

MAKSIMALNE PERFORMANSE UPRAVLJANJA MOMENTOM ASINHRONOG MOTORA U STRUJNOM I NAPONSKOM LIMITU

Petar Matić¹, Dejan Raca², Branko Blanuša¹, Slobodan N. Vukosavić³

¹Elektrotehnički fakultet u Banjoj Luci, Banja Luka, Republika Srpska, BiH, ²University of Wisconsin
– Madison, USA, ³Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Beograd, SiCG

Sadržaj: U radu će biti definisane maksimalne performanse koje se teorijski mogu dobiti pri upravljanju momentom u pogonu sa asinhronim motorom. Biće određen potreban kapacitet pogonskog pretvarača za dostizanje tih performansi, a zatim maksimalne moguće performanse za slučaj kada ovaj kapacitet nije dovoljan. Analiza će biti bazirana na osnovnim jednačinama rada asinhronog motora, tako da će dobijeni rezultati važiti u opštem slučaju, bez obzira na odabrani koncept upravljanja: skalarno, vektorsko ili direktnu kontrolu momenta.

Ključne reči: Asinhroni motor, Upravljanje momentom, Strujni i naponski limit, Performanse

1. UVOD

Asinhrona mašina radi u naponskom limitu ako je indukovana kontraelektromotorna sila bliska nominalnom naponu motora. Ova situacija tipično se javlja prelaskom brzine preko nominalne, odnosno u slabljenju polja. Ograničenje trajne struje aktuatora određeno je nominalnom strujom poluprovodničkih prekidača i uslovima hlađenja, dok je maksimalna kratkotrajna struja određena kratkotrajnim strujnim preopterećenjem poluprovodnika. Pogon može dostizati ili naponski ili strujni limit, ili oba istovremeno. Poželjno je formirati upravljačku strategiju i dimenzionisati aktuator tako da se oba limita dostižu u tački u kojoj će moment biti maksimalan. Ako bi se pri maksimalnom momentu naponski limit dostizao prije nego strujni, tada bi aktuator bio predimenzionisan po struji, dok se u slučaju kada se strujni limit dostiže prije nego naponski, ne mogu dobiti maksimalne performanse pogona zbog nedovoljne struje. Pravilnim izborom pogonskog pretvarača, performanse kompletnog pogona postaju jednake teorijskim performansama asinhronog motora, dok su u slučaju limita struje i/ili napona aktuatora performanse pogona određene kapacitetom aktuatora i upravljačkom strategijom. U radu će biti uspostavljena veza između performansi pogona i karakteristika aktuatora koja će poslužiti kao osnov za definisanje

kriterijuma za dobijanje maksimalnih performansi, odnosno maksimalno mogućeg momenta u uslovima strujnog i naponskog limita.

2. KARAKTERISTIKE POGONSKOG PRETVARAČA

Pogonski pretvarač – aktuator na svom izlazu obezbjeđuje napone i struje potrebne učestanosti. Njegov kapacitet definisan je nominalnim naponom i strujom na izlazu u trajnom radu (nominalnom prividnom snagom) i maksimalnom kratkotrajnom strujom koja direktno određuje dalju dinamiku pogona. Nominalne prividne snage pretvarača i motora treba da budu jednake (isti nominalni naponi i struje), a maksimalna struja aktuatora takva da se dobiju tražene performanse tokom prelaznih procesa /1-5/.

Invertorski napajani asinhroni motori imaju značajno ojačanu izolaciju zbog veoma strme promjene napona, tako da bi mogli da rade i sa naponima većim od nominalnog. Ograničenje nametnuto stepenom izolacije motora znatno je iznad naznačenog nominalnog napona motora. Zbog toga kao ograničenje napona treba posmatrati maksimalno mogući napon aktuatora koji je određen naponom njegovog jednosmjernog međukola:

$$0 \leq U_{inv} \leq U_{MAX}, \quad (1)$$

gdje je U_{MAX} maksimalni napon aktuatora i najčešće takav da je jednak nominalnom naponu motora $U_{MAX} = u_{sn}$. Struja aktuatora nalazi se u granicama:

$$0 \leq I_{inv} \leq I_{MAX}, \quad (2)$$

gdje je I_{MAX} maksimalna struja aktuatora.

Da bi motor radio sa nominalnim fluksom, za brzine manje od nominalne, odnosno učestanosti manje od nominalne, odnos napona i učestanosti održava se konstantnim istovremenom varijacijom amplitude i učestanosti napona statora. Za brzine veće od nominalne, napon na motoru se ne povećava preko nominalne vrijednosti, te se dalje povećavanje učestanosti obavlja pri konstantnom naponu. Povećavanje učestanosti pri konstantnom naponu dovodi do slabljenja polja. U slučaju kada je opterećenje relativno malo, ili kada se

traži prolazak radne tačke kroz nultu brzinu, može se smanjiti nivo fluksa u motoru i za brzine manje od nominalne. Na taj način se mogu postići uštede u potrošnji električne energije /1-5/, odnosno poboljšati estimacija pozicije i brzine rotora na niskim učestanostima. U servopogonima visokih performansi, sa čestim promjenama momenta opterećenja, ovaj pristup se obično ne koristi. U ovom radu će se usvojiti pristup da se do nominalne sinhronne brzine indukcija održava na nominalnoj vrijednosti, dok će u slabljenju polja indukcija opadati obrnuto proporcionalno sa brzinom:

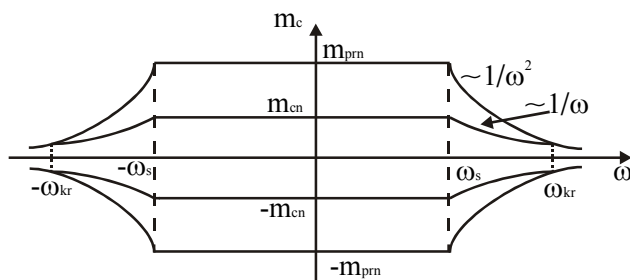
$$B \sim \frac{u_s}{\omega_s} = \begin{cases} \frac{u_{sn}}{\omega_{sn}}, & \omega_s \leq \omega_{sn} \\ \frac{u_{sn}}{\omega_s}, & \omega_s > \omega_{sn} \end{cases} \quad (3)$$

3. EKSPLOATAACIONA I TRANZIJENTNA KARAKTERISTIKA ZA NAPONSKO NAPAJANJE

Za napone i učestanosti manje od nominalne indukcija se održava na nominalnoj vrijednosti, pa je eksploataaciona karakteristika (skup tačaka u kojima mašina može trajno da radi) ograničena nominalnim momentom i nominalnom (sinhronom) brzinom. Tranzijentna karakteristika (oblast u kojoj motor može kratkotrajno da radi) ograničena je prevalnim momentom i nominalnom (sinhronom) brzinom. U oblasti slabljenja polja moment koji motor razvija u trajnom radu m_e zbog (3) opada po obrnuto proporcionalno sinhronoj brzini, odnosno prevalni moment opada obrnuto proporcionalno kvadratu brzine

$$m_e \sim \frac{1}{\omega_s}, \quad m_{pr} \sim \frac{1}{\omega_s^2} \quad (4)$$

Na Sl. 1. prikazane su eksploataaciona i tranzijentna karakteristika trofaznog asinhronog motora u slučaju naponskog napajanja bez strujnih limita. U oblasti slabljenja polja dolazi do presjeka tranzijentne i eksploataacione karakteristike. Brzina pri kojoj se ove dvije karakteristike sijeku naziva se kritična brzina. Povećavanjem brzine preko kritične moment opada proporcionalno kvadratu brzine (eksploataaciona karakteristika je ujedno i tranzijentna). Oznake sa Sl. 3.2. su sljedeće: m_{cn} - nominalni moment (konverzije), ω_s - nominalna sinhrona brzina, m_{prn} - nominalni prevalni moment, ω_{kr} - kritična brzina. Indeksom "n" označene su nominalne vrijednosti.



Sl. 1. Eksploataaciona i tranzijentna karakteristika

Kritična brzina dobija se izjednačavanjem momenta na eksploataacionoj i tranzijentnoj karakteristici pri kritičnoj brzini ω_{kr} :

$$m_n \frac{\omega_n}{\omega_{kr}} = m_{prn} \left(\frac{\omega_n}{\omega_{kr}} \right)^2 \quad (5)$$

Tada je kritična brzina:

$$\omega_{kr} = \omega_n \frac{m_{prn}}{m_n} \quad (6)$$

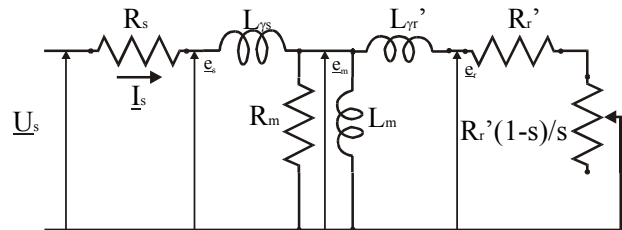
Zbog prelaska tranzijentne karakteristike ispod eksploataacione, oblast slabljenja polja dijeli se na dvije pod-oblasti: prvu, za brzine manje od kritične, u kojoj je trajni moment na vratilu obrnuto proporcionalan brzini, i drugu, za brzine veće od kritične, u kojoj je trajni moment obrnuto proporcionalan kvadratu brzine. U prvoj oblasti mehanička snaga motora (uz zanemarenje gubitaka frikcije i ventilacije) je konstantna.

4. UTICAJ STRUJNOG LIMITA NA TRANZIJENTNU KARAKTERISTIKU

U dosadašnjoj analizi momentnih karakteristika pretpostavljeno je da ne postoji strujno ograničenje, odnosno da je pogonski pretvarač idealan naponski izvor. Ako je strujni kapacitet pretvarača nedovoljan, tada mašina u prelaznim režimima neće moći da razvije prevalni moment, pa se neće moći dobiti tranzijentna karakteristika definisana prevalnim momentom kao na Sl. 1. U nastavku će prvo biti određen potreban strujni kapacitet akuatora za dobijanje prevalnog momenta u svim režimima, odnosno uslov pod kojim se akuator može posmatrati kao idealan naponski izvor. Nakon toga će biti analiziran uticaj strujnog limita na tranzijentnu karakteristiku određenu naponskim napajanjem, te definisane maksimalne performanse koje se tada mogu dobiti.

4.1. Određivanje dovoljnog strujnog kapaciteta

Na Sl. 2. prikazana je ekvivalentna šema asinhronog motora /1-5/.



Sl. 2. Ekvivalentna šema asinhronog motora

Amplituda struje statora, na osnovu ekvivalentne šeme sa Sl. 2 uz zanemarenje otpora statora i grane magnećenja je:

$$i_s = \frac{u_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + \omega_s^2 (L_{\gamma_s} + L_{\gamma_r}')^2}} \quad (7)$$

Ako se u izraz (7) uvrsti prevalno klizanje sa zanemarenim otporom statora:

$$s_{pr} = \frac{R_r'}{\omega_s (L_{\gamma_s} + L_{\gamma_r}')}, \quad (8)$$

dobija se izraz za struju statora u funkciji klizanja:

$$i_s = \frac{u_s \cdot s \cdot s_{pr}}{R_r' \sqrt{s^2 + s_{pr}^2}} \quad (9)$$

Dijeljenjem i množenjem izraza (9) sa sinhronom brzinom, može se dobiti zavisnost struje statora od učestanosti klizanja:

$$i_s = \left(\frac{u_s}{\omega_s} \right) \frac{\omega_{kl} \cdot \omega_{klpr}}{R_r \sqrt{\omega_{kl}^2 + \omega_{klpr}^2}}. \quad (10)$$

Prema (10) nominalna struja motora je:

$$i_{sn} = \left(\frac{u_{sn}}{\omega_{sn}} \right) \frac{\omega_{kln} \cdot \omega_{klpr}}{R_r \sqrt{\omega_{kln}^2 + \omega_{klpr}^2}}, \quad (11)$$

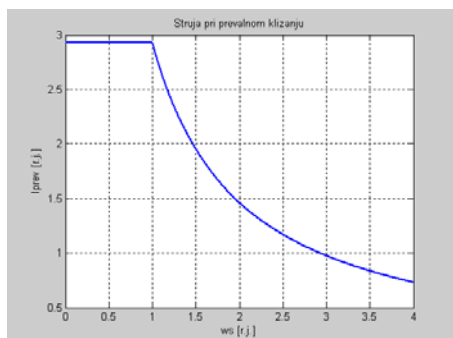
a kada mašina na svom vratilu razvija prevalni moment, tada je $s = s_{pr}$, i na osnovu (10) amplituda struje statora i_{spr} pri prevalnom momentu je:

$$i_{spr} = \left(\frac{u_s}{\omega_s} \right) \frac{1}{\sqrt{2}(L_{js} + L_{jr})}, \quad (12)$$

Dijeljenjem (3.35) i (3.36) dobija se odnos struje pri prevalnom klizanju i struje u nominalnom režimu za posmatranu radnu tačku:

$$\frac{i_{spr}}{i_{sn}} = \left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s} \right) \cdot \frac{\sqrt{\omega_{kln}^2 + \omega_{klpr}^2}}{\sqrt{2} \omega_{kln}}. \quad (13)$$

Na Sl. 3. prikazan je odnos struja pri prevalnom i nominalnom klizanju za jedan tipičan niskonaponski asinhroni motor sa parametrima $m_{prm} / m_n = 2,13$, $\omega_{kln} = 18,85 \text{ rad/s}$, $\omega_{klpr} = 75,75 \text{ rad/s}$.



Sl. 3. Odnos struje pri prevalnom klizanju i nominalne struje u obje zone upravljanja

U prvoj zoni je odnos (13) konstantan, dok u zoni slabljenja polja struja pri prevalnom momentu opada obrnuto proporcionalno sinhronoj brzini. Na brzini $\omega_{lmax} > \omega_s$ struja u slabljenju polja pri prevalnom momentu opada ispod nominalne struje. Ova brzina može se odrediti iz (13) uvrštavanjem $i_{sn} = i_{spr}$:

$$\omega_{lmax} = \omega_{sn} \cdot \frac{\sqrt{\omega_{kln}^2 + \omega_{klpr}^2}}{\sqrt{2} \omega_{kln}}. \quad (14)$$

Ako pogon u svim režimima treba da ostvari maksimalne performanse, tada strujni kapacitet aktuatora I_{POT} treba da bude određen na osnovu (13) u prvoj zoni:

$$\frac{I_{POT}}{i_{sn}} = \frac{\sqrt{\omega_{kln}^2 + \omega_{klpr}^2}}{\sqrt{2} \omega_{kln}} = v_{idovoljno}, \quad (15)$$

jer se maksimalna struja pri prevalnom momentu uvijek ima u prvoj zoni upravljanja. Povećavanje strujnog kapaciteta preko dovoljne vrijednosti definisane

izrazom (15) nema praktičnog smisla, jer je struja određena prema (15) dovoljna da se u svakom režimu može postići prevalni moment. Ako bi strujna preopteretljivost aktuatora bila veća od (15), aktuator bi bio strujno predimenzionisan. Zbog toga se strujni kapacitet aktuatora $v_{idovoljno}$ može nazvati *dovoljnim strujnim kapacitetom*. Strujna preopteretljivost može se eventualno povećati za faktor sigurnosti.

4.2. Uvažavanje strujnog limita

U slučaju da aktuator u prelaznim režimima daje maksimalnu struju $I_{sMAX} < I_{POT}$, stvarni strujni kapacitet je:

$$v_i = \frac{I_{sMAX}}{i_{sn}}, \quad (16)$$

i on je tada manji od odnosa (15). U ovom slučaju mašina neće moći da u prelaznim režimima moći razvije prevalni moment definisan idealnim naponskim napajanjem, nego će taj moment biti manji. Maksimalni moment motora u uslovima strujnog limita može se odrediti preko klizanja ω_{klMAX} pri kome je struja (10) maksimalna I_{sMAX} :

$$I_{sMAX} = \left(\frac{u_s}{\omega_s} \right) \frac{\omega_{klMAX} \cdot \omega_{klpr}}{R_r \sqrt{\omega_{klMAX}^2 + \omega_{klpr}^2}}, \quad (17)$$

gdje je I_{sMAX} maksimalna dopuštena struja, a ω_{klMAX} učestanost klizanja pri kojoj se ima ta maksimalna struja. Dijeljenjem izraza za maksimalnu i nominalnu struju ((17) i (10)), dobija se izraz za učestanost klizanja ω_{klMAX} pri kojoj je struja motora maksimalna I_{sMAX} :

$$\omega_{klMAX} = k_i \cdot \omega_{klpr}, \quad (18)$$

gdje je

$$k_i = \frac{v_i \omega_{kln}}{\sqrt{\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s} \right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{kln}^2 \left[\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s} \right)^2 - v_i^2 \right]}}. \quad (19)$$

Koeficijent k_i može se nazvati *koeficijentom strujne preopteretljivosti*. Ovim koeficijentom je definisana učestanost klizanja pri kojoj se ima maksimalni moment određen strujnim kapacitetom, i koja je, u zavisnosti od kapaciteta aktuatora i radnog režima, manja ili jednaka učestanosti klizanja pri prevalnom momentu ($k_i \leq 1$).

Rastom sinhronne brzine struja pri kojoj se ima prevalni moment (13) opada, a samim tim maksimalno dozvoljeno klizanje raste i približava se prevalnom. U trenutku kada struja pri prevalnom klizanju postane manja od limita I_{sMAX} , izraz (19) postaje nedefinisan (podkorjena veličina bi bila manja od nule), odnosno tada se može dozvoliti rad mašine sa prevalnim klizanjem. Zbog toga, u opštem slučaju, koeficijent k_i zavisi od strujnog limita, i može se odrediti na osnovu:

$$k_i = \begin{cases} \frac{v_i \omega_{k \ln}}{\sqrt{\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 \left[\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 - v_i^2\right]}}, & v_i \leq \left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right) \frac{\sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2}}{\sqrt{2} \omega_{k \ln}} \\ 1, & v_i > \left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right) \frac{\sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2}}{\sqrt{2} \omega_{k \ln}} \end{cases} \quad (20)$$

Dobijenu zavisnost koeficijenta k_i od strujnog kapaciteta treba modifikovati tako da bude funkcija sinhronne brzine. Na taj način se može posmatrati klizanje u zavisnosti od brzine obrtanja u prvoj i drugoj zoni u skladu sa strujnim limitom. U prvoj zoni je $\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s} = 1$, pa koeficijent strujne preopterećenosti (19) postaje:

$$k_i = \frac{v_i \omega_{k \ln}}{\sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 (1 - v_i^2)}} = const. \quad (21)$$

U drugoj zoni upravljanja $\omega_s / \omega_{sn} > 1$, $u_s = u_{sn}$, pa k_i raste (dozvoljava se veće klizanje jer struja opada):

$$k_i = \frac{v_i \omega_{k \ln}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s}\right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 \left[\left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s}\right)^2 - v_i^2\right]}} \quad (22)$$

Ovaj režim traje sve dok se ne dostigne brzina pri kojoj se struja pri prevalnom klizanju izjednačuje sa maksimalno dozvoljenom strujom:

$$i_{spr} = I_{sMAX}, \quad (23)$$

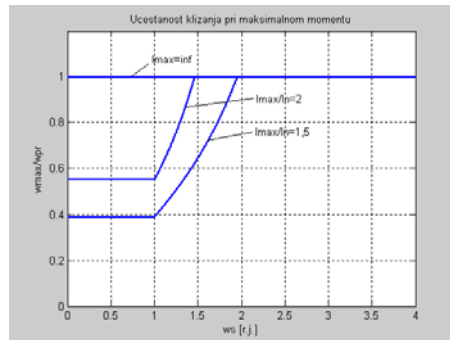
te je tada koeficijent $k_i = 1$, a granična sinhrona brzina iz (19):

$$k_i = \begin{cases} \frac{v_i \omega_{k \ln}}{\sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 (1 - v_i^2)}} = const, & \omega_s < \omega_{sn} \\ \frac{v_i \omega_{k \ln}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s}\right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 \left[\left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s}\right)^2 - v_i^2\right]}}, & \omega_{sn} \leq \omega_s < \omega_{sgr} \\ 1, & \omega_s > \omega_{sgr} \end{cases} \quad (25)$$

Na Sl. 4. nacrtana je zavisnost koeficijenta k_i u prvoj i drugoj zoni upravljanja za strujne kapacitete $v_i = 1,5$ i $v_i = 2$. U prvoj zoni upravljanja koeficijent k_i je konstantan i određen maksimalnom strujom, dok u drugoj zoni raste sve do dostizanja granične brzine. Iz (24) može se odrediti da je granična brzina u konkretnom primjeru za faktor preopterećenja $v_i = 1,5$ jednaka $\omega_{gr} = 1,95$, dok je za faktor $v_i = 2$ ona manja i jednaka $\omega_{gr} = 1,45$. Nakon što se dostigne granična brzina, odnosno struja motora padne ispod dozvoljene, mašina može raditi sa prevalnim klizanjem, odnosno koeficijent k_i se izjednačava sa jedinicom.

$$\omega_{sgr} = \frac{\sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2}}{\sqrt{2} \omega_{k \ln} v_i} \omega_{sn} \quad (24)$$

Prelaskom sinhronne brzine preko granične vrijednosti ω_{sgr} struja opada ispod maksimalne vrijednosti, odnosno mašina može da radi sa prevalnim klizanjem. Za dovoljan strujni kapacitet (15) granična brzina je tačno jednaka sinhronoj brzini, odnosno tada mašina u cijelom opsegu brzina može da radi sa prevalnim klizanjem. Što je strujni kapacitet aktuatora manji, ona je veća i obrnuto, odnosno mašina dublje u slabljenju polja može da radi sa prevalnim klizanjem. Njena teorijski maksimalna vrijednost je jednaka brzini ω_{lmax} (14), i imala bi se kada bi maksimalna struja aktuatora bila jednaka nominalnoj struji. Može se zaključiti da se brzina pri kojoj se dozvoljava rad sa prevalnim klizanjem u slabljenju polja ranije dostiže ako je strujni kapacitet v_i veći. Na osnovu prethodne analize, mogu se definisati granice za koeficijent k_i u prvoj i drugoj zoni upravljanja. U slučaju da je strujni kapacitet aktuatora dovoljan (ispunjen uslov (15)), tada se u obje zone može usvojiti da je $k_i = 1$, odnosno mašina može stalno raditi sa prevalnim klizanjem odnosno momentom. Kada je strujni kapacitet aktuatora nedovoljan, tada se koeficijent k_i bira na osnovu:



Sl.4. Zavisnost koeficijenta strujne preopterećenosti od strujnog kapaciteta

U slučaju da je aktuator dovoljnog kapaciteta (odnosno ponaša se kao idealni naponski izvor), mašina može raditi sa prevalnim klizanjem u cijelom opsegu brzina (na Sl. 4. oznaka $I_{\max} = \text{inf}$), odnosno $\omega_{klgr} = \omega_{sn}$.

4.3. Ograničenje maksimalnog momenta

Ako je klizanje motora jednako:

$$\omega_{klMAX} = k_i \omega_{klpr} = k_i \frac{1}{\sigma T_r}, \quad (25)$$

tada mašina na svom vratilu razvija maksimalno mogući moment definisan strujnim kapacitetom v_i (16) i taj moment je u opštem slučaju manji od prevalnog. On se može izraziti u odnosu na prevalni moment (bez strujnog limita) u svakoj radnoj tački. U tom slučaju može se pisati Klossova formula u kojoj će figurisati prevalni moment m_{pr} koji bi se imao kada ne bi bilo ograničenja struje, i moment m_{ogr} koji je određen učestanošću klizanja ω_{klMAX} (25):

$$\frac{m_{ogr}}{m_{pr}} = \frac{2}{\frac{\omega_{klMAX}}{\omega_{klpr}} + \frac{\omega_{klpr}}{\omega_{klMAX}}}, \quad (26)$$

što uz uvrštavanje koeficijenta strujne preopteretljivosti (25) daje:

$$\frac{m_{ogr}}{m_{pr}} = 2 \frac{k_i}{1 + k_i^2}, \quad (27)$$

odnosno nakon uvrštavanja izraza za strujnu preopteretljivost (25):

$$\frac{m_{ogr}}{m_{pr}} = 2 \frac{v_i \omega_{k \ln} \sqrt{\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 \left[\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 - v_i^2\right]}}{\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 (\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2)} \quad (28)$$

Pošto se prevalni moment m_{pr} razlikuje u prvoj i drugoj zoni upravljanja, potrebno je u (28) uvrštavati m_{pr} sa tranzijentne karakteristike sa Sl. 1:

$$m_{pr} = \begin{cases} m_{prn}, & \omega_s \leq \omega_{sn} \\ m_{prn} \left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s}\right)^2, & \omega_s > \omega_{sn} \end{cases} \quad (29)$$

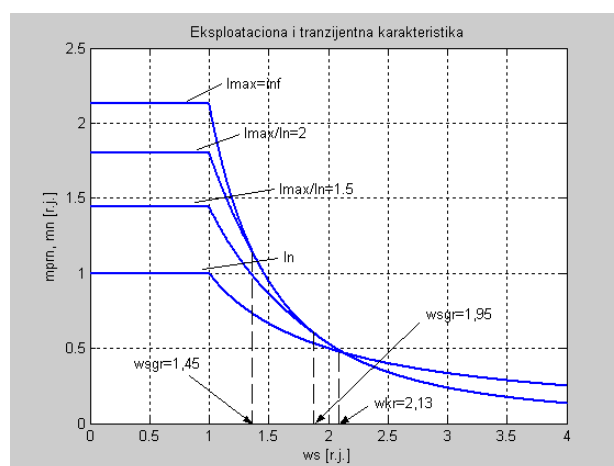
$$m_{ogr} = \pm \frac{3}{2} P \frac{1}{L_{js} + L_{jr}} \left(\frac{u_{sn}}{\omega_{sn}}\right)^2 \frac{v_i \omega_{k \ln} \sqrt{\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2 \left[\left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right)^2 - v_i^2\right]}}{(\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2)}. \quad (30)$$

Traženjem maksimuma (30) po strujnom kapacitetu, dobija se izraz:

$$v_i = \left(\frac{u_s \omega_{sn}}{u_{sn} \omega_s}\right) \frac{\sqrt{\omega_{k \ln}^2 + \omega_{klpr}^2}}{\sqrt{2} \omega_{k \ln}}, \quad (31)$$

iz koga se može odrediti potreban strujni kapacitet, pisanjem (31) u prvoj zoni, te se dobija izraz (15). Uvrštavanjem (31) u (30) dobija se poznati izraz za

Na osnovu (28) i (29) može se odrediti koliko će maksimalno mogući moment (u slučaju strujnog limita) biti manji u odnosu na prevalni moment (bez strujnog limita). Grafik funkcije (28) uz (29) za različite vrijednosti strujnog kapaciteta aktuatora v_i prikazan je na Sl. 5. Na Sl. 5. prikazana je tranzijentna karakteristika asinhronog motora za slučaj da ne postoji strujni limit ($I_{\max} = \text{inf}$), eksploataciona karakteristika, koja je određena nominalnom strujom I_n , te tranzijentne momentne karakteristike za strujne limite $v_i = 1,5$ i $v_i = 2$. Kao što se vidi sa Sl. 5, što je dozvoljena struja veća, moment koji motor može razviti u prelaznim režimima u prvoj zoni je veći. U oblasti slabljenja polja, kada struja pri prevalnom momentu opadne ispod limita (pri graničnoj brzini ω_{sgr}), karakteristike ograničenog i prevalnog momenta se poklapaju. Prelaskom preko kritične brzine $\omega_{kr} = 2,13r.j.$, moment počinje da opada obrnuto proporcionalno kvadratu brzine, te tranzijentna karakteristika postaje istovremeno i eksploataciona.



Sl. 3.6. Eksploataciona i tranzijentna karakteristika u slučaju istovremenog ograničenja struje i napona

Uvrštavanjem izraza za prevalni moment (29) u (28), može se odrediti maksimalni moment u slučaju zanemarene induktivnosti magnećenja:

prevalni moment, odnosno u slučaju dovoljnog kapaciteta aktuatora mašina može u svim režimima da radi sa prevalnim momentom.

Za sinhronu brzinu veće od granične

$$\omega_{sgr} > \frac{\sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{k \ln}^2}}{\sqrt{2} \omega_{k \ln} v_i} \omega_{sn}, \quad (32)$$

mašina može razvijati prevalni moment bez strujnog limita, jer je tada struja pri prevalnom momentu manja od maksimalno dozvoljene.

Na osnovu sprovedene analize, iz izraza (30) može se odrediti koliki maksimalni moment mašina može razviti u prvoj i drugoj zoni u slučaju istovremenog strujnog i naponskog limita:

$$m_{ogr} = \begin{cases} \pm \frac{3}{2} P \frac{1}{L_{\gamma s} + L_{\gamma r}} \left(\frac{u_{sn}}{\omega_{sn}} \right)^2 \frac{v_i \omega_{kln} \sqrt{\omega_{klpr}^2 + \omega_{kln}^2 [1 - v_i^2]}}{(\omega_{klpr}^2 + \omega_{kln}^2)} = const, & \omega_s \leq \omega_{sn} \\ \pm \frac{3}{2} P \frac{1}{L_{\gamma s} + L_{\gamma r}} \left(\frac{u_{sn}}{\omega_{sn}} \right)^2 \frac{v_i \omega_{kln} \sqrt{\left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s} \right)^2 \omega_{klpr}^2 + \omega_{kln}^2 \left[\left(\frac{\omega_{sn}}{\omega_s} \right)^2 - v_i^2 \right]}}{(\omega_{klpr}^2 + \omega_{kln}^2)}, & \omega_{sn} < \omega_{sgr} \\ \pm \frac{3}{2} P \frac{1}{L_{\gamma s} + L_{\gamma r}} \left(\frac{u_{sn}}{\omega_s} \right)^2, & \omega_{sgr} \leq \omega_s \end{cases} \quad (33)$$

Dobijeni izraz (33) može se iskoristiti kao ograničenje referentne vrijednosti momenta u obje zone upravljanja s obzirom na naponski i strujni limit. Ograničenjem referentne vrijednosti momenta na (33) struja i napon motora nikada neće preći maksimalnu vrijednost određenu naponskim i strujnim kapacitetom aktuatora (1) i (2).

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize sprovedene u radu, mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Moment koji mašina može razviti u trajnom radu određen je nivoom indukcije i trajnom strujom aktuatora. U slučaju da se indukcija održava na nominalnoj vrijednosti, i da je trajna struja aktuatora jednaka nominalnoj struji motora, ovaj moment je u prvoj zoni jednak nominalnom momentu. U drugoj zoni ovaj moment opada obrnuto proporcionalno brzini obrtnja (4) sve do kritične sinhronne brzine (6). Nakon kritične sinhronne brzine moment u trajnom radu opada obrnuto proporcionalno kvadratu brzine. Oblast koja je određena ovim momentom je eksploataciona karakteristika.

2. Maksimalni moment koji mašina može razviti u prelaznim režimima je u slučaju dovoljnog strujnog kapaciteta aktuatora (15) jednak prevalnom momentu u prvoj zoni upravljanja, a u drugoj zoni upravljanja opada obrnuto proporcionalno kvadratu brzine (4). U slučaju ograničenog strujnog kapaciteta (16), ovaj moment je konstantan u prvoj zoni i njegova vrijednost je određena strujnim kapacitetom aktuatora. U drugoj zoni upravljanja maksimalni moment opada sve do trenutka dok struja pri prevalnom klizanju (12) ne padne ispod maksimalne dozvoljene struje aktuatora, odnosno brzina ne dostigne graničnu vrijednost (32). Nakon toga, moment opada obrnuto proporcionalno kvadratu brzine kao i u slučaju dovoljnog kapaciteta aktuatora.

3. Učestanost klizanja pri maksimalnom momentu u prvoj zoni upravljanja je konstantna. Ako je strujni kapacitet dovoljan, tada je njena maksimalna vrijednost jednaka prevalnom klizanju, dok je u slučaju da je strujni kapacitet ograničen, maksimalna vrijednost je određena maksimalnom strujom. U drugoj zoni upravljanja maksimalna dozvoljena učestanost klizanja raste dok ne dostigne prevalno klizanje. Rad sa prevalnim klizanjem se dozvoljava kada struja motora padne ispod dozvoljene

vrijednosti, pri graničnoj brzini (32). Ukoliko ne postoji strujni limit, maksimalna učestanost klizanja pri maksimalnom momentu je konstantna za cijeli opseg brzina i jednaka prevalnom klizanju.

6. LITERATURA

1. Sang-Hoon Kim, Seung-Ki Sul: "Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No.4, July/August 1995.
2. Fernando Briz, Alberto Diez, Micahel W. Degner, Robert D. Lorenz: "Current and Flux Regulation in Field –Weakening Operation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No.1, January/February 2001.
3. Lennart Harnefors, Kai Pietilainen, Lars Gertmar: "Torque – Maximizing Field-Weakening Control: Design, Analysis, and Parameter Selection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No.1, February 2001.
4. Horst Grotstollen, Josef Wiesing: "Torque Capability and Control of a Saturated Induction Motor Over a Wide Range of Flux Weakening", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, No.4, August 1995.
5. Myoung – Ho Shin, Dong – Seok Hyun: "Speed Sensorless Stator Flux – Oriented Control of Induction Machine in the Field Weakening Region", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, No.2, March 2003.

MAXIMUM TORQUE PERFORMANCES OF INDUCTION MACHINE IN THE CURRENT AND VOLTAGE LIMIT

Abstract: Maximum torque performances in the simultaneous voltage and current limit are defined. Inverter capacity for the maximum performances will be calculated, and then the performances when this capacity is not large enough. Analysis will be based on basic induction motor equations, so the results will be useful both in scalar, vector and DTC control of induction machine.

Key words: Induction motor, Torque control, Voltage and current limit, Performances