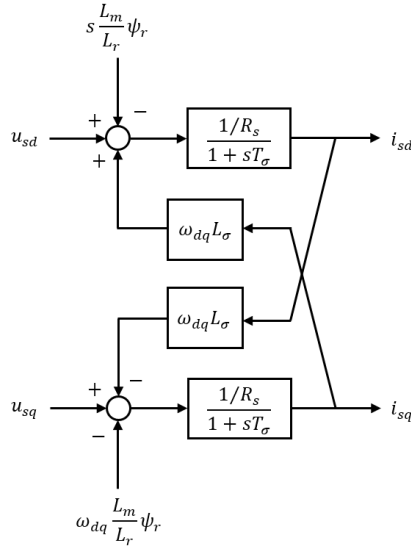


VEŽBA VI KONCEPT CRVSI U POGONU AM

Polazi se od matematičkog modela u operatorskom domenu elektromagnetnog podsistema namotaja statora vektorski upravljane AM u sinhrono–rotirajućem dq koordinatnom sistemu osa vezanim za rotorski fluks (RFOC), opisanim formalizmom funkcija prenosa:

$$\begin{aligned} G_{id}(s) &= \frac{i_{sd}(s)}{\Delta u_{sd}(s) - s \cdot \frac{L_m}{L_r} \psi_r(s)} = \frac{1/R_s}{1 + T_{\sigma d} \cdot s} \\ G_{iq}(s) &= \frac{i_{sq}(s)}{\Delta u_{sq}(s) - \omega_{dq} \frac{L_m}{L_r} \psi_r(s)} = \frac{1/R_s}{1 + T_{\sigma q} \cdot s} \end{aligned} \quad (1)$$

čiji je blok dijagram prikazan na narednoj slici:



Blok dijagram strujnog podsistema AM sa RFOC upravljanjem

Analiza uticaja sprežućih članova na dinamičke režime struja statora

Međusobno sprezanje d i q osa statorskog namotaja (engl. *Cross Coupling*) predstavlja pojavu u vidu uzajamnog uticaja radnog režima jedne ose na radni režim druge i obrnuto. Pomenuto je posledica osobina matrične transformacije kretanja primenjene na matematički model AM mašine. Usled zavisnosti transformacione matrice od položaja rotora, invarijantnost forme matematičkog modela nije postignuta, što se ogleda u pojavi dinamičkih komponenata elektromotornih sila u obe ose.

Aproksimativni matematički model strujnog podsistema u kome su zanemarene elektromotorne sile usled dejstva rotorskog fluksa $\psi_r(s) = 0$ prikazan je u matričnoj formi:

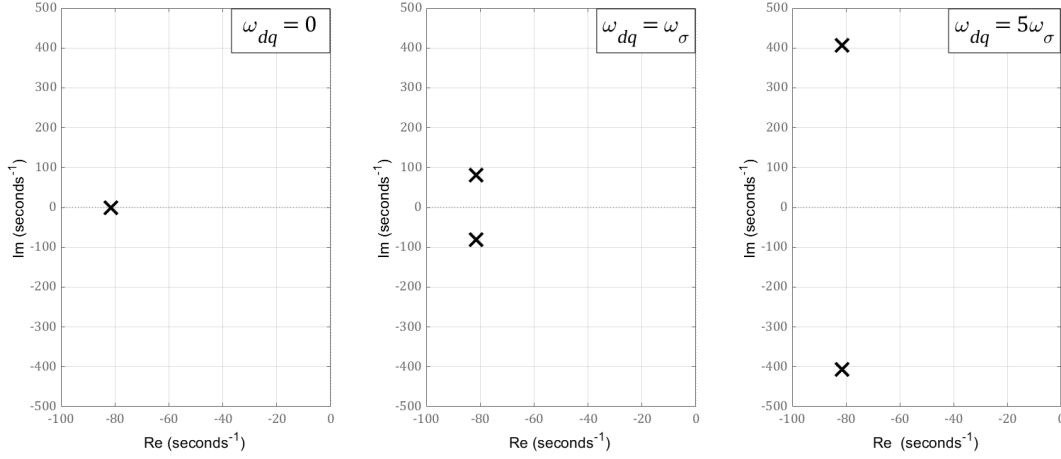
$$\begin{bmatrix} u_{sd}(s) \\ u_{sq}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_\sigma & -\omega_{dq}L_\sigma \\ \omega_{dq}L_\sigma & R_s + sL_\sigma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd}(s) \\ i_{sq}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Na osnovu matrične forme izvodi se funkcija prenosa od komponenti vektora struje statora do komponenti vektora statorskog napona, koja daje uvid u dinamičke osobine opisanog sistema:

$$\begin{bmatrix} i_{sd}(s) \\ i_{sq}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_\sigma & -\omega_{dq}L_\sigma \\ \omega_{dq}L_\sigma & R_s + sL_\sigma \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u_{sd}(s) \\ u_{sq}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G}(s) = \frac{1/R_s}{1 + (\omega_{dq}T_\sigma)^2 + s \cdot 2T_\sigma + s^2T_\sigma^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 + sT_\sigma & \omega_{dq}T_\sigma \\ -\omega_{dq}T_\sigma & 1 + sT_\sigma \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$s_{p1,2} = -\frac{1}{T_\sigma} \pm j\omega_{dq}$$



Geometrijsko mesto polova funkcije prenosa (4) pri $\omega_\sigma = 1/T_\sigma = 81 \text{ rad/s}$ i za slućajeve $\omega_{dq} = \{0, \omega_\sigma, 5 \cdot \omega_\sigma\}$

MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) model elektrićnog podsistema *AM* moće se prikazati u notaciji kompleksnih vektora koja je pogodnija za dalje analize u frekvencijskom domenu! U domenu kompleksnih vektora, ulaz u sistem je vektor napona statora $\mathbf{u}_s = [u_{sd}(s) \ u_{sq}(s)]^T$ a izlaz vektor struje statora $\mathbf{i}_s = [i_{sd}(s) \ i_{sq}(s)]^T$ dok funkcija prenosa strujnog podsistema namotaja statora *AM* dobija oblik:

$$\mathbf{i}_s(s) = \mathbf{G}(s) \cdot \mathbf{u}_s(s)$$

$$\mathbf{G}(s) = \frac{1/R_s}{1 + (\omega_{dq}T_\sigma)^2 + 2T_\sigma \cdot s + T_\sigma^2 \cdot s^2} \left\{ (1 + T_\sigma \cdot s) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - (\omega_{dq}T_\sigma) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\}$$

$$\mathbf{G}(s) = \frac{1/R_s \cdot \{(1 + T_\sigma \cdot s) - j(\omega_{dq}T_\sigma)\}}{(1 + T_\sigma \cdot s)^2 + (\omega_{dq}T_\sigma)^2} = \frac{1/R_s \cdot \{(1 + T_\sigma \cdot s) - j(\omega_{dq}T_\sigma)\}}{\{(1 + T_\sigma \cdot s) + j(\omega_{dq}T_\sigma)\} \cdot \{(1 + T_\sigma \cdot s) - j(\omega_{dq}T_\sigma)\}} \quad (5)$$

$$\mathbf{G}(s) = \frac{\mathbf{i}_s(s)}{\mathbf{u}_s(s)} = \frac{1/R_s}{(1 + T_\sigma \cdot s) + j(\omega_{dq}T_\sigma)} = \frac{1}{L_\sigma \cdot s + R_s + j\omega_{dq}L_\sigma}$$

Funkcija prenosa $\mathbf{G}(s)$ ima kompleksne parametre i prvog je reda sa jednim polom u:

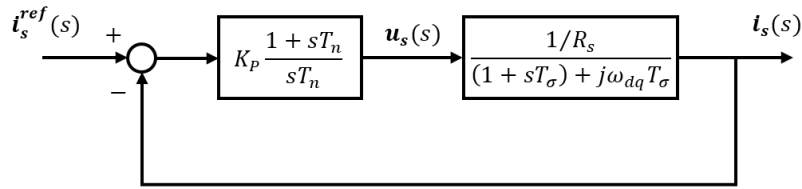
$$s_p = -\frac{1}{T_\sigma} - j\omega_{dq} \quad (6)$$

Sinteza regulacione petlje korišćenjem klasićnog pristupa sa dijagonalnim PI regulatorom

Posmatra se klasićni pristup regulaciji vektora struje statora $\mathbf{i}_s(s)$ korišćenjem dijagonalnog *PI* regulatora sa funkcijom prenosa:

$$\mathbf{G}_{PI}(s) = \begin{bmatrix} G_{PI}(s) & 0 \\ 0 & G_{PI}(s) \end{bmatrix} = K_p \frac{1 + sT_n}{sT_n} \cdot \mathbf{I} + 0 \cdot \mathbf{J}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Uprošćena strujna regulaciona petlja je prikazana na slici ispod:

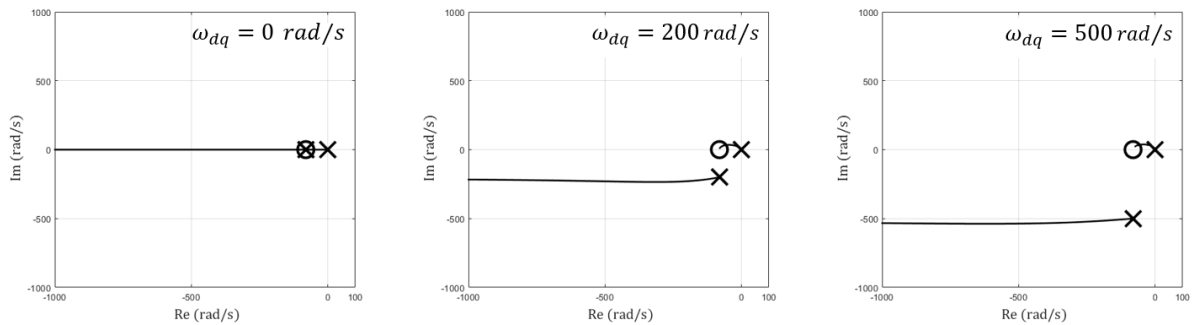


Uprošćena regulaciona petlja struje statora AM sa dijagonalnim PI regulatorom

Odsustvo vandijagonalnih elemenata u funkciji prenosa (7) podrazumeva da regulator unosi nulu na realnoj osi kompleksne s ravni, tj. da na komponente vektora napona statora $\mathbf{u}_s$ isključivo utiču greške vektora struje u odgovarajućim osama!

Realna nula regulatora može delimično kompenzovati kompleksni pol sistema (6) samo na relativno malim učestanostima ω_{dq} kada se on nalazi blizu realne ose. Sa porastom ω_{dq} , performanse dijagonalnog PI regulatora se degradiraju usled nepovoljne dispozicije pola sistema i nule regulatora.

Na narednoj slici je prikazano kretanje polova strujne regulacione petlje nakon zatvaranja povratne sprege u zavisnosti od vrednosti pojačanja u direktnoj grani za različite vrednosti parametra ω_{dq} .

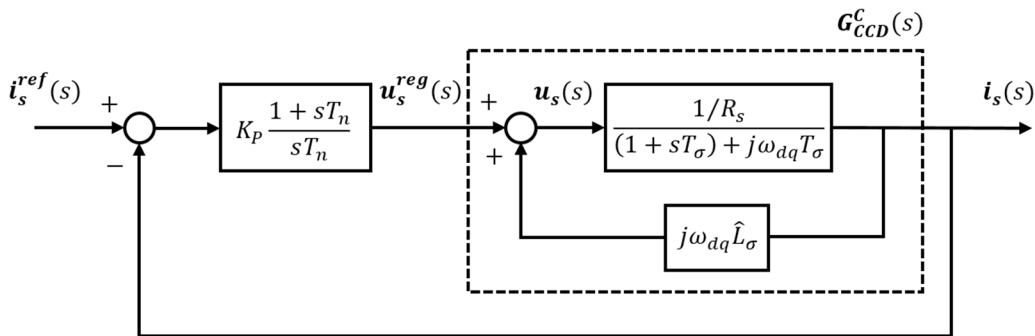


Dijagrami kompleksnog GMK strujne regulacione petlje sa dijagonalnim PI regulatorom u sinhrono rotirajućem referentnom sistemu osa za slučajeve $\omega_{dq} = \{0, 200, 500\}$ rad/s; $\omega_\sigma = 1/T_\sigma = 81$ rad/s

Prikazan je slučaj kada je izvršena kompenzacija dominantne vremenske konstante $T_n = T_\sigma$. Sa slike je jasno da se kompenzacija pola sistema nulom dijagonalnog PI regulatora može postići samo kada važi $\omega_{dq} = 0$. U svim ostalim slučajevima, nula regulatora će interagovati sa astatizmom, dok će dinamički odziv petlje diktirati kompleksni pol čiji je imaginarni deo jednak učestanosti ω_{dq} . Kako se kompleksni pol u realnom domenu manifestuje u vidu para konjugovano kompleksnih polova sa jednakim vrednostima realnog i imaginarnog dela, zaključuje se da će odziv strujne petlje imati oscilatorni karakter, što u kontekstu upravljanja momentom u pogonima visokih performansi nije poželjno.

Sinteza regulacione petlje korišćenjem naprednog pristupa sa dijagonalnim PI regulatorom i mehanizmom za direktno raspredanje osa – feed-forward

U cilju unapređenja dinamičkih performansi odziva primenjuje se tehnika direktnog raspredanja osa primenom *feed-forward* mehanizma! Pomenuta tehnika je našla primenu u aplikacijama gde je potrebna precizna kontrola momenta mašine i rad pri visokim brzinama obrtanja kada je efekat sprežanja osa naročito izražen.



Uprošćena regulaciona petlja struje statora AM sa dijagonalnim PI regulatorom i feedforward mehanizmom

Pomenuti pristup na gornjoj slici podrazumeva uvođenje korektivnih naponskih akcija u osama kojima se modifikuje vektor napona na izlazu klasičnog (dijagonalnog) *PI* regulatora struje tako da se poništi efekat sprezanja osa!

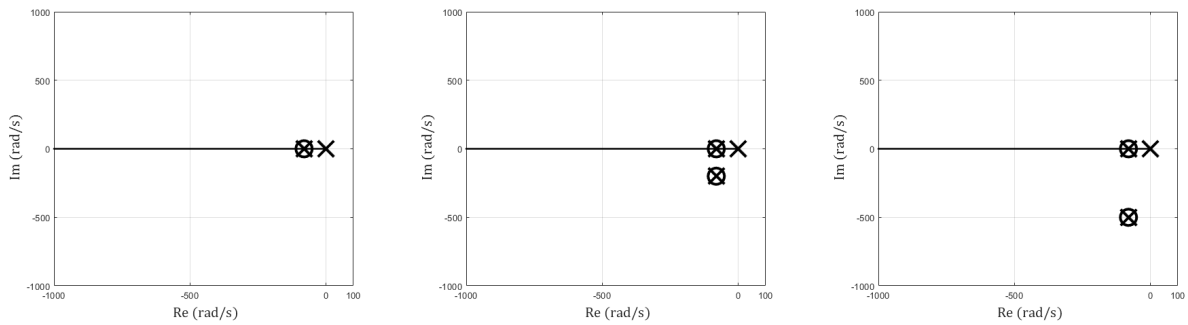
$$\mathbf{u}_s(s) = \mathbf{u}_s^{reg}(s) + j\omega_{dq}\hat{L}_\sigma \mathbf{i}_s(s) \quad (8)$$

Na izlaz iz dijagonalnog *PI* regulatora se superponira korektivna akcija $j\omega_{dq}\hat{L}_\sigma \mathbf{i}_s(s)$ gde $\hat{L}_\sigma$ predstavlja estimiranu vrednost rasipne induktivnosti namotaja statora *AM* i u opštem slučaju se razlikuje od njene stvarne vrednosti L_σ .

Funkcija prenosa rezultatnog objekta upravlja u idealnom slučaju ($\hat{L}_\sigma = L_\sigma$) postaje:

$$G_{CCD}^c(s) = \frac{\mathbf{i}_s(s)}{\mathbf{u}_s^{reg}(s)} = \frac{1/R_s}{1 + sT_\sigma} \quad (9)$$

Primenom *feedforward* mehanizma u strujnoj regulacionoj petlji uz poznavanje tačne vrednosti parametra L_σ , rezultatni objekat upravljanja svodi se na sistem čija funkcija prenosa nema kompleksne parametre. Kompleksni pol *AM* (7) se premešta na realnu osu, a tamo uspešno kompenzuje nulom dijagonalnog *PI* regulatora! Postiže se efekat potpunog raspresanja osa kao i kompenzacije sporog pola sistema!



Dijagrami kompleksnog *GMK* strujne regulacione petlje sa dijagonalnim *PI* regulatorom u sinhrono rotirajućem referentnom sistemu osa i *feed-forward* mehanizmom za slučajeve $\omega_{dq} = \{0, 200, 500\}$ rad/s; $\omega_\sigma = 1/T_\sigma = 81$ rad/s

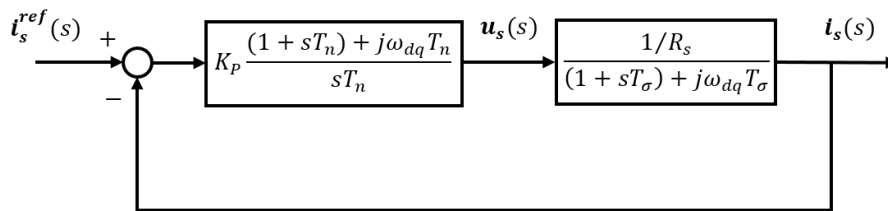
Unapređena struktura sa *feed-forward* mehanizmom omogućuje superiorne dinamičke performanse odziva samo u slučaju kada se poznaje egzaktna vrednost parametra induktivnosti rasipanja $\hat{L}_\sigma = L_\sigma$!

Sinteza regulacione petlje korišćenjem naprednog pristupa zasnovanog na konceptu internog modela

Koncept internog modela *IMC* (engl. *Internal Model Control*) predstavlja robustan upravljački pristup za kontrolu procesne veličine od interesa *SAU*. Primenjen u aplikaciji vektorskog pogona *AM* u svrhe implementacije koncepta *CRVSI*, ovaj pristup obezbeđuje robustno raspresanje dinamike *d* i *q* komponenta struje statora i jednostavnu parametarsku sintezu regulatora zasnovanu na definisanju željenog propusnog opsega strujne petlje.

Preciznije rečeno, upotrebom *IMC* kontrolera postiže se smanjena parametarska osetljivost na nepoznavanje ekvivalentne induktivnosti rasipanja *AM* u odnosu na napredni pristup koji podrazumeva implementaciju *feed-forward* mehanizma. Ova karakteristika performanse je naročito izražena pri visokim učestanostima napajanja *AM* ali se neće analizirati na ovom mestu!

Na slici ispod je prikazana uprošćena regulaciona petlja za kontrolu vektora struje statora *AM* kada je primenjen *IMC* pristup!



Uprošćena regulaciona petlja struje statora *AM* sa *IMC* kontrolerom

Za pomenuti slučaj, *IMC* kontroler ubacuje u regulacionu strukturu jednu kompleksnu nulu koja kompenzuje kompleksni pol objekta (6):

$$(1 + T_n \cdot s) + j(\omega_{dq} T_n) = 0 \rightarrow z = -\frac{1}{T_n} - j\omega_{dq} \quad (10)$$

Funkcija otvorenog prenosa za slučaj $T_n = T_\sigma$ ima poželjnu integratorsku karakteristiku (astatizam) sa presečnom učestanošću integratora λ koja odgovarati propusnom opsegu zatvorene petlje!

$$W^{IMC}(s) = K_P \frac{1 + sT_n + j\omega_{dq}T_n}{sT_n} \frac{1/R_s}{(1 + j\omega_{dq}T_\sigma) + sT_\sigma} = \frac{K_P}{sT_\sigma R_s} = \frac{\lambda}{s} \quad (11)$$

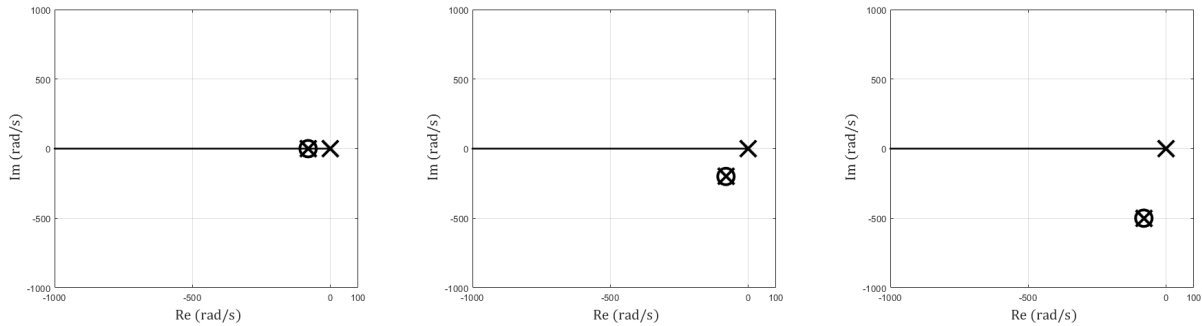
Funkcija spregnutog prenosa dobija sledeći oblik!

$$W_s^{IMC}(s) = \frac{W^{IMC}}{1 + W^{IMC}} = \frac{\lambda}{s + \lambda} \quad (12)$$

Funkcija prenosa (12) nema kompleksnih koeficijenata što navodi na zaključak da ovaj regulator uspešno rešava problem sprežanja osa!

U odnosu na prethodni pristup, kompenzacija pola se ne vrši na realnoj osi, već se dipolna struktura formira na lokaciji pola objekta upravljanja. Geometrijski posmatrano, novoformirana dipolna struktura je udaljena od astatizma za poteg od koordinatnog početka u kompleksnoj s ravni, što je suštinska razlika u odnosu na prethodni slučaj kompenzacije relociranog pola AM na realnoj osi! U slučaju nepotpune kompenzacije kada postoji odstupanje vrednosti parametra u kontroleru od stvarnog parametra AM ($\hat{L}_\sigma \neq L_\sigma$), interakcija dipolne strukture sa astatičkim elementom je značajno manja. Dinamičke performanse odziva su kvalitetnije u konkretnom slučaju sa IMC , a naročito je to izraženo na visokim učestanostima ω_{dq} .

Na slici ispod su prikazani dijagrami kompleksnog GMK regulacione strukture sa IMC kontrolerom.



Dijagrami kompleksnog GMK strujne regulacione petlje sa IMC kontrolerom u sinhrono rotirajućem referentnom sistemu osa za slučajeve $\omega_{dq} = \{0, 200, 500\}$ rad/s; $\omega_\sigma = 1/T_\sigma = 81$ rad/s

Fizička implementacija IMC kontrolera podrazumeva da na komponente vektora napona statora $\mathbf{u}_s$ utiče celokupan vektor greške struje! Funkcija prenosa IMC kontrolera je generalizacija funkcije prenosa dijagonalnog PI regulatora $G_{IMC}(s)$ koja uključuje i vandijagonalne elemente:

$$G_{IMC}(s) = K_P \frac{1 + sT_n + j\omega_{dq}T_n}{sT_n} = K_P \frac{1 + sT_n}{sT_n} \cdot \mathbf{I} + \frac{\omega_{dq}K_P}{s} \cdot \mathbf{J} = G_{PI}(s) \cdot \mathbf{I} + \frac{\omega_{dq}K_P}{s} \cdot \mathbf{J} \quad (13)$$

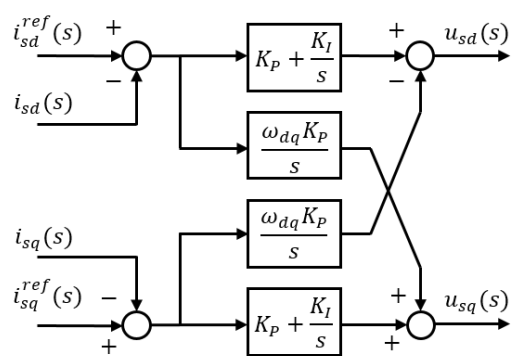
$$G_{IMC}(s) = \begin{bmatrix} K_P \frac{1 + sT_n}{sT_n} & -\frac{\omega_{dq}K_P}{s} \\ \frac{\omega_{dq}K_P}{s} & K_P \frac{1 + sT_n}{sT_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_P + \frac{K_I}{s} & -\frac{\omega_{dq}K_P}{s} \\ \frac{\omega_{dq}K_P}{s} & K_P + \frac{K_I}{s} \end{bmatrix}, \quad T_n = \frac{K_P}{K_I}$$

U idealnom slučaju kada su poznati parametri objekta upravljanja, parametri IMC kontrolera se dobijaju kao funkcija ekvivalentnog propusnog opsega petlje λ :

$$\hat{R}_s = R_s, \quad \hat{L}_\sigma = L_\sigma \rightarrow K_P = \lambda \cdot \hat{L}_\sigma, \quad K_I = \lambda \cdot \hat{R}_s \quad (14)$$

Jednostavna parametarska sinteza (14) predstavlja dodatnu prednost ovog regulacionog pristupa!

Blok dijagram strujnog regulatora zasnovanog na IMC pristupu je prikazan na slici ispod:



Blok dijagram strujnog regulatora projektovanog na osnovu IMC metode

RAČUNARSKE VEŽBE:

- *Simulacija I: Konstrukcija modela u Simulink okruženju MATLAB programskog paketa*
 - konstrukcija modela objekta upravljanja, elektromagnetskog podsistema naponski napajane AM sa uvaženim sprežućim članovima i zanemarenim članovima usled fluksa rotora;
 - konstrukcija regulacione petlje sa dijagonalnim PI regulatorom i *feed-forward* mehanizmom;
 - konstrukcija regulacione petlje sa IMC kontrolerom;
 - parametrizacija modela;
- *Simulacija II: Odziv struje u otvorenoj sprezi*
 - zadavanje odskočne pobude napona;
 - prirodni odziv uprošćene funkcije prenosa objekta upravljanja na eksitaciju odskočnom naponskom pobudom pri raznim vrednostima ω_{dq} ;
 - analiza uticaja sprezanja pri izraženim vrednostima ω_{dq} na odziv struje (razmena energije, gubitak pojačanja...)
- *Simulacija III: Odziv struje u zatvorenoj sprezi – sinteza dijagonalnog PI regulatora po metodi kompenzacije dominantne vremenske konstante*
 - propusni opseg $\lambda = 1/T_\sigma$, odzivi napona, tranzijentna analiza pri raznim ω_{dq} ;
 - propusni opseg $\lambda = n/T_\sigma$, odzivi napona, tranzijentna analiza pri raznim ω_{dq} ;
 - analiza sprezanja u dinamičkom režimu;
- *Simulacija IV: Odziv struje u zatvorenoj sprezi – sinteza dijagonalnog PI regulatora po metodi kompenzacije dominantne vremenske konstante sa uvaženim *feed-forward* mehanizmom*
 - propusni opseg $\lambda = 1/T_\sigma$, odzivi napona, tranzijentna analiza pri raznim ω_{dq} ;
 - propusni opseg $\lambda = n/T_\sigma$, odzivi napona, tranzijentna analiza pri raznim ω_{dq} ;
- *Simulacija V: Odziv struje u zatvorenoj sprezi – sinteza IMC regulatora*
 - propusni opseg $\lambda = 1/T_\sigma$, odzivi napona, tranzijentna analiza pri raznim ω_{dq} ;
 - propusni opseg $\lambda = n/T_\sigma$, odzivi napona, tranzijentna analiza pri raznim ω_{dq} ;
- *Simulacija VI: Komparativna analiza odziva struje u zatvorenoj sprezi IMC pristupa sa *feed-forward* mehanizmom u slučaju parametarske nesigurnosti objekta upravljanja*
 - slučaj $\hat{R}_s \neq R_s$ pri različitim vrednostima ω_{dq} ;
 - slučaj $\hat{L}_\sigma \neq L_\sigma$ pri različitim vrednostima ω_{dq} !