Μοντελοποίηση και έλεγχος ανεμογεννητριών

Τεχνολογίες Ελέγχου στις ΑΠΕ

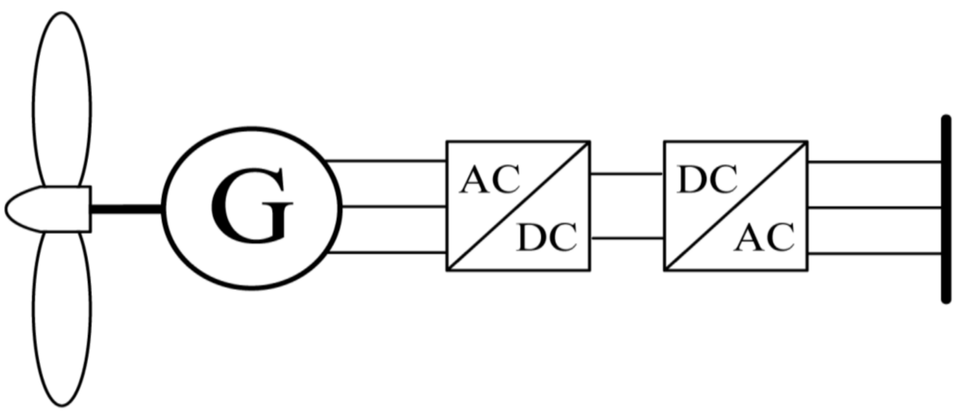
Καθηγητής Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Αναπλ. Καθηγητής Γεώργιος Κωνσταντόπουλος

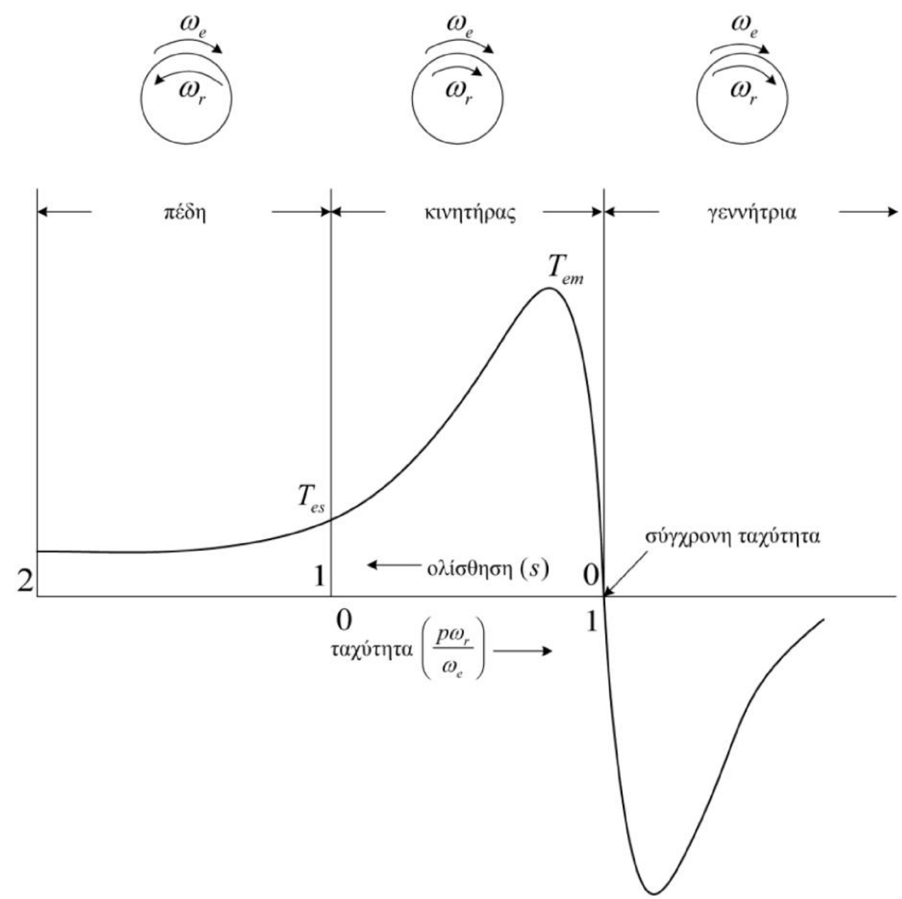
Τύποι ανεμογεννητριών και έλεγχος

- Τύποι γεννητριών:
  - **Ασύγχρονες γεννήτριες**
    - Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού
    - Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα
  - **Σύγχρονες γεννήτριες**
    - Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη
    - Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα

- Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων

Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού





Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Φασικές τάσεις στον στάτη:

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix}$$

- Φασικές τάσεις στον δρομέα:

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix}$$

- Συνοπτικά:

$$U_S^{abc} = \dot{\lambda}_s^{abc} + R_S I_S^{abc} \qquad V_r^{abc} = \dot{\lambda}_r^{abc} + R_r I_r^{abc}$$

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Park με γωνιακή συχνότητα ω_s:

$$U_S^{dq0} = T_{dq0}(\omega_S)\frac{d}{dt}\left[T_{dq0}^{-1}(\omega_S)\lambda_S^{dq0}\right] + T_{dq0}(\omega_S)R_S T_{dq0}^{-1}(\omega_S)I_S^{dq0}$$

$$U_{ds} = \dot{\lambda}_{ds} - \omega_S\lambda_{qs} + R_S I_{ds}$$

$$U_{qs} = \dot{\lambda}_{qs} + \omega_S\lambda_{ds} + R_S I_{qs}$$

- Ο δρομέας έχει p ζεύγη πόλων και περιστρέφεται με γωνιακή συχνότητα ω_r και τα ηλεκτρικά μεγέθη του περιστρέφονται ως προς αυτά του στάτη με γωνιακή συχνότητα $\omega_{slip} = \omega_s - p\omega_r$ ολίσθησης:

$$V_{dr} = \dot{\lambda}_{dr} - (\omega_s - p\omega_r)\lambda_{qr} + R_r I_{dr}$$

$$V_{qr} = \dot{\lambda}_{qr} + (\omega_s - p\omega_r)\lambda_{dr} + R_r I_{qr}$$

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Σχέσεις που συνδέουν ρεύματα και ροές δρομέα:

$$\lambda_{ds} = L_{\sigma s} I_{ds} + L_m (I_{ds} + I_{dr}) = L_S I_{ds} + L_m I_{dr}$$

$$\lambda_{qs} = L_{\sigma s} I_{qs} + L_m \left(I_{qs} + I_{qr}\right) = L_S I_{qs} + L_m I_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_{\sigma r} I_{dr} + L_m (I_{ds} + I_{dr}) = L_r I_{dr} + L_m I_{ds}$$

$$\lambda_{qr} = L_{\sigma r} I_{qr} + L_m \left(I_{qs} + I_{qr}\right) = L_r I_{qr} + L_m I_{qs}$$

όπου $L_{\sigma s}$ και $L_{\sigma r}$ είναι οι ανά φάση αντιδράσεις σκέδασης στάτη και δρομέα, L_m είναι η επαγωγή μαγνήτισης ενώ $L_S = L_{\sigma s} + L_m$ και $L_r = L_{\sigma r} + L_m$.

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη σχέση ροπής-ταχύτητας είναι η ακόλουθη:

$$J\dot{\omega}_r + b\omega_r = T_e - T_m$$

όπου J είναι η ροπή αδράνειας της μηχανής, b είναι ο συντελεστής απόσβεσης, T_m είναι η μηχανική ροπή δρομέα και T_e η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$T_e = \frac{3}{2}p\left(\lambda_{ds}I_{qs} - \lambda_{qs}I_{ds}\right) = \frac{3}{2}p\frac{L_m}{L_S}\left(\lambda_{qs}I_{dr} - \lambda_{ds}I_{qr}\right) = \frac{3}{2}pL_m\left(I_{qs}I_{dr} - I_{ds}I_{qr}\right) = \frac{3}{2}p\left(\lambda_{dr}I_{qr} - \lambda_{qr}I_{dr}\right)$$
$$= \frac{3}{2}p\frac{L_m}{L_r}\left(\lambda_{dr}I_{qs} - \lambda_{qr}I_{ds}\right)$$

- Μηδενίζοντας την τάση του δρομέα, δηλαδή θέτοντας $V_{dr} = V_{qr} = 0$, καταλήγουμε στο ισοδύναμο μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο δύο κάθετων αξόνων dq.

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Για ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, οι δυναμικές εξισώσεις των ροών του δρομέα γίνονται:

$$0 = \dot{\lambda}_{dr} - (\omega_S - p\omega_r)\lambda_{qr} + \frac{R_r}{L_r}\lambda_{dr} - \frac{R_r L_m}{L_r} I_{ds}$$

$$0 = \dot{\lambda}_{qr} + (\omega_S - p\omega_r)\lambda_{dr} + \frac{R_r}{L_r}\lambda_{qr} - \frac{R_r L_m}{L_r} I_{qs}$$

- Η ανάλυση θα γίνει για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό τη ροή του δρομέα, ο οποίος εκφράζεται ως

$$\lambda_{dr} = \lambda_r, \qquad \lambda_{qr} = 0 \qquad \kappa\alpha\iota \qquad \dot{\lambda}_{qr} = 0$$

- Επομένως, από τις εξισώσεις των ροών προκύπτουν:

$$\frac{L_r}{R_r}\dot{\lambda}_r + \lambda_r = L_m I_{ds}$$

$$\omega_{slip} = (\omega_S - p\omega_r) = \frac{L_m R_r}{\lambda_r L_r} I_{qs}$$

- Στη μόνιμη κατάσταση η ροή δρομέα είναι σταθερή και δίνεται από τη σχέση: $\lambda_r^* = L_m I_{ds}$

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Επομένως οι εξισώσεις ρευμάτων στάτη μπορούν να εξαχθούν με βάση το δυναμικό μοντέλο της μηχανής και, υπό προσανατολισμό στη ροή του δρομέα γράφονται ως:

$$\sigma\tau_s\dot{I}_{ds} + I_{ds} = \sigma\tau_s\omega_S I_{qs} - \frac{(1-\sigma)\tau_s}{L_m}\dot{\lambda}_r + \frac{1}{R_s}U_{ds}$$

$$\sigma\tau_s\dot{I}_{qs} + I_{qs} = -\sigma\tau_s\omega_s I_{ds} - \frac{(1-\sigma)\tau_s}{L_m}\omega_s\lambda_r + \frac{1}{R_s}U_{qs}$$

και συνδυάζονται με τις παρακάτω εξισώσεις για να εξαχθεί το μοντέλο της ασύγχρονης γεννήτριας με προσανατολισμό στο ροή του δρομέα:

$$\frac{L_r}{R_r}\dot{\lambda}_r + \lambda_r = L_m I_{ds}$$

$$J\dot{\omega}_r + b\omega_r = \frac{3}{2}p\frac{L_m}{L_r}\lambda_r I_{qs} - T_m$$

όπου $\sigma = 1 - \frac{1}{(1+\sigma_s)(1+\sigma_r)}$, με $\sigma_s = \frac{L_s}{L_m} - 1$ και $\sigma_r = \frac{L_r}{L_m} - 1$ ενώ $\tau_s = \frac{(1+\sigma_s)L_m}{R_s}$

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

- Η ροή του δρομέα δεν μπορεί να μετρηθεί κι έτσι, για να γίνει προσανατολισμός σε αυτή και να βρεθεί το μέτρο της, χρησιμοποιείται εκτιμητής ροής σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{L_r}{R_r}\dot{\hat{\lambda}}_r + \hat{\lambda}_r = L_m I_{ds}$$

όπου $\hat{\lambda}_r$ είναι η εκτίμηση της συνολικής ροής του δρομέα.

- Πρέπει να σημειωθεί ότι η συχνότητα στάτη ω_S δεν είναι σταθερή και υπολογίζεται με τη βοήθεια της συχνότητας ολίσθησης:

$$\omega_s = p\omega_r + \frac{R_r L_m}{\hat{\lambda}_r L_r} I_{qs}$$

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

- Για τον σχεδιασμό του εσωτερικού βρόχου ελέγχου ρευμάτων στάτη εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός εισόδου

$$u_{ds} = \sigma\tau_s\omega_s I_{qs} - \frac{(1-\sigma)\tau_s}{L_m}\dot{\hat{\lambda}}_r + \frac{1}{R_s}U_{ds}$$

$$u_{qs} = -\sigma\tau_s\omega_s I_{ds} - \frac{(1-\sigma)\tau_s}{L_m}\omega_s\hat{\lambda}_r + \frac{1}{R_s}U_{qs}$$

και οι εξισώσεις ρευμάτων στάτη γίνονται:

$$\sigma\tau_s\dot{I}_{ds} + I_{ds} = u_{ds}$$

$$\sigma\tau_s\dot{I}_{qs} + I_{qs} = u_{qs}$$

Αποζευγμένες!

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

- Σχεδιάζοντας PI ελεγκτές ρεύματος για τις νέες εισόδους:

$$u_{ds} = k_{Pds}\left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right) + k_{Ids}\int_0^t \left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right)d\tau$$

$$u_{qs} = k_{Pqs}\left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right) + k_{Iqs}\int_0^t \left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right)d\tau$$

οι πραγματικές είσοδοι ελέγχου είναι:

$$U_{ds} = R_s\left[-\sigma\tau_s\omega_s I_{qs} + \frac{(1-\sigma)\tau_s}{L_m}\dot{\hat{\lambda}}_r + k_{Pds}\left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right) + k_{Ids}\int_0^t \left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right)d\tau\right]$$

$$U_{qs} = R_s\left[\sigma\tau_s\omega_s I_{ds} + \frac{(1-\sigma)\tau_s}{L_m}\omega_s\hat{\lambda}_r + k_{Pqs}\left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right) + k_{Iqs}\int_0^t \left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right)d\tau\right]$$

- Επειδή η ροή δρομέα ρυθμίζεται, όπως θα δούμε στη συνέχεια σε σταθερή τιμή, ο όρος με την παράγωγο της εκτιμώμενης ροής δρομέα μπορεί να παραλειφθεί.

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

- Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου μπορεί να υπολογιστεί για $i = d, q$:

$$\frac{I_{is}}{I_{is}^{ref}} = \frac{k_{Pis}s + k_{Iis}}{\sigma\tau_s s^2 + (1 + k_{Pis})s + k_{Iis}} = \frac{1}{1 + \tau_{is}s}$$

όπου

$$k_{Pis} = \frac{\sigma\tau_s}{\tau_{is}} \qquad k_{Iis} = \frac{1}{\tau_{is}}$$

- Ποιά είναι όμως τα I_{ds}^{ref} και I_{qs}^{ref}?

I_{ds}^{ref} : ρύθμιση ροής δρομέα

I_{qs}^{ref} : ρύθμιση γωνιακής ταχύτητας δρομέα

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

- **Ρύθμιση ροής δρομέα**: Είναι σύνηθες να ορίζεται για λειτουργία μέχρι και την ονομαστική ισχύ της ασύγχρονης μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού μια σταθερή επιθυμητή ροή λειτουργίας λ_r^{ref}, η οποία σύμφωνα με τη σχέση προσανατολισμού στη ροή του δρομέα δίνει:

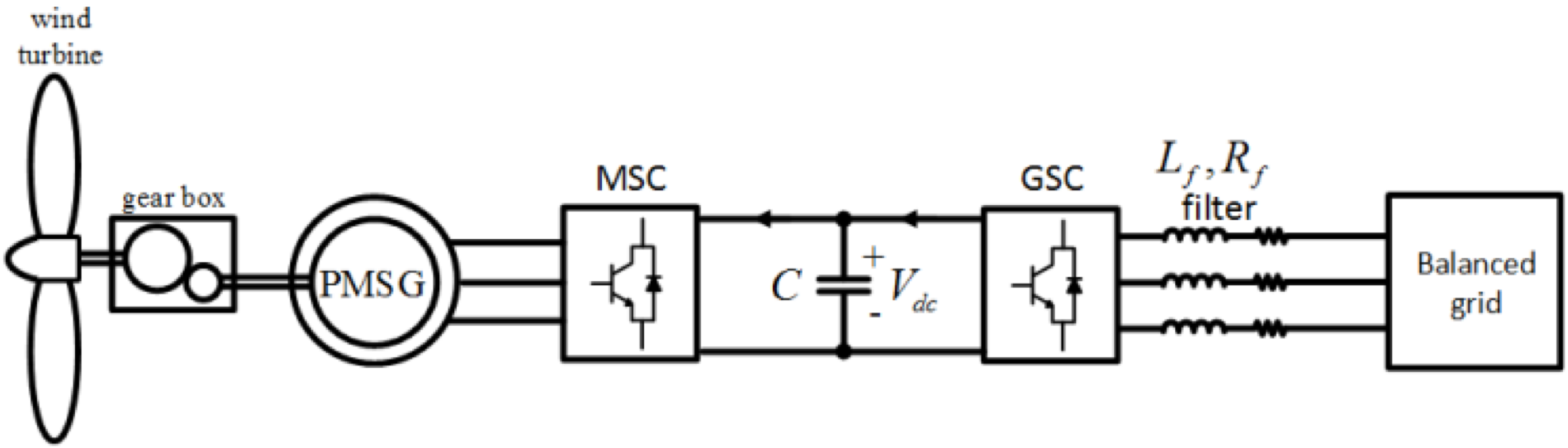
$$I_{ds}^{ref} = \frac{\lambda_r^{ref}}{L_m}$$

- **Ρύθμισης γωνιακής ταχύτητας δρομέα**: Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της γωνιακής ταχύτητας δρομέα υπό προσανατολισμό στη ροή δρομέα, και θεωρώντας ότι το ρεύμα I_{qs} έχει ισορροπήσει στην τιμή I_{qs}^{ref} (γρήγορος ελεγκτής ρεύματος), σχεδιάζεται ο PI ελεγκτής:

$$I_{qs}^{ref} = k_{P\omega}\left(\omega_r^{ref} - \omega_r\right) + k_{I\omega}\int_0^t \left(\omega_r^{ref} - \omega_r\right) d\tau$$

όπου $\omega_r^{ref} = \omega_r^{opt} = n_g \frac{\lambda_{opt}}{R_T} v_{wind}$ προκειμένου να επιτευχθεί λειτουργία μέγιστης απομάστευσης ισχύος από τον άνεμο. Αφού έχουν ισορροπήσει τα ρεύματα και με την υπόθεση ότι έχει ισορροπήσει και η ροή $\lambda_r = \lambda_r^{ref}$, τα κέρδη του ελεγκτή υπολογίζονται με αντίστοιχο τρόπο.

Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη



Μοντέλο σύγχρονης μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Φασικές τάσεις στον στάτη:

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix}$$

- Οι μαγνητικές ροές του στάτη στις 3 φάσεις δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{am} \\ \lambda_{bm} \\ \lambda_{cm} \end{bmatrix}$$

- L_{aa}, L_{bb} και L_{cc} οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του στάτη,
- L_{ab}, L_{ac} και L_{bc} οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη, για τις οποίες ισχύει L_{ij}=L_{ji}, και
- λ_{am}, λ_{bm} και λ_{cm} οι μαγνητικές ροές που παράγονται στους πόλους της μηχανής.

Μοντέλο σύγχρονης μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Park στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς:

$$V_{ds} = R_S i_{ds} - \omega_S \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt}$$

$$V_{qs} = R_S i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_S \lambda_{ds}$$

- V_{ds} και V_{qs} οι τάσεις του στάτη στους άξονες d και q αντίστοιχα,
- i_{ds} και i_{qs} τα ρεύματα του στάτη στους άξονες d και q αντίστοιχα,
- λ_{ds} και λ_{qs} οι μαγνητικές ροές του στάτη στους άξονες d και q αντίστοιχα και
- ω_S η γωνιακή ταχύτητα του σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου για την οποία ισχύει: $\omega_S = p\omega_r$, ισούται δηλαδή με το γινόμενο των ζευγών πόλων της σύγχρονης γεννήτριας με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

Μοντέλο σύγχρονης μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Οι μαγνητικές ροές του στάτη στους άξονες d και q αντίστοιχα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \lambda_{dm}$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} + \lambda_{qm}$$

- L_{ds} και L_{qs} οι επαγωγές του στάτη στους άξονες d και q αντίστοιχα και
- λ_{dm} και λ_{qm} οι συνιστώσες της μαγνητικής ροής που παράγεται στους πόλους της μηχανής.

- Σύγχρονη μηχανή κυλινδρικού δρομέα: $L_{ds} = L_{qs}$
- Σύγχρονη μηχανή με έκτυπους πόλους: $L_{ds} \neq L_{qs}$

Μοντέλο σύγχρονης μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Στην περίπτωση που το σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς είναι προσανατολισμένο με το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους μαγνητικούς πόλους της μηχανής, δηλαδή με το πεδίο του δρομέα, τότε η συνιστώσα της μαγνητικής ροής στον άξονα q είναι μηδέν ($\lambda_{qm} = 0$), ενώ στον άξονα *d* ισούται με τη μαγνητική ροή που παράγουν οι μόνιμοι μαγνήτες ($\lambda_{dm} = \lambda_m$), της οποίας η τιμή είναι σταθερή ($\dot{\lambda}_{dm} = 0$) και μπορεί να ληφθεί από τις παραμέτρους και τα στοιχεία που αναγράφονται στην πινακίδα της μηχανής.

- Για επίτευξη του προσανατολισμού γίνεται μέτρηση της γωνιακής θέσης του δρομέα μέσω κατάλληλων αισθητήρων στον άξονα της μηχανής. Η γωνία αυτή χρησιμοποιείται στον μετασχηματισμό Park.

Μοντέλο σύγχρονης μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Επομένως, οι εξισώσεις ρευμάτων στάτη της μηχανής γίνονται:

$$V_{ds} = R_S i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - p\omega_r L_{qs} i_{qs}$$

$$V_{qs} = R_S i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + p\omega_r L_{ds} i_{ds} + p\omega_r \lambda_m$$

- Η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή στη σύγχρονη μηχανή είναι:

$$T_e = \frac{3}{2} p\left(\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}\right)$$

και με αντικατάσταση των τύπων των ροών έχουμε:

$$T_e = \frac{3}{2} p\left(\lambda_m i_{qs} + i_{ds} i_{qs}\left(L_{ds} - L_{qs}\right)\right)$$

Η σχέση της ταχύτητας της μηχανής: $J\dot{\omega}_r + b\omega_r = T_e - T_m$

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες

- Για το σχεδιασμό του εσωτερικού βρόχου ελέγχου ρευμάτων στάτη εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός εισόδου:

$$u_{ds} = p\omega_r L_s I_{qs} + V_{ds}$$

$$u_{qs} = -p\omega_r L_s I_{ds} - p\omega_r \lambda_m + V_{qs}$$

και καταλήγουμε στις αποζευγμένες εξισώσεις ρεύματος:

$$L_s \dot{I}_{ds} + R_s I_{ds} = u_{ds}$$

$$L_s \dot{I}_{qs} + R_s I_{qs} = u_{qs}$$

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες

- Σχεδιάζουμε PI ελεγκτές ρεύματος για τις νέες εισόδους:

$$u_{ds} = k_{Pds}\left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right) + k_{Ids}\int_0^t \left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right)d\tau$$

$$u_{qs} = k_{Pqs}\left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right) + k_{Iqs}\int_0^t \left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right)d\tau$$

- Οι πραγματικές είσοδου ελέγχου είναι:

$$V_{ds} = -p\omega_r L_s I_{qs} + k_{Pds}\left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right) + k_{Ids}\int_0^t \left(I_{ds}^{ref} - I_{ds}\right)d\tau$$

$$V_{qs} = p\omega_r L_s I_{ds} + p\omega_r \lambda_m + k_{Pqs}\left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right) + k_{Iqs}\int_0^t \left(I_{qs}^{ref} - I_{qs}\right)d\tau$$

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες

- Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου μπορεί να υπολογιστεί για $i = d, q$:

$$\frac{I_{is}}{I_{is}^{ref}} = \frac{k_{Pis}s + k_{Iis}}{L_s s^2 + (R_s + k_{Pis})s + k_{Iis}} = \frac{1}{1 + \tau_{is}s}$$

όπου

$$k_{Pis} = \frac{L_s}{\tau_{is}} \qquad k_{Iis} = \frac{R_s}{\tau_{is}}$$

- Ποιά είναι όμως τα I_{ds}^{ref} και I_{qs}^{ref}?

I_{ds}^{ref}: μηδενισμός ρεύματος στον d άξονα (απλοποίηση ελέγχου)

I_{qs}^{ref}: ρύθμιση γωνιακής ταχύτητας δρομέα

Σχεδιασμός ελέγχου σε ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού

- **Μηδενισμός ρεύματος στον d άξονα**:

$$I_{ds}^{ref} = 0$$

- **Ρύθμισης γωνιακής ταχύτητας δρομέα**: Η διαφορική εξίσωση της γωνιακής ταχύτητας για μηχανή κυλινδρικού δρομέα ($L_{ds} = L_{qs} = L_s$) γίνεται:

$$J\dot{\omega}_r + b\omega_r = \frac{3}{2} p\lambda_m I_{qs} - T_m$$

Θεωρώντας ότι το ρεύμα I_{qs} έχει ισορροπήσει στην τιμή I_{qs}^{ref} (γρήγορος ελεγκτής ρεύματος). σχεδιάζεται ο PI ελενκτής:

$$I_{qs}^{ref} = k_{P\omega}(\omega_r^{ref} - \omega_r) + k_{I\omega} \int_0^t (\omega_r^{ref} - \omega_r) d\tau$$

όπου $\omega_r^{ref} = \omega_r^{opt} = n_g \frac{\lambda_{opt}}{R_T} v_{wind}$ προκειμένου να επιτευχθεί λειτουργία μέγιστης απομάστευσης ισχύος από τον άνεμο. Τα κέρδη του ελεγκτή υπολογίζονται με αντίστοιχο τρόπο.