



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Προηγμένος έλεγχος ηλεκτρικών μηχανών

Ενότητα 4: Διπολικό Μοντέλο Ασύγχρονης Μηχανής

Επαμεινώνδας Μητρονίκας - Αντώνιος Αλεξανδρίδης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών

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.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

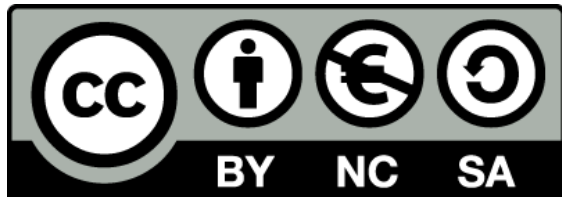
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



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.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Περιεχόμενα

1. Έλεγχος Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος με ξένη διέγερση
2. Έλεγχος Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος με διέγερση σε σειρά
3. Βαθμωτός Έλεγχος Ασύγχρονων Μηχανών
- 4. Διπολικό μοντέλο ασύγχρονης μηχανής**
5. Εκτίμηση συνιστωσών μαγνητικής ροής με χρήση του μοντέλου τάσης
6. Εκτίμηση συνιστωσών μαγνητικής ροής με χρήση του μοντέλου ρεύματος
7. Έμμεσος Διανυσματικός Έλεγχος Ασύγχρονου Κινητήρα
8. Άμεσος Διανυσματικός Έλεγχος Ασύγχρονων Μηχανών με προσανατολισμό στην μαγνητική ροή του στάτη
9. Άμεσος Διανυσματικός Έλεγχος Ασύγχρονων Μηχανών με προσανατολισμό στην μαγνητική ροή του δρομέα
10. Άμεσος Έλεγχος Ροής και Ροπής



Σκοποί ενότητας

- ❑ Παρουσίαση του διπολικού μοντέλου της ασύγχρονης μηχανής
- ❑ Εξαγωγή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής



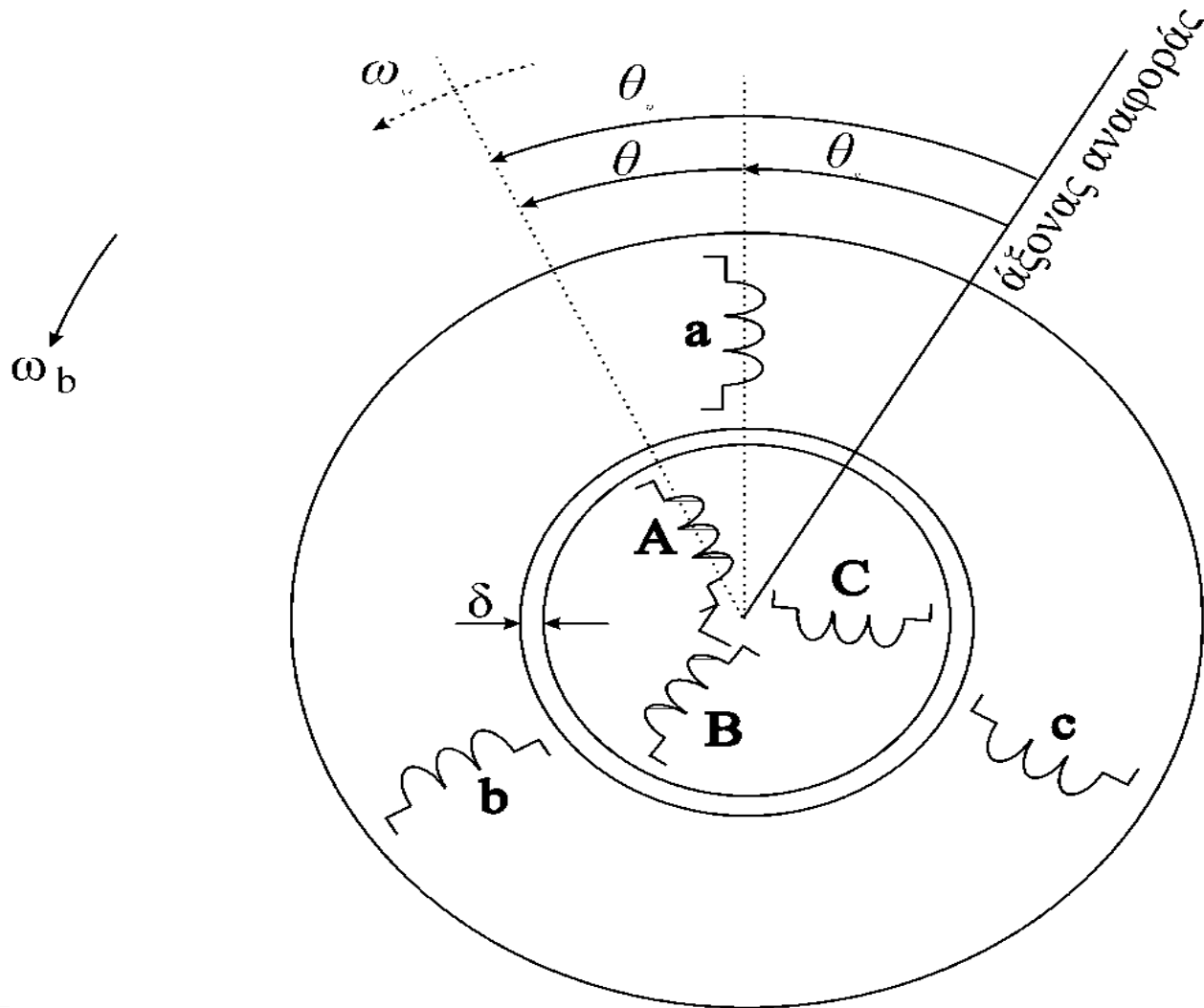
Διπολικό μοντέλο Ασύγχρονης Μηχανής

Παραδοχές

- Τα τυλίγματα στις τρεις φάσεις του στάτη και του δρομέα είναι συμμετρικά.
- Οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων θεωρούνται σταθερές (παραλείπονται οι μεταβολές λόγω θερμοκρασίας).
- Οι αυτεπαγωγές και οι αμοιβαίες επαγωγές των τυλιγμάτων θεωρούνται σταθερές (θεωρούμε γραμμική τη μαγνητική χαρακτηριστική).
- Θεωρούμε το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής ημιτονοειδώς κατανομημένο, συνεπώς οι ανώτερες αρμονικές λόγω των αυλακώσεων και όσες άλλες εμφανίζονται στο διάκενο παραλείπονται.
- Οι απώλειες σιδήρου θεωρούνται αμελητέες.
- Θεωρούμε ότι η μηχανή έχει μόνο ένα ζεύγος πόλων. Αυτή η παραδοχή μας βοηθάει στην κατανόηση της γεωμετρικής φύσης του προβλήματος, χωρίς να μας περιορίζει, αφού η θεωρητική ανάλυση ισχύει για μηχανές με οποιοδήποτε αριθμό ζευγών πόλων.



Διπολικό μοντέλο της Ασύγχρονης Μηχανής στο σύστημα A-B-C



Ορισμοί (1/2)

- ❑ Στο σχήμα φαίνεται ο άξονας αναφοράς με βάση τον οποίο γίνεται η μέτρηση των γωνιών. Η θέση του άξονα αναφοράς επιλέγεται κατά βούληση.
- ❑ ϑ_s είναι η γωνία που σχηματίζει η φάση a του στάτη με τον άξονα αναφοράς
- ❑ ϑ_R είναι η γωνία που σχηματίζει η φάση A του δρομέα με τον άξονα αναφοράς.
- ❑ Τη γωνία που σχηματίζει ο δρομέας με το στάτη τη συμβολίζουμε με ϑ .
- ❑ Είναι φανερό ότι στο διπολικό μοντέλο, επειδή υποθέτουμε μηχανή με ένα ζεύγος πόλων, οι ηλεκτρικές γωνίες ταυτίζονται με τις γεωμετρικές (μηχανικές).



Διπολικό μοντέλο (2/2)

- Στις μηχανές με $p > 1$ ζεύγη πόλων θα συμβολίζουμε με κεφαλαίο γράμμα τις μηχανικές γωνίες και με μικρό τις ηλεκτρικές. Οι ηλεκτρικές γωνίες (θ_x) συνδέονται με τις μηχανικές γωνίες (Θ_x) και τον αριθμό p των ζευγών των πόλων της μηχανής σύμφωνα με τη σχέση: $\theta_x = p \cdot \Theta_x$
- οι στροφές στον άξονα της μηχανής συνδέονται με τη γωνία θ μέσω της σχέσης:

$$n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot p} \cdot \frac{d\theta}{dt}$$



Εξισώσεις τάσεων

□ Εξισώσεις στάτη

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix}$$

□ Εξισώσεις δρομέα

$$\begin{bmatrix} u'_A \\ u'_B \\ u'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_R & 0 & 0 \\ 0 & R'_R & 0 \\ 0 & 0 & R'_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_A \\ i'_B \\ i'_C \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix}$$



Εξισώσεις μαγνητικών ροών

□ Μαγνητική ροή στάτη:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

□ Μαγνητική ροή δρομέα:

$$\begin{bmatrix} \lambda_A \\ \lambda_B \\ \lambda_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$



Επεξηγήσεις συμβόλων

- u_a, u_b, u_c είναι οι φασικές τάσεις στους ακροδέκτες του στάτη της μηχανής,
- $u_{A'}, u_{B'}, u_{C'}$ είναι οι ανηγμένες στο στάτη φασικές τάσεις στους ακροδέκτες του δρομέα της μηχανής,
- i_a, i_b, i_c είναι τα ρεύματα στα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη,
- $i_{A'}, i_{B'}, i_{C'}$ είναι τα ρεύματα στα τυλίγματα των τριών φάσεων του δρομέα ανηγμένα στο στάτη,
- R_s είναι η ωμική αντίσταση μιας φάσης του στάτη και
- R'_R είναι η ωμική αντίσταση μιας φάσης του δρομέα ανηγμένη στο στάτη.



Επαγωγιμότητες

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = S_S + M \\ L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ca} = L_{ac} = M_{S\sigma} - \frac{M}{2} \\ L_{AB} = L_{BA} = L_{BC} = L_{CB} = L_{CA} = L_{AC} = M_{S\sigma} - \frac{M}{2} \\ L_{aA} = L_{bB} = L_{cC} = L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} = M \cdot \cos \theta \\ L_{aB} = L_{bC} = L_{cA} = L_{Ba} = L_{Cb} = L_{Ac} = M \cdot \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{aC} = L_{cB} = L_{bA} = L_{Ca} = L_{Bc} = L_{Ab} = M \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \end{array} \right.$$



Συνοπτική γραφή εξισώσεων τάσεων

□ Εξισώσεις τάσεων

$$\begin{bmatrix} U_{abc} \\ U_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{ABC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{ABC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{ABC} \end{bmatrix}$$

□ Εξισώσεις ροών

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & L_{SR} \\ L_{RS} & L_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{ABC} \end{bmatrix}$$



Μετασχηματισμός Park

Σημασία του μετασχηματισμού Park

- ❑ Το μεγαλύτερο πρόβλημα που εμφανίζεται στην ανάλυση της λειτουργίας της A.M. με τη χρήση των σχέσεων που προκύπτουν από το διπολικό μοντέλο, είναι η εξάρτηση των στοιχείων των μητρών LSR και LRS από την κίνηση του δρομέα ως προς το στάτη.
- ❑ Το αποτέλεσμα είναι ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που:
 - είναι μη γραμμικό και
 - έχει συντελεστές που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς συναρτήσει του χρόνου
- ❑ Το σύστημα αυτό είναι πολύ δύσκολο να επιλυθεί.
- ❑ Αυτός είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους για να θεωρηθεί η ασύγχρονη μηχανή μη κατάλληλη για εφαρμογές ελέγχου μέχρι τα τελευταία χρόνια.
- ❑ Σήμερα γνωρίζουμε ότι το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με το μετασχηματισμό του μοντέλου της ασύγχρονης μηχανής με τις τρεις φάσεις a, b και c σε δύο ορθογώνιους άξονες d και q όπου, όπως θα φανεί, έχουμε εξισώσεις ανεξάρτητες μεταξύ τους με σταθερούς όρους.



Μετασχηματισμός Park (1/3)

- Ο μετασχηματισμός αυτός, που αναπτύχθηκε το 1929 από τον Park, συνίσταται στο πολλαπλασιασμό των εξισώσεων της μηχανής με τη μήτρα μετασχηματισμού Park, η γενική μορφή της οποίας δίνεται από τη σχέση:

$$(M_x)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_x & \cos(\theta_x + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_x - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_x & -\sin(\theta_x + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_x - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$



Μετασχηματισμός Park (2/3)

- Ο δείκτης x υποδηλώνει ότι η μήτρα μετασχηματισμού δεν είναι η ίδια για τα μεγέθη του στάτη και του δρομέα, αφού οι γωνίες ϑ_S και ϑ_R που σχηματίζει ο άξονας του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα με το σύστημα αναφοράς δεν είναι ίδιες.
 - Για $x=S$ προκύπτει η μήτρα για τον μετασχηματισμό των μεγεθών του στάτη $(M_S)^{-1}$.
 - για $x=R$ προκύπτει η μήτρα για το μετασχηματισμό των μεγεθών του δρομέα $(M_R)^{-1}$.

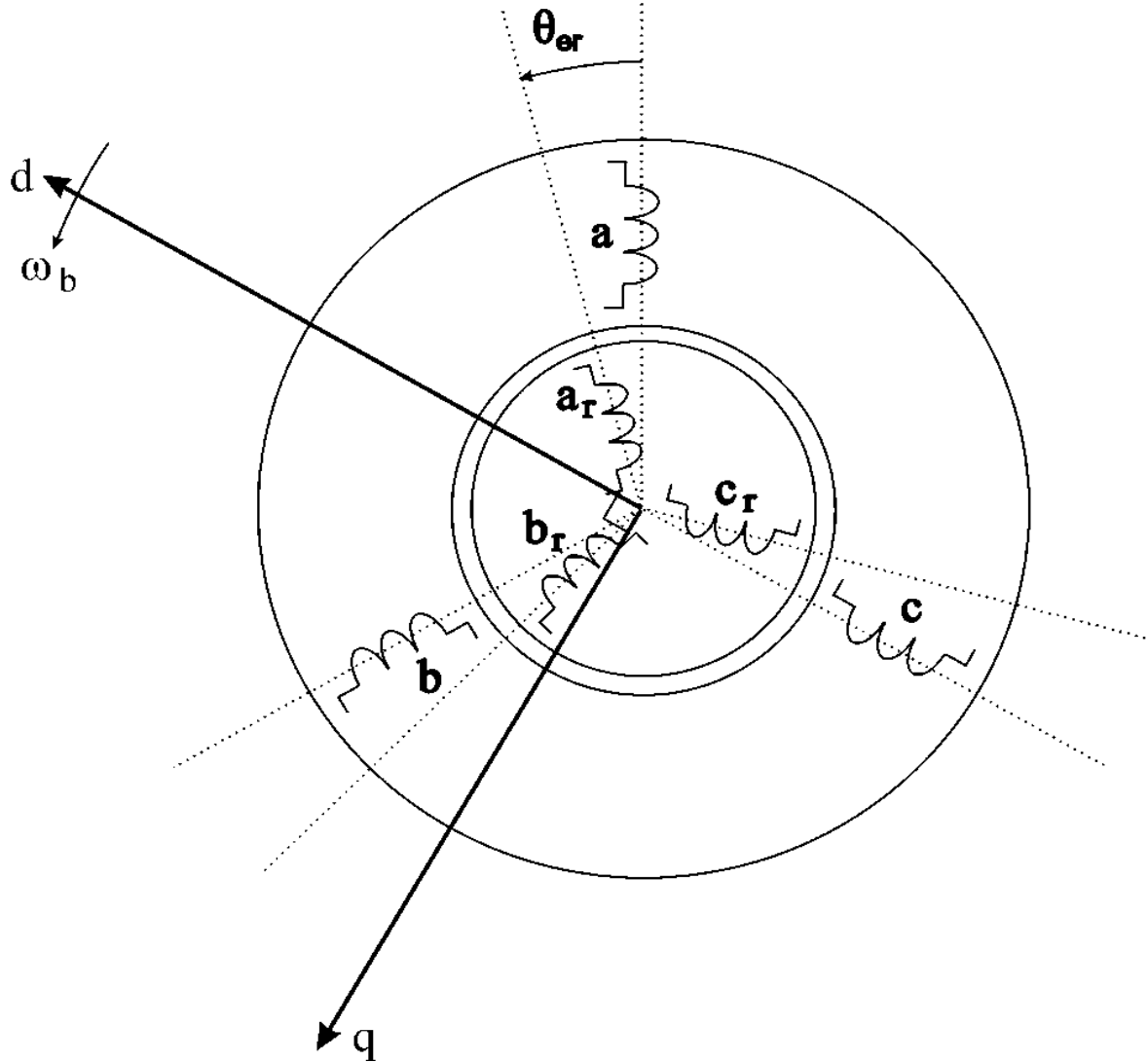


Μετασχηματισμός Park (2/3)

- ❑ Η επιλογή της γωνίας ϑ_{χ} , μπορεί να γίνει αυθαίρετα (από τη θεωρία δεν υπάρχει περιορισμός στην επιλογή της)
- ❑ Η εφαρμογή του μετασχηματισμού Park στις εξισώσεις ενός συστήματος έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου συστήματος με δύο συνιστώσες d και q , κάθετες μεταξύ τους.
- ❑ Το νέο αυτό σύστημα, μαθηματικά είναι ισοδύναμο με το πραγματικό.



Σύστημα d-q



Εφαρμογή του μετασχηματισμού Park στην ασύγχρονη μηχανή(1/4)

- Με την εφαρμογή του μετασχηματισμού του Park οι τερματικές σχέσεις στο στάτη της μηχανής μετασχηματίζονται ως εξής:

$$(U_{dqo}) = (M_S)^{-1} \cdot (U_{abc})$$

$$(I_{dqo}) = (M_S)^{-1} \cdot (I_{abc})$$



Εφαρμογή του μετασχηματισμού Park στην ασύγχρονη μηχανή(2/4)

$$\begin{pmatrix} U_{dqo} \end{pmatrix} = (R_S) \cdot \begin{pmatrix} I_{dqo} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_{dqo} \end{pmatrix} - \dot{\theta}_S \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{Sq} \\ -\lambda_{Sd} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} U_{DQO} \end{pmatrix} = (R_S) \cdot \begin{pmatrix} I_{DQO} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_{DQO} \end{pmatrix} - \dot{\theta}_R \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{Rq} \\ -\lambda_{Rd} \\ 0 \end{bmatrix}$$



Εφαρμογή του μετασχηματισμού Park στην ασύγχρονη μηχανή(3/4)

□ Υπό μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} U_{dqo} \\ U_{DQO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{ABC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dqo} \\ I_{DQO} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_S & 0 \\ 0 & Z_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{dqo} \\ \lambda_{DQO} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{dqo} \\ \lambda_{DQO} \end{bmatrix}$$

$$Z_S = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\vartheta}_S & 0 \\ \dot{\vartheta}_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Z_R = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\vartheta}_R & 0 \\ \dot{\vartheta}_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Εφαρμογή του μετασχηματισμού Park στην ασύγχρονη μηχανή(4/4)

□ Μαγνητικές ροές:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dqo} \\ \lambda_{DQO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & 0 & 0 & L_h & 0 & 0 \\ 0 & L_S & 0 & 0 & L_h & 0 \\ 0 & 0 & L_{SO} & 0 & 0 & 0 \\ L_h & 0 & 0 & L_R & 0 & 0 \\ 0 & L_h & 0 & 0 & L_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{RO} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dqo} \\ I_{DQO} \end{bmatrix}$$

$$L_{SO} = S_S + 2M_{S\sigma}$$

$$L_{RO} = S_R + 2M_{R\sigma}$$

$$L_S = L_{S\sigma} + L_h$$

$$L_R = L_{R\sigma} + L_h$$

$$L_{S\sigma} = S_S - M_{S\sigma}$$

$$L_{R\sigma} = S_R - M_{R\sigma}$$

$$L_h = \frac{3}{2}M$$



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.00**.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Επαμεινώνδας Μητρονίκας, Αντώνιος Αλεξανδρίδης 2014. Επαμεινώνδας Μητρονίκας, Αντώνιος Αλεξανδρίδης. «Προηγμένος Έλεγχος Ηλεκτρικών Μηχανών». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/courses/EE800/>.



Βιβλιογραφία

- [1]. Α. Αλεξανδρίδη, Ε. Μητρονίκα: «Προηγμένος Έλεγχος Ηλεκτρικών Μηχανών», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.
- [2]. Ε. Μητρονίκας: «Νέα Βελτιωμένη μέθοδος Διανυσματικού Ελέγχου Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα με Προσανατολισμό στη Μαγνητική Ροή του Στάτη», Διδακτορική Διατριβή, Ιανουάριος 2002.

