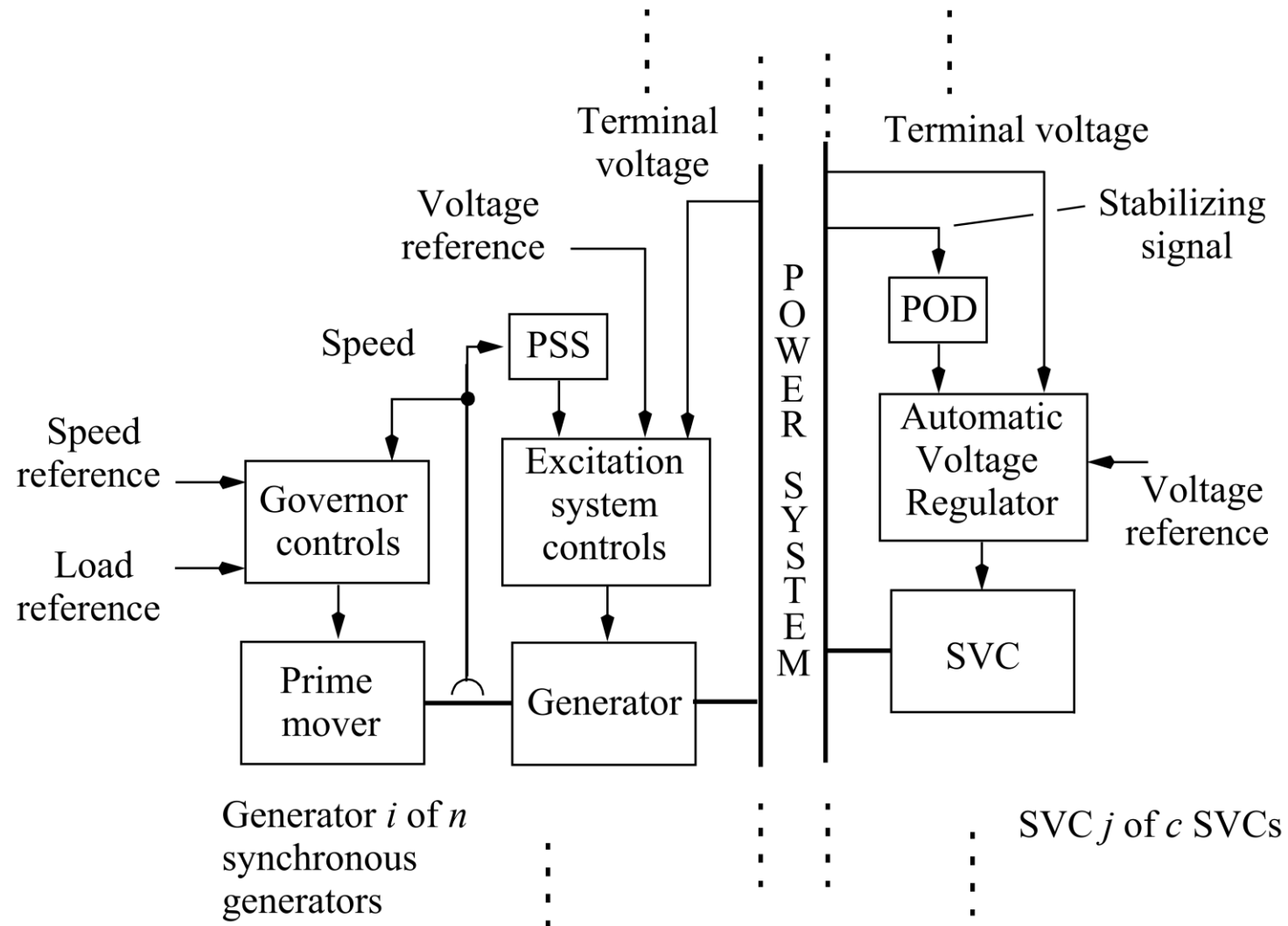


Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ

Σταθεροποιητής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Έλεγχος σύγχρονης γεννήτριας και συστήματος μεταφοράς



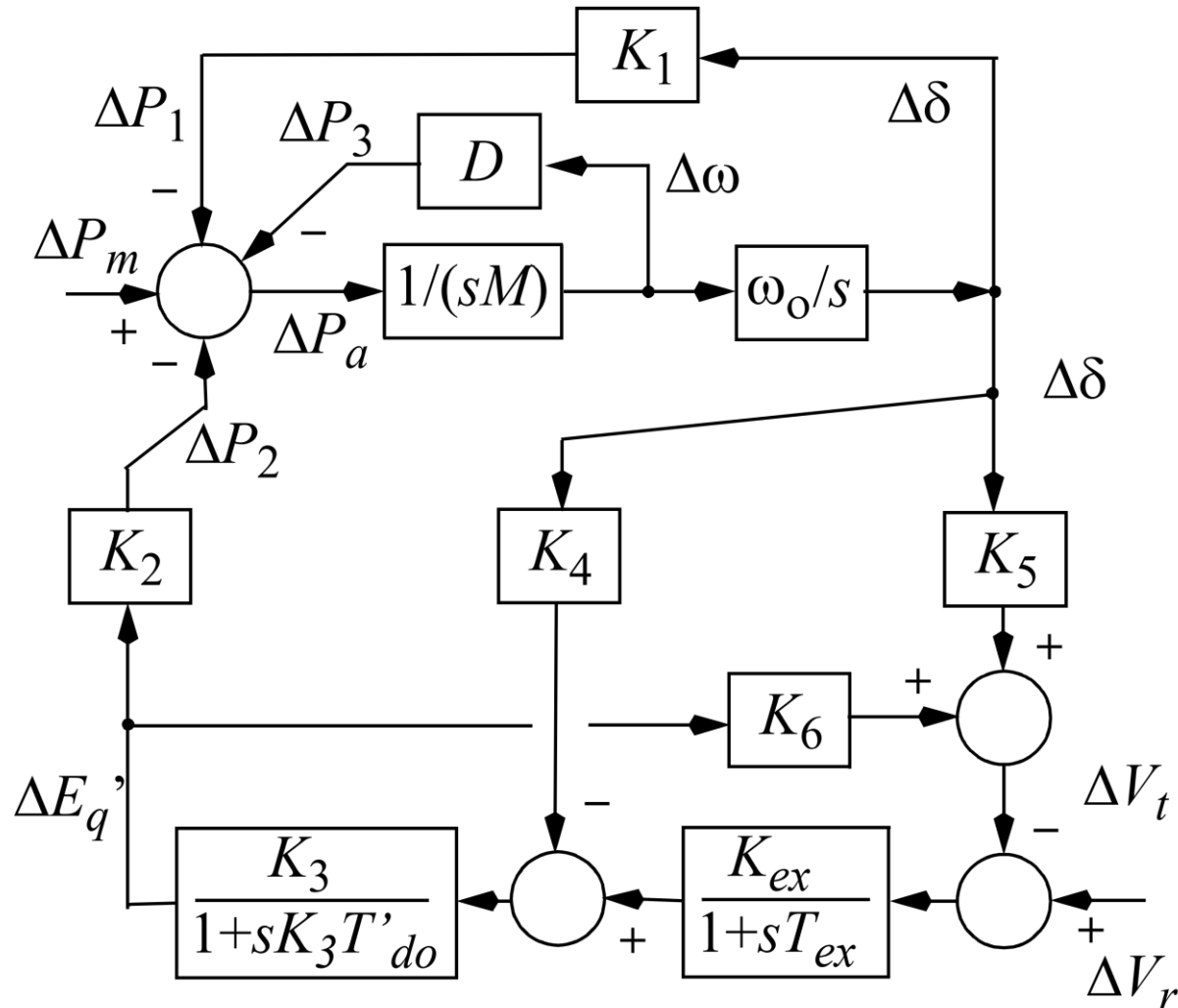
Σταθεροποιητής συστήματος

- Ο σταθεροποιητής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (power system stabilizer - PSS) εφαρμόζεται σε μια σύγχρονη μηχανή και έχει διπλό ρόλο:
 - Να σταθεροποιήσει τις ασταθείς ηλεκτρομηχανικές καταστάσεις του συστήματος
 - Να εγγυηθεί ότι υπάρχει ικανό περιθώριο ευστάθειας για τις καταστάσεις αυτές σε ένα εύρος καταστάσεων λειτουργίας και απρόσμενων συνθηκών (οι ηλεκτρομηχανικές καταστάσεις είναι ικανώς αποσβεννύμενες)
- Η εφαρμογή του σταθεροποιητή συστήματος επεκτείνεται και στην περίπτωση συστήματος με πολλαπλές μηχανές (multi-machine power system)
- Ο σταθεροποιητής συστήματος χρησιμοποιεί την μέτρηση της ταχύτητας της γεννήτριας ως το σήμα σταθεροποίησης για τον ελεγκτή κλειστού βρόχου

Σταθεροποιητής συστήματος

- Ο βασικός ρόλος του PSS είναι η προσθήκη απόσβεσης στις ηλεκτρομηχανικές καταστάσεις (modes) για μικρές διαταραχές (small disturbances) του συστήματος.
- Οι μη γραμμικές εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά της γεννήτριας γραμμικοποιούνται γύρω από ένα σημείο ισορροπίας.
- Ο βρόχος ελέγχου του PSS περιλαμβάνει το σύστημα διέγερσης, το οποίο περιέχει τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης (automatic voltage regulator – AVR), και μοντελοποιείται ως μια απλή συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης.

Σύστημα σύγχρονης μηχανής συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό



- ΔP_1 Electrical torque, a function of rotor angle
- ΔP_2 Torque of electro-magnetic origin
- ΔP_3 Damping torque associated with windage, friction, and losses in the damper windings
- ΔP_a Accelerating torque acting on the shaft of the generator-turbine unit
- ΔP_m Prime mover torque
- $\Delta E_q'$ Voltage proportional to direct axis flux linkages
- ΔV_t Terminal voltage
- ΔV_r Reference voltage
- $\Delta \omega$ Rotor speed
- $\Delta \delta$ Rotor angle

Ροπές απόσβεσης και συγχρονισμού

- Το στοιχείο της ροπής που είναι ανάλογο με την ταχύτητα ονομάζεται ροπή απόσβεσης (damping torque) και το στοιχείο που είναι ανάλογο με την γωνία του ρότορα ονομάζεται ροπή συγχρονισμού (synchronizing torque).
- Και οι δύο αυτές ροπές 'φρενάρουν' το σύστημα καθώς αντιστέκονται σε μεταβολές της ταχύτητας και της γωνίας.
- Ας θεωρήσουμε την βασική ηλεκτρομαγνητική ροπή ΔP_0 που εφαρμόζεται στον ρότορα της γεννήτριας. Αν οι μεταβολές της ροπής βασικού κινητήρα (prime-mover torque) είναι αμελητέες, $\Delta P_m = 0$, τότε το άθροισμα των ηλεκτρικών ροπών που εφαρμόζονται στον ρότορα είναι:

$$\Delta P_0(s) = \Delta P_a = \Delta P_1(s) + \Delta P_2(s) + \Delta P_3(s)$$

Ροπές απόσβεσης και συγχρονισμού

- Ισοδύναμα:

$$\Delta P_0(s) = K_1 \Delta \delta(s) + K_2 \Delta E'_q(s) + D \Delta \omega(s)$$

- Με βάση τη σχέση της γωνίας ρότορα (σε rad) και της per-unit ταχύτητας:

$$\Delta \delta(s) = \omega_0 \Delta \omega(s) / s$$

- Μόνο ο όρος $K_2 \Delta E'_q(s)$ δεν έχει εκφραστεί συναρτήσει των $\Delta \omega$ και $\Delta \delta$. Όμως

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta} = \frac{s}{\omega_0} \cdot \frac{\Delta E'_q}{\Delta \omega}$$

Ροπές απόσβεσης και συγχρονισμού

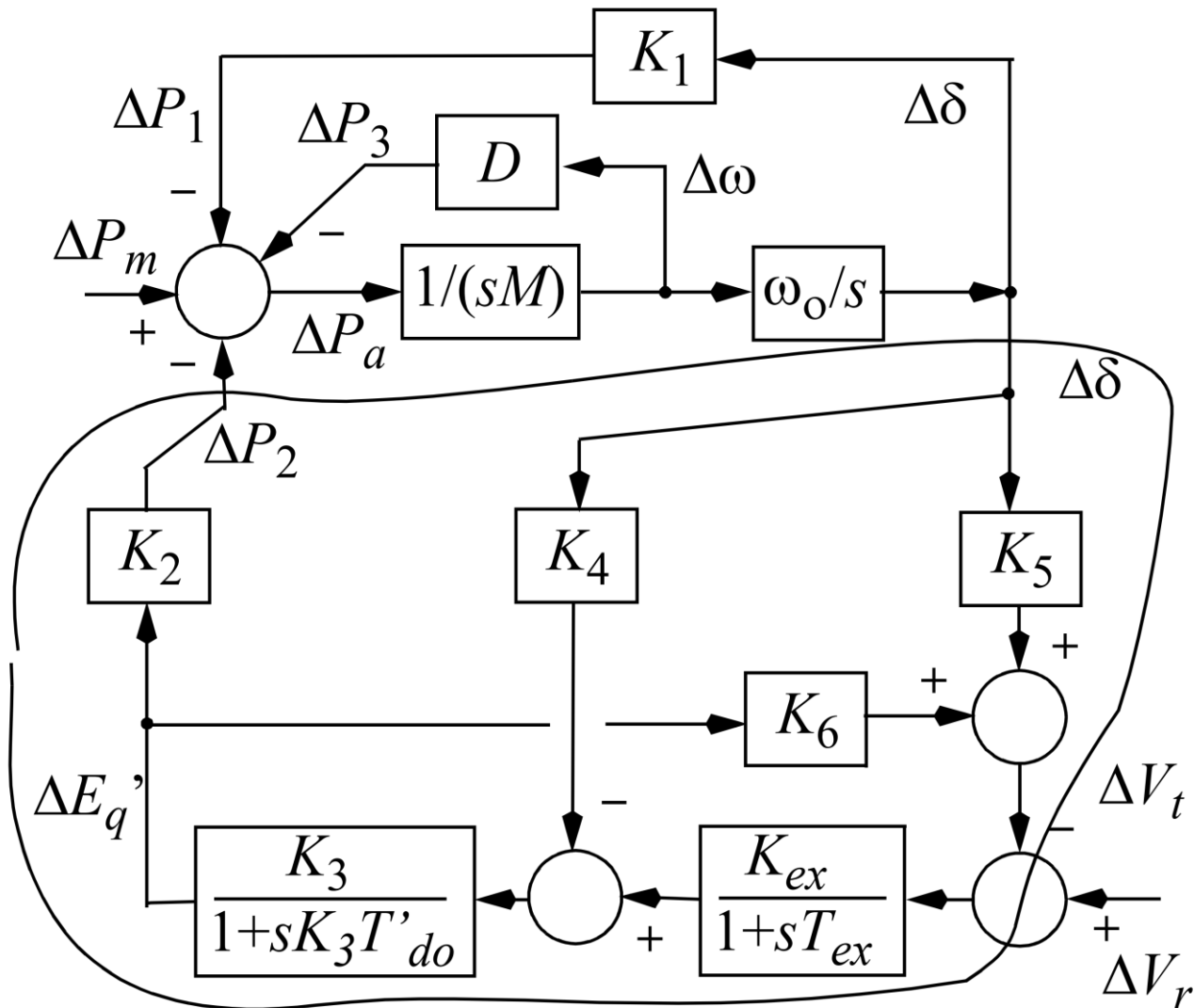
- Ο όρος της ηλεκτρικής ροπής $K_2 \Delta E'_q(s)$ μπορεί να χωριστεί σε δύο όρους, έναν πραγματικό όρο ανάλογο της γωνίας ρότορα και έναν πραγματικό όρο ανάλογο της ταχύτητας. Επομένως η έκφραση $\Delta P_0(s)$ μπορεί να γραφεί:

$$\Delta P_0 = [K_1 + K_2 \operatorname{Re}(\Delta E'_q / \Delta \delta)] \Delta \delta + [D + K_2 \operatorname{Re}(\Delta E'_q / \Delta \omega)] \Delta \omega$$
$$\Delta P_0 = k_s \Delta \delta + k_d \Delta \omega$$

- $k_s \Delta \delta$: ροπή απόσβεσης
- $k_d \Delta \omega$: ροπή συγχρονισμού
- Από το σχηματικό διάγραμμα έχουμε:

$$\frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta} = \frac{-K_3 [K_4 (1 + sT_{ex}) + K_5 K_{ex}]}{s^2 K_3 T_{ex} T'_{d0} + s(T_{ex} + K_3 T'_{d0}) + (1 + K_3 K_6 K_{ex})}$$

Υπολογισμός $\Delta E'_q(s)/\Delta\delta$



Υπολογισμός συντελεστών των ροπών

- Γνωρίζουμε ότι $s = j\omega_f$

- Από τη σχέση ταχύτητας-γωνίας:

$$\Delta\delta(j\omega_f) = -j(\omega_0/\omega_f)\Delta\omega(j\omega_f)$$

- Επομένως

$$\Delta P_0(j\omega_f) = k_d \Delta\omega(j\omega_f) - j \left(\frac{\omega_0}{\omega_f} \right) k_s \Delta\omega(j\omega_f) = (a + jb) \Delta\omega(j\omega_f)$$

όπου $a = k_d$ και $b = -(\omega_0/\omega_f)k_s$ είναι οι συντελεστές ροπών και είναι αντίστοιχα το πραγματικό και φανταστικό μέρος της συνάρτησης μεταφοράς $\Delta P_0(j\omega_f)/\Delta\omega(j\omega_f)$. Ομοίως

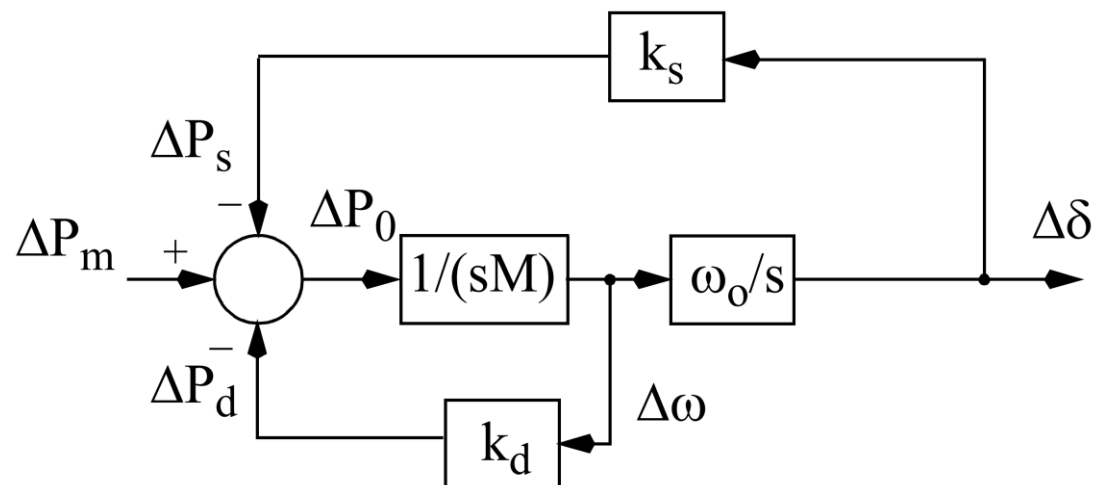
$$k_d = \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta P_0(j\omega_f)}{\Delta\omega(j\omega_f)} \right\} \text{ και } k_s = -\operatorname{Im} \left\{ \frac{\omega_0}{\omega_f} \cdot \frac{\Delta P_0(j\omega_f)}{\Delta\omega(j\omega_f)} \right\}$$

Απλοποιημένο μοντέλο γεννήτριας συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό

Θεωρούμε τις παρακάτω απλοποιήσεις:

- Δεν υπάρχουν μεταβολές στην επιθυμητή τάση V_r
- Οι σταθερές χρόνου του συστήματος διέγερσης T_{ex} και του ανοικτού κυκλώματος $K_3 T'_{d0}$ είναι πολύ μικρές
- Οι μόνες διαταραχές του συστήματος εμφανίζονται ως διαταραχές της μηχανικής ροπής ΔP_m

Απλοποιημένο μοντέλο:



Απλοποιημένο μοντέλο γεννήτριας συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό

- Η βασική ηλεκτρομαγνητική ροπή ΔP_0 που εφαρμόζεται στον ρότορα της γεννήτριας είναι το άρθιοσμα των ροπών συγχρονισμού και απόσβεσης:

$$\Delta P_0(s) = \Delta P_s + \Delta P_d = k_s \Delta \delta + k_d \Delta \omega$$

- Η συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ της μεταβολής της μηχανικής ροπής και της γωνίας ρότορα είναι

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta P_m} = \frac{\frac{\omega_0}{2H}}{s^2 + \frac{k_d}{2H}s + \frac{\omega_0 k_s}{2H}}$$

- Τυπικά η απόσβεση σε ένα τέτοιο σύστημα είναι ασθενής και η απόκριση του σε βηματική είσοδο είναι ταλαντωτική

Απλοποιημένο μοντέλο γεννήτριας συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό

- Υπάρχει ένα ζεύγος μιγαδικών πόλων:

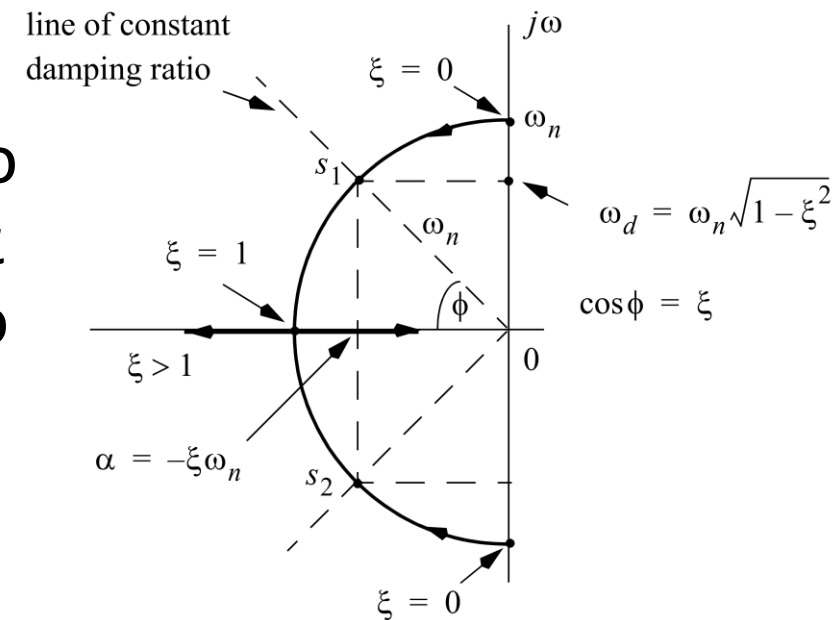
$$s_{1,2} = -\frac{k_d}{4H} \pm j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\omega_0 k_s}{2H} - \left(\frac{k_d}{2H}\right)^2} \approx -\frac{k_d}{4H} \pm j \sqrt{\frac{\omega_0 k_s}{2H}}$$

όταν $k_d \ll 2\sqrt{\omega_0 k_s (2H)}$. Η αποσβενύμενη συχνότητα των ταλαντώσεων του δρομέα είναι $\omega_d \approx \sqrt{\omega_0 k_s / (2H)}$. Επομένως, **όσο αυξάνεται ο συντελεστής ροπής απόσβεσης k_d :**

- Οι πόλοι μετακινούνται 'σχεδόν παράλληλα στον πραγματικό άξονα' προς τα αριστερά στο μιγαδικό επίπεδο με μια σχεδόν σταθερή συχνότητα ταλάντωσης (όσο ο λόγος απόσβεσης είναι μικρότερος από 0.2-0.3)
- Η σταθερά απόσβεσης είναι $a = -k_d / (4H)$, δηλαδή αντιστρόφως ανάλογη της σταθεράς αδράνειας H

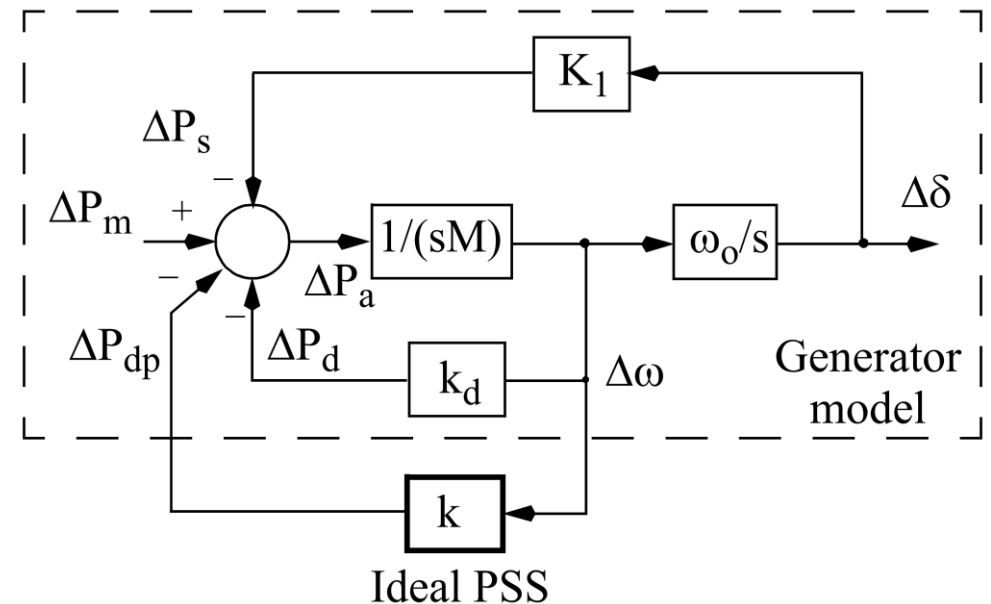
Απλοποιημένο μοντέλο γεννήτριας συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό

- Η συχνότητα της αποσβεννύμενης ταλάντωσης είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του λόγου $\omega_0 k_s / (2H)$.
- Αν ο λόγος απόσβεσης ξεπεράσει το ~ 0.2 όσο το k_d αυξάνεται, η τροχιά των μιγαδικών πόλων θα κινείται σε ένα ημικύκλιο με σταθερή ακτίνα στο μιγαδικό επίπεδο
- Αν η τιμή του $a = -k_d / (4H)$ είναι θετική (δηλαδή ο συντελεστής ροπής απόσβεσης k_d είναι αρνητικός) τότε ένα ζεύγος πόλων θα βρίσκεται στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, κι επομένως το σύστημα θα είναι ασταθές



Ιδανικός PSS

- Ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να προσθέσουμε ένα βρόχο ανατροφοδότησης από την ταχύτητα του ρότορα $\Delta\omega$ προς το σήμα ροπής ΔP_{dp} , δηλαδή $\Delta P_{dq} = k\Delta\omega$
- Παρατηρούμε ότι η αύξηση του κέρδους k (κέρδος απόσβεσης του PSS) έχει την ίδια επίδραση με την αύξηση του συντελεστή ροπής απόσβεσης k_d , δηλαδή αυξάνει την απόσβεση των ταλαντώσεων ρότορα
- Μετατόπιση πόλων προς τα αριστερά από το $-k_d/(4H)$ στο $-(k + k_d)/(4H)$



Παράδειγμα σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό χωρίς PSS

Generator: $D = 0$, $H = 3.0$ MWs/MVA, $r_a = 0$, $x_d = 1.9$ pu, $x_q = 1.8$ pu, $x'_d = 0.30$ pu,

$T'_{do} = 6.5$ s, rating 250 MVA.

Exciter: $K_{ex} = 200$ pu, $T_{ex} = 0.02$ s.

Transformer and line reactance: $x_t = 0.15$ pu and $x_L = 0.225$ pu, respectively.

The generator is under closed-loop voltage control, terminal voltage $V_t = 1.0$ pu.

Operating Conditions: System frequency = 50 Hz. Rated real power output is $P = 0.9$ pu, and reactive power outputs are $Q = -0.20, 0.0, 0.2$ and 0.4 pu.

Q pu	Rotor Angle deg.	Angle Term. Voltage deg.	Infinite Bus Voltage pu	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	Eigenvalues, rotor mode	k_d at 8.69 rad/s	k_s at 8.69 rad/s
-0.2	85.9	17.4	1.127	1.355	1.665	0.297	2.664	-0.121	0.204	$1.44 \pm j9.32$	-17.3	1.66
0.0	77.0	18.6	1.055	1.289	1.523	0.297	2.437	-0.072	0.292	$0.539 \pm j8.73$	-6.47	1.46
0.2	70.0	20.0	0.985	1.202	1.371	0.297	2.194	-0.051	0.357	$0.26 \pm j8.25$	-3.12	1.30
0.4	64.9	21.6	0.915	1.122	1.227	0.297	1.964	-0.048	0.404	$0.188 \pm j7.94$	-2.26	1.20

• PSS με $k_d > 17.3$ θα κάνει το σύστημα ευσταθές

- Ανάλυση ιδιοτιμών: ασταθείς καταστάσεις λειτουργίας ρότορα σε συχνότητες μεταξύ 7.9 και 9.3 rad/s
- Συχνότητα 8.69 rad/s στη μέση του εύρους ταλαντωτικών συχνοτήτων του ρότορα

Σχεδιασμός του PSS

- Ορίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του PSS ως

$$H_{PSS}(s) = kG(s), \text{ όπου } G(s) = G_C(s)G_W(s)G_{LP}(s)$$

όπου η $G(s)$ περιλαμβάνει συναρτήσεις αντιστάθμισης και φίλτρα. Η μεθοδολογία για το σχεδιασμό της $H_{PSS}(s)$ είναι η εξής:

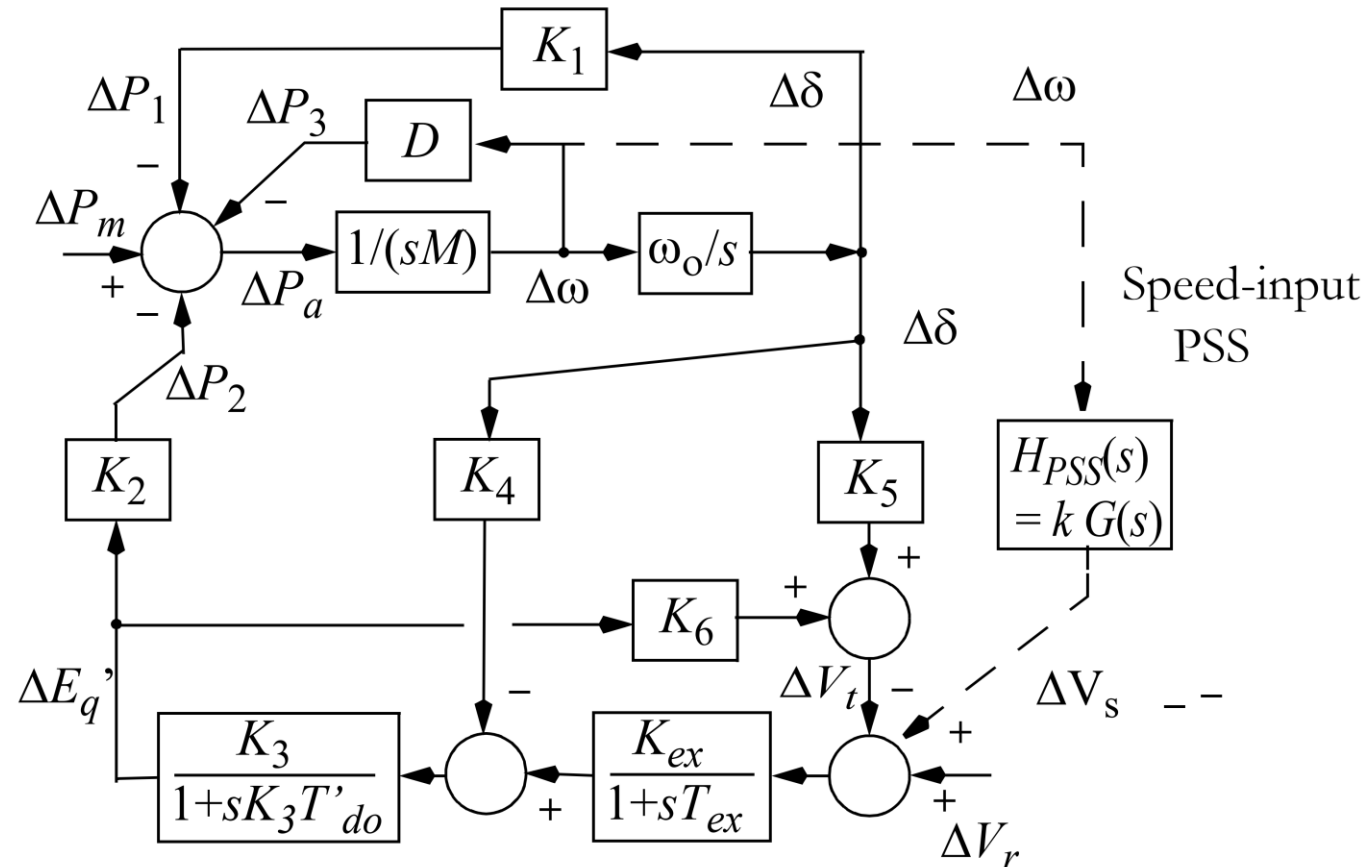
1. Σχεδιάζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς αντιστάθμισης $G_C(s)$ έτσι ώστε σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, η ηλεκτρομαγνητική ροπή που εισέρχεται από τον PSS να είναι ανάλογη της ταχύτητας
2. Επιλέγουμε την τιμή του κέρδους απόσβεσης k
3. Επιλέγουμε τις παραμέτρους του PSS washout filter $G_W(s)$. Το φίλτρο αυτό αποκόπτει τις τιμές μόνιμης κατάστασης (DC offsets) και μειώνει σημαντικά τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων, κάτω από το εύρος συχνοτήτων του ρότορα. Ιδανικά, η συνάρτηση μεταφοράς στο εύρος συχνοτήτων του ρότορα είναι $1 \angle 0^\circ$

Σχεδιασμός του PSS

4. Επιλέγουμε τις παραμέτρους του κατωδιαβατού φίλτρου $G_{LP}(s)$ που μειώνει σημαντικά τις υψηλές συχνότητες πάνω από το εύρος συχνοτήτων του ρότορα. Στο εύρος αυτό, η συνάρτηση μεταφοράς είναι ιδανικά $1\angle 0^\circ$
5. Εφαρμόζουμε τον PSS στο σύστημα, αναλύουμε την απόδοση του και επιβεβαιώνουμε την οθότητα του σχεδιασμού σε ένα εύρος καταστάσεων λειτουργίας

Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης

- Η έξοδος του PSS εισέρχεται ως σήμα στο αθροιστικό σημείο της τάσης αναφοράς και της τερματικής τάσης, ή σε κάποιο σημείο στον AVR.



Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης

- Σε ένα εύρος των ηλεκτρομηχανικών καταστάσεων (ρότορα), πχ. από 1.5 έως 15rad/s, το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς του washout και του κατωδιαβατού φίλτρου πρέπει να είναι κοντά στο $1 \angle 0^\circ$. Κάτω από αυτές τις συνθήκες:

$$H_{PSS}(s) = kG_c(s)$$

- Η εξίσωση των ηλεκτρομαγνητικών ροπών είναι:

$$\Delta P_0(s) = \Delta P_1(s) + \Delta P_2(s) + \Delta P_3(s), \quad \Delta P_m = 0$$

- Σκοπός του PSS είναι να εισάγει ροπή (ηλεκτρομαγνητικής φύσης) η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας του ρότορα της γεννήτριας μέσω των συντελεστών των ροπών ΔP_1 και ΔP_2 . Αφού το σύστημα είναι γραμμικό, μπορεί να εφαρμοστεί ο κανόνας της υπέρθεσης, ώστε να προκύψουν οι σχέσεις για καθέναν από τους συντελεστές των ροπών, και στη συνέχεια να συνδυαστούν κατάλληλα

Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης

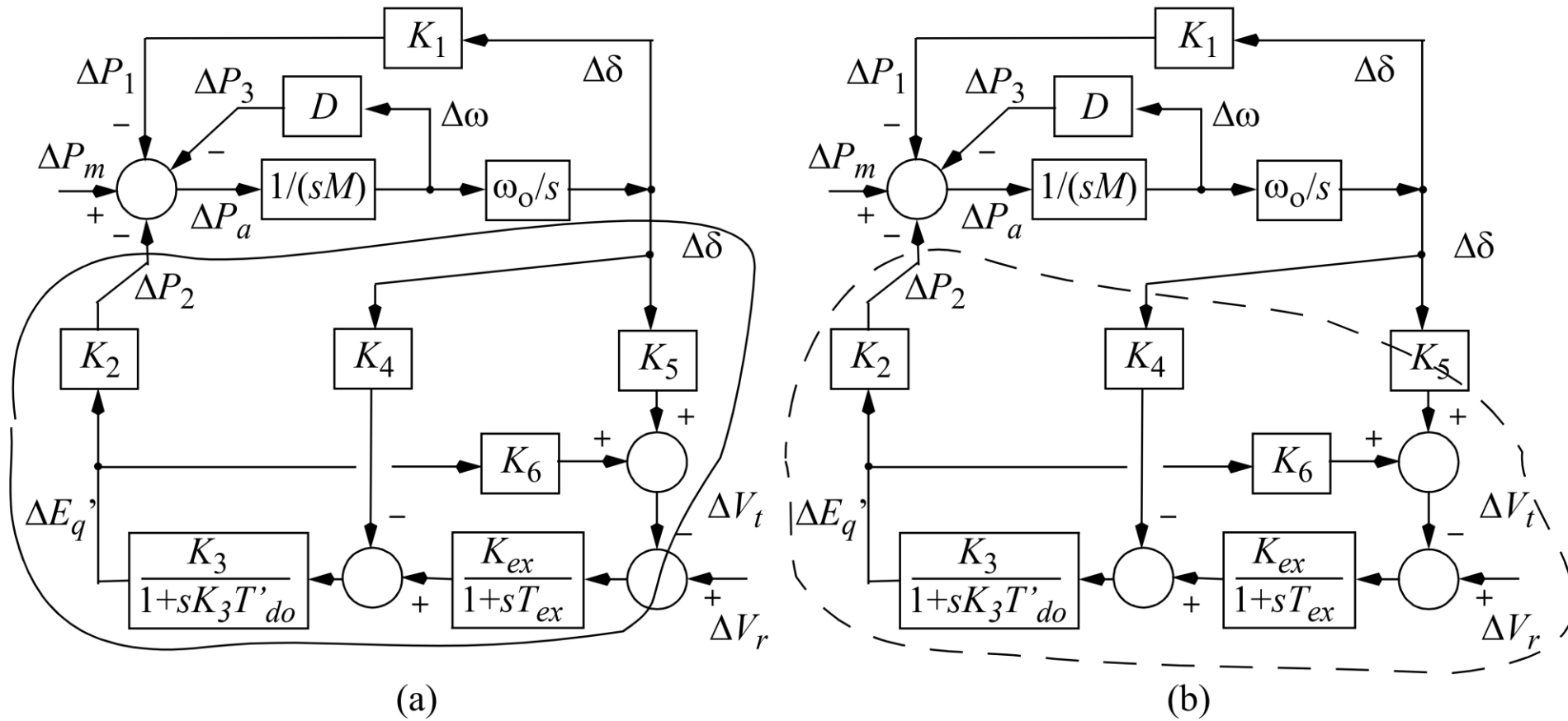



Figure 5.8 Evaluation of transfer functions,
 (a) $(\Delta P_2/\Delta \delta)|_{\Delta V_r=0}$ (b) $(\Delta P_2/\Delta V_r)|_{\Delta \omega=0}$

Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης

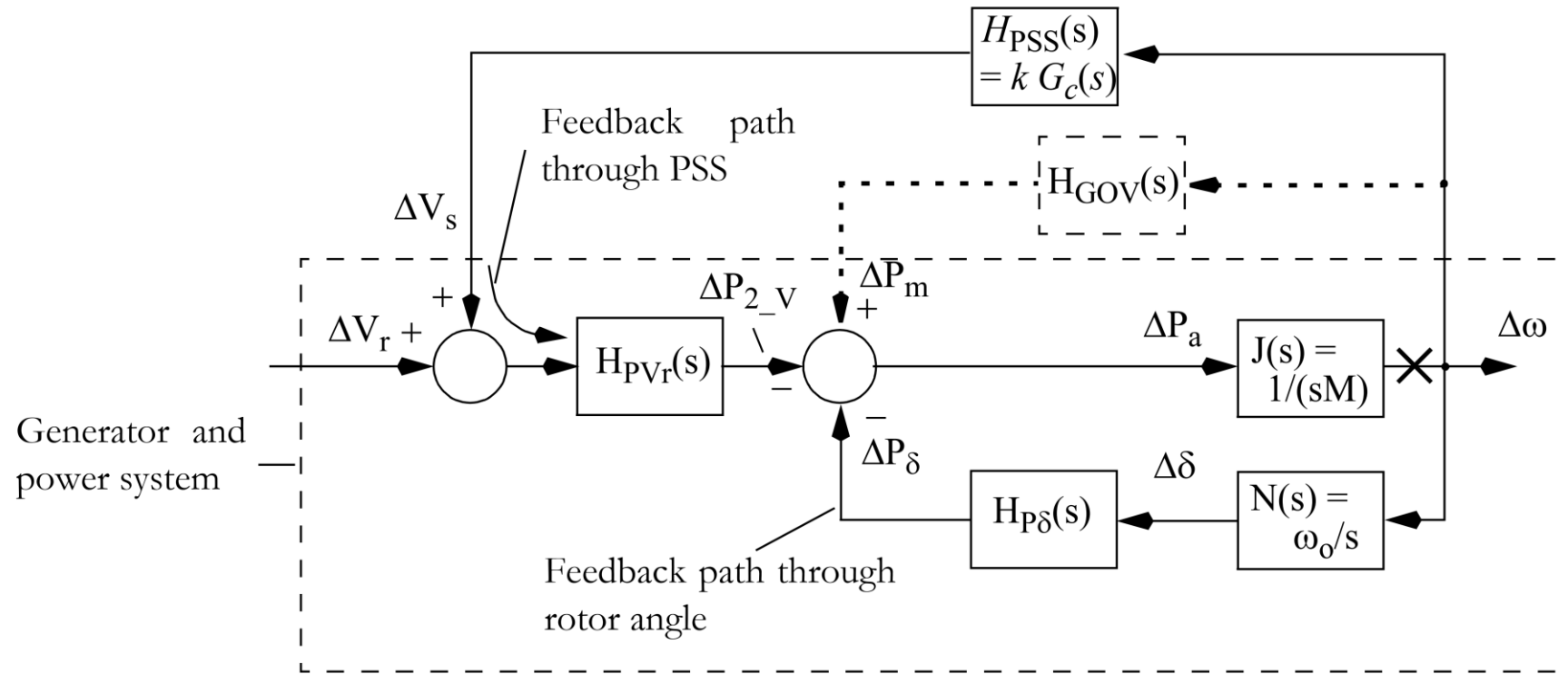
$$\left. \frac{\Delta P_2}{\Delta \delta} \right|_{\Delta V_r = 0} = - \left(\frac{(K_2 K_3) [K_4 (1 + s T_{ex}) + K_5 K_{ex}]}{s^2 K_3 T_{ex} T'_{d0} + s (T_{ex} + K_3 T'_{d0}) + (1 + K_3 K_6 K_{ex})} \right)$$

$$H_{P\delta}(s) = \left. \frac{\Delta P_\delta}{\Delta \delta} \right|_{\Delta V_r = 0} = K_1 + \left. \frac{\Delta P_2}{\Delta \delta} \right|_{\Delta V_r = 0}$$

$$H_{PV_r}(s) = \left. \frac{\Delta P_2}{\Delta V_r} \right|_{\Delta \omega = 0} = \frac{K_2 K_3 K_{ex}}{s^2 K_3 T_{ex} T'_{d0} + s (T_{ex} + K_3 T'_{d0}) + (1 + K_3 K_6 K_{ex})}$$


$$H_{PV_r}(s) = \frac{k_c}{1 + c_1 s + c_2 s^2}$$

Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης



$$\begin{aligned}
 \Delta P_2 \Big|_{\Delta V_r = 0} &= \frac{\Delta P_2}{\Delta V_s} \cdot \frac{\Delta V_s}{\Delta \omega} \cdot \Delta \omega \\
 &= H_{PVr}(s) \cdot k G_c(s) \cdot \Delta \omega
 \end{aligned}$$

Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης

- Για να είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή ΔP_2 ανάλογη της ταχύτητας $\Delta\omega$, πρέπει

$$G_c(s) = 1/H_{PVr}(s)$$

και κατά συνέπεια

$$H_{PSS}(s) = kG_c(s) = \frac{k}{H_{PVr}(s)}$$

- Για το συγκεκριμένο μοντέλο της γεννήτριας:

$$G_c(s) = \frac{s^2 K_3 T_{ex} T'_{d0} + s(T_{ex} + K_3 T'_{d0}) + (1 + K_3 K_6 K_{ex})}{K_2 K_3 K_{ex}}$$

$$G_c(s) = \frac{(1 + K_3 K_6 K_{ex})}{K_2 K_3 K_{ex}} \cdot \left[1 + s \cdot \frac{T_{ex} + K_3 T'_{d0}}{1 + K_3 K_6 K_{ex}} + s^2 \cdot \frac{K_3 T_{ex} T'_{d0}}{1 + K_3 K_6 K_{ex}} \right]$$

Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης

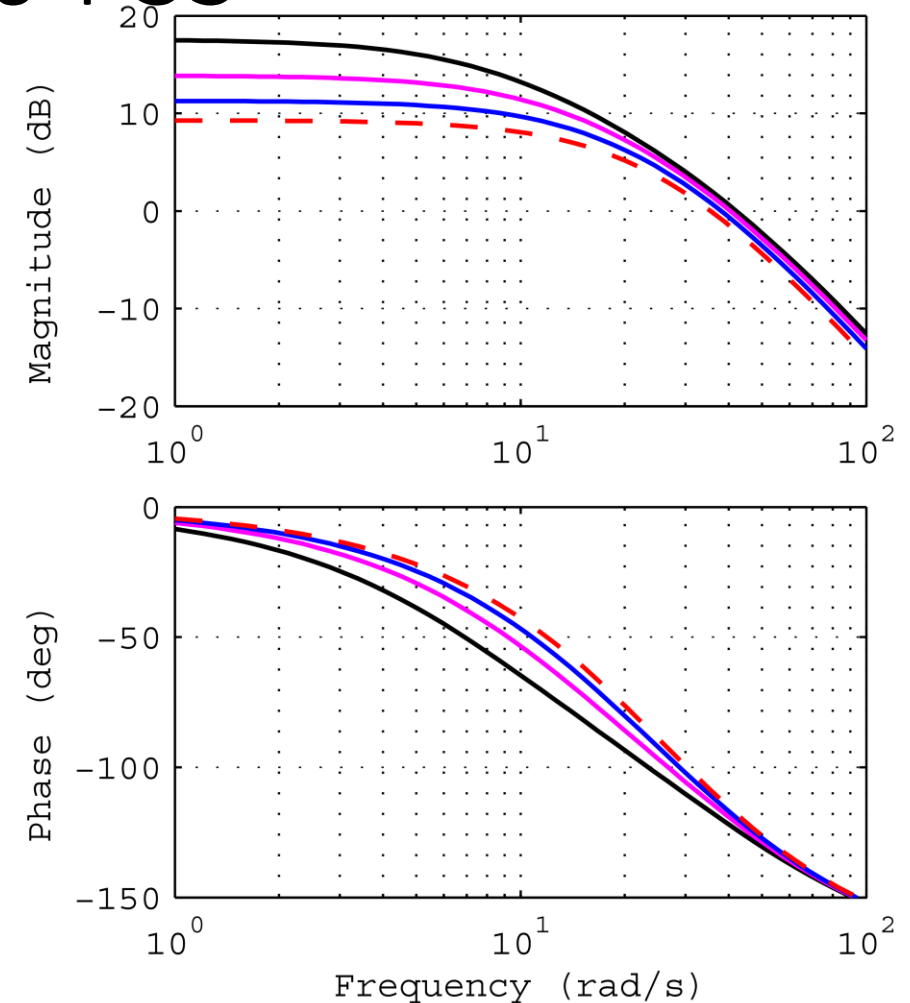
Παρατηρούμε ότι:

- Προτείνεται να ακυρώσουμε το σύνολο των πόλων της συνάρτησης μεταφοράς $\Delta P_2 / \Delta V_r$ με ένα αντίστοιχο σύνολο μηδενικών. Αυτό επιτρέπεται αρκεί οι πόλοι να είναι ευσταθείς
- Η συνάρτηση μεταφοράς $G_c(s)$ δεν είναι proper (ωστόσο αυτό μπορεί να διορθωθεί αργότερα)

Παράδειγμα: Καθορισμός συνάρτησης μεταφοράς αντιστάθμισης του PSS

Επιλέγουμε την χαρακτηριστική $P - V_r$ όπου $Q=0$ καθώς η φάση -47.7° (στα 8.69rad/s) βρίσκεται στη μέση του εύρους των χαρακτηριστικών καμπύλων. Η φάση της χαρακτηριστικής για κάθε άλλη τιμή του Q , $-0.2 < Q < 0.4$, θα βρίσκεται μέσα σε ένα εύρος 11° από την επιλεγμένη $P - V_r$ χαρακτηριστική

$$G_c(s) = 0.20263(1 + s0.10638 + s^20.0021058)$$



- | | | | |
|---|-------------|-------|-------------|
| — | A: $Q=-0.2$ | — | B: $Q= 0.0$ |
| — | C: $Q= 0.2$ | - - - | D: $Q= 0.4$ |

Καθορισμός κέρδους απόσβεσης k του PSS

- Όπως δείξαμε, ο ιδανικός PSS δημιουργεί έναν όρο ηλεκτρομαγνητικής ροπής ανάλογο της ταχύτητας, $\Delta P_{dq} = k\Delta\omega$, όπου k είναι τόσο ο συντελεστής ροπής απόσβεσης όσο και το κέρδος απόσβεσης του ιδανικού PSS.
- Ακολουθώντας το σχηματικό διάγραμμα:

$$\Delta P_{2-V} \Big|_{\Delta V_r = 0} = H_{PSS}(s) \cdot H_{PVr}(s) \Delta\omega = kG_c(s) \cdot (1/G_c(s)) \cdot \Delta\omega = k \Delta\omega$$

Το κέρδος απόσβεσης του PSS πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε:

- να καλύπτει οποιεσδήποτε αρνητικές ροπές απόσβεσης εμφανίζονται στο εύρος λειτουργίας της γεννήτριας
- να εγγυάται ότι η πιο ασθενώς-αποσβεννύμενη κατάσταση του ρότορα ικανοποιεί τα κριτήρια για την απόσβεση του συστήματος

Ένα κέρδος απόσβεσης 20-30pu (αναλογικά με την κλίμακα της γεννήτριας) είναι συνήθως αρκετό

Παράδειγμα: καθορισμός κέρδους απόσβεσης k του PSS

- Ας υποθέσουμε ότι η γεννήτρια έχει μια ασθενώς αποσβεννύμενη κατάσταση και το κριτήριο της συμπεριφοράς απόσβεσης ορίζεται από το 2% χρόνο αποκατάστασης ο οποίος πρέπει να είναι καλύτερος από 8sec. Αυτό σημαίνει ότι το πραγματικό μέρος του πόλου αυτού πρέπει να είναι πιο αρνητικό από $-a = -\frac{4}{8} = -0.5$
- Από τον πίνακα στη διαφάνεια 15, μπορούμε να δούμε ότι χωρίς τον PSS, η πιο ασθενώς αποσβεννύμενη κατάσταση είναι η περίπτωση που $P = 0.9, Q = -0.2$, δηλαδή $1.144 \pm j9.32$. Για να επιτύχουμε το στόχο απόσβεσης με -0.5, πρέπει ο PSS να μετακινήσει τον πόλο αυτό τουλάχιστον κατά $-\Delta a = -0.5 - 1.144 = -1.644$

Παράδειγμα: καθορισμός κέρδους απόσβεσης k του PSS

- Από τα ζεύγη των μιγαδικών πόλων για τη γεννήτρια συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό:

$$s_{1,2} = -\frac{k_d}{4H} \pm j \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4\omega_0 k_s}{2H} - \left(\frac{k_d}{2H}\right)^2} \approx -\frac{k_d}{4H} \pm j \sqrt{\frac{\omega_0 k_s}{2H}}$$

μπορούμε να πούμε ότι κατά προσέγγιση η μετατόπιση προς τα αριστερά κατά Δa για έναν πόλο με αντίστοιχο κέρδος απόσβεσης k_d είναι $\Delta a = k_d / (4H)$.

- Για σταθερά αδράνειας $H = 3$, έχουμε $k_d = 4H\Delta a = 4 \times 3 \times 1.644 = 19.73$. Άρα με ένα κέρδος απόσβεσης PSS της τάξης $k = 20pu$ μπορούμε να πετύχουμε την επιθυμητή απόδοση.

Washout φίλτρο

- Το washout φίλτρο ενσωματώνεται στον PSS ώστε αργές μεταβολές στη συχνότητα του συστήματος να μην δημιουργούν offset στην τερματική τάση της γεννήτριας, σε σχέση με την επιθυμητή τιμή, στη μόνιμη κατάσταση. Η συνάρτηση μεταφοράς του washout φίλτρου είναι:

$$G_W(s) = \frac{sT_W}{1 + sT_W} \Big|_{s = j\omega_f}$$

- Ο τρόπος επιλογής της σταθεράς χρόνου T_W είναι να τοποθετήσουμε την corner frequency ($1/T_W$) περίπου μια δεκάδα κάτω από τη μικρότερη συχνότητα των ταλαντούμενων καταστάσεων του ρότορα

Κατωδιαβατό φίλτρο

- Το κατωδιαβατό φίλτρο προστίθεται για να αποσβέσει σήματα υψηλών συχνοτήτων (τα οποία θα ενισχύονταν από τον PSS σε διαφορετική περίπτωση) και να εγγυηθεί ότι η συνάρτηση μεταφοράς του PSS είναι proper. Η απλούστερη μορφή του φίλτρου είναι:

$$G_{LP}(s) = \frac{1}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)\dots(1 + sT_p)}$$

- Οι corner frequencies που σχετίζονται με τις σταθερές χρόνου T_1, T_2, \dots συνήθως τοποθετούνται μια δεκάδα πάνω από την υψηλότερη συχνότητα των ταλαντούμενων καταστάσεων του ρότορα
- Η τάξη p του φίλτρου επιλέγεται ώστε να δημιουργήσει ικανοποιητική αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων και/ή να κάνει τη συνάρτηση μεταφοράς του PSS proper. Ένα κατωδιαβατό φίλτρο δεύτερης τάξης

$$G_{PL}(s) = 1 / \left(1 + \frac{s}{\omega_c}\right)^2 \text{ φαίνεται στην επόμενη διαφάνεια:}$$

Washout φίλτρο και κατωδιαβατό φίλτρο

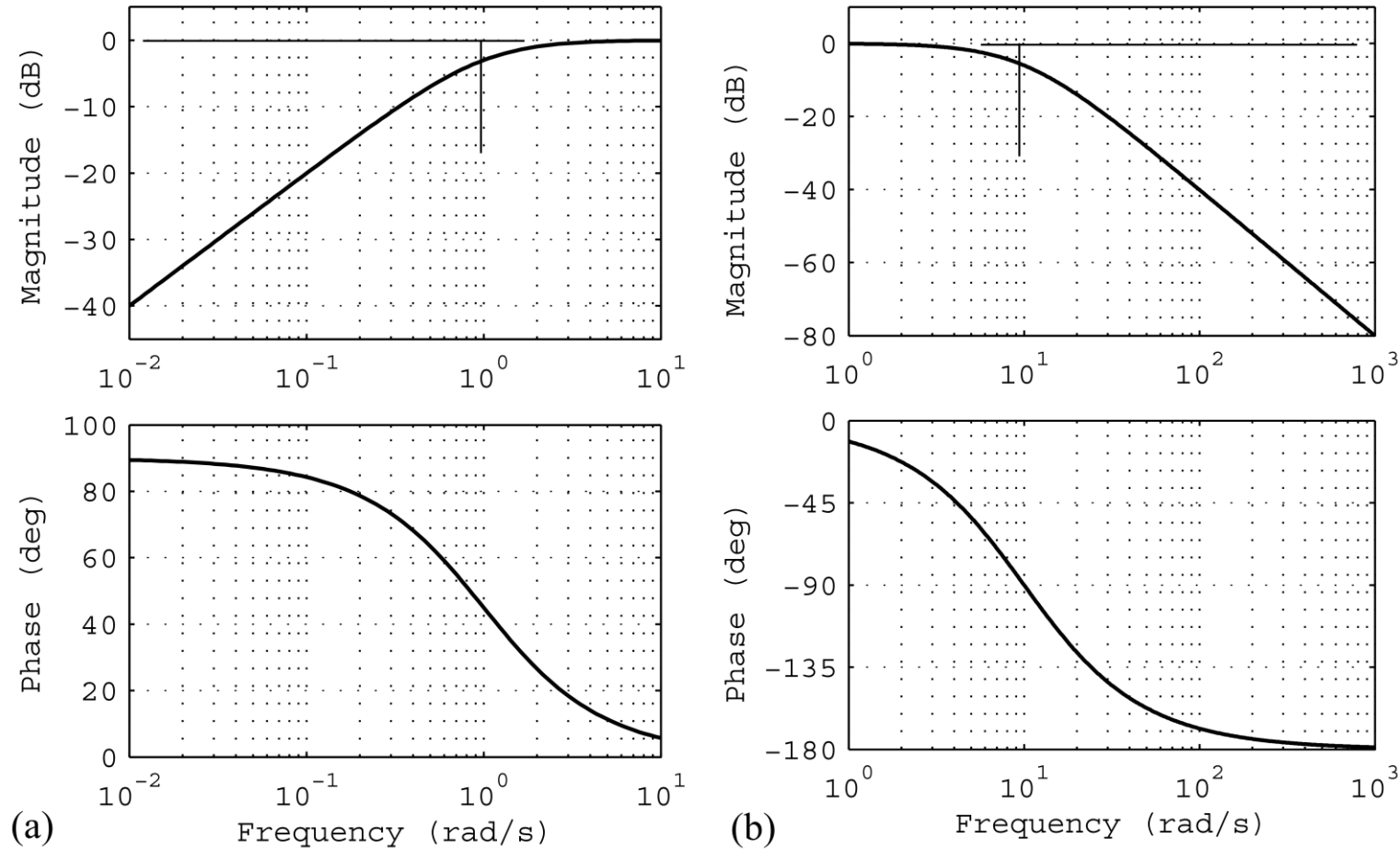


Figure 5.11 Frequency response of (a) a first-order washout filter and (b) a second-order low-pass filter. The corner frequencies are normalized to 1 and 10 rad/s, respectively. For another corner frequency, ω_c rad/s, scale frequency axes to ω_c or $\omega_c/10$.

Η συνάρτηση μεταφοράς του PSS

Συνοπτικά:

- Το washout φίλτρο χρειάζεται για την απόσβεση του offset στη μόνιμη κατάσταση του σήματος εισόδου του PSS. Στις συχνότητες λειτουργίας του ρότορα πρέπει να είναι ιδανικά $1 \angle 0^\circ$
- Η επιλογή του κατωδιαβατού φίλτρου με κατάλληλη τάξη είναι σημαντική για να κάνει τη συνάρτηση του PSS proper. Στις συχνότητες λειτουργίας του ρότορα πρέπει να είναι ιδανικά $1 \angle 0^\circ$
- Για να αποκοπούν οι υψηλές συχνότητες, ένα κατωδιαβατό φίλτρο με τάξη 2 ή μεγαλύτερη είναι αρκετό.
- Το κέρδος απόσβεσης k επιλέγεται σε τιμές περίπου 20-30pu και/ή να ικανοποιεί το κριτήριο της επιθυμητής απόσβεσης του συστήματος

Η συνάρτηση μεταφοράς του PSS

- Η γενική μορφή του PSS είναι:

$$H_{PSS}(s) = kG(s) = k \left(\frac{1}{H_{PVR}(s)} \right) \cdot G_W(s) \cdot G_{LP}(s)$$

$$\text{or } H_{PSS}(s) = kG(s) = kG_c(s) \cdot G_W(s) \cdot G_{LP}(s)$$

$$\text{όπου } G_c(s) = \frac{1 + c_1s + c_2s^2}{k_c} .$$

$$H_{PSS}(s) = kG(s) = k \cdot \frac{sT_W}{1 + sT_W} \cdot \frac{1}{k_c} \cdot \frac{1 + c_1s + c_2s^2}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$$

Το κέρδος k/k_c ονομάζεται 'PSS κέρδος' (PSS gain).

Παράδειγμα εφαρμογής PSS

Για το παράδειγμα της γεννήτριας που έχουμε αναλύσει:

- **Συνάρτηση αντιστάθμισης:**

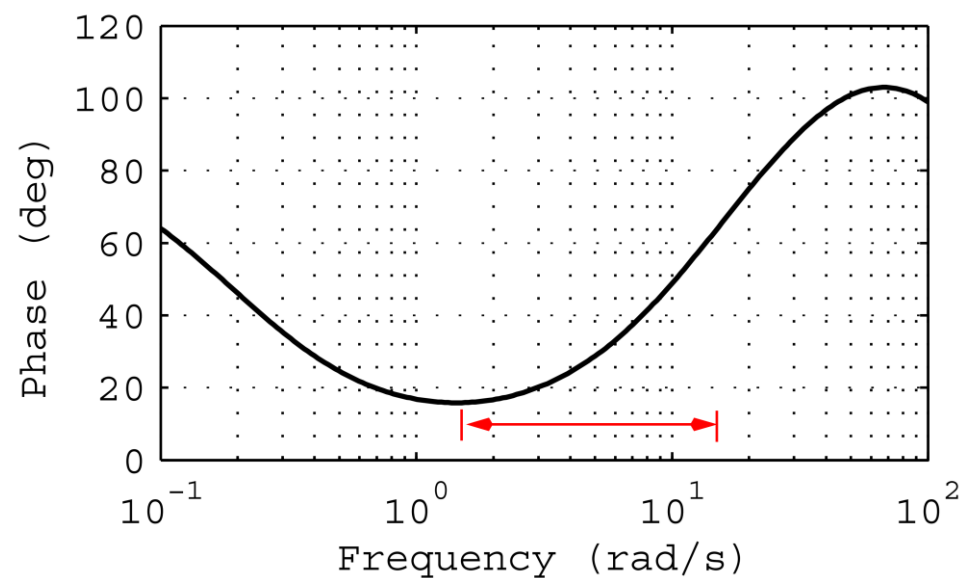
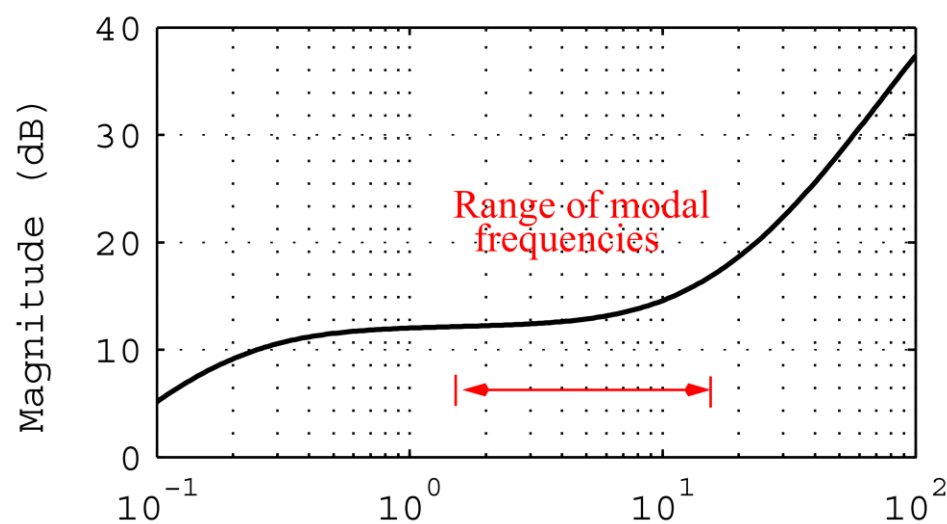
$$G_c(s) = (1 + s0.10638 + s^20.0021058)/4.935$$

- **Washout φίλτρο:** Η corner frequency του φίλτρου τοποθετείται μια δεκάδα χαμηλότερα από την μικρότερη συχνότητα του ρότορα, δηλ. τα $7.9rad/sec$. Για σταθερά χρόνου $T_W = 5s$, η corner frequency είναι $0.2rad/sec$, που ικανοποιεί την παραπάνω προδιαγραφή.
- **Κατωδιαβατό φίλτρο:** Η corner frequency του φίλτρου τοποθετείται μια δεκάδα υψηλότερα από την μεγαλύτερη συχνότητα του ρότορα, δηλ. τα $9.3rad/sec$. Η επιλογή ενός κατωδιαβατού φίλτρου 2^{ης} τάξης με corners στα $200rad/sec$ οδηγεί σε μικρό phase lag της τάξης των 5° στα $9.3rad/sec$ και θέτει τη συνάρτηση του PSS ως proper.

Παράδειγμα εφαρμογής PSS

- Χρησιμοποιώντας το κέρδος απόσβεσης $k = 20\rho u$ (όπως έχει ήδη εξηγηθεί), η συνάρτηση μεταφοράς του PSS γίνεται:

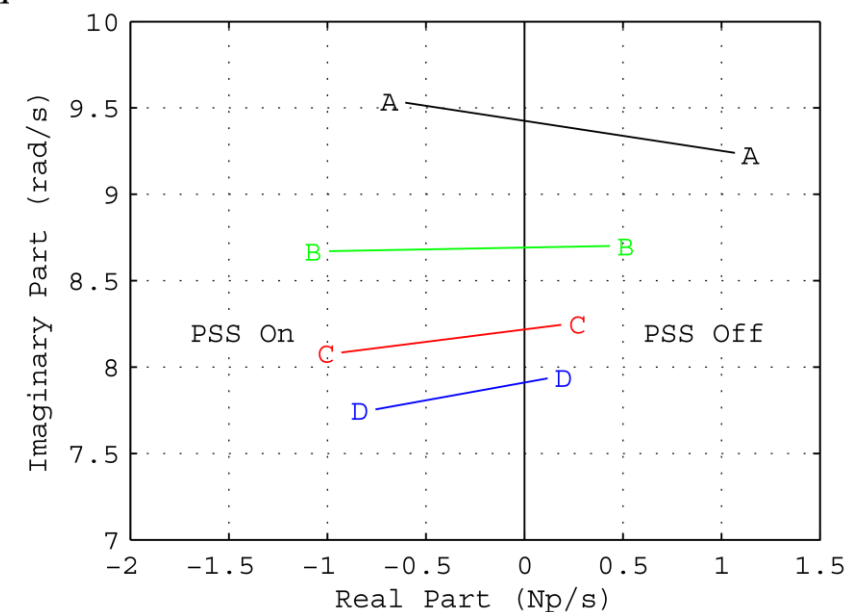
$$H_{PSS}(s) = 20 \cdot \frac{s5}{1 + s5} \cdot \frac{1}{4.935} \cdot \frac{(1 + s0.1064 + s^20.002106)}{(1 + s0.005)(1 + s0.005)}$$



Παράδειγμα εφαρμογής PSS

Table 5.2 Effect on rotor modes with PSS in service ($P = 0.9$ pu), $k = 20$ pu.

Case / Q pu	Eigenvalues, rotor mode		Mode shift
	with PSS out of service	with PSS in service	
A / -0.2	$1.148 \pm j9.23$	$-0.684 + j9.54$	$-1.832 + j0.305$
B / 0.0	$0.514 \pm j8.70$	$-1.072 + j8.67$	$-1.586 - j0.025$
C / 0.2	$0.267 \pm j8.25$	$-1.008 + j8.08$	$-1.275 - j0.166$
D / 0.4	$0.198 \pm j7.94$	$-0.836 + j7.75$	$-1.034 - j0.193$



A $Q=-0.2$, B $Q=0.0$, C $Q=0.2$, D $Q=0.4$

The table reveals that, with the PSS in service, the 2% settling time of the rotor mode for all operating conditions is shorter than the criterion of 8 s, i.e. all modes are better damped than a mode with a real part of -0.5 Np/s. The PSS design therefore satisfies this performance specification.