

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

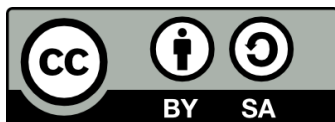
κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΘΕΜΕΛΗΣ

ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

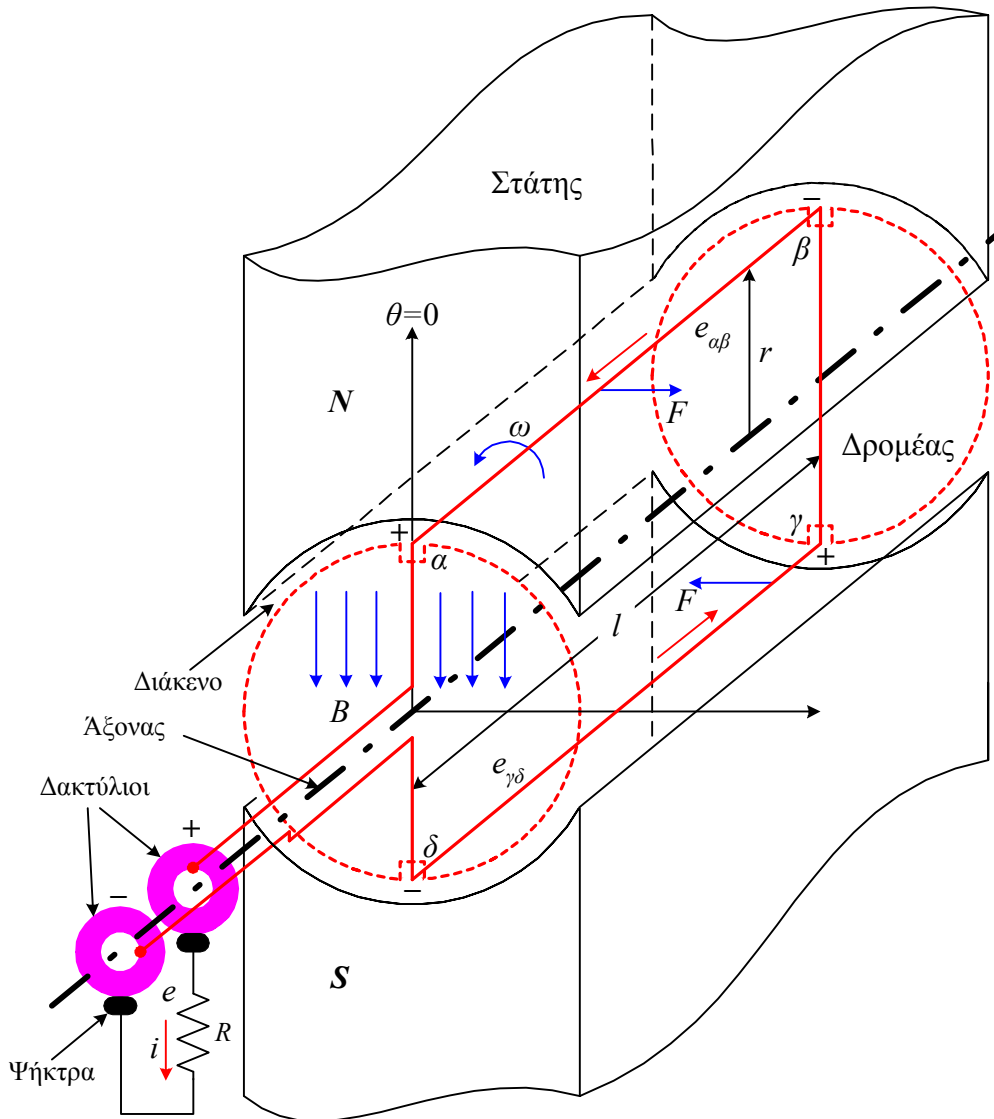
Μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος (*dc machine*), παράγει τάση συνεχούς μορφής όταν χρησιμοποιείται ως γεννήτρια. Αντίστοιχα, ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος πρέπει να τροφοδοτηθεί από πηγή συνεχούς τάσης. Η κατασκευή των μηχανών συνεχούς ρεύματος προηγήθηκε των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος, καθώς οι ερευνητές τον 19^ο αιώνα προσπαθούσαν να κατασκευάσουν μια μηχανή, η οποία να παράγει συνεχές ρεύμα όπως οι συσσωρευτές.

Η πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος κατασκευάστηκε το 1832 από το Γάλλο *Hippolyte Pixii*. Η μηχανή του *Pixii* είχε συλλέκτη δύο τομέων. Η μηχανή συνεχούς ρεύματος, αρχικά με συλλέκτη δύο τομέων, που κατασκευάστηκε από τον *Werner Von Siemens* το 1856, αποτέλεσε την αφορμή για την εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών. Η πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος με μορφή αντίστοιχη της σημερινής κατασκευάστηκε από τον *Hefner-Alteneck* το 1872.

Θα αναφερθούμε αρχικά στην αρχή λειτουργίας των μηχανών συνεχούς ρεύματος, η οποία είναι ίδια μ' εκείνη των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τις τροποποιήσεις των πρακτικών μηχανών συνεχούς ρεύματος, οι οποίες έχουν ως σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους.

2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Κάθε ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από δύο κύρια τμήματα. Τα ακίνητο τμήμα της μηχανής ονομάζεται *στάτης (stator)* και το στρεφόμενο τμήμα *δρομέας (rotor)*. Στο Σχ. 2.1 εικονίζεται η δομή μιας στοιχειώδους ηλεκτρικής μηχανής. Η αρχή λειτουργίας όλων των ηλεκτρικών μηχανών στηρίζεται σ' αυτή τη στοιχειώδη μηχανή. Ο στάτης της μηχανής αποτελείται από ένα ηλεκτρομαγνήτη με δύο πόλους, το βόρειο και το νότιο, ο οποίος παράγει το μαγνητικό πεδίο B . Ο δρομέας αποτελείται από ένα κύλινδρο κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό, ο οποίος μπορεί να στραφεί γύρω από τον άξονα.



Σχ. 2.1 Δομή της στοιχειώδους ηλεκτρικής μηχανής

Σε δύο αυλακώσεις στην επιφάνεια του κυλίνδρου, είναι συμμετρικά τοποθετημένοι οι αγωγοί ενός πλαισίου. Το πλαίσιο αυτό ονομάζεται, *τύλιγμα του δρομέα*. Θα δούμε στη συνέχεια ότι το τύλιγμα του δρομέα στις πρακτικές μηχανές συνεχούς ρεύματος, έχει πολύ πιο σύνθετη δομή από αυτή του απλού πλαισίου. Τα άκρα του τυλίγματος του δρομέα συνδέονται σε δύο δακτυλίους, με τους οποίους εφάπτονται οι *ψήκτρες* (*brushes*). Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών το τύλιγμα του δρομέα είναι διαθέσιμο στο στάτη.

Μεταξύ των πόλων του στάτη και του κυλινδρικού δρομέα, υπάρχει ένα διάκενο αέρα με σταθερό πλάτος. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του στάτη, στη διαδρομή τους από το βόρειο προς το νότιο πόλο, διέρχονται μέσω του δρομέα και του διακένου. Επειδή η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του δρομέα, οι δυναμικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα (Σχ. 2.2). Έτσι, η διαδρομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο με τη μεγάλη μαγνητική αντίσταση είναι ελάχιστη. Επιπλέον, η μαγνητική ροή που διέρχεται από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλεται περίπου γραμμικά, καθώς ο δρομέας στρέφεται.

2.2.1 Λειτουργία Γεννήτριας

Θεωρούμε ότι ο δρομέας της στοιχειώδους μηχανής (Σχ. 2.1), στρέφεται από μια κινητήρια

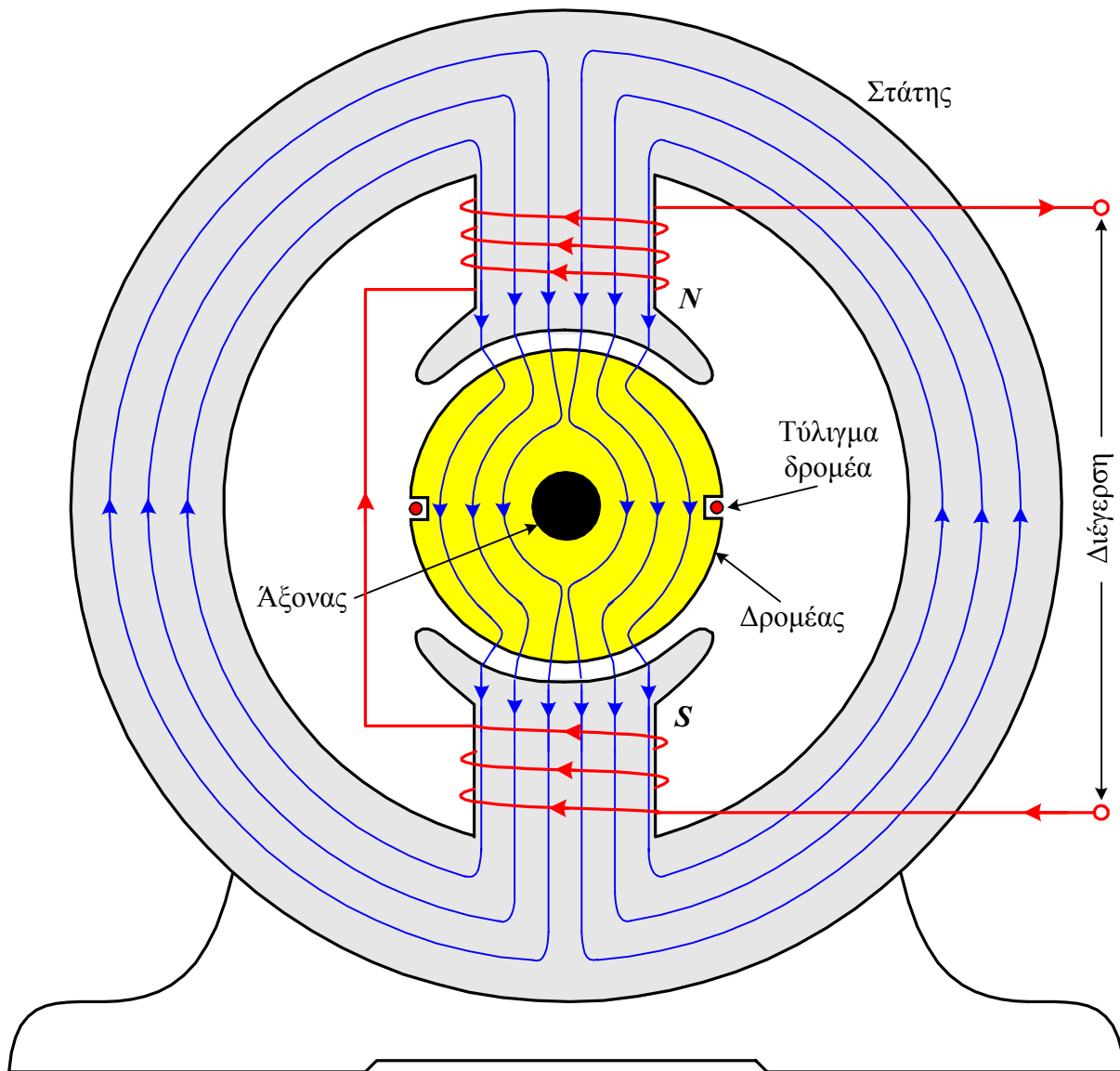
μηχανή. Στην περίπτωση αυτή, στα άκρα του ορθογώνιου πλαισίου του δρομέα αναπτύσσεται μια τάση εξ επαγωγής και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Η ολική τάση στα άκρα του πλαισίου, είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων στις τέσσερις πλευρές του. Η τάση σε κάθε πλευρά του πλαισίου ορίζεται από την Εξ. 1.18, την οποία επαναλαμβάνουμε

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \tag{2.1}$$

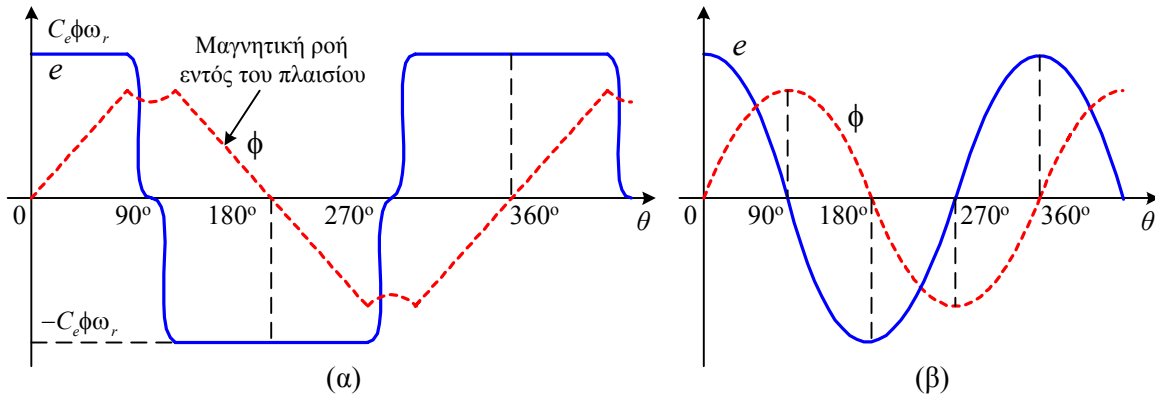
Καθώς το πλαίσιο περιστρέφεται στις περιοχές κάτω από τους πόλους, το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό και κάθετο στις πλευρές του πλαισίου ab και $γδ$, ενώ είναι παράλληλο στις πλευρές του $βγ$ και $αδ$. Επομένως, στις πλευρές ab και $γδ$ του πλαισίου με μήκος l , επάγεται τάση ίση με

$$e_{ab} = e_{γδ} = vBl \tag{2.2}$$

Στις πλευρές $βγ$ και $αδ$ δεν επάγεται τάση, καθώς στρέφονται παράλληλα προς το μαγνητικό πεδίο.



Σχ. 2.2 Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου στη στοιχειώδη ηλεκτρική μηχανή, όπου διακρίνεται πλήρως ο στάτης. Οι μαγνητικές γραμμές είναι κάθετες στην επιφάνεια του δρομέα



Σχ. 2.3 Κυματομορφή της τάσης εξόδου και της μαγνητικής ροής στη στοιχειώδη γεννήτρια με μεταλλικό κύλινδρο (α) και χωρίς μεταλλικό κύλινδρο (β) στο εσωτερικό του πλαισίου του δρομέα

Η ολική επαγόμενη τάση στο πλαίσιο, όταν αυτό βρίσκεται κάτω από τους πόλους, είναι ίση με

$$e = 2vBl \tag{2.3}$$

Στις μικρές περιοχές έξω από τους πόλους, το μαγνητικό πεδίο είναι μηδέν. Έτσι, στις περιοχές αυτές η επαγόμενη τάση στο πλαίσιο είναι μηδέν. Αν το πλαίσιο στραφεί κατά 180°, από τη θέση που εικονίζεται στο Σχ. 2.1, η πλευρά ab θα βρεθεί απέναντι από το νότιο πόλο και η πλευρά $γδ$ απέναντι από το βόρειο. Έτσι, η πολικότητα της τάσης εξόδου θα αντιστραφεί. Η κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πλαισίου, η οποία είναι ίση με την τάση εξόδου της γεννήτριας και η μαγνητική ροή που διέρχεται από το πλαίσιο, εικονίζονται στο Σχ. 2.3α. Η μεταβολή της τάσης και της ροής θα ήταν ημιτονοειδής, αν δεν υπήρχε ο μεταλλικός κύλινδρος στο εσωτερικό του πλαισίου (Σχ. 2.3β).

Ο υπολογισμός της επαγόμενης τάσης στο πλαίσιο από την Εξ. (2.3) δεν είναι βολικός. Στην Εξ. (2.3), v είναι η γραμμική ταχύτητα των πλευρών ab και $γδ$ του πλαισίου, η οποία είναι ίση με

$$v = r\omega_r \tag{2.4}$$

όπου, r είναι η ακτίνα του πλαισίου (δρομέα) και ω_r η γωνιακή του ταχύτητα σε rad/s. Η επιφάνεια καθενός από τους δύο πόλους του στάτη S_p , αν αγνοήσουμε το μεταξύ τους κενό, είναι ίση με το μισό της παράπλευρης επιφάνειας του κυλίνδρου με ακτίνα r και μήκος l . Το πλάτος του διακένου είναι πολύ μικρό και αμελείται, οπότε

$$S_p = \frac{1}{2}(2\pi rl) = \pi rl \tag{2.5}$$

Καθώς η μαγνητική επαγωγή είναι σταθερή κάτω από τους πόλους, η μαγνητική ροή του κάθε πόλου είναι ίση με

$$\phi = S_p B \tag{2.6}$$

Εισάγοντας τις Εξ. (2.4), (2.5) και (2.6) στην Εξ. (2.3), έχουμε

$$e = C_e \phi \omega_r = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\} \phi \omega_r \tag{2.7}$$

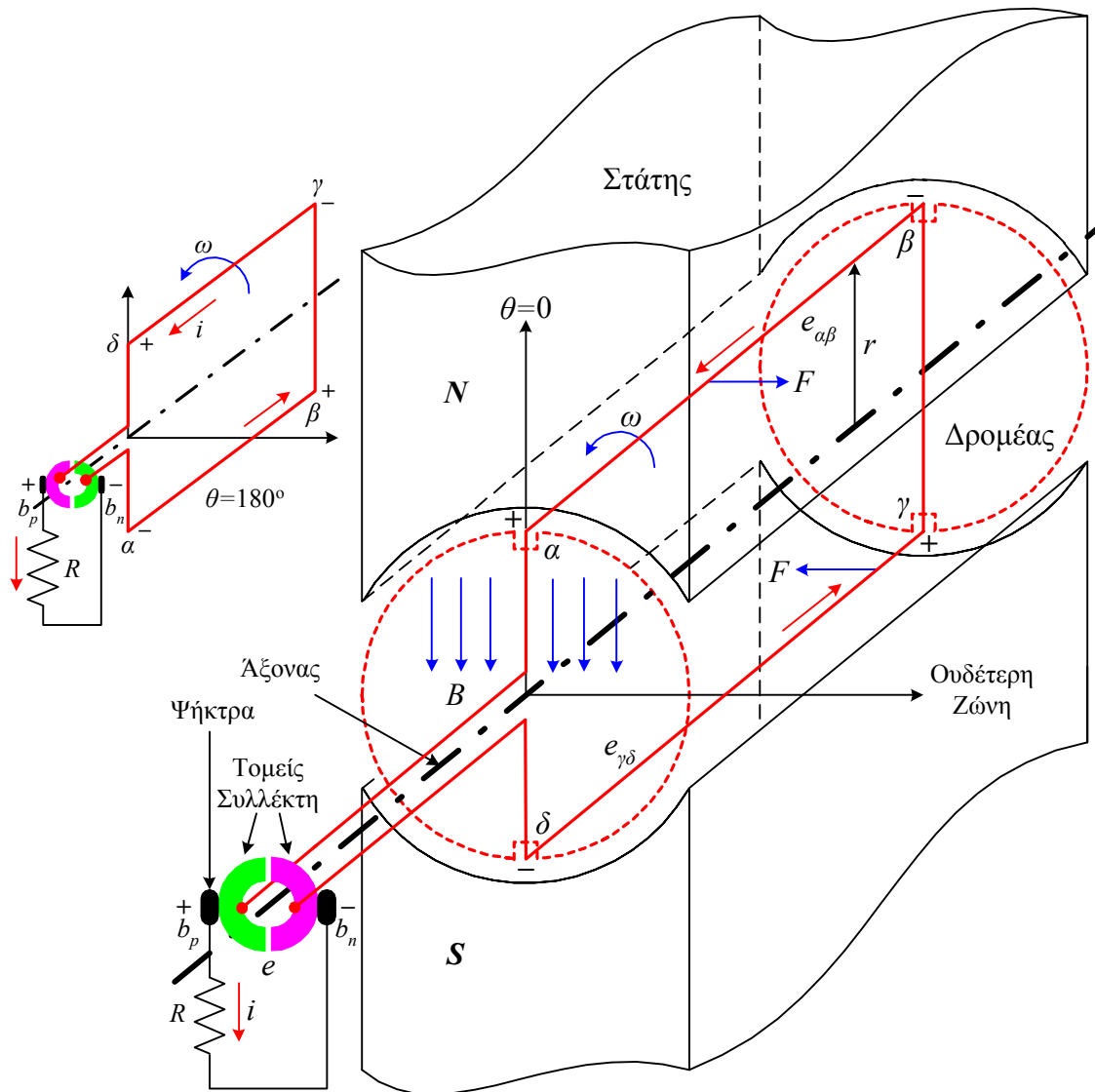
Η Εξ. (2.7) ορίζει την τάση που επάγεται στο εσωτερικό κάθε ηλεκτρικής μηχανής, ως το γινόμενο τριών όρων. Ο πρώτος όρος είναι ένας συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από την

κατασκευαστική δομή της κάθε μηχανής. Στη στοιχειώδη μηχανή ο συντελεστής C_e έχει την τιμή $2/\pi$. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στη μαγνητική ροή του κάθε πόλου και ο τρίτος είναι η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

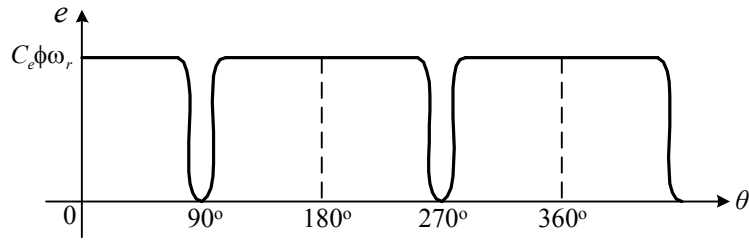
Όταν η στοιχειώδης γεννήτρια του Σχ. 2.1 δεν τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, το πλαίσιο δεν διαρρέεται από ρεύμα. Αν στους ακροδέκτες εξόδου της γεννήτριας συνδέσουμε ένα φορτίο R , τότε το πλαίσιο διαρρέεται από το ρεύμα του φορτίου i . Η φορά του ρεύματος προκύπτει από το νόμο του *Lenz* και εικονίζεται στο Σχ. 2.1. Εξαιτίας του ρεύματος στο πλαίσιο, ασκούνται στις πλευρές του $\alpha\beta$ και $\gamma\delta$ δυνάμεις *Laplace*. Οι δυνάμεις *Laplace*, με τη δεδομένη από το νόμο του *Lenz* κατεύθυνση του ρεύματος, έχουν φορά αντίθετη από τη φορά που η κινητήρια μηχανή προσπαθεί να στρέψει τη γεννήτρια. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που παράγει η γεννήτρια (καταναλώνει το φορτίο), τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι το έργο που προσφέρει η κινητήρια μηχανή.

2.2.2 Γεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος

Η στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή του Σχ. 2.1, κατά τη λειτουργία της ως γεννήτρια παράγει μια τάση εξόδου με τη μορφή του Σχ. 2.3. Η τάση εξόδου της γεννήτριας είναι εναλλασσόμενη. Επομένως, η διάταξη του Σχ. 2.1 είναι μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχ. 2.4 Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος ως γεννήτρια



Σχ. 2.5 Κυματομορφή της τάσης εξόδου, της στοιχειώδους γεννήτριας συνεχούς ρεύματος

Προκειμένου να παράγουμε συνεχή τάση από τη στοιχειώδη μηχανή, συνδέουμε τα άκρα του πλαισίου με δύο ημιδακτυλίους (Σχ. 2.4). Οι δύο ημιδακτύλιοι ονομάζονται *τομείς του συλλέκτη*. Οι δύο ψήκτρες εφάπτονται με τους τομείς του συλλέκτη. Έτσι, η ψήκτρα b_p συνδέεται πάντα με την πλευρά του πλαισίου που είναι απέναντι από το βόρειο πόλο και αναπτύσσει θετική τάση. Αντίστοιχα, η ψήκτρα b_n συνδέεται πάντα με την πλευρά του πλαισίου που είναι απέναντι από το νότιο πόλο και αναπτύσσει αρνητική τάση. Επομένως, μέσω του συλλέκτη επιτυγχάνεται η ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης που επάγεται στο πλαίσιο (Σχ. 2.5). Παρόλο που η τάση και το ρεύμα στο φορτίο είναι συνεχή, το ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα είναι εναλλασσόμενο.

Οι ψήκτρες κάθε 180° μεταβαίνουν από τον ένα τομέα του συλλέκτη στον άλλο, με συνέπεια τη στιγμιαία βραχυκύκλωση του πλαισίου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *μεταγωγή (commutation)*. Η μεταγωγή πρέπει να γίνεται τη χρονική στιγμή που η επαγόμενη τάση στο πλαίσιο είναι μηδέν, έτσι ώστε να μην προκαλούνται σπινθηρισμοί. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η τοποθέτηση των ψηκτρών στην κατάλληλη θέση (ουδέτερη ζώνη). Επομένως, μεταγωγή ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία οι εναλλασσόμενες τάσεις και τα ρεύματα στο εσωτερικό της μηχανής συνεχούς ρεύματος μετατρέπονται σε συνεχείς τάσεις και ρεύματα στα άκρα της.

2.2.3 Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος

Αν τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα του δρομέα (πλαίσιο), της στοιχειώδους μηχανής συνεχούς ρεύματος με συνεχή τάση, τότε αυτή θα λειτουργήσει ως κινητήρας. Η περιστροφή του δρομέα οφείλετε στις δυνάμεις *Laplace* που αναπτύσσονται στις πλευρές $\alpha\beta$ και $\gamma\delta$ του πλαισίου, όταν αυτές βρίσκονται κάτω από τους πόλους. Η δύναμη *Laplace* σε κάθε πλευρά του πλαισίου ορίζεται από την Εξ. 1.19, η οποία επαναλαμβάνεται

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{I} \times \mathbf{B}) \tag{2.8}$$

Η φορά των δυνάμεων *Laplace* εικονίζεται στο Σχ. 2.6, ενώ το μέτρο τους είναι ίσο με

$$F = F_{\alpha\beta} = F_{\gamma\delta} = i l B \tag{2.9}$$

Στις πλευρές $\beta\gamma$ και $\alpha\delta$ του πλαισίου δεν αναπτύσσονται δυνάμεις

$$F_{\beta\gamma} = F_{\alpha\delta} = 0 \tag{2.10}$$

Συνέπεια των δυνάμεων *Laplace* είναι η ανάπτυξη των ροπών

$$T_{\alpha\beta} = T_{\gamma\delta} = r F \sin \delta = r i l B \tag{2.11}$$

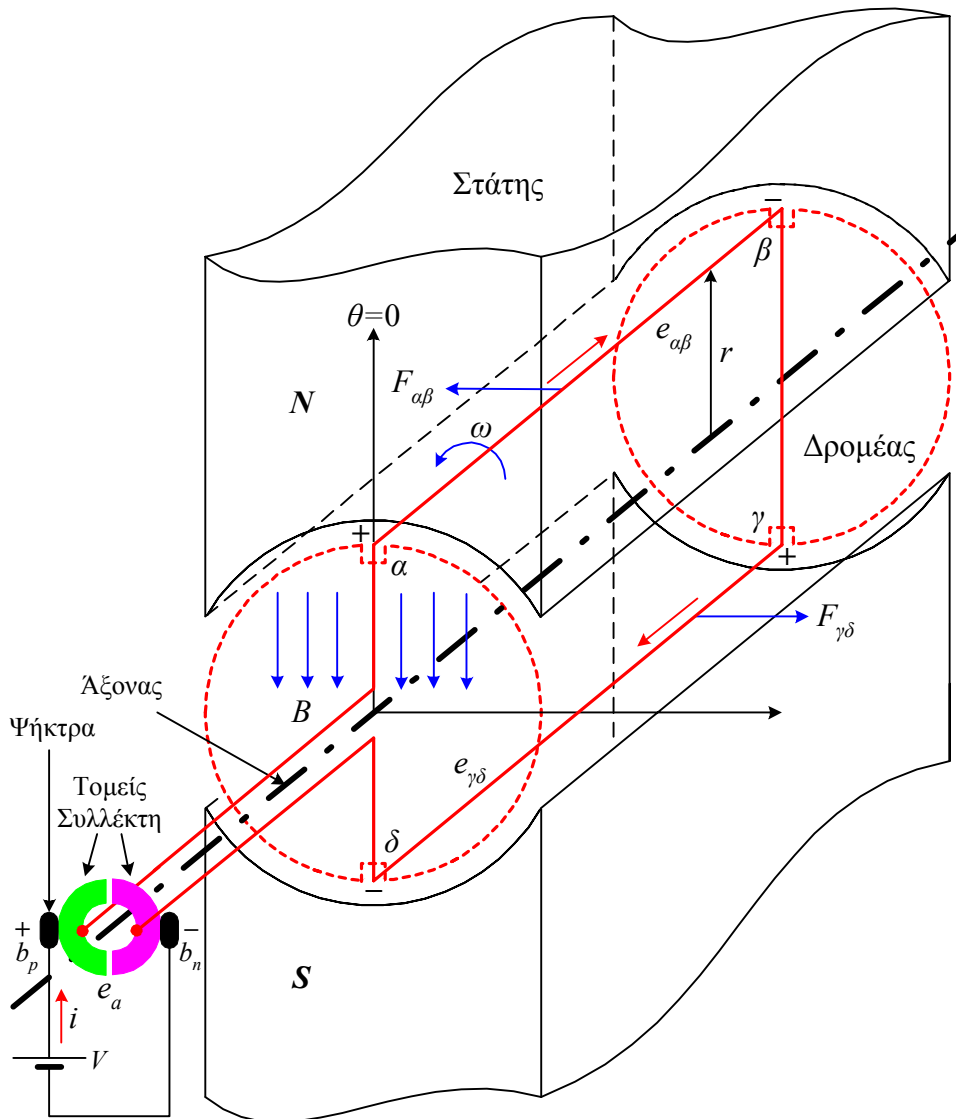
όπου δ είναι η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων \mathbf{r} και \mathbf{F} , η οποία είναι ίση με 90° . Η συνολική ροπή που αναπτύσσεται στο πλαίσιο, όταν αυτό βρίσκεται κάτω από τους πόλους, είναι ίση με

$$T = T_{\alpha\beta} + T_{\gamma\delta} = 2rilB = C_T i\phi = \left\{ \frac{2}{\pi} \right\} i\phi \quad (2.12)$$

Η ροπή είναι μηδενική όταν το πλαίσιο βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ των πόλων. Επομένως, η κυματομορφή της ροπής είναι η ίδια μ' εκείνη της τάσης εξόδου στο Σχ. 2.5. Η φορά περιστροφής είναι η ίδια μ' εκείνη της γεννήτριας, δηλαδή αντίθετη από τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Όμως, η φορά του ρεύματος στο πλαίσιο είναι αντεστραμμένη, σε σχέση με τη λειτουργία της γεννήτριας (Σχ. 2.4).

Η Εξ. (2.12) ορίζει τη ροπή στο δρομέα κάθε ηλεκτρικής μηχανής. Η ροπή εξαρτάται από το συντελεστή C_T , ο οποίος καθορίζεται από τον τύπο της κάθε μηχανής, το ρεύμα του δρομέα i και τη μαγνητική ροή κάθε πόλου ϕ . Στο στοιχειώδη κινητήρα του Σχ. 2.6 είναι, $C_T = 2/\pi$.

Όταν η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, στο πλαίσιο αναπτύσσεται μια τάση εξ επαγωγής, καθώς το πλαίσιο στρέφεται εντός του μαγνητικού πεδίου του στάτη (λειτουργία γεννήτριας). Η τάση αυτή ονομάζεται *αντιηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα*, e_a .



Σχ. 2.6 Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος ως κινητήρας

2.3 ΤΟ ΤΥΛΙΓΜΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Ο δρομέας των μηχανών συνεχούς ρεύματος αποτελείται από τον άξονα, στον οποίο στηρίζεται μια κυλινδρική δομή από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, η οποία ονομάζεται *οπλισμός ή επαγωγικό τύμπανο (armature)*, το *συλλέκτη* και τον *ανεμιστήρα*. Ο συλλέκτης αποτελείται από τους τομείς, οι οποίοι κατασκευάζονται από χαλκό. Η διαφορά, ως προς το δρομέα, μιας πραγματικής μηχανής συνεχούς ρεύματος από τη στοιχειώδη μηχανή, αναφέρεται μόνο στο τύλιγμα του δρομέα. Στη στοιχειώδη μηχανή το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή ενός πλαισίου, οι σπείρες του οποίου είναι τοποθετημένες σε δύο αυλακώσεις του επαγωγικού τύμπανου. Στις πραγματικές μηχανές, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων πλαισίων, τα οποία ονομάζονται *ομάδες (coils)*. Κάθε ομάδα έχει ένα καθορισμένο αριθμό *σπειρών (turns)*. Οι ομάδες διαμορφώνονται στην επιθυμητή μορφή σε ειδικά καλούπια και στη συνέχεια τοποθετούνται στις αυλακώσεις του επαγωγικού τύμπανου. Τα άκρα των ομάδων συνδέονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους, μέσω των τομέων του συλλέκτη, σχηματίζοντας το τύλιγμα του οπλισμού (δρομέα).

Κανονικά κάθε ομάδα έχει άνοιγμα 180 ηλεκτρικές μοίρες. Οι ηλεκτρικές μοίρες θ_e συνδέονται με τις μηχανικές θ_m , με τη σχέση

$$\theta_e = \left(\frac{P}{2}\right)\theta_m \quad (2.13)$$

όπου, P είναι ο αριθμός των πόλων του στάτη. Σε μια τετραπολική μηχανή οι πόλοι είναι τοποθετημένοι κάθε 90 μηχανικές μοίρες στο στάτη. Στη στοιχειώδη διπολική μηχανή, οι πόλοι είναι τοποθετημένοι κάθε 180 μηχανικές μοίρες. Επομένως, το άνοιγμα των 180 ηλεκτρικών μοιρών στις ομάδες σημαίνει ότι, τη στιγμή που η μια πλευρά της ομάδος βρίσκεται κάτω από το κέντρο ενός πόλου, η άλλη πλευρά της βρίσκεται κάτω από το κέντρο του αντίθετου πόλου. Έτσι, οι τάσεις στις δύο πλευρές των ομάδων έχουν συνεχώς το ίδιο πλάτος αλλά αντίθετη πολικότητα. Αυτές οι ομάδες ονομάζονται *πλήρους βήματος (full pitch coils)*. Συχνά οι ομάδες έχουν άνοιγμα μικρότερο από 180°, οπότε ονομάζονται *ομάδες κλασματικού βήματος (fractional pitch coils)*.

Το τύλιγμα του δρομέα διακρίνεται σε *απλό (simplex)* και *πολλαπλό (multiplex)*. Έτσι, ένα διπλό τύλιγμα αποτελείται από δύο απλά ανεξάρτητα μεταξύ τους τυλίγματα. Τα δύο επιμέρους τυλίγματα συνδέονται εναλλάξ στους τομείς του συλλέκτη. Το ένα στους τομείς 1, 3, 5 ... και το άλλο στους τομείς 2, 4, 6 ... Αντίστοιχα, τα τρία ανεξάρτητα τυλίγματα του τριπλού τυλίγματος, συνδέονται ανά τρεις τομείς του συλλέκτη.

Ακόμη, τα τυλίγματα του δρομέα μπορεί να είναι *μιας ή συνηθέστερα δύο στρώσεων (two layer winding)*. Στο τύλιγμα δύο στρώσεων, σε κάθε αυλάκι του οπλισμού τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ανεξάρτητες ομάδες σπειρών.

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των ομάδων στους τομείς του συλλέκτη, τα τυλίγματα του δρομέα διακρίνονται σε, *βροχοτυλίγματα (lap windings)*, *κυματοτυλίγματα (wave windings)* και το συνδυασμό τους που ονομάζεται *ισοσταθμισμένο τύλιγμα (frog leg)*.

2.3.1 Τα Βροχοτυλίγματα

Το δυσκολότερο τμήμα στην κατασκευή μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, είναι η υλοποίηση του τυλίγματος του δρομέα. Το τύλιγμα με την απλούστερη διαδικασία κατασκευής είναι το *απλό βροχοτύλιγμα*. Σ' αυτό, τα άκρα της κάθε ομάδας συνδέονται σε γειτονικούς τομείς του συλλέκτη. Το απλό βροχοτύλιγμα έχει τόσους παράλληλους κλάδους, για το ρεύμα εξόδου της μηχανής, όσοι είναι και οι πόλοι της. Ακόμη, ο αριθμός των ψηκτρών είναι ίσος με τον

αριθμό των πόλων. Οι ψήκτρες με την ίδια πολικότητα συνδέονται αγωγίμα μεταξύ τους. Στο Σχ. 2.7 εικονίζεται η δομή ενός απλού βροχοτυλίγματος με 16 ομάδες μιας τετραπολικής μηχανής.

Το διπλό βροχοτύλιγμα αποτελείται από δύο ανεξάρτητα απλά βροχοτυλίγματα. Τα άκρα των ομάδων καθενός τυλίγματος συνδέονται τώρα ανά δύο τομείς του συλλέκτη. Ο αριθμός των παράλληλων κλάδων του τυλίγματος είναι διπλάσιος από εκείνο του απλού βροχοτυλίγματος, δηλαδή διπλάσιος από τον αριθμό των πόλων της μηχανής.

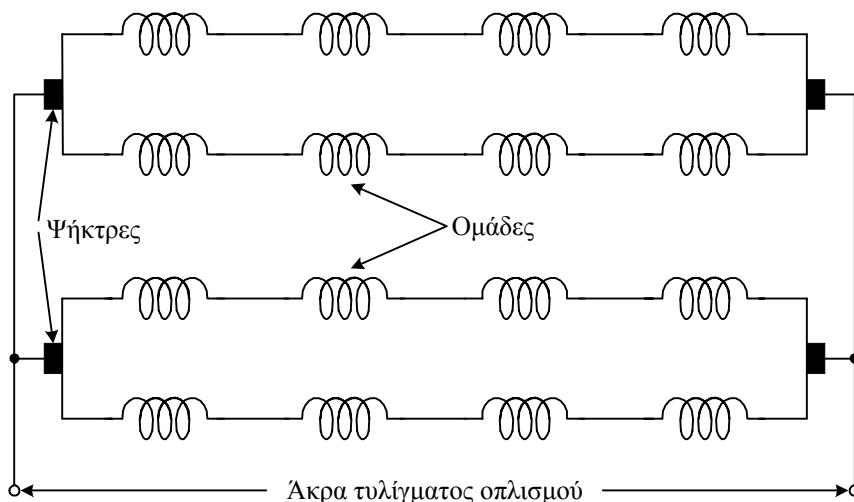
Καθώς τα βροχοτυλίγματα μπορούν να έχουν πολλούς παράλληλους κλάδους, σε εφαρμογές χαμηλών τάσεων και υψηλών ρευμάτων χρησιμοποιούνται μηχανές με πολλούς πόλους και βροχοτύλιγμα στο δρομέα.

2.3.2 Τα Κυματοτυλίγματα

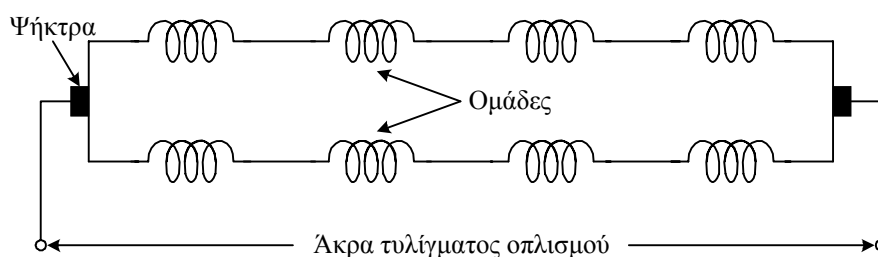
Στο απλό κυματοτύλιγμα οι ομάδες συνδέονται στους τομείς του συλλέκτη με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματιστούν δύο παράλληλοι κλάδοι στο ρεύμα εξόδου της μηχανής (Σχ. 2.8). Έτσι, ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων αρκούν δύο ψήκτρες. Το διπλό κυματοτύλιγμα, το οποίο αποτελείται από δύο απλά κυματοτυλίγματα, έχει τέσσερις παράλληλους κλάδους, το τριπλό έξι κλάδους, κ.ο.κ. Τα κυματοτυλίγματα, επειδή οι περισσότερες ομάδες τους συνδέονται στη σειρά, είναι κατάλληλα στις μηχανές υψηλών τάσεων.

2.3.3 Τα Ισοσταθμισμένα Τυλίγματα

Τα ισοσταθμισμένα τυλίγματα προκύπτουν από το συνδυασμό ενός βροχοτυλίγματος μ' ένα κυματοτύλιγμα. Ο αριθμός των παράλληλων κλάδων των ισοσταθμισμένων τυλιγμάτων είναι ίσος με $2Pm$, όπου P είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής και m η πολλαπλότητα του βροχοτυλίγματος.



Σχ. 2.7 Απλό βροχοτύλιγμα τετραπολικής μηχανής με 16 ομάδες



Σχ. 2.8 Απλό κυματοτύλιγμα

2.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, όπως και κάθε ηλεκτρική μηχανή, αποτελείται από το στρεφόμενο τμήμα, το οποίο ονομάζεται δρομέας και το ακίνητο τμήμα που ονομάζεται στάτης. Στην κατασκευαστική δομή του δρομέα και ιδιαίτερα του τυλίγματός του, έχουμε αναφερθεί στην παρ. 2.3. Ο στάτης της πραγματικής μηχανής συνεχούς ρεύματος αποτελείται από το κέλυφος, το ζύγωμα (*yoke*), τους κύριους και τους βοηθητικούς πόλους και το ψηκτροφορέα με τις ψήκτρες. Ακόμη, στο στάτη υπάρχουν το *τύλιγμα διέγερσης*, το *τύλιγμα των βοηθητικών πόλων* και το *τύλιγμα αντιστάθμισης*. Η πλήρης σχηματική δομή μιας τετραπολικής μηχανής συνεχούς ρεύματος εικονίζεται στο Σχ. 2.9. Η φυσική κατασκευαστική δομή των μηχανών συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχ. 2.10.

Το κέλυφος είναι το εξωτερικό περίβλημα της μηχανής, το οποίο στο κάτω τμήμα του είναι κατάλληλα διαμορφωμένο ώστε να αποτελεί τη βάση στήριξης της μηχανής.

Το ζύγωμα, με κυλινδρικό σχήμα, αποτελεί τον κορμό της μηχανής. Το ζύγωμα στηρίζεται στο κέλυφος και κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα. Πάνω στο ζύγωμα τοποθετούνται οι μαγνητικοί πόλοι. Οι κύριοι πόλοι είναι αυτοί που δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Οι κύριοι πόλοι αποτελούνται από τον *πυρήνα* και το *πέδιλο*. Πέδιλο ονομάζεται το ειδικά διαμορφωμένο άκρο των πόλων στην πλευρά του δρομέα, το οποίο έχει ως σκοπό τη δημιουργία ομοιόμορφου πεδίου στο *διάκενο* (*air gap*), μεταξύ των πόλων και της επιφάνειας του δρομέα. Οι κύριοι πόλοι κατασκευάζονται αποκλειστικά από ελάσματα για τη μείωση των απωλειών από τα δινορεύματα. Τα δινορεύματα προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της ροής στους πόλους, καθώς η επιφάνεια του δρομέα εξαιτίας των αυλακώσεων της δεν είναι ομοιόμορφη.

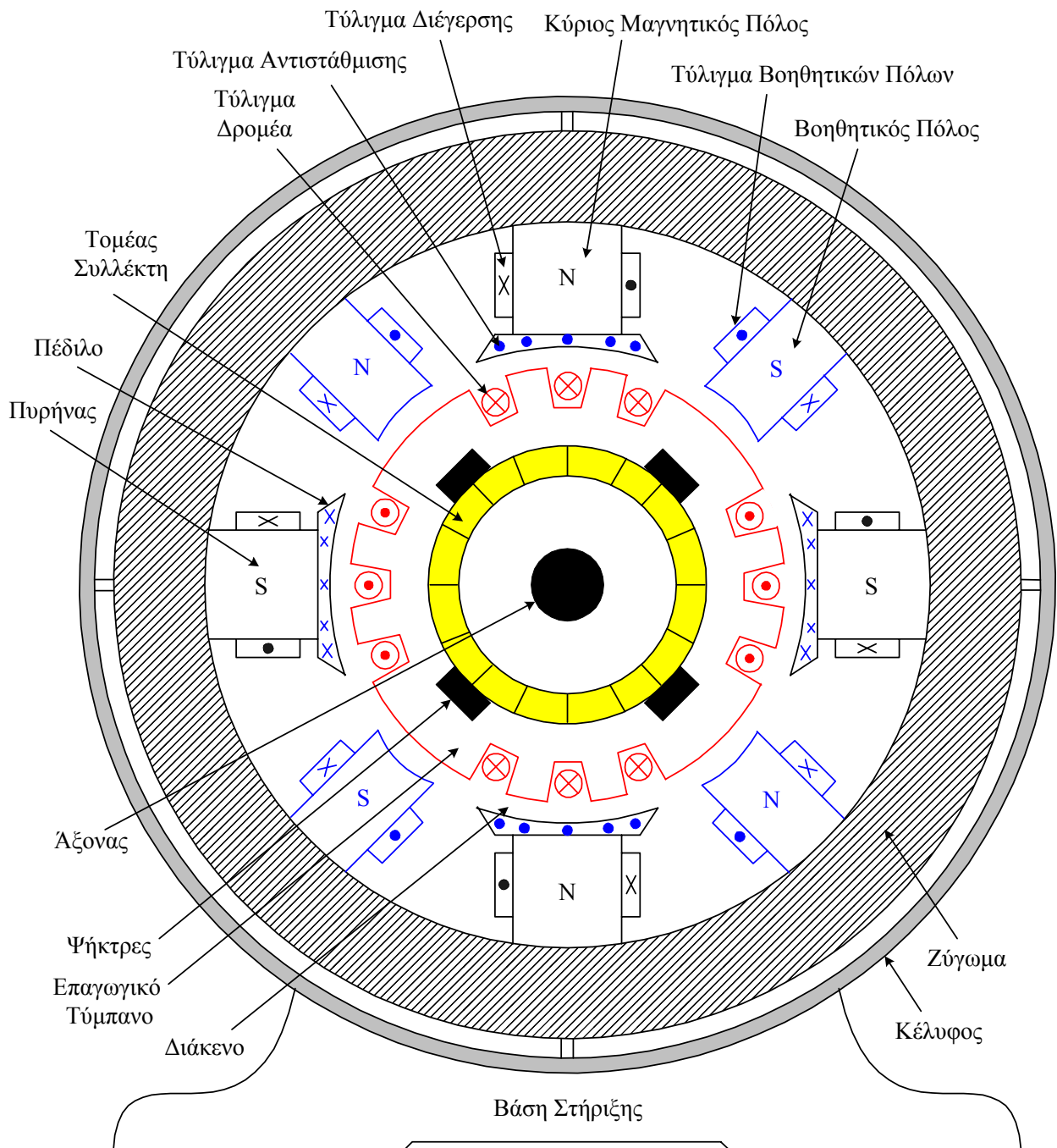
Στους κύριους πόλους τυλίγονται τα πηνία του τυλίγματος διέγερσης. Τα επιμέρους πηνία κάθε κύριου πόλου συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι το *τύλιγμα διέγερσης* με δύο άκρα. Το *τύλιγμα διέγερσης* διαρρέετε από συνεχές ρεύμα, προκαλώντας το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Στις σύγχρονες εφαρμογές των μηχανών συνεχούς ρεύματος το *τύλιγμα διέγερσης* τροφοδοτείται από μετατροπείς ισχύος, με αποτέλεσμα το ρεύμα διέγερσης να περιέχει αρμονικές συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων. Αυτός είναι ένας επιπλέον λόγος για την κατασκευή εκτός από τους κύριους πόλους και του ζυγώματος από ελάσματα.

Οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται μεταξύ των κύριων πόλων. Οι βοηθητικοί πόλοι όλο και συχνότερα κατασκευάζονται από ελάσματα, όπως και οι κύριοι μαγνητικοί πόλοι. Τα πηνία που τοποθετούνται σε κάθε βοηθητικό πόλο συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους, σχηματίζοντας το *τύλιγμα των βοηθητικών πόλων*. Στη σημασία των βοηθητικών πόλων, όπως και του τυλίγματος αντιστάθμισης, το οποίο τοποθετείται στα *πέδιλα* των κύριων πόλων, θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

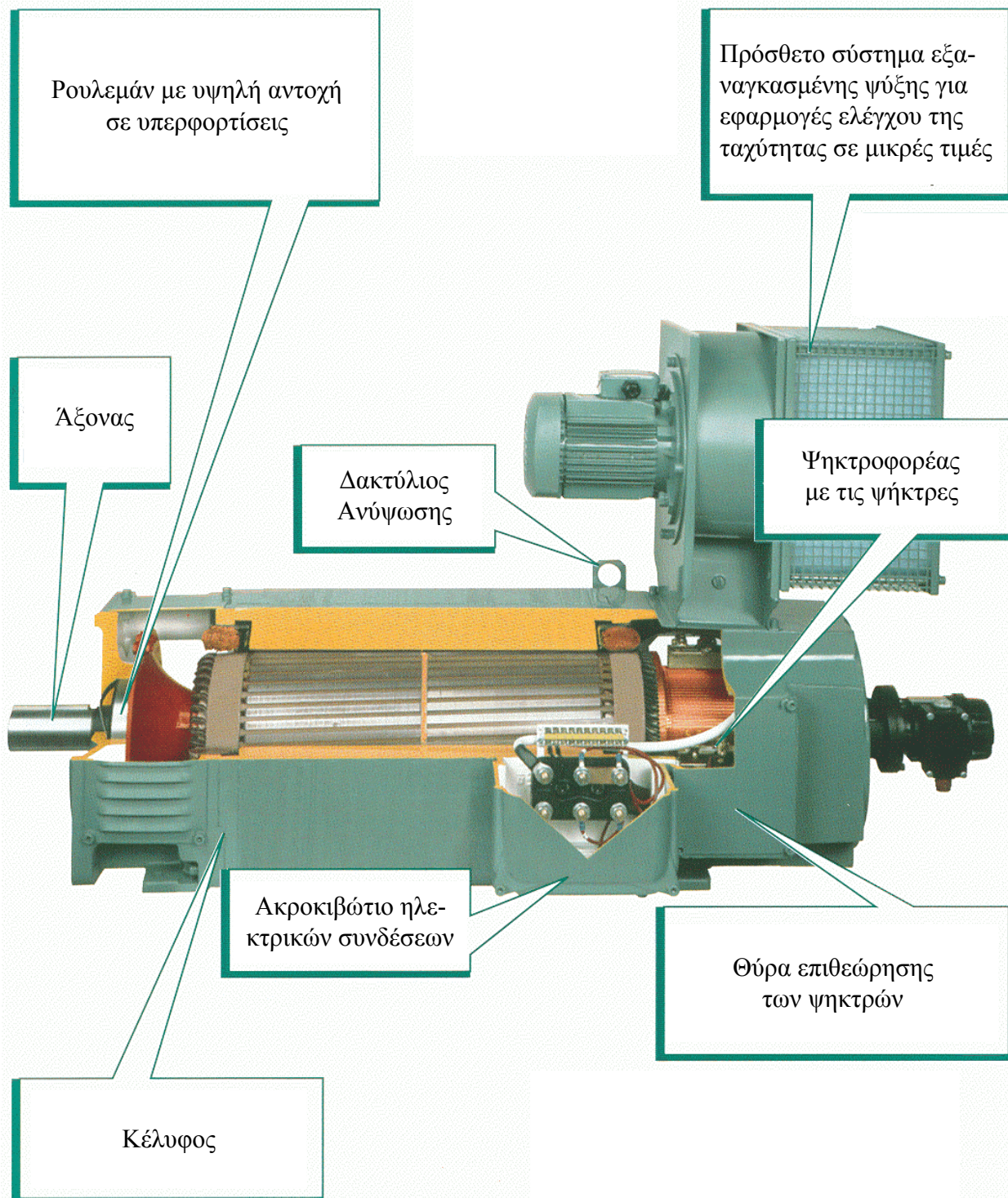
Οι ψήκτρες είναι κατασκευασμένες από άνθρακα, ή από μείγμα άνθρακα και γραφίτη. Διαθέτουν μεγάλη αγωγιμότητα και είναι πολύ πιο μαλακές από τους τομείς του συλλέκτη, έτσι ώστε ο συλλέκτης να φθείρεται ελάχιστα. Οι ψήκτρες είναι τοποθετημένες μέσα στις ψηκτροθήκες και πιέζονται στο συλλέκτη από ελατήρια που βρίσκονται στις ψηκτροθήκες. Η πίεση που ασκούν οι ψήκτρες στο συλλέκτη πρέπει να επιλέγεται με ακρίβεια. Αν η πίεση είναι πολύ μεγάλη η φθορά των ψηκτρών αλλά και του συλλέκτη είναι αυξημένη. Αν η πίεση είναι μικρή, οι ψήκτρες δεν διατηρούν συνεχώς την επαφή τους με το συλλέκτη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία σπινθηρισμών, με καταστροφικά αποτελέσματα και για τα δύο μέρη. Επιπλέον, για τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των ψηκτρών, η μηχανή δεν πρέπει να λειτουργεί χωρίς φορτίο.

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει ή να απορροφήσει μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, όπως και κάθε ηλεκτρική μηχανή, περιορίζεται από τη μόνωση των τυλιγμάτων της. Αν καταστραφεί η μόνωση των τυλιγμάτων, εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας, η μηχανή βραχυκυκλώνεται. Αν και η επισκευή της μηχανής είναι συνήθως δυνατή, είναι αρκετά δαπανηρή. Για να αποφύγουμε την καταστροφή της μόνωσης των τυλιγμάτων, η θερμοκρασία τους πρέπει να διατηρείται μικρότερη από μια μέγιστη τιμή. Η τιμή αυτή εξαρτάται από το υλικό

μόνωσης των τυλιγμάτων. Οι οργανισμοί τυποποίησης των διάφορων χωρών έχουν ορίσει μια σειρά από κλάσεις μόνωσης για τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, όπως και για τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, ανάλογα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στις ΗΠΑ η NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος έχει ορίσει τη κλάση μόνωσης A με μέγιστη θερμοκρασία 70°C, τη κλάση B με 100°C, την F με 130°C και την κλάση H με μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας τους 155°C.



Σχ. 2.9 Σχηματική παράσταση της κατασκευαστικής δομής της τετραπολικής μηχανής συνεχούς ρεύματος



Σχ. 2.10 Τυπική κατασκευαστική δομή των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Μηχανή της Leroy-Somer

2.5 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΤΥΜΠΑΝΟΥ

Όταν μια μηχανή συνεχούς ρεύματος λειτουργεί ως γεννήτρια, στα άκρα του τυλίγματος του δρομέα αναπτύσσεται μια τάση εξ επαγωγής. Το τύλιγμα του δρομέα δεν διαρρέεται από ρεύμα όταν η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο. Έτσι, στο εσωτερικό της μηχανής υφίσταται μόνο το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι κύριοι πόλοι του στάτη (*main field*). Όταν συνδεθεί φορτίο στα άκρα της γεννήτριας, το τύλιγμα του οπλισμού διαρρέεται από ένα ρεύμα, το οποίο είναι

ανάλογο με την ισχύ του φορτίου. Το ρεύμα αυτό προκαλεί το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (*armature field*), το οποίο παραμορφώνει το αρχικό πεδίο των κύριων πόλων της μηχανής. Η παραμόρφωση της μαγνητικής ροής των κύριων πόλων, από το πεδίο του οπλισμού, ονομάζεται *αντίδραση του επαγωγικού τύμπανου ή αντίδραση του οπλισμού (armature reaction)*.

Η αντίδραση του οπλισμού προκαλεί δύο πολύ σημαντικά προβλήματα στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Το πρώτο είναι η *μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης* και το δεύτερο η *μείωση του ολικού μαγνητικού πεδίου της μηχανής (flux weakening)*.

2.5.1 Μετατόπιση της Ουδέτερης Ζώνης

Ουδέτερη ζώνη στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ονομάζεται το επίπεδο, όπου η επαγόμενη τάση στο τύλιγμα του δρομέα είναι μηδέν. Στην ουδέτερη ζώνη το ολικό μαγνητικό πεδίο της μηχανής είναι μηδέν. Στο Σχ. 2.4 διακρίνεται η θέση της ουδέτερης ζώνης στη στοιχειώδη μηχανή όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο.

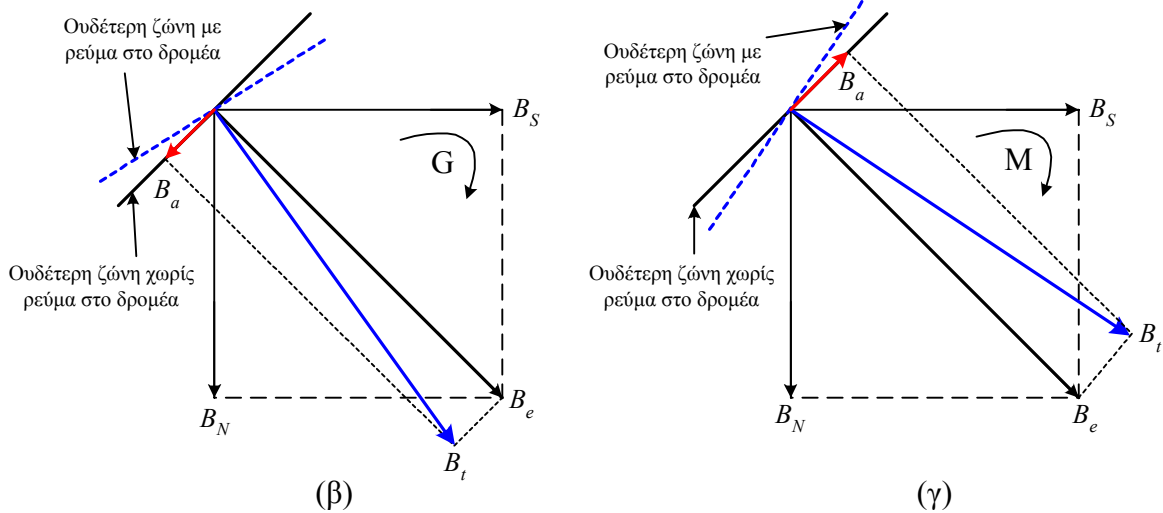
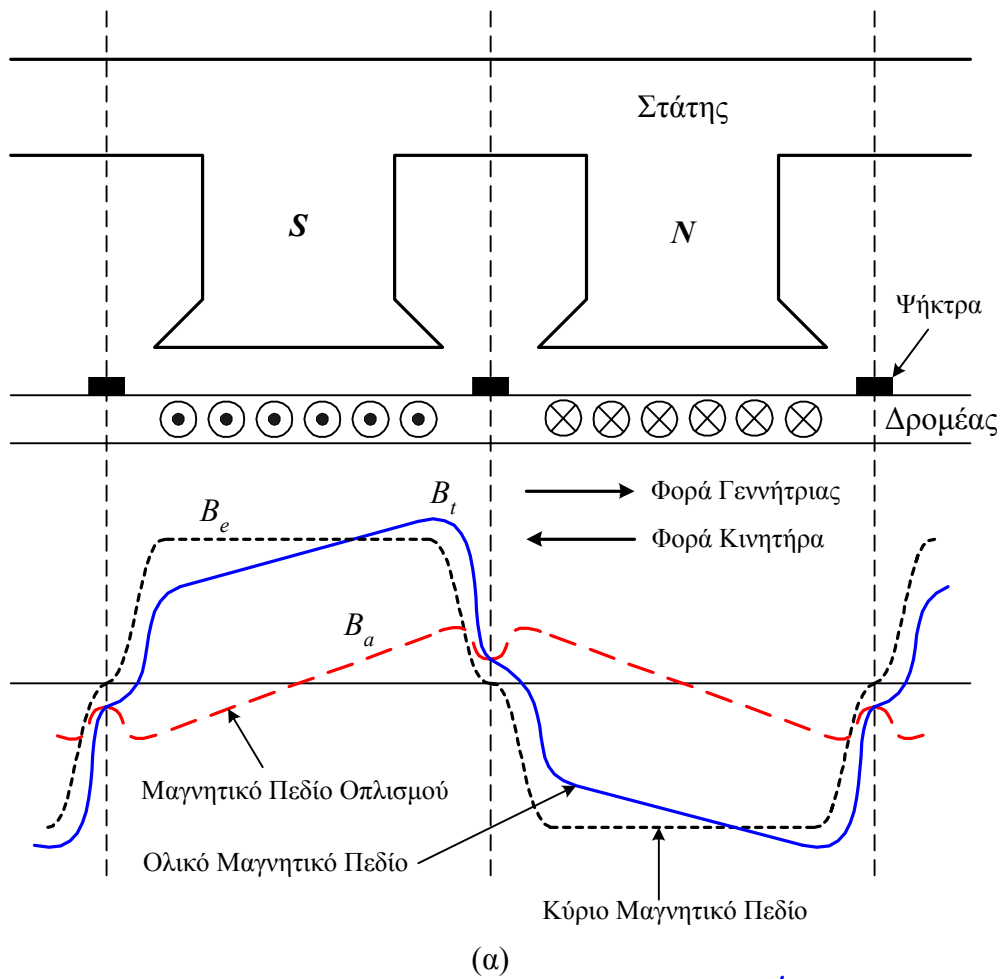
Η ροή του ρεύματος στο τύλιγμα του επαγωγικού τύμπανου, προκαλεί την ανάπτυξη του μαγνητικού πεδίου του δρομέα. Το πεδίο του δρομέα παραμορφώνει το κύριο μαγνητικό πεδίο των κύριων πόλων, όπως εικονίζεται στο Σχ. 2.11α, με αποτέλεσμα το ολικό μαγνητικό πεδίο να μηδενίζεται σε μια θέση διαφορετική από εκείνη της αφόρτιστης λειτουργίας. Επομένως, η ουδέτερη ζώνη έχει μετατοπιστεί από την αρχική της θέση, στο μέσο των κύριων πόλων. Η μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης είναι προς τη φορά περιστροφής στις γεννήτριες (Σχ. 2.11β) και αντίθετη της φοράς περιστροφής στους κινητήρες (Σχ. 2.11γ). Με δεδομένη τη φορά περιστροφής της μηχανής, το ρεύμα του δρομέα στους κινητήρες έχει αντίθετη φορά από εκείνο στις γεννήτριες. Η μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα στον οπλισμό, δηλαδή μεγαλύτερο το φορτίο της μηχανής.

Αν οι ψήκτρες της μηχανής τοποθετηθούν στην αρχική ουδέτερη ζώνη και η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο, τότε οι ψήκτρες θα βραχυκυκλώνουν τους τομείς του συλλέκτη, στις ομάδες των οποίων επάγεται μηδενική τάση. Αν η μηχανή φορτιστεί, η ουδέτερη ζώνη θα μετακινηθεί από την αρχική της θέση και οι ψήκτρες θα βραχυκυκλώνουν μέσω των τομέων του συλλέκτη ομάδες, με μη μηδενική τάση. Το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση σπινθηρισμών στο συλλέκτη, οι οποίοι προκαλούν τη δραστική μείωση της διάρκειας ζωής τόσο των ψηκτρών όσο και του συλλέκτη.

2.5.2 Μείωση του Ολικού Μαγνητικού Πεδίου

Η δεύτερη συνέπεια από την αντίδραση του επαγωγικού τύμπανου είναι η μείωση της ολικής μαγνητικής ροής, σε σχέση με τη ροή που παράγουν οι κύριοι πόλοι. Η μείωση της ροής εικονίζεται στο Σχ. 2.11α όπου, η εξασθένηση του πεδίου κάτω από τους πόλους είναι μεγαλύτερη από την ενίσχυσή του. Αυτό οφείλεται στη λειτουργία των μηχανών κοντά στον κορεσμό. Έτσι, για δεδομένη μεταβολή της μαγνητεγερτικής δύναμης, η μείωση στη μαγνητική ροή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αύξηση. Η μείωση της ροής προκαλεί στις γεννήτριες τη μείωση της παραγόμενης τάσης και στους κινητήρες την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής.

Οι δυσμενείς επιπτώσεις της αντίδρασης του οπλισμού θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με τη μετακίνηση των ψηκτρών, έτσι ώστε να βρίσκονται πάντα στην ουδέτερη ζώνη. Όμως, η θέση της ουδέτερης ζώνης εξαρτάται από το φορτίο. Επομένως, οι ψήκτρες πρέπει να μετακινούνται κάθε φορά που αλλάζει το φορτίο της μηχανής. Η συνεχής μετακίνηση των ψηκτρών δεν είναι εύκολη στην πράξη και επιπλέον δεν λύνει το πρόβλημα της μείωσης της ολικής ροής. Έτσι, για την αντιμετώπιση της αντίδρασης του οπλισμού χρησιμοποιούνται οι βοηθητικοί πόλοι και το τύλιγμα αντιστάθμισης.



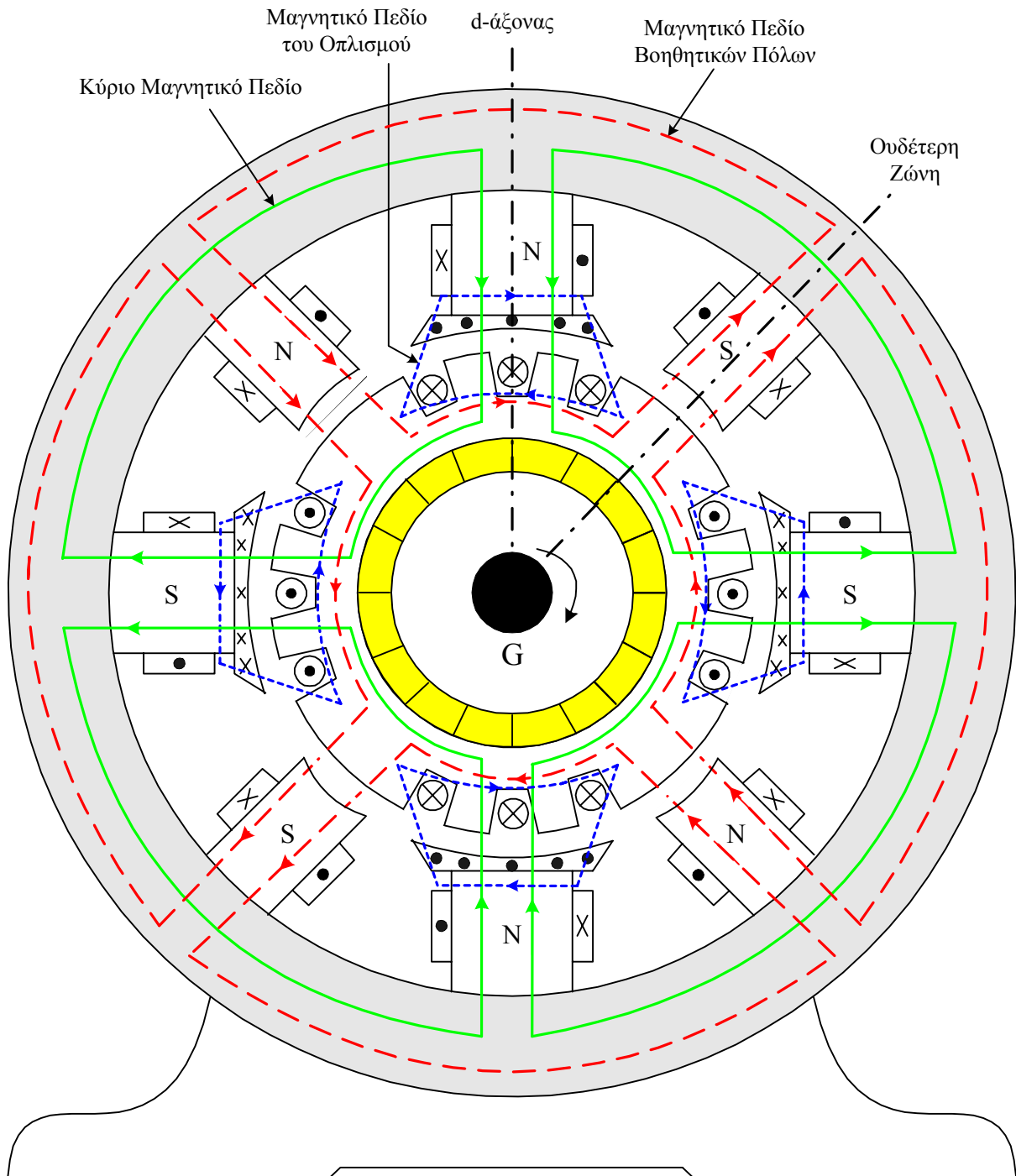
Σχ. 2.11 Παραμόρφωση του κύριου μαγνητικού πεδίου της μηχανής συνεχούς ρεύματος από το πεδίο του δρομέα (α). Μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης κατά τη φορά περιστροφής στις γεννήτριες (β) και αντίθετα της φοράς περιστροφής στους κινητήρες (γ)

2.5.3 Βοηθητικοί Πόλοι

Οι βοηθητικοί πόλοι είναι μικροί πόλοι, οι οποίοι τοποθετούνται μεταξύ των κύριων πόλων. Οι βοηθητικοί πόλοι δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξασφαλίζει ότι στις ομάδες που υφίστανται μεταγωγή, η επαγόμενη τάση είναι μηδενική. Αυτό σημαίνει την πλήρη εξάλειψη των σπινθηρισμών. Το μαγνητικό πεδίο των βοηθητικών πόλων επιδρά μόνο τοπικά, στις ομάδες

που υφίστανται τη μεταγωγή και δεν επηρεάζει αλλιώς τη λειτουργία της μηχανής. Έτσι, οι βοηθητικοί πόλοι δεν εξαλείφουν το πρόβλημα της μείωσης της ολικής ροής.

Για την εξάλειψη των σπινθηρισμών, σε κάθε τιμή του φορτίου, το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Στο Σχ. 2.12 εικονίζονται τα μαγνητικά πεδία σε μια τετραπολική μηχανή συνεχούς ρεύματος, όταν αυτή λειτουργεί ως γεννήτρια. Στην περίπτωση του κινητήρα, με την ίδια φορά περιστροφής, οι φορές των ρευμάτων στο τύλιγμα του δρομέα είναι αντίθετες. Επομένως, αντίθετοι είναι και οι βοηθητικοί πόλοι, οι οποίοι διαρρέονται από το ρεύμα του δρομέα.



Σχ. 2.12 Τα μαγνητικά πεδία σε μια τετραπολική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος

Οι βοηθητικοί πόλοι χρησιμοποιούνται σ' όλες της μηχανές συνεχούς ρεύματος με ισχύ μεγαλύτερη από 1hp. Αν και εξαλείφουν αποτελεσματικά τους σπινθηρισμούς, με σχετικά μικρό κόστος, δεν επιδρούν στην κατανομή του πεδίου κάτω από τους πόλους. Έτσι, δεν βελτιώνουν το πρόβλημα της μείωσης της ολικής ροής.

2.5.4 Τύλιγμα Αντιστάθμισης

Στις μηχανές και ιδιαίτερα στους κινητήρες μεγάλης ισχύος, το πρόβλημα της μείωσης της ολικής μαγνητικής ροής από την αντίδραση του οπλισμού είναι πολύ σημαντικό. Με τη χρήση του τυλίγματος αντιστάθμισης, αντιμετωπίζονται πλήρως οι επιπτώσεις από την αντίδραση του οπλισμού. Το τύλιγμα αντιστάθμισης (*compensating winding*) τοποθετείται σε αυλάκια στα πέδιλα των κύριων πόλων. Έτσι, είναι παράλληλο στους αγωγούς του τυλίγματος του οπλισμού. Το τύλιγμα αντιστάθμισης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι ίσο και αντίθετο από το πεδίο του οπλισμού. Έτσι, το τύλιγμα αντιστάθμισης εξουδετερώνει πλήρως το πεδίο του δρομέα κάτω από τους κύριους πόλους και η ολική ροή στην μηχανή είναι ίση με τη ροή που δημιουργεί το ρεύμα διέγερσης των κύριων πόλων, ανεξάρτητα από το φορτίο. Ταυτόχρονα εξαλείφονται και οι σπινθηρισμοί, καθώς η ουδέτερη ζώνη δεν μετακινείται από την αφόρτιστη θέση, εξαιτίας του φορτίου. Η ουδέτερη ζώνη μετατοπίζεται στην περίπτωση των βοηθητικών πόλων.

Το τύλιγμα αντιστάθμισης χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τους βοηθητικούς πόλους. Στην περίπτωση αυτή, οι βοηθητικοί πόλοι χρησιμοποιούνται μόνο για τον περιορισμό των υπερτάσεων εξαιτίας της αυτεπαγωγής των ομάδων και της ταχείας μεταβολής του ρεύματος σ' αυτές $L \cdot di/dt$. Έτσι, οι βοηθητικοί πόλοι είναι λιγότερο ισχυροί, απ' όσο στην περίπτωση που δεν υπάρχει το τύλιγμα αντιστάθμισης. Το μειονέκτημα του τυλίγματος αντιστάθμισης είναι το μεγάλο κόστος εγκατάστασής του στα πέδιλα των πόλων.

2.6 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Σ' όλες τις ηλεκτρικές μηχανές, όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, κατά τη διαδικασία της μετατροπής της ισχύος, από μηχανική σε ηλεκτρική (γεννήτριες) και το αντίστροφο στους κινητήρες, εμφανίζονται απώλειες ισχύος. Έτσι, η ισχύς εξόδου P_{out} είναι πάντα μικρότερη της ισχύος εισόδου P_{in} , κατά την ισχύ απωλειών P_{loss}

$$P_{out} = P_{in} - P_{loss} \quad (2.14)$$

Η ικανότητα μιας ηλεκτρικής μηχανής να μετατρέπει την ισχύ εισόδου, εκφράζεται από το βαθμό απόδοσης (*efficiency*) η

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.15)$$

Οι απώλειες προκαλούν τη θέρμανση της μηχανής και διακρίνονται στις εξής πέντε κατηγορίες:

➤ *Απώλειες χαλκού (copper losses)*. Οι απώλειες χαλκού P_{cu} οφείλονται στη ροή των ρευμάτων του δρομέα I_a και της διέγερσης I_e , από τα τυλίγματα του δρομέα με ωμική αντίσταση R_a και της διέγερσης με αντίσταση R_e

$$P_{cu} = I_a^2 R_a + I_e^2 R_e \quad (2.16)$$

➤ *Απώλειες σιδήρου (iron, core losses)*. Οι απώλειες σιδήρου ή πυρήνα P_{iron} περιλαμβάνουν τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων στα μεταλλικά τμήματα της μηχανής στο στάτη και το δρομέα. Το μέγεθος των απωλειών σιδήρου εξαρτάται από την ταχύτητα της μηχανής ω_r και το τετράγωνο της μαγνητικής ροής του πεδίου ϕ

$$P_{iron} \approx C_i \phi^2 \omega_r^{1.5} \quad (2.17)$$

➤ *Μηχανικές απώλειες (mechanical losses)*. Οι μηχανικές απώλειες P_{fw} , περιλαμβάνουν τις απώλειες τριβών (*friction*) και αερισμού (*windage*). Εξαρτώνται από την ταχύτητα της μηχανής.

➤ *Απώλειες ψηκτρών*. Αυτές οφείλονται στην πτώση τάση επαφής των ψηκτρών και ορίζονται από τη σχέση

$$P_{br} = V_{br} I_a \quad (2.18)$$

όπου, I_a είναι το ρεύμα του δρομέα και V_{br} η πτώση τάσης στις ψήκτρες.

Η τάση επαφής των ψηκτρών είναι σταθερή και περίπου ίση με 2V, για μια μεγάλη περιοχή τιμών του ρεύματος δρομέα.

➤ *Κατανεμημένες απώλειες (stray losses)*. Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες δεν μπορούν να ενταχθούν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών P_{stray} είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής, σε λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο. Μια προσεγγιστική σχέση υπολογισμού των κατανεμημένων απωλειών είναι η παρακάτω

$$P_{stray} \approx C_s I_a^2 \omega_r^2 \quad (2.19)$$

Οι ολικές απώλειες της μηχανής, στις οποίες οι απώλειες χαλκού αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα, είναι ίσες με

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{iron} + P_{fw} + P_{br} + P_{stray} \quad (2.20)$$

Τέλος, οι σταθερές $C_e = C_T$ που στη στοιχειώδη μηχανή έχουν την τιμή $2/\pi$, σε μια πραγματική μηχανή συνεχούς ρεύματος, ορίζονται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$C_e = C_T = \frac{z}{\pi b} \frac{P}{2} \quad (2.21)$$

όπου, P ο αριθμός των πόλων, z ο συνολικός αριθμός των αγωγών στο τύλιγμα του οπλισμού και b ο αριθμός των παράλληλων κλάδων στο τύλιγμα του δρομέα. Στη στοιχειώδη μηχανή είναι, $P = 2$, $z = 2$ και $b = 1$.