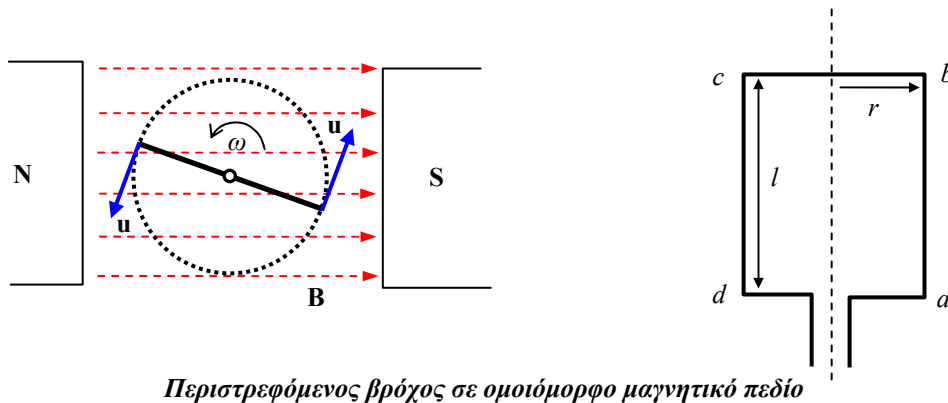


# ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος (ΕΡ) χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις *σύγχρονες* (που χρησιμοποιούνται συνήθως ως γεννήτριες) και τις *ασύγχρονες* (ή *επαγωγικές* – χρησιμοποιούνται κυρίως ως κινητήρες). Στην πρώτη περίπτωση το ρεύμα διέγερσης προέρχεται από ανεξάρτητες πηγές τροφοδοσίας ΣΡ, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το ρεύμα επάγεται στο κύκλωμα της διέγερσης. Επιπλέον, στις σύγχρονες μηχανές η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίδια με αυτή του πεδίου του στάτη, ενώ στις ασύγχρονες μηχανές είναι μικρότερη και εξαρτάται από το φορτίο. Σε αντίθεση με τις μηχανές ΣΡ, στις περισσότερες περιπτώσεις των μηχανών ΕΡ τα κυκλώματα διέγερσης βρίσκονται στο δρομέα και όχι στο στάτη. Στη συνέχεια εξετάζονται φαινόμενα που βοηθούν στην κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των μηχανών ΕΡ, με βασικότερο αυτό του *στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου*.

## ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΣ ΒΡΟΧΟΣ ΣΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Θα θεωρήσουμε την περίπτωση ενός αγωγίμου ορθογωνικού πλαισίου, το οποίο περιστρέφεται μέσα σε ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής  $\mathbf{B}$  (το πεδίο μπορεί να θεωρηθεί πως δημιουργείται από έναν ακίνητο μόνιμο μαγνήτη). Ακολούθως υπολογίζονται τόσο η τάση που επάγεται στο βρόχο όσο και η ροπή του, στην περίπτωση που αυτός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Αν και η συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι αντιπροσωπευτική για την περίπτωση μηχανών ΕΡ (εκεί το μαγνητικό πεδίο δεν είναι ομοιόμορφο), οι παράγοντες που επηρεάζουν την τάση και την ροπή είναι οι ίδιοι με αυτούς που εμφανίζονται στα αντίστοιχα μεγέθη στις μηχανές ΕΡ.



### Επαγόμενη τάση

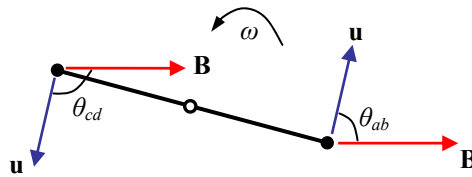
Λόγω της κίνησης των αγωγίμων τμημάτων του πλαισίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο, επάγεται τάση σε καθένα εξ αυτών. Η συνολικά επαγόμενη τάση θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους τιμών. Υπενθυμίζεται ότι η τάση που αναπτύσσεται σε αγωγό κινούμενο μέσα σε μαγνητικό πεδίο δίνεται από τη γενική σχέση  $e_{ind} = (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$ . Έτσι έχουμε:

Πλευρά ab:  $e_{ba} = Bul \sin \theta_{ab}$ .

Πλευρά bc:  $e_{cb} = 0$ , αφού τα διανύσματα  $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$  και  $\mathbf{l}$  είναι κάθετα μεταξύ τους.

Πλευρά cd:  $e_{dc} = Bul \sin \theta_{cd}$ .

Πλευρά da:  $e_{ad} = 0$ .



Απεικόνιση των διανυσμάτων της ταχύτητας των πλευρών  $ab, cd$

Συνεπώς, η συνολική τάση είναι ίση με

$$e_{ind} = e_{ba} + e_{cb} + e_{dc} + e_{ad} = Bul(\sin \theta_{ab} + \sin \theta_{cd})$$

και, δεδομένου ότι οι δύο γωνίες που εμφανίζονται είναι παραπληρωματικές ( $\theta_{ab} + \theta_{cd} = 180^\circ$ ), η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή

$$e_{ind} = 2Bul \sin \theta.$$

Αν τώρα θεωρήσουμε περιστροφή του βρόχου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , τότε θα είναι  $u = \omega r$  και  $\theta = \omega t$  (όπου  $t$  ο χρόνος), με αποτέλεσμα να προκύπτει ότι

$$e_{ind} = 2B\omega r l \sin \omega t.$$

Επειδή το εμβαδόν του βρόχου είναι ίσο με  $S = 2rl$ , ο παράγοντας  $2Brl$  ισούται με τη μαγνητική ροή που διέρχεται από το πλαίσιο, όταν το επίπεδο του τελευταίου γίνεται κάθετο στο διάνυσμα  $\mathbf{B}$ . Με άλλα λόγια, το γινόμενο  $2Brl$  παριστάνει τη μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής που διέρχεται από το βρόχο. Για το λόγο αυτό προκύπτει τελικά ότι

$$e_{ind} = \Phi_{\max} \omega \sin \omega t$$

υποδεικνύοντας την ημιτονοειδή χρονικά μορφή της  $e_{ind}$  και την εξάρτηση της από α) τη μαγνητική ροή, β) την ταχύτητα περιστροφής και γ) τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

### Επαγόμενη ροπή

Έστω τώρα ότι ο περιστρεφόμενος βρόχος διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως  $I$ . Αφού η ασκούμενη δύναμη υπολογίζεται από τη γενική σχέση  $\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$  και η αντίστοιχη ροπή έχει μέτρο  $\tau = rF \sin \theta$  (όπου  $\theta$  η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων  $\mathbf{r}$  και  $\mathbf{F}$ ), ισχύουν τα ακόλουθα:

Πλευρά ab:  $\tau_{ab} = BIlr \sin \theta_{ab}$  κατά την ωρολογιακή φορά.

Πλευρά bc:  $\tau_{bc} = 0$ , αφού η δύναμη είναι παράλληλη προς τον άξονα περιστροφής.

Πλευρά cd:  $\tau_{cd} = BIlr \sin \theta_{cd}$  κατά την ωρολογιακή φορά.

Πλευρά da:  $\tau_{da} = 0$ .

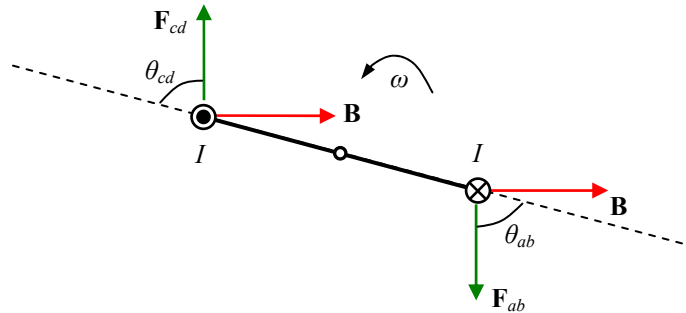
Η συνολική ροπή θα είναι ίση με

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

ή, με βάση αυτά που ειπώθηκαν προηγουμένως,

$$\tau_{ind} = 2BIlr \sin \theta.$$

Είναι φανερό ότι η ροπή αυτή μεγιστοποιείται όταν το επίπεδο του βρόχου γίνεται παράλληλο προς το μαγνητικό πεδίο, ενώ μηδενίζεται όταν το επίπεδο του βρόχου είναι κάθετο στο  $\mathbf{B}$ .



*Δυνάμεις στις πλευρές ab, cd του πλαισίου, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα*

Η μαθηματική έκφραση της ροπής μπορεί να πάρει μια διαφορετική μορφή (υποδεικνύοντας την αντιστοίχιση με τα μεγέθη των μηχανών ΕΡ), αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο  $B_{loop}$  που δημιουργείται από το ρευματοφόρο βρόχο είναι ανάλογο της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει, δηλ.

$$B_{loop} = cI$$

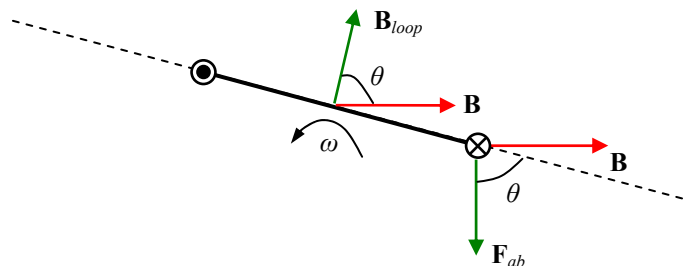
και έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του βρόχου (για θέσεις πάνω στο επίπεδό του). Η σταθερά  $c$  εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του βρόχου. Αντικαθιστώντας, προκύπτει μια σχέση της μορφής

$$\tau_{ind} = CB_{loop} B \sin \theta$$

ή, σε διανυσματική μορφή

$$\tau_{ind} = C(\mathbf{B}_{loop} \times \mathbf{B})$$

αφού προκύπτει ότι η γωνία  $\theta$  ισούται με τη γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα  $\mathbf{B}_{loop}$  και  $\mathbf{B}$ . Από εδώ φαίνεται πως οι παράγοντες που επηρεάζουν την επαγόμενη ροπή είναι α) το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου του στρεφόμενου βρόχου, β) το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου του στάτη (δηλ. το εξωτερικό πεδίο), γ) το ημίτονο της σχετικής γωνίας που σχηματίζουν τα δύο πεδία και δ) τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.



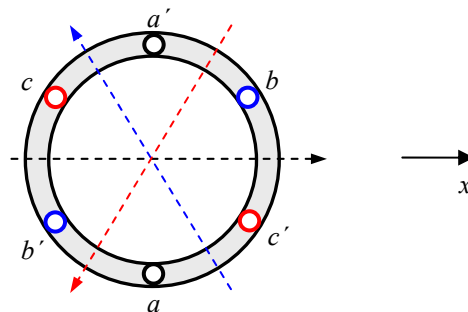
*Συσχέτιση του υπάρχοντος μαγνητικού πεδίου με αυτό του πλαισίου*

## ΤΟ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται πως αν στο εσωτερικό μιας μηχανής υπάρχουν δύο μαγνητικά πεδία, τότε δημιουργείται ροπή που τείνει να τα ευθυγραμμίσει. Αν το ένα μαγνητικό πεδίο προέρχεται από το στάτη και το δεύτερο από το δρομέα, η εμφανιζόμενη ροπή θα εξαναγκάσει το δρομέα να περιστραφεί, μέχρι να ευθυγραμμιστούν τα δύο πεδία. Επομένως, αν είναι δυνατό το μαγνητικό πεδίο του στάτη να περιστρέφεται, τότε ο δρομέας θα εξαναγκαστεί να τον “κυνηγά” σε κυκλική κατεύθυνση. Σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται ουσιαστικά η λειτουργία των κινητήρων ΕΡ. Ακολούθως παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί η περιστροφή του μαγνητικού πεδίου.

Ας θεωρήσουμε την απλούστερη περίπτωση όπου στο στάτη τοποθετούνται τρία τυλίγματα, τα οποία απέχουν ανά δύο γωνιακή απόσταση ίση με  $120^\circ$ . Η διάταξη αυτή θεωρείται ως τύλιγμα δύο πόλων, διότι – όπως αποδεικνύεται παρακάτω – παράγει ουσιαστικά ένα στρεφόμενο σύστημα αποτελούμενο από ένα βόρειο και ένα νότιο μαγνητικό πόλο. Το συγκεκριμένο *τριφασικό τύλιγμα* θεωρείται συμμετρικό, με την έννοια ότι τα επιμέρους τυλίγματα έχουν όλα την ίδια αντίσταση και αποτελούνται από το ίδιο πλήθος σπειρών. Τροφοδοτώντας τα τυλίγματα αυτά με τριφασικό σύστημα ρευμάτων, οι αντίστοιχες εντάσεις θα είναι της μορφής

$$\begin{aligned}i_{aa'}(t) &= I_0 \sin(\omega t) \text{ (A)} \\i_{bb'}(t) &= I_0 \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ (A)} \\i_{cc'}(t) &= I_0 \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ (A)}.\end{aligned}$$



*Τριφασικό τύλιγμα και οι αντίστοιχοι μαγνητικοί άξονες*

Οι εντάσεις των παραγόμενων μαγνητικών πεδίων είναι αντίστοιχα

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_{aa'}(t) &= B_0 \sin(\omega t) \hat{\mathbf{n}}_{0^\circ} \\ \mathbf{B}_{bb'}(t) &= B_0 \sin(\omega t - 120^\circ) \hat{\mathbf{n}}_{120^\circ} \\ \mathbf{B}_{cc'}(t) &= B_0 \sin(\omega t - 240^\circ) \hat{\mathbf{n}}_{240^\circ}\end{aligned}$$

όπου  $\mathbf{n}_\phi$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με διεύθυνση κατά τη γωνία  $\phi$  (θεωρούμε ότι ο πρώτος μαγνητικός άξονας ταυτίζεται με τον άξονα  $x$ ). Δηλαδή οι διευθύνσεις των τριών παραπάνω διανυσμάτων σχηματίζουν και αυτές μεταξύ τους γωνίες  $120^\circ$  και ταυτίζονται με τις διευθύνσεις των μαγνητικών αξόνων. Προσθέτοντας τις τρεις συνιστώσες του πεδίου θα προκύψει η τελική συνισταμένη. Επειδή ισχύει γενικά η σχέση

$$\hat{\mathbf{n}}_\phi = \cos \phi \hat{\mathbf{x}} + \sin \phi \hat{\mathbf{y}}$$

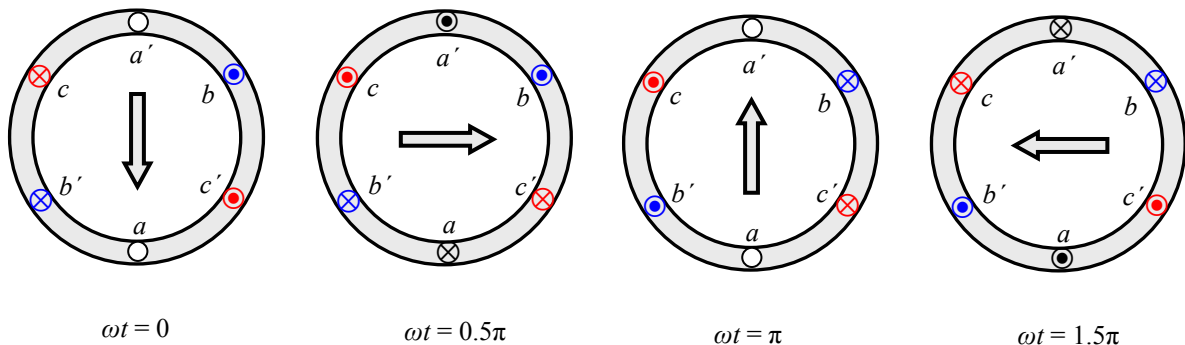
θα έχουμε

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{net} &= \mathbf{B}_{aa'} + \mathbf{B}_{bb'} + \mathbf{B}_{cc'} \\ &= B_0 \sin(\omega t) \hat{\mathbf{x}} \\ &\quad + B_0 \sin(\omega t - 120^\circ) [\cos(120^\circ) \hat{\mathbf{x}} + \sin(120^\circ) \hat{\mathbf{y}}] \\ &\quad + B_0 \sin(\omega t - 240^\circ) [\cos(240^\circ) \hat{\mathbf{x}} + \sin(240^\circ) \hat{\mathbf{y}}]. \end{aligned}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\sin(120^\circ) = \sqrt{3}/2$ ,  $\cos(120^\circ) = -0.5$ ,  $\sin(240^\circ) = -\sqrt{3}/2$ ,  $\cos(240^\circ) = -0.5$  και  $\sin(\omega t - \phi_0) = \sin(\omega t)\cos(\phi_0) - \cos(\omega t)\sin(\phi_0)$ , τελικά προκύπτει ότι

$$\mathbf{B}_{net} = 1.5 B_0 [\sin(\omega t) \hat{\mathbf{x}} - \cos(\omega t) \hat{\mathbf{y}}].$$

Είναι φανερό πως: α) το μέτρο της παραπάνω παράστασης είναι σταθερό και ίσο  $1.5 B_0$  και β) η διεύθυνση του αντίστοιχου διανύσματος μεταβάλλεται συνεχώς, αφού αυτό περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Με άλλα λόγια, η υπέρθεση τριών διανυσματικών μεγεθών με χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος και σταθερή διεύθυνση οδήγησε σε ένα διανυσματικό μέγεθος με σταθερό πλάτος και συνεχώς μεταβαλλόμενη διεύθυνση.



*Απεικόνιση του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε διάφορες χρονικές στιγμές, μαζί με τις αντίστοιχες διευθύνσεις των ρευμάτων*

Το συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο ουσιαστικά μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από ένα ζεύγος μαγνητικών πόλων το οποίο περιστρέφεται, πραγματοποιώντας μια πλήρη περιστροφή στη διάρκεια μιας περιόδου του ηλεκτρικού ρεύματος. Αν  $f_m$  είναι η μηχανική ταχύτητα περιστροφής σε rps και  $f_e$  η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz, τότε στην περίπτωση των δύο πόλων θα είναι

$$f_e = f_m.$$

Περισσότεροι πόλοι μπορούν να δημιουργηθούν αν η σειρά των τυλιγμάτων επαναληφθεί περισσότερες από μία φορές. Αν, για παράδειγμα, χρησιμοποιηθούν έξι τυλίγματα θα προκύψουν δύο ζεύγη πόλων, οπότε στη διάρκεια μιας περιόδου του ρεύματος καθένας από τους πόλους διαγράφει τη μισή περιφέρεια. Σε αυτήν την περίπτωση δηλ. διαγράφεται μηχανική γωνία  $180^\circ$  και ηλεκτρική γωνία  $360^\circ$ , με αποτέλεσμα η ηλεκτρική συχνότητα είναι διπλάσια της περιστροφικής:

$$f_e = 2f_m.$$

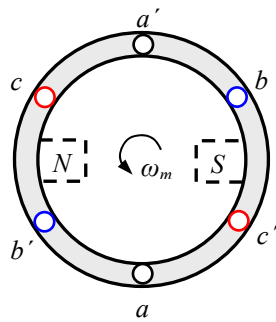
Στη γενική περίπτωση που εμφανίζονται  $2P$  μαγνητικοί πόλοι (απαιτώντας  $P$  τριφασικά τυλίγματα), θα έχουμε αντίστοιχα

$$f_e = Pf_m$$

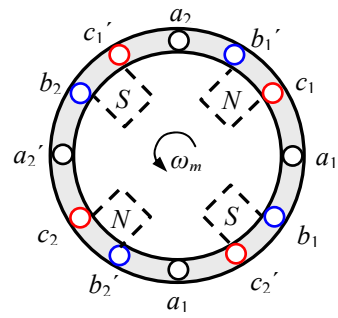
και επειδή είναι  $f_m = n_m / 60$ , προκύπτει τελικά ότι

$$f_e = \frac{Pn_m}{60}$$

Σημειώνεται πως αντιστροφή της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου μπορεί να επιτευχθεί ανταλλάσσοντας απλώς τα ρεύματα σε δύο από τα τρία τυλίγματα.



Τύλιγμα στάτη δύο πόλων



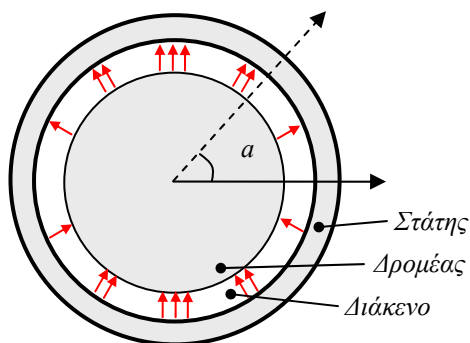
Τύλιγμα στάτη τεσσάρων πόλων

## ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΜΕΔ

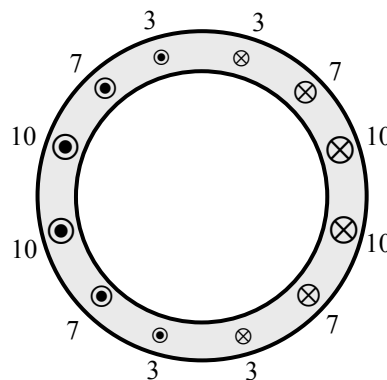
Εξετάζοντας μια μηχανή ΕΡ με κυλινδρικό δρομέα, το διάνυσμα  $\mathbf{B}$  της μαγνητικής επαγωγής μπορεί να θεωρηθεί παντού κάθετο στην επιφάνεια του δρομέα. Η παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης σε μια τέτοια μηχανή απαιτεί την ημιτονοειδή μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της περιφέρειας του διακένου. Συνεπώς, με τον ίδιο τρόπο θα πρέπει να μεταβάλλεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$  και, κατ' επέκταση, η μαγνητεγερτική δύναμη  $\mathcal{F}$ . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί υλοποιώντας μια ανάλογη κατανομή των αγωγών του τυλίγματος μέσα στα αυλάκια στον στάτη. Αν  $n_c$  είναι το πλήθος των αγωγών σε κάθε αυλάκι του οποίου η θέση προσδιορίζεται από τη γωνία  $a$ , τότε θα είναι

$$n_c = N_c |\cos a|$$

όπου  $N_c$  το πλήθος των αγωγών μέσα στο αυλάκι στη θέση  $0^\circ$ . Για παράδειγμα, αν ο στάτης έχει 12 αυλάκια (καθένα τοποθετημένο ανά  $360^\circ/12 = 30^\circ$ ) και στο πρώτο (στις  $0^\circ$ ) είναι (θεωρητικά) τοποθετημένοι 10 αγωγοί, τότε στο εκάστοτε αυλάκι θα έχουμε διαδοχικά:  $10 \cos 15^\circ \approx 10$ ,  $10 \cos 45^\circ \approx 7$ ,  $10 \cos 75^\circ \approx 3$  κ.ο.κ. Είναι φανερό πως αυτή η ημιτονοειδής κατανομή των αγωγών, η οποία απαιτεί την πυκνή χάραξη των αυλακίων, μόνο κατά προσέγγιση μπορεί να εφαρμοσθεί, αφού το πλήθος των αγωγών σε κάθε αυλάκι είναι πάντα ακέραιος αριθμός. Για τους λόγους αυτούς, στην πράξη η ΜΕΔ ακολουθεί μια κλιμακωτή μορφή, η οποία απλώς προσεγγίζει την ιδανική ημιτονοειδή κατανομή.



Ημιτονοειδής κατανομή του πεδίου σε μηχανή EP με κυλινδρικό δρομέα



Κατανομή των αγωγών με  $N_c = 10$  σε μηχανή EP με κυλινδρικό δρομέα

## ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗ EP

Ας θεωρήσουμε πως ο δρομέας μιας μηχανής EP περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ , παράγοντας ένα ημιτονοειδώς κατανεμημένο στο διάκενο μαγνητικό πεδίο με μέτρο  $B = B_0 \sin(\omega t - a)$  ( $a$  είναι η γωνία που αντιστοιχεί σε κάθε θέση) και διεύθυνση ακτινική. Αναζητώντας την τάση που επάγεται σε ένα από τα τυλίγματα του στάτη, διαπιστώνεται πως η σχέση  $e_{ind} = (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αυτήν την περίπτωση, παρά το γεγονός ότι οι αντίστοιχοι αγωγοί είναι ακίνητοι. Το σκεπτικό είναι ότι για έναν παρατηρητή που “κινείται” μαζί με το μαγνητικό πεδίο, αυτός αντιλαμβάνεται το πεδίο ως σταθερό, ενώ τα πλαίσια του στάτη ως στρεφόμενα. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου (δηλ. υπολογισμός της τάσης σε κάθε πλευρά του πλαισίου ξεχωριστά και άθροιση των επιμέρους τιμών), προκύπτει ότι η τάση που επάγεται σε πλαίσιο αποτελούμενο από  $N_c$  αγωγούς είναι

$$e_{ind} = N_c \Phi \omega \sin(\omega t).$$

Αντίστοιχα, αν το τύλιγμα είναι τριφασικό, τότε οι αντίστοιχα επαγόμενες τάσεις συνθέτουν και αυτές ένα τριφασικό σύστημα:

$$\begin{cases} e_{aa'} = N_c \Phi \omega \sin(\omega t) \\ e_{bb'} = N_c \Phi \omega \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_{cc'} = N_c \Phi \omega \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

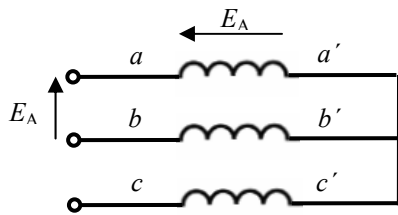
Είναι φανερό πως το πλάτος της τάσης σε καθεμιά από τις τρεις φάσεις είναι ίσο με

$$E_0 = N_c \Phi \omega = 2\pi N_c \Phi f$$

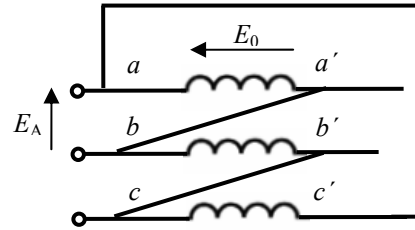
οπότε η αντίστοιχη ενεργός τιμή κάθε φασικής τάσης είναι

$$E_A = \frac{2\pi N_c \Phi f}{\sqrt{2}} = 4.44 N_c \Phi f.$$

Αν τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα, η ενεργός τάση στα άκρα της μηχανής είναι ίση με  $\sqrt{3}E_A$ , ενώ αν έχουμε σύνδεση σε τρίγωνο, η τιμή αυτή είναι ίση με  $E_A$ .



Σύνδεση τυλιγμάτων σε αστέρα



Σύνδεση τυλιγμάτων σε τρίγωνο

Στη συνέχεια θεωρούμε πως στο εσωτερικό της μηχανής συνυπάρχουν δύο μαγνητικά πεδία: αυτό του δρομέα και αυτό του στάτη. Αν  $\mathbf{B}_R$  είναι η μαγνητική επαγωγή του πρώτου και  $\mathbf{B}_S$  του δεύτερου, η ροπή που επάγεται θα είναι ίση με

$$\tau_{ind} = C\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_S.$$

Αν  $\mathbf{B}_{net} = \mathbf{B}_R + \mathbf{B}_S$  είναι το άθροισμα των δύο πεδίων, τότε μπορεί ναδειχτεί ότι

$$\tau_{ind} = C\mathbf{B}_R \times \mathbf{B}_{net}$$

με μέτρο

$$\tau_{ind} = CB_R B_{net} \sin \delta$$

όπου  $\delta$  η γωνία μεταξύ των δύο πεδίων.

## ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Σε μια ηλεκτρική μηχανή EP οι απώλειες ισχύος μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

– Απώλειες χαλκού: αυτές είναι οι ηλεκτρικές απώλειες που αντιστοιχούν στα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα. Σε μια τριφασική μηχανή EP οι απώλειες του στάτη είναι ίσες με

$$P_S = 3I_A^2 R_A$$

ενώ αυτές του δρομέα καθορίζονται από τη σχέση

$$P_R = I_F^2 R_F.$$

- Απώλειες πυρήνα: χωρίζονται σε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων.
- Μηχανικές απώλειες: σχετίζονται με μηχανικά φαινόμενα, όπως η τριβή και ο εξαερισμός.
- Κατανεμημένες απώλειες: δεν υπάγονται σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και λαμβάνονται συνήθως ίσες με το 1% του πλήρους φορτίου.

Όπως και στις μηχανές ΣΡ, το άθροισμα των μηχανικών απωλειών και των απωλειών πυρήνα χαρακτηρίζονται ως *απώλειες περιστροφής*.

Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής EP ορίζεται ως

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} 100\%.$$

Τέλος, τα διαγράμματα ροής ισχύος έχουν την ακόλουθη μορφή:



