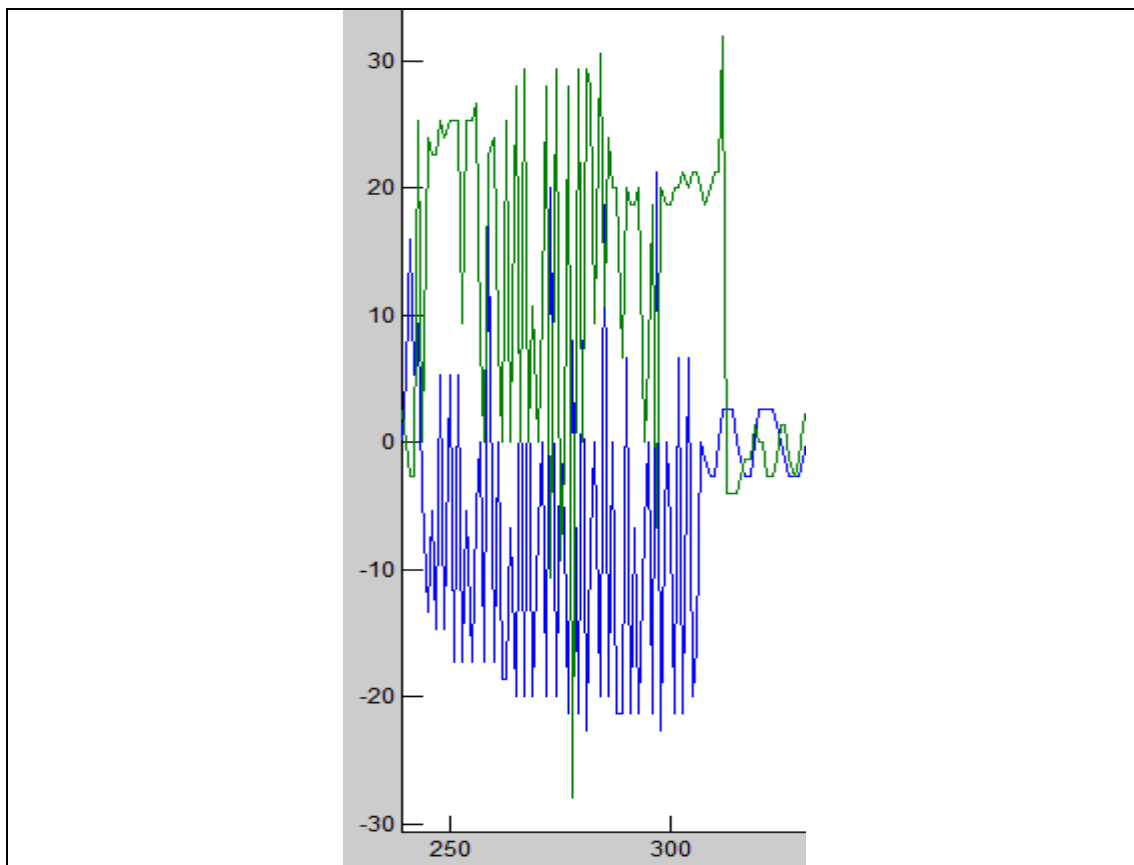
Σχήμα 6.21 Ημιτονοειδής κατανομή στιγμιαίων τιμών τάσης για τη γεννήτρια G1, με γαλάζιο χρώμα παρατίθενται οι στιγμιαίες τιμές κατά το παραλληλισμό και με πράσινο κατά τη διακοπή του inverter.

Ο παλμογράφος καταγράφει μικρή πτώση της ημιτονοειδούς πολικής τάσης με πλάτος $V_{\pi} = 12,5V$. Σύμφωνα με τον τύπο που συνδέει το πλάτος ημιτονοειδούς τάσης με την ενεργό τιμή της, η αριθμητικά υπολογιζόμενη ενεργός τιμή είναι $V_{rms} = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{2}} = 8,84V$. Η τιμή που υπολογίζεται αριθμητικά είναι πολύ κοντά στο εύρος των ενεργών τιμών που καταγράφει το πολύμετρο.

Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές ενεργού ισχύος για τις δύο γεννήτριες.

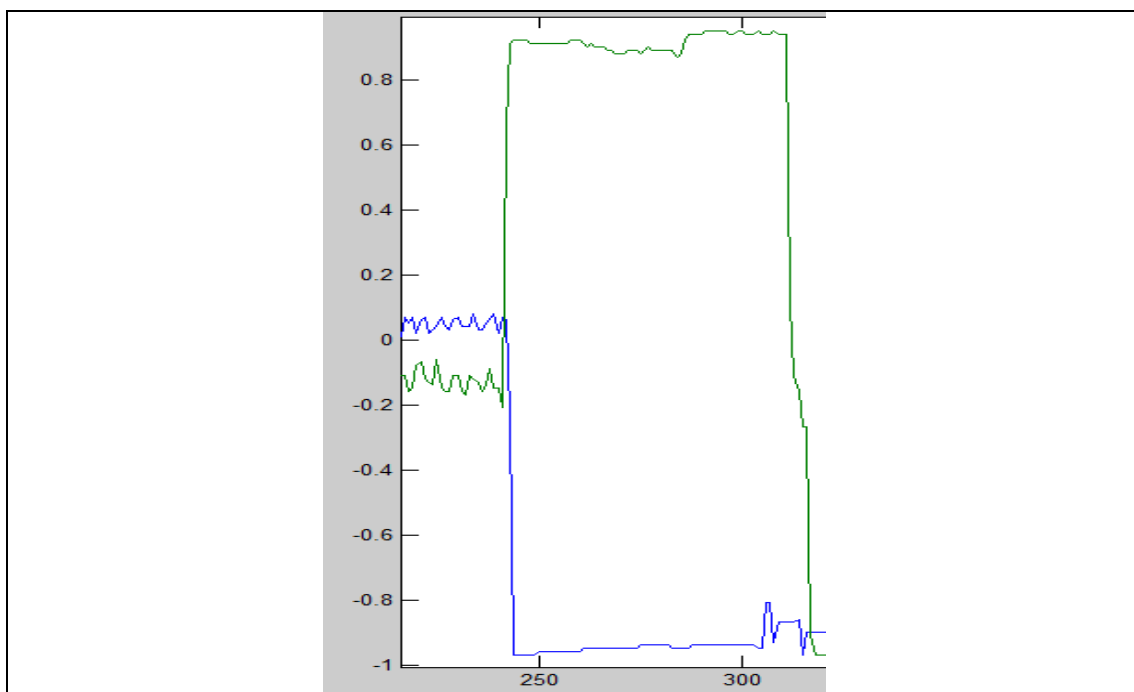


Και σε αυτή τη φάση του πειράματος, πέρα από κάποιες περιρρέουσες ωμικές αντιδράσεις δε λαμβάνει καμία παραγωγή ενεργού ισχύος. Καθώς υφίσταται όμως το επιπρόσθετο φορτίο του άξονα του κινητήρα E2, καταγράφεται μεταφορά ισχύος από τη γεννήτρια G1 στη γεννήτρια G2, που πλέον δρα ως σύγχρονος κινητήρας για να καλυφθεί αυτή η ανάγκη. Στο διάγραμμα εμφανίζεται καθαρά η παραγωγή ισχύος από τη σύγχρονη γεννήτρια και η μεταφορά της στο σύγχρονο κινητήρα όπου καταναλώνεται αυτή η ισχύς. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο παρατηρείται και στην παραγωγή άεργου ισχύος, με την γεννήτρια G1 να παράγει άεργο ισχύ, που καταναλώνεται στις σύγχρονες αντιστάσεις του οπλισμού της γεννήτριας G2.



Σχήμα 6.23 Κατανομή άεργου ισχύος. Με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές για τη γεννήτρια G1 και με πράσινο οι τιμές της γεννήτριας G2.

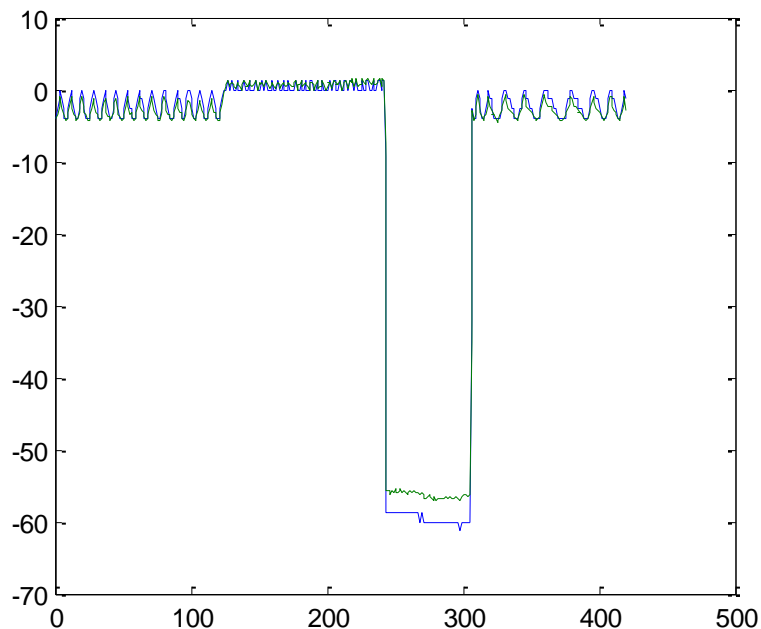
Στο τελευταίο διάγραμμα καταγράφονται οι τιμές του συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 6.24 Οι τιμές του συντελεστή ισχύος ΣΙ. Με γαλάζιο χρώμα καταγράφονται οι τιμές για τη γεννήτρια G1 και με πράσινο χρώμα οι τιμές για τη γεννήτρια G2.

Όπως ήταν αναμενόμενο η μηχανή G1 που συνεχίζει να λειτουργεί ως σύγχρονη γεννήτρια, καθώς παράγει άεργο ισχύ που αποθηκεύεται με στους οπλισμούς της για να αποδοθεί στη μηχανή G2, καταγράφει αρνητικές τιμές συντελεστή ισχύος. Παρουσιάζει χωρητικό χαρακτήρα λειτουργίας, σε αντίθεση με το σύγχρονο κινητήρα G2 ο οποίος καταναλώνει άεργο ισχύ και παρουσιάζει επαγωγικό χαρακτήρα λειτουργίας και επομένως καταγράφει θετικές τιμές συντελεστή ισχύος.

Στο επόμενο διάγραμμα γίνεται μια επαλήθευση των μετρήσεων του πολυμέτρου. Με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται η πορεία τιμών της ενεργού ισχύος για τη γεννήτρια G1 όπως καταγράφηκαν και με πράσινο, η πορεία τιμών σύμφωνα με την αριθμητική παράσταση $P = V_{\epsilon\nu} I_{\epsilon\nu} \cos\varphi = \frac{V_{\pi}}{\sqrt{3}} I_{\epsilon\nu} \cos\varphi$. Τα διαγράμματα ισχύος αναφέρονται στην ισχύ που μεταφέρονται σε μία γραμμή του τριφασικού κυκλώματος.



Σχήμα 6.25 Κατανομή τιμών ενεργού ισχύος για τη γεννήτρια G1. Με γαλάζιο χρώμα οι τιμές όπως καταγράφηκαν από το πολύμετρο, και με πράσινο οι τιμές όπως υπολογίζονται αριθμητικά.

Βιβλιογραφία

- 1) William H. Hayat, Jack Kemmerly, (1991), *Ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων*, Αθήνα : Εκδόσεις Ε.Μ.Π
- 2) Chapman Stephen J (1993), *Ηλεκτρικές μηχανές DC-AC*, Αθήνα : Εκδόσεις Ε.Μ.Π
- 3) Hubert, Charles, (2008), *Ηλεκτρικές μηχανές: θεωρία, λειτουργία, εφαρμογές ρυθμίσεις*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π
- 4) Chapman Stephen J. (1993), *Electric machinery fundamentals* (1999) Νέα Υόρκη: Εκδόσεις McGraw-Hill
- 5) Προυσαλίδης Ι. (Ιούλιος 2003), «ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑΣ», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 6) Προυσαλίδης Ι., Ιωαννίδης Ι. (2003), 3η Εργαστηριακή άσκηση 9^{ου} εξαμήνου, «ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα