

ROBUSTNI KONTROLER MAKSIMALNE EFIKASNOSTI U POGONU AM ZA ELEKTRIČNA VOZILA

ROBUST EFFICIENCY CONTROLLER IN ELECTRIC VEHICLE DRIVES

Emir Murtezić, Vladimir Popović, Darko Marčetić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu je prikazan sistematičan prilaz analizi performansi kontrolera energetske efikasnosti pogona sa asinhronim motorom u električnim vozilima. Važni aspekti upravljačkog algoritma za maksimizaciju energetske efikasnosti AM kao što su matematički model AM sa gubicima u gvožđu, LMC metode i algoritmi pretraživanja su teorijski analizirani. Izvršena je simulaciona analiza rada predloženog kontrolera na matematičkom modelu pogona AM sa gubicima u gvožđu za sve karakteristične radne režime pogona električnog vozila. Verifikacija rezultata pretraživanja optimalnih trajektorija za unapređenje efikasnosti prikazana je tabelarno i grafički za celokupan opseg brzina i momenata pogona.

Ključne reči: energetska efikasnost, AM, LMC, kontroler pretrage

Abstract – Systematic approach for performance analysis of efficiency controller in induction motor electric vehicle drive is given. Important aspect of this algorithm including IM modelling with incorporated iron losses, loss model controller – LMC and search controller are theoretically analysed. Extensive simulations on IM model including iron losses are performed to demonstrate the effectiveness of the proposed efficiency algorithm. Verification is given through presentation of results which demonstrate the the optimal trajectories over all operating drive range.

Ključne reči: power efficiency, AM, LMC, search controller

1. UVOD

Upotreba vozila na električni pogon postaje sve veći trend u svetu. U najvećem broju tih pogona, dominantu poziciju zauzima trofazna AM naizmenične struje sa kratko spojenim kaveznom rotorom. Moderne tehnologije izrade baterija zasnovane na litijum–jonskim ćelijama, još uvek ne pružaju specifične gustine snaga, dovoljne za potrebe električnog transporta na velikim udaljenostima. S' tim u vezi danas se u svetu posvećuje velika pažnja projektovanju energetske efikasnosti pogona, usled čega se povećava iskorišćenost baterija i sam domet električnog automobila. Opšte je poznato u teoriji električnih pogona, da se odgovarajućim izborom nivoa fluksa u funkciji od momenta opterećenja u AM, može postići maksimalna efikasnost pogona i stoga i optimalna kontrola AM sa stanovišta minimizacije gubitaka pogona.

NAPOMENA:

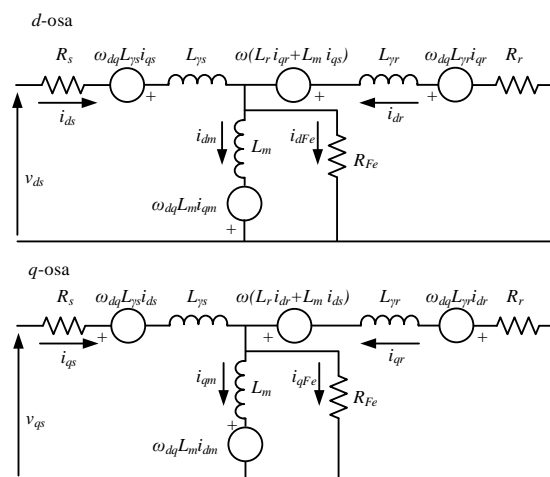
Ovaj rad proistekao je iz master rada, čiji mentor je bio dr Darko Marčetić, red.prof.

U literaturi je predstavljen veliki broj metoda za poboljšanje energetske efikasnosti elektromotornog pogona [1-6]. Metode se mogu klasifikovati u dve osnovne kategorije. Prva kategorija predstavlja LMC kontrolu (eng. Loss Model Controller) [1-4]. Ova metoda bazirana je na matematičkom modelu AM. Optimalni nivo fluksa motora se bira na osnovu izračunavanja minimuma gubitaka motora, predstavljanih putem analitičkih jednačina istog matematičkog modela. Drugu grupu predstavljaju metode, zasnovane na pretraživanju, tzv. SC metode (eng. Search Controller) [5-6]. Ove metode vrše pretragu maksimuma efikasnosti motora, merenjem ulazne snage i promenom reference fluksa u mašini. Utiskivanjem odgovarajućeg vektora napona statora, za konstantnu izlaznu snagu, nastoji se postići minimum ulazne snage, čime se postiže i minimizacija gubitaka tj. maksimizacija efikasnosti u elektromotornom pogonu.

U ovom radu je predložena jednostavna, ali efikasna strategija zasnovana na SC kontroleru, koja objedinjuje dobre performanse oba dijametralno suprotna pristupa. Na osnovu ove strategije, dobija se energetske optimalan pogon u celokupnom režimu rada.

2. MATEMATIČKI MODEL AM SA GUBICIMA U GVOŽĐU

Gubici u gvožđu su gubici u feromagnetnom jezgru mašine, koji se sastoje od gubitaka izazvanih vrtložnim strujama i gubitaka usled histerezisa. Čest prilaz modelovanju efekta gubitaka u gvožđu, jeste dodavanje otpora, paralelnog sa granom magnećenja, R_{Fe} , u dinamičku ekvivalentnu šemu, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Dinamička ekvivalentna šema AM sa uvažnim gubicima u gvožđu

Jednačine koje opisuju ovaj model su date u nastavku, gde su sve veličine i parametri koji figurišu u njima opisani u [1]:

- Jednačina naponske ravnoteže statora:

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + L_{\gamma s} \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dm}}{dt} - \omega_{dq} (L_{\gamma s} i_{qs} + L_m i_{qm}) \quad (1)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + L_{\gamma s} \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qm}}{dt} + \omega_{dq} (L_{\gamma s} i_{ds} + L_m i_{dm}) \quad (2)$$

- Jednačina naponske ravnoteže rotora:

$$0 = R_r i_{dr} + L_{\gamma r} \frac{di_{dr}}{dt} + L_m \frac{di_{dm}}{dt} - (\omega_{dq} - \omega) (L_{\gamma r} i_{qr} + L_m i_{qm}) \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + L_{\gamma r} \frac{di_{qr}}{dt} + L_m \frac{di_{qm}}{dt} + (\omega_{dq} - \omega) (L_{\gamma r} i_{dr} + L_m i_{dm}) \quad (4)$$

- Dinamička jednačina grane magnetećenja

$$i_{ds} + i_{dr} = \frac{1}{R_{Fe}} \left(L_m \frac{di_{dm}}{dt} - \omega_{dq} L_m i_{qm} \right) + i_{dm} \quad (5)$$

$$i_{qs} + i_{qr} = \frac{1}{R_{Fe}} \left(L_m \frac{di_{qm}}{dt} + \omega_{dq} L_m i_{dm} \right) + i_{qm} \quad (6)$$

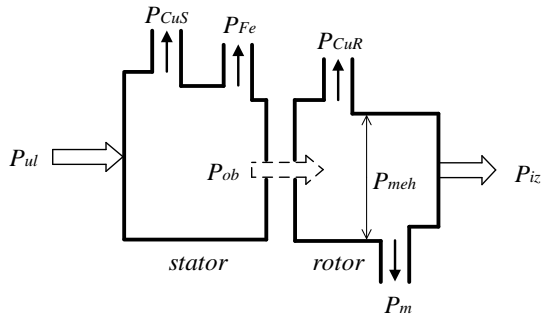
Ove jednačine će biti iskorišćene u okviru simulacionih analiza za verifikaciju algoritma pretrage optimalnih gubitaka pogona AM.

2.1. Energetski bilans AM

Ukupni gubici u AM, P_{gub} , se sastoje od gubitaka u bakru statora i rotora P_{cu} , gubitaka u gvožđu P_{Fe} i mehaničkih gubitaka P_m .

$$P_{gub} = P_{cu} + P_{Fe} + P_m \quad (7)$$

Tok energije kroz mašinu je prikazan na Slici 2:



Slika 2. Energetski bilans asinhronog motora

- Gubici u bakru mašine se dele na gubitke u statorskom P_{cus} i gubitke u rotorskom namotaju P_{cur} i dati su kao:

$$P_{cu} = P_{cus} + P_{cur} = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2) \quad (8)$$

- Gubici u gvožđu se sastoje od gubitaka usled histereza i vrtložnih struja:

$$P_{Fe} = k_h \omega \psi_m^2 + k_v \omega^2 \psi_m^2 = (\omega \psi_m)^2 / \left(1 / \left(\frac{k_h}{\omega} + k_v \right) \right) = E^2 / R_{Fe}(\omega) \quad (9)$$

- Mehanički gubici usled trenja i ventilacije:

$$P_m = k_m \omega_r \quad (10)$$

Prve dve komponente gubitaka, zavise od električnih veličina AM, te se mogu kontrolisati putem promene vrednosti tih veličina.

Sa druge strane, mehanički gubici zavise od brzine, koja je referenca u sistemu regulisanim po brzini i momentu, te se na njih ne može uticati.

Osnovni cilj upravljačkog optimalnog algoritma je da minimizuje ove gubitke u cilju poboljšanja stepena iskorišćenja pogona pri svim režimima rada.

2.2. Optimalni zakoni kontrole bazirani na LMC pristupu

Optimalna kontrola zasnovana na LMC pristupu, koristi aproksimativni matematički model pogona i gubitaka u cilju izvođenja zakona optimalnog upravljanja. Na osnovu prethodno navedenog energetskog bilansa AM i aproksimacija modela AM iz [2-4], izvedeni su optimalni zakoni:

- Uprošćeni model AM sa zanemarenim gubicima u gvožđu [2]:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r}{R_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2} \quad (11)$$

- Uprošćeni model AM sa uvažanim i raspregnutim gubicima u gvožđu [3]:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r}{R_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\omega^2 L_m^2}{R_s R_{Fe}}}} \quad (12)$$

- Uprošćeni model AM sa zanemarenim rasipanjem [4]:

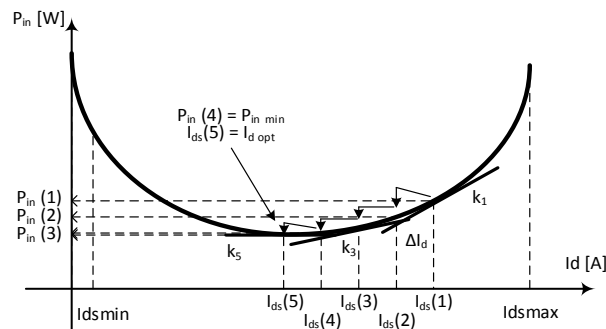
$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r}{R_s} \left(\frac{R_{Fe}}{R_{Fe} + R_r} \right)} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\omega^2 L_m^2}{R_s (R_{Fe} + R_r)}}} \quad (13)$$

Ove relacije će biti upoređene sa optimalnim trajektorijama pogona dobijenim na osnovu nadograđenog algoritma pretrage minimalnih gubitaka i biće komentarisani rasponi greške koja se time postiže.

3. KONTROLER PRETRAGE MINIMALNIH GUBITAKA AM

Standardni pristupi zasnovani na LMC algoritmima zavise od parametara i/ili zahtevaju ispravnu orijentaciju polja, kako bi se osigurala optimalna efikasnost. Ove nesigurnosti su glavni razlog zašto su potrebne dodatne metodologije na bazi pretraživanja, kako bi se osigurala robustnost procesa efikasnosti. Razmatranja u prethodnim paragrafima, apostrofiraju neophodnost nadograđnje LMC pristupa sa dodatnim mehanizmom pretraživanja, kako bi se suzbili nedostaci LMC-a. Kombinovanjem LMC-a sa dodatnim algoritmom pretraživanja, može se dobiti brza, precizna i robustna identifikacija karakteristike optimalne efikasnosti u odnosu na radne uslove u pogonu.

Predloženi algoritam pretraživanja je vrsta gradijentnog optimizatora i prikazan je na Slici 3.



Slika 3. Algoritam za pretraživanje minimalne ulazne snage u odnosu na referencu fluksa

Smer promene fluksa određuje se prema znaku nagiba funkcije $P_{in} = f(I_{ds})$.

Nagib funkcije se računa kao:

$$k(nT) = (P_{in}(nT) - P_{in}(nT - T)) / \Delta I_d \quad (14)$$

Ako je nagib (14) negativan, referenca fluksa se povećava i obrnuto. Strategija promene fluksa se analitički predstavlja kao:

$$k(nT) <> 0 \rightarrow I_{ds}(nT + T) = I_{ds}(nT) \pm \Delta I_d \quad (15)$$

gde za znak < odgovara povećanje reference za korak ΔI_d ; + predznak, i obrnuto.

Strategija opisana u (14) se zasniva na metodi opadanja gradijenta i osigurava da apsolutna vrednost nagiba k konvergira ka nuli u vremenu. Optimalna tačka je osigurana u pogonu kada nagib dostigne nultu vrednost. Gore predstavljena metoda je jednostavna metoda za dobijanje optimalnih uslova vožnje. Međutim, ova metoda ima neke praktične nedostatke, koji se moraju preduprediti na odgovarajući način, kako bi se osigurala efikasna i robustna optimizacija.

3.1. Kontroler pretrage – praktični aspekti

Metoda prikazana u prethodnom poglavlju ima određene nedostatke, koji mogu ograničiti opseg njene primene. Samo sa istovremenim ispunjavanjem ovih uslova, može se održati efikasna i efektivna optimizacija unutar pogona. Ovi nedostaci se mogu klasifikovati kao:

- Greška u proceni snage, ukoliko merenje iste nije dostupno unutar pogona
- Nagle promene uslova vožnje (momentat/brzina) u vezi sa procesom pretraživanja
- Problemi sa logikom detekcije stacionarnog stanja i svojstvima konvergencije algoritma

Merenje aktivne snage motora je u većini slučajeva izostavljeno, kako bi se smanjila ukupna cena pogona. Međutim, kada se koriste algoritmi za pretraživanje zasnovani na snazi, za praćenje optimalnih uslova, potrebno je imati informaciju o ulaznoj snazi. U tim slučajevima, procena ulazne snage je osnovni preduslov.

$$P_{el} = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) \quad (16)$$

Referenca [5] diskutuje problem procesuiranja napona i struja statora za procenu snage. Ovi problemi su uglavnom vezani za procesuiranje signala napona, kada se propuštaju kroz filtarske blokove za potiskivanje viših PWM indukovanih harmonika. Demonstrirano je da je, naročito u slučajevima malih opterećenja, neophodno kompenzovati faznu grešku prvog harmonika napona u cilju precizne estimacije snage [6]. Procesuiranje struje se obično vrši putem kvalitetnih senzora visokopropusnog opsega, dok se mikroprocesorskim odabiranjem na polovini PWM ciklusa može otkloniti sistemski PWM šum.

Drugi problem se rešava umetanjem blokova za promenu reference fluksa, putem rampa funkcija (17) i usrednjavanjem ulazne snage (18). Zbirno gledano, smanjuju se oscilacije momenta i brzine u pogonu i smanjuje mogućnost neželjenih promena fluksa u slučaju oscilovanja trenutne vrednosti snage.

$$i_{ds}(t) = I_{ds}(nT) + k_{ramp} t \rightarrow k_{ramp} = \frac{\Delta I_d}{T} \quad (17)$$

$$P_{in_avg}(nT) = \sum_{j=1}^m P_{in}(jT_{PWM}) / T \quad (18)$$

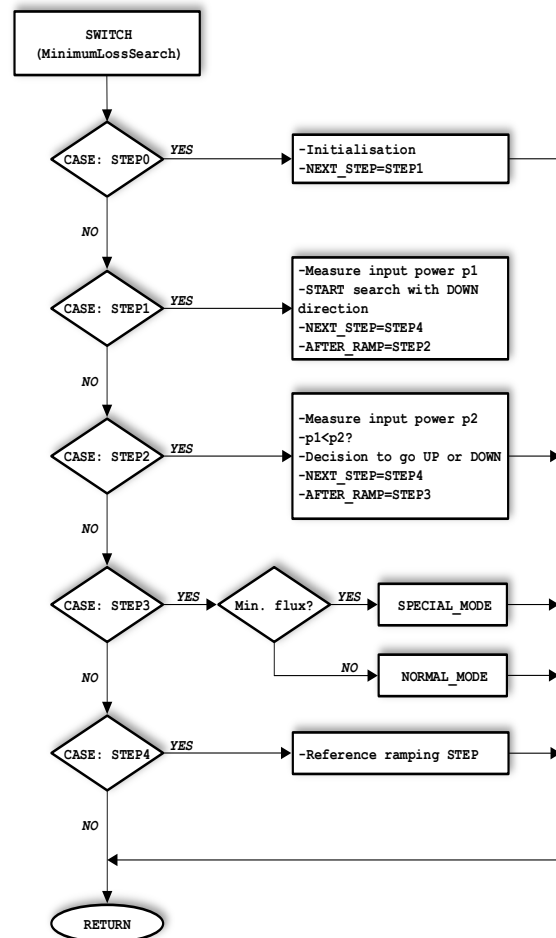
gde su:

- k_{ramp} označen parametar brzine promene fluksa uz već definisan period trajanja rampe fluksa.
- T sastoji od m uzastopnih PWM odabiraka $T = mT_{PWM}$.

Poslednji problem je inherentan kontrolerima pretrage i rešava se postepenim smanjivanjem promene fluksa, kao i efikasnom detekcijom stacionarnog stanja, koja uvažava male promene u varijablama stanja sistema [5].

3.2. Kontroler pretrage – realizacija algoritma

Algoritam mašine stanja kontrolera traženja minimalne snage je prikazan na Slici 4 i sastoji se od pet koraka. Prvi korak – STEP0 služi za inicijalizaciju algoritma pretrage, nakon čega se prelazi na drugi korak. U drugom koraku – STEP1 vrši se merenje prvog odbirka ulazne snage i početak traženja sa smerom prema dole, nakon čega se prelazi u peti korak – STEP4 gde se promena reference fluksa vrši po linearnoj rampa funkciji. Nakon obavljene rampe sledi treći korak – STEP2 gde se vrši merenje odbirka ulazne snage sa smanjenom vrednošću reference fluksa i donosi odluka o daljem smeru traženja i zadavanje nove reference fluksa. Zadana referenca se ponovo menja po linearnoj rampa funkciji u koraku STEP4, nakon čega se prelazi u četvrti korak – STEP3 koji je podeljen na dva radna režima pogona: normalni režim rada (sa referencom fluksa u radnom opsegu) i specijalni režim rada (sa minimalnom referencom fluksa).



Slika 4. Blok dijagram algoritma mašine stanja kontrolera minimalne snage

4. PARAMETRI POGONA ELEKTRIČNOG VOZILA ZASNOVANOG NA AM

U cilju validacije optimalnih algoritama zasnovanih na minimizaciji gubitaka pogona, (LMC i SC metode) opisanih u prethodna dva poglavlja, neophodno je upoznati se sa karakteristikama samog pogona korišćenog za potrebe električne vuče.

Električni i mehanički podaci sa natpisne pločice mašine kao i termičke osobine izolacije su prikazane:

$$U_{sn} = 48 \text{ V}, I_{sn} = 80 \text{ A}, f_n = 170 \text{ Hz}, P_n = 5 \text{ kW}$$

$$n_n = 5000 \text{ o/min}, S2 - 60 \text{ min}$$

Parametri 5kW pogona AM YDQ 6730 su dobijeni putem implementacije metoda za samopodešavanje pogona AM. Kao ulazni parametri u algoritam su korišćeni podaci sa natpisne pločice i dobijeni su sledeći parametri:

$$\text{Otpornosti namotaja: } R_{sn} = 4.5 \text{ m}\Omega, R_{rn} = 5 \text{ m}\Omega$$

$$\text{Induktivnosti rasipanja namotaja: } L_{ys} = L_{yr} = 28 \mu\text{H}$$

$$\text{Nazivna induktivnost magnećenja: } L_{mn} = 0.94 \text{ mH}$$

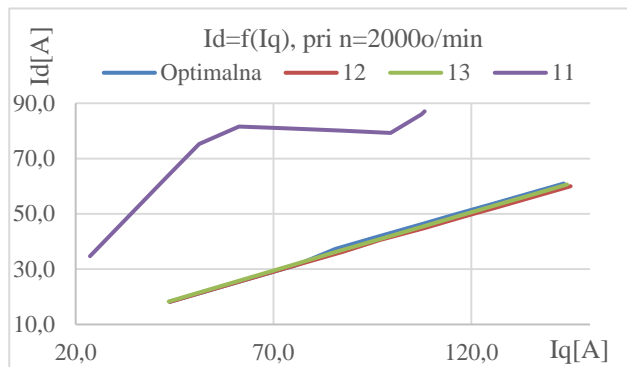
$$\text{Nazivna vremenska konstanta rotora: } T_{rn} = 255 \text{ ms}$$

$$\text{Otpornosti gubitaka u gvožđu: } R_{Fe} = 3.2 \Omega$$

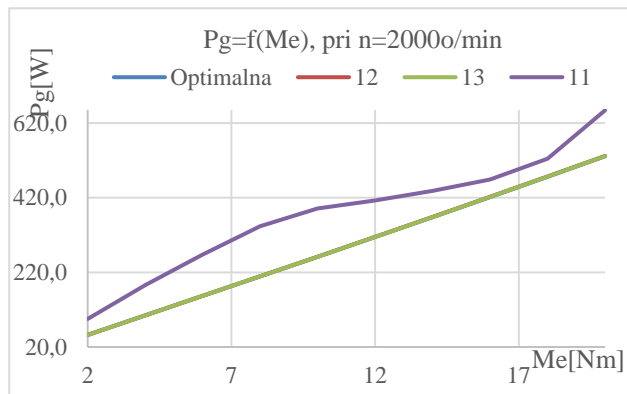
Parametar otpornosti koja modeluje gubitke u gvožđu R_{Fe} ima veliku parametarsku nesigurnost, ako se ne procesuiru putem preciznog merenja snage. Ako se doda i njegova promenljivost sa frekvencijom napajanja (9), nije moguće očekivati njegovu preciznu estimaciju.

5. SIMULACIONA ANALIZA OPTIMALNOG KONTROLERA NA MODELU AM

Simulacije rada LMC metoda zasnovanih na optimalnim relacijama (11), (12) i (13) vršene su u Matlab Simulink modelu. Rezultati simulacije dati su u nastavku.



Slika 5. Funkcija zavisnosti $I_d = f(I_q)$ za optimalne relacije (11), (12) i (13)



Slika 6. Funkcija zavisnosti $P_g = f(M_e)$ za optimalne relacije (11), (12) i (13)

Analizom rezultata simulacije, dolazi se do zaključka da se korišćenjem optimalnih relacija (12) i (13) pravi greška manja od 0.2% u odnosu na stvarnu optimalnu relaciju, dobijenu nadogradnjom LMC relacije (12) mehanizmom pretrage. Sa druge strane, korišćenjem optimalne relacije (11) može se praviti greška i do 60%. Dakle, ukoliko se dobro poznaju parametri pogona, moguće je koristiti LMC metode, zasnovane na relacijama (12) i (13), čineći beznačajnu grešku. Međutim, u prethodnom poglavlju je već bilo reči o parametarskoj nesigurnosti LMC metoda, te je, usled nepoznavanja parametra R_{Fe} , neophodna nadogradnja LMC metoda mehanizmom pretraživanja, kako bi se dobile prave optimalne trajektorije, i samim tim postigla maksimalna efikasnost električnog pogona.

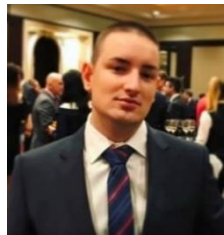
6. ZAKLJUČAK

LMC metode zbog parametarske osetljivosti, pokazuju dobre performanse pri malim brzinama i opterećenjima gde uticaj nepoznavanja stvarnih vrednosti parametara pogona nije u velikoj meri izražen. Sa druge strane, SC metode u slučaju malih opterećenja (mali faktori snage), značajno povećavaju osetljivost procene snage, te se dobre performanse postižu tek na većim brzinama i momentima, kada je faktor snage značajniji.

7. LITERATURA

- [1] Levi E., "Impact of Iron Loss on Behavior of Vector Controlled Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 6, pp. 1287 – 1296, 1995.
- [2] Kioskeridis I., Margaris N., "Loss Minimization in Induction Motor Adjustable – Speed Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, no. 1, pp. 226 – 231, 1996.
- [3] Lim S., Nam K., "Loss-minimising control scheme for induction motors", IEEE Proc. Electr. Power Appl. vol. 151, no 4, pp. 385–397, 2004.
- [4] Garcia O. G., Mendes Luis C. J., Stephan M. R., Watanabe H. E., "An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 5, pp. 533 – 539, 1994.
- [5] Kirschen S. D., Novotny W. D., Lipo A. T., "Optimal Efficiency Control of an Induction Motor Drive", IEEE Power Engineering Review, pp. 70 – 76, 1987.
- [6] Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P., "Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor – A Review", International Journal of Computer and Electrical Engineering vol. 1, no. 1, pp. 1793-1800, 2009.

Kratka biografija:



Emir Murtezić rođen je u Novom Pazaru 1994. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva - Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2019.god.