

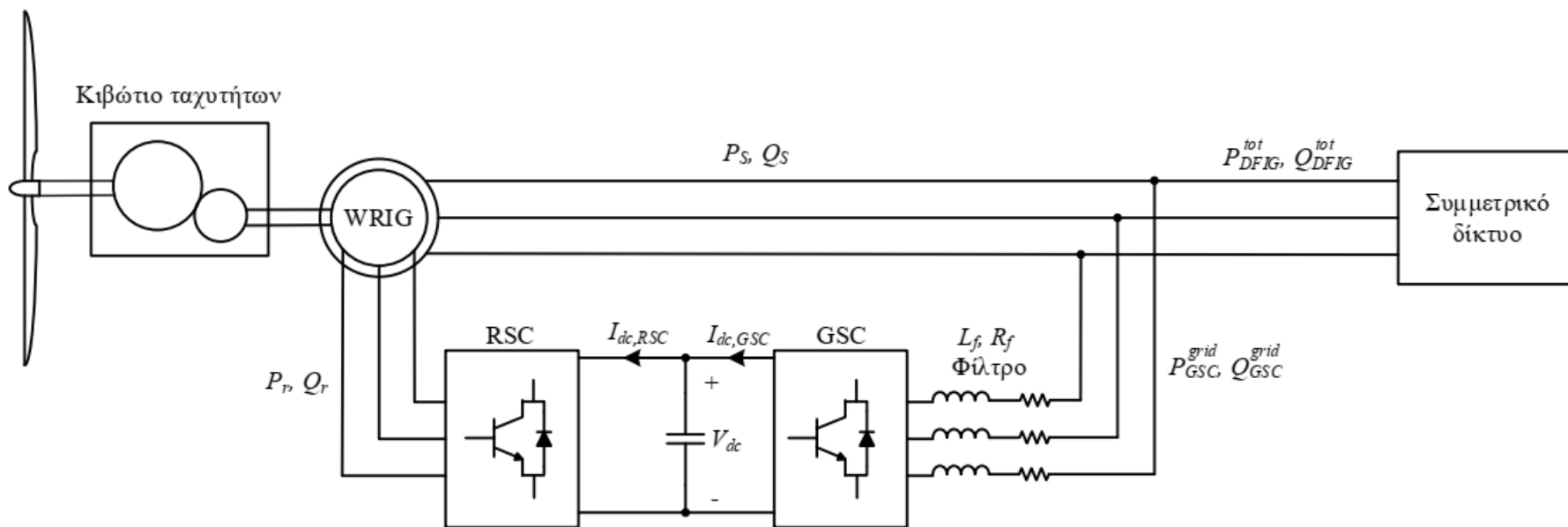
Μοντελοποίηση και έλεγχος ανεμογεννητριών - συνέχεια

Τεχνολογίες Ελέγχου στις ΑΠΕ

Καθηγητής Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Αναπλ. Καθηγητής Γεώργιος Κωνσταντόπουλος

Ανεμογεννήτρια με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοσίας

Ανεμοκνητήρας



Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Δυναμικό μοντέλο επαγωγικής γεννήτριας στο dq πλαίσιο αναφοράς:

$$\dot{\lambda}_{ds} = \omega_s \lambda_{qs} - R_s I_{ds} + U_{ds}$$

$$\dot{\lambda}_{qs} = -\omega_s \lambda_{ds} - R_s I_{qs} + U_{qs}$$

$$\sigma \tau_r \dot{I}_{dr} + I_{dr} = \sigma \tau_r \omega_{slip} I_{qr} - \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m} \dot{\lambda}_{ds} + \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m} \omega_{slip} \lambda_{qs} + \frac{V_{dr}}{R_r}$$

$$\sigma \tau_r \dot{I}_{qr} + I_{qr} = -\sigma \tau_r \omega_{slip} I_{dr} - \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m} \dot{\lambda}_{qs} - \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m} \omega_{slip} \lambda_{ds} + \frac{V_{qr}}{R_r}$$

$$J \dot{\omega}_r + b \omega_r = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} (\lambda_{qs} I_{dr} - \lambda_{ds} I_{qr}) - T_m$$

$$\mu \epsilon \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \text{ και } \tau_r = \frac{L_r}{R_r}.$$

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Δυναμικό μοντέλο μετατροπέα της πλευράς του δικτύου μαζί με την διασύνδεση ΣΡ:

$$L_f \dot{I}_{df} = -R_f I_{df} + \omega_s L_f I_{qf} - V_{df} + U_{dgrid}$$

$$L_f \dot{I}_{qf} = -\omega_s L_f I_{df} - R_f I_{qf} - V_{qf} + U_{qgrid}$$

$$\frac{2}{3} C \dot{V}_{dc} = \frac{V_{df} I_{df} + V_{qf} I_{qf} - V_{dr} I_{dr} - V_{qr} I_{qr}}{V_{dc}}$$

- Σημειώνεται ότι οι λόγοι κατάτμησης των μετατροπέων είναι:

$$\bullet u_{df} = \frac{V_{df}}{V_{dc}/2}, u_{qf} = \frac{V_{qf}}{V_{dc}/2}, u_{dr} = \frac{V_{dr}}{V_{dc}/2}, u_{qr} = \frac{V_{qr}}{V_{dc}/2}$$

Όπου οι δείκτες f και r αντιστοιχούν στην πλευρά του δικτύου και του ρότορα της μηχανής, αντίστοιχα.

Μοντέλο επαγωγικής μηχανής στο dq πλαίσιο αναφοράς

- Χρησιμοποιώντας PLL ώστε να επιτύχουμε προσανατολισμό της τάσης του δικτύου στον q άξονα:

$$U_{ds} = U_{dgrid} = 0$$

$$U_{qs} = U_{qgrid} = U_{grid}$$

- Στη μόνιμη κατάσταση, υπό τον προτεινόμενο προσανατολισμό της τάσης του δικτύου, λαμβάνουμε:

$$\lambda_{qs}^* = \frac{R_s I_{ds}^*}{\omega_s}$$

$$\lambda_{ds}^* = \frac{U_{grid} - R_s I_{qs}^*}{\omega_s}$$

- Για ανεμογεννήτρια μεγάλης ονομαστικής ισχύος (MW), η αντίσταση στάτη είναι πολύ μικρή (mΩ), το πλάτος της φασικής τάσης είναι της τάξης των kV και το δίκτυο συχνότητας 50Hz. Επομένως:

$$\lambda_{qs}^* \cong \bar{\lambda}_{qs} = 0$$

Προσανατολισμός της ροής του στάτη στον d άξονα!

$$\lambda_{ds}^* \cong \bar{\lambda}_{ds} = \frac{U_{grid}}{\omega_s}$$

Το ίδιο μπορεί να συμβεί αν επιτευχθεί ρεύμα $I_{ds}^* = 0$ (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος). Προσοχή, το ρεύμα I_{ds} δεν ελέγχεται απ'ευθείας!

Σχεδιασμός εσωτερικών βρόχων ελέγχου από την πλευρά του δρομέα

- Θεωρώντας προσανατολισμό της ροής του στάτη στον d άξονα, ισχύει ότι $\lambda_{qs} = 0$ και $\dot{\lambda}_{qs} = 0$. Επομένως, οι εξισώσεις ρευμάτων δρομέα γίνονται:

$$\sigma\tau_r\dot{I}_{dr} + I_{dr} = \sigma\tau_r\omega_{slip}I_{qr} - \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m}\dot{\lambda}_{ds} + \frac{V_{dr}}{R_r}$$

$$\sigma\tau_r\dot{I}_{qr} + I_{qr} = -\sigma\tau_r\omega_{slip}I_{dr} - \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m}\omega_{slip}\bar{\lambda}_{ds} + \frac{V_{qr}}{R_r}$$

όπου όμως προσεγγιστικά ισχύει: $\bar{\lambda}_{ds} = \frac{U_{grid}}{\omega_S}$

- Επομένως:

$$\sigma\tau_r\dot{I}_{dr} + I_{dr} = \sigma\tau_r\omega_{slip}I_{qr} + \frac{V_{dr}}{R_r}$$

$$\sigma\tau_r\dot{I}_{qr} + I_{qr} = -\sigma\tau_r\omega_{slip}I_{dr} - \frac{(1-\sigma)\tau_r}{L_m}\omega_{slip}\frac{U_{grid}}{\omega_S} + \frac{V_{qr}}{R_r}$$

Σχεδιασμός εσωτερικών βρόχων ελέγχου από την πλευρά του δρομέα

- Με βάση τη θεωρία ελέγχου που εφαρμόσαμε και στις προηγούμενες μηχανές, προκύπτει ο νόμος ελέγχου:

$$V_{dr} = R_r \left[-\sigma \tau_r \omega_{slip} I_{qr} + k_{Pdr} (I_{dr}^{ref} - I_{dr}) + k_{Idr} \int_0^t (I_{dr}^{ref} - I_{dr}) d\tau \right]$$

$$V_{qr} = R_r \left[\sigma \tau_r \omega_{slip} I_{dr} + \frac{(1 - \sigma) \tau_r}{L_m} \omega_{slip} \frac{U_{grid}}{\omega_s} + k_{Pqr} (I_{qr}^{ref} - I_{qr}) + k_{Iqr} \int_0^t (I_{qr}^{ref} - I_{qr}) d\tau \right]$$

όπου τα κέρδη των PI ελεγκτών υπολογίζονται κατάλληλα με την επιθυμητή σταθερά χρόνου τ_i .

Σχεδιασμός εσωτερικών βρόχων ελέγχου από την πλευρά του δικτύου

- Λαμβάνοντας υπόψη τον προσανατολισμό της τάσης του δικτύου στον q άξονα, οι εξισώσεις ρευμάτων του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου γίνονται:

$$L_f \dot{I}_{df} = -R_f I_{df} + \omega_s L_f I_{qf} - V_{df}$$

$$L_f \dot{I}_{qf} = -\omega_s L_f I_{df} - R_f I_{qf} - V_{qf} + U_{grid}$$

- Επομένως, ακολουθώντας τη θεωρία ελέγχου που έχουμε μάθει, προκύπτει ο νόμος ελέγχου:

$$V_{df} = \omega_s L_f I_{qf} - k_{pdf} (I_{df}^{ref} - I_{df}) - k_{Idf} \int_0^t (I_{df}^{ref} - I_{df}) d\tau$$

$$V_{qf} = U_{grid} - \omega_s L_f I_{df} - k_{pqf} (I_{qf}^{ref} - I_{qf}) - k_{Iqf} \int_0^t (I_{qf}^{ref} - I_{qf}) d\tau$$

Με τα κέρδη των PI ελεγκτών να υπολογίζονται κατάλληλα με βάση την επιθυμητή σταθερά χρόνο τ_i .

Σχεδιασμός εξωτερικών βρόχων ελέγχου

- **Ελεγκτής ρύθμισης γωνιακής ταχύτητας δρομέα:**

Θεωρώντας γρήγορους εσωτερικούς ελεγκτές ρεύματος και προσανατολισμό της ροής του στάτη στον d άξονα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται ως:

$$T_e = -\frac{3}{2}p \frac{L_m}{L_s} \frac{U_{grid}}{\omega_s} I_{qr}^{ref}$$

Επομένως, η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα μπορεί να ελεγχθεί μέσω του ρεύματος του q άξονα ως:

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

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.

Σχεδιασμός εξωτερικών βρόχων ελέγχου

- **Ελεγκτής ρύθμισης αέργου ισχύος στάτη:**

Εφόσον η ρύθμιση της ενεργούς ισχύος γίνεται μέσω του ρεύματος I_{qr} , η ρύθμιση της αέργου ισχύος στάτη θα πρέπει να γίνει μέσω του ρεύματος δρομέα I_{dr} . Χρησιμοποιώντας τις ακριβείς τιμές ισορροπίας για τις συνιστώσες ροών στάτη καθώς και τη σχέση $\lambda_{qs} = L_S I_{qs} + L_m I_{qr}$, έχουμε:

$$\omega_S \lambda_{qs}^* = R_S I_{ds}^*$$

$$\omega_S \lambda_{ds}^* = U_{grid} - \frac{R_S}{L_S} \lambda_{qs}^* + R_S \frac{L_m}{L_S} I_{qr}^{ref}$$

Επιπλέον, η έκφραση της αέργου ισχύος στάτη υπό προσανατολισμό της τάσης του στάτη στον q άξονα γίνεται:

$$Q_s^* = \frac{3}{2} U_{grid} I_{ds}^*$$

οδηγώντας στην παρακάτω έκφραση:

$$\lambda_{qs}^* = \frac{2}{3} \frac{R_S}{\omega_S U_{grid}} Q_s^*$$

Σχεδιασμός εξωτερικών βρόχων ελέγχου

Με αντικατάσταση στην εξίσωση της ροής στάτης στον d άξονα:

$$\lambda_{ds}^* = \frac{U_{grid}}{\omega_s} - \frac{2}{3} \frac{R_s^2}{\omega_s^2 L_s U_{grid}} Q_s^* + \frac{R_s L_m}{\omega_s L_s} I_{qr}^{ref}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι: $\lambda_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr}$ έχουμε επίσης:

$$\lambda_{ds}^* = \frac{2}{3} \frac{L_s}{U_{grid}} Q_s^* + L_m I_{dr}^{ref}$$

Εξισώνοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις λαμβάνουμε την επιθυμητή τιμή του ρεύματος δρομέα στον d άξονα ως:

$$I_{dr}^{ref} = \frac{U_{grid}}{\omega_s L_m} + \frac{R_s}{\omega_s L_s} I_{qr}^{ref} - \frac{2}{3 L_m U_{grid}} \left(L_s + \frac{R_s^2}{\omega_s^2 L_s} \right) Q_s^*$$

για μια επιθυμητή άεργο ισχύο στον στάτη $Q_s^* = Q_s^{ref}$.

Σχεδιασμός εξωτερικών βρόχων ελέγχου

- **Ελεγκτής ρύθμισης αέργου ισχύος από την πλευρά του δικτύου:**

Θεωρώντας γρήγορους εσωτερικούς ελεγκτές ρεύματος και προσανατολισμό της ροής του στάτη στον d άξονα, η αέργος ισχύς στην πλευρά του μετατροπέα δικτύου γίνεται:

$$Q_{GSC}^{grid} = \frac{3}{2} U_{grid} I_{df}^{ref}$$

από όπου προκύπτει το επιθυμητό ρεύμα του d άξονα για τον μετατροπέα της πλευράς του δικτύου:

$$I_{df}^{ref} = \frac{2}{3U_{grid}} Q_{GSC}^{grid,ref}$$

Προφανώς, για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος προκύπτει $I_{df}^{ref} = 0$.

Σχεδιασμός εξωτερικών βρόχων ελέγχου

- **Ελεγκτής τάσης διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος:**

Ο έλεγχος της τάσης διασύνδεσης ΣΡ πραγματοποιείται μέσω του ρεύματος του q άξονα για τον μετατροπέα της πλευρά του δικτύου, χρησιμοποιώντας έναν τυπικό PI ελεγκτή:

$$I_{qf}^{ref} = k_{Pdc}(V_{dc}^{ref} - V_{dc}) + k_{Idc} \int_0^t (V_{dc}^{ref} - V_{dc}) d\tau$$

Σχηματικό διάγραμμα πλήρους μοντέλου ανεμογεννήτριας με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδοσίας

