

Regulacija asinhronskega motorja v slabljenju polja

Mitja Alič

E-pošta: mitja1357@gmail.com

Povzetek. IZHODIŠČA. Potreba po velikem razponu vrtilne hitrosti je v sedanjosti na področju vodenja pogonov zelo potrebna. Z uporabo napetostno-frekvenčnih pretvornikov se lahko generira poljubne oblike in velikosti napajalnih napetosti. Na podlagi različnih tehnik in izračunov nastavljamo željene vrednosti za pogone. V tem delu bom predstavil tehnike za regulacijo asinhronskega stroja v področju konstantne moči, pri čemer je želja po čim višjem ustvarjenem navoru.

METODE. Ob pregledu strokovne literature, ki je ustrezala študiji, sem zbral primere tehnik, s katerimi asinhronski motor reguliramo v območju slabljenja polja, hkrati pa zagotovimo visoko vrednost ustvarjenega navora.

REZULTATI. S simulacijami sem prikazal, da s pomočjo različnih tehnik, stroj v področju slabljenja polja ustvari različne velikosti električnega navora.

ZAKLJUČEK. Obstaja veliko pristopov, kako regulirati pogon asinhronskega motorja v področju slabljenja polja. Različne tehnike se odzivajo različno. S katero tehniko bo motor reguliran, je odvisno le od načrtovalca pogona.

Ključne besede: koordinatni sistem rotorskega polja, magnetilni tok, navor, slabljenje polja

1 UVOD

Želja po velikem razponu vrtilne hitrosti elektromotorjev je v sedanjem času zelo zaželjena. Z uporabo napetostno-frekvenčnih pretvornikov se lahko pogone zelo dobro prilagodi bremenom, katere bo moral premagovati. Z različnimi metodami se pogone lahko vodi v širokem območju. V območjih do nazivne hitrosti se uporablja metoda U/f [1], ki v področju do nazivne hitrosti omogoča ustvariti konstanten navor. V nadnazivnih hitrostih začne pogon omejevati napetostna zmožnost napajalnega pretvornika. Navadno se pri tej točki obratovanja spremeni metoda za določanje želenih vrednosti tokov v motor. V literaturi [1],[2],[3] ipd. so opisane metode, ki se jih je primerno poslužiti. Za obratovanje asinhronskega motorja pri nadnazivnih hitrostih je potrebno zmanjšati vrednost magnetnega sklepa v zračni reži. Ta metoda ne zagotovi enakega navora kot v podnazivnem območju navora. V tem območju sta vrednosti napajalne napetosti in toka konstantni, zato se to območje delovanja imenuje območje konstantne moči. Za obratovanje s čim višjim navorom pa je potrebno pravilno nastaviti želene vrednosti tokov v področju slabljenja polja. Motor hkrati ne sme preseči nazivnih vrednosti napajalne napetosti in toka, saj bi se mu s tem lahko skrajšala življenska doba.

V tem delu bom predstavil različne metode za določanje želenih vrednosti tokov. S programskim paketom Matlab simuliral delovanje motorja v nadnazivnih hitrostih in pri tem preizkusil nekatere metode.

2 PRETVORBA V KOORDINATNI SISTEM POLJA

Teorija orientacije polja je bila prvič objavljena v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja in velja danes kot prevladujoče orodje za regulacijo servo pogonov, ki ni omejena le na asinhronske motorje. Napetosti, tokove in magnetne sklepe posameznih faz lahko v stroju opišemo s prostorskim vektorjem posamezne količine.

Iz Kirchhoffovih zakonov sledi

$$\sum_{n=1}^3 i_n(t) = 0 \quad (1)$$

prav tako za napetosti

$$\sum_{n=1}^3 u_n(t) = 0 \quad (2)$$

Prostorski vektor je vektorska vsota faznih količin, ki so v medsebojno zamaknjene za kot $\gamma = 2\pi/3$. Prostorsko umestitev faznih veličin dosežemo tako, da njihove skalarne vrednosti množimo s tremi kompleksnimi konstantami

$$e^{jn\gamma} = \cos n\gamma + j \sin n\gamma,$$

kjer je $n = \{0,1,2\}$. Prostorsko umeščeni vektorji posameznih faz so definirani kot

$$\mathbf{i}_1(t) = i_1(t)e^{j0}$$

$$\mathbf{i}_2(t) = i_2(t)e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\mathbf{i}_3(t) = i_3(t)e^{j\frac{4\pi}{3}}$$

Skupni učinek vseh tokov združimo v rezultanti toka. Ob upoštevanju Kirchhoffovega in Eulerjevega izreka velja naslednja relacija

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_s(t) &= c(\mathbf{i}_1(t) + \mathbf{i}_2(t) + \mathbf{i}_3(t)) = \\ &= \underbrace{c \frac{3}{2} i_1(t)}_{\text{Re}[\mathbf{i}(t)]} + j \underbrace{c \frac{\sqrt{3}}{2} (i_2(t) - i_3(t))}_{\text{Im}[\mathbf{i}(t)]} = \\ &= i_{sa}(t) + j i_{sb}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Koordinatni sistem rotorskega polja je usmerjen v smeri vektorja rotorskega fluksa oz. magnetilnega toka. Vektor $\mathbf{i}_s(t)$ je potrebno projicirati v sistem rotorskega polja. To opravimo z matričnim množenjem.

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho & \sin \rho \\ -\sin \rho & \cos \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Kot ρ je kot magnetilnega toka rotorja, ki se vrti s sinhronsko hitrostjo. Definiran je kot

$$\rho = \int (\omega_{sl} + p_p \omega_m) dt \quad (5)$$

Kjer ω_{sl} predstavlja slipno krožno frekvenco, ω_m mehansko vrtilno hitrost in p_p polove pare.

S temi transformacijami se tok kot tudi napetost in rotorski magnetni pretok pretvori v sistem, ki se ga obravnava kot reguliranje enosmernega motorja.

V znani enofazni nadomestni shemi asinhronskega stroja, poznamo stresani induktivnosti $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$ in glavno induktivnost, ki jo označimo z L_m . Te induktivnosti izhajajo iz statorske L_s in rotorske L_r induktivnosti.

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m \quad (6)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m \quad (7)$$

Stresani induktivnosti lahko opišemo tudi s faktorji stresanja.

$$L_{\sigma s} = \sigma_s L_m \quad (8)$$

$$L_{\sigma r} = \sigma_r L_m \quad (9)$$

Vpeljimo faktor skupnega stresanja

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_s)(1 + \sigma_r)} = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (10)$$

S tem faktorjem lahko definiramo tranzientno induktivnost statorskega navitja, ki nastopa v izpeljanih napetostnih enačbah.

$$L'_s = \sigma L_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \quad (11)$$

3 STANDARDNA METODA

Napajalni pretvornik pogona ima definirano napetostno in tokovno limito. Napetostna limita je odvisna od napetosti enosmernega pretvornika.[3] Zaradi omejene izhodne napetosti pretvornika je lahko maksimalna napetost:

$$u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = U_{smax}^2 \quad (12)$$

u_{sd} in u_{sq} predstavljata vzdolžno in prečno komponento napetosti v dvoosnem koordinatnem sistemu. Napetosti sta odvisni od prečne i_{sq} in vzdolžne i_{sd} komponente toka ter magnetilnega toka i_{mr} (enačbi 13, 14). Magnetilna komponenta toka je odvisna le od i_{sd} (15). Magnetilna komponenta se na i_{sd} odziva, kot člen prvega reda s časovno rotorsko konstanto ki je razmerje med rotorsko induktivnostjo in rotorsko upornostjo.[1]

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L'_s \frac{di_{sd}}{dt} - L'_s \omega_{mr} i_{sq} + (L_s - L'_s) \frac{di_{mr}}{dt} \quad (13)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L'_s \frac{di_{sq}}{dt} + L'_s \omega_{mr} i_{sd} + (L_s - L'_s) \omega_{mr} i_{mr} \quad (14)$$

$$T_r \frac{di_{mr}}{dt} + i_{mr} = i_{sd} \quad (15)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (16)$$

V stacionarnem stanju so vrednosti odvodov enake 0. Magnetilni tok ima takrat enako vrednost kot i_{sd} . Pri višjih vrtilnih hitrostih postane ohmski padec napetosti zanemarljiv in enačbi se v stacionarnem stanju poenostavi v

$$u_{sd} = -L'_s \omega_{mr} i_{sq} \quad (17)$$

$$u_{sq} = L_s \omega_{mr} i_{sd} \quad (18)$$

Enačbi (17) in (18) vstavimo v enačbo (12)

$$(L'_s \omega_{mr} i_{sq})^2 + (L_s \omega_{mr} i_{sd})^2 = U_{smax}^2 \quad (19)$$

Rezultat predstavlja maksimalno vrednost statorskih tokov v dvoosnem koordinatnem sistemu, v odvisnosti od napetosti. Če izraz nekoliko predelamo dobimo enačbo, iz katere prepoznamo elipso:

$$\left(\frac{i_{sd}}{a}\right)^2 + \left(\frac{i_{sq}}{b}\right)^2 = 1 \quad (20)$$

a in b predstavljata pol osi elipse, $a = U_{smax}/(\omega_{mr} L_s)$, $b = U_{smax}/(\omega_{mr} L'_s)$. Polosi sta funkciji vrtilne hitrosti in z naraščanjem hitrosti postajata manjši.

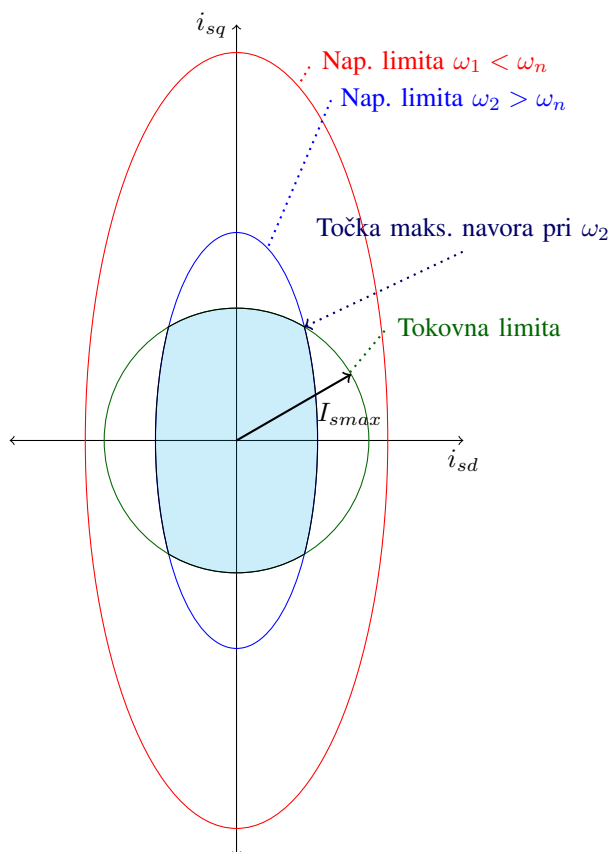
Vsak motor je konstruiran za določene pogoje in temu primerno je določen tudi nazivni tok. Če stroj obratuje z višjim tokom kot je nazivni, se bo zaradi toplotnih izgub v navitjih začel segrevati. S segrevanjem se lahko stroj deformira, ali se mu z obratovanjem v takih pogojih

skrajša življenska doba. Maksimalen tok v motor je tako definiran kot:

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = \hat{I}_n^2 = I_{smax}^2 \quad (21)$$

Pogojema določenima z enačbama (20) in (21), mora statorski tok vedno ustrezati. Ob takem obratovanju bo stroj lahko deloval celotno življensko dobo.[3]

Če grafično ponazorimo napetostno in tokovno limito nam presek limit prikazuje točko, ki označuje največjo vrednost i_{sd} in i_{sq} (Slika 1). V tej točki motor ustvari največji navor. Tokovna limita je ponazorjena s krožnico, z radijem I_{smax} . Elipsa predstavlja napetostno limito, ki se v odvisnosti od vrtilne hitrosti spreminja. Pri nižjih vrtilnih hitrostih sta polosi večji od polmera tokovne limite (Napetostna limita za ω_1 na sliki 1), zato vpliva na željene vrednosti tokov i_{sd} in i_{sq} le tokovna limita (tokovni vektor se mora gibati znotraj zelenega kroga). Pri višjih vrtilnih hitrostih polosi elipse postanejo manjši in želene vrednosti tokov se morajo prilagoditi tudi napetostni limiti (Napetostna limita za ω_2 na sliki 1). Želeni vrednosti tokov i_{sd} in i_{sq} se morajo prilagoditi preseku območja, ki ga označuje obarvan del.



Slika 1: Prikaz napetostne in tokovne limite pri dveh različnih vrtilnih hitrostih

Pri vrtilnih hitrostih višjih od nazivne se standardno uporablja slabljenje polja po prvi potenci. Pri tej metodi se znižuje vrednost toka i_{sd} v obratnem razmerju z

vrtilno hitrostjo,

$$i_{sd}^* = i_{sdn} \frac{\omega_n}{\omega_r} \quad (22)$$

kjer i_{sdn} predstavlja nazivno vrednost magnetilnega toka, ω_n predstavlja nazivno vrtilno hitrost, ki jo ponvadi navede proizvajalec in ω_r trenutno vrtilno hitrost rotorja. Ulomek $\frac{\omega_r}{\omega_n}$ bi lahko nadomestili tudi z vrtilno hitrostjo v p.u. sistemu. Maksimalna vrednost i_{sq} pri tej metodi določi limita iz enačbe (21)[3]

$$i_{sqmax} = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{sd}^{*2}} \quad (23)$$

4 IZBOLJŠANA METODA

V nadeljevanju sta opisani dve tehniki nastavljanja željene vrednosti vzdolžnega toka, pri katerih je magnetna nasičenost zanemarljiva. Predpostavljamo linearno karakteristiko magnetilnice, katera je v realnosti drugače nelinearna. Prva tehnika (Tehnika A) ustvari večji navor v območju nad vrtilno hitrostjo kot standardna. Druga (Tehnika B) temelji na prvi metodi, vendar lahko ob prehodnih pojavih ustvari večji navor kot tehnika A.[3]

4.1 Tehnika A

Ob definiranem napajalnem pretvorniku je podana maksimalno vrednost izhodne napetosti in toka. Ob upoštevanju enačb (20) in (23) lahko izrazimo vrtilno hitrost, pri kateri je nazivni vzdolžni tok še možen. Vrtilna hitrost, pri kateri se poslužimo tehnike slabljenja polja je odvisna od parametrov napajalnega pretvornika, nazivnega vzdolžnega toka ter statorske in stresane induktivnosti.

$$\omega_n = \frac{U_{smax}}{\sqrt{i_{sdn}^2 (L_s^2 - L_s'^2) + (L_s' I_{smax})^2}} \quad (24)$$

V področju slabljenja polja bo navor višji od standardne metode ob upoštevanju limit, ki jih določati enačbi (20) in (21).

$$i_{sd}^* = \sqrt{\frac{(U_{smax})^2 - (L_s' I_{smax})^2}{L_s^2 - L_s'^2}} \quad (25)$$

Vrednost i_{sd}^* glede na vrtilno hitrost v področju slabljenja polja lahko razberemo iz slike 1, v presečišču elipse in krožnice.

4.2 Tehnika B

Pri tehniki A je upoštevano, da je motor v stacionarnem stanju in magnetilni tok enak i_{sd} . Navorno enačbo za asinhroski motor se lahko zapiše kot:[1]

$$M_{el} = \frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_r} |\psi_{rd}| i_{sq} \quad (26)$$

Pri čemer ψ_r predstavlja rotorski magnetni sklep. Leta je odvisen od magnetilnega toka, ki je posledica i_{sd}

$$\psi_{rd} = \frac{L_m i_{sd}}{1 + T_r p} \quad (27)$$

kjer p predstavlja operator odvajanja po času $p = d/dt$ in T_r rotorsko časovno konstanto.

Rešitev enačbe (27) je:

$$\psi_{rd} = L_m i_{sd} + \Delta\psi_{rd}, \quad (28)$$

kjer je

$$\Delta\psi_{rd} = (\psi_{rd}(t_0) - L_m i_{sd}(t_0)) e^{-\frac{t_0 - t}{T_r}} \quad (29)$$

t_0 predstavlja začetni čas. Elektromagnetni navor je tako povišan

$$M_{el} = \frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_r} (L_m i_{sd} + \Delta\psi_{rd}) i_{sq} \quad (30)$$

Ob upoštevanju neenakosti magnetilnega toka in vzdolžne komponente statoskega toka v enačbi 14 in posledično tudi v enačbi 20, je željena vrednost vzdolžne komponente toka:

$$i_{sd}^* =$$

$$\frac{\sqrt{(cL_s)^2 + d[(\frac{U_{smax}}{\omega})^2 - L_s'^2 I_{smax}^2 - c^2]} - cL_s}{d} \quad (31)$$

$$i_{sqmax} = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{sd}^{*2}} \quad (32)$$

Pri čemer

$$c = \frac{L_m}{L_r} (\psi_r(t_0) - L_m i_{sd}(t_0))$$

$$d = L_s^2 - L_s'^2$$

Po prehodnem pojavu (Enačba (27)), c konvergira k 0. S tem se izraz (31) poenostavi v (25).[3]

5 SIMULACIJE IN UPORABA TEHNIK

Simulacije sem izvedel s programskim paketom Matlab. Za model asinhronskega motorja sem si izbral naslednje podatke:

Za izračune v simulaciji sem uporabil dvoosni koordinatni sistem, v katerega sem pretvoril asinhronski motor.

Motor sem reguliral z neposredno FOC metodo. Limite v regulaciji sem nastavljal po izrazih v 19 in 21. Osrednji del simulacij se je navezoval na določanje vzdolžne komponente toka. Za njeno določanje sem uporabil izraza iz zgoraj teoretično opisanih postopkov (Glej poglavje 4.1, 4.2).

6 REZULTATI SIMULIRANIH TEHNIK

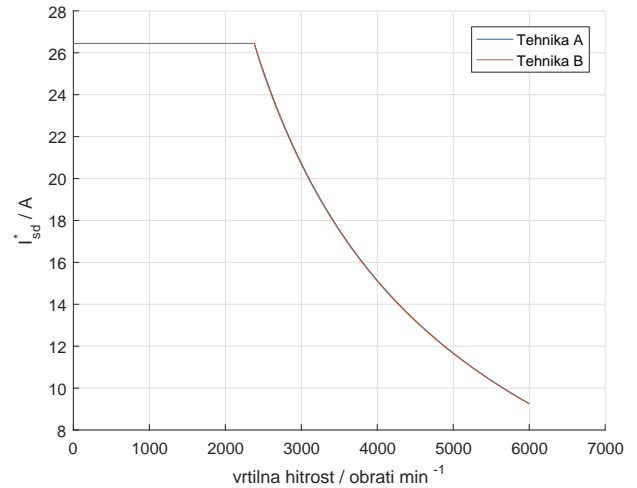
Pri simulaciji izboljšanih tehnik nisem upošteval nelinearnosti železa. Zato je vrtilna hitrost lahko naraščala tudi v območju, kjer se je v realnosti potrebno poslužiti druge tehnike zaradi nasičenosti železa.

Tabela 1: Nazivni podatki simuliranega motorja

P_n	0.5 kW
M_n	2,5 Nm
U_n	15 V
$I_{mrn} = i_{sdn}$	18,7 A
I_n	28,4 A
n_N	2200 rpm
R_s	0.074 Ω
R_r	0.0513 Ω
L_s	2.596 mH
L_r	2.559 mH
L_m	2.4 mH
p_p	1 polov par
J	0,001 kg m ²

6.1 Statična karakteristika

Statično karakteristiko sem simuliral tako, da sem željeno vrednost vrtilne hitrosti linearno večal. Rezultat simulacije je na sliki 6.1.



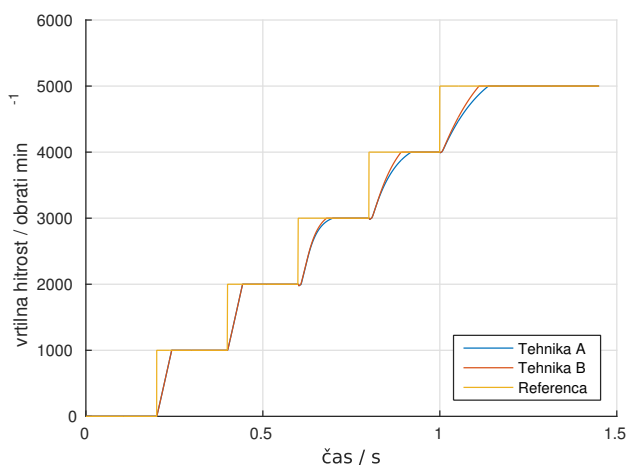
Slika 2: Odvisnost željene vrednosti vzdolžne komponente toka od vrtilne hitrosti

V poglavju 4.2 je opisano, da je v stacionarnem stanju vrednost i_{sd}^* enaka v obeh tehnikah. V simulaciji je manjše odstopanje druge tehnike. Vrednost vrtilne hitrosti sem linearno višal, zato se je spreminjala tudi željena vrednost vzdolžne komponente. Rotorski magnetni pretok linearno sledi vrednosti i_{sd} . Konstanta c tako ni 0. Izraz v 31 zato ni enak 25 in od tu je manjše odstopanje.

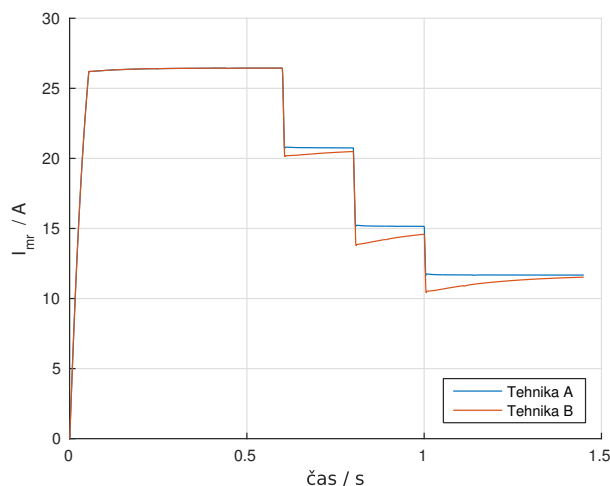
6.2 Prehodni pojav

V naslednji simulaciji sem simuliral prehode vrtilne hitrosti. Za željeno vrednost vrtilne hitrosti sem nastavljal stopničasto funkcijo. Ob tem sem opazoval vrtilno hitrost, vrednosti magnetilnega toka in potek ustvarjenega navora. Določanje željene vrednosti i_{sd} sem nastavljal

z uporabo tehnik opisanih v poglavju 4.1 in 4.2. Potek simulacije je predstavljen na slikah 3, 4 in 5. V področju slabljenja polja se vrednost željene vrednosti vzdolžne komponente toka manjša. Pri času 0,6 s sem se začel posluževati tehnik primernih v področju slabljenja polja. Motor v tem področju lahko ustvari manjši navor, kot ga je lahko ustvarjal v območju pod nazivno hitrostjo. Na sliki 5 se vidi kako motor v območju višjih vrtilnih hitrosti ne ustvari več polnega navora. Najvišja vrednost ustvarjenega navora pada obratno sorazmerno z višanjem vrtilne hitrosti. Prehodni pojav vrtilne hitrosti zaradi manjšega ustvarjenega navora traja dlje (Slika 3).



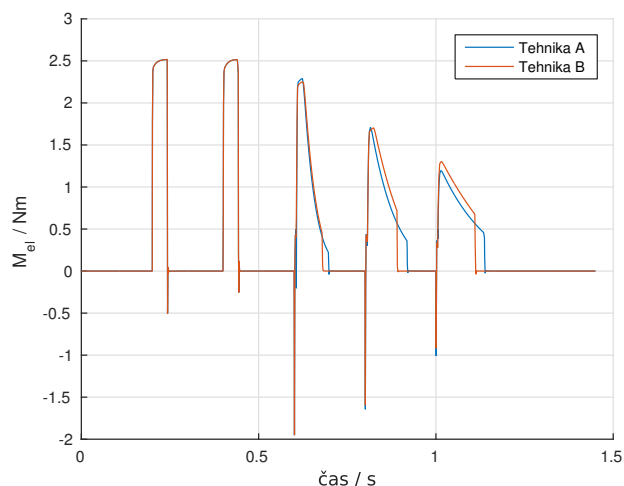
Slika 3: Potek prehodov vrtilne hitrosti



Slika 4: Potek vrednosti magnetilnega toka

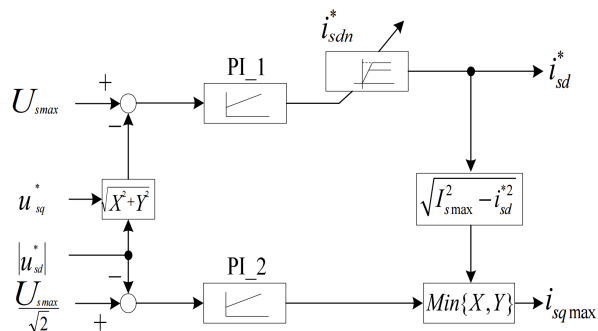
7 DRUGE METODE ZA ZAGOTOVITEV MAKSIMALNEGA NAVORA

V regulaciji se nastavlja vrednosti željenih tokov, vendar motor se krmili z napetostjo. Izhod regulacije je napetost, katero je potrebno prilagoditi glede na področje



Slika 5: Potek navora

delovanja. V področju konstantnega navora je želja zagotoviti naziven magnetni pretok ($i_{sd}^* = \text{konst.}$). Prečna in vzdolžna komponenta napetosti sta nižji od maksimalne izhodne napetosti. V tem področju se uporablja U/f metoda. [1] Ko U/f metoda doseže maksimalno izhodno napetost je potrebno prečno komponento napetosti manjšati (Enačba 14). Za ohranjanje maksimalne napetosti lahko vzdolžno komponento napetosti povišamo. V obratovanju z maksimalno izhodno napetostjo, se bo lahko zagotovil največji navor. Slika 6 prikazuje primer blokovne sheme za zagotavljanje maksimalnega navora. Strategija je sestavljena iz dveh PI regulatorjev za določanje vzdolžne komponente toka in maksimalne vrednosti i_{sq} .

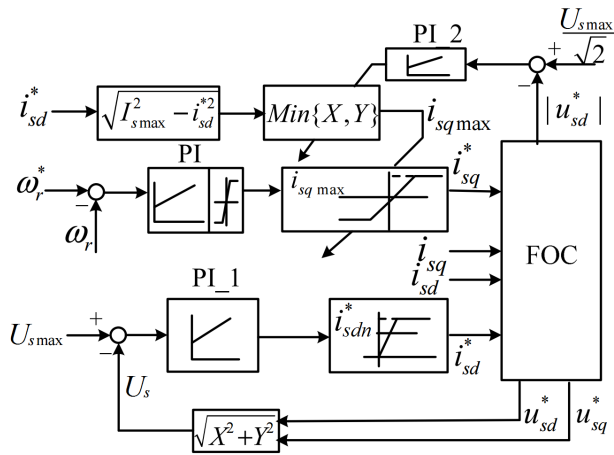


Slika 6: Blokovna shema za določanje vzdolžne komponente toka in maksimalne vrednosti prečne komponente toka[4]

Regulator PI_1 regulira vzdolžno komponento toka in skrbi za zmanjševanje magnetnega pretoka v področju slabljenja polja. Regulator PI_2 skrbi, da sta vrednosti $|u_{sd}^*|$ in u_{sq}^* enaki $U_{smax}/\sqrt{2}$, saj motor v tej delovni točki ustvari največji navor.

Na sliki 7 je prikazan primer uporabe takega načina določanja željenih vrednosti tokov. Regulator PI_1 je omejen z nazivno vrednostjo vzdolžne komponente toka

in uravnava vrednost toka, ko je na izhodu zahtevana maksimalna napetost. Regulator PI_2 je v nasičenju ko motor obratuje v območju konstantnega navora. Maksimalna vrednost i_{sq} je omejena z izrazom $\sqrt{I_{smax}^2 - i_{sd}^2}$. V tem območju je maksimalna vrednost prečne komponente toka odvisna le od i_{sd} . V področju slabljenja polja se začne željena vrednost vzdolžne komponente toka manjšati, s tem pa se začne višati vrednost maksimalne vrednosti prečne komponente. Izhod regulatorja PI_2 se zaradi naraščanja absolutne vrednosti prečne komponente napetosti manjšati. Sočasno začne regulator PI_2 siliti končno izhodno napetost vzdolžne komponente k vrednosti $U_{smax}/\sqrt{2}$. Rezultat delovanja s to strategijo je, da motor ves čas deluje v točki maksimalnega navora. [4]



Slika 7: Blokovna shema regulacije za ustvarjanje maksimalnega navora[4]

LITERATURA

- [1] V. Ambrožič, P. Zajec, *Električni servo pogoni*, Slovensko združenje elektroenergetikov CIGRÉ-CIRED, 2016
- [2] P. Jereb, D. Miljavec, *Električni stroji: temeljna znanja*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2014
- [3] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press, pp 632–641, 1998
- [4] Y. Xu, C. Shen, H. Hui and Z. Huang, *Field Weakening Strategy in a Wide Speed Range of Induction Motors for Electric Vehicles Based on Maximum Torque Control* Power Electronics and Application Conference and Exposition, p. 740, 2014

8 ZAKLJUČEK

Predstavil sem regulacijo motorja v področju slabljenja polja. Opisal sem osnovno metodo, kako nastavlja željeno vrednost vzdolžne komponente toka. Predstavil sem tudi izboljšani tehniki, s katerima lahko motor ustvari višji navor v območju nad nazivno hitrostjo. Simuliral sem poteke nastavljanja vzdolžne komponente toka glede na željeno vrtilno hitrost. Na koncu sem predstavil še metodo, katera napaja motor tako, da vedno deluje v točki največjega ustvarjenega navora.

Vrtenje motorja v nadnazivnih hitrostih nam omogoča večji razpon željene vrtilne hitrosti. Z uporabo primernih tehnik lahko v širokem območju vrtilne hitrosti dosežemo maksimalen navor. S tem delom sem prikazal, da se lahko v območju nad nazivno hitrostjo obratuje dobro. S primerno metodo se da še zvišati ustvarjen navor. Metodo katero se bo uporabilo v pogonu, je nato odvisno le od načrtovalca.