



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ηλεκτρικές Μηχανές II

Ενότητα 2: Σύγχρονη Μηχανή με Έκτυπους Πόλους 1

Επ. Καθηγήτρια Τζόγια Χ. Καππάτου

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

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.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» 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.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

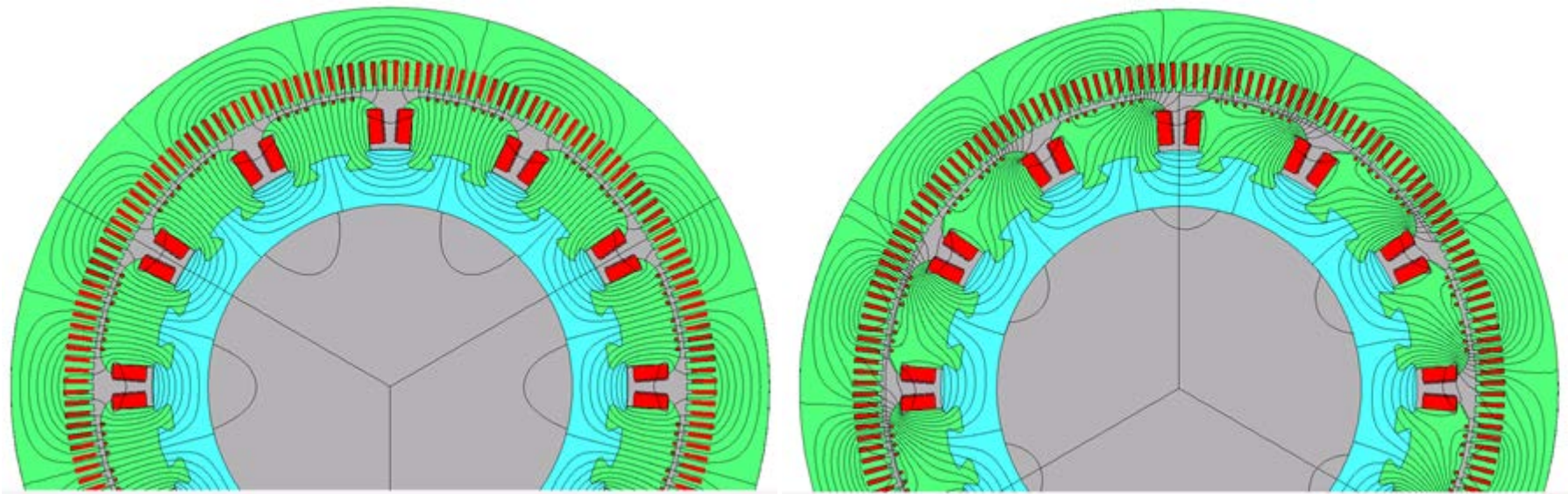
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Σύγχρονη μηχανή με εκτύπους πόλους

- Η Σ.Μ. με εκτύπους πόλους παρουσιάζει ιδιομορφίες στη λειτουργική συμπεριφορά λόγω της ιδιόμορφης κατάσκευής του δρομέα.
- Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα (κατασκευάζεται από μη μαγνητικά υλικά), επάνω στον οποίο στερεώνεται ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας.
- Μέρος του πυρήνα αυτού είναι οι έκτυποι πόλοι, γύρω από τους οποίους τυλίγεται ο αγωγός διέλευσης του ρεύματος και έτσι σχηματίζεται το τύλιγμα διέγερσης.
- Κατά μεγάλο μέρος η συμπεριφορά της είναι ίδια με τη συμπεριφορά της σύγχρονης μηχανής με κατανεμημένο τύλιγμα διέγερσης, δηλαδή με κυλινδρικό δρομέα που φέρει αυλακώσεις για την τοποθέτηση του τυλίγματος διέγερσης.

Σύγχρονη μηχανή με εκτύπους πόλους 2



α)

β)

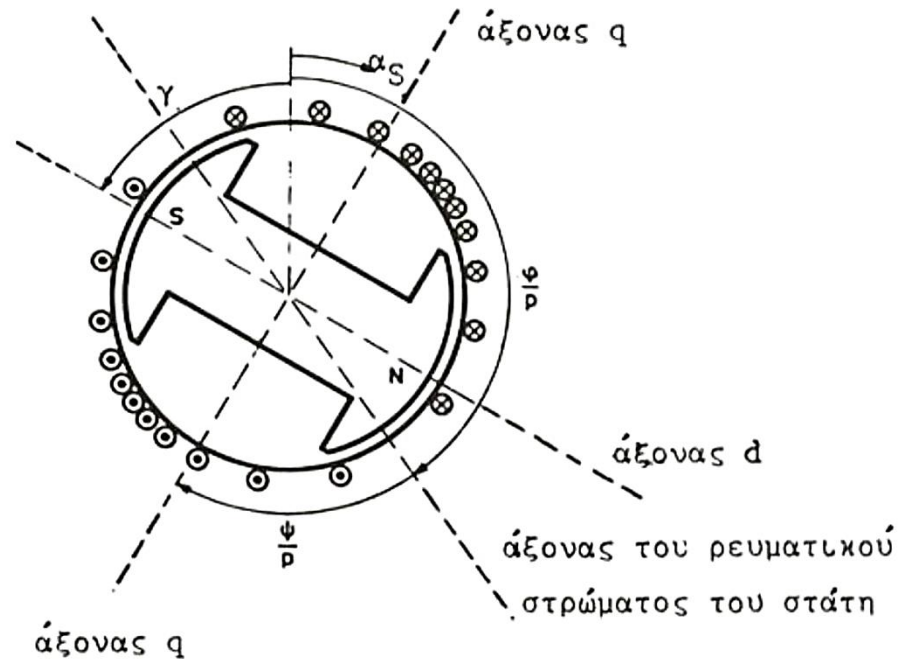
Κατανομή μαγνητικών γραμμών μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση α) της εν κενώ λειτουργίας β) της φόρτισης της γεννήτριας

- Παραπάνω απεικονίζονται οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου μιας πραγματικής σύγχρονης μηχανής με έκτυπους πόλους με $P=200000$ kVA, $n=500$ rpm, $f=50$ Hz, $I_N=8882.3$ A, $I_f=1988.5$ A, στις καταστάσεις εν κενώ και φόρτισης, λειτουργώντας ως γεννήτρια.

Διαμερισμός της διαρροής του στάτη

- Στη Σ.Μ. με εκτύπους πόλους το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι παντού το ίδιο. Επομένως είμαστε αναγκασμένοι να διακρίνουμε δύο μαγνητικούς άξονες:
- Τον **κατά μήκος άξονα** (δείκτης d : direct axis)
- Τον **εγκάρσιο άξονα** (δείκτης q : quadrature axis)
- Ο μαγνητικός άξονας d συμπίπτει με τον άξονα ενός πόλου του δρομέα, ο δε άξονας q είναι κάθετος προς τον άξονα d και βρίσκεται στο κενό μεταξύ δύο πόλων.

Διαμερισμός της διαρροής του στάτη 2



Σχηματική παράσταση του τριφασικού ρευματικού στρώματος και της θέσης του δρομέα μιας Σ.Μ. με δύο έκτυπους πόλους για $t=0$

Διαμερισμός της διαρροής του στάτη 3

- Η μαγνητική αντίσταση στον εγκάρσιο άξονα q είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με εκείνη στον άξονα d , όπως προκύπτει από την αναλογία των διακένων.
- Το τριφασικό τύλιγμα του στάτη συμπεριφέρεται όπως ένα στρεφόμενο πηνίο, του οποίου ο άξονας καθορίζεται από το τριφασικό ρευματικό στρώμα του στάτη.
- Ο άξονας αυτός γενικά δεν συμπίπτει με τον άξονα d . Έτσι μεταξύ του άξονα q και του άξονα του ρευματικού στρώματος του στάτη σχηματίζεται μια ηλεκτρική γωνία Ψ/ρ .
- Ο δρομέας με τους εκτύπους πόλους στρέφεται σύγχρονα με τον άξονα του ρευματικού στρώματος του στάτη, ανάλογα δε με τη μεταξύ τους θέση έχουμε διαφορετικό μαγνητικό πεδίο του στάτη για το ίδιο ρεύμα.
- Το μαγνητικό πεδίο που προέρχεται από αυτό το ρευματικό στρώμα δεν είναι ημιτονοειδώς κατανεμημένο, διότι το διάκενο δεν έχει σταθερό πλάτος.
- Η μορφή του πεδίου (κατανομή στο χώρο) αλλάζει για κάθε διαφορετική τιμή του φορτίου, διότι αλλάζει η θέση του δρομέα ως προς τον άξονα του ρευματικού στρώματος του στάτη. Αυτό δεν παρατηρείται στη Σ.Μ. με κατανεμημένους πόλους, όπου ανεξάρτητα από την θέση του δρομέα η μορφή του πεδίου είναι ίδια.

Ρευματικό στρώμα

Εάν η φάση a ενός συμμετρικού τριφασικού τυλίγματος του στάτη διαρρέεται από το ρεύμα:

$$i_a = \sqrt{2}I_s \cos(\omega t + \phi)$$

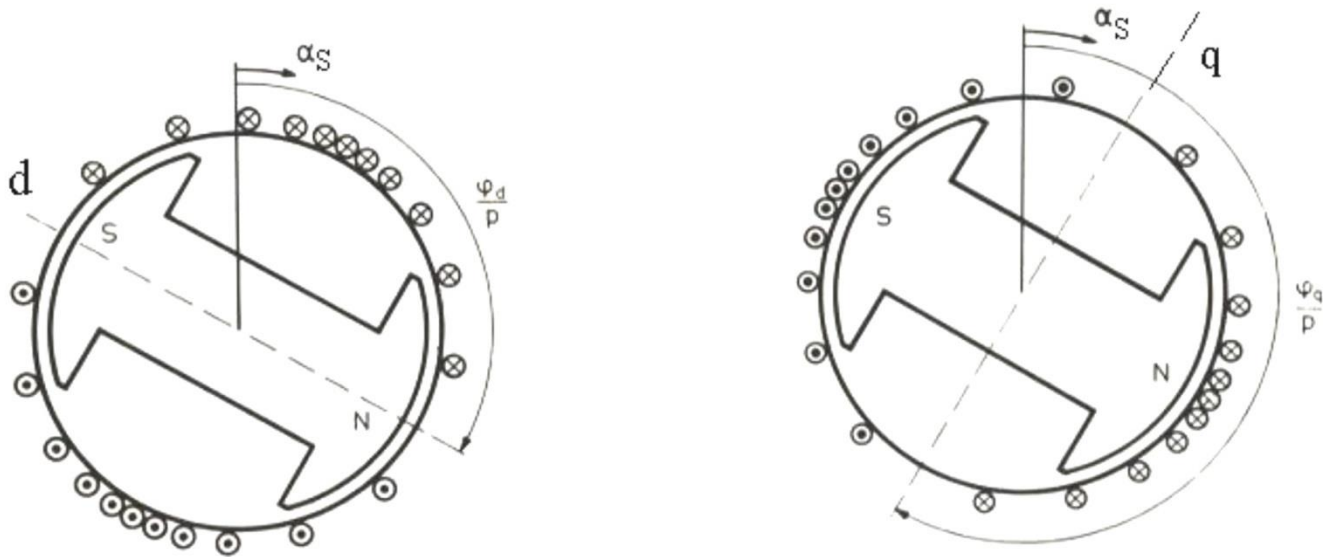
Τότε από όλα τα φασικά ρεύματα προκύπτει το ρευματικό στρώμα:

$$A_s(a_s, t) = \hat{A}_s \sin(p a_s - \omega t - \phi)$$

Το οποίο παριστάνει μια κύμανση, ή πιο παραστατικά, ένα στρεφόμενο διάνυσμα με ταχύτητα $n_s = \omega/p$ και μήκος

$$\hat{A}_s = \frac{3}{2} \frac{4\sqrt{2}I_s w_s \xi_s}{\pi D}$$

Ρευματικό στρώμα 2



Σχηματική παράσταση των δύο συνιστωσών του ρευματικού στρώματος του στάτη για $t=0$

Ρευματικό στρώμα 3

Μεταξύ των διαφόρων χωρικών γωνιών που εμφανίζονται στα σχήματα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\phi_q}{\rho} &= \frac{\phi}{\rho} + \frac{\Psi}{\rho} \\ \frac{\phi_d}{\rho} &= \frac{\phi}{\rho} + \frac{\Psi}{\rho} - \frac{\pi}{2\rho} \end{aligned} \right\}$$

Συνεπώς για τις ηλεκτρικές γωνίες ισχύει :

$$\left. \begin{aligned} \phi_q &= \phi + \Psi \\ \phi_d &= \phi + \Psi - \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\}$$

- Μια Σ.Μ. με οποιοδήποτε αριθμό ζευγών πόλων p αναλύεται κατά τον ίδιο τρόπο όπως μια διπολική μηχανή (όπου χωρικές και ηλεκτρικές γωνίες είναι ίσες), αφού διαιρέσουμε τις διάφορες γωνίες δια p (ζεύγη πόλων).

Ρευματικό στρώμα 4

Προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για τις συνιστώσες του ρευματικού στρώματος:

$$A_d(a_s, t) = \hat{A}_d \sin(pa_s - \omega t - \phi_d)$$

$$A_q(a_s, t) = \hat{A}_q \sin(pa_s - \omega t - \phi_q)$$

$$A_s(a_s, t) = A_d(a_s, t) + A_q(a_s, t)$$

Τα μεγέθη A_d και A_q προκύπτουν, εάν οι τρεις φάσεις του στάτη διαρρέονται συγχρόνως από τα δύο συμμετρικά συστήματα ρευμάτων, των οποίων το ρεύμα στη φάση π.χ. α εκφράζεται ως εξής :

$$i_d = \sqrt{2}I_d \cos(\omega t + \phi_d)$$

$$i_q = \sqrt{2}I_q \cos(\omega t + \phi_q)$$

Πραγματικό Ρεύμα I_s

Επομένως συνιστάται να αναλύσουμε το πραγματικό ρεύμα i_s σε δύο συνιστώσες :

$$i_s = i_d + i_q$$

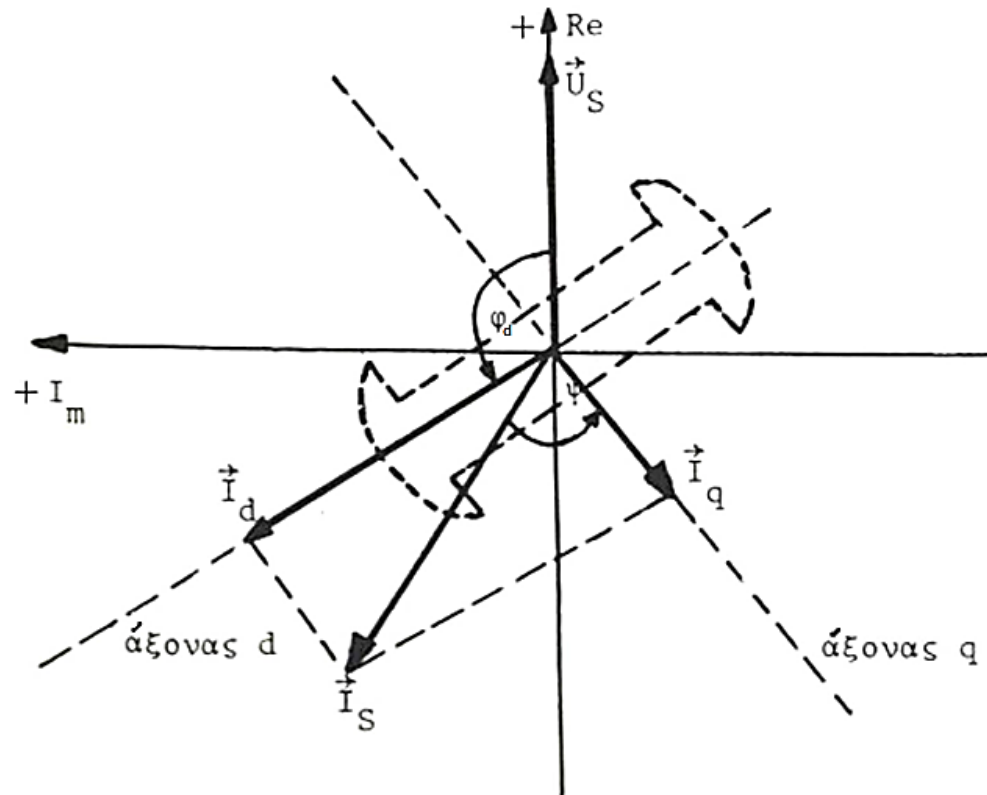
ή αναλυτικά ως συναρτήσεις του χρόνου

$$i_a = \sqrt{2}I_s \cos(\omega t + \phi) = \sqrt{2}I_d \cos(\omega t + \phi_d) + \sqrt{2}I_q \cos(\omega t + \phi_q)$$

Τη σχέση αυτή με μιγαδικά διανύσματα γράφουμε ως εξής

$$\left. \begin{aligned} \vec{I}_s &= \vec{I}_d + \vec{I}_q \\ \vec{I}_s &= I_s e^{j\phi} \\ \vec{I}_d &= I_d e^{j\phi_d} \\ \vec{I}_q &= I_q e^{j\phi_q} \end{aligned} \right\}$$

Διαμερισμός του ρεύματος στάτη



Διαμερισμός του ρεύματος στάτη

Διαμερισμός του ρεύματος στάτη 2

$$\vec{I}_q = \vec{I}_s \cos \Psi e^{j\Psi}$$

$$\vec{I}_d = \vec{I}_s \sin \Psi e^{j(\Psi - \frac{\pi}{2})}$$

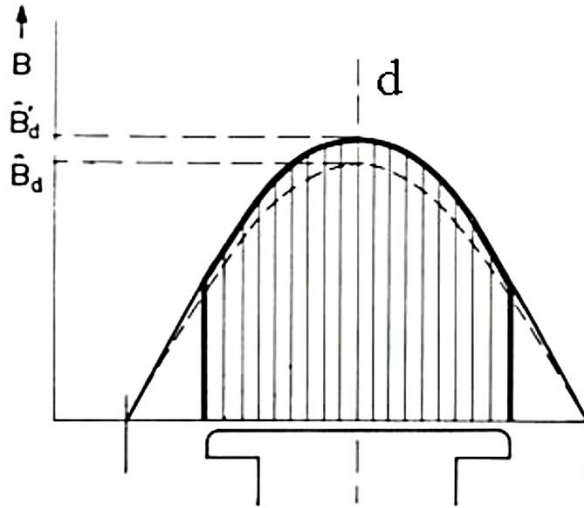
$$\hat{A}_q = \hat{A}_s \cos \Psi$$

$$\hat{A}_d = \hat{A}_s \sin \Psi$$

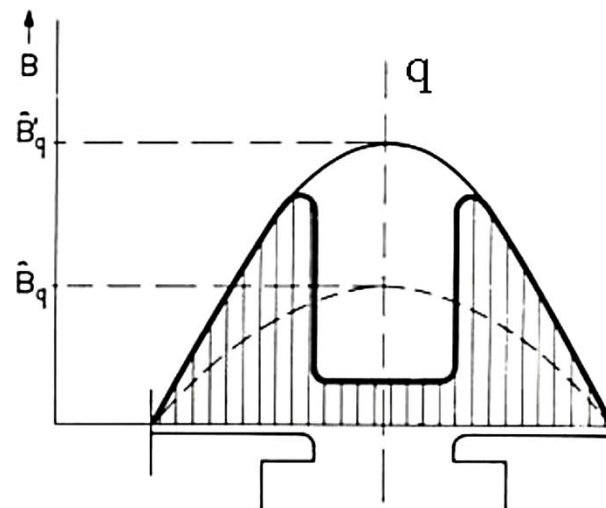
- Το μαγνητικό πεδίο του στάτη (τύμπανο) μίας σύγχρονης μηχανής με εκτύπους πόλους μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Η κατά μήκος συνιστώσα (άξονας d) προέρχεται από το ρευματικό στρώμα $A_d(\alpha_s, t)$ και η εγκάρσια συνιστώσα (άξονας q) προέρχεται από το $A_q(\alpha_s, t)$.
- Τα δύο πεδία παίρνουν μια σταθερή θέση ως προς το δρομέα, διότι για έναν παρατηρητή επί του στάτη, το μαγνητικό πεδίο του στάτη και ο δρομέας στρέφονται με την ίδια σύγχρονη ταχύτητα. Από την ανάλυση των ρευμάτων στις συνιστώσες d και q προκύπτουν τα μαγνητικά πεδία στον άξονα d και q και μπορούμε να υπολογίσουμε το ολικό μαγνητικό πεδίο, του οποίου το μέγεθος και η μορφή εξαρτώνται από το φορτίο.

Προσδιορισμός των επαγωγιμοτήτων στους άξονες d , q

Σε καθένα άξονα d και q μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει μια επαγωγιμότητα, αφού διακρίνουμε αντίστοιχα δύο ξεχωριστά μαγνητικά πεδία. Ο υπολογισμός αυτών των επαγωγιμοτήτων προκύπτει, εάν γνωρίζουμε τα πεδία στους άξονες d και q .



a) πεδίο στον άξονα d



b) πεδίο στον άξονα q

Κατανομή του μαγνητικού πεδίου προερχόμενου από το ρεύμα του στάτη μίας Σ.Μ. με εκτύπους πόλους στους άξονες d και q

Προσδιορισμός των επαγωγιμοτήτων στους άξονες d ,q 2

- Ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της ολικής ροής μίας φάσης του στάτη, που προέρχεται από τη βασική αρμονική του πεδίου στον άξονα d, και του ρεύματος i_d στη φάση αυτή ονομάζεται **κύρια επαγωγιμότητα του στρεφόμενου πεδίου L_{hd} στον άξονα d**.
- Ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της ολικής ροής μίας φάσης του στάτη, που προέρχεται από τη βασική αρμονική του πεδίου στον άξονα q, και του ρεύματος i_q στη φάση αυτή, ονομάζεται **κύρια επαγωγιμότητα του στρεφόμενου πεδίου L_{hq} στον εγκάρσιο άξονα q**.
- Η βασική αρμονική της τάσης εξ επαγωγής λόγω του πεδίου B_d σε μια φάση ισούται με $\omega L_{hd} i_d$ και η άλλη λόγω του B_q ισούται με $\omega L_{hq} i_q$ (ενεργός τιμή). Τις ανώτερες αρμονικές τις παραλείπουμε.
- Το εγκάρσιο πεδίο περιέχει μια ισχυρή τρίτη αρμονική, η οποία ιδιαίτερα κατά την ενεργό φόρτιση προκαλεί στις τρεις φάσεις συμφασικές τάσεις με τριπλάσια συχνότητα σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου.
- Εάν το τριφασικό τύλιγμα είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα, τότε οι πολικές τάσεις δεν περιέχουν αυτές τις αρμονικές και το δίκτυο μένει ανεπηρέαστο.

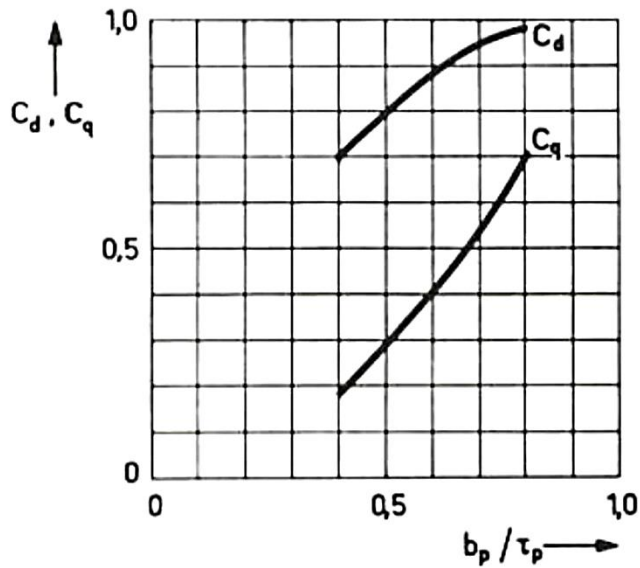
Προσδιορισμός των επαγωγιμοτήτων στους άξονες d ,q 3

Λόγω των κενών μεταξύ των πόλων οι επαγωγιμότητες L_{hd} και L_{hq} είναι μικρότερες από την L_h της Σ.Μ. με κυλινδρικό δρομέα. Έτσι χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες σχέσεις :

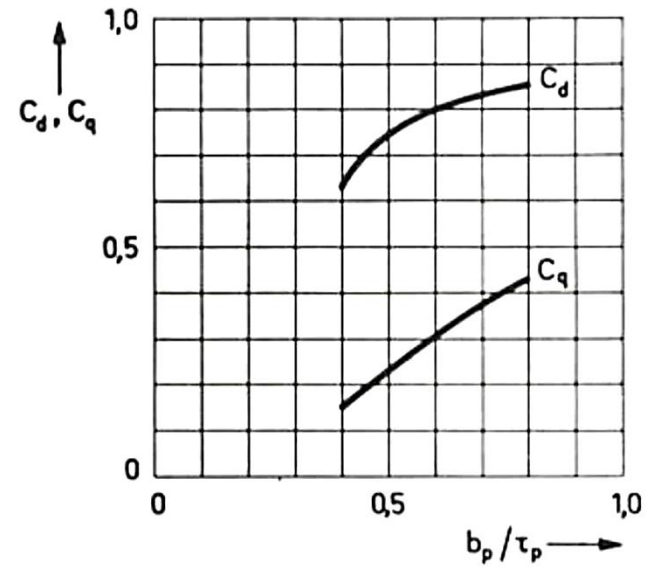
$$\left. \begin{array}{l} L_{hd} = C_d L_h, C_d < 1 \\ L_{hq} = C_q L_h, C_q < 1 \end{array} \right\}, C_d = \frac{\hat{B}_d}{\hat{B}'_d}, C_q = \frac{\hat{B}_q}{\hat{B}'_q}$$

- Οι συντελεστές του πεδίου C_d και C_q μίας σύγχρονης μηχανής με εκτύπους πόλους εξαρτώνται από το πλάτος b_p κάθε πόλου και από την πολική απόσταση τ .
- Επίσης εξαρτώνται από τη μορφή του πέλματος των πόλων, από τον λόγο του διακένου δ_m στο μέσο του πέλματος προς την πολική απόσταση τ και από τον κορεσμό του σιδήρου.
- Συνήθως οι κατασκευαστές δίνουν στο πέλμα τέτοια μορφή, ώστε το διάκενο μεταξύ στάτη και πέλματος να μεταβάλλεται ημιτονοειδώς ή τραπεζοειδώς, με στόχο η τάση εξ' επαγωγής στο στάτη να πλησιάζει όσο γίνεται πιο πολύ την ημιτονοειδή μορφή.

Συναρτήσεις των συντελεστών πεδίου



a) σταθερό διάκενο
($\delta m / \tau_p \approx 0,02$)



b) ημιτονοειδές διάκενο
($\delta m / \tau_p \approx 0,015$)

Συναρτήσεις των συντελεστών πεδίου C_d και C_q

Πηγές

Οι πηγές των **Εικόνων, των Σχημάτων και των Διαγραμμάτων είναι:**

[1] Α.Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Α», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009

[2] Α.Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Β», Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2009

[3] Α.Ν. Σαφάκας, «Δυναμική Ηλεκτρομηχανικών συστημάτων» Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2008

[4] Τζόγια Χ. Καππάτου, Εξομοιώσεις Ηλεκτρικών Μηχανών σε περιβάλλον Πεπερασμένων Στοιχείων, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Η.Μ.Τ.Υ, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Τζόγια Καππάτου. Τζόγια Καππάτου, «Ηλεκτρικές Μηχανές II». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/EE687/>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ