



Τεχνολογικό
Εκπαιδευτικό
Ιδρυμα Κρήτης
Παράρτημα Χανίων

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ
ΧΩΡΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΩΝ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ

ΝΕΙΛΑ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

ΠΑΠΑΔΑΚΗ ΜΑΤΘΑΙΟΥ

Εισηγητής : **ΘΥΜΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ**

Χανιά, Φεβρουάριος 2011

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	5
ΣΚΟΠΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	6
PURPOSE	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ	9
1.1. Γενικά περί ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής	9
1.2. Δομή ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής	9
1.3. Λειτουργία και σημαντικές ιδιότητες	10
1.4. Ισοδύναμο κύκλωμα	13
1.5. Απώλειες επαγωγικών κινητήρων	19
1.6. Χαρακτηριστική Ροπής -Ταχύτητας	21
1.7. Έλεγχος ταχύτητας σε κινητήρες επαγωγής	24
1.8. Εκκίνηση επαγωγικού Κινητήρα	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ	44
2.1. Έλεγχος ταχύτητας σε ανοιχτό βρόχο	48
2.2. Έλεγχος ταχύτητας σε διάταξη διπλής τροφοδοσίας	54
2.3. Σύστημα ανάκτησης της ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα.	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ	63
3.1. Μέθοδος του υπολογισμού ολίσθησης συχνότητας	63
3.2. Εκτίμηση ταχύτητας χρησιμοποιώντας εξισώσεις	66
3.3. Εκτίμηση βασισμένη στις ανώτερες αρμονικές τάσεις	69
3.4. Εκτίμηση ροής και ρύθμιση διανύσματος ροής	72
3.5. Άμεσος έλεγχος μέσω ροπής και ροής	75
3.6. Έλεγχος βασισμένος σε παρατηρητές	76
3.7. MRAS, Model Reference Adaptive Systems	79
3.8. Ταυτοποίηση ταχύτητας με τη χρήση φίλτρου Kalman	81
3.9. Μοντέλο ελέγχου ταχύτητας χωρίς αισθητήρες με προσαρμογή παραμέτρων	83
3.10. Εκτίμηση βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα	84
3.11. Συμπεράσματα	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ	87
4.1 Παρατηρήσεις	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ	94
5.1. Προσομοίωση στο MATLAB του μοντέλου κινητήρα επαγωγής με φίλτρο KALMAN για τον έλεγχο ταχύτητας του	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ	105
6.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ	105
6.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN	108
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	111
ΕΠΙΛΟΓΟΣ	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	115

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης τον έλεγχο κινητήρων επαγωγής και ειδικότερα τον έλεγχο χωρίς αισθητήρες των κινητήρων επαγωγής.

Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά μέρη της θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής, ο προσδιορισμός των παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος, οι θεωρητικές μέθοδοι ελέγχου ταχύτητας και οι μέθοδοι εκκίνησής τους. Επίσης περιγράφονται αναλυτικά το γενικευμένο και μαθηματικό μοντέλο του κινητήρα επαγωγής σε δυναμική κατάσταση. Ακολουθεί ανάλυση για τις τεχνικές ελέγχου με ανοιχτό βρόχο, διάταξη διπλής τροφοδότησης, έλεγχος προσανατολισμού ως προς το πεδίο και σύστημα ανάκτησης ισχύος.

Το κύριο μέρος της εργασίας αναφέρεται στην μέθοδο ελέγχου ταχύτητας χωρίς τη χρήση αισθητήρων όπου οι πληροφορίες για την ταχύτητα του κινητήρα συνάγονται από μετρούμενες τιμές των τάσεων στάτη και των ρευμάτων.

Η μέθοδος αυτή είναι μια νέα τεχνική ελέγχου η οποία θα έχει ευρεία εφαρμογή κυρίως στη βιομηχανία καθώς παρέχει υψηλή αξιοπιστία, καλή απόδοση, καλή λειτουργία σε μεγάλες απαιτήσεις αλλαγής ταχύτητας, εξάλειψη θορύβου και μικρότερο κόστος εγκατάστασης λόγω έλλειψης αισθητήρων.

Τέλος γίνεται προσομοίωση στο πρόγραμμα MATLAB μιας διάταξης ελέγχου χωρίς αισθητήρες, όπου ο κινητήρας επαγωγής συνδέεται κατάλληλα με ένα φίλτρο KALMAN, πραγματοποιείται έλεγχος ταχύτητας και εξάγονται οι κατάλληλες χαρακτηριστικές. Παρατηρούμε ότι η απόκριση του φίλτρου KALMAN δεν είναι τόσο ακριβής όσο αυτή με την μέθοδο προσανατολισμού πεδίου, ανατροφοδότησης. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού με τη μέθοδο του φίλτρου δεν λαμβάνουμε ακριβείς μετρήσεις αλλά προβλέψεις. Η απόκλιση όμως των δύο μεθόδων δεν είναι πολύ μεγάλη πράγμα που καθιστά τη μέθοδο αρκετά ικανοποιητική.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικές μηχανές, κινητήρας επαγωγής, έλεγχος ταχύτητας, έλεγχος ταχύτητας χωρίς αισθητήρες, έλεγχος προσανατολισμού πεδίου, φίλτρο KALMAN, προσομοίωση, MATLAB.

ABSTRACT

The present thesis studies the speed control of induction motors and especially the sensorless control of induction motors.

Initially the basic components of induction machines theory, the identification of equivalent circuit parameters, the theoretical methods of speed control and starting methods are presented. Moreover the general and mathematical model of induction motor in dynamical state are described in detail and the techniques of open loop speed control, the field orientation control, the block of double supply are presented.

The thesis main part refers to the speed sensorless control of induction motors. This method is a new control method that will have extensive application mainly in industry as it offers higher reliability, good performance, good operation in adverse conditions and lower cost of the whole control set.

Finally a block of speed sensorless control where the motor is connected to a KALMAN filter is simulated. Speed control was achieved and the appropriate curves were extracted, we observe that the response of KALMAN filter is not as accurate as in the classic method of field oriented control. This was expected, as with the filter method we don't extract accurate measurements but predictions. The difference between the methods is not very large which makes the filter method satisfactory.

KEYWORDS

Electric machines, Induction motor, speed control, sensorless speed control, field oriented control, Kalman filter, simulation, Matlab

ΣΚΟΠΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Είμαστε σίγουροι ότι στο εγγύς μέλλον η μέθοδος ελέγχου χωρίς αισθητήρες θα χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε όλους τους τομείς.

Για αυτό γίνονται πολλές προσπάθειες για νέες εφαρμογές στα πεδία ελέγχου ταχύτητας, υπολογισμού ροής ρότορα και άμεσου ελέγχου ροπής.

Τα Ηλεκτρονικά Ισχύος, οι επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και τα νευρωνικά δίκτυα έχουν συμβάλει σε μεγάλο βαθμό σε ένα καινούριο τρόπο ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών αρκετά αξιόπιστο και με χαμηλότερο κόστος.

Σκοπός επομένως της συγκεκριμένης πτυχιακής είναι να γίνει αναφορά στο τρόπο ελέγχου ταχύτητας των ηλεκτρικών μηχανών χωρίς την χρήση αισθητήρων αλλά με τις πληροφορίες για την ταχύτητα να συνάγονται από μετρούμενες τιμές των τάσεων στάτη και ρευμάτων

Επίσης επιδίωξη μας με τον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών χωρίς την χρήση αισθητήρων είναι να προβάλουμε το χαμηλότερο κόστος και το μικρότερο μέγεθος των συσκευών οδήγησης, την εξάλειψη του θορύβου λόγω της μη χρήσης αισθητήρων και τέλος την αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος σε σχέση με την μέθοδο ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών με την χρήση αισθητήρων.

PURPOSE

We are confident that in the near future the method of sensorless control will be used widely in all areas. This is the result that we see many efforts to be made for new applications in the areas of speed control, rotor flux calculation and direct torque control.

Power electronics, digital signal processors, automatic control systems and neural networks have largely contributed to control electrical machines in a more efficient, reliable and cost effective way.

The purpose of this thesis, therefore, is to discuss the speed control of electric machines without the use of sensors, but using the speed information being inferred from measured values of stator voltages and currents as well as the benefits arisen out in regards to lower cost, smaller size of the driving devices, elimination of noise due to non-use of sensors, and finally the

increased system reliability compared with the method Control of electrical machines using sensors.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν τις βασικότερες διατάξεις για την παραγωγή, μεταφορά και αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης βρίσκουν εφαρμογή στα κυριότερα τμήματα της βιομηχανίας, παραγωγής, αλλά και της καθημερινής μας ζωής.

Σήμερα οι ηλεκτρικές μηχανές που κατασκευάζονται σε βιομηχανική κλίμακα είναι κυρίως οι εξής:

- Οι Σύγχρονες μηχανές που κυρίως χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες, εναλλακτήρες, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι Ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής που κυρίως χρησιμοποιούνται ως κινητήρες σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις
- Οι Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος των οποίων η χρήση περιορίζεται όπου απαιτείται έλεγχος στροφών.
- Οι Κινητήρες Έλξεως που χρησιμοποιούνται σε μεταφορικά μέσα που λειτουργούν με συχνότητα $16^{2/3}$ HZ για την Ευρώπη ή 25Hz για την Αμερική.
- Οι Κινητήρες Μικρής Ισχύος που χρησιμοποιούνται στις οικιακές και παρόμοιες συσκευές καθώς και ειδικοί ελεγχόμενοι μικροί κινητήρες με μεγάλες απαιτήσεις ακριβείας που χρησιμοποιούνται σε ιατρικά μηχανήματα.

Η θεωρία των ηλεκτρικών μηχανών παρέμενε ουσιαστικά αμετάβλητη εδώ και χρόνια όμως σήμερα παρουσιάζεται σημαντική βελτίωση στη λειτουργία τους σε πάρα πολλούς τομείς. Σε αυτό συμβάλουν η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου και των βιομηχανικών ηλεκτρονικών. Ταχύτατη εξέλιξη έχει επιτευχθεί στον τομέα του ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών και ειδικά στον έλεγχο των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής.

Ο έλεγχος υλοποιείται με την εφαρμογή της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου. Όμως για να καταστεί δυνατός ο έλεγχος πρέπει οι ηλεκτρικές μηχανές να συνδέονται με ηλεκτρονικές μονάδες ισχύος οι οποίες υποχρεούνται να υπακούν στους νόμους και περιορισμούς που επιβάλλει η θεωρία αυτομάτου ελέγχου. Οι νόμοι και οι περιορισμοί αυτοί υλοποιούνται με τη βοήθεια των βιομηχανικών ηλεκτρονικών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μελέτης τον έλεγχο των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής και ειδικά τον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής χωρίς την χρήση αισθητήρων. Η μέθοδος αυτή είναι μια νέα τεχνική ελέγχου η οποία θα έχει ευρεία εφαρμογή κυρίως στη βιομηχανία καθώς παρέχει υψηλή αξιοπιστία, ευρωστία, καλή λειτουργία ακόμα και σε δυσμενής συνθήκες. Ακόμη, ο θόρυβος που υπεισέρχεται κατά τον έλεγχο με τη χρήση αισθητήρων εδώ εξαλείφεται καθώς δεν υπάρχουν αισθητήρες. Τέλος, ένας ακόμη λόγος που συνέβαλε στην ανάπτυξη της είναι το μικρότερο οικονομικό κόστος της όλης εγκατάστασης ελέγχου σε σχέση με την μέθοδο ελέγχου με αισθητήρες.

Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Τα πρώτα κεφάλαια της εργασίας είναι θεωρητικά και έχουν ληφθεί τόσο από βιβλία που διδάχθηκα στην σχολή όσο και από διάφορες άλλες πηγές οι οποίες παραθέτονται στο τέλος της εργασίας. Συνεπώς η παρούσα εργασία μπορεί να χαρακτηριστεί βιβλιογραφική.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής. Γίνεται προσδιορισμός των παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος, αναφορά στις θεωρητικές μεθόδους ελέγχου ταχύτητας και στις μεθόδους εκκίνησής τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά το γενικευμένο και μαθηματικό μοντέλο του κινητήρα επαγωγής σε δυναμική κατάσταση καθώς και οι τεχνικές ελέγχου ταχύτητας που χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα κίνησης εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος ελέγχου χωρίς αισθητήρες. Αναλύονται οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει η οδήγηση των κινητήρων επαγωγής καθώς και τα block διαγράμματά τους.

Στο κεφάλαιο τέσσερα, γίνεται συγκριτική παρουσίαση της απόδοσης των διαφόρων μεθόδων ελέγχου χωρίς αισθητήρες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση στο πρόγραμμα MATLAB ενός κινητήρα επαγωγής ο οποίος συνδέεται με ένα φίλτρο KALMAN και πραγματοποιείται έλεγχος της ταχύτητας του. Και τέλος ακολουθεί ο επίλογος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής

1.1. Γενικά περί ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής.

Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων μηχανών παράγεται από ανεξάρτητες πηγές Σ.Ρ ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή) στα τυλίγματα διέγερσης τους.

Αυτού του είδους οι μηχανές έλαβαν την ονομασία επαγωγικές λόγω του ότι η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στο κύκλωμα διέγερσης αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση.

Η ειδοποιός διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το γεγονός ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης.

Η επαγωγική μηχανή μπορεί να λειτουργεί και σαν κινητήρας και σαν γεννήτρια. Όμως κατά τη λειτουργία της ως γεννήτρια παρατηρούνται πολλά μειονεκτήματα, πράγμα που την κάνει να χρησιμοποιείται σπάνια ως γεννήτρια. Συνέπεια τούτου είναι όλες οι επαγωγικές μηχανές να αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

1.2. Δομή ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής

Οι ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής αποτελούνται από το ακίνητο μέρος τον στάτη και τον περιστρεφόμενο δρομέα.

Ο στάτης και ο δρομέας χωρίζονται από το διάκενο, η τάξη μεγέθους του είναι συνήθως κλάσματα του χιλιοστού. Σε πολύ μεγάλους κινητήρες μπορεί το διάκενο να είναι μερικά χιλιοστά.

- *Ενεργά μέρη* : είναι οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα (φορείς της τάσης και του ρεύματος) και οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα (φορείς της μαγνητικής ροής). Οι περιελίξεις είναι τοποθετημένες στα αυλάκια που βρίσκονται στην εσωτερική περιφέρεια του πυρήνα του στάτη και στην εξωτερική περιφέρεια του πυρήνα του δρομέα.

Οι πυρήνες αποτελούνται από στοιβαγμένα πυριτιούχα δυναμοελάσματα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών δινορρευμάτων. Σε μεγάλες μηχανές

οι πυρήνες κατασκευάζονται για τεχνολογικούς λόγους από τομείς δυναμοελασμάτων.

Στα αυλάκια του στάτη τοποθετείται η τριφασική περιέλιξη, τα έξι άκρα της οποίας καταλήγουν σε ισάριθμους ακροδέκτες του κιβωτίου άκρων.

Η περιέλιξη που βρίσκεται στα αυλάκια του δρομέα χαρακτηρίζει και το είδος της επαγωγικής μηχανής:

- *επαγωγική μηχανή με δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού*

Αποτελείται από μία σειρά αγωγίων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δύο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων.

- *επαγωγική μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα.*

Διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τυλίγμα όπου είναι τοποθετημένο ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίου. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίου. Άρα τα ρεύματα του δακτυλιοφόρου δρομέα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες κι ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης. Λόγω της τελευταίας δυνατότητας είναι εφικτή η επεξεργασία της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.

- *Μη ενεργά μέρη:* αποτελούν το περίβλημα, ο άξονας, τα έδρανα, τα πλέγματα, ο ανεμιστήρας και άλλα εξαρτήματα στήριξης, στερέωσης και μόνωσης.

1.3. Λειτουργία και σημαντικές ιδιότητες

Η επαγωγική μηχανή κατασκευάζεται με τυλίγματα απόσβεσης, η λειτουργία της είναι ίδια με την λειτουργία των τυλιγμάτων απόσβεσης στις σύγχρονες μηχανές (όπου είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος εκκίνησης τους).

- *Επαγόμενη ροπή* :έστω ένας επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού, εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα τάσεων στον στάτη, οπότε ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων διαρρέει τους αγωγούς του δρομέα. Συνέπεια αυτών των ρευμάτων είναι η παραγωγή του πεδίου B_s του στάτη, που περιστρέφεται με ανθρωπολογική φορά και ταχύτητα:

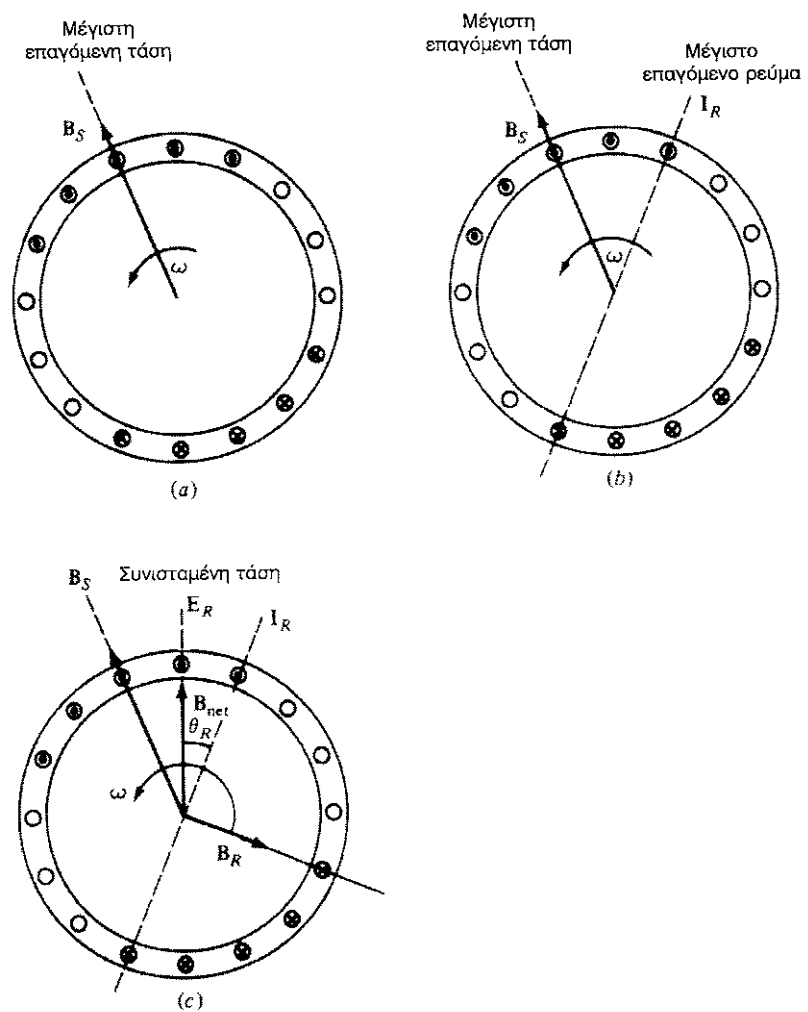
$$N_{sync} = \frac{120 f_c}{P}$$

όπου: f_c συχνότητα συστήματος σε Hz
P αριθμός πόλων μηχανής

Η σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη επάγει μία τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα η οποία είναι:

$$E_{ind} = (U \times B)l$$

όπου: U , η σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο
 B , η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη
 l , το μήκος του αγωγού του δρομέα



Σχήμα 1

Το ρεύμα του δρομέα προκαλεί το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_R . Η αλληλεπίδραση των δύο πεδίων προκαλεί την ροπή στη μηχανή:

$$T_{ind} = K B_R B_S \quad \text{με ανθρωρολογιακή φορά}$$

Δηλαδή ο δρομέας επιταχύνεται κατά την ανθρωρολογιακή φορά.

Η ταχύτητα του δρομέα μπορεί να είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη αλλά δεν μπορεί να είναι ίση με αυτή.

Ολίσθηση του δρομέα : η σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία περιγράφεται από δύο μεγέθη. Την ταχύτητα ολίσθησης και την ολίσθηση.

Η ταχύτητα ολίσθησης ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m$$

όπου : n_{slip} η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής

n_{sync} η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων

n_m η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής

Η ολίσθηση είναι η σχετική ταχύτητα εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα βάση:

$$S = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \quad (\times 100\%)$$

και μέσω γωνιακής ταχύτητας:

$$S = \frac{\omega_{sync} - \omega_m}{\omega_{sync}} \quad (\times 100\%)$$

Η τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών $s=0$, $s=1$.

Όπου έχει τιμή $s=0$ όταν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα και $s=1$ όταν ο δρομέας είναι ακίνητος.

Όταν $n_m=0$ rpm, η συχνότητα του δρομέα f_r είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη f_e , και η ολίσθηση είναι $s=1$.

Όταν $n_m = n_{sync}$ δηλ. όταν ο δρομέας κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η συχνότητα της τάσης του δρομέα f_r είναι μηδενική και η ολίσθηση είναι $s=0$.

Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα η συχνότητα στο δρομέα είναι ανάλογη της διαφοράς της ταχύτητας του πεδίου του στάτη, n_{sync} με την ταχύτητα του δρομέα.

Η συχνότητα του δρομέα είναι:

$$f_r = \frac{P}{120} (s_{sync} - n_m)$$

επίσης ισχύει

$$f_r = s f_e$$

όπου: f_r η συχνότητα του δρομέα
 f_e η συχνότητα του στάτη.

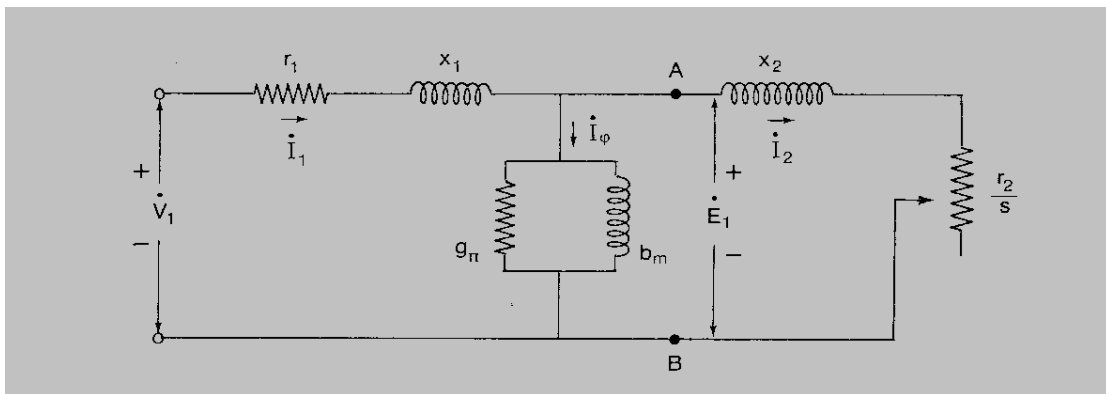
1.4. Ισοδύναμο κύκλωμα

Οι μηχανές επαγωγής έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις.

Μελετούμε τη μία φάση μόνο εφόσον όλες οι φάσεις συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο και η μόνη διάκριση μεταξύ τους είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσης χρόνου.

Το τύλιγμα στάτη θεωρείται συνδεδεμένο κατ'αστέρα. Επίσης θεωρείται ότι όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή κύματος. Οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στη διανομή της ροής αγνοούνται, ενώ λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκέδασης στάτη και δρομέα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2

Τα μεγέθη που παριστάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι τα εξής:

- V_1 τάση ακροδεκτών στάτη
- E_1 αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη συνισταμένη ροή διακένου
- I_1 ρεύμα στάτη
- r_1 πραγματική αντίσταση στάτη
- X_1 αντίδραση σκέδασης στάτη
- I_ϕ συνιστώσα ρεύματος διέγερσης
- I_π συνιστώσα απωλειών πυρήνα
- I_m συνιστώσα μαγνήτισης
- g_m αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα
- b_m μαγνητίζουσα αγωγιμότητα
- I_2 συνιστώσα φορτίου
- X_2 αντίδραση σκέδασης δρομέα ανοιγμένοι στη συχνότητα στάτη
- r_2/s ανακλώμενη αντίσταση, συνδυασμένη επίδραση του φορτίου στον άξονα και της αντιστάσεως του δρομέα.

Ισχύει η σχέση:

$$V_1 = E_1 + I_1(r_1 + jX_1)$$

Επισημαίνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανακλώνται στο στάτη, η συχνότητα τους μετατρέπεται σε συχνότητα στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα, όταν παρατηρούνται στο στάτη, γίνονται φαινόμενα συχνότητας στάτη, διότι το τύλιγμα του στάτη απλώς βλέπει κύματα ΜΕΔ και ροής να οδεύουν στη σύγχρονη ταχύτητα.

Προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό της επίδοσης του κινητήρα υπό φορτίο.

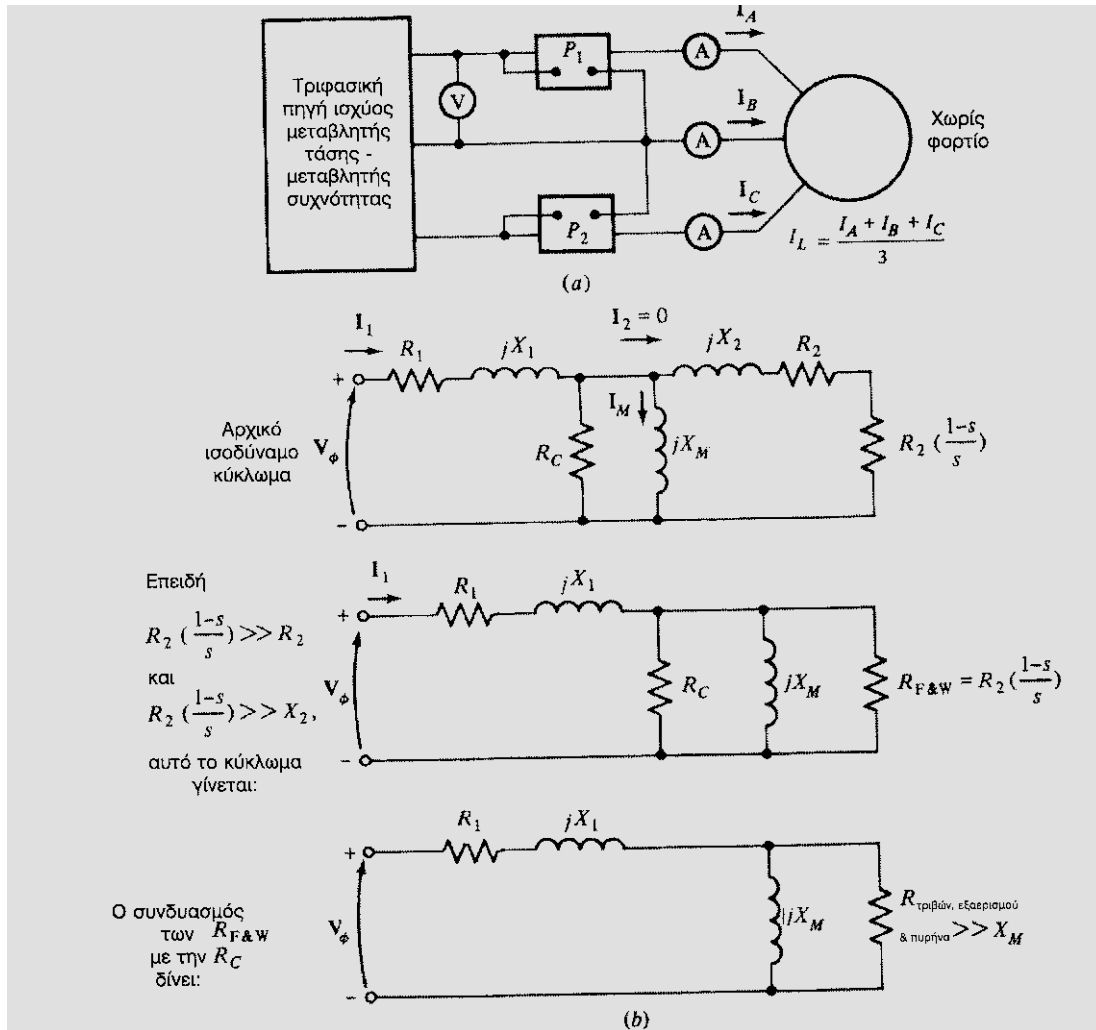
Για τη εύρεση αυτών των παραμέτρων πραγματοποιούνται οι εξής δοκιμές:

Δοκιμή κενού φορτίου, δοκιμή ακίνητου δρομέα και το πείραμα της μέτρησης των αντιστάσεων συνεχούς ρεύματος του τυλίγματος του στάτη.

- **Δοκιμή κενού φορτίου**

Κατά την πραγματοποίηση αυτής της δοκιμής μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα διέγερσης και τις απώλειες κενού φορτίου (περιστροφής).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3



Σχήμα 3

Ο κινητήρας περιστρέφεται χωρίς φορτίο και συνδέονται δύο βαττόμετρα, ένα βολτόμετρο και τρία αμπερόμετρα.

Εδώ το φορτίο του κινητήρα αποτελούν οι απώλειες τριβών και ανεμισμού, άρα όλη η ισχύς καταναλώνεται στις μηχανικές απώλειες. Η ολίσθηση είναι πολύ μικρότερη του 0.001.

Από το βαττόμετρο μετράμε την ισχύ εισόδου, η οποία πρέπει να είναι ίση με τις απώλειες του κινητήρα.

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι πολύ μικρές και αγνοούνται.

Οι απώλειες χαλκού στο στάτη δίνονται από τη σχέση:

$$P_{SCL} = I_1^2 R_1$$

Η ισχύς εισόδου είναι:

$$P_{IN} = P_{SCL} + P_{CORE} + P_{F+W} + P_{MISK} = 3 I_1^2 R_1 + P_{ROT}$$

Άρα μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες περιστροφής από τη σχέση:

$$P_{\text{ROT}} = P_{\text{IN}} - 3 I_1^2 R_1.$$

Όπου:

- P_{CORE} απώλειες πυρήνα
- $P_{\text{F+W}}$ απώλειες τριβών και ανεμισμού
- P_{MISK} κατανεμημένες απώλειες
- P_{SCL} απώλειες χαλκού στο στάτη

Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά την ισοδύναμη αντίσταση εισόδου από τη σχέση:

$$|Z| = V_{\phi} / I_{1, \text{NL}} = X_1 + X_M$$

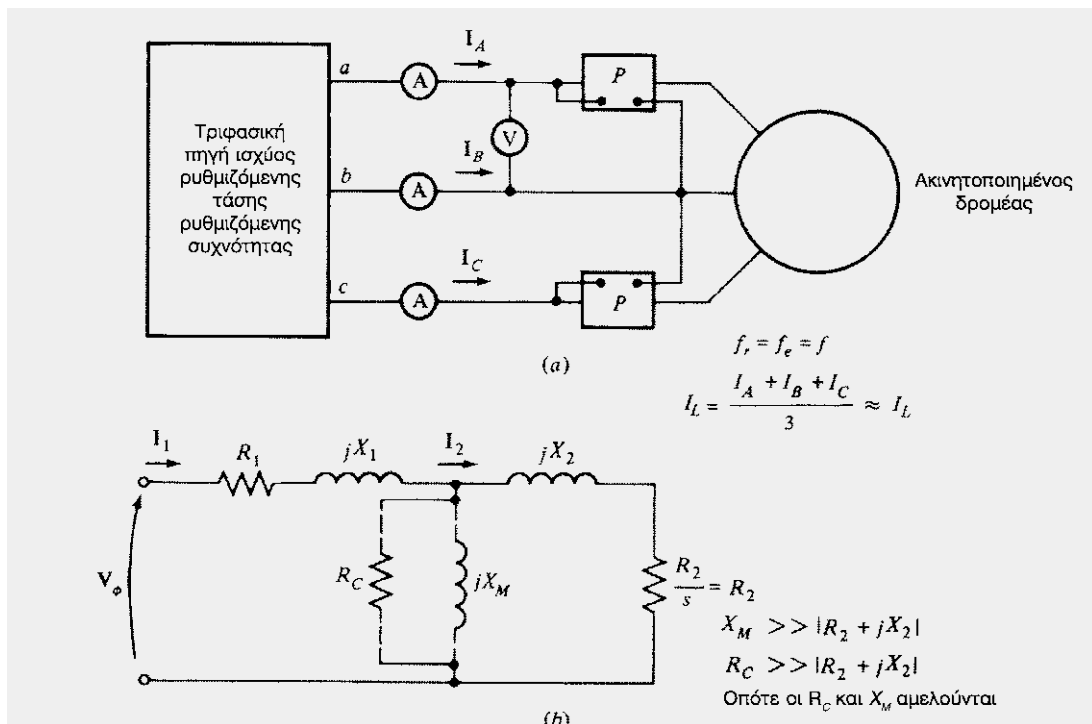
Οπότε αν γνωρίζουμε την αντίδραση του στάτη X_1 , μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίδραση μαγνήτισης X_M .

- **Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα**

Κατά τη δοκιμή αυτή ακινητοποιείται ο δρομέας, ώστε να μην μπορεί να κινηθεί.

Εφαρμόζεται μια τάση στον κινητήρα και μετριοούνται η τάση, το ρεύμα και η ισχύς, και υπολογίζονται οι σύνθετες αντιδράσεις σκέδασης.

Η συνδεσμολογία του πειράματος είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 4

Εφαρμόζονται συμμετρικές πολυφασικές τάσεις στον στάτη και ρυθμίζεται το ρεύμα ώστε να είναι ίσο περίπου με το ρεύμα κατά την πλήρη φόρτιση.

Όταν το ρεύμα φτάσει την τιμή πλήρους φόρτισης τότε λαμβάνουμε τις μετρήσεις για την τάση, το ρεύμα και την ισχύ που προσφέρεται στον κινητήρα.

Επειδή ο δρομέας είναι ακίνητος η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα, άρα η αντίσταση r_2/s θα έχει την πολύ μικρή τιμή r_2 . Η r_2 και X_2 είναι πολύ μικρές άρα σχεδόν όλο το ρεύμα θα διέλθει μέσα από αυτές και όχι από την πολύ μεγαλύτερη αντίδραση μαγνήτισης X_m του παράλληλου κλάδου.

Συχνότητα δρομέα

Κατά την εκκίνηση του κινητήρα η συχνότητα δρομέα είναι ίση με την συχνότητα δικτύου (όπως και η συχνότητα του στάτη στην κανονική λειτουργία είναι ίση με την συχνότητα δικτύου).

Όμως κατά την κανονική λειτουργία η ολίσθηση των κινητήρων είναι ίση το πολύ με 2 ως 4%, άρα η συχνότητα του δρομέα είναι από 1 ως 3 Hz. οπότε εδώ δημιουργείται πρόβλημα αφού η συχνότητα του δικτύου ισχύος δεν ανταποκρίνεται στις συνθήκες λειτουργίας του δρομέα κατά την κανονική λειτουργία. το πρόβλημα δημιουργείται στους κινητήρες κλάσης B και C όπου η ενεργός αντίσταση του δρομέα εξαρτάται σημαντικά από την συχνότητα. Άρα έχοντας λάβει λάθος τιμή συχνότητας ο δρομέας, μπορεί να ληφθούν και λάθος αποτελέσματα μετρήσεων. Για την αντιμετώπιση του ανωτέρου προβλήματος ο κώδικας δοκιμών IEEE προτείνει συχνότητα ίση με το 1/4 της ονομαστικής. Η παραπάνω μέθοδος λύνει το πρόβλημα σε δρομείς με σχεδόν σταθερή αντίσταση (κλάσης A και D), όμως δεν είναι σίγουρη για υπολογισμό αντίστασης δρομέα μεταβλητής αντίστασης. Για την αντιμετώπιση παρομοίων προβλημάτων πρέπει να εφαρμόζονται με προσοχή οι κανονισμοί.

Κατά την εκτέλεση του πειράματος, αφού η τάση και η συχνότητα λάβουν τις κατάλληλες τιμές, ρυθμίζεται το ρεύμα εισόδου του κινητήρα στην ονομαστική του τιμή και πριν θερμανθεί πολύ ο δρομέας λαμβάνουμε τις τιμές της ισχύος, της τάσης, και του ρεύματος εισόδου.

Η ισχύς εισόδου είναι : $P_{IN} = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta$

Όπου : V_T ονομαστική τάση,
 I_L ονομαστικό ρεύμα,
 θ γωνία σύνθετης αντίστασης

Άρα ο συντελεστής ισχύος ακινητοποιημένου δρομέα θα είναι:

$$\Sigma.I = \cos\theta = \frac{P_{IN}}{\sqrt{3}V_T I_L}$$

υπολογίζουμε το μέτρο της ολικής σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος

$$|Z_{ολ}| = \frac{V_\phi}{I_L} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L}$$

$$Z_{ολ} = R_{ολ} + jX'_{ολ}$$

Η αντίσταση ακινητοποιημένου δρομέα είναι
 $R_{ολ} = R_1 + R_2$

Η αντίδραση ακινητοποιημένου δρομέα είναι
 $X'_{ολ} = X'_1 + X'_2$

Όπου X'_1 αντίδραση στάτη ανοιγμένη στην συχνότητα του πειράματος
 X'_2 αντίδραση δρομέα ανοιγμένη στην συχνότητα του πειράματος

Άρα βρίσκουμε την αντίσταση δρομέα:
 $R_2 = R_{ολ} - R_1$

Η R_1 υπολογίζεται από το πείραμα Συνεχούς Ρεύματος που θα αναλυθεί παρακάτω.

Η ισοδύναμη ολική αντίδραση στην κανονική συχνότητα λειτουργίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$X_{ολ} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X'_{ολ} = X_1 + X_2$$

για την διανομή της συνολικής αντίδρασης σκέδασης μεταξύ του στάτη και του δρομέα ακολουθούνται εμπειρικοί κανόνες σύμφωνα με τον κώδικα δοκιμών του IEEE, οι τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα

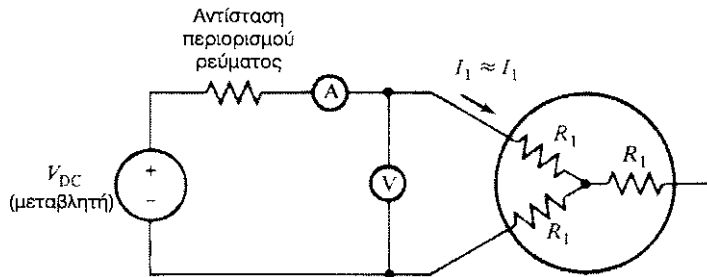
ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	ΚΛΑΣΜΑ $x_1 + x_2$	
	x_1	x_2
Κλάση Α (κανον. ροπή εκκινήσεως, καν. ρεύμα εκκ.)	0.5	0.5
Κλάση Β (κανον. ροπή εκκινήσεως, χαμ. ρεύμα εκκ.)	0.4	0.6
Κλάση C (υψηλή ροπή εκκινήσεως, χαμ. ρεύμα εκκ.)	0.3	0.7
Κλάση D (υψηλή ροπή εκκινήσεως, υψηλή ολίσθηση)	0.5	0.5
Τυλιγμένος δρομέας	0.5	0.5

• Πείραμα Συνεχούς Ρεύματος

Σε αυτό το πείραμα υπολογίζουμε την αντίσταση του στάτη. Ο υπολογισμός αυτός είναι χρήσιμος για τον εντοπισμό της αντίδρασης του δρομέα από την ολική αντίσταση του κυκλώματος, η οποία υπολογίζεται από τη Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα. Η αντίσταση δρομέα είναι σημαντική στη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα. Η τιμή της αντίδρασης του στάτη που υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο δεν είναι απόλυτα ακριβείς αφού δεν λαμβάνεται υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο στα τυλίγματα.

Για τη διόρθωση της μεθόδου σχετικά με τη θερμοκρασία και το επιδερμικό φαινόμενο, υπάρχει η Τυποποίηση 112 της IEEE.

Κατά το πείραμα συνδέουμε πηγή συνεχούς ρεύματος στα δύο από τα τρία άκρα του κινητήρα, συνδεδεμένου σε αστέρα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5

Το ρεύμα του στάτη πρέπει να ρυθμιστεί στην ονομαστική του τιμή, για να θερμανθούν τα τυλίγματα στη θερμοκρασία που θα έχουν στην κανονική λειτουργία, (αφού η αντίσταση του τυλίγματος είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας), και μετριέται η τάση στα δυο άκρα του κινητήρα.

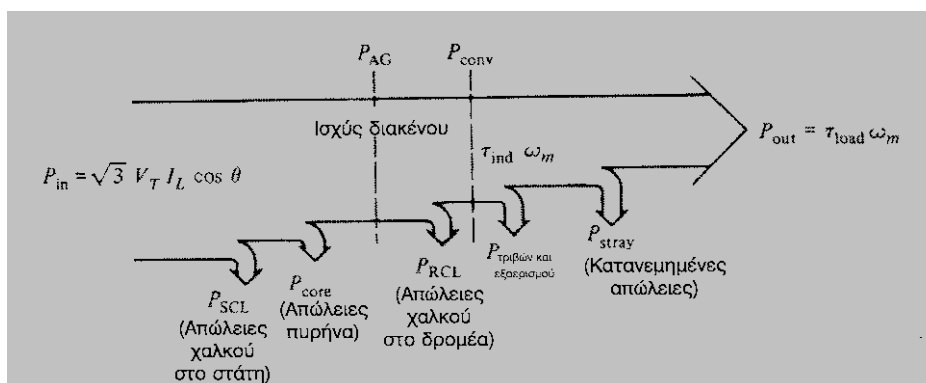
Εδώ το μόνο στοιχείο που περιορίζει το ρεύμα του κινητήρα είναι η αντίσταση του στάτη. Αυτό λόγω του ότι το ρεύμα είναι συνεχές με συνέπεια να μην επάγεται τάση στον δρομέα, το ρεύμα του δρομέα να έχει μηδενική τιμή και η αντίδραση του κινητήρα να είναι μηδενική.

Το ρεύμα διαρρέει τα δυο τυλίγματα του στάτη άρα ισχύει:

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

Συνεπώς $R_1 = V_{DC}/2 I$

1.5. Απώλειες επαγωγικών κινητήρων



Σχήμα 6

Οι απώλειες στους κινητήρες επαγωγής κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα ως εξής:

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου παράγεται από ένα τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων και έξοδος του κινητήρα είναι η μηχανική ισχύς.

Οι πρώτες απώλειες που συναντάμε είναι οι

$P_{sci}=I^2R$ θερμικές απώλειες στα τυλίγματα χαλκού του στάτη

P_{core} απώλειες πυρήνα οι οποίες περιλαμβάνουν τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων του μετάλλου της μηχανής

P_{AG} Η ισχύς που απομένει διέρχεται του διακένου και μεταφέρεται στο δρομέα της μηχανής ως εξής: ένα μέρος της μετατρέπεται σε

P_{RCL} θερμικές απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα (απώλειες Χαλκού δρομέα)
η εναπομένουσα ισχύς από ηλεκτρική μετατρέπεται σε

P_{CONV} μηχανική ισχύς. Από αυτή αφαιρούνται οι

$P_{F\&W}$ απώλειες τριβών και εξαερισμού (μηχανικές απώλειες) και οι

P_{misc} κατανεμημένες απώλειες.
Σε αυτές περιλαμβάνονται απώλειες που δεν είναι δυνατό να ενταχθούν σε μία από τις προηγούμενες κατηγορίες. Το άθροισμα των απωλειών τριβών και εξαερισμού και κατανεμημένων απωλειών αποτελεί τις απώλειες περιστροφής της μηχανής.

P_{OUT} Τέλος η ισχύς που απομένει είναι η ισχύς εξόδου της μηχανής,

όπου $P_{OUT} = T_{load}\omega_m$.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες περιστροφής. Ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα (πιο κοντά στη σύγχρονη) τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες πυρήνα.

Οι συνολικές απώλειες περιστροφής συνήθως θεωρούνται σταθερές καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται σε αντίθετη κατεύθυνση.

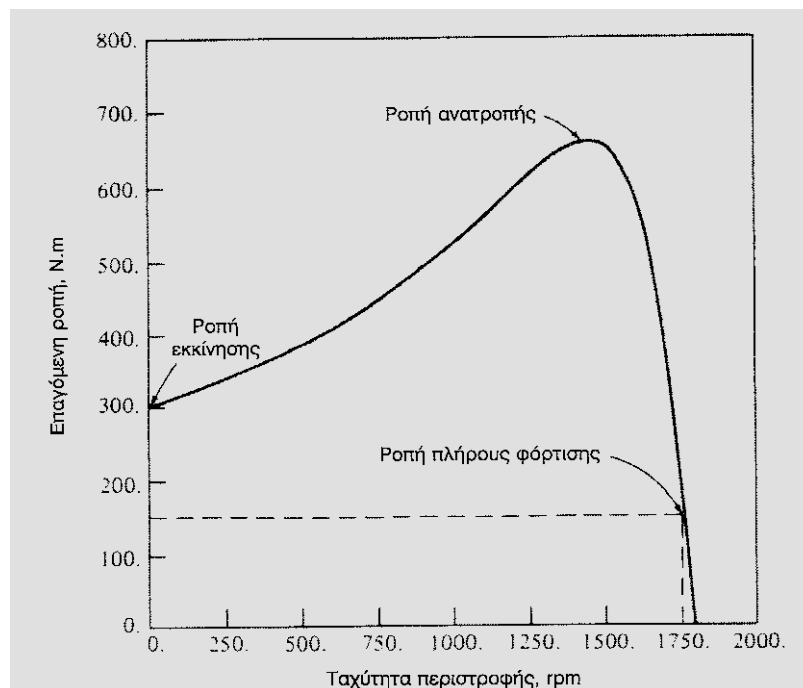
1.6. Χαρακτηριστική Ροπής -Ταχύτητας

Η γενική εξίσωση για τη σχέση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής του, εξάγεται από το ισοδύναμο κύκλωμα και το διάγραμμα ροής ισχύος.

Η σχέση αυτή είναι:

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega_{sync} \cdot [(R_{TH} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$

η γραφική παράσταση ροπής ταχύτητας είναι:



Σχήμα 7

Η παραπάνω χαρακτηριστική μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές:

- Περιοχή χαμηλής ολίσθησης
Εδώ παρατηρείται σχεδόν γραμμική αύξηση της ολίσθησης του κινητήρα καθώς το φορτίο αυξάνει, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μειώνεται

σχεδόν γραμμικά με το φορτίο. Η αντίδραση του δρομέα είναι αμελητέα, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα είναι ίσος περίπου με τη μονάδα και το ρεύμα δρομέα αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση.

Το τελικό εύρος της κανονικής ευσταθούς λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνεται σε αυτή την περιοχή γραμμικής και χαμηλής ολίσθησης.

Στην κανονική λειτουργία ο επαγωγικός κινητήρας παρουσιάζει γραμμική πτώση της ταχύτητας του, από τη γενική εξίσωση προκύπτει ότι η ολίσθηση σε αυτή την περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 s}{\omega_{sync} R_2}$$

- Περιοχή μέτριας ολίσθησης

Σε αυτή την περιοχή η συχνότητα του δρομέα έχει υψηλότερη τιμή από αυτή της προηγούμενης περιοχής. Το μέτρο της αντίδρασης δρομέα είναι ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίσταση. Το ρεύμα δρομέα δεν αυξάνεται τόσο απότομα όπως πριν και ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται.

Επίσης εδώ παρατηρείται η μέγιστη ροπή του κινητήρα, η ροπή ανατροπής.

Εντοπίζεται στο σημείο όπου για μια σημαντική αύξηση του φορτίου η αύξηση του ρεύματος εξουδετερώνεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος του δρομέα. Η ροπή αυτή είναι η μέγιστη επιτρεπτή και είναι αδύνατο να ξεπεραστεί, επίσης είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση.

Η ροπή αυτή υπολογίζεται και είναι:

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync} [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]}$$

- Περιοχή υψηλής ολίσθησης

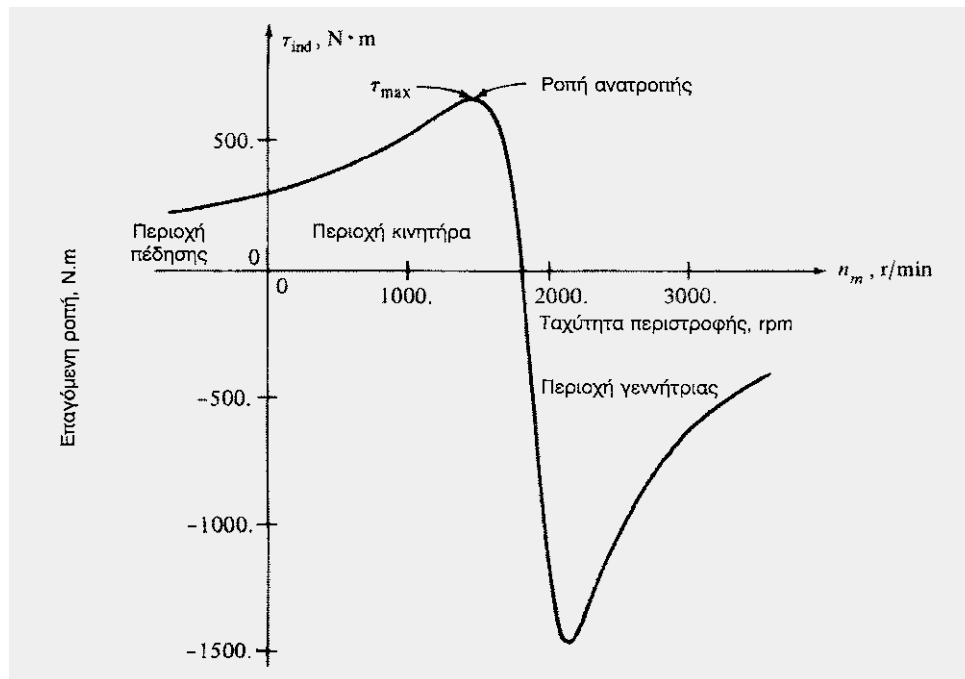
Η επαγόμενη ροπή μειώνεται με την αύξηση του φορτίου καθώς η αύξηση του ρεύματος στο δρομέα επικαλύπτεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα.

Επίσης σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούνται και τα παρακάτω:

Στη σύγχρονη ταχύτητα η επαγόμενη ροπή είναι μηδενική.

Η ροπή εκκίνησης είναι λίγο μεγαλύτερη από τη ροπή πλήρους φόρτισης, πράγμα που κάνει τον κινητήρα να μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.

Παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας με διευρυμένη περιοχή λειτουργίας. Δηλαδή διακρίνεται η περιοχή πέδησης και η περιοχή επαγωγικής γεννήτριας.



Σχήμα 8

- περιοχή πέδησης

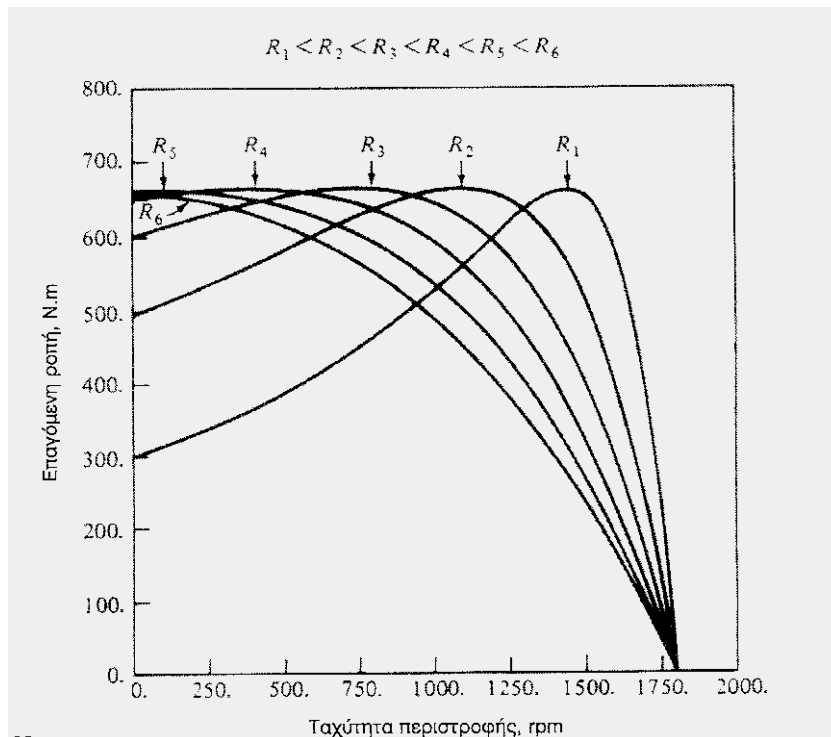
Σε αυτή την περιοχή η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του. Αποτέλεσμα αυτού είναι η επαγόμενη ροπή να σταματήσει τον κινητήρα και να προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά.

Με αντιμετάθεση των συνδέσεων σε δύο από τις τρεις φάσεις του κινητήρα, αλλάζει η φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων με αποτέλεσμα την ακαριαία πέδηση του κινητήρα.

- Περιοχή γεννήτριας

Όταν ο δρομέας περιστραφεί με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης τότε η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται. Συνέπεια αυτού είναι η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια δηλαδή να μετατρέπει την μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική.

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι επιπτώσεις της μεταβολής της αντίστασης του δρομέα στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.



Σχήμα 9

Παρατηρούμε ότι καθώς η αντίσταση δρομέα αυξάνεται, η ταχύτητα ανατροπής μειώνεται ενώ η ροπή ανατροπής παραμένει σταθερή.

1.7. Έλεγχος ταχύτητας σε κινητήρες επαγωγής

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές οι κινητήρες πρέπει να ικανοποιούν πολύ αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την περιοχή και την ομαλότητα ελέγχου καθώς και την οικονομική λειτουργία. Το κανονικό εύρος λειτουργίας ενός τυπικού επαγωγικού κινητήρα περιορίζεται κάτω από το πέντε τοις εκατό για την ολίσθηση, ενώ η μεταβολή της ταχύτητας πέρα από αυτό το εύρος είναι σχεδόν ανάλογη του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Αν η ολίσθηση μπορούσε να λάβει μεγαλύτερες τιμές τότε θα μειωνόταν ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα αφού οι απώλειες χαλκού δρομέα είναι ανάλογες με την ολίσθηση.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα οι κινητήρες επαγωγής δεν αποτελούσαν καλή επιλογή σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας, όμως τα προβλήματα τους αντιμετωπίστηκαν με την εισαγωγή των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρονικής οδήγησης.

Υπάρχουν δύο τεχνικές ρύθμισης ταχύτητας :

1. Μεταβολή σύγχρονης ταχύτητας
2. Μεταβολή ολίσθησης

1) Μεταβολή σύγχρονης ταχύτητας

Μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα που είναι η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα, αφού η ταχύτητα άξονα παραμένει πάντα κοντά στη σύγχρονη.

Η σύγχρονη ταχύτητα δίνεται από τη σχέση

$$N_{\text{sync}} = \frac{120 \cdot f_e}{P}$$

Άρα μπορεί να μεταβληθεί με τη ρύθμιση της ηλεκτρικής συχνότητας και με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων.

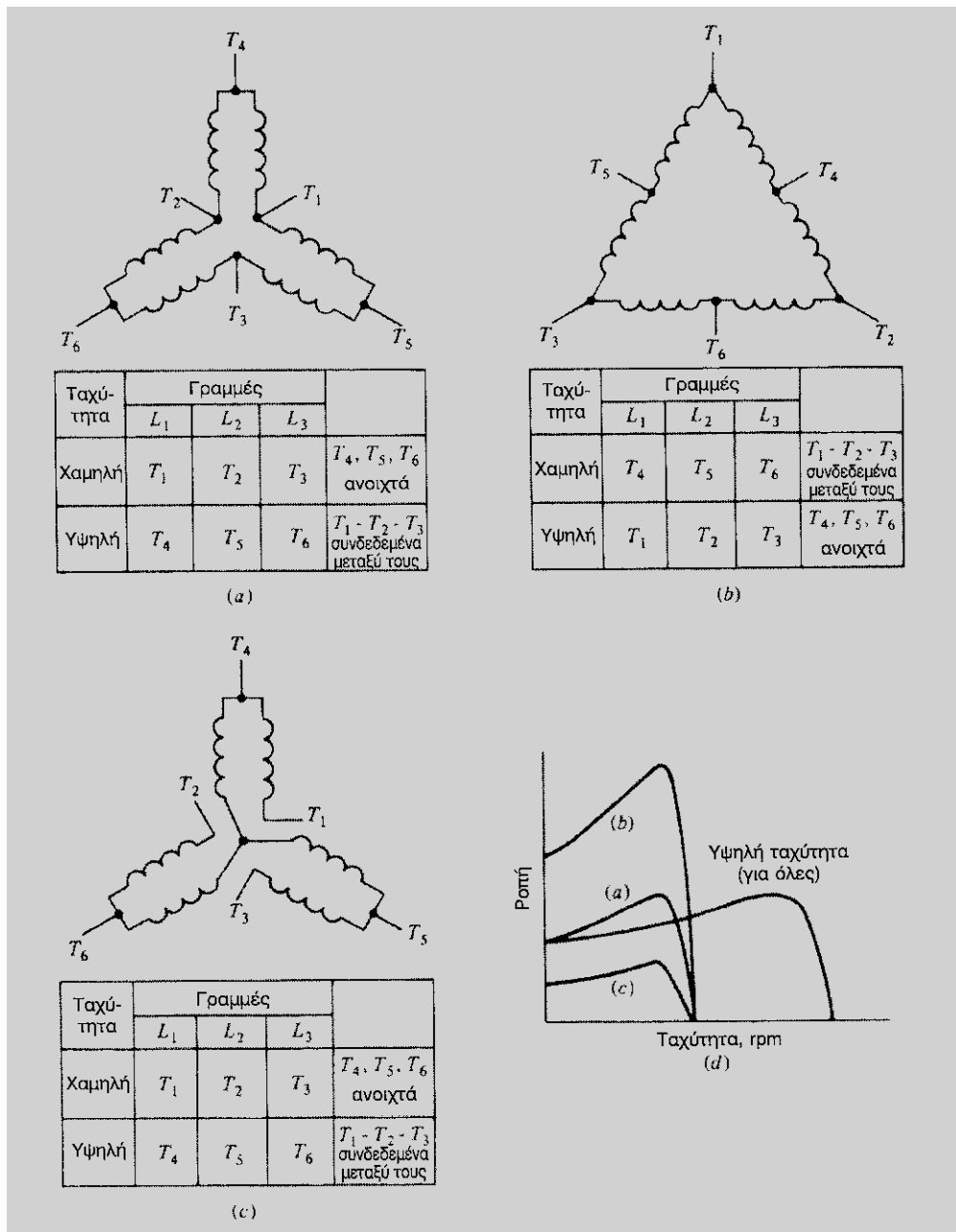
α. Μέθοδος μεταβολής αριθμού των πόλων

Υπάρχουν τρεις μέθοδοι αλλαγής αριθμού των πόλων

- Η μέθοδος διαδοχικών πόλων

Είναι μια παλιά μέθοδος έλεγχου ταχύτητας. Σύμφωνα με αυτή το τύλιγμα του στάτη σχεδιάζεται με τρόπο ώστε με απλή μεταβολή στις συνδέσεις των πηνίων ο αριθμός των πόλων μπορεί να μεταβληθεί σε λόγο 2:1. Ο δρομέας είναι πάντα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Παρακάτω φαίνονται οι δυνατές συνδέσεις των τυλιγμάτων στο στάτη για αλλαγή του αριθμού των πόλων σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.



Σχήμα 10

Το ότι οι ταχύτητες θα πρέπει να έχουν λόγο 2:1 είναι ένα βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, για την αντιμετώπιση του γίνεται εισαγωγή πολλαπλών τυλιγμάτων στο στάτη, αυτή είναι η δεύτερη μέθοδος αλλαγής αριθμού πόλων.

- Πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη.

Εισάγονται πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη με διαφορετικό αριθμό πόλων το καθένα και γίνεται ενεργοποίηση ενός από αυτά κάθε φορά. Τα πολλαπλά τυλίγματα αυξάνουν το κόστος του κινητήρα και χρησιμοποιούνται όταν είναι τελείως απαραίτητα.

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων καθιστά εφικτή την κατασκευή κινητήρα τεσσάρων ταχυτήτων. Παραδείγματος χάρη με δύο ξεχωριστά τυλίγματα 4 και 6 πόλων είναι δυνατό να κατασκευαστεί κινητήρας που λειτουργώντας στα 60 HZ μπορεί να περιστραφεί με ταχύτητες 600, 900, 1200 και 1800 rpm.

- Διαμόρφωση πλάτους του πόλου PAM.

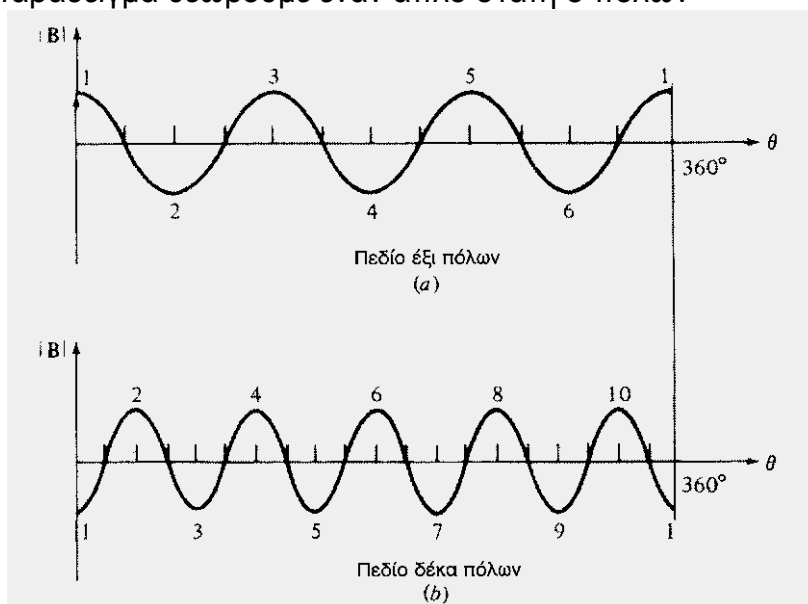
Σύμφωνα με την μέθοδο PAM παράγονται πολλαπλοί πόλοι με το ίδιο τύλιγμα στάτη και δημιουργούνται αριθμοί πόλων με λόγο διαφορετικό από 2 :1.

Οι τυπικοί λόγοι αριθμού πόλων που πραγματοποιούνται με την PAM φαίνονται παρακάτω και δίπλα οι αντίστοιχοι λόγοι σύγχρονης ταχύτητας.

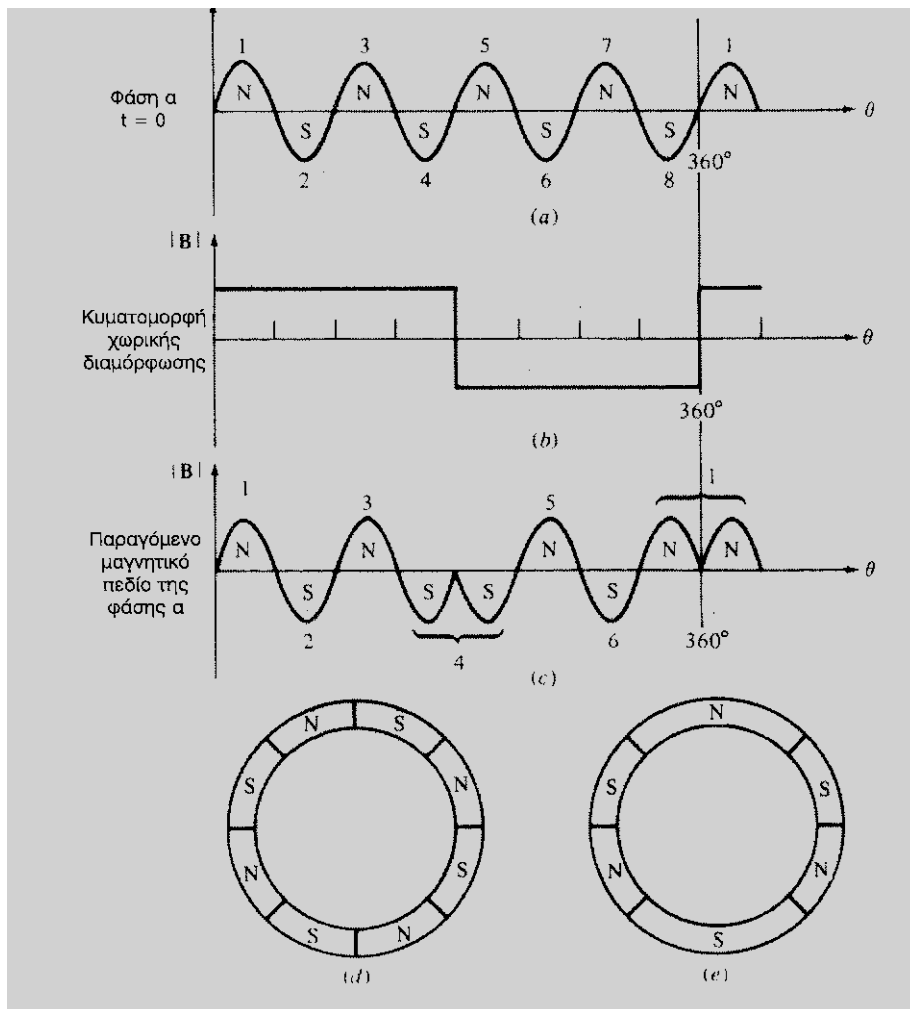
Pole ratio	Synchronous speeds, r/min	
	At 50 Hz	At 60 Hz
2 : 8	3000/750	3600/900
4 : 6	1500/1000	1800/1200
4 : 10	1500/600	1800/720
6 : 8	1000/750	1200/900
6 : 10	1000/600	1200/720
8 : 10	750/600	900/720
8 : 12	750/500	900/600
10 : 12	600/500	720/600

Παρακάτω γίνεται σύντομη παρουσίαση της μεθόδου αφού η θεωρία της διαμόρφωσης πλάτους του πόλου είναι αρκετά περίπλοκη.

Σαν παράδειγμα θεωρούμε έναν απλό στάτη 8 πόλων



Σχήμα 11.1



Σχήμα 11.2

Στο σχήμα 11.2 α παριστάνεται η φυσική κατανομή του αρχικού μαγνητικού πεδίου του στάτη.

Στο b η κυματομορφή χωρικής διαμόρφωσης η οποία παράγεται από την αλλαγή των συνδέσεων στις μισές από τις ομάδες φάσης μιας δεδομένης φάσης. Τα τυλίγματα του στάτη διαμορφώνονται από την τριφασική χωρική κυματομορφή των δυο πόλων.

Στο c φαίνεται το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο της φάσης α, εδώ παρατηρείται η επίδραση της διαμόρφωσης των πόλων. Εμφανίζονται 6 διαφορετικοί πόλοι με διαφορετικά μεγέθη ο καθένας, το μαγνητικό πεδίο αναλύεται κατά Fourier και διαιρείται σε δύο τμήματα.

Στο σχήμα d φαίνεται η φυσική κατανομή των πόλων στην επιφάνεια του στάτη πριν τη διαμόρφωση.

Στο σχήμα e φαίνεται η φυσική κατανομή των πόλων στην επιφάνεια του στάτη μετά τη διαμόρφωση.

Στο σχήμα 11.1 α το πρώτο τμήμα του μαγνητικού πεδίου περιλαμβάνει 6 πόλους και

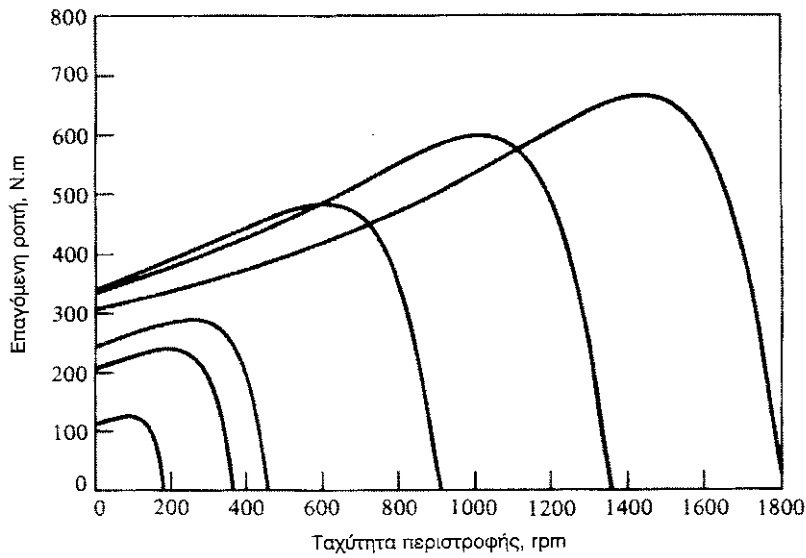
Στο σχήμα 11.1 β το δεύτερο τμήμα του μαγνητικού πεδίου περιλαμβάνει 10 πόλους.

Αυτά τα 2 τμήματα παρουσιάζονται ταυτόχρονα και ο κινητήρας ανταποκρίνεται σε αυτά ανάλογα με την κατανομή και το βήμα τυλίγματος. Στη συγκεκριμένη μηχανή το τριφασικό πεδίο 6 πόλων απομακρύνεται και τελική η μηχανή διαθέτει 10 πόλους. Το ίδιο γίνεται και με τις άλλες δύο φάσεις του κινητήρα.

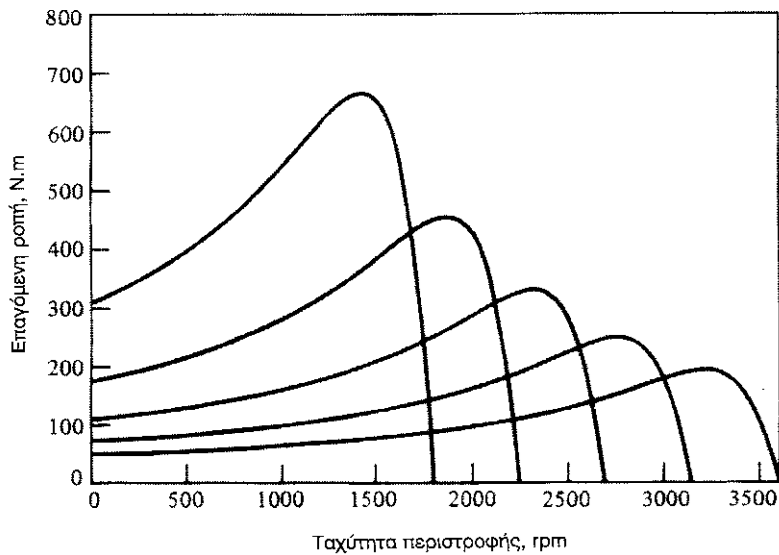
β. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.

Μεταβάλλοντας τη συχνότητα του δικτύου δηλαδή τη συχνότητα που εφαρμόζουμε στο στάτη μπορούμε να επιτύχουμε ανάλογη μεταβολή του ρυθμού περιστροφής των μαγνητικών πεδίων n_{sync} και μεταβολή του σημείου λειτουργίας στην καμπύλη ροπής ταχύτητας χωρίς φορτίο. Δηλαδή υπάρχει δυνατότητα ελέγχοντας τη συχνότητα να ελέγχουμε ανάλογα και την ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζοντας σε τιμή μεγαλύτερες ή μικρότερες της βασικής συχνότητας (όπου βασική ταχύτητα είναι η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες).

Το εύρος των τιμών ρύθμισης αρχίζει από 5% της βασικής και μπορεί να φθάσει σε τιμές διπλάσιες της βασικής. Όμως για την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα κατά τη μεταβολή της ταχύτητας του πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα όρια ασφαλείας για την τάση και ροπή του. Μια πρώτη διαδικασία για την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα είναι ο υποβιβασμός τάσης. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα μικρότερες της βασικής. Η τάση του στάτη θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη συχνότητα (υποβιβασμός τάσης) για να αποφευχθεί το φαινόμενο κορεσμού στο χάλυβα του στάτη και υπερβολική αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης του κινητήρα. Στο παρακάτω σχήμα 12^α φαίνονται μια οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής ταχύτητας για ταχύτητα μικρότερη της βασικής όπου το πλάτος της τάσης μεταβάλλεται γραμμικά με την συχνότητα.



(a)



(b)

Σχήμα 12

Όταν η ηλεκτρική συχνότητα είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής συχνότητας τότε θα πρέπει η τάση στο στάτη να παραμείνει σταθερή προκειμένου να διασφαλισθεί η προστασία της μόνωσης.

Στο σχήμα 12b φαίνεται μια οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής ταχύτητας, για ταχύτητα πάνω από τη βασική και με σταθερή τάση στάτη.

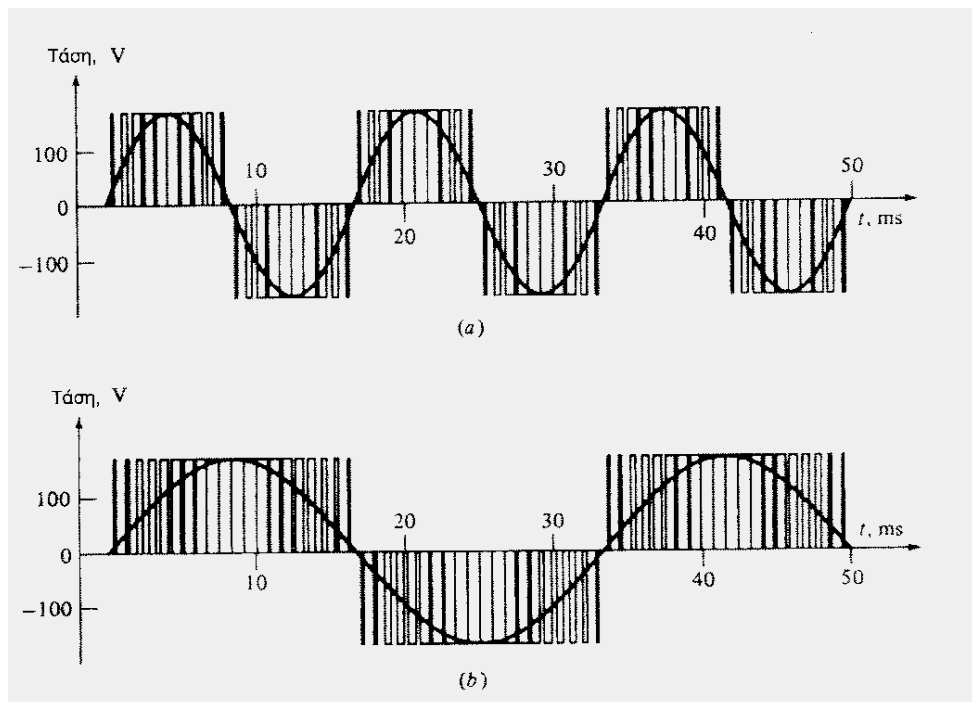
Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για τη ρύθμιση της ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα είναι οι συσκευές οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες. αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιοδήποτε επαγωγικό κινητήρα, ενώ η μέθοδος μεταβολής πόλων απαιτεί κινητήρα με ειδικά τυλίγματα στο στάτη.

Σε αυτές τις συσκευές η είσοδος τους μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική με τιμές συχνότητων 50 ή 60 HZ και ένα συγκεκριμένο εύρος πλάτους τάσης, ενώ η έξοδος είναι ένα τριφασικό σύστημα τάσεων με συχνότητα και πλάτος τάσης που μεταβάλλονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Οι τιμές της τάσης και της συχνότητας εξόδου της συσκευής διαμορφώνονται με τις τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM. Εν συντομία σε αυτή τη μέθοδο ρυθμίζεται το εύρος δηλ. η διάρκεια των παλμών μιας παλμοσειράς ανάλογα με το πλάτος ενός μικρού σήματος ελέγχου. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της τάσης ελέγχου, τόσο μεγαλύτερο εύρος έχουν οι παλμοί που παράγονται.

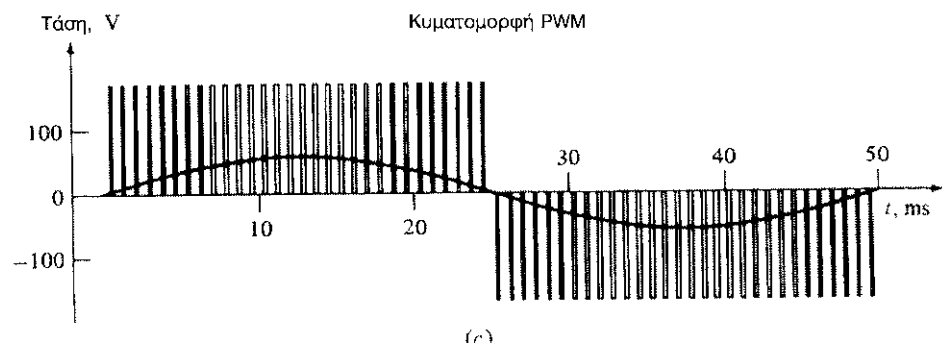
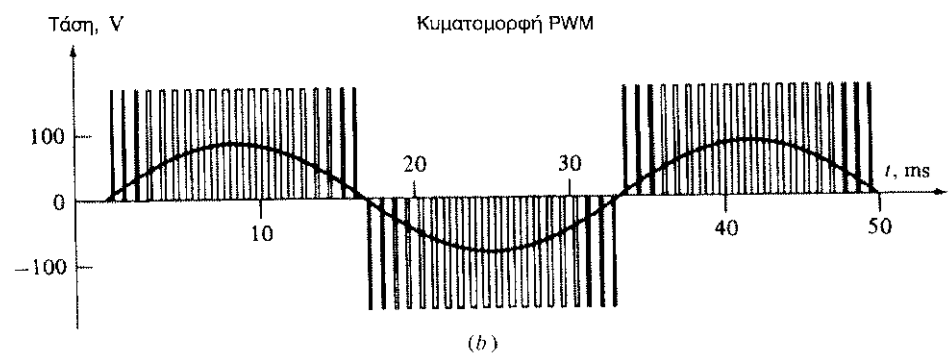
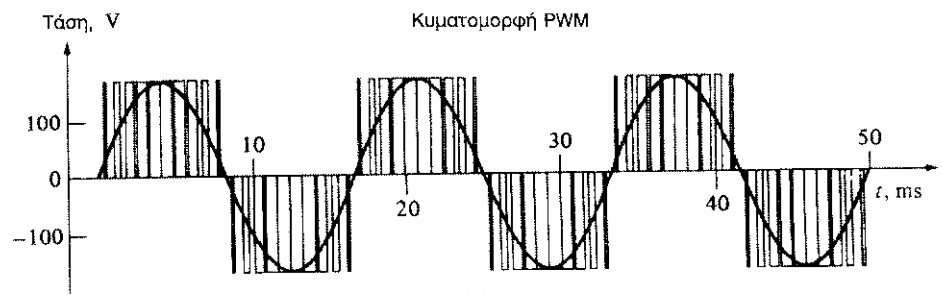
Στη θέση της τάσης ελέγχου του κυκλώματος PWM χρησιμοποιείται ένα ημίτονο ορισμένης συχνότητας ούτως ώστε να παραχθεί μια κυματομορφή ισχύος της οποίας η μέση τιμή της τάσης μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και είναι ικανή για την οδήγηση κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Σύμφωνα με την παραπάνω τεχνική μπορεί να ρυθμισθεί η συχνότητα εξόδου ενώ παραμένει σταθερή η ενεργός τιμή τάσης. Επίσης μπορεί να ρυθμισθεί η ενεργός τιμή τάσης διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα. Και τέλος μπορεί να γίνει ταυτόχρονη γραμμική μεταβολή της ενεργού τιμής τάσης με την συχνότητα

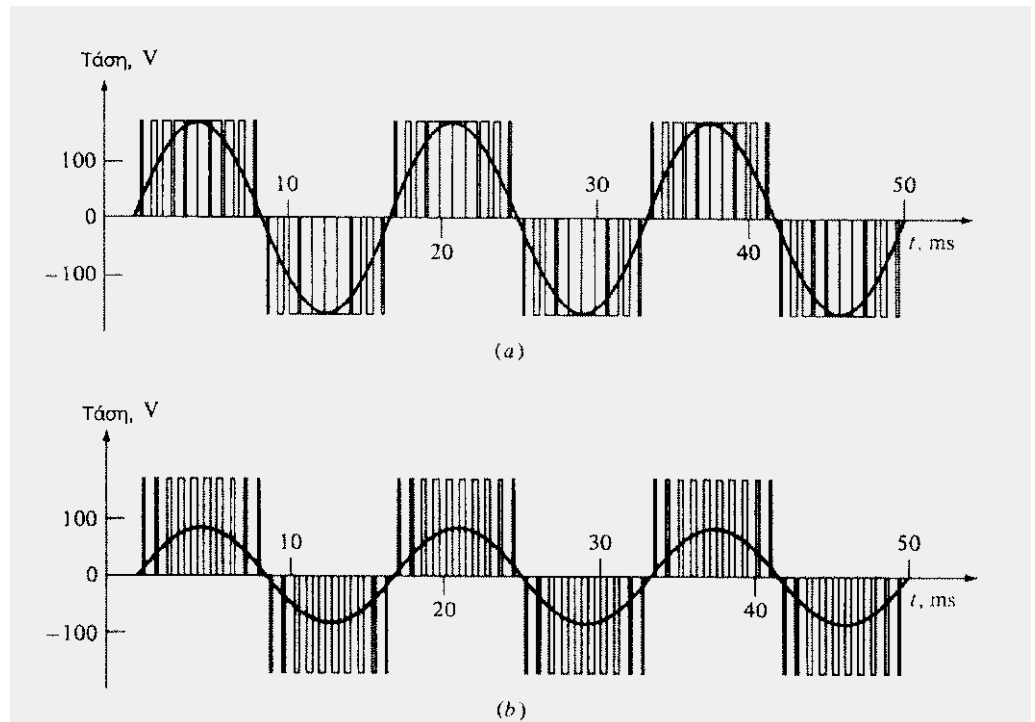
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα προηγούμενα



Έλεγχος μεταβλητής τάσης με μια κυματομορφή PWM α) κυματομορφή PWM 60 HZ, 120V. β) 30HZ, 120V



Έλεγχος μεταβλητής τάσης με μια κυματομορφή PWM α) κυματομορφή PWM 60 HZ, 120V. β) 30HZ, 60V γ) 20 HZ 40V



Σχήμα 13

Έλεγχος μεταβλητής τάσης με μια κυματομορφή PWM α) κυματομορφή PWM 60 HZ, 120V. β) 60HZ, 60V

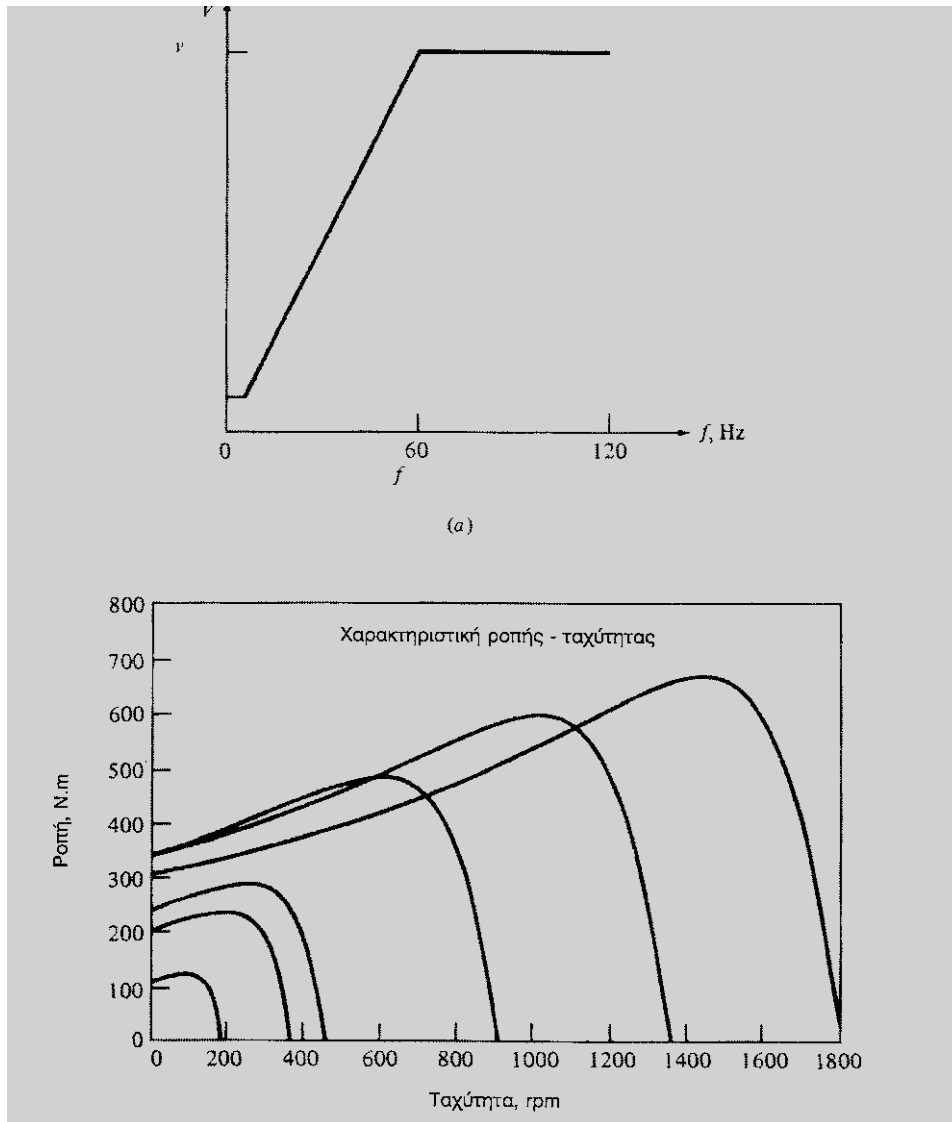
Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι και στις 3 περιπτώσεις το πλάτος τάσης στην έξοδο της συσκευής οδήγησης παραμένει σταθερό. Τα μεγέθη που ρυθμίζονται είναι: το μέγεθος της ενεργούς τιμής τάσης ανάλογα με το κλάσμα χρόνου στο οποίο εμφανίζεται και στην έξοδο του. Και η συχνότητα η οποία ρυθμίζεται από το ρυθμό που μεταβάλλεται η πολικότητα των παλμών από θετική σε αρνητική και αντίστροφα. Η τυπική συσκευή οδήγησης επαγωγικών κινητήρων είναι πολύ ευέλικτη είναι εύκολη στη χρήση και σύμφωνα με κάποιες ιδιότητες που έχει από κατασκευής μπορεί να ρυθμιστούν κατάλληλα διάφορα μεγέθη ώστε να ληφθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Οι ιδιότητες αυτές είναι οι εξής:

- *ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ Η ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ*

Μπορεί να ρυθμιστεί η συχνότητα εξόδου της συσκευής οδήγησης με κάποιο εξωτερικό σήμα ελέγχου. Αυτό μπορεί να γίνει χειροκίνητα από σύστημα ελέγχου που είναι τοποθετημένο πάνω στο σασί εξωτερικό Η/Υ ή έναν ελεγκτή διαδικασία για τον έλεγχο της ταχύτητας.

- *ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ*

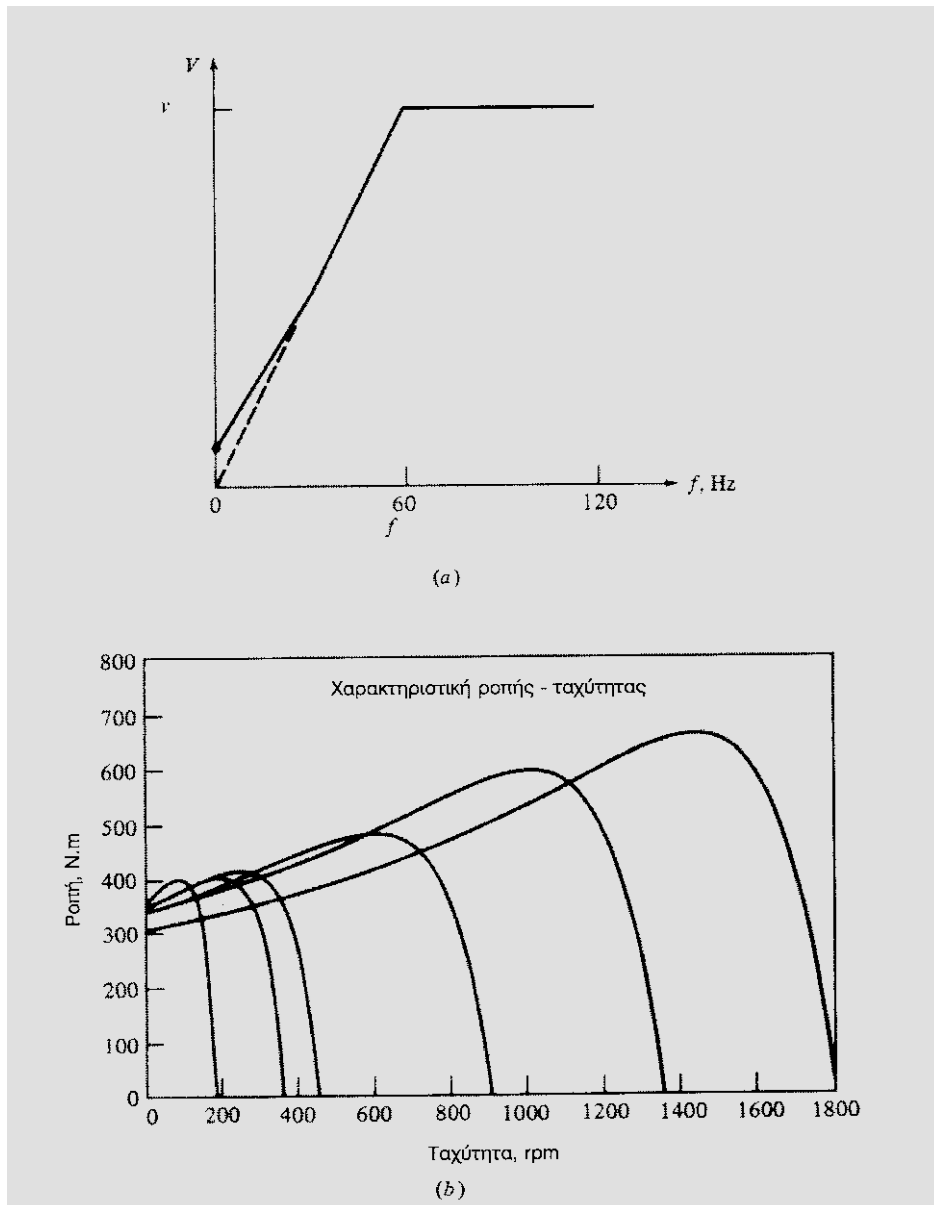
Η συσκευή οδήγησης έχει την ικανότητα παραγωγής μεγάλης ποικιλίας καμπυλών τάσης-συχνότητας. Μερικά παραδείγματα τέτοιων καμπυλών φαίνονται στο επόμενο σχήμα. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε φορτίου του κινητήρα, επιλέγεται η κατάλληλη καμπύλη.



Σχήμα 14

α) Η τυποποιημένη ή γενικών εφαρμογών καμπύλη ταχύτητας – συχνότητας.

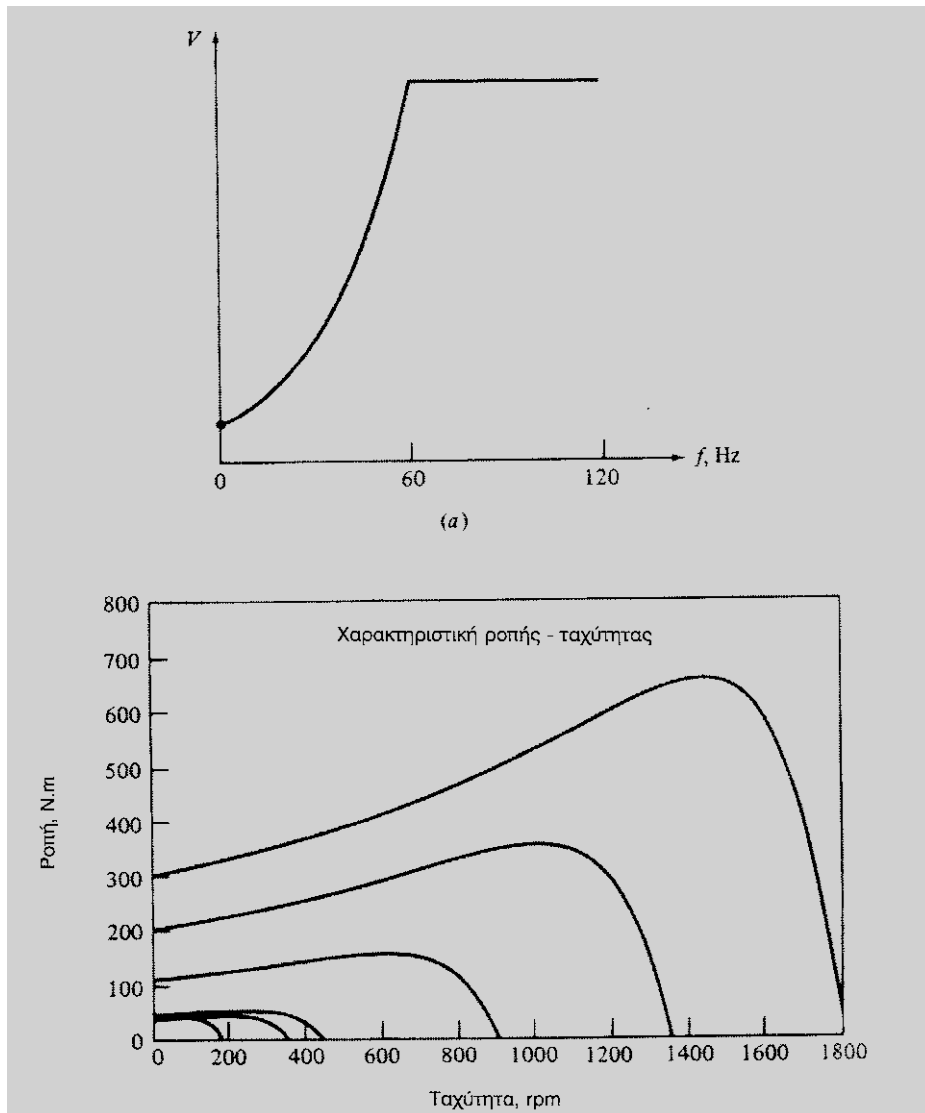
β) χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για συχνότητα λειτουργίας κάτω από τη βασική ταχύτητα



Σχήμα 15

α) καμπύλη τάσης-συχνότητας για φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης.

β) χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για συχνότητα λειτουργίας κάτω από τη βασική ταχύτητα για φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης.



Σχήμα 16

α) καμπύλη ταχύτητας –συχνότητας για φορτία με μικρή ροπή εκκίνησης.

β) χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για συχνότητα λειτουργίας μικρότερη της βασικής ταχύτητας για φορτία με μικρή ροπή εκκίνησης.

Στο σχήμα 14α παρουσιάζονται η τυποποιημένη ή γενικών εφαρμογών καμπύλη ταχύτητας –συχνότητας.

- Για ταχύτητες μικρότερες της βασικής η ταχύτητα εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τις μεταβολές της συχνότητας.
- Για ταχύτητες μεγαλύτερες της βασικής η ταχύτητα εξόδου παραμένει σταθερή
- Στις πολύ μικρές συχνότητες η ταχύτητα παραμένει σταθερή, η μικρή περιοχή σταθερής τάσης είναι απαραίτητες για να είναι σίγουρη η ανάπτυξη ροπής στις πολύ μικρές ταχύτητες.

Στο σχήμα 14β φαίνονται οι χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα για συχνότητα λειτουργίας κάτω από τη βασική ταχύτητα

Στο σχήμα 15α φαίνονται η καμπύλη τάσης-συχνότητας η οποία είναι διαμορφωμένη ώστε να αντιστοιχεί σε φορτίο που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης.

Για ταχύτητες μικρότερες της βασικής η ταχύτητα εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τις μεταβολές της συχνότητας αλλά η κλίση της καμπύλης σχ.15α είναι μικρότερη για συχνότητες μικρότερες των 30HZ. Σε σύγκριση με την προηγούμενη καμπύλη του σχήματος 14α.

Για την ίδια συχνότητα η ταχύτητα εξόδου της συσκευής θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ταχύτητα του σχήματος 14α. Η αύξηση αυτή της τάσης προσφέρει μεγαλύτερες ροπές όμως έτσι αυξάνεται περισσότερο ο μαγνητικός κορεσμός καθώς επίσης και το ρεύμα μαγνήτισης. Οι αυξήσεις των δύο αυτών μεγεθών είναι αποδεκτές καθώς η χρονική περίοδος εκκίνησης των ισχυρών φορτίων είναι πολύ μικρή και συνεπώς η αύξηση τους διαρκεί πολύ λίγο.

Το σχήμα 15β παρουσιάζει τις χαρακτηριστική Ροπής – ταχύτητας για λειτουργίας μικρότερη της βασικής ταχύτητας. Εδώ η ροπή είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές συχνότητες σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή του σχήματος 14β. Το σχήμα 16α παρουσιάζει καμπύλη ταχύτητας –συχνότητας των φορτίων με μικρή ροπή εκκίνησης δηλ. των φορτίων ομαλής εκκίνησης. Εδώ παρατηρείται παραβολική μεταβολή της τάσης σε σχέση με την συχνότητα για συχνότητα μικρότερη της βασικής. Για ίδια συχνότητα κάτω από τα 60 HZ, η τάση εξόδου της συσκευής θα είναι μικρότερη από αυτή του σχήματος 15α.

Η μικρή αυτή ταχύτητα χρειάζεται για την παραγωγή μικρότερης ροπής στα φορτία ομαλής εκκίνησης αφού προσφέρει αργή και ομαλή εκκίνηση.

Το σχήμα 16β παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας για συχνότητα λειτουργίας μικρότερη της βασικής ταχύτητας και εδώ η ροπή στις χαμηλές συχνότητες είναι μειωμένη σε σχέση με το σχήμα 15.

- *ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΕΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΕΙΣ*

Αν κάποιο φορτίο απαιτεί ξαφνική μεταβολή της ταχύτητας η συσκευή οδήγησης δεν μεταβάλλει στιγμιαία την προηγούμενη ταχύτητα στην νέα ταχύτητα . Για το σκοπό αυτό υπάρχουν ειδικά κυκλώματα στην συσκευή όπου περιορίζουν την επιτάχυνση ή επιβράδυνση του κινητήρα σε ορισμένα επίπεδα ασφαλείας. Αυτά ρυθμίζονται ανεξάρτητα για τις επιταχύνσεις και τις επιβραδύνσεις του κινητήρα.

- *ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ*

Η συσκευή οδήγησης περιλαμβάνει κατάλληλους ανιχνευτές ώστε όταν παρουσιαστούν διάφορα προβλήματα που μπορούν να βλάψουν τον κινητήρα, όπως ισχυρά μόνιμα ρεύματα σε περίπτωση υπερφόρτωσης, ισχυρά στιγμιαία ρεύματα, καταστάσεις υπερτάσεων ή μειωμένων τάσεων, αυτά διακόπτουν την λειτουργίας του κινητήρα.

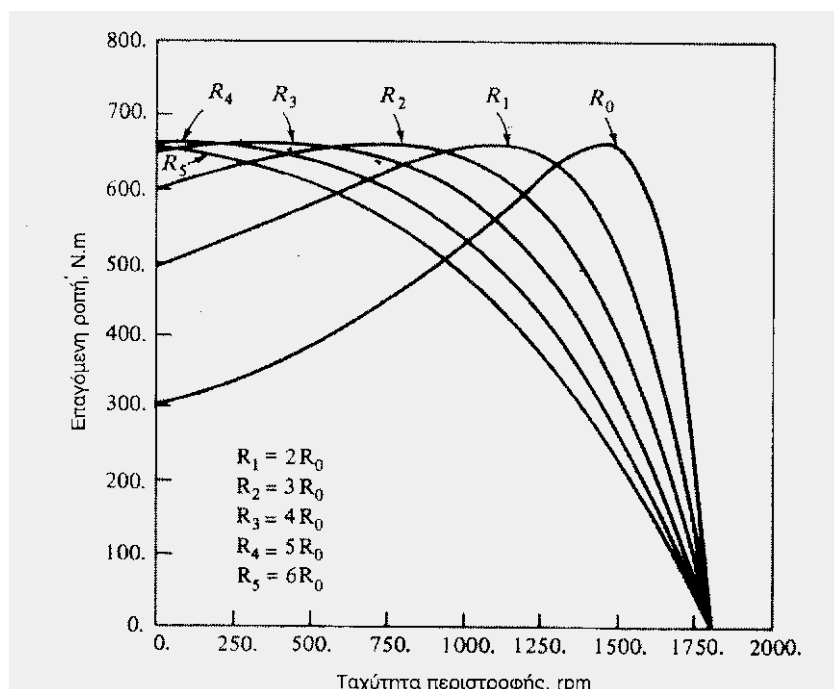
2. Έλεγχος ταχύτητας με την τεχνική της μεταβολής ολίσθησης του κινητήρα

Ο έλεγχος της ολίσθησης πραγματοποιείται με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ή με μεταβολή της τάσης εισόδου στον κινητήρα.

α) Έλεγχος ταχύτητας με μεταβλητές αντιστάσεις δρομέα.

Χρησιμοποιείται στους κινητήρες επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα όπου προστίθενται μηχανικά αντιστάσεις στο κύκλωμα του δρομέα.

Και έτσι είναι δυνατή η μεταβολή της μορφής της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 17

Η αρχική χαρακτηριστική είναι η καμπύλη με R_0 προσθέτοντας αντιστάσεις π.χ. $R_1=2R_0$ μεταβάλλεται αντίστοιχα η ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης της μηχανής και η μικρή μεταβολή ταχύτητας σε σχέση με τη μεταβολή φορτίου που τον καθιστούν αντισυμβατικό. Παρόλα αυτά χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή ευρέως στην πρακτική κυρίως για κινητήρα χαμηλής τάσης.

β) Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή τάσης τροφοδοσίας.,

Χρησιμοποιείται συνήθως στους μικρούς κινητήρες με τυλίγματα κλωβού. Ως γνωστόν η ροπή που αναπτύσσει ένας κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης, σύμφωνα με αυτό, είναι εφικτή η ρύθμιση αυτή όμως μπορεί να γίνει σε ένα περιορισμένο εύρος τιμών ταχύτητας.

1.8. Εκκίνηση επαγωγικού Κινητήρα

Κατά την εκκίνηση των μηχανικών επαγωγής παρουσιάζονται προβλήματα τα οποία είναι σημαντικά για τον ίδιο του κινητήρα αλλά και για τη μηχανή εργασίας και το δίκτυο. Τα κύρια προβλήματα εκκίνησης είναι τα μέτρα της ροπής εκκίνησης και του ρεύματος εκκίνησης. Για να εκκινήσει ο δρομέας θα πρέπει η ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα να είναι μεγαλύτερη από τη ροπή που επιβάλλεται από τον άξονα στο φορτίο. Συχνά απαιτείται ροπή εκκίνησης ίση ή και μεγαλύτερη από την ονομαστική. Σε στρεφόμενες μηχανές η ροπή εκκίνησης δεν μπορεί να είναι ούτε πολύ μικρή διότι τότε απαιτείται μεγάλος χρόνος εκκίνησης ούτε πολύ μεγάλη διότι υπάρχει κίνδυνος θραύσης του άξονα.

Ακόμη, κατά την εκκίνηση οι κινητήρες βραχυκλωμένου δρομέα απορροφούν ρεύμα τετραπλάσιο μέχρι και οκταπλάσιο του ονομαστικού τους. Όμως στις ηλεκτρικές κινήσεις με μεγάλο ρεύμα εκκίνησης ο χρόνος εκκίνησης δεν επιτρέπεται να είναι μεγάλος, επειδή αναπτύσσεται μεγάλη θερμότητα σε όλο το κύκλωμα και ανεπιθύητες πτώσεις τάσεις στο δίκτυο. Η ΔΕΗ απαιτεί το ρεύμα εκκίνησης να μην υπερβαίνει ορισμένες τιμές ανάλογα με την εγκατάσταση.

Επίσης επιβάλλεται η εκκίνηση με διακόπτη Αστέρα/ τριγώνου σε 3Φ κινητήρα ισχύος άνω του 1,1 KW και απαγορεύει τη λειτουργία 1Φ ηλεκτροκινητήρα ισχύος άνω του 1,5 KW .

Μέθοδοι εκκίνησης επαγωγικού Κινητήρα

Για την επίλυση των ανωτέρω προβλημάτων αναπτύχθηκαν αρκετές μέθοδοι:

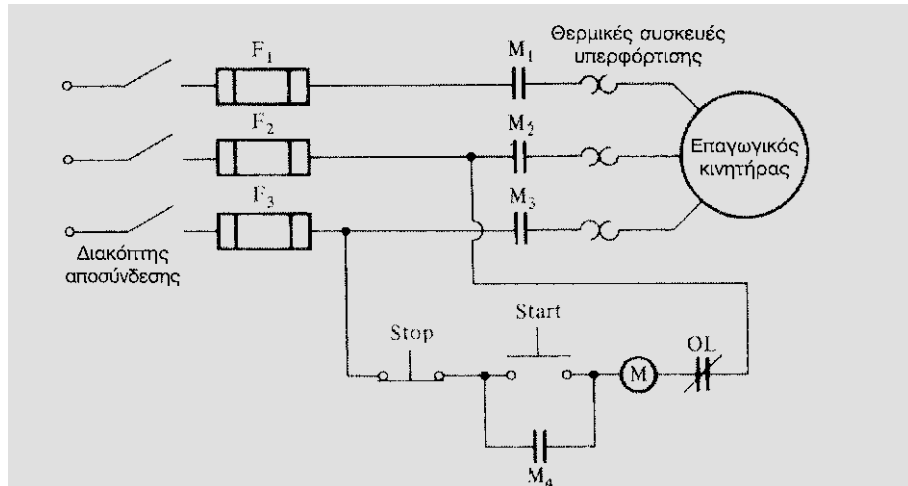
α) Απευθείας εκκίνηση. Ο κινητήρας συνδέεται στο δίκτυο μέσω τριπολικού διακόπτη. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε κινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 1.5 ίππους και δημιουργεί πτώση τάσης στο δίκτυο.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- Ρεύμα εκκίνησης : περίπου εξαπλάσιο του ονομαστικού
Μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, δημιουργία πτώσης τάσης.
- Ροπή εκκίνησης :1.5 *ονομαστικής ροπής
Μεγάλη ροπή εκκίνησης, δυνατότητα εκκίνησης με φορτίο.
- Απλός εξοπλισμός

- Αδυναμία ρύθμισης

Ένα τυπικό μαγνητικό κύκλωμα εκκίνησης πλήρους τάσης ή εκκίνησης με σύνδεση στη γραμμή κάποιου επαγωγικού κινητήρα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 18

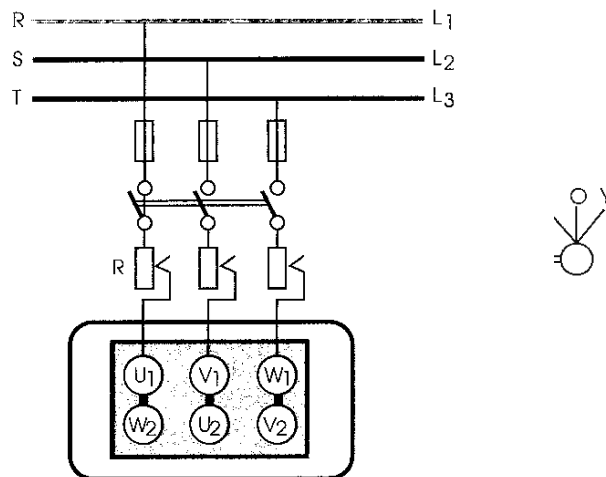
β) Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα τρίγωνο

Η εκκίνηση γίνεται με ειδικό χειροκίνητο ή με αυτόματο διακόπτη αστέρα – τριγώνου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας χειροκίνητος διακόπτης αστέρα-τριγώνου.

Κατά την εκκίνηση ο διακόπτης στρέφεται στη θέση αστέρα και όταν φθάσει σε κάποιο οριακό αριθμό στροφών στρέφεται στη θέση τριγώνου.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- Ρεύμα εκκίνησης : περίπου διπλάσιο του ονομαστικού
- Ροπή εκκίνησης : 0.5 * ονομαστικής ροπής
- Σύνθετος εξοπλισμός
- Αδυναμία ρύθμισης
- Παρατηρούνται αιχμές ρεύματος και ροπή κατά τη μεταλλαγή από αστέρα σε τρίγωνο



Σχήμα 19

γ) Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη.

Με τη διάταξη του παρακάτω σχήματος παρεμβάλλεται σε σειρά με το τύλιγμα του στάτη αντιστάσεις. Κατ'αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας εκκινεί με ελαττωμένη τάση και φυσικά ελαττωμένη ένταση. Προοδευτικά, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, ελαττώνουμε την αντίσταση μέχρι ο κινητήρας να αποκτήσει την ονομαστική του ταχύτητα, οπότε ο εκκινητής τίθεται εκτός δικτύου.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- Ρεύμα εκκίνησης : 4,5 του ονομαστικού
- Ροπή εκκίνησης : 0.75 * ονομαστικής ροπής
- Σύνθετος εξοπλισμός
- Αδυναμία ρύθμισης

Σχήμα 20

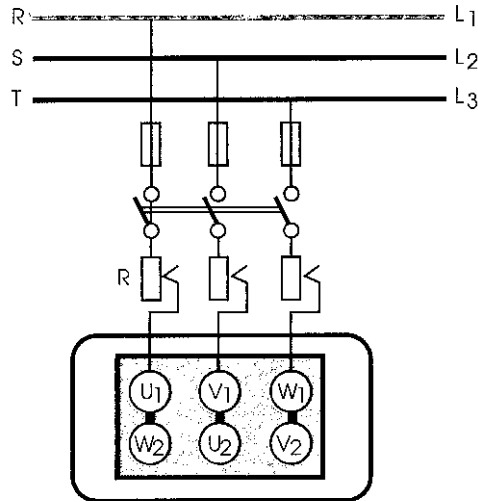
δ) Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

Κατά την εκκίνηση κλείνουμε το διακόπτη και τροφοδοτούμε τον κινητήρα με ελαττωμένη τάση μέσω του αυτομετασχηματιστή. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα φτάσει το 80% της κανονικής πατάμε τον μεταγωγικό διακόπτη Δ_2 θέτουμε τον κινητήρα υπό πλήρη τάση δικτύου. Ταυτόχρονα ανοίγουμε τον διακόπτη Δ_1 και θέτουμε τον μετασχηματιστή εκτός τάσης.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- Ρεύμα εκκίνησης : 3,5 του ονομαστικού

- Ροπή εκκίνησης :0.8*ονομαστικής ροπής
- Σύνθετος εξοπλισμός
- Αδυναμία ρύθμισης
- Μικρή ροπή εκκίνησης



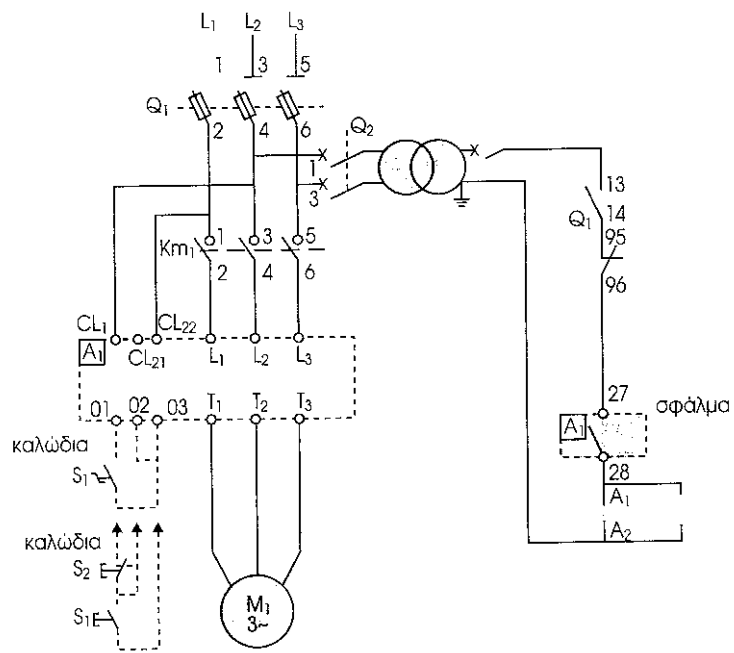
Σχήμα 21

ε) Εκκίνηση με ηλεκτρονικό εκκινητή

Ο ηλεκτρονικός εκκινητής επιτρέπει τον έλεγχο της διαδικασίας εκκίνησης του κινητήρα. Ανάλογα με τη ροπή του φορτίου, μπορούμε να προσαρμόσουμε την τάση και να επιτύχουμε τη βέλτιστη εκκίνηση ,τόσο από άποψη ροπής όσο και από άποψη έντασης ρεύματος.

Χαρακτηριστικά λειτουργίας:

- Ρεύμα εκκίνησης : 2 έως 5 του ονομαστικού
- Ροπή εκκίνησης :0,5 έως 1 της ονομαστικής ροπής
- Δυνατότητα ρύθμισης των παραπάνω παραμέτρων με τις ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.



Σχήμα 22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Ο έλεγχος ενός κινητήρα και ειδικά ενός συστήματος κίνησης είναι απαραίτητος όταν υπάρχουν συχνές μεταβολές των μεγεθών της ροπής και της ισχύος φορτίου οι οποίες δημιουργούν υπερφόρτιση του κινητήρα, αστάθεια του συστήματος, υπερθέρμανση και υπερβολική κατανάλωση ενέργειας. Όλα αυτά αντιμετωπίζονται με την κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα . Επίσης με τον έλεγχο εξασφαλίζεται οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας και αύξηση του βαθμού απόδοσης οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν κινητήρες χαμηλότερες ονομαστικής ισχύος.

Για τον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται μετατροπείς ισχύος. Οι μετατροπείς ισχύος παρέχουν τις εξής λειτουργίες:

- Μετατροπή εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και αντίστροφα
- Δυνατότητα αλλαγής συχνότητας
- Δυνατότητα αλλαγής αριθμού φάσεων
(π.χ. μετατροπή μονοφασικής τάσης σε 3φ)

Γενικά οι στατικοί μετατροπείς ισχύος μπορούν να ελέγξουν την ροή ενέργειας μεταξύ 2 διαφορετικών συστημάτων.

Είδη στατικών μετατροπέων ισχύος:

- α) ανορθωτές, οι οποίοι μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή
- β) αντιστροφείς ,όπου μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη
- γ) μετατροπείς συνεχούς τάσης που μετατρέπουν τη δεδομένη συνεχή τάση σε συνεχή επιθυμητού εύρους και πολικότητας
- δ) μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης ή κυκλομετατροπείς, μετατρέπουν τη δεδομένη εναλλασσόμενη τάση σε εναλλασσόμενη τάση επιθυμητού εύρους, συχνότητας και αριθμού φάσεων.

Μία δεύτερη ταξινόμηση σύμφωνα με τον τρόπο μετάβασης είναι:

Μετατροπείς χωρίς μετάβαση, στους οποίους δεν παρατηρείται το φαινόμενο της μετάβασης και έχουν τα χαρακτηριστικά ενός διακόπτη.

Μετατροπείς με φυσική μετάβαση, στους οποίους το ρεύμα αναγκάζεται να μεταβεί από έναν κλάδο σε άλλο υπό την επίδραση της τάσεως του δικτύου ή της τάσεως του φορτίου.

Μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση, η τάση που αναγκάζει το ρεύμα να αλλάξει κλάδο προέρχεται από κάποια βοηθητική διάταξη με πυκνωτή και βοηθητικό θυρίστορ.

Ο κινητήρας επαγωγής ή ασύγχρονος κινητήρας είναι ο πιο διαδεδομένος στα συστήματα κινήσεως E.P. και με αυτόν θα ασχοληθούμε στο παρόν κεφάλαιο.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής για την μόνιμη κατάσταση δεν είναι κατάλληλο για τη μελέτη της δυναμικής κατάστασης και για την περίπτωση που ο κινητήρας τροφοδοτείται από στατικό μετατροπέα ισχύος. Προκειμένου να αντιμετωπισθούν οι δύο παραπάνω περιπτώσεις έχουν δημιουργηθεί κάποια ειδικά μαθηματικά μοντέλα

α) Μαθηματικό μοντέλο για τον 3φ κινητήρα επαγωγής σε δυναμική κατάσταση.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μαθηματικό μοντέλο της μηχανής επαγωγής στο σύστημα αναφοράς συνδεδεμένο με τον άξονα της φάσης 1 του στάτη είναι οι ακόλουθες:

$$R_S \bar{i}_S + L_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + M \frac{d}{dt} \left(\bar{i}_R e^{j\theta} \right) = \bar{u}_S(t)$$

$$R_R \bar{i}_R + L_R \frac{d\bar{i}_R}{dt} + M \frac{d}{dt} \left(\bar{i}_S e^{-j\theta} \right) = 0$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T(t) - T_L(t) = \frac{3}{2} M \operatorname{Im} \left[\bar{i}_S (\bar{i}_R e^{j\theta})^* \right] - T_L(\theta, \omega, t)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Οι δύο πρώτες εξισώσεις έχουν πραγματικό και φανταστικό μέρος, οπότε και χωρίζονται σε ζεύγη με πραγματικό και φανταστικό μέρος. Έτσι προκύπτει ένα σύστημα 6 διαφορετικών μη γραμμικών εξισώσεων οι οποίες εφαρμόζονται για οποιαδήποτε κυματομορφή τάσεων, ρευμάτων, μεταβλητών ροπών και ταχυτήτων.

β) Γενικευμένο μοντέλο του συμμετρικού κινητήρα επαγωγής σε δυναμική λειτουργία.

Θεωρούμε ότι μεταβάλλονται τα παρακάτω μεγέθη: ροπή, ταχύτητα καθώς η συχνότητα τάσης και η κυματομορφή της τάσης που επιβάλλονται στα

τυλίγματα του στάτη. Επίσης η ρυθμιζόμενη πηγή είναι συμμετρική. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο είναι:

$$T_S \frac{d\psi_{Sd}}{dt} = -\psi_{Sd} + \frac{1}{S_S} \frac{\omega_1}{\omega_0} \psi_{Sq} + \frac{1}{1+\sigma_R} \psi_{Rd} + \frac{1}{S_S} \frac{U_S(t)}{U_{S0}}$$

$$T_S \frac{d\psi_{Sq}}{dt} = -\frac{1}{S_S} \frac{\omega_1}{\omega_0} \psi_{Sd} - \psi_{Sq} + \frac{1}{1+\sigma_R} \psi_{Rq}$$

$$T_R \frac{d\psi_{Rd}}{dt} = -\frac{1}{1+\sigma_S} \psi_{Sd} - \psi_{Rd} + \frac{1}{S_R} \frac{\omega_2}{\omega_0} \psi_{Rq}$$

$$T_S \frac{d\psi_{Rq}}{dt} = \frac{1}{1+\sigma_S} \psi_{Sq} - \frac{1}{S_R} \frac{\omega_2}{\omega_0} \psi_{Rd} - \psi_{Rq}$$

$$T_m \frac{d\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{dt} = 3(1+\sigma_S) (\psi_{Sq}\psi_{Rd} - \psi_{Sd}\psi_{Rq}) - \frac{T_L(\omega, \theta, t)}{T_{L0}}$$

$$\frac{\theta_0}{\omega_0} \frac{d\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right)}{dt} = \frac{\omega}{\omega_0}$$

Όπου:

ω_0 : ονομαστική κυκλική συχνότητα

U_{S0} : ονομαστική τάση στάτη

ψ_{sd} : ορθή συνιστώσα μαγνητικής ροής στάτη

ψ_{sq} : κάθετη συνιστώσα μαγνητικής ροής στάτη

ψ_{Rd} : ορθή συνιστώσα μαγνητικής ροής δρομέα

ψ_{Rq} : κάθετη συνιστώσα μαγνητικής ροής δρομέα

T : ροπή

T_R : σταθερά χρόνου δρομέα

σ_R : συντελεστής σκέδασης δρομέα

σ_S : συντελεστής σκέδασης στάτη.

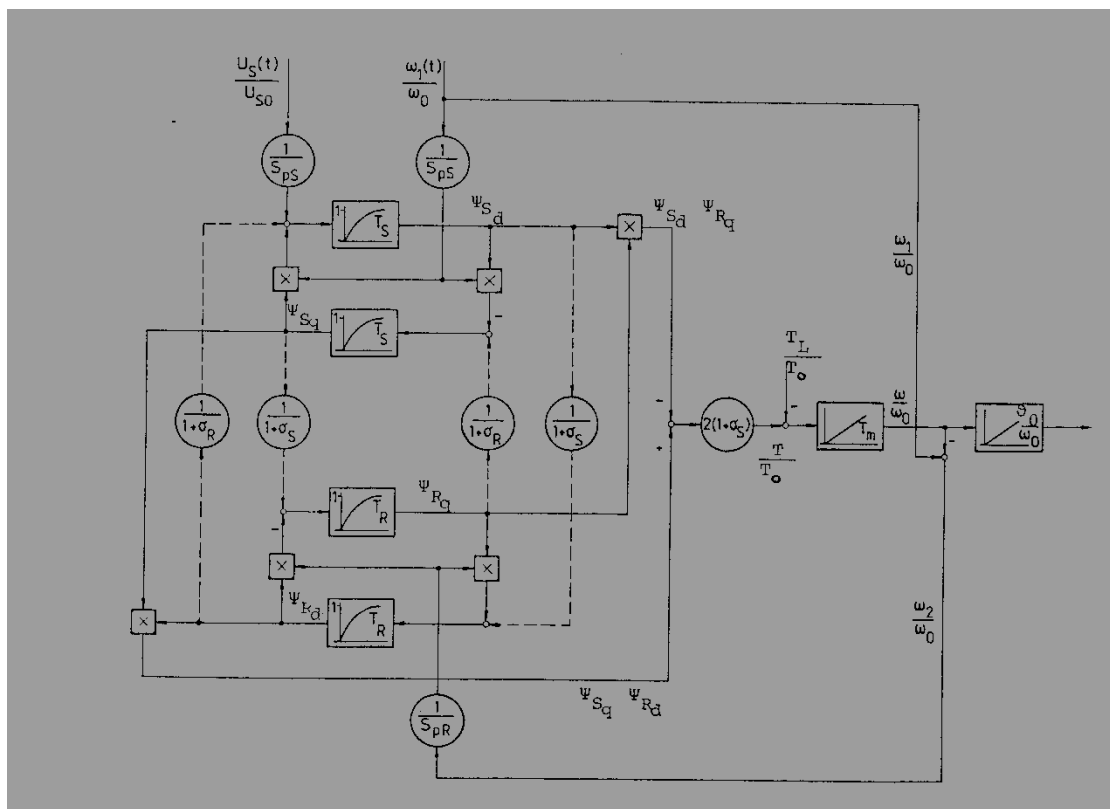
$$S_R = \frac{R_R}{\omega_0 \sigma L_R} = \frac{1}{\omega_0 T_R}$$

$$S_S = \frac{R_S}{\omega_0 \sigma L_S} = \frac{1}{\omega_0 T_S}$$

$$T_m = \frac{J \omega_0}{T_0}$$

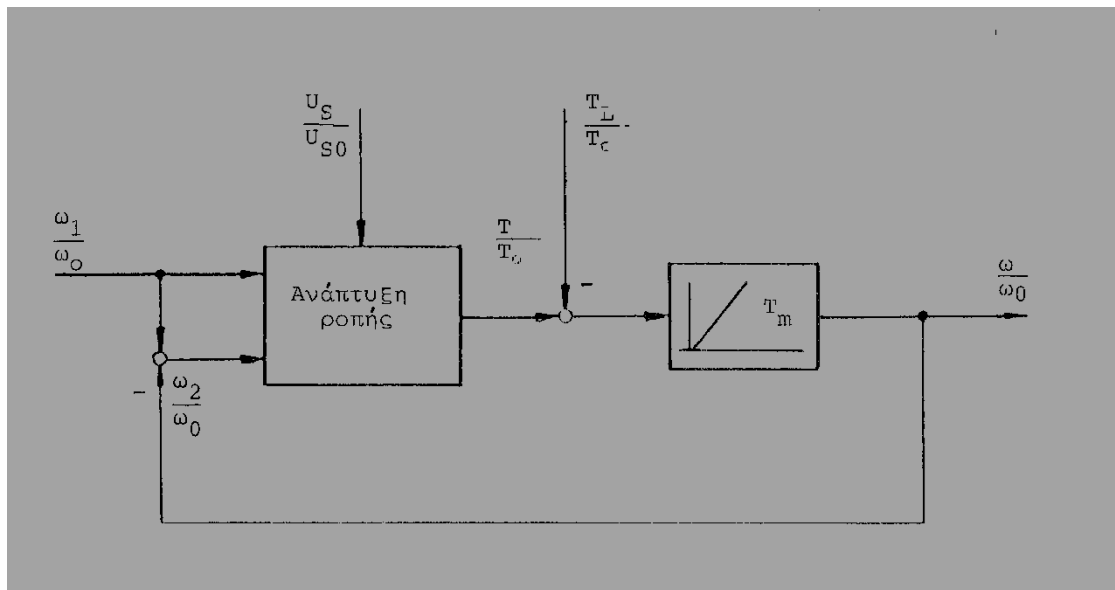
$$\omega_2 = \omega_1 - \omega$$

Το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος ελέγχου του ασύγχρονου κινητήρα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 23

Το απλοποιημένο δομικό διάγραμμα του κινητήρα επαγωγής φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 24

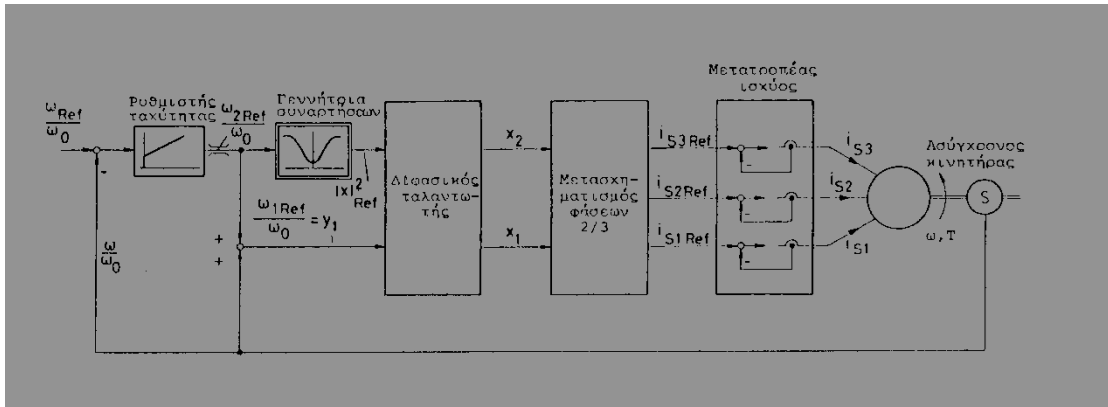
Από τα προηγούμενα μοντέλα του κινητήρα επαγωγής παρατηρούμε ότι είναι ένα μη γραμμικό πολυμεταβλητό σύστημα καθώς η κύρια ροή και το ρεύμα τυμπάνου αλληλεπιδρούν και τα ρεύματα στο δρομέα τύπου κλωβού δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν. Συνέπεια αυτού είναι η ανάπτυξη πλήθους διαφορετικών τεχνικών ελέγχου.

Παρακάτω θα αναπτυχθούν οι ακόλουθες διατάξεις και οι αντίστοιχες τεχνικές ελέγχου:

- α) Διάταξη ελέγχου της ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής σε ανοικτό βρόχο
- β) Έλεγχος ταχύτητας με διάταξη διπλής τροφοδότησης
- γ) Σύστημα ανάκτησης ισχύος του κινητήρα επαγωγής

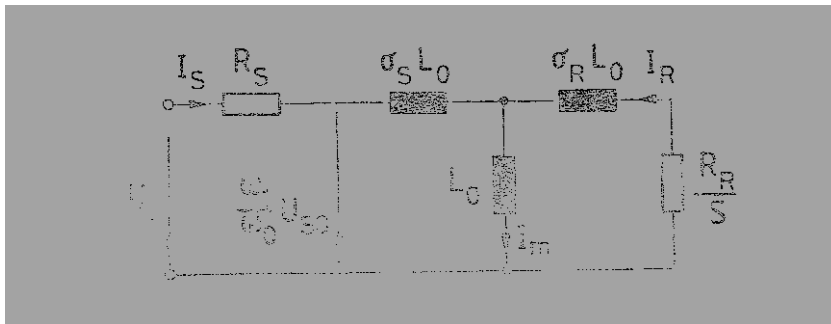
2.1. Έλεγχος ταχύτητας σε ανοικτό βρόχο

Στην παρούσα τεχνική ελέγχου ρυθμίζεται η μαγνητική ροή σε ανοικτό βρόχο έτσι ώστε να παραμένει σταθερή μεταβάλλοντας την τάση και την συχνότητα. Ο λόγος τάσης προς συχνότητα παραμένει σταθερός, συνεπώς και η μαγνητική ροή παραμένει σταθερή. Η διάταξη ελέγχου της ταχύτητας μέσω ελέγχου της μαγνητικής ροής σε ανοικτό βρόχο παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 25

- Για χαμηλές συχνότητας θεωρούμε ότι η αντίσταση R_s του στάτη είναι περίπου μηδενική. Οπότε υπάρχει γραμμική μεταβολή της τάσης και συχνότητας για σταθερή μαγνητική ροή. το ισόδυναμο κύκλωμα του ασύγχρονου κινητήρα για μεταβλητή συχνότητα του στάτη είναι το εξής:



Σχήμα 26

- Για υψηλές συχνότητες η πτώση τάσεως στην αντίσταση του στάτη λαμβάνεται υπόψη. Διατηρείται σταθερή η μαγνητική ροή συνεπώς και το ρεύμα μαγνήτισης I_m , ανεξαρτήτως της ταχύτητας του φορτίου και έτσι μπορεί να αφαιρεθεί από το μοντέλο του ασύγχρονου κινητήρα η επίδραση της αντίστασης στάτη R_s και της αυτεπαγωγής σκέδασης του στάτη. Συνεπώς το ρεύμα μαγνήτισης δίνεται από τη σχέση:

$$I_m = \frac{j\omega_1 \sigma_R M + R_R/s}{j\omega_1 (1 + \sigma_R) M + R_R/s} I_s$$

και το ρεύμα στάτη:

$$\bar{I}_S = \frac{1 + j(\omega_1 - \omega) T_R}{1 + j(\omega_1 - \omega) \frac{\sigma_R}{1 + \sigma_R} T_R} \bar{I}_m$$
$$T_R = L_R / R_R = \frac{1}{\sigma \omega_0 S_p}$$

όπου T_R : σταθερά χρόνου δρομέα.

Για να διατηρηθεί σταθερό το ρεύμα μαγνήτισης στην τιμή του ρεύματος κενού φορτίου I_{s0} πρέπει να ισχύει.

$$I_m = I_{m0} \cong I_{s0}$$
$$I_S = \frac{1 + (\omega_2 T_R)^2}{1 + \left(\frac{\sigma_R}{1 + \sigma_R} \omega_2 T_R \right)^2} I_{s0}$$

Όπου

ω_2 : συχνότητα δρομέα

I_{s0} : ρεύμα κενού φορά

T_R : σταθερά χρόνου δρομέα

σ_R : συντελεστής σκέδασης δρομέα

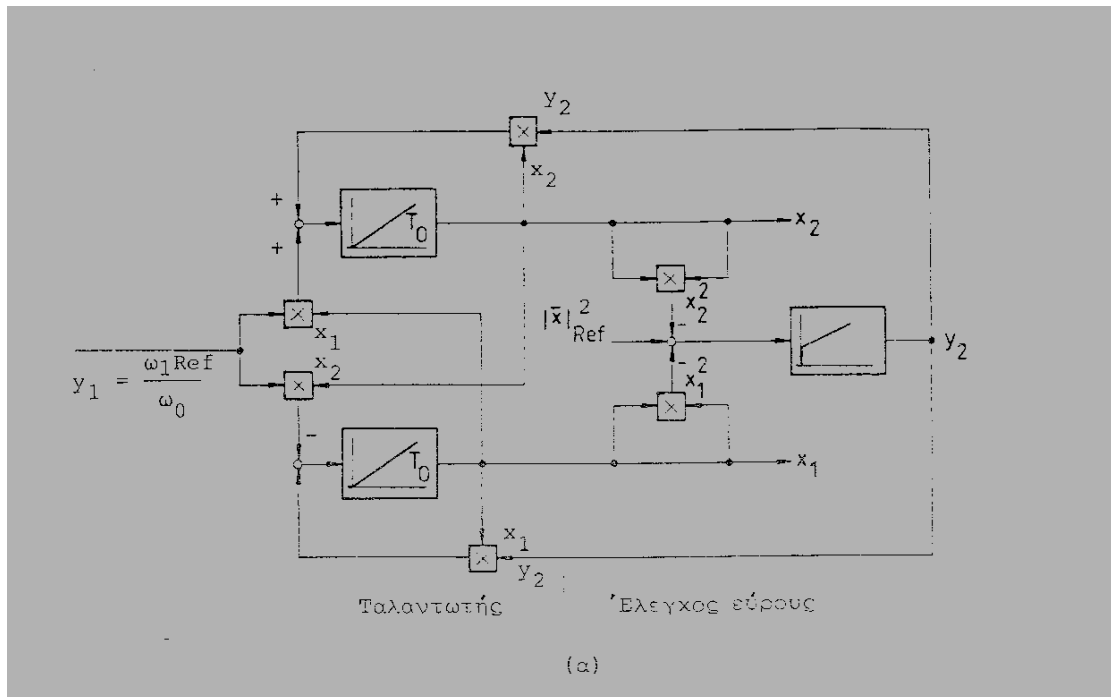
σ_S : συντελεστής σκέδασης στάτη.

Παρατηρούμε από την προηγούμενη σχέση ότι το μέτρο του ρεύματος του στάτη είναι συνάρτηση της συχνότητας του δρομέα $\omega_2 = \omega_1 - \omega_0$ και περιλαμβάνει μόνο τις παραμέτρους του δρομέα.

Βάση αυτής της εξίσωσης λαμβάνεται το σήμα αναφοράς για το ρεύμα στάτη I_{sRef} , αυτό το σήμα τροφοδοτεί το σύστημα ελέγχου που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο σχήμα. Μια γεννήτρια συναρτήσεων παράγει κατάλληλο σήμα αναφοράς. Η γεννήτρια αυτή δέχεται ως μεταβλητή εισόδου την επιθυμητή συχνότητα του δρομέα ω_{2REF} / ω_0 .

Η συχνότητα του δρομέα περιορίζεται σε ένα ορισμένο εύρος ούτως ώστε η ταχύτητα να μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο. Αυτή η επιθυμητή συχνότητα δρομέα λαμβάνεται από ρυθμιστή ταχύτητας. Η έξοδος της γεννήτριας συναρτήσεων είναι το μέγεθος $|\bar{x}|_{REF}^2$ όπου $x_{2ref} = x_1^2 + x_2^2 = (I_s/I_{so})$ δηλ. το ρεύμα του στάτη.

Το επόμενο στοιχείο της διάταξης ελέγχου είναι ο διφασικός ταλαντωτής το δομικό διάγραμμα το οποίο φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 27

Τα σήματα εισόδου του διφασικού ταλαντωτή είναι τα ψ_1, ψ_2 όπου $\psi_1 = \omega_{1Ref}/\omega_0$ παράγεται από το άθροισμα του σήματος ταχύτητας ω/ω_0 και του σήματος αναφοράς της συχνότητας του δρομέα ω_{2Ref}/ω_0 . Εδώ ο κινητήρας

λειτουργεί στην γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας, αφού η συχνότητα δρομέα ω_2 είναι περιορισμένη. Έξοδος του διφασικού ταλαντωτή είναι τα σήματα χ_1, χ_2 , τα σήματα ψ_1, ψ_2 και χ_1, χ_2 συνδέονται σύμφωνα με τις διαφορικές εξισώσεις:

$$T_0 \frac{dx_1}{dt} = -y_1 x_2 + y_2 x_1$$

$$T_0 \frac{dx_2}{dt} = y_1 x_1 + y_2 x_2$$

όπου:

$$T_0 = \frac{1}{\omega_0}$$

$$y_1 = \frac{\omega_{1Ref}}{\omega_0}$$

$$x_{Ref}^2 = x_1^2 + x_2^2 = \left(\frac{I_s}{I_{s0}} \right)$$

Οι 2 μεταβλητές $\chi_1(t), \chi_2(t)$ αποτελούν ένα διφασικό σύστημα κατάστασης $\chi(t) = x_1(t) + x_2(t)$, μια συνεχής συνάρτηση που χρησιμοποιείται ως σήμα αναφοράς για το ρεύμα.

Στα δύο σήματα αυτά γίνεται μετασχηματισμός φάσεων από 2 σε 3 οπότε το ισοδύναμο τριφασικό σύστημα είναι:

$$\begin{aligned}\bar{x}(t) &= x_1(t) + jx_2(t) = \\ &= \frac{2}{3} [w_1(t) + e^{j\gamma}w_2(t) + e^{-j\gamma}w_3(t)]\end{aligned}$$

$$\text{όπου } \gamma = \frac{2\pi}{3}$$

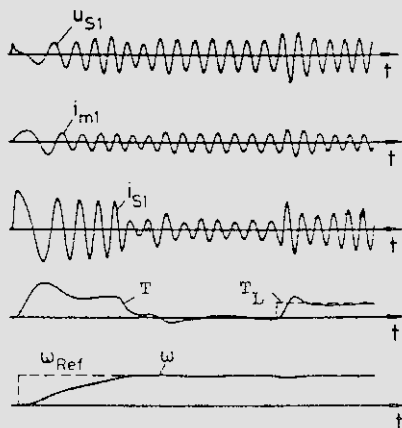
$$w_1(t) = x_1(t) = \frac{i_{S1Ref}}{I_{S0}}$$

$$w_2(t) = -\frac{1}{2}x_1(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}x_2(t) = \frac{i_{S2Ref}}{I_{S0}}$$

$$w_3(t) = -\frac{1}{2}x_1(t) - \frac{\sqrt{3}}{2}x_2(t) = \frac{i_{S3Ref}}{I_{S0}}$$

$$w_1(t) + w_2(t) + w_3(t) = 0$$

Κατ' αυτόν τον τρόπο παράγεται ένα τριφασικό εναλλασσόμενο σύστημα αναφοράς i_{S1Ref} , i_{S2Ref} , i_{S3Ref} , τα τρία αυτά ρεύματα έχουν ρυθμίσιμη συχνότητα και είναι τα τρία σήματα αναφοράς που εισέρχονται στον μετατροπέα ισχύος. Η όλη διάταξη προσομοιώνονται σε Η/Υ και τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, όπου απεικονίζει την απόκριση του συστήματος, εκκίνηση και φόρτιση.



Σχήμα 28

Όπου:

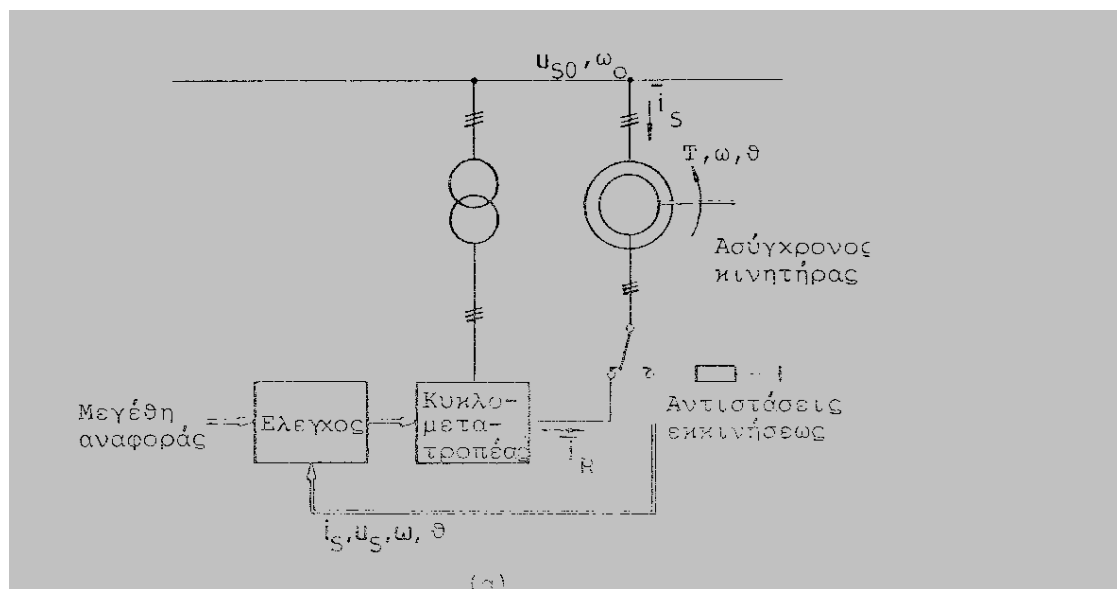
- V_{s1} : Φασική τάση
- I_{m1} : ρεύμα μαγνήτισης
- I_{s1} : φασικό ρεύμα
- T : ροπή κινήσεως
- T_L : ροπή φορτίου
- ω : ταχύτητα

2.2. Έλεγχος ταχύτητας σε διάταξη διπλής τροφοδοσίας

Η παρούσα μέθοδος εφαρμόζεται στις περιπτώσεις όπου δημιουργείται μεγάλη μεταβολή της ροπής φορτίου για μικρές ταχύτητας.

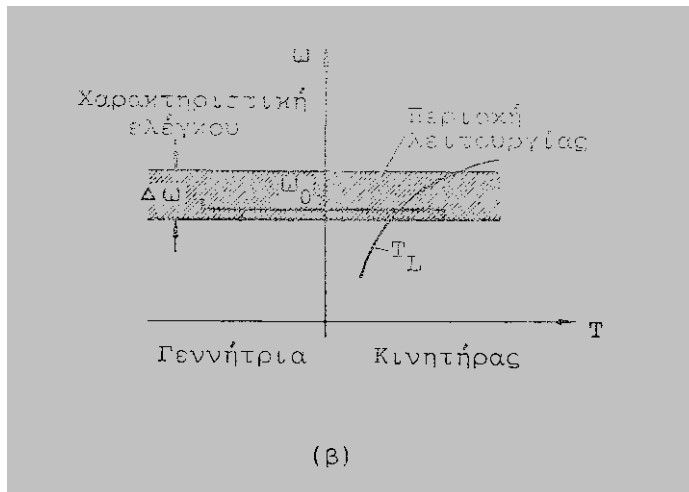
Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται σε δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας ενώ τα τυλίγματα του δρομέα τροφοδοτούνται μέσω στατικού μετατροπέα με τάση ρυθμίσιμου εύρους, φάσης και συχνότητας, δηλ. γίνεται διπλή τροφοδότηση. Όταν η μηχανή λειτουργεί με σταθερή συχνότητα δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στην παρούσα εφαρμογή θα ασχοληθούμε με την περίπτωση κατά την οποία η εναλλασσόμενη διέγερση του δρομέα μεταβάλλεται σε συχνότητα, εύρος και φάση και μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα, ροπή και η άεργος ισχύς ενώ οι μεταβατικές ταλαντώσεις της ταχύτητας έχουν καλή απόσβεση.

Η συνδεσμολογία του κινητήρα επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι η εξής:



Σχήμα 29

και η περιοχή λειτουργίας του ρύθμισης της ταχύτητας ΔW



Σχήμα 30

Όπου : W_{s0} , σταθερή συχνότητα πηγής
 U_{s0} σταθερή τάση γραμμής της τριφασικής συμμετρικής πηγής με την οποία συνδέονται τα τυλίγματα του στάτη.

Ο δρομέας τροφοδοτείται με 3φ ρεύματα μεταβλητού εύρους, συχνότητας και φάσης. Η πηγή τάσης του μπορεί να είναι ένας κυκλομετατροπέας ή ένας αντιστροφέας παλμών μεταβλητού εύρους.

Η τεχνική ελέγχου που θα παρουσιασθεί είναι η field oriented control ή με προσανατολισμό ως προς το πεδίο του συστήματος κίνησης ασύγχρονου κινητήρα σε διάταξη διπλής τροφοδότησης.

Επιλέγεται ένα σύστημα αναφοράς για τα ρεύματα και τις τάσεις, το οποίο έχει τον ορθό άξονα ευθυγραμμισμένο με το ρεύμα μαγνήτισης και μετατρέπουμε τις τάσεις και τα ρεύματα του κινητήρα στο νέο σύστημα συντεταγμένων.

Για την περίπτωση του κινητήρα διπλής τροφοδότησης η ροπή κίνησης είναι ανάλογη της κάθετης συνιστώσας του ρεύματος δρομέα, ενώ η ορθή συνιστώσα του ρεύματος δρομέα είναι ανάλογη του ρεύματος μαγνήτισης και χρησιμεύει για την ρύθμιση του. Στην περίπτωση βραχυκυκλωμένου δρομέα η κάθετη συνιστώσα του ρεύματος στάτη είναι ανάλογη με τη ροπή κίνησης, ενώ η ορθή συνιστώσα του ρεύματος στάτη είναι ανάλογη του ρεύματος μαγνήτισης και ρυθμίζεται μέσω αυτής. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται εδώ, είναι το μοντέλο σε δυναμική κατάσταση όπως περιγράφηκε πριν με μικρές αλλαγές. Η βασική αλλαγή είναι ότι υπάρχει πηγή τάσης στο δρομέα. Η εξίσωση τάσεων δρομέα είναι:

$$R_R \bar{i}_R + L_R \frac{d\bar{i}_R}{dt} + M \frac{d}{dt} \left(\bar{i}_S e^{-j\theta} \right) = \bar{u}_R(t)$$

όπου:

$$\bar{u}_R(t) = u_{R1} + u_{R2} e^{j\gamma} + u_{R3} e^{j2\gamma}$$

και ισχύει το ακόλουθο σύστημα διαφορικών εξισώσεων

$$R_S \bar{i}_S + M(1+\sigma_S) \frac{d\bar{i}_S}{dt} + M \frac{d}{dt} \left(\bar{i}_R e^{j\theta} \right) = \bar{u}_S(t)$$

$$R_R \bar{i}_R + L_R \frac{d\bar{i}_R}{dt} + M \frac{d}{dt} \left(\bar{i}_S e^{-j\theta} \right) = \bar{u}_R(t)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T(t) - T_L(t) = \frac{2}{3} M/m \left[\bar{i}_S (\bar{i}_R e^{j\theta})^* \right] - T_L(\theta, \omega, t)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

Στις παραπάνω εξισώσεις γίνονται οι κατάλληλες μετατροπές ώστε να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του ρεύματος δρομέα, της τάσης του στάτη και ρεύματος μαγνήτισης, αφού ο έλεγχος θα γίνει μέσω του ρεύματος δρομέα. Το σύστημα αναφοράς το οποίο έχει άξονα τον άξονα του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται “σύστημα προσανατολισμένο ως προς το πεδίο” ή “field oriented system of coordinates” και οι συντεταγμένες συντεταγμένες πεδίου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τρία συστήματα αναφοράς της ασύγχρονης μηχανής και η συσχέτιση τους. Οι σχέσεις μεταξύ των γωνιών τους είναι:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \omega_2$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \omega_{mS}$$

Μετά από μετατροπές καταλήγουμε για το ρεύμα δρομέα στο σύστημα αναφοράς του πεδίου σε συντεταγμένες πεδίου και είναι:

$$i_R e^{j\delta} = i_R e^{j(\theta+\xi-\mu)} = i_R \cos\delta + j i_R \sin\delta = i_{Rd} + j i_{Rq}$$

Τα i_{Rd} i_{Rq} ονομάζονται d-q συνιστώσες του ανύσματος ρεύματος του δρομέα στο σύστημα αναφοράς πεδίου ή η ορθή και η κάθετη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα σε συντεταγμένες του πεδίου. Η ροπή κίνησης του κινητήρα είναι:

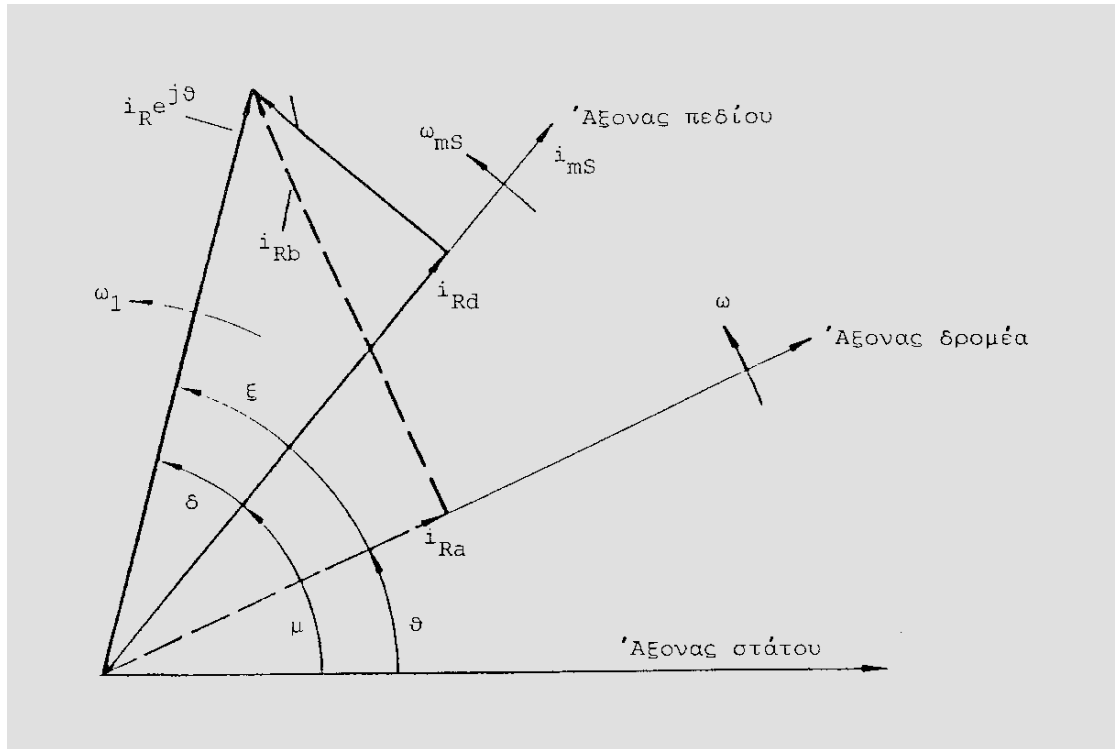
$$T(t) = K i_{ms} i_{Rq}$$

Όπου

$$K = -2/3 \quad M/1 + \sigma_s$$

Άρα μέσω της κάθετης συνιστώσας του ρεύματος i_{Rq} μπορούμε να ρυθμίσουμε τη ροπή της ασύγχρονης μηχανής.

Από το σχήμα



Σχήμα 31

παρατηρούμε ότι το ρεύμα μαγνήτισης I_{mS} ρυθμίζεται μέσω της ορθής συνιστώσας του ρεύματος δρομέα I_{Rd} . Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μέτρο και τη γωνία του ρεύματος μαγνήτισης συναρτήσεσι των ορθών και κάθετων συνιστωσών τάσης στάτη και του ρεύματος δρομέα είναι:

$$T_S \frac{di_{mS}}{dt} + i_{mS} = \frac{1+\sigma_S}{R_S} u_{Sd} + i_{Rd}$$

$$\frac{d\mu}{dt} = \omega_{mS} = \frac{1}{T_S i_{mS}} \left[\frac{1+\sigma_S}{R_S} u_{Sq} + i_{Rq} \right]$$

Οι κάθετες συνιστώσες d-q του ρεύματος δρομέα υπολογίζονται από τα φυσικά ρεύματα I_{r1}, I_{r2}, I_{r3} όπως φαίνεται παρακάτω αφού

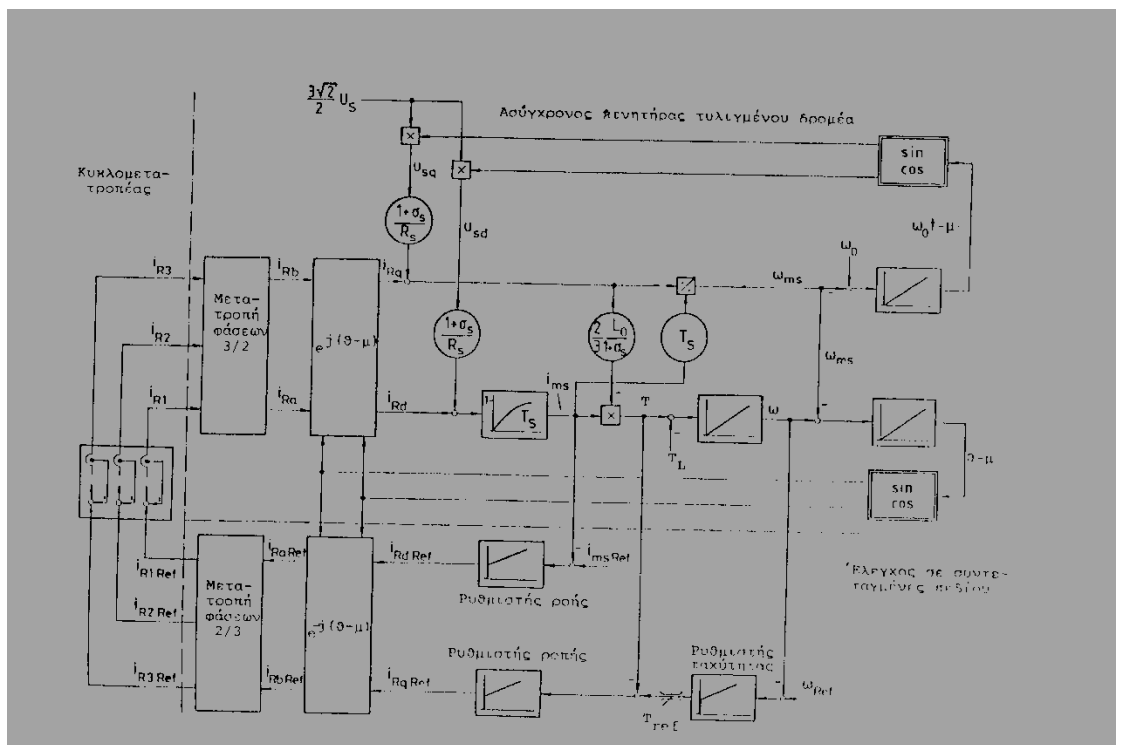
πρώτα το χωρικό άνυσμα ρεύματος μετατρέπεται σε ένα διφασικό σύστημα ρευμάτων i_{Ra}, i_{Rb} και στη συνέχεια γίνεται αναφορά τους στο σύστημα

αναφοράς πεδίου. Η γωνία $\theta-\mu$ είναι η θέση του δρομέα σε συντεταγμένες πεδίου.

$$\begin{aligned}
 i_R e^{j(\theta-\mu)} &= i_R e^{j(\theta+\xi-\mu)} = i_R e^{j\xi} = \\
 &= (i_{Ra} + j i_{Rb}) \left[\cos(\theta-\mu) + j \sin(\theta-\mu) \right] = \\
 &= i_{Ra} \cos(\theta-\mu) - i_{Rb} \sin(\theta-\mu) + j \left[i_{Ra} \sin(\theta-\mu) + i_{Rb} \cos(\theta-\mu) \right] = \\
 &= i_{Rd} + j i_{Rq}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{i}_R(t) &= i_R e^{j\xi} = i_{R1} + i_{R2} e^{j\gamma} + i_{R3} e^{j2\gamma} = \\
 &= \frac{3}{2} i_{R1} + j \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{R2} - i_{R3}) = i_{Ra} + j i_{Rb}
 \end{aligned}$$

Το δομικό διάγραμμα του ασύγχρονου κινητήρα διπλής τροφοδότησης φαίνεται παρακάτω



Σχήμα 32

Εν' συντομία ο έλεγχος επιτυγχάνεται ως εξής: η i_{Rd} ορθή συνιστώσα του ρεύματος δρομέα ρυθμίζει το ρεύμα μαγνήτισης και η I_{Rq} κάθετη συνιστώσα ρυθμίζει τη ροπή κινήσεως. Η μαγνητική ροή ή το ρεύμα μαγνητίσεως I_{ms} προσδιορίζεται από την τάση του δικτύου U_s και εφ' όσον το ρυθμίζει η ορθή συνιστώσα χρησιμοποιείται για να διατηρεί το άεργο ρεύμα του στάτη σε μια σταθερή τιμή. Τότε η κάθετη συνιστώσα του ρεύματος δρομέα γίνεται μεταβλητή εισόδου για τον έλεγχο της ροπής στον οποίο προστίθεται ο έλεγχος της ταχύτητας.

Τέλος το σύστημα αυτό έχει καλές λειτουργικές χαρακτηριστικές και η τεχνική ελέγχου είναι πολύ ευέλικτη.

2.3. Σύστημα ανάκτησης της ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα.

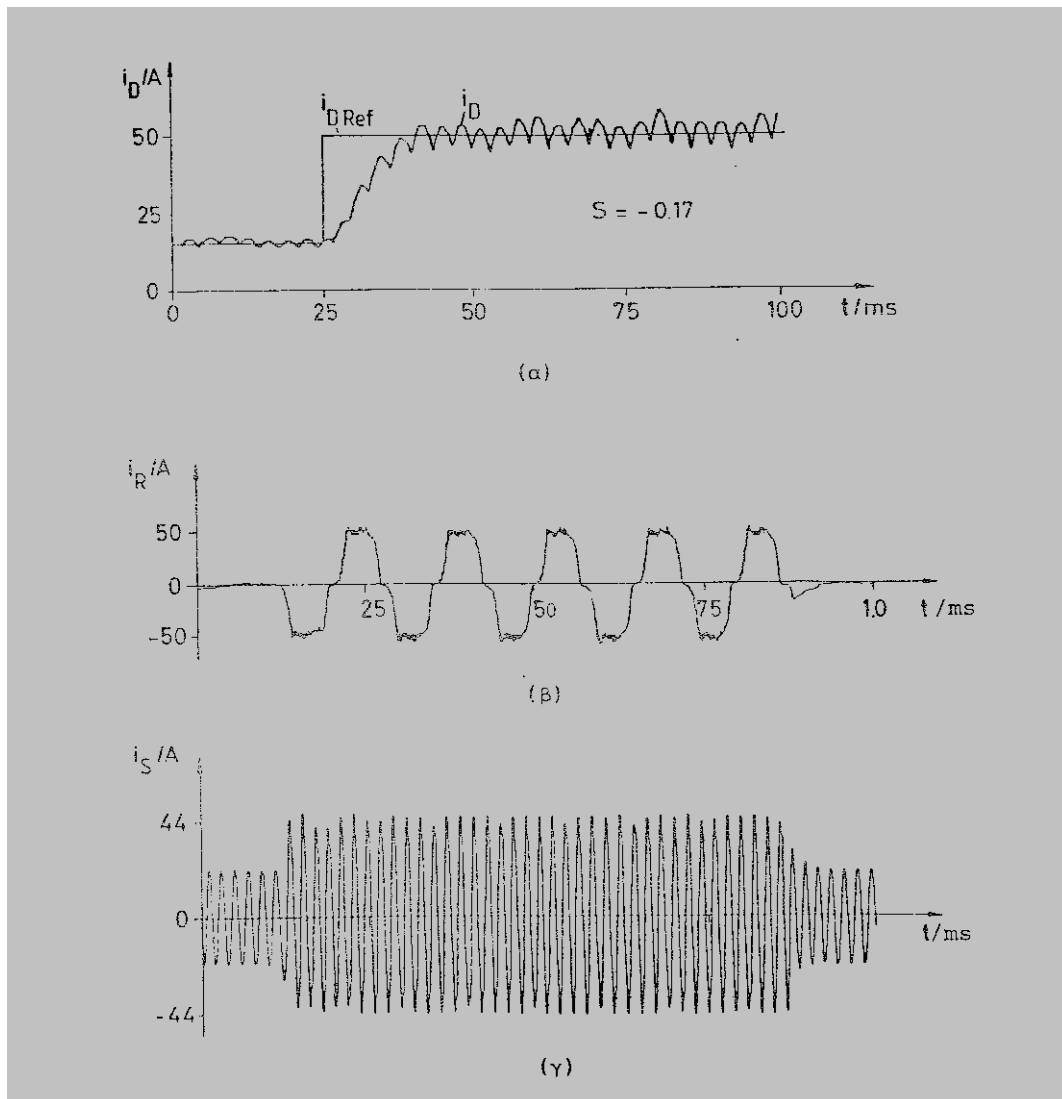
Η μηχανή διπλής τροφοδότησης της προηγούμενης παραγράφου λειτουργεί σαν κινητήρα ή σαν γεννήτρια. Η ισχύς ολίσθησης P_r μπορεί να ρέει από την τριφασική γραμμή προς το δρομέα και αντίστροφα, έτσι το σύστημα αποκτά μεγάλο βαθμό ευελιξίας.

Η διάταξη ελέγχου του στατικού συστήματος ανάκτησης ισχύος φαίνεται παρακάτω καθώς και οι χαρακτηριστικές ταχύτητας ροπής του:

Ο ρυθμιστής ταχύτητας τύπου PI (proportional –integral) διατηρεί την ταχύτητα σταθερή για όλη την περιοχή του φορτίου ως εξής: αν το φορτίο αυξάνει περισσότερο τότε ο ρυθμιστής ταχύτητας οδηγείται σε κορεσμό και προκαλεί μείωση της ταχύτητας.

Εάν η ταχύτητα μειώνεται περισσότερο τότε θέτει σε κίνδυνο τον αντιστροφέα.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η απόκριση του συστήματος ανάκτησης ισχύος κατά τη βηματική αύξηση του συνεχούς ρεύματος αναφοράς I_{DRef} για σταθερής ταχύτητας.



Σχήμα 34

Όπου:

- Απόκριση του συνεχούς ρεύματος I_D
- Απόκριση του ρεύματος του δρομέα I_R
- Απόκριση του ρεύματος στάτη I_S .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΧΩΡΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια νέα τεχνική έλεγχου των κινητήρων επαγωγής κατά την οποία δεν χρησιμοποιούνται αισθητήρες όπως για τη μέτρηση της θέσης του ρότορα. Σε πολλές περιπτώσεις είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες για τη μέτρηση της ταχύτητας είτε γιατί είναι τεχνικώς αδύνατο είτε υπερβολικά ακριβό. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται κατά τον έλεγχο με αισθητήρες οδήγησαν στην ανάπτυξη της παρούσας μεθόδου και ταυτόχρονα γίνονται πλεονεκτήματα της. Η νέα αυτή τεχνική παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία, μεγάλη ευρωστία, καλή λειτουργία σε μεγάλες απαιτήσεις αλλαγής ταχύτητας. Επίσης δεν υπεισέρχεται θόρυβος και είναι γενικά λιγότερο δαπανηρή από αυτή με αισθητήρες.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται για την εκκίνηση, πέδηση, αλλαγή ταχύτητας.

Τα κυκλώματα ελέγχου μπορεί να είναι ανοιχτού ή κλειστού βρόχου.

Ο έλεγχος με ανοιχτό βρόχο με μεταβολή συχνότητας παρέχει ικανοποιητικό έλεγχο π.χ. όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ροπή σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας χωρίς αυστηρές απαιτήσεις σε ρύθμιση ταχύτητας. Όταν η οδήγηση απαιτεί γρήγορη δυναμική απόκριση και ακριβή ταχύτητα ή ακριβή έλεγχο ροπής ο έλεγχος με ανοιχτό βρόχο δεν είναι ικανοποιητικός.

Ο έλεγχος με κλειστό βρόχο είναι απαραίτητος στην δυναμική κατάσταση λειτουργίας όταν η λειτουργία του επηρεάζει την ολική απόδοση του συστήματος στο οποίο ανήκει ο κινητήρας.

Επίσης ένας λόγος που κάνει πολύπλοκη τη σχεδίαση συστήματος ελέγχου του επαγωγικού κινητήρα είναι η μη γραμμική σχέση ροπής – μαγνητικής ροής και ροπής – ταχύτητας.

Ο έλεγχος χωρίς αισθητήρες μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους εξής 2 τρόπους:

α) έλεγχος ταχύτητας Ανοιχτού Βρόχου με αναπλήρωση ολίσθησης

Κατά τον οποίο ρυθμίζεται η σύγχρονη ταχύτητα ή η συχνότητα ενώ η εκτιμώμενη ολίσθηση χρησιμοποιείται μόνο για να αναπληρώσει τις αλλαγές φορτίου.

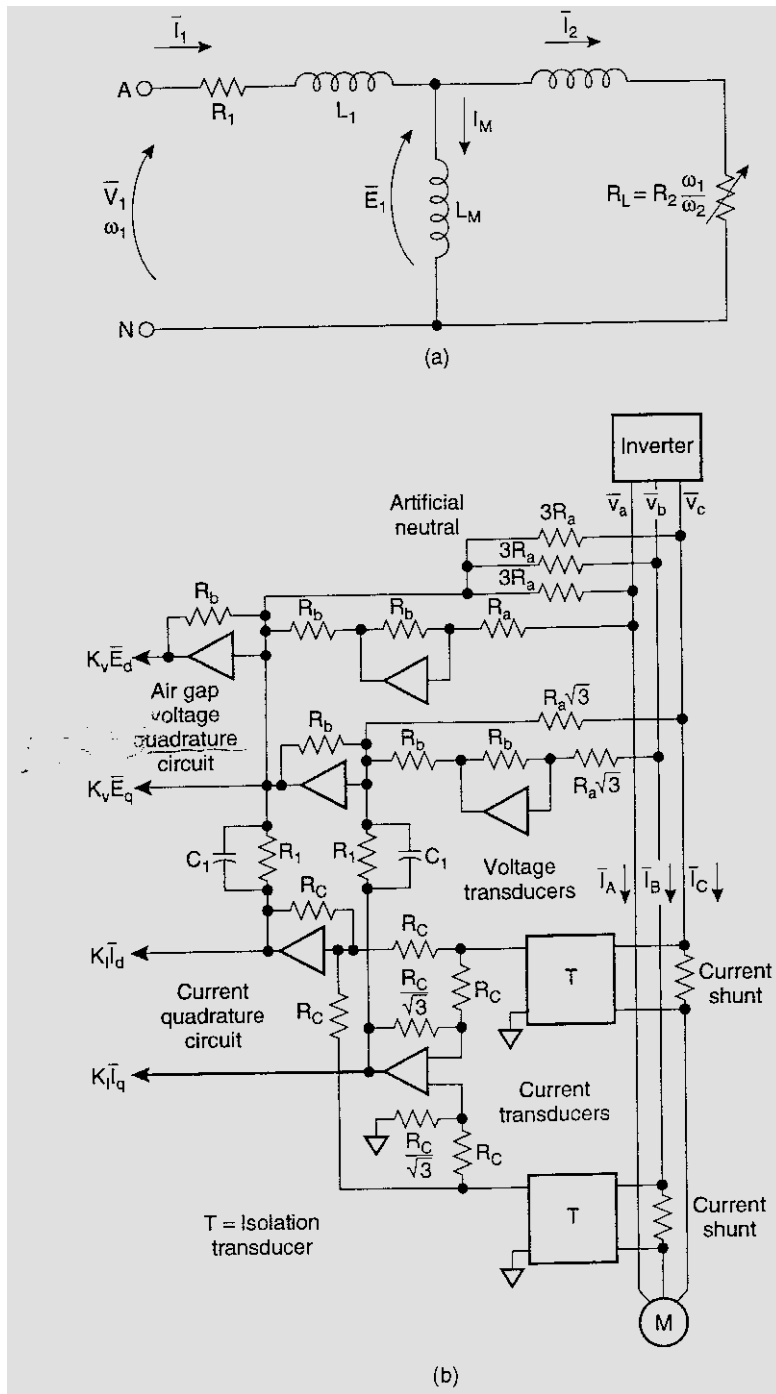
β) έλεγχος ταχύτητας κλειστού βρόχου με εκτιμητή ταχύτητας

Όπου εκτιμάται η ταχύτητα του κινητήρα και χρησιμοποιείται σαν σήμα ανατροφοδότησης για κλειστού βρόχου ρύθμιση ταχύτητας.

Οι 2 παραπάνω τεχνικές υλοποιούνται σύμφωνα με τις παρακάτω μεθόδους.

3.1. Μέθοδος του υπολογισμού ολίσθησης συχνότητας

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο υπολογίζουμε την ολίσθηση συχνότητας τη διαφορά δηλαδή της συχνότητας του στάτη από την ηλεκτρική συχνότητα και βάση αυτής υπολογίζουμε την ταχύτητα του ρότορα.



Σχήμα 35

Οι πληροφορίες για τη συχνότητα λαμβάνονται υπολογίζοντας τα ηλεκτρικά μεγέθη του κινητήρα.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής λαμβάνουμε για την Ολίσθηση συχνότητας

$$\omega_2 = R_2/K * T\omega_1^2/E_1^2 = R_2 N/D \quad (1)$$

Υπολογίζεται από τον τύπο 1 η συχνότητα της ολίσθησης ω_2 και μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα. Το σήμα αυτό λαμβάνεται και χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει τον κινητήρα.

Οι μετρούμενες τιμές του ρεύματος του στάτη και της τάσης διακένου, που συμβολίζονται με το N στον τύπο 1 μετατρέπονται σε αναλογικά σήματα από ένα δυναμικό κύκλωμα. Η ποσότητα D περιέχει πληροφορίες για το πλάτος της τάσης διακένου και τη συχνότητα στάτη.

Το παραπάνω σχήμα χρησιμοποιείται μόνο στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και έχει περιορισμένα όρια διακύμανσης ταχύτητας. Μια επέκταση αυτής της μεθόδου η οποία έχει τους ίδιους περιορισμούς είναι οι εξής: υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται στον ρότορα χρησιμοποιώντας το dc τάση και της απώλειας στον μετατροπέα και στάτη σύμφωνα με τη σχέση:

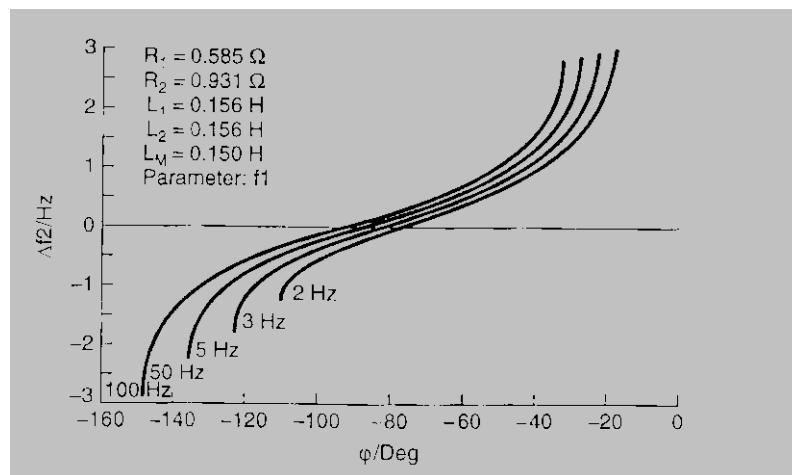
Ηλεκτρική ισχύς ρότορα = dc ισχύς – (απώλειες, μετατροπέα και στάτη)

Η ροπή σε σχέση με τη συχνότητα στάτη και ω_1 είναι:

Ροπή = ηλεκτρική είσοδος ρότορα / ω_1

αυτή είναι η βάση για τον υπολογισμό της ολίσθησης.

Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε την συχνότητα του ρότορα απ' ευθείας από τη διαφορά φάση ανάμεσα στην τάση του στάτη και το ρεύμα στάτη, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 36

Η ολίσθηση συχνότητας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μόνο τις παραμέτρους του κινητήρα και τις μετρήσεις από το ρεύμα στάτη.

Η παρακάτω συσχέτιση μεταξύ της ηλ. Συχνότητας ρότορα και της γωνίας φάσης μπορούν να βρεθούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας των μηχανής επαγωγής.

$$\Phi = \arctan D\omega_2^2 - E / (A\omega_2^2 + B\omega_2 + C)$$

Οι εξισώσεις των τάσεων του στάτη και ρότορα δίνονται από τις σχέσεις:

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d}{dt} \lambda_{\alpha s}$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d}{dt} \lambda_{\beta s}$$

$$0 = R_r i_{\alpha r} + \frac{d}{dt} \lambda_{\alpha r} + \omega_r \lambda_{\beta r}$$

$$0 = R_r i_{\beta r} + \frac{d}{dt} \lambda_{\beta r} - \omega_r \lambda_{\alpha r}$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{\tau_M} (T_e - T_{load})$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_p (\lambda_{\alpha s} i_{\beta s} - \lambda_{\beta s} i_{\alpha s})$$

$$\omega_{sr} = \omega_s \cdot R_2 \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \frac{e_{\beta r} \cdot i_{\beta s} + e_{\alpha r} \cdot i_{\alpha s}}{e_{\alpha r}^2 + e_{\beta r}^2}$$

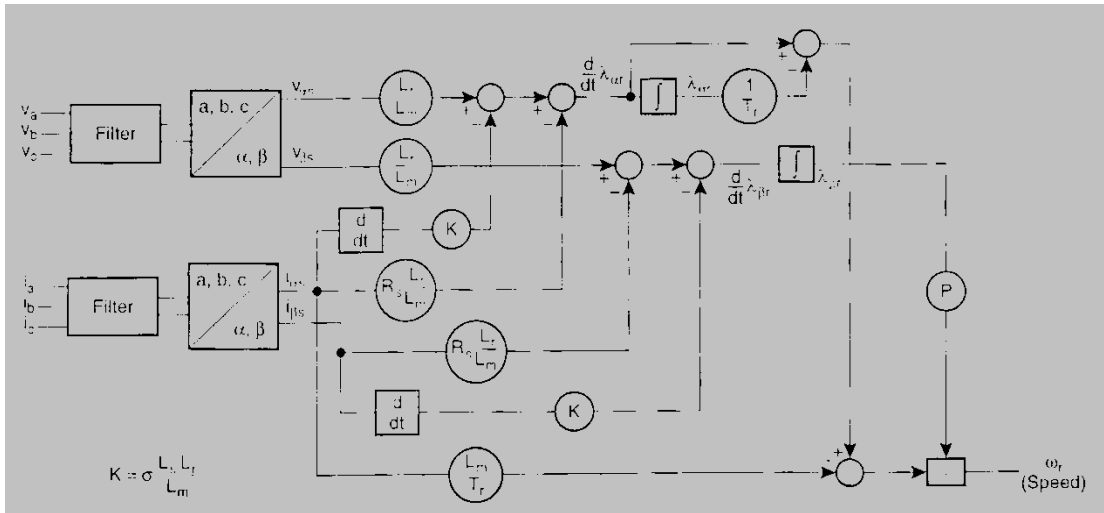
$$e_{\alpha r} = \frac{d}{dt} \lambda_{\alpha r} = \left(\frac{L_r}{L_m} v_{\alpha s} - R_s \frac{L_r}{L_m} i_{\alpha s} \right) - \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} \frac{d}{dt} i_{\alpha s}$$

$$e_{\beta r} = \frac{d}{dt} \lambda_{\beta r} = \left(\frac{L_r}{L_m} v_{\beta s} - R_s \frac{L_r}{L_m} i_{\beta s} \right) - \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} \frac{d}{dt} i_{\beta s}$$

$$\omega_r = \frac{1}{\lambda_{\beta r} \cdot P_p} \left[e_{\alpha r} - \lambda_{\alpha r} \frac{R_r}{L_r} + L_m \cdot \frac{R_r}{L_r} i_{\alpha s} \right]$$

Οι τέσσερις τελευταίες εξισώσεις είναι οι βασικές για την μέτρηση ολίσθησης από τις μετρούμενες ποσότητες του στάτη. Η ρύθμιση της συχνότητας στάτη με εσωτερικό βρόχο ελέγχου χωρίς τη χρήση ενός

εξωτερικού κωδικοποιητή φαίνεται στο σχήμα 37β όπου απεικονίζεται η μέθοδος του αριθμητικού υπολογισμού της ταχύτητας σαν επέκταση της προηγούμενης μεθόδου.

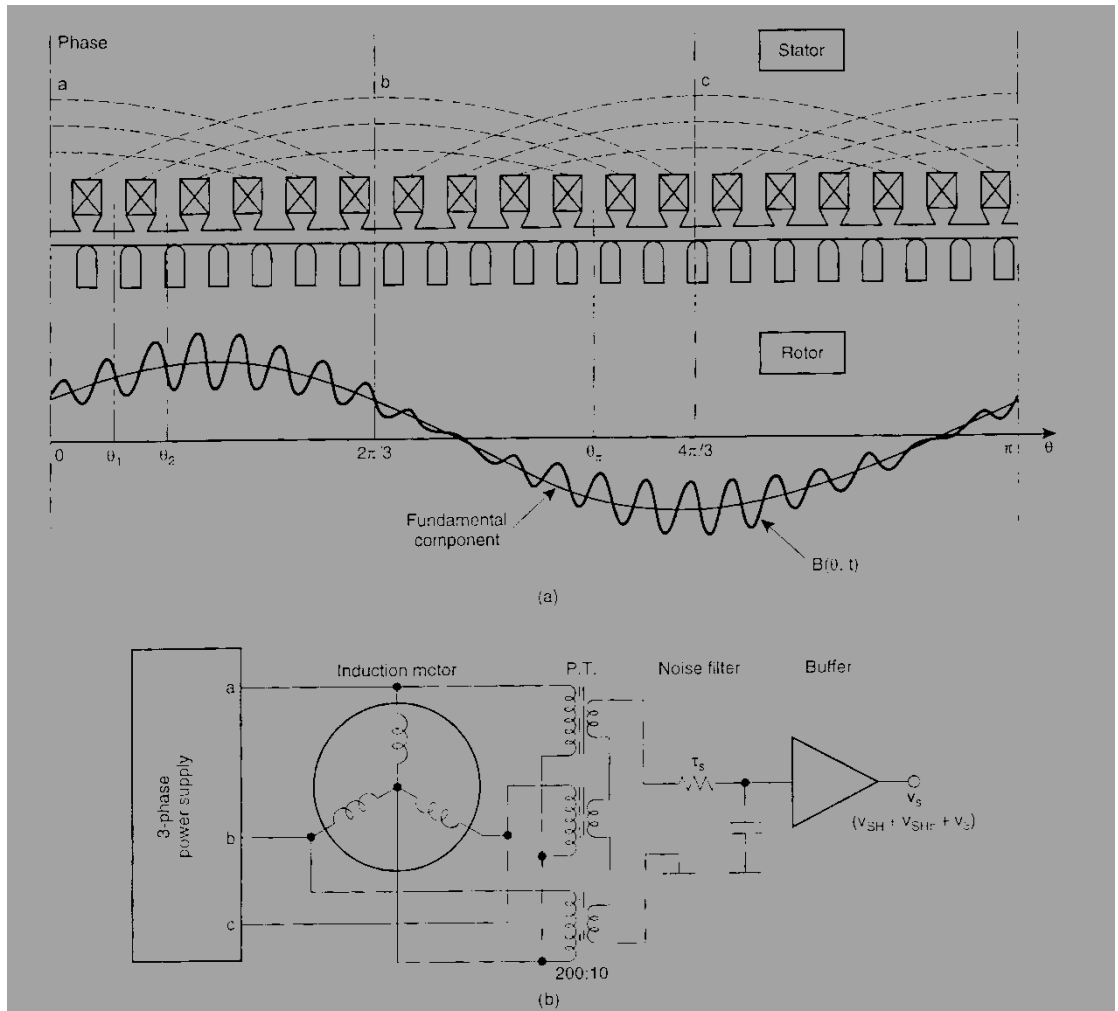


Σχήμα 37β

Η παρούσα μεθόδευση βασίζεται σε διανυσματικό έλεγχο στον οποίο η σύγχρονη ταχύτητα ρυθμίζεται με την ροπή παράγοντας ρεύματα που υπολογίζονται από τάσεις του στάτη και ρεύματα που παραθέτονται στο σχήμα.

3.3. Εκτίμηση βασισμένη στις ανώτερες αρμονικές τάσεις

Αυτή η μέθοδος παρουσιάζεται στο σχήμα 38

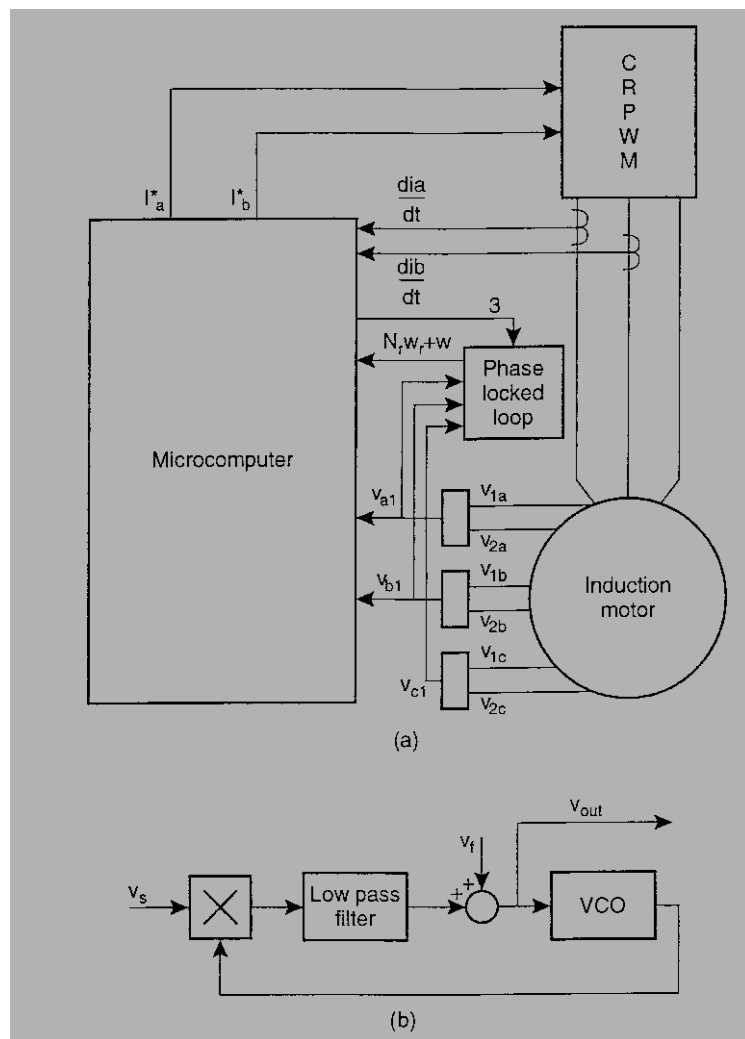


Σχήμα 38

Σε έναν κινητήρα επαγωγής τα αυλάκια στην επιφάνεια του στάτη και ο πυρήνας του ρότορα παράγουν αρμονικές στην ροή διακένου οι οποίες επάγουν τάση με αρμονικές αυλακίων που περιλαμβάνονται στην τάση στάτη.

Οι αρμονικές από τον δρομέα στο πεδίο διακένου ρυθμίζουν τη σύνδεση της ροής του στάτη με συχνότητα ανάλογη με την ταχύτητα του ρότορα

Η δομή διακένου και η κατανομή της ροής φαίνεται στο σχήμα 38α



Σχήμα 39

Η ταχύτητα μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας το μέγιστο της αρμονικής αφού αυτή σχετίζεται ευθέως με την ταχύτητα του ρότορα.

Η τάση του στάτη γενικά επάγει μόνο λίγα ποσοστά επί τοις εκατό από αρμονικές γι' αυτό πρέπει να αφαιρεθεί η βασική αρμονική από την καμπύλη της τάσης.

Το σχ. 38b δείχνει το κύκλωμα υπολογισμού της αρμονικής τάσης και το κύκλωμα υπολογισμού της ολίσθησης συχνότητας χρησιμοποιώντας τις αρμονικές.

Η ρύθμιση της τάσης ανάλογα με την ολίσθηση συχνότητας επιτυγχάνεται με την άθροιση των τριών φάσεων της τάσης του κινητήρα και χρησιμοποιείται για εκτίμηση ταχύτητας πάνω από τα 300 rpm.

Η 3^η αρμονική της συνολικής τάσης αφαιρείται με ένα κατάλληλο κύκλωμα παραγωγής σημάτων, το οποίο χρησιμοποιείται για τη λήψη της ταχύτητας από την ταχύτητα του ρότορα αλλά και από άλλους παράγοντες όπως το ρεύμα του ρότορα καθώς η συχνότητα είναι λιγότερο εξαρτημένη από άλλες παραμέτρους. Η λήψη της ταχύτητας βασίζεται στην συχνότητα της αρμονικής χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της τάσης, τα μεγέθη του ρότορα λαμβάνονται

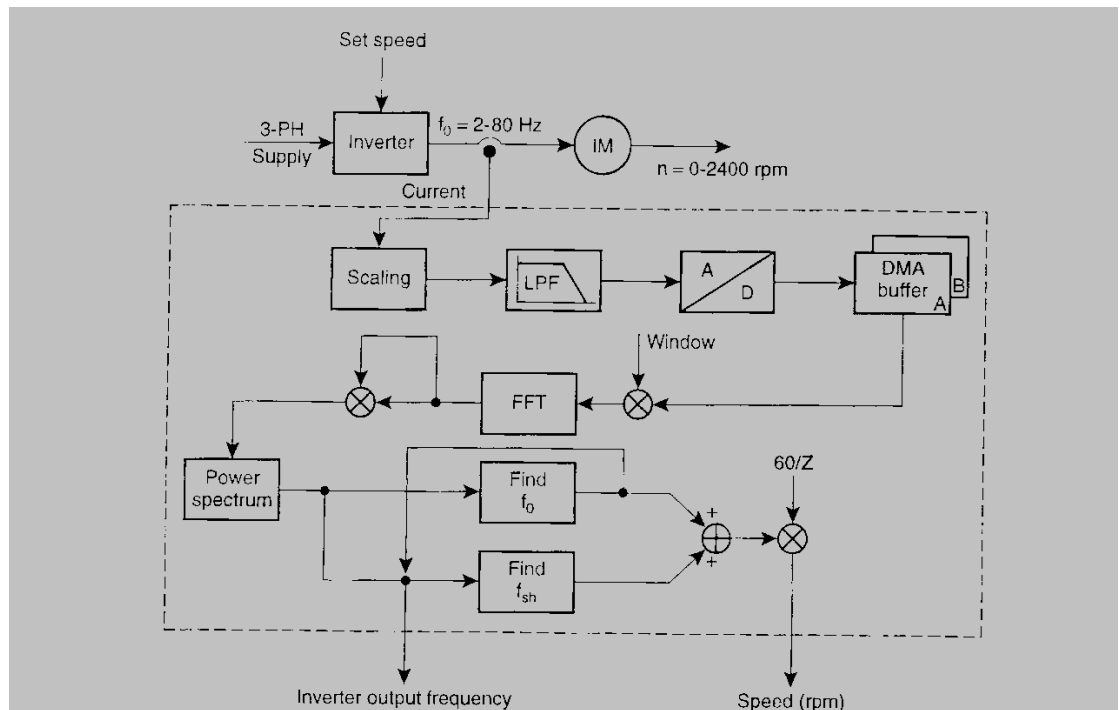
για να υπολογισθεί η ολίσθηση συχνότητας. Για να ληφθεί η συχνότητα χρησιμοποιούμε ένα βρόχο phase – locked. Το μπλοκ διάγραμμα της παραπάνω εφαρμογής φαίνεται στο σχήμα 39.

Ο έλεγχος της ταχύτητας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις ριπές των tapped windings από την μετακίνηση των αυλακιών του ρότορα διαμέσου της ροής για την εκτίμηση ταχύτητας.

Τα αυλάκια του ρότορα παράγουν στο διάκενο μόνιμα κύματα με χωρική κατανομή που εξαρτάται από τον αριθμό των αυλακιών του ρότορα. Αυτά τα κύματα αλληλεπιδρούν με την μαγνητεγερτική δύναμη του διάκενου η οποία προέρχεται από την ΜΕΔ στάτη και δρομέα.

Η ταχύτητα εκτιμάται από την ανάλυση (ανασύνθεση) του σήματος στάτη στις συνιστώσες αρμονικές για να καθορίσει την εξαρτημένα από την ταχύτητα, συχνότητα της αρμονικής αυλακιών, f_{sh} και την βασική ταχύτητα του κινητήρα f_o . Η ταχύτητα του ρότορα σε rpm είναι: $n = 60/z * (f_{sh} \pm F_o)$ όπου Z ο αριθμός των αυλακιών του ρότορα

Το απλοποιημένο διάγραμμα εντοπισμού ταχύτητας σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο φαίνεται στο σχήμα 40.



Σχήμα 40

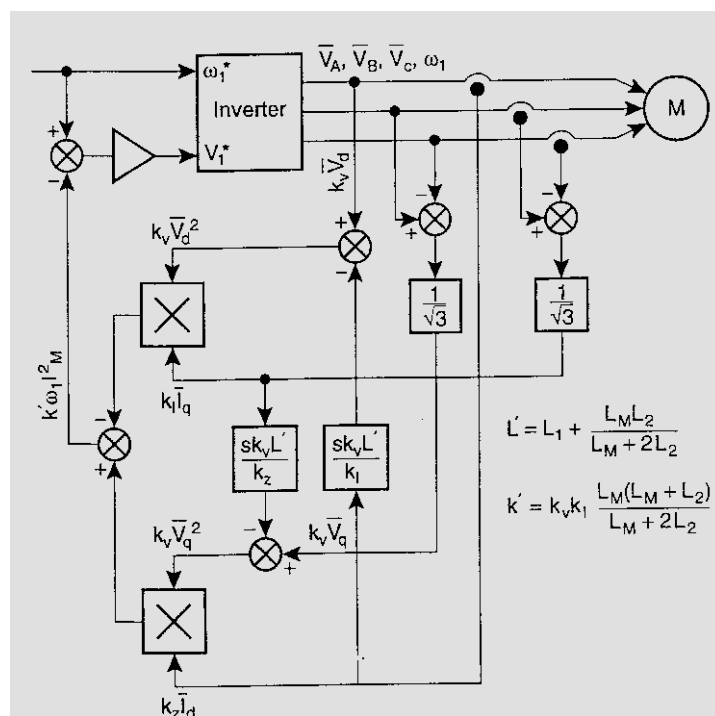
Η τεχνική βασίζεται στον μετασχηματισμό Fourier (FFT), όπου χρησιμοποιεί ένα προσέσορα ψηφιακού σήματος. Η εξαρτώμενη ταχύτητα από τις αρμονικές αυλακιών μπορεί να ληφθεί και να απομονωθεί από τις γειτονικές αρμονικές κάτω από οποιασδήποτε συνθήκη φορτίου και σε

μεγάλο εύρος ταχυτήτων, έτσι παρέχεται ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Το λάθος εκτίμησης ταχύτητας είναι ± 15 rpm και η εκτίμηση της μεθόδου είναι ικανοποιητική πάνω από 2 Hz. Οι αρμονικές αυλακίων και οι συχνότητες εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους όπως ο αριθμός των αυλακίων του ρότορα. Συνεπώς ο αλγόριθμος εκτίμησης μεθόδου πρέπει να αλλάζει σύμφωνα με τον τύπο της μηχανής. Έχει δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος στον οποίο καθορίζονται εξ' αρχής οι ειδικές παράμετροι της μηχανής και έτσι δεν επηρεάζονται οι αρμονικές από τις διάφορες παραμέτρους.

3.4. Εκτίμηση ροής και ρύθμιση διανύσματος ροής

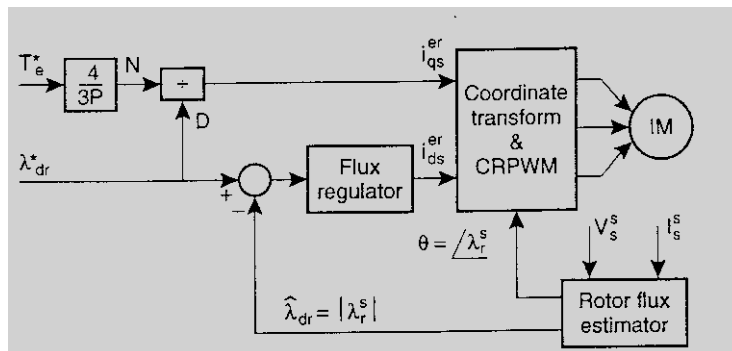
Στα συστήματα οδήγησης των κινητήρων επαγωγής γενικά η ροή διακένου καθορίζεται κοντά στην ονομαστική τιμή ούτως ώστε να δημιουργηθεί η μέγιστη ροπή, μεγάλη σταθερότητα, και γρήγορη αλλαγή απόκρισης. Για να διατηρηθεί σταθερή η ροπή η τάση που παρέχεται στον κινητήρα πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με τη

συχνότητα, ώστε το πηλίκο της να είναι σταθερό. Στο σχήμα 41 φαίνεται μία διαφορετική μέθοδος ρύθμισης της ροής.



Σχήμα 41

Εδώ, λαμβάνονται οι πληροφορίες για την ροή μέσω της σύνθεσης ενός σήματος που σχετίζεται με το ρεύμα μαγνήτισης. Το σύστημα βασίζεται στις εξισώσεις του κινητήρα κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η δυναμική και η ακρίβεια του συστήματος είναι αρκετά χαμηλές. Για να αποφευχθούν οι αισθητήρες θέσης και ροής χρησιμοποιούνται τα τερματικά μεγέθη του κινητήρα προς εκτίμηση της ροής του δρομέα. Το δομικό διάγραμμα του εκτιμητή της ροής δρομέα χωρίς αισθητήρες φαίνεται στο σχ. 42



Σχήμα 42

Η έξοδος του εκτιμητή ροής δρομέα χρησιμοποιείται για ρύθμιση ροής σε κλειστό βρόχο. Η ροή ρότορα εκτιμάται αφού υπολογισθεί πρώτα η ροή του στάτη η οποία δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\lambda_s = \int (V_s - R_s I_s) dt \quad \lambda_r = L_r/L_m (\lambda_s - \sigma L_s I_s)$$

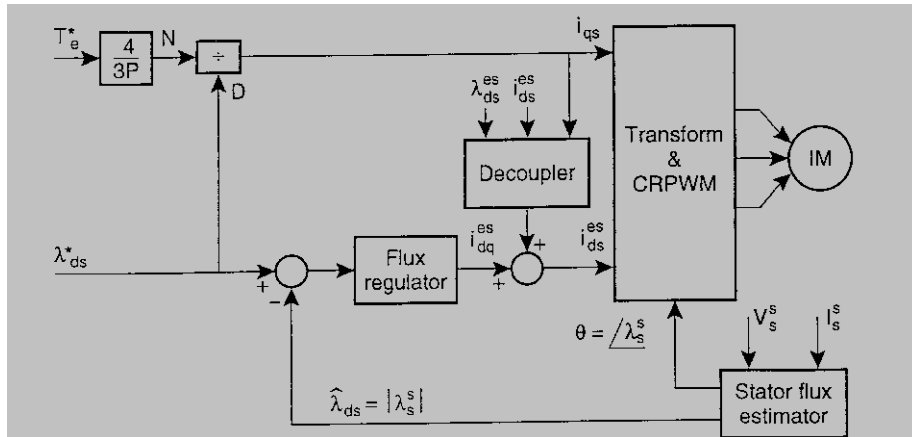
Όπου

λ_s : ροή στάτη

λ_r : ροή δρομέα

$\sigma = 1 - L_m^2/L_s L_r$ ολική σκέδαση

Η ακρίβεια της εκτίμησης της ροής ρότορα εξαρτάται από την ακρίβεια της εκτίμησης της αντίστασης και επαγωγής του στάτη. Ένα τυπικό δομικό διάγραμμα του προσανατολισμού ροής του στάτη φαίνεται στο σχ. 43



Σχήμα 43

Η αντίσταση μεταβάλλεται με την συχνότητα και θερμοκρασία. Η επαγωγική σκέδαση αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Η ροή του στάτη υπολογίζεται μόνο από τις ποσότητες που μετρώνται στην έξοδο του κινητήρα και από την αντίσταση του στάτη.

Η τάση ροτρά υπολογίζεται αφού εκτιμηθούν η σύγχρονη συχνότητα και η ολίσθηση συχνότητας. Η σύγχρονη συχνότητα.

$$\hat{\omega}_s = \frac{(v_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) \hat{\lambda}_{\alpha s} - (v_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) \hat{\lambda}_{\beta s}}{\hat{\lambda}_{\alpha s}^2 + \hat{\lambda}_{\beta s}^2}$$

Η συχνότητα ολίσθησης ω_{sr} μπορεί να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας την ροπή και τα ονομαστικά μεγέθη της μηχανής ή βασίζεται στις παραμέτρους του κινητήρα. Συνεπώς η ταχύτητα του ρότορα είναι $\omega_r = \omega_s - \omega_{sr}$.

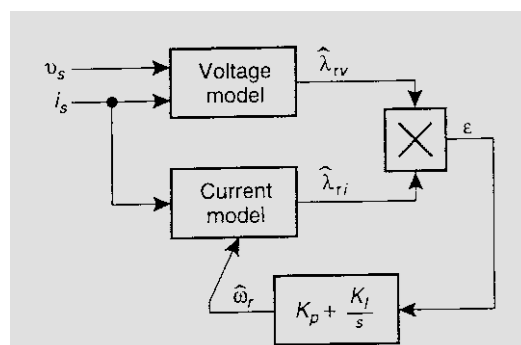
Στο σχ. 44 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα μιας άλλης μεθόδου κατά την οποία η ταχύτητα ροής ρότορα ελέγχεται από το ρεύμα (που παράγεται από τη ροπή).

Σε αυτό το σύστημα τα στιγμιαία μεγέθη ροής και ροπής υπολογίζονται μόνο από τις αρχικές τιμές. Μπορούν να ρυθμιστούν ευθέως και ανεξάρτητα επιλέγοντας μεταγωγικούς διακόπτες. Η επιλογή γίνεται έτσι ώστε να αποφευχθούν λάθη στην ροπή και ροή μέσω της υστέρησης, να δημιουργηθεί γρήγορα απόκριση ροπής και χαμηλές απώλειες αρμονικών.

Η έξοδος των ελεγκτών ροής δίνονται σε ένα κύκλωμα μεταγωγής για να δημιουργηθεί η κατάλληλη ρύθμιση .

3.6. Έλεγχος βασισμένος σε παρατηρητές

Για τους ελεγκτές της παρούσας παραγράφου πρέπει να γνωρίζεται επακριβώς η τιμή της ροής του ρότορα. Αυτή η ροή όμως δεν μπορεί να μετρηθεί κατευθείαν, για το λόγω αυτό έχουν αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι όπου εκτιμούν τη ροή ρότορα χρησιμοποιώντας διαφορούς τύπους παρατηρητών. Οι παρατηρητές αυτοί παίζουν βασικό ρόλο για τη δημιουργία σημείου αναφοράς της ροής ρότορα το οποίο απαιτείται για τον ευθύ μετασχηματισμό των συντεταγμένων. Εκτιμούν τις τιμές που δεν μπορούν να μετρηθούν μόνο μέσω των τερματικών ποσοτήτων του κινητήρα. Ένας απλός παρατηρητής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 46:



Σχήμα 46

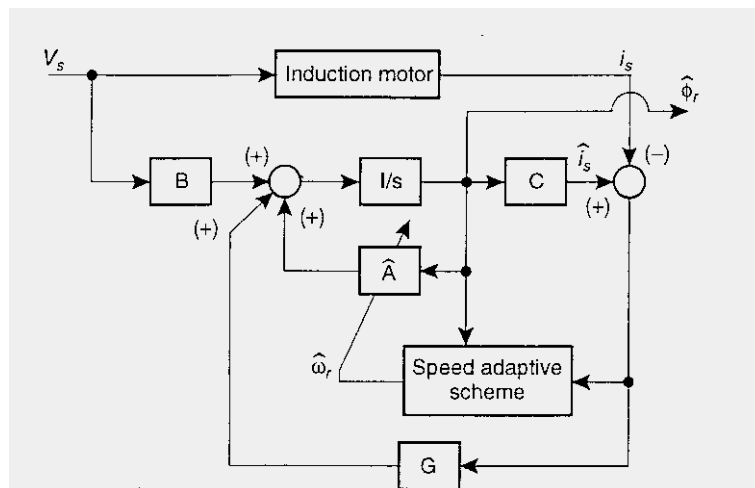
Η ροή υπολογίζεται από το μοντέλο τάσης και το μοντέλο ρεύματος. Οι εξισώσεις του μοντέλου τάσης και ρεύματος είναι:

$$p\hat{\lambda}_{rv} = \frac{L_r}{M} (v_s - R_s i_s - \sigma L_s p i_s)$$

$$p\hat{\lambda}_{ri} = \left(-\frac{1}{\tau_r} I_s + \omega_r J \right) \hat{\lambda}_{ri} + \frac{M}{\tau_r} i_s$$

Το μοντέλο τάσης δεν περιλαμβάνει την ταχύτητα του ρότορα ω_r , ενώ το μοντέλο ρεύματος την περιέχει. Η ταχύτητα υπολογίζεται από την διαφορά των 2 αυτών μοντέλων, όπως φαίνεται στο σχήμα 46.

Η ταχύτητα δίνεται από τον τύπο $\omega_r = (K_p + K_1/s) * \epsilon$ όπου ϵ το σφάλμα εξόδου. Ο ολοκληρωτής του σχήματος, λόγω προβλημάτων, αντικαθίσταται με ένα χαμηλοδιαβατό φίλτρο. Η ευαισθησία του παρατηρητή είναι υψηλή στις περιοχές χαμηλής ταχύτητας. Πρέπει να είναι ευαίσθητο στην μέτρηση του θορύβου, ειδικά στις χαμηλές ταχύτητες. Στο σχήμα 47 δίνεται το δομικό διάγραμμα του προσαρμογέα ταχύτητας.



Σχήμα 47

Η σχέση με την οποία γίνεται η εκτίμηση του ρεύματος στάτη και ροής ρότορα είναι

$$d_x/dt = A^{\wedge} x + B V_s + G(i_s^{\wedge} - i_s)$$

Όπου \wedge συμβολίζει τις ποσότητες που εκτιμούνται και G ο πίνακας του κέρδους του παρατηρητή.

Η εκτίμηση της ταχύτητας δίνεται

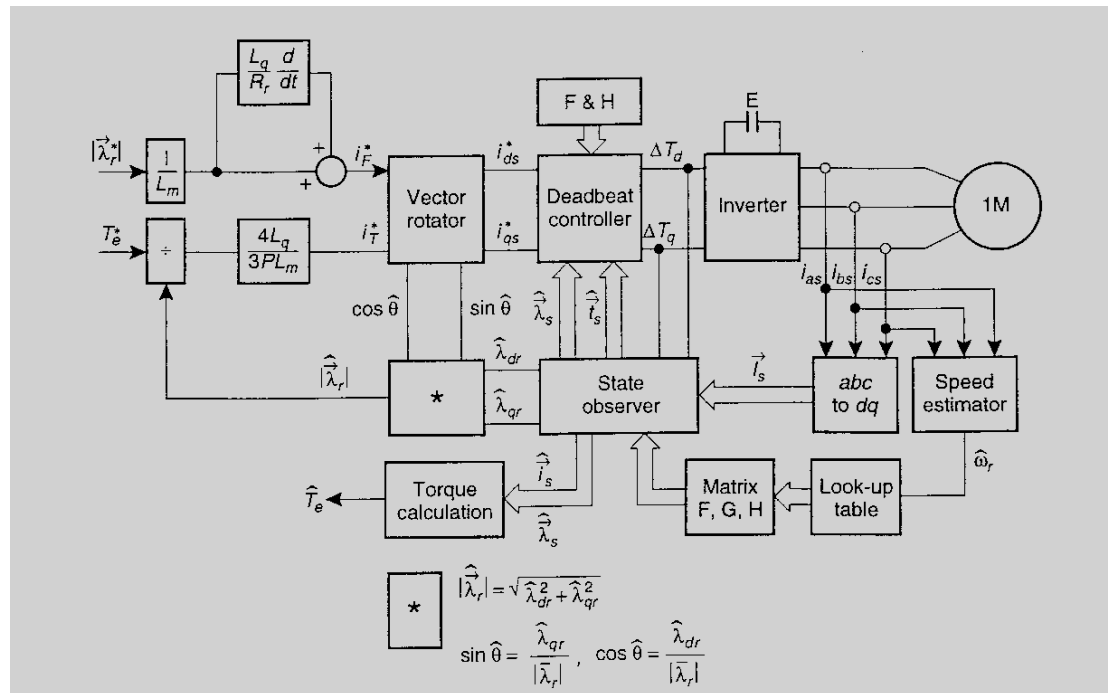
$$\hat{\omega}_r = K_p(\epsilon_{i_{\alpha s}} \hat{\lambda}_{\beta r} - \epsilon_{i_{\beta s}} \hat{\lambda}_{\alpha r}) + K_I \int (\epsilon_{i_{\alpha s}} \hat{\lambda}_{\beta r} - \epsilon_{i_{\beta s}} \hat{\lambda}_{\alpha r}) dt$$

$$\epsilon_{i_{\alpha s}} = i_{\alpha s} - \hat{i}_{\alpha s} \text{ and } \epsilon_{i_{\beta s}} = i_{\beta s} - \hat{i}_{\beta s}$$

Όπου K_p, K_I τα θετικά κέρδη

Το γενικό πρόβλημα με τον παρατηρητή ροής δημιουργείται λόγω των διακυμάνσεων στις παραμέτρους.

Ένα άλλο μοντέλο είναι αυτό του σχήμα 48 είναι ένας ελεγκτής προσανατολισμού πεδίου ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνική dead beat control.



Σχήμα 48

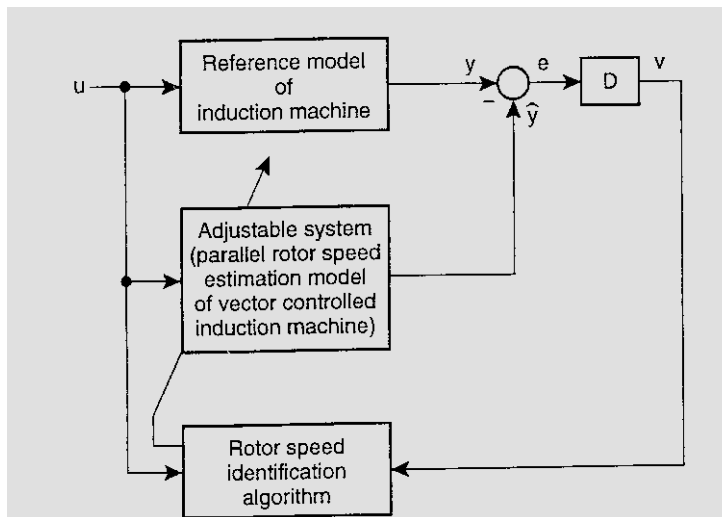
Η dead beat τεχνική είναι ένας τύπος ελέγχου της ταχύτητας.

Είχε δεχθεί ότι η dead beat control δεν επηρεάζεται από την αλλαγή της αντίστασης ρότορα. Πρώτα, η ροή του στάτη εκτιμάται για να ταυτοποίηση την ταχύτητα του ρότορα με χαμηλή ευαισθησία στις διακυμάνσεις των παραμέτρων. Βασισμένος στην εκτίμηση ταχύτητας ο παρατηρητής εκτιμά την ροή του ρότορα με χαμηλή ευαισθησία στην διακύμανση των παραμέτρων σε σχέση με το συμβατικό ελεγκτή ολίσθησης συχνότητας.

Τελικά χρησιμοποιώντας τον έλεγχο προσανατολισμού πεδίου, η τεχνική dead beat χρησιμεύει για την ρύθμιση του ρεύματος στάτη δίνοντας λύση στις χαμηλές ριπές σε ρεύμα και ροπή με σχετικά χαμηλή συχνότητα. Το λειτουργικό διάγραμμα του ελεγκτή ταχύτητας χωρίς αισθητήρες βασίζεται στον προβλέψιμο παρατηρητή με dead beat απόκριση στο ρεύμα στάτη φαίνεται στο σχήμα 48.

3.7. MRAS, Model Reference Adaptive Systems

Στα MRAS πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των εξόδων από δυο εκτιμητές. Ο εκτιμητής που δεν περιλαμβάνει τις ποσότητες που θέλουμε να εκτιμηθούν, στην παρούσα περίπτωση η ταχύτητα του ρότορα, θεωρείται σαν μοντέλο αναφοράς του κινητήρα. Ο δεύτερος εκτιμητής, που περιλαμβάνει τις ποσότητες που θέλουμε να εκτιμηθούν, θεωρείται σαν ρυθμιστικό μοντέλο. Το σφάλμα μεταξύ των δύο εκτιμητών χρησιμοποιείται για να μοιράσει ένα κατάλληλο προσαρμογέα μηχανισμό ο οποίος παράγει την υπολογισμένη ταχύτητα του ρότορα για το ρυθμιστικό μοντέλο. Ένα σχηματικό διάγραμμα για τον παράλληλο mode adaptive ρυθμιστή φαίνεται στο σχήμα 49

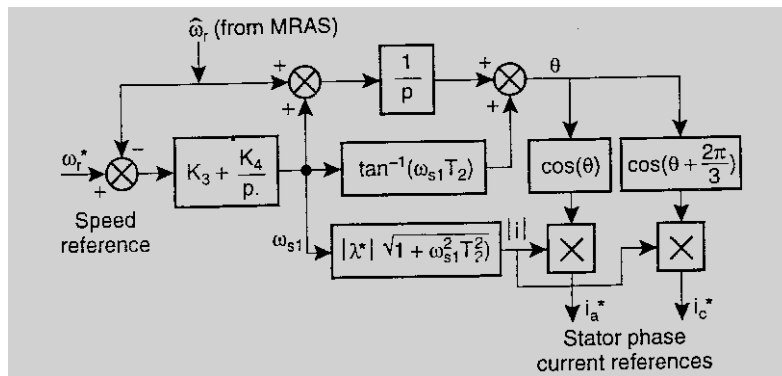


Σχήμα 49

Το μοντέλο αναφοράς είναι ένας κινητήρας επαγωγής και το ρυθμιζόμενο μοντέλο μπορεί να είναι ένας vector controller κινητήρας επαγωγής στον οποίο η ταχύτητα ρότορα αναφέρεται ως παράμετρος. Όταν η ταχύτητα ρότορα που πρέπει να εκτιμηθεί αλλάζει στο ρυθμιζόμενο μοντέλο με τέτοιο τρόπο ώστε η διαφορά μεταξύ εξόδου του μοντέλου αναφοράς και της εξόδου του ρυθμιζόμενου μοντέλου να είναι μηδενική, η εκτιμώμενη ταχύτητα ρότορα μπορεί να είναι ίδια με την ταχύτητα ρότορα στην πράξη.

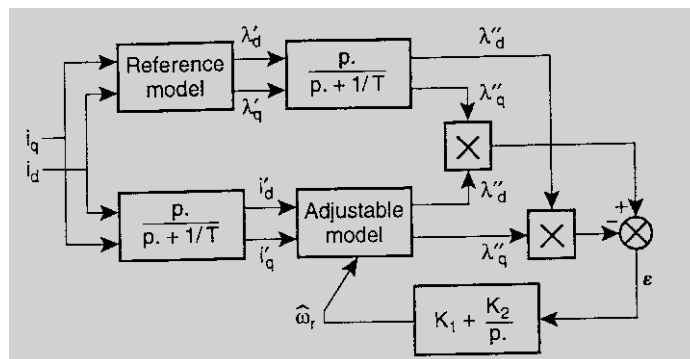
Το σήμα σφάλματος ενεργοποιεί τον αλγόριθμο ταυτοποίησης της ταχύτητας ρότορα, ο οποίος κάνει το σφάλμα να τείνει ασυμπτωτικά προς το μηδέν. Ο ταυτοποιητής της ταχύτητας ρότορα είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη και σταθερή απόκριση.

Στο σχήμα 50 φαίνεται το σύστημα vector control που χρησιμοποιεί ο MRAS.



Σχήμα 50

Έχουν δημιουργηθεί δύο ανεξάρτητοι παρατηρητές όπου η ροή του ρότορα συγκρίνεται για να δημιουργήσει το σφάλμα από το οποίο θα εκτιμηθεί η ταχύτητα ρότορα. Ο ένας παρατηρητής περιέχει την ποσότητα ω_r δηλαδή είναι το μοντέλο αναφοράς. Στο σχ. 51 φαίνεται ένα τροποποιημένο μοντέλο όπου χρησιμοποιείται για να λύσει τα προβλήματα που παρουσιάζει το προηγούμενο από διάφορες εσωτερικές καταστάσεις.



Σχήμα 51

Τοποθετείται και στα δύο μοντέλα ένας γραμμικός πίνακας μεταφοράς. Όμως η απόδοση του συστήματος σε ταχύτητα κοντά στο μηδέν δεν είναι ικανοποιητική. Για να λαμβάνονται υπόψη οι διακυμάνσεις των παραμέτρων, οι παράμετροι του κινητήρα μετρώνται αυτόματα όταν ο οδηγός είναι στη στάση μέσω των ρευμάτων που προκαλούν στατικά ή παλλόμενα πεδία οπότε δεν παράγουν ροπή αλλά δίνουν πληροφορίες για τις παραμέτρους του κινητήρα. Η ταχύτητα ρότορα που εκτιμάται δίνεται από τη σχέση

$$\hat{\omega}_r = \left(K_p + \frac{K_I}{p} \right) (\hat{e}_m \otimes e_m)$$

Όπου $p=d/dt$

και \otimes

συμβολίζει εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων.

Γενικά όλα τα MRAS μοντέλα χρησιμοποιούν την εξής εξίσωση για την εκτίμησης ρότορα

$$\hat{\omega}_r = K_p(\varepsilon_\beta \tilde{\varepsilon}_\alpha - \varepsilon_\alpha \tilde{\varepsilon}_\beta) + K_I \int_0^T (\varepsilon_\beta \tilde{\varepsilon}_\alpha - \varepsilon_\alpha \tilde{\varepsilon}_\beta) dt$$

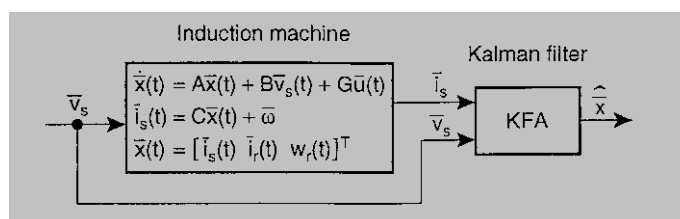
Όπου K_p, K_I τα κέρδη προσαρμογής

$\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$ οι έξοδοι των μοντέλων αναφοράς

$\tilde{\varepsilon}_\alpha, \tilde{\varepsilon}_\beta$ οι έξοδοι των μοντέλων ρύθμισηςόπως η ροή, η μετρούμενη ηλεκτρομαγνητική δύναμη κ.α

3.8. Ταυτοποίηση ταχύτητας με τη χρήση φίλτρου Kalman

Το Kalman φίλτρο χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την ταχύτητα και την ροή του ρότορα ενός κινητήρα επαγωγής, βασισμένο στο ρεύμα στάτη και στην dc τάση. Η τεχνική αυτή βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο του κινητήρα επαγωγής. Το φίλτρο Kalman παρέχει παρατηρήσεις από σήματα που προέρχονται από τυχαίους θορύβους. Υπολογίζει αποδοτικά on line την ταχύτητα και θέση του ρότορα. Αυτό επιτυγχάνεται από τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα επαγωγής. Η ταχύτητα ρότορα υπολογίζεται από τις μετρούμενες τάσεις και ρεύματα που συμβολίζονται $v_\alpha, v_\beta, i_\alpha, i_\beta$ και μέσω των εξισώσεων υπολογίζεται η ταχύτητα ρότορα. Το δομικό διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 52.



Σχήμα 52

Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται σε δύο βήματα

- α) πρόβλεψη
- β) φιλτράρισμα .

Η πρόβλεψη γίνεται από το K^+ στο $(K+1)^-$ ενώ το φίλτρο από $(K+1)^-$ ως $(K+1)^+$

Το μέρος πρόβλεψης του αλγορίθμου υπολογίζει τις επόμενες τιμές εκτίμησης για χ και τον πίνακα συνδιακύμανσης P , πριν γίνει η νέα μέτρηση. Στη συνέχεια η πρόβλεψη χρησιμοποιεί τις εξισώσεις μεταβατικής κατάστασης τον πίνακα μεταβατικής κατάστασης, τον πίνακα διαταραχής συνδιακύμανσης Q και την μετρούμενη συνδιακύμανση R . Η παράμετρος κατάστασης και η έξοδος του μοντέλου δίνονται από τις εξισώσεις:

$$X(K+1) = f[X(K), K] + G(K) W_{(K)}$$

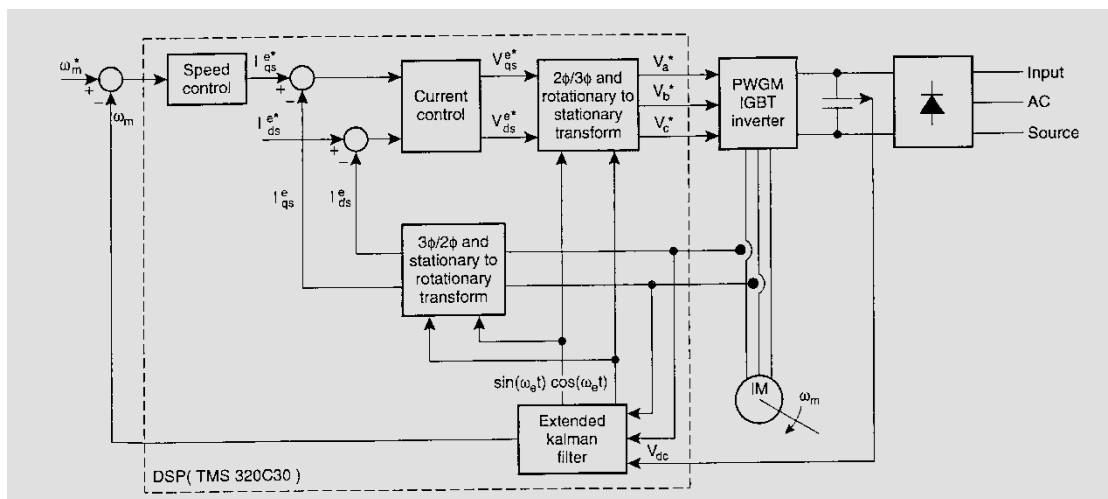
$$Y(K) = H(K) X_{(K)} + V_{(K)}$$

Όπου G μετρούμενος πίνακας του θορύβου
 W πίνακας θορύβου του μοντέλου κατάστασης
 V πίνακας θορύβου της εξόδου.

Η ταχύτητα του ρότορα εκτιμάται από τον ακόλουθο αλγόριθμο του Kalman φίλτρου:

1. Εκτίμηση της μήτρας συνδιακύμανσης σφάλματος
2. Υπολογισμός του κέρδους του φίλτρου
3. Ενημέρωση της μήτρας διακύμανσης σφάλματος
4. Εκτίμηση κατάστασης

Το δομικό διάγραμμα του φίλτρου δίνεται στο σχήμα 53



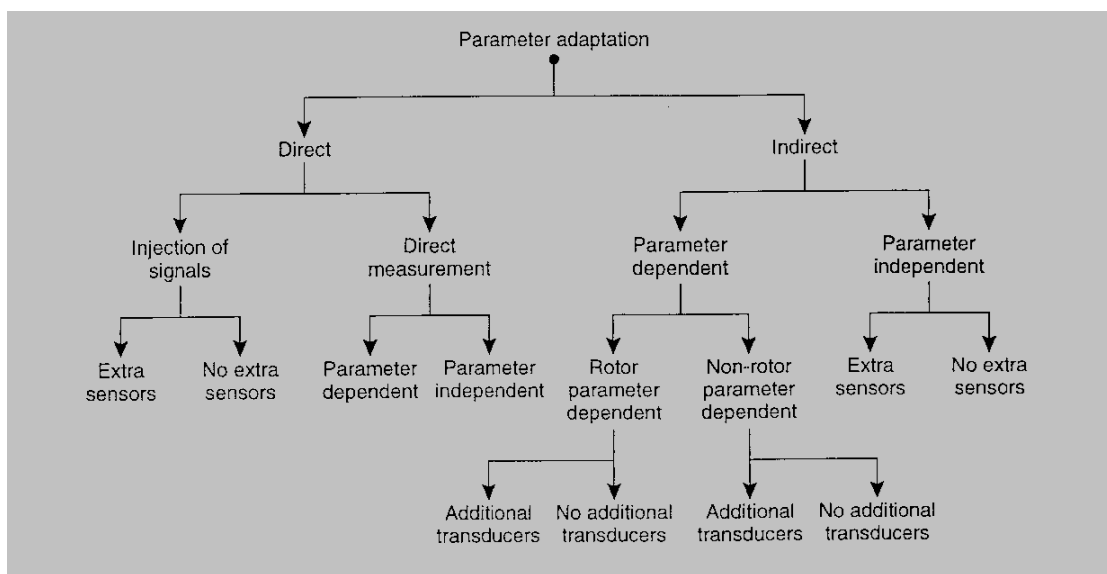
Σχήμα 53

Η γωνία της ροής ρότορα για την μετατροπή μεταξύ μιας στατικής κατάστασης αναφοράς και της σύγχρονης περιστροφής κατάστασης μεταφοράς πραγματοποιείται από το φίλτρο. Το κρίσιμο σημείο για τη σχεδίαση του φίλτρου είναι να διαλέξουμε τις καταλληλότερες τιμές για να

γίνουν οι σωστότερες εκτιμήσεις. Η μέθοδος του Kalman φίλτρου είναι πολύ αποδοτική και τα αποτελέσματα της εξαρτώνται από την ακρίβεια των παραμέτρων του μοντέλου και του κινητήρα.

3.9. Μοντέλο ελέγχου ταχύτητας χωρίς αισθητήρες με προσαρμογή παραμέτρων

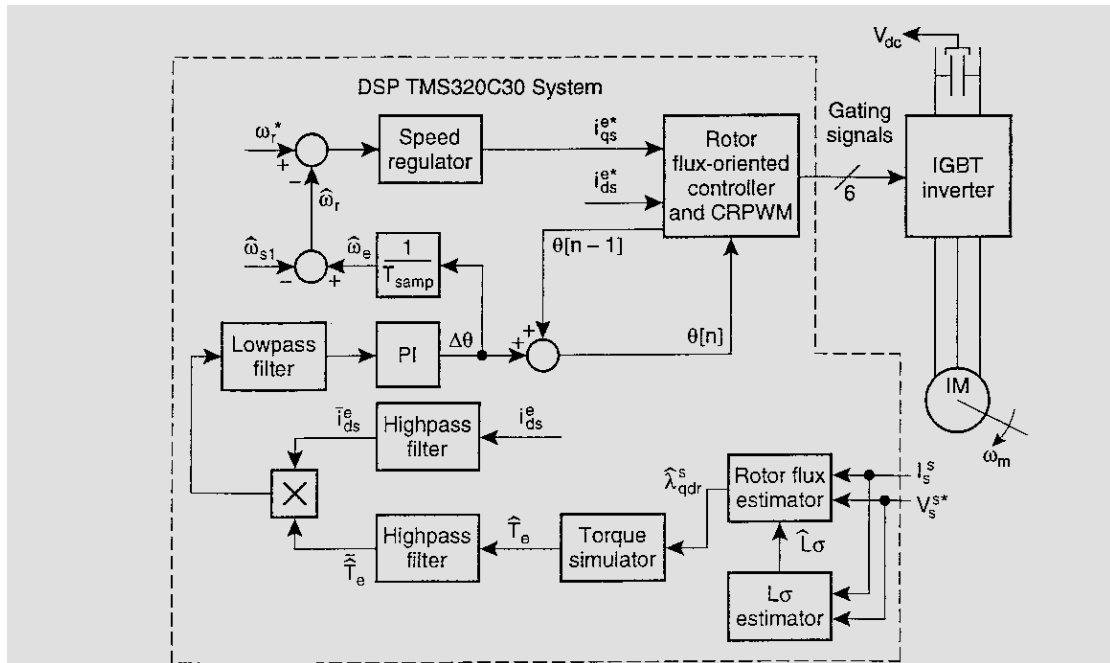
Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της έμμεσης μεθόδου για τον έλεγχο προσανατολισμού πεδίου είναι ότι οι παράμετροι της μηχανής είναι αλληλοεξαρτώμενες καθώς και οι πληροφορίες από την ροή αποκτώνται βασισμένη στο μοντέλο της επαγωγικής μηχανής. Οι παράμετροι της μηχανής επηρεάζονται από την θερμοκρασία, τα επίπεδα κορεσμού, και τη συχνότητα λειτουργίας. Η εξάρτηση της ρύθμισης της ροής από τις παραμέτρους του κινητήρα έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται λάθη στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας και αλλαγές στην ημιτονοειδή καμπύλη της ροπής και ροής. Για να αντισταθμιστούν τα παραπάνω αποτελέσματα γίνονται κάποιες προσαρμογές στις παραμέτρους του κινητήρα. Οι προσαρμογές αυτές κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το παρακάτω σχηματικό διάγραμμα σχ. 54



Σχήμα 54

Η προσαρμογή παραμέτρων σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα γίνεται αρχικά σε άμεσο και έμμεσο τρόπο. Στον άμεσο τρόπο οι παράμετροι μετρώνται είτε από ένα εξωτερικό σήμα είτε απ' ευθείας μέτρηση των συγγενών παραμέτρων. Τα εξωτερικά σήματα μπορούν να ληφθούν με έξτρα αισθητήρες ή χωρίς. Οι μετρήσεις των παραμέτρων μπορεί να είναι εξαρτώμενες ή μη εξαρτώμενες από άλλες παραμέτρους. Στον έμμεσο τρόπο μετρώνται παράμετροι εξαρτώμενες από άλλες. Οι εξαρτημένες μπορεί να εξαρτώνται από τον ρότορα ή όχι και να λαμβάνονται από μετατροπείς ή

χωρίς μετατροπείς. Οι μη εξαρτώμενες παράμετροι μπορεί να λαμβάνονται από έξτρα αισθητήρες ή χωρίς έξτρα αισθητήρες.



Σχήμα 55

Στο σχήμα 55 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα ενός ελεγκτή χωρίς αισθητήρες του κινητήρα επαγωγής όπου χρησιμοποιεί ρεύματα μεγάλης συχνότητας. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν ελεγκτή ταχύτητας, έναν ελεγκτή ρεύματος, έναν εκτιμητή ροής και έναν εκτιμητή γωνίας ρότορα. Επίσης δεν χρησιμοποιεί καμιά παράμετρο του κινητήρα πράγμα που το κάνει εύρωστο στην διακύμανση των παραμέτρων και ανεξάρτητο από τις διακυμάνσεις φορτίου. Ένα υψηλής συχνότητας ρεύμα λαμβάνεται από τον d άξονα και υπολογίζεται η γωνία $\Delta\theta$ μεταξύ του ανύσματος αναφοράς και του διανύσματος της ροής του ρότορα. Η γωνία του ρότορα για κάθε στιγμή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \Delta\theta$$

Ακόμη λόγω ότι η συχνότητα του ρεύματος είναι υψηλή δεν επηρεάζεται η ροή του κινητήρα, επηρεάζεται όμως η ροπή του. Η παραπάνω μέθοδος μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες.

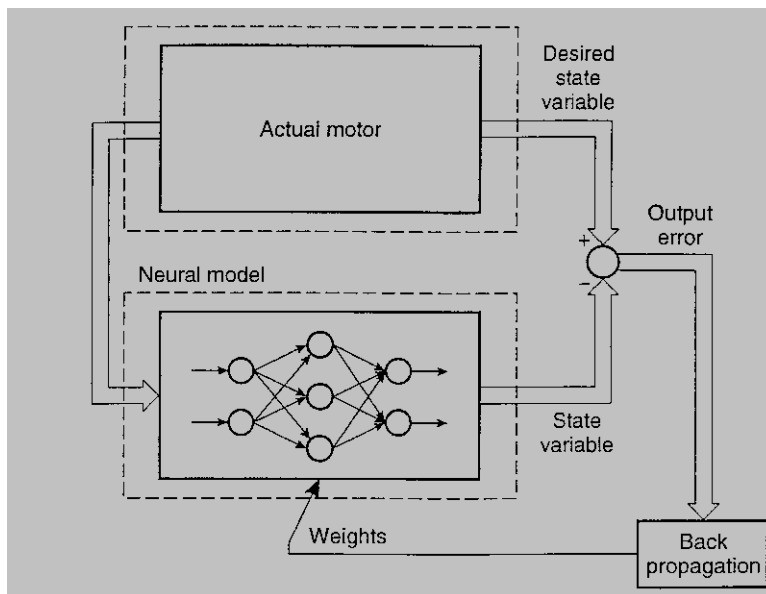
3.10. Εκτίμηση βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν το πλεονέκτημα ότι ο παράλληλος υπολογισμός μπορεί να γίνει πολύ γρήγορα και έχει μεγάλη ανοχή λάθους.

Το πιο ευρέως διαδεδομένο νευρωνικό δίκτυο είναι το πολυεπίπεδο με προσωτροφοδότηση, κατά το οποίο δεν ανατροφοδοτείται καμία πληροφορία κατά την διάρκεια της επεξεργασίας. Η ανατροφοδότηση γίνεται μόνο κατά την διάρκεια της λειτουργίας του νευρωνικού δικτύου. Αυτή η διαδικασία είναι γενικά αργή και χρονοβόρα καθώς ο αλγόριθμος χρειάζεται αρκετή ώρα για να συγκλίνει.

Στο σχήμα 56 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός νευρωνικού δικτύου δύο επιπέδων για την εκτίμηση ταχύτητας βασισμένο στην τεχνική back – propagation. Από την έξοδο του κινητήρα λαμβάνουμε τη ζητούμενη τιμή της μεταβλητής και από την έξοδο του νευρωνικού δικτύου λαμβάνουμε την εκτίμηση της μεταβλητής, αυτές οι δύο συγκρίνονται και λαμβάνουμε το σφάλμα εξόδου . Σε αυτό γίνεται η τεχνική back – propagation για να ρυθμίσει τα βάρη ώστε να ληφθεί η ζητούμενη τιμή της ταχύτητας.

Γενικά η τεχνική των νευρωνικών δικτύων μπορεί να είναι ιδανική για ρύθμιση ταχύτητας σε κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 56

3.11. Συμπεράσματα

Κατά την μέθοδο ελέγχου των κινητήρων επαγωγής χωρίς αισθητήρες οι πληροφορίες για την ταχύτητα του συνάγονται από μετρούμενες τιμές των τάσεων στάτη και των ρευμάτων. Η πλειοψηφία των μεθόδων αναγνώρισης ταχύτητας βασίζεται στα εκτιμώμενα θεμελιώδη μεγέθη του κινητήρα. Οι παράμετροι αυτοί του κινητήρα επηρεάζονται από την θερμοκρασία, από τα επίπεδα κορεσμού και την συχνότητα λειτουργίας. Η εξάρτηση της ρυθμιζόμενης ροής από τις παραμέτρους της μηχανής προκαλεί λάθη στην μόνιμη κατάσταση και αυξομειώσεις στην ροή και ροπή. Για να αντιμετωπιστούν οι διακυμάνσεις αυτές των παραμέτρων έχουν αναπτυχθεί διάφορα κυκλώματα προσαρμογής τους. Η καλύτερη στρατηγική για έλεγχο χωρίς αισθητήρες είναι αυτή που θα παρέχει τις πληροφορίες της ταχύτητας και τη ρύθμιση της ταχύτητας με ακρίβεια 0,5 % ή και καλύτερη, από μηδενική ταχύτητα στην υψηλότερη, κάτω από όλες τις συνθήκες λειτουργίας και λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση από τις μεταβολές παραμέτρων και από τα επίπεδα κορεσμού.

Προς το παρόν πολλές έρευνες γίνονται στο πεδίο των νευρωνικών δικτύων για την επίτευξη καλύτερων μεθόδων που θα λαμβάνουν υπόψη τις διακυμάνσεις των παραμέτρων και τη μη γραμμικότητα των χαρακτηριστικών του κινητήρα. Οι γρήγοροι ψηφιακή επεξεργαστές σήματος έχουν καταστήσει δυνατό να γίνουν γραμμικές η ταχύτητα και άλλες παράμετροι όπως η ροπή και ροή. Επίσης οι έρευνες συνεχίζονται για την ανάπτυξη καλύτερων και ακριβέστερων μεθόδων στα πεδία των εκτιμητών ταχύτητας, υπολογισμού ροής ρότορα και άμεσο έλεγχο ροπής των κινητήρων επαγωγής.

Γενικά οι ψηφιακοί μετατροπείς, τα νευρωνικά δίκτυα, η ψηφιακή λογική θα συνεισφέρουν στην ανάπτυξη μεθόδων με μεγαλύτερη αξιοπιστία, λειτουργία κάτω από όλες τις συνθήκες και βέβαια με χαμηλότερο οικονομικό κόστος, στον τομέα του ελέγχου χωρίς αισθητήρες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΩΡΙΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΔΙΟ (FOC)

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των 5 μεθόδων που χρησιμοποιούν την τεχνική ελέγχου με προσανατολισμό ως προς το πεδίο, οι οποίες αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο , δηλαδή:

- α) Μέθοδος εκτίμησης ταχύτητας, SE
- β) Μοντέλο με προσαρμογή παραμέτρων MRAS
- γ) Μοντέλο παρατηρητή ταχύτητας, LSO
- δ) Φίλτρο Kalman, EKF
- ε) Μέθοδος των ριπών αυλακίων ρότορα, RSR

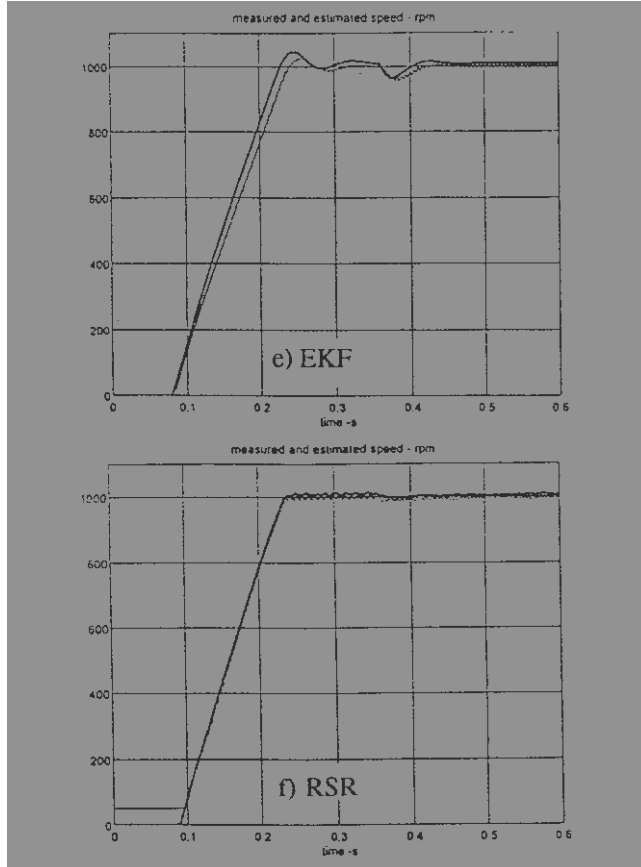
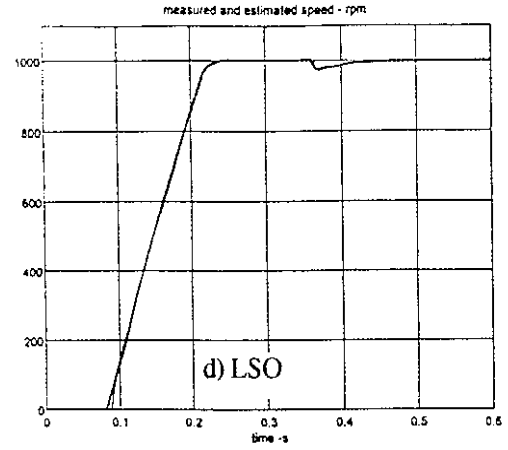
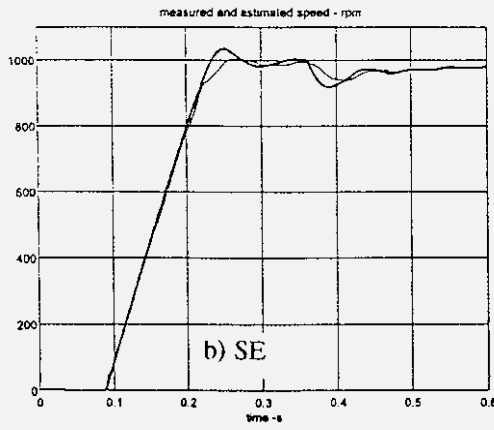
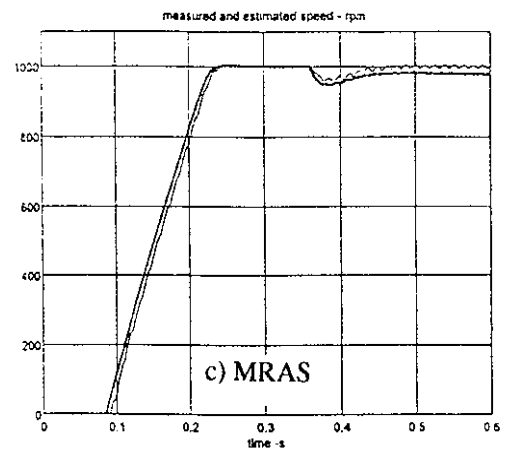
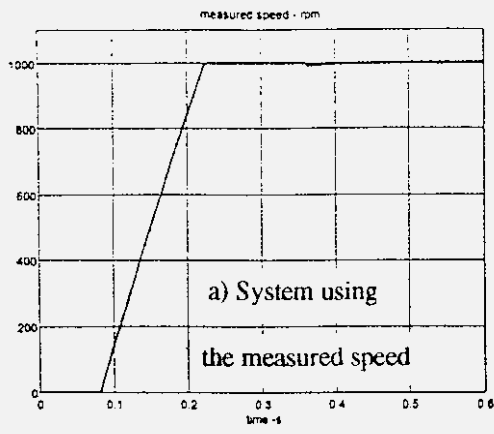
Η Σύγκριση γίνεται προσομοιώνοντας τα παραπάνω μοντέλα και λαμβάνοντας τις γραφικές παραστάσεις ταχύτητας σε σχέση με το χρόνο για τα παρακάτω πειράματα:

- Σφάλμα κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
- Δυναμική απόκριση στην βηματική μεταβολή ταχύτητας και στην βηματική μεταβολή της ροπής
- Χαμηλές ταχύτητες
- Αύξηση της αντίστασης του δρομέα
- Εισαγωγή λευκού θορύβου

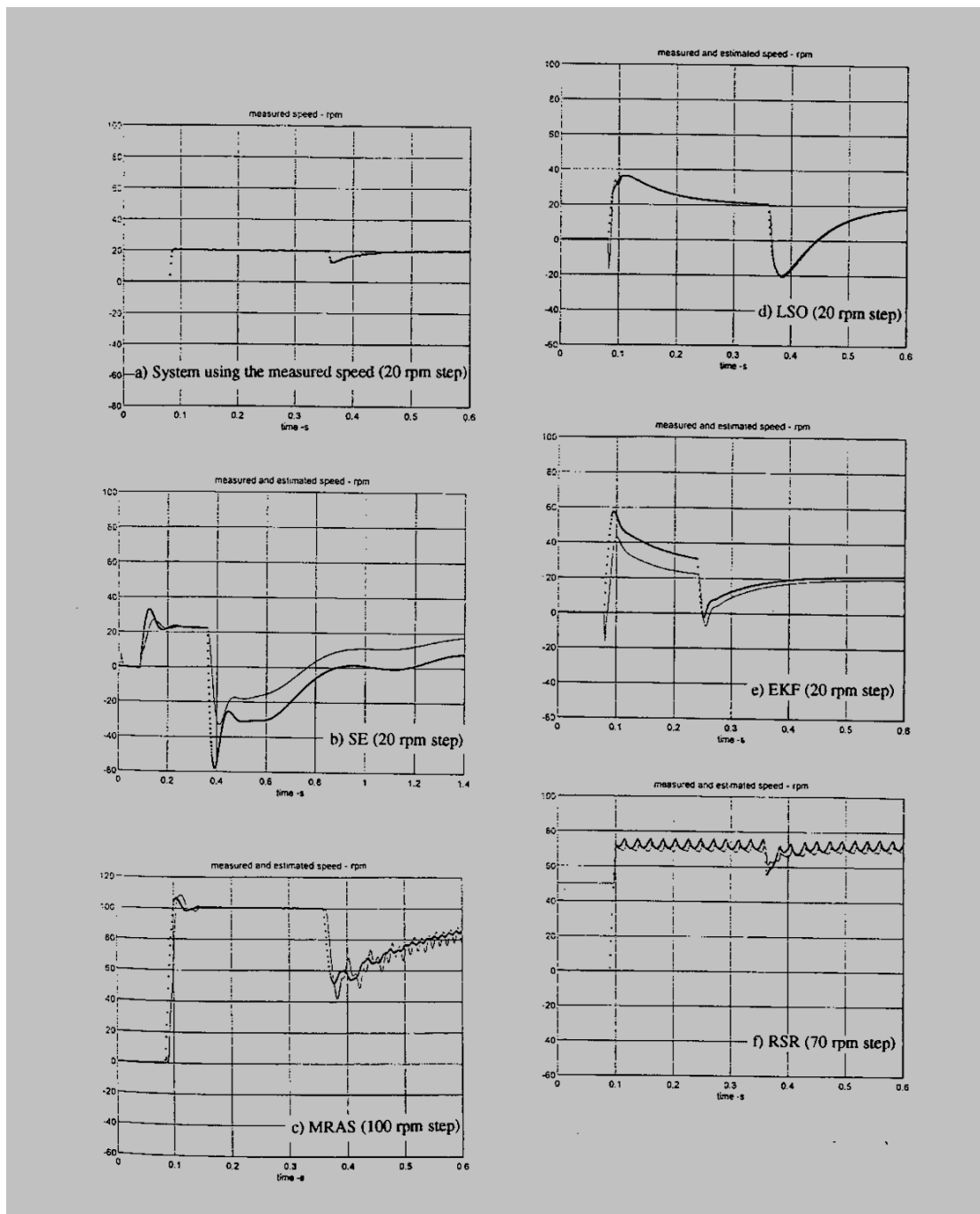
Η πρώτη προσομοίωση γίνεται για βηματική μεταβολή της ταχύτητας στα 1000rpm και η ροπή φορτίου αλλάζει μετά από χρόνο 0,36sec.

Στο πρώτο σχηματικό διάγραμμα φαίνεται η συμπεριφορά του συστήματος στις παραπάνω μεταβολές στο b σχηματικό διάγραμμα απεικονίζεται με έντονη γραμμή η πραγματική ταχύτητα και με λεπτή γραμμή η εκτιμώμενη για τις παραπάνω συνθήκες στο μοντέλο του εκτιμητή ταχύτητας, SE.

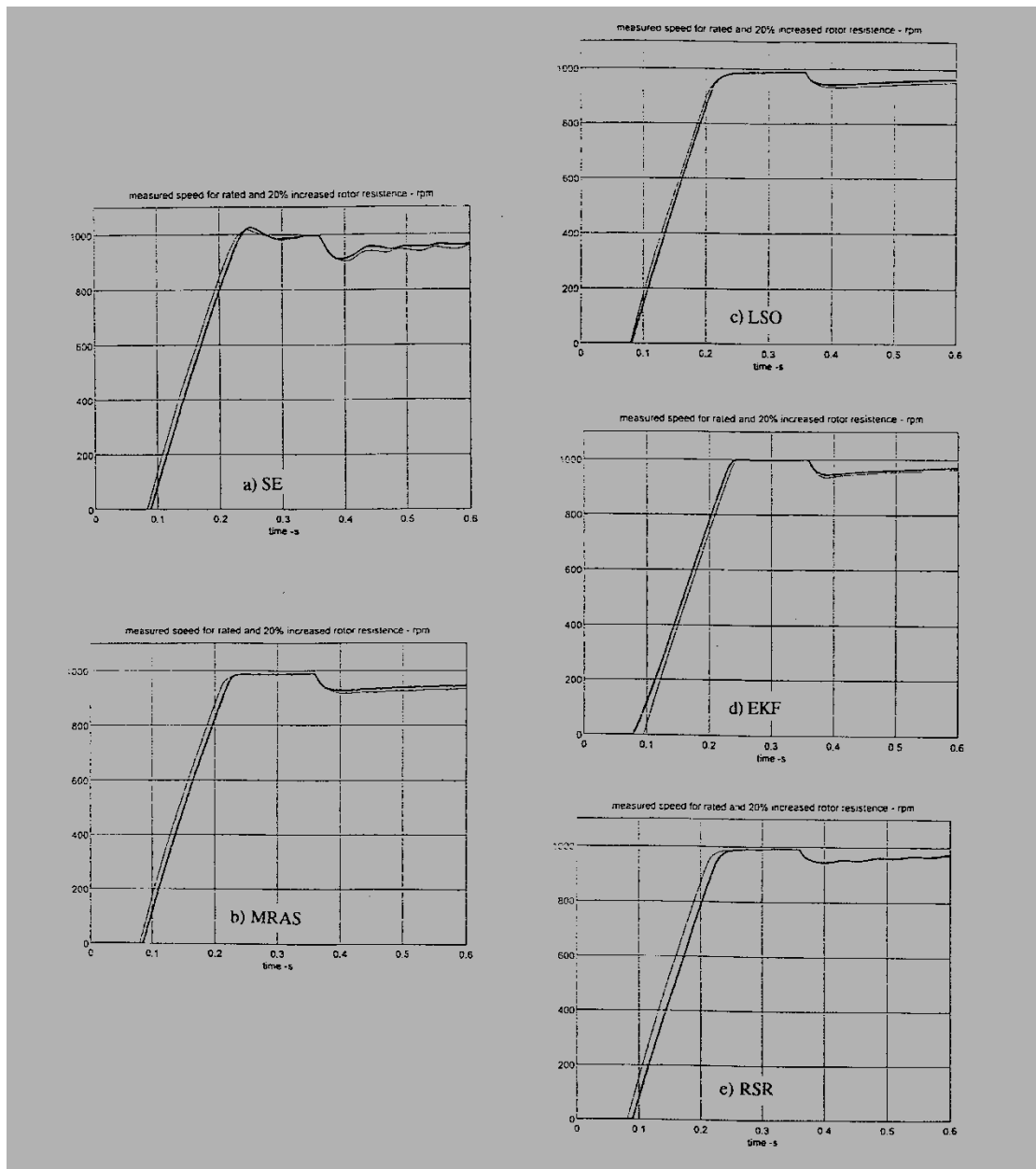
Στα c, d, e, f σχήματα φαίνεται η απόκριση των μοντέλων MRAS, LSO, EKF και RSR αντίστοιχα.



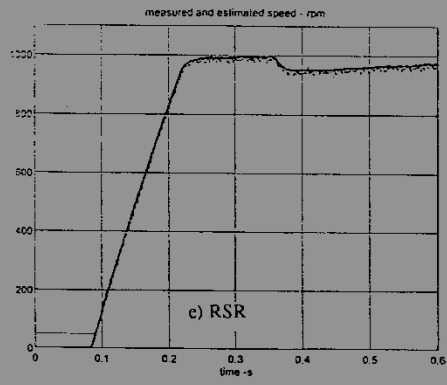
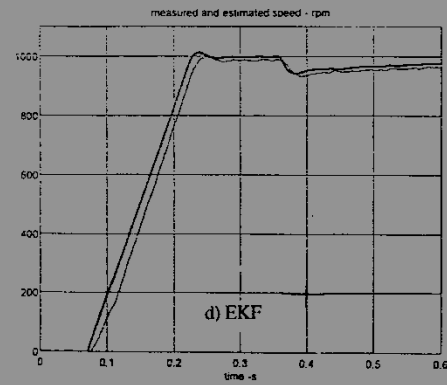
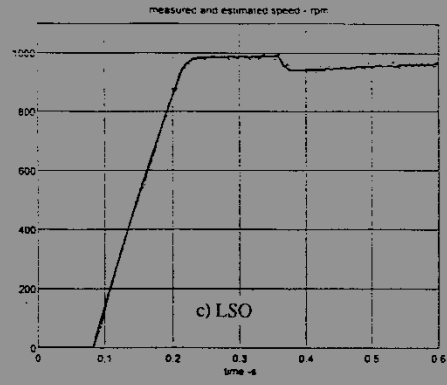
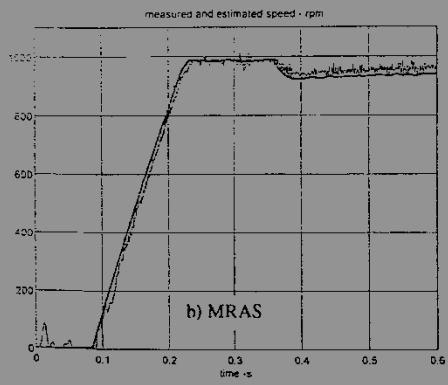
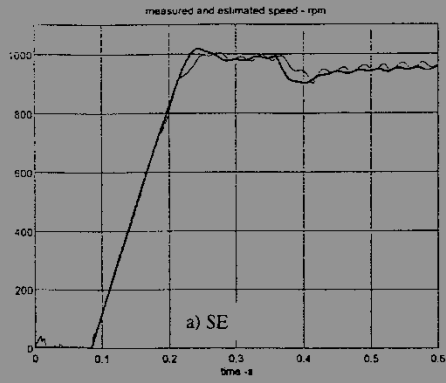
Στην δεύτερη προσομοίωση παρατηρούμε την απόδοση του συστήματος στις χαμηλές ταχύτητες. Η ταχύτητα αναφοράς είναι στα 20 rpm για τα μοντέλα SE, LSO, EKF, τα 100 rpm για MRAS και τα 70 rpm για το RSR.



Στην Τρίτη περίπτωση παρατηρούμε τη συμπεριφορά των πέντε μοντέλων όταν αυξήσουμε την αντίσταση του ρότορα κατά 20%.



Η τέταρτη προσομοίωση παρουσιάζει την πραγματική και εκτιμώμενη ταχύτητα όταν θόρυβος παρεμβάλλεται στις μετρούμενες τιμές τάσης στάτη και ρευμάτων. ο θόρυβος είναι το 5% των μετρούμενων μεγεθών.



4.1 Παρατηρήσεις

α) προσομοίωση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (steady state error)

Παρατηρούμε ότι αφού ο βρόχος ταχύτητας έχει έναν ελεγκτή PI το σφάλμα μόνιμης κατάστασης της ταχύτητας οφείλεται στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης μεταξύ ανάμεσα στην πραγματική και εκτιμώμενη ταχύτητα. Το λάθος αυτό εξαρτάται από τα μεγέθη αναφοράς και τα δυσμενέστερα αποτελέσματα εμφανίζονται στις χαμηλές ταχύτητες.

Στο SE μοντέλο όταν δεν υπάρχει φορτίο δεν παρατηρείται και σφάλμα, αλλά υπό συνθήκες φόρτισης παρατηρείται ένα μικρό σφάλμα στην ταχύτητα.

Στο MRAS μοντέλο και εδώ δεν παρατηρείται λάθος χωρίς φόρτιση, κατά την φόρτιση το σφάλμα ταχύτητας παρουσιάζεται κατά 2% στις υψηλές ταχύτητες και μειώνεται στις χαμηλές.

Στο LSO μοντέλο δεν υπάρχει λάθος ούτε χωρίς φόρτιση ούτε κατά τη συνθήκη φόρτισης

Στο EKF υπάρχει σφάλμα σε όλες τις ταχύτητες όταν η ροπή φορτίου είναι κοντά στο 0. Το σχετικό σφάλμα είναι μικρό στις υψηλές ταχύτητες στα 1000 rpm, αλλά μπορεί να είναι σημαντικό στις υψηλές. Το σφάλμα μειώνεται με την αύξηση του φορτίου

β) Δυναμική κατάσταση (DB)

Παρατηρούμε στη γραφική παράσταση ότι ο χρόνος που χρειάζεται η ταχύτητα για να επανέλθει σε επίπεδα όμοια με της μετρούμενης είναι μεγάλος, (αργή απόκριση ταχύτητας) και η καμπύλη ταχύτητας αυξομειώνεται στα σχήματα SE, MRAS, EKF.

Ενώ στα μοντέλα LSO, RSR δεν υπάρχει αυτό το πρόβλημα. Για να υπάρξει καλή δυναμική απόκριση σε μεγάλες μεταβολές ταχύτητας πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας προσαρμογέας. Το μόνο μοντέλο που μπορεί να έχει σωστή δυναμική απόκριση είναι το RSR.

γ) Λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες (LS)

Εδώ παρατηρούμε ότι τα μοντέλα EKF, LSO, SE μπορεί να λειτουργήσουν σε πολύ χαμηλές ταχύτητες στα 20 rpm, ενώ τα μοντέλα MRAS και RSR δεν λειτουργούν σε τόσο χαμηλές φτάνουν τα 100 και 70 rpm αντίστοιχα .

δ) Ευαισθησία παραμέτρων (PS)

Εδώ οι έντονες γραμμές απεικονίζουν την κατάσταση πριν την μεταβολή και οι λεπτές την κατάσταση μετά την αύξηση της αντίστασης του ρότορα κατά 20%.

Παρατηρούμε ότι η απόκριση ταχύτητας στην βηματική μεταβολή αρχίζει λίγο χρόνο πριν σε σχέση με την απόκριση χωρίς την αύξηση της

αντίστασης σε όλα τα μοντέλα εκτός του EKF όπου παρουσιάζει καθυστέρηση.

Επίσης υπάρχει ένα στατικό σφάλμα περίπου 1% όταν εφαρμόζεται φορτίο εκτός από το μοντέλο RSR. Γενικά παρατηρούμε ότι το LSO είναι το λιγότερο ευαίσθητο και το RSR το περισσότερο ευαίσθητο στην προκείμενη μεταβολή.

ε) Ευαισθησία στο θόρυβο (NS)

Εδώ το μοντέλο EKF στην εκτιμώμενη ταχύτητα και ροπή έχει την καλύτερη απόδοση.

Το LSO δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τον θόρυβο ενώ το MRAS και SE είναι ευαίσθητα σε αυτή.

στ) Πολυπλοκότητα (C)

Το EKF, έχει το σοβαρό μειονέκτημα ότι πρέπει να ληφθεί μέριμνα κατά την επιλογή του πίνακα συνδιακύμανσης θορύβου και των τιμών του αλγορίθμου διότι αν επιλεγούν λάθος θα παρουσιασθεί πρόβλημα αστάθειας.

Για τα MRAS το πρόβλημα της επιλογής συντελεστών του μηχανισμού προσαρμογής όπως της ευστάθειας βρόχου δεν έχει εξακριβωθεί.

Για τα SE υπάρχουν προβλήματα με την ευστάθεια του αλγορίθμου στην διακριτή της μορφή.

Στο LSO το μόνο πρόβλημα είναι η προσαρμογή της μήτρας κέρδους., όμως το πρόβλημα αντιμετωπίζεται.

Στο SRS πρέπει να δίνεται προσοχή στη σχεδίαση του ηλεκτρονικού κυκλώματος που λαμβάνει της αρμονικές για να μην υπάρξει πρόβλημα.

ζ) Χρόνος σύγκλισης (CT)

Ο αλγόριθμος EKF μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας του, επιπλέον η απόδοση του ελαττώνεται όσο ο χρόνος δειγματοληψίας αυξάνεται.

Στα μοντέλα LSO, MRAS, SE δεν υπάρχει πρόβλημα ενώ στο μοντέλο RSR οι απαιτήσεις του είναι ελάχιστες.

Στον παρακάτω πίνακα βαθμολογείται η απόδοση του κάθε μοντέλου συνοψίζοντας τα παραπάνω. Με ένα βαθμολογείται η καλύτερη απόδοση ενώ με πέντε η δυσμενέστερη.

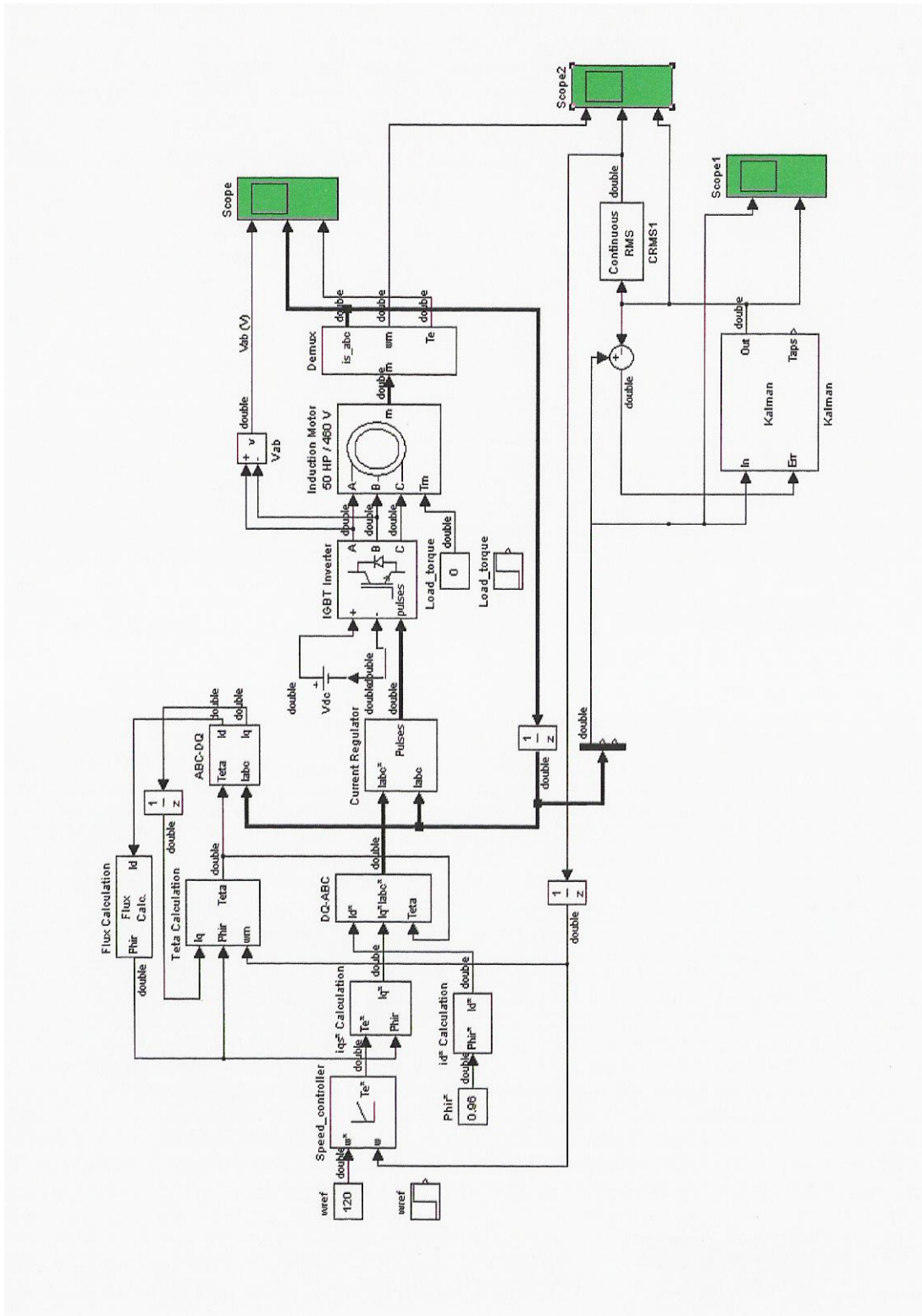
	STE	DB	LS	PS	NS	C	CT
SE	2	3	3	2	4	2	3
MRAS	2	3	4	2	4	3	4
LSO	1	1	2	1	2	2	2
EKF	2	2	2	2	1	4	5
RSR	2	3	3	2	3	1	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

5.1. Προσομοίωση στο MATLAB του μοντέλου κινητήρα επαγωγής με φίλτρο KALMAN για τον έλεγχο ταχύτητας του

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει προσομοίωση στο πρόγραμμα MATLAB έκδοσης 7, ενός κινητήρα επαγωγής συνδεδεμένου κατάλληλα με ένα φίλτρο KALMAN προκειμένου να γίνει έλεγχος της ταχύτητας του χωρίς τη χρήση αισθητήρα. Το συγκεκριμένο μοντέλο παρουσιάστηκε θεωρητικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κύκλωμα που θα υλοποιηθεί είναι το σχήμα 53 με κάποιες τροποποιήσεις και φαίνεται παρακάτω. Τα περισσότερα κομμάτια του σχήματος λαμβάνονται από τις κατάλληλες βιβλιοθήκες του προγράμματος και γίνεται η απαραίτητη σύνδεση τους καθώς η δημιουργία τους από την αρχή είτε μέσω σχεδίασης είτε μέσω προγραμματισμού μέσω της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB είναι πάρα πολύ πολύπλοκα θέματα.

Το βασικό κύκλωμα είναι το εξής:

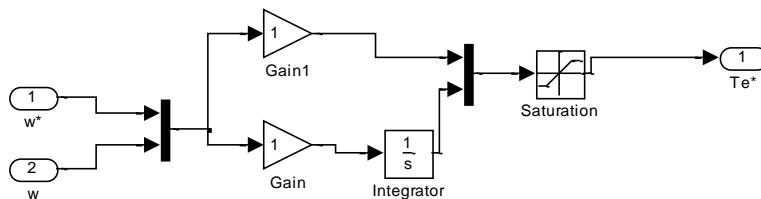


Σχήμα 57

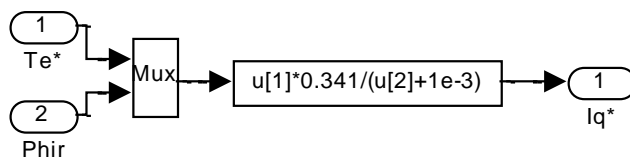
Προσομοιωμένο μοντέλο κινητήρα επαγωγής συνδεδεμένο με φίλτρο KALMAN στο MATLAB.

Το κύκλωμα αποτελείται από τα εξής blocks:

Speed controller τύπου PI proportional-integral το σχηματικό του διάγραμμα είναι:



Σαν είσοδο δέχεται την ταχύτητα αναφοράς η οποία μπορεί να έχει μία συνεχή τιμή π.χ 120 rad/s ή μια βηματική συνάρτηση, και την ανατροφοδότηση της ταχύτητας από το φίλτρο. Η έξοδος του T_e^* εισέρχεται στον υπολογιστή της i_q συνιστώσας του ρεύματος αναφοράς στάτη μαζί με την ροή του ρότορα ως εξής:



$$I_q = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot \left(\frac{2}{p}\right) \cdot \left(\frac{L_r}{L_m}\right) \cdot \left(\frac{T_e}{\text{Phir}}\right)$$

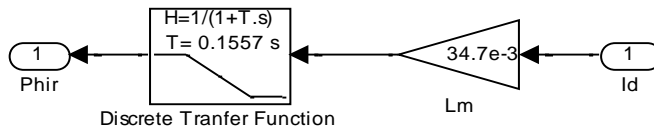
$$I_q = 0.341 \cdot \left(\frac{T_e}{\text{Phir}}\right)$$

$$L_m = 34.7 \text{ mH}$$

$$L_r = L_l' + L_m = 0.8 + 34.7 = 35.5 \text{ mH}$$

$$p = \text{nb of poles} = 4$$

Η ροή ρότορα Phir υπολογίζεται από το κύκλωμα:



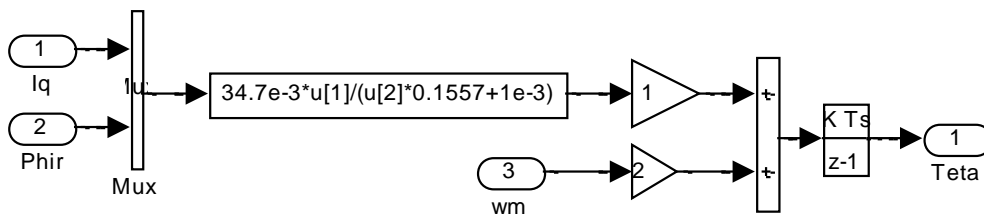
$$\text{Phir} = L_m \cdot I_d / (1 + T_r \cdot s)$$

$$L_m = 34.7 \text{ mH}$$

$$T_r = L_r / R_r = 0.1557 \text{ s}$$

$$L_r = L_l' + L_m = 0.8 + 34.7 = 35.5 \text{ mH} \quad R_r = 0.228 \text{ ohms}$$

Η γωνία ροής ρότορα θα υπολογίζεται από το teta calculation:



$$\text{Teta} = \text{Electrical angle} = \text{integ} (w_r + w_m)$$

$$w_r = \text{Rotor frequency (rad/s)} = L_m \cdot I_q / (T_r \cdot \text{Phir})$$

$$w_m = \text{Rotor mechanical speed (rad/s)}$$

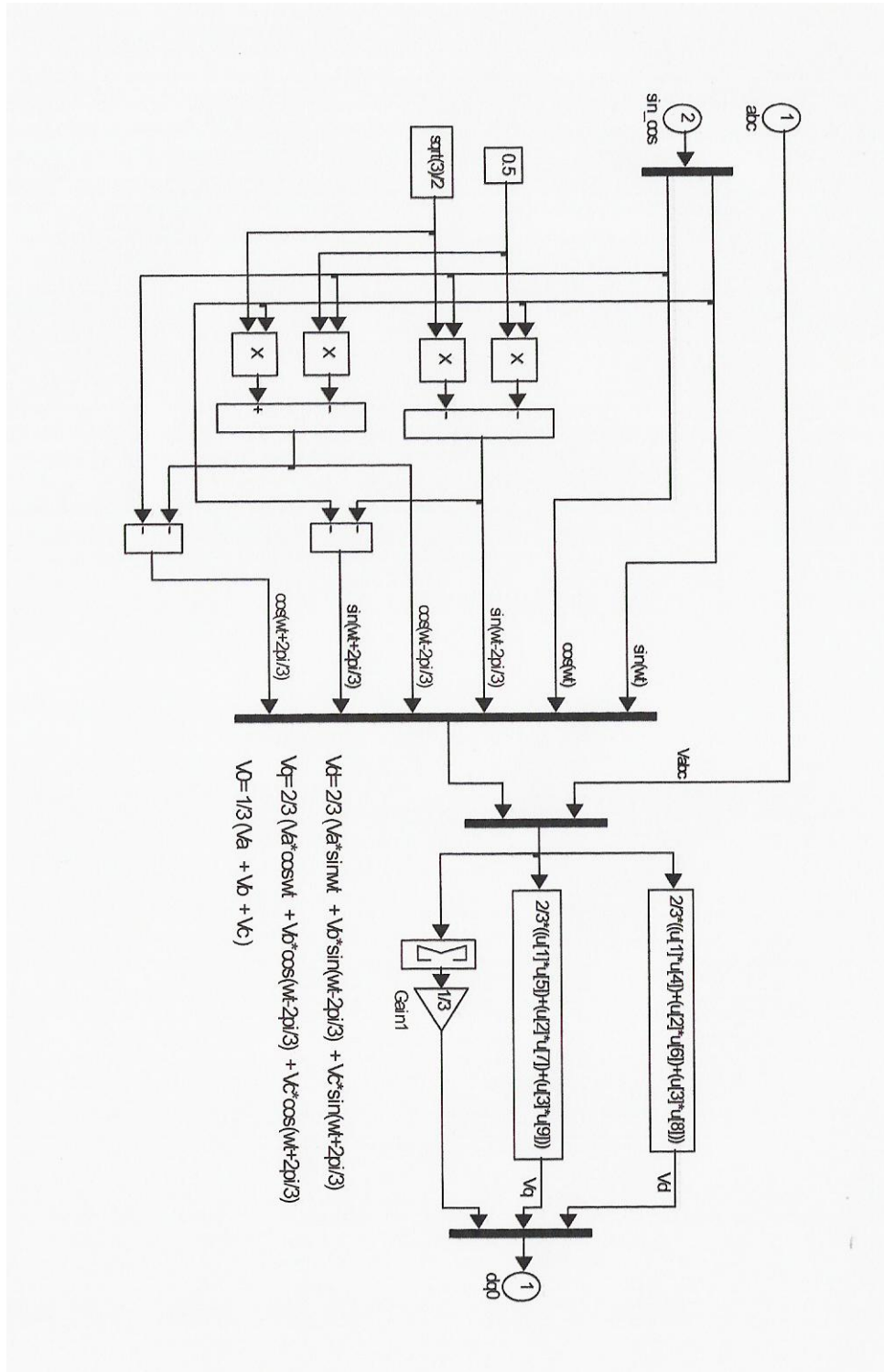
$$L_m = 34.7 \text{ mH}$$

$$L_r = L_l' + L_m = 0.8 + 34.7 = 35.5 \text{ mH}$$

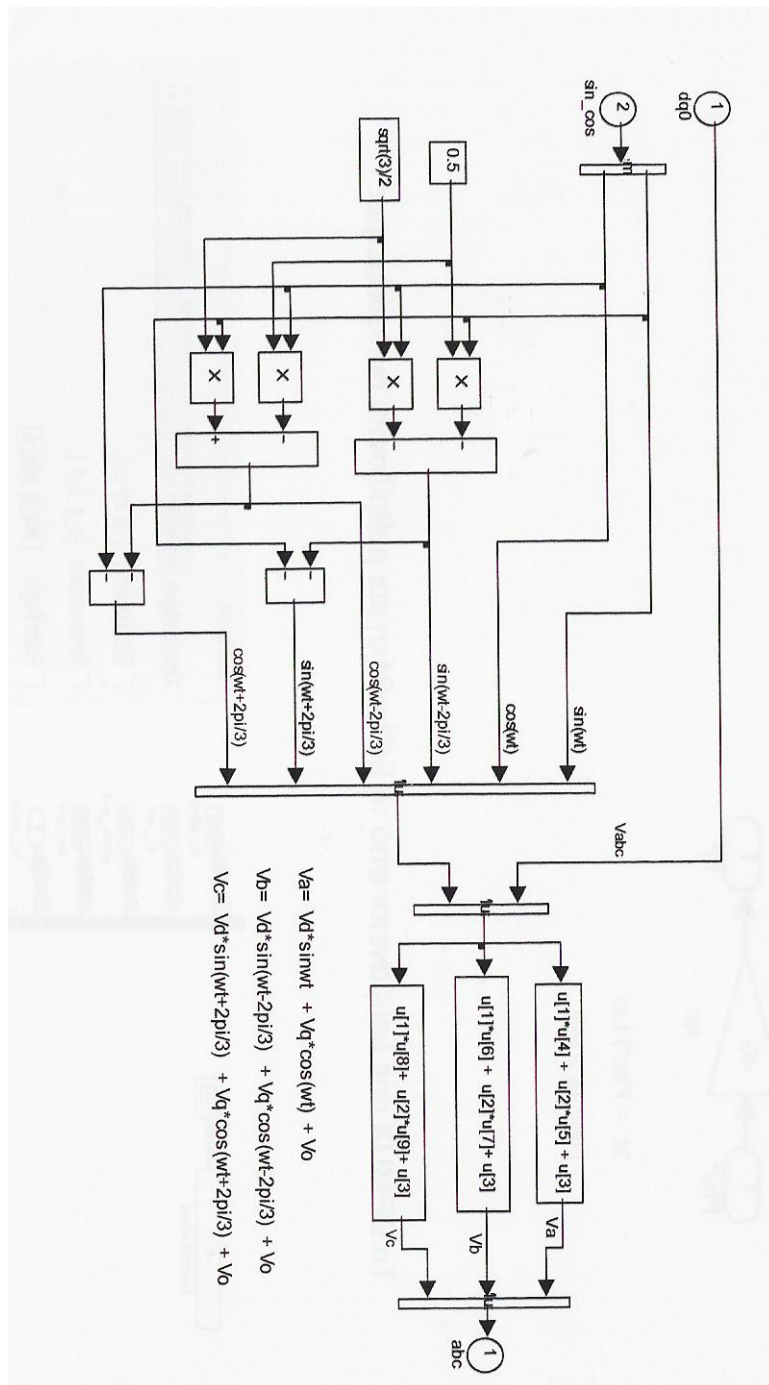
$$R_r = 0.228 \text{ ohms}$$

$$T_r = L_r / R_r = 0.1557 \text{ s}$$

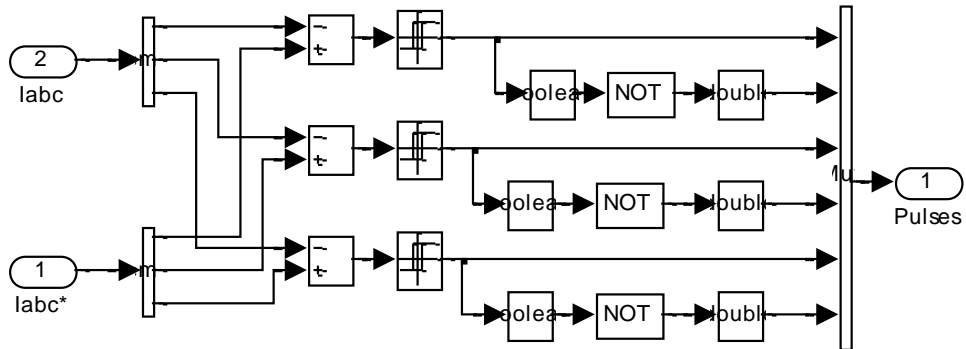
Η μετατροπή των ρευμάτων του κινητήρα labc σε συντεταγμένες πεδίου q,d πραγματοποιείται από τον μετατροπέα ABC TO DQ:



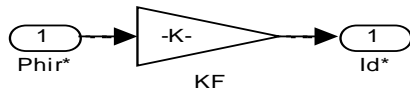
Η μετατροπή από συντεταγμένες πεδίου σε iabc γίνεται:



Ο current regulator ο οποίος δέχεται τα ρεύματα αναφοράς του κινητήρα I_{abc}^* και τα μετρούμενα ρεύματα I_{abc} από την έξοδο του και τα μετατρέπει σε κατάλληλους παλμούς για την οδήγηση του μετατροπέα υλοποιείται με το σχήμα:



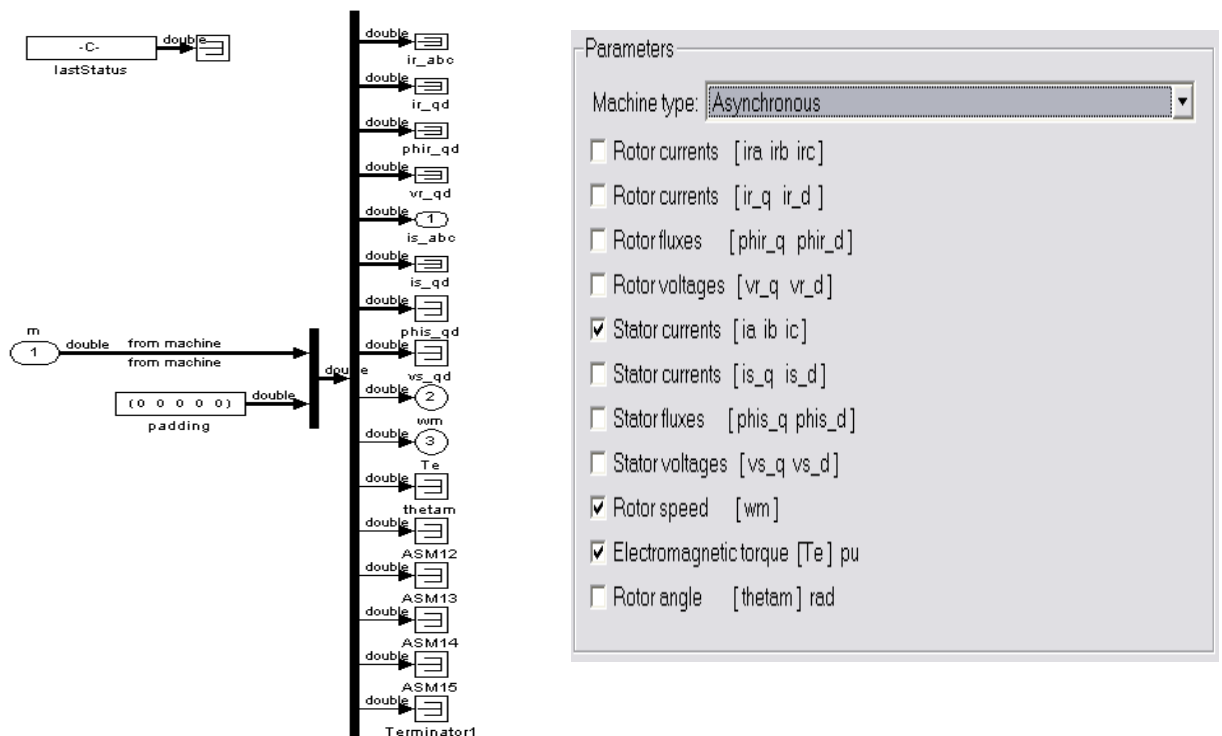
Η συνιστώσα πεδίου ρεύματος αναφοράς I_d^* υπολογίζεται: όπου ϕ_{ir}^* ροή ρότορα σταθερά στα 0.9



$$I_d^* = \phi_{ir}^* / L_m$$

$$L_m = 34.7 \text{ mH}$$

Το DEMUX unit λαμβάνεται από τη βιβλιοθήκη και ρυθμίζονται οι παράμετροι:



Το μοντέλο του ασύγχρονου κινητήρα λαμβάνεται από τη βιβλιοθήκη του simulink και το block SimPowerSystem και ρυθμίζονται οι παράμετροι στην παρακάτω μάσκα του προγράμματος:

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in the dq rotor reference frame. Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. Press help for inputs and outputs description.

You can specify initial values for stator and rotor currents. In the Initial conditions parameter you have the possibility to specify the stator current only :

[s0 th(deg) isa, isb, isc(p.u.) pha, phb, phc(deg)]:

Or you can choose to enter the stator and the rotor initial currents:

[s0 th(deg) isa, isb, isc(p.u.) pha, phb, phc(deg) ira, irb, irc(pu) pha, phb, phc]:

Parameters

Rotor type:

Reference frame:

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[50*746, 460, 60]

Stator [Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.087 0.8e-3]

Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[0.228 0.8e-3]

Mutual inductance Lm (H):

[34.7e-3]

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m²) F(N.m.s) p0]:

[1.662 0.1 2]

Initial conditions (read the details in the description above)

[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

Ο IGBT μετατροπέας λαμβάνεται από τη βιβλιοθήκη του simulink , το block SimPowerSystem το power electronic device και τέλος επιλέγεται το universal bridge block , η μάσκα που παρουσιάζεται και οι κατάλληλες ρυθμίσεις της είναι:

Block Parameters: IGBT Inverter

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. For most applications the internal inductance should be set to zero.

Parameters

Number of bridge arms:

Port configuration

Snubber resistance Rs (Ohms)

Snubber capacitance Cs (F)

Power Electronic device

Ron (Ohms)

Forward voltages [Device Vf(V) , Diode Vfd(V)]

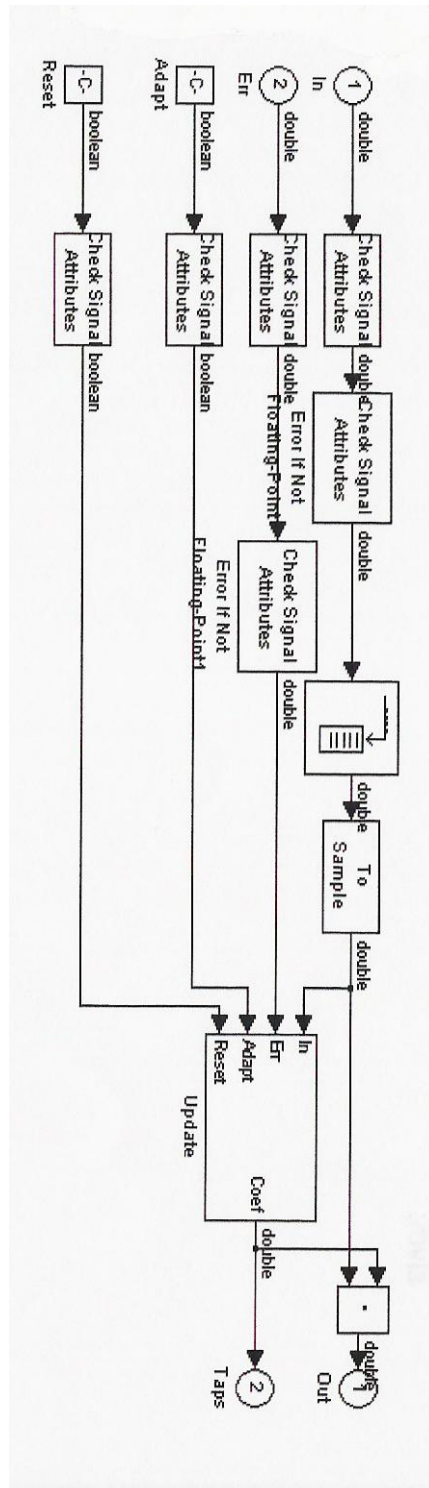
[0.8 0.8]

[Tf(s) , Tt(s)]

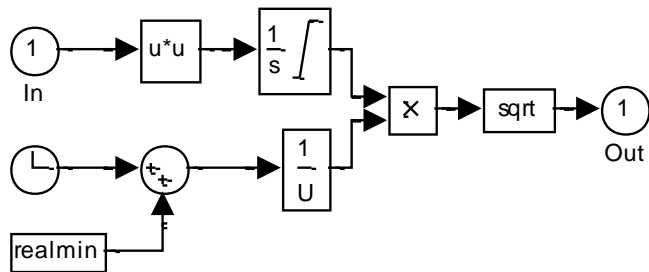
[1e-6 , 2e-6]

Measurements

Το φίλτρο KALMAN που δίνεται από τις ειδικές βιβλιοθήκες του προγράμματος είναι :



Η είσοδος του είναι τα ρεύματα του κινητήρα i_{abc} και το error η διαφορά της εισόδου από το σήμα εξόδου. Το `adapt` και `reset` δέχονται κατάλληλες σταθερές ώστε να γίνει σωστά η προσομοίωση και τα `blocks check signal attributes` είναι ειδικά προγραμματισμένες συναρτήσεις s-functions έτοιμες από το MATLAB όπου βάση αυτών το φίλτρο πραγματοποιεί τον γνωστό αλγόριθμο. Η έξοδος του πριν ανατροφοδοτηθεί στον speed controller περνάει μέσα από ένα RMS BLOCK ώστε να μειωθούν οι ταλαντώσεις του σήματος και να μας δώσει την κατάλληλη κυματομορφή όπως θα φανεί παρακάτω. Το RMS BLOCK έχει την εξής δομή:



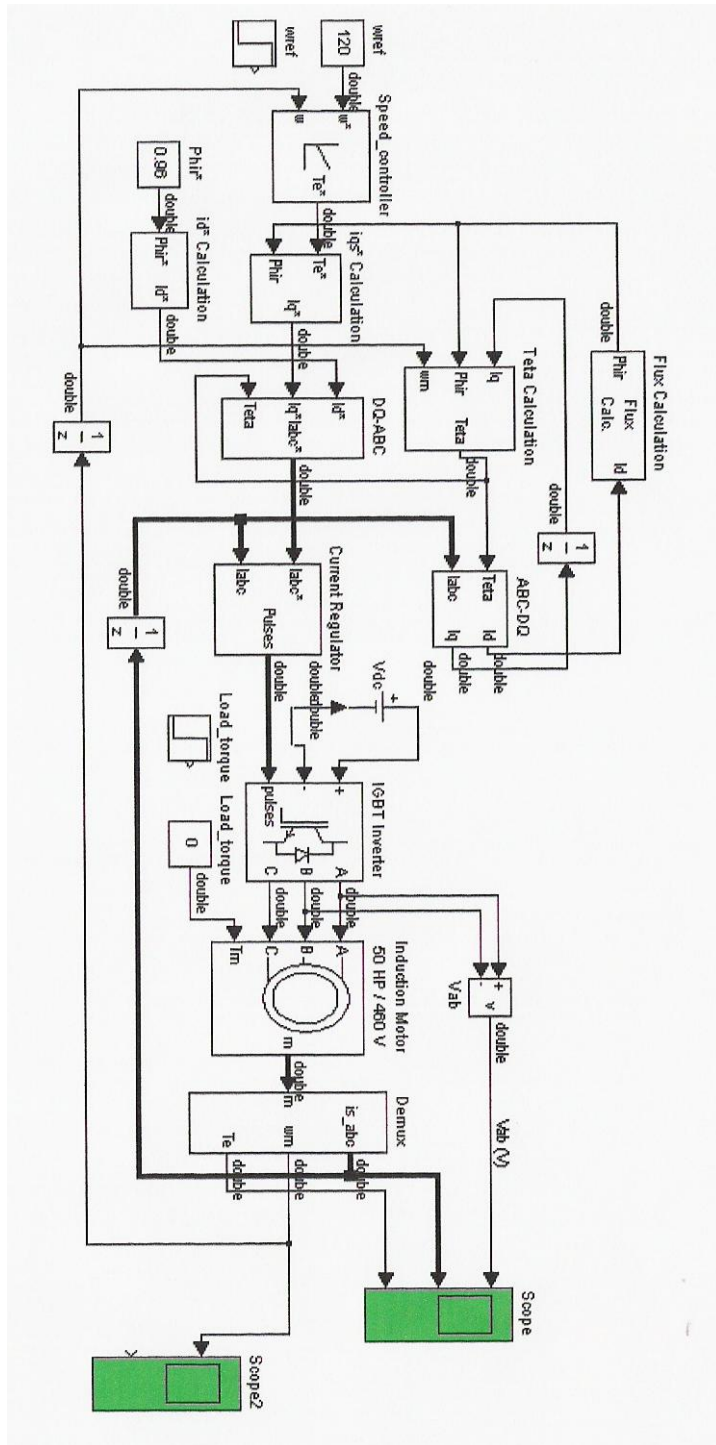
όπου το ρολόι δίνει το χρόνο προσομοίωσης του ρεύματος.

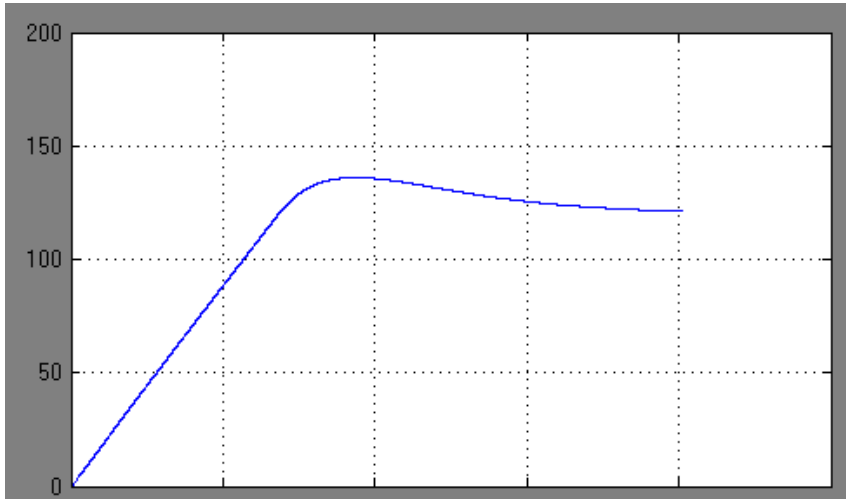
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Η πρώτη προσομοίωση γίνεται με την κλασική μέθοδο της ανατροφοδότησης χωρίς τη χρήση του φίλτρου και χωρίς να εφαρμόζεται εξωτερική ροπή ώστε να είναι εφικτή σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Το ρεύμα που λαμβάνεται από την έξοδο του DEMUX UNIX του κινητήρα ανατροφοδοτείται στον speed controller. Το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου και η κυματομορφή που λαμβάνουμε από το scope 2 για την ταχύτητα του κινητήρα είναι:



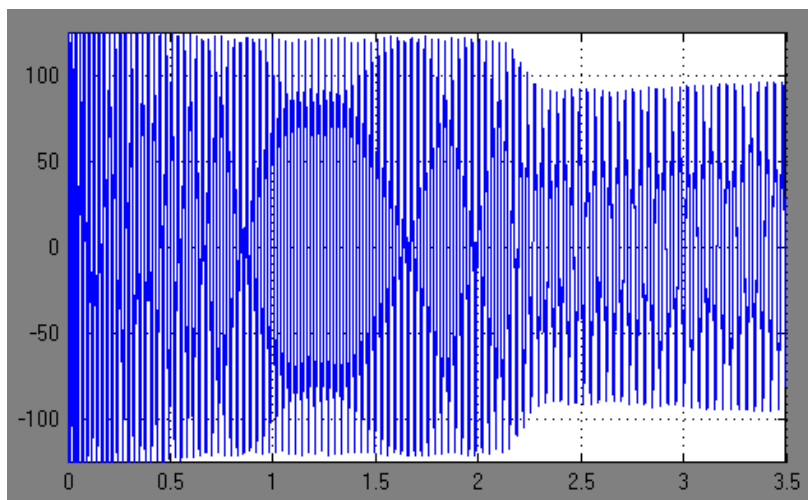


Παρατηρούμε ότι η χαρακτηριστική απόκρισης αυξάνει γραμμικά με το χρόνο μέχρι τα 120 rpm, πάνω από την ταχύτητα αναφοράς μεταβάλλεται σε μια καμπύλη δευτέρου βαθμού και μετά τείνει να κρατηθεί σταθερή στα 120 rpm.

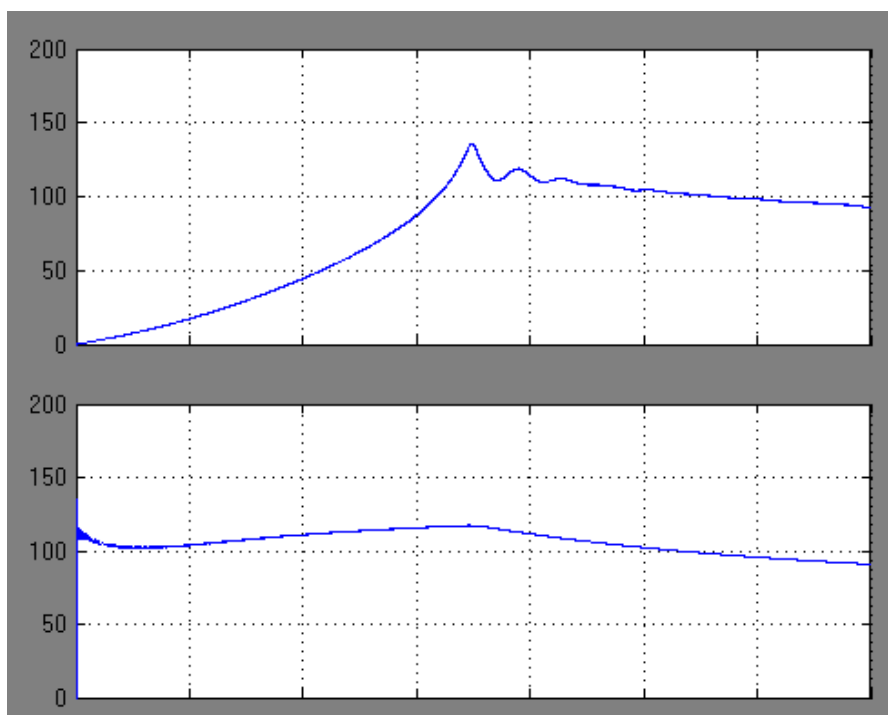
6.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΦΙΛΤΡΟΥ KALMAN

- Η πρώτη προσομοίωση γίνεται χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής ροπής στον κινητήρα. Η πρώτη χαρακτηριστική εξάγεται από το scope1 και αναπαριστά την κυματομορφή της ταχύτητας από την έξοδο του φίλτρου. Η δεύτερη εξάγεται από το scope2 και αναπαριστά την ταχύτητα που ανατροφοδοτείται στο σύστημα και η Τρίτη εξάγεται από το scope2 και αναπαριστά την ταχύτητα στην έξοδο του κινητήρα:

SCOPE 1: Kalman Filtering process signal

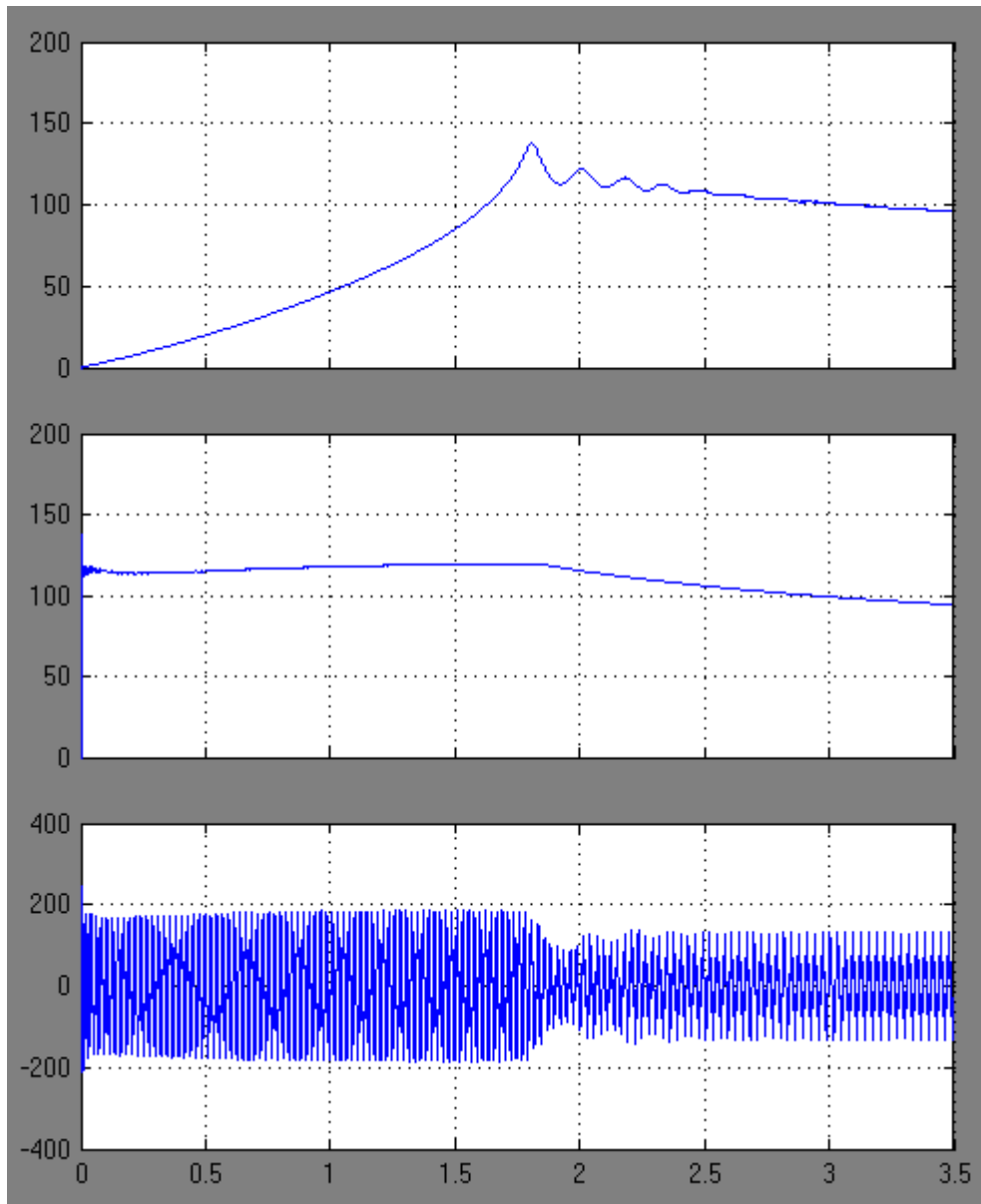


SCOPE 2: SPEED OUTPUT and Feedback signal (NO Torque Load)

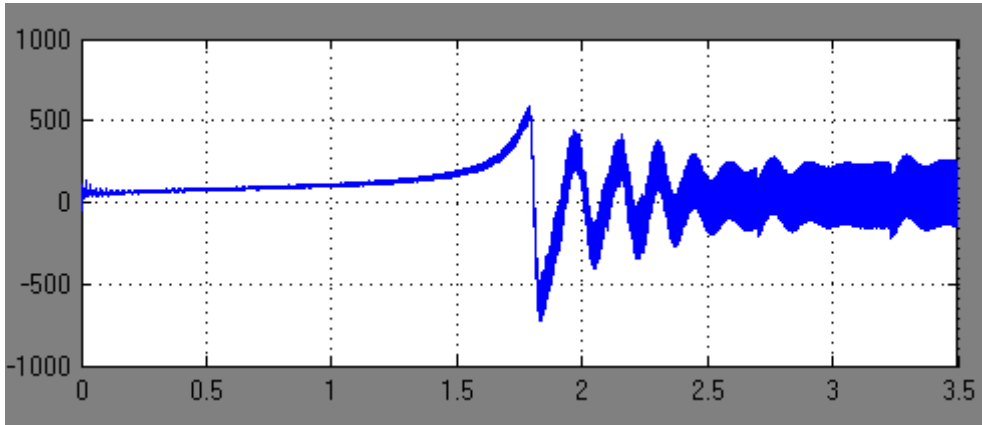


Η δεύτερη προσομοίωση γίνεται εφαρμόζοντας ροπή step type 50Nt και 200Nt. Οι κυματομορφές που λαμβάνουμε είναι:

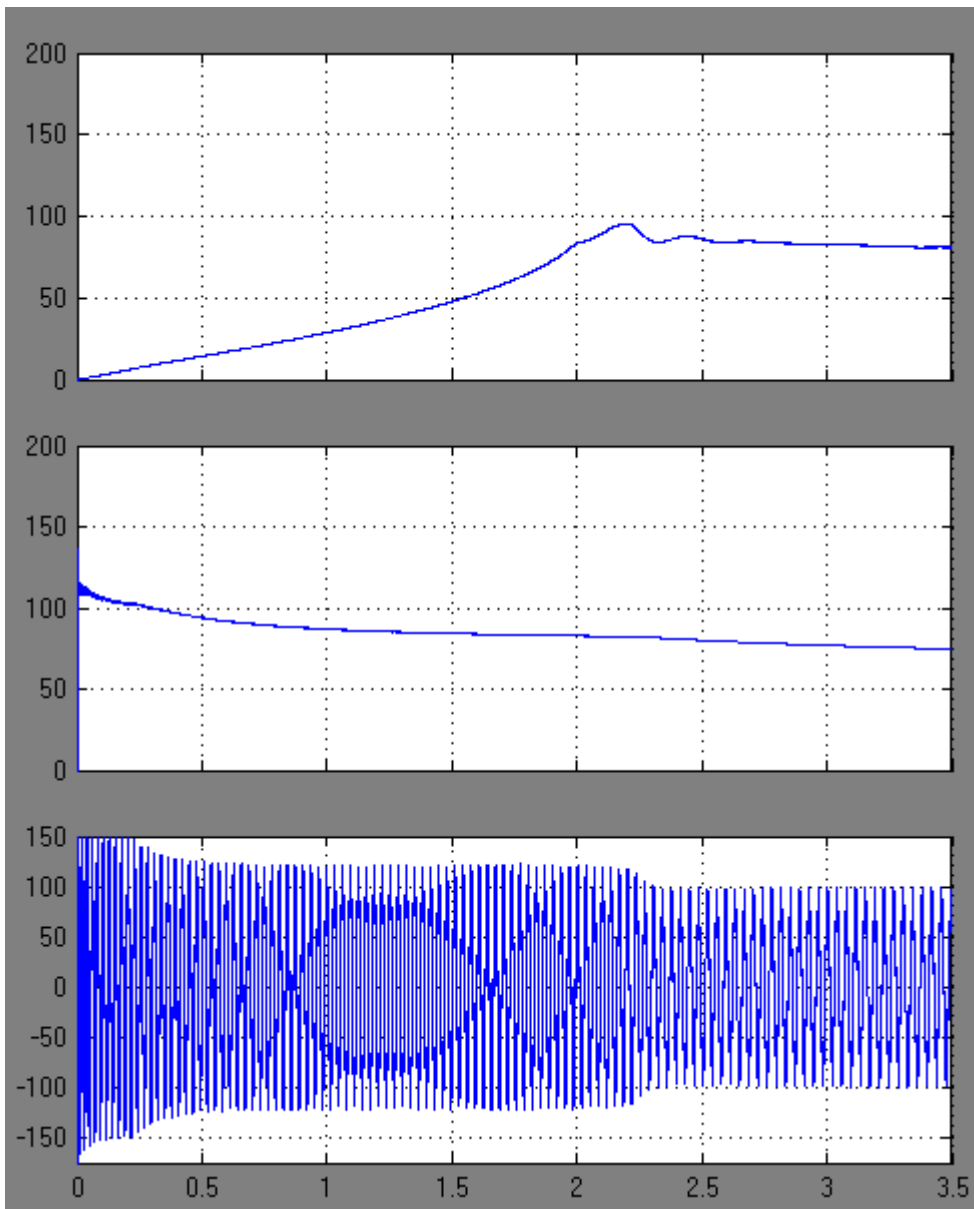
SCOPE 2: SPEED OUTPUT and Feedback signal (Torque Load= 50 Nm)

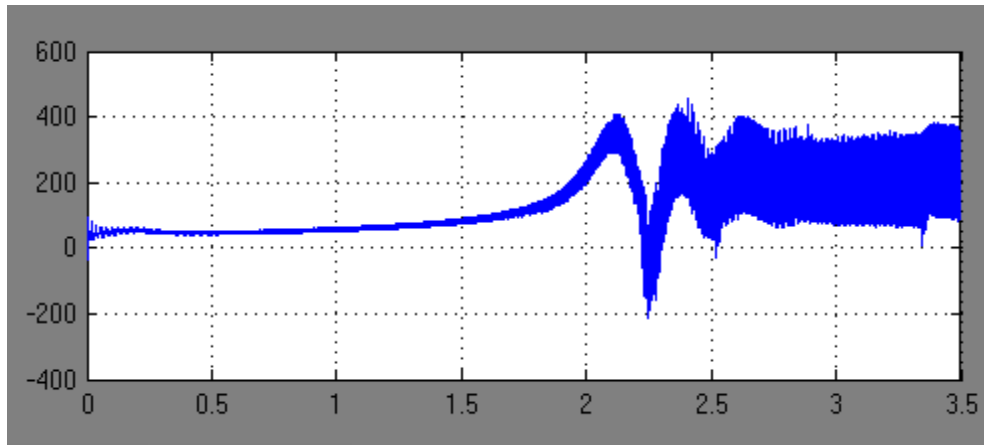


scope:Output torque in Motor



SCOPE 2: SPEED OUTPUT and Feedback signal (Torque Load=200Nm)





ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Κατά τη λειτουργία χωρίς εξωτερική ροπή παρατηρούμε:

Η χαρακτηριστική κατά την έξοδο από το φίλτρο παρουσιάζει ταλάντωση, αυτό εξαλείφεται χρησιμοποιώντας το RMS unit.

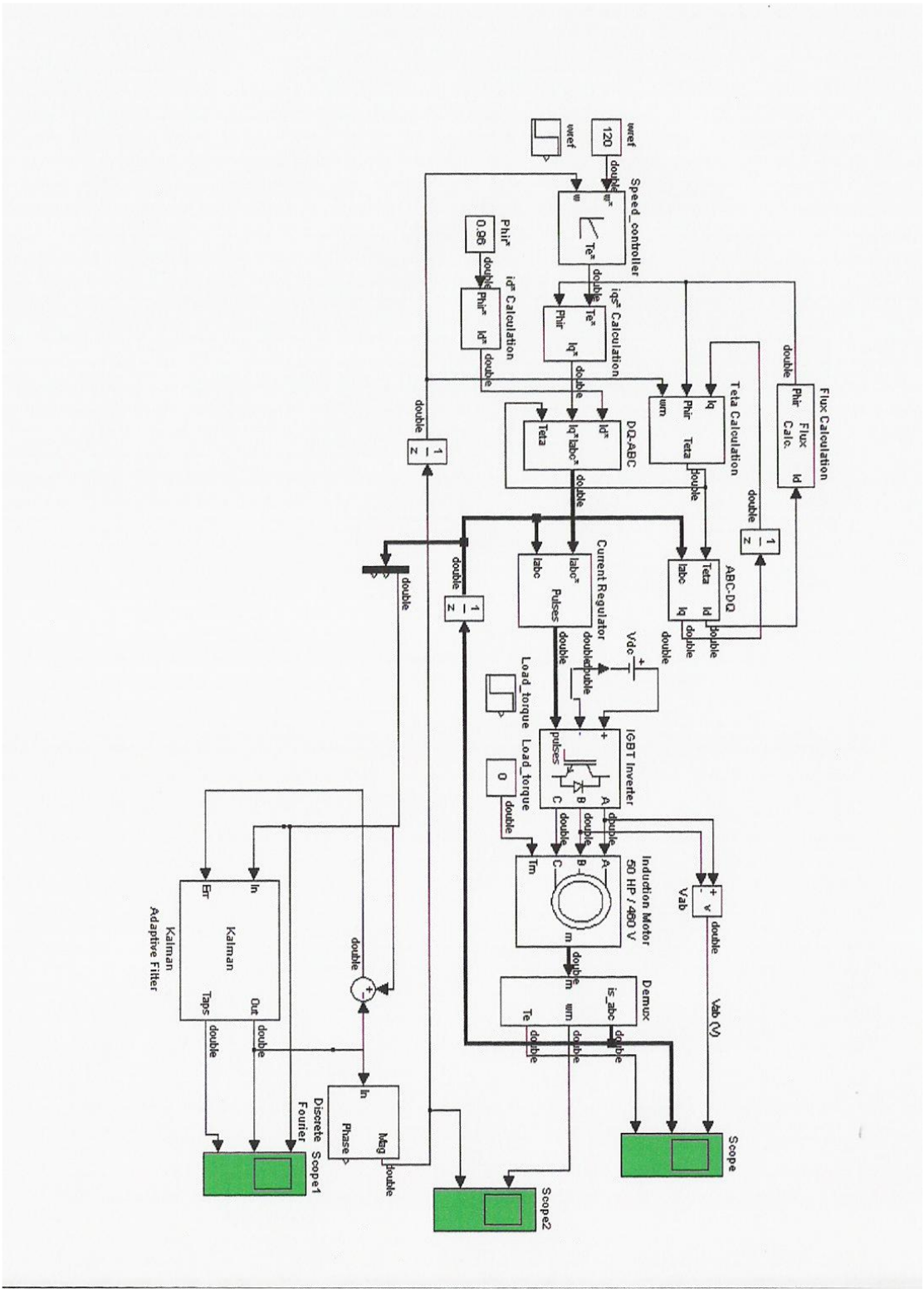
Η ταχύτητα εξόδου του κινητήρα αυξάνει μέχρι τα 120 rpm αλλά κατά την πάροδο του χρόνου ελαττώνεται κάνοντας κάποιες αυξομειώσεις, τέλος τείνει να σταθεροποιηθεί παρουσιάζοντας μικρή κλίση.

Η ταχύτητα ανατροφοδότησης στην αρχή κρατιέται στα 120 rpm με την πάροδο του χρόνου ελαττώνεται καθώς ελαττώνεται και το ρεύμα που τραβάει ο κινητήρας αλλά σταθεροποιείται σε κάποια τιμή κάτω από τα 120 rpm.

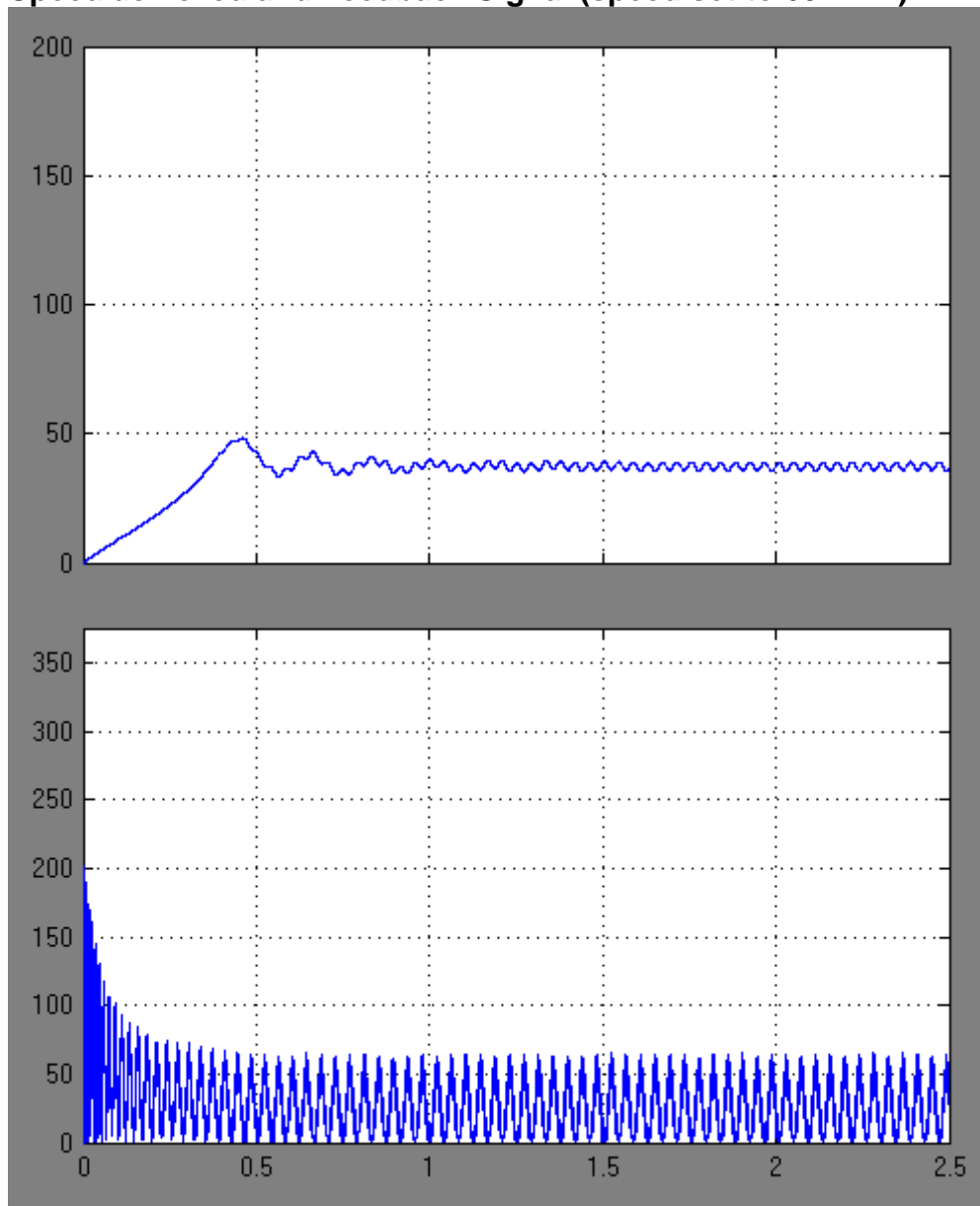
Κατά τη λειτουργία με εφαρμογή εξωτερικής ροπής παρατηρούμε ότι η αύξηση της ροπής προκαλεί διακυμάνσεις στην ταχύτητα, στα 200 Nt ακόμα περισσότερο. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού όταν αυξάνει το φορτίο μειώνονται οι στροφές. Με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων του φίλτρου μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη ρύθμιση.

Τέλος μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο έλεγχος που επιτεύχθηκε είναι αρκετά ικανοποιητικός λαμβάνοντας υπόψη ότι η προσομοίωση έγινε προσπαθώντας να προσαρμοσθούν έτοιμα blocks χωρίς να γίνει ειδικός σχεδιασμός ή προγραμματισμός για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ακόμα θα πρέπει να αναφερθεί μια άλλη προσπάθεια για την προσομοίωση του θέματος όπου στη θέση του RMS unit χρησιμοποιήθηκε ένας Fourier analyzer. Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται παρακάτω. Οι κυματομορφές που ελήφθησαν είναι οι παρακάτω και όπως φαίνεται εδώ η ταχύτητα μπορεί να κρατηθεί σταθερή, όμως στο σήμα ανατροφοδότησης παρουσιάζεται μεγάλη ταλάντωση άρα όχι καλός έλεγχος της ταχύτητας. Συνεπώς υλοποιήθηκε με τη χρήση του RMS unit.



Speed achieved and Feedback Signal (speed set to 60 RPM)



Σαν τελικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι η απόκριση του φίλτρου KALMAN δεν είναι τόσο ακριβής όσο αυτή με την μέθοδο προσανατολισμού πεδίου, ανατροφοδότησης αλλά αυτό είναι φυσικό αφού με τη μέθοδο του φίλτρου δεν λαμβάνουμε ακριβείς μετρήσεις αλλά προβλέψεις. Η διαφορά όμως δεν είναι πολύ μεγάλη.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κλείνοντας την παρούσα εργασία μπορεί επιγραμματικά να σχολιαστούν τα εξής:

Προς το παρόν ο έλεγχος ταχύτητας των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής που βρίσκουν εφαρμογή στην βιομηχανία και στις μεταφορές γίνεται μέσω συσκευών οδήγησης με αισθητήρες. Οι επεξεργαστές ψηφιακών σημάτων, τα νευρωνικά δίκτυα, τα ηλεκτρονικά ισχύος και τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου έχουν συμβάλλει στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών χωρίς την χρήση αισθητήρων. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι αρκετά και σημαντικά σε σχέση με τη γνωστή μέθοδο με χρήση αισθητήρων. Το μικρότερο μέγεθος της συσκευής οδήγησης, η έλλειψη των συνδέσμων των αισθητήρων και η εξάλειψη του θορύβου που αυτοί εισάγουν, η αυξημένη αξιοπιστία, η ευρωστία και τέλος το χαμηλότερο κόστος των συσκευών οδήγησης.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει αυτή η μέθοδος και έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό των συστημάτων αντιμετωπίζονται μέσω των ψηφιακών συστημάτων. Ειδικά οι κατασκευαστές των οδηγών τάσης προς συχνότητα με αισθητήρες έχουν δείξει ενδιαφέρον για την αντικατάστασή τους από συσκευές οδήγησης που χρησιμοποιούν την μέθοδο με προσανατολισμό ως προς το πεδίο (FOC) χωρίς αισθητήρες όπου κατασκευαστικά η διαφορά τους είναι οι αισθητήρες.

Γενικά γίνονται πολλές έρευνες ώστε να αναπτυχθούν εφαρμογές στα πεδία του ελέγχου ταχύτητας, υπολογισμού ροής ρότορα και άμεσου ελέγχου της ροπής έτσι ώστε στο εγγύς μέλλον η μέθοδος ελέγχου χωρίς αισθητήρες να χρησιμοποιείται ευρύτατα σε όλους τους τομείς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ι.Α Τεγόπουλος, 'Ηλεκτρικές Μηχανές, μέρος β' εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2001.
- Στέφανος Μανιάς 'Ηλεκτρονικά Ισχύος' ,εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2000
- Sensorless Control of AC Motor Drives Kaushik Rajashekara,Atsuo Kawamura, Kouki Matsue .IEEE PRESS 1999
- Μαρία Ιωαννίδου' Συστήματα ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών', έκδοση Ε.Μ.Π 2003
- Γιάννη Ξυππέρα 'Ηλεκτρικές Μηχανές' τόμος 1, εκδόσεις ΖΗΤΗ Θεσσαλονίκη 1995
- Stephen J. Chapman, 'Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC' εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε. Θεσσαλονίκη 1993
- D.W.Novotny and T.A. Lipo 'Vector Control and Dynamics Of AC Drives' Oxford Science Publications 2000
- Ευάγγελος Β. Χατζίκος 'MATLAB 6 για μηχανικούς' εκδόσεις Α.Τζιόλα Θεσσαλονίκη 2003
- MATLAB 7 USER GUIDE