

ROBUSTNI KONTROLER MAKSIMALNE EFIKASNOSTI U POGONU SINHRONE MAŠINE ZA ELEKTRIČNA VOZILA
ROBUST EFFICIENCY CONTROLLER IN SYNCHRONOUS MACHINE ELECTRIC VEHICLE DRIVES

 Stefan Simić, Darko Marčetić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu teorijski je izvršena analiza za modela niskonaponske sinhronne mašine sa permanentnim magnetima na rotoru kao i analiza gubitaka odgovarajućeg motora. Prikazane su dve klase naprednih upravljačkih algoritama: prva za minimizaciju gubitaka LMC, i druga, strategija za uvećanje momentnog kapaciteta sinhronne mašine. Diskutovane su pojedinačno osnovne osobine analiziranih pristupa. Verifikacija teorijskih razmatranja je izvršena putem simulacija. Na osnovu prikazanih rezultata izvedeni su relevantni zaključci o performansama energetske efikasnosti pogona.

Ključne reči: MTPA, sinhrona mašina, LMC

Abstract – Theoretical analysis of low voltage permanent magnet synchronous motor model as well as its energy analysis was presented. Two advanced control approaches were discussed: efficiency maximization by LMC, and maximum torque per ampere strategy. The advantages of the presented algorithms were thoroughly discussed. Verification of the theoretical considerations were given through the simulations. Performance evaluation of the energy optimized traction drive was given and corresponding conclusions were derived.

Keywords: MTPA, synchronous motor, LMC

1. UVOD

Upotreba vozila na električni pogon postaje sve veći trend u svetu. Sve veću primenu u tim pogonima beleži trofazna sinhrona mašina sa permanentnim magnetima (*eng. Permanent Magnet Synchronous Machine – PMSM*). 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 vektora struje PMSM, može postići maksimalna efikasnost pogona i stoga i optimalna kontrola PMSM sa stanovišta minimizacije gubitaka pogona [1].

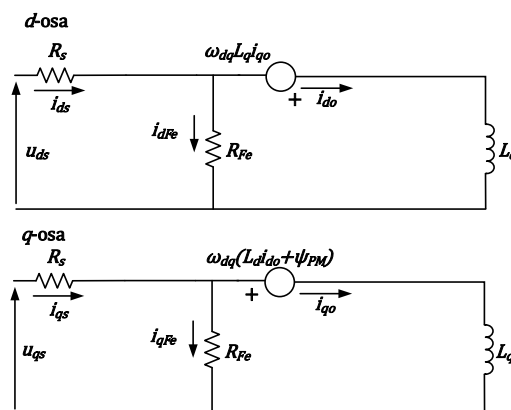
NAPOMENA:

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]. Ovde su predstavljene dve metode koje poboljšanje energetske efikasnosti postižu na različite načine. Prva metoda obezbeđuje optimalnu kontrolu u ustaljenom stanju, LMC kontrolu (*eng. Loss Model Controller*) [1-3]. Ova metoda bazirana je na matematičkom modelu PMSM. Optimalni vektor struje statora motora se bira na osnovu izračunavanja minimuma gubitaka motora, predstavljenih putem analitičkih jednačina istog matematičkog modela. Druga metoda za poboljšanje energetske efikasnosti i u prelaznim režimima obezbeđuje potpuno iskorišćenje momenta uzimajući u obzir strujne i naponske kapacitete pogona (*eng. Maximum Torque per Ampere/Minimum Ampere per Torque – MTPA/MAPT*) [4-6]. Ove metode obezbeđuju veću efikasnost motora, minimizovanjem statorske struje potrebne da se obezbedi željeni momenat. Utiskivanjem odgovarajućeg vektora struje statora, nastoji se postići minimum gubitaka u bakru, čime se postiže i smanjenje gubitaka tj. povećanje efikasnosti u pogonu.

2. MATEMATIČKI MODEL PMSM SA GUBICIMA U GVOŽĐU

Ovde će biti predstavljen matematički model sinhronne mašine sa stalnim magnetima utisnutim u rotor (*eng. Interior Permanent Magnet Synchronous Machine – IPMSM*). 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 ekvivalentnu šemu, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Ekvivalentna šema IPMSM sa uvažanim gubicima u gvožđu – vektorski model

Vektorski model se dobija kada se rotirajući dq sistem poravnava sa fluksom permanentnog magneta:

$$\theta_{dq} = \theta_{PM}. \quad (1)$$

U skladu sa kolom prikazanim na slici 1 model vektorskog upravljanja u ustaljenom stanju biće zapisan u odgovarajućem obliku, gde su sve veličine i parametri koji figurišu u njemu opisani u [1]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} &= R_s \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_s}{R_{Fe}}\right) \begin{bmatrix} u_{do} \\ u_{qo} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_{do} \\ u_{qo} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{dq} L_q \\ \omega_{dq} L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{dq} \psi_{PM} \end{bmatrix} \\ i_{do} &= i_{ds} - i_{dFe}, i_{qo} = i_{qs} - i_{qFe} \\ i_{dFe} &= -\frac{\omega_{dq} L_q i_{qo}}{R_{Fe}}, i_{qFe} = \frac{\omega_{dq} (\psi_{PM} + L_d i_{do})}{R_{Fe}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$m_{el} = K(\psi_{PM} i_{qo} + (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}) \rightarrow K = \frac{3}{2} P$$

Ove jednačine će biti iskorišćene u okviru simulacionih analiza za verifikaciju strategija optimalnog upravljanja pogona IPMSM.

2.1. Energetski bilans IPMSM

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

$$P_{gub} = P_{cu} + P_{Fe} + P_m \quad (3)$$

- Gubici u bakru mašine predstavljaju gubitke u statorskom namotaju i dati su kao:

$$P_{cu} = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \quad (4)$$

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

$$P_{Fe} = R_{Fe} (i_{dFe}^2 + i_{qFe}^2) \quad (5)$$

- Mehanički gubici usled trenja i ventilacije:

$$P_m = k_m \omega \quad (6)$$

Prve dve komponente gubitaka, zavise od električnih veličina IPMSM, 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 zakona je da minimizuje ove gubitke u cilju poboljšanja stepena iskorišćenja pogona u svim pogonskim režimima.

3. NAPREDNA KONTROLA – UOPŠTENI MODEL

U slučaju IPMSM, može se izvući opšta optimalna relacija koja obezbeđuje poboljšanje performansi unutar pogona. Opšta optimalna relacija podrazumeva orijentaciju vektora struje statora spram pozicije fluksa rotora usled permanentnih magneta na način da se ukupni kontrolabilni gubici (4)–(5) minimizuju. Uvažanjem celokupnog bilansa posmatra se LMC strategija dok, ukoliko se zanemari komponenta gubitaka u gvožđu (5), tada se podrazumeva MTPA strategija.

Da bi se dobila opšta optimalna relacija za SM pogone, treba poći od skupa jednačina koje opisuju IPMSM vektorski upravljane pogone u ustaljenom stanju sa uključenim gubicima u gvožđu i energetskim bilansom.

Optimizacija karakteristike IPMSM u radnim režimima kada se pogon ne nalazi u sistemskom limitu (strujni, naponski...) se postiže odgovarajućom raspodelom vektora struje statora za ostvarenje zahteva sa mehaničke strane: brzine obrtanja i momenta opterećenja na vratilu. U osnovi, utiskivanjem vektora struje statora se utiče na vrednost statorskog fluksnog obuhvata koji se prilagođava na način da se ostvare pomenuti restrikcioni zahtevi u radnoj tački gde kriterijumska funkcija za optimizaciju ima svoj ekstrem. Formulisanjem optimizacionog kriterijuma u funkciji komponenti vektora struje statora i nalaženjem ekstremnih tačaka mogu se postići optimalne performanse kontrole IPMSM.

Kriterijumska funkcija za optimizaciju predstavlja ukupne kontrolabilne gubitke P_{gub} (4)–(5) izražene u funkciji struje vazdušnog zazora i_{do} i reference momenta m_{el} . Optimalni uslov se matematički zapisuje na sledeći način:

$$\frac{\partial P_{gub}}{\partial i_{do}} = 0 \rightarrow GH = m_{el}^2 F \quad (7)$$

gde su novodefinisane veličine G , H i F funkcije ugaone učestanosti ω_{dq} i parametara modela:

- $G = K^2 [R_s R_{Fe}^2 i_{do} + \omega_{dq}^2 L_d (R_s + R_{Fe}) (\psi_{PM} + L_d i_{do})]$
- $H = [\psi_{PM} + (L_d - L_q) i_{do}]^3$
- $F = [R_s R_{Fe}^2 + \omega_{dq}^2 L_q^2 (R_s + R_{Fe})] (L_d - L_q)$

Određivanje optimalne radne tačke pogona u kojoj su ukupni kontrolabilni gubici IPMSM minimalni svodi se na rešavanje polinoma četvrtog reda po vrednosti reference i_{do} :

$$f(i_{do}) = A i_{do}^4 + B i_{do}^3 + C i_{do}^2 + D i_{do} + E = 0 \quad (8)$$

Parametri $A \div E$ definišu koeficijente polinoma (8) i funkcija su parametara ekvivalentne šeme IPMSM, ugaone učestanosti ω_{dq} i ulaznog parametra u optimalni blok, reference elektromagnetnog momenta m_{el} (MAPT) ili amplitude vektora struje statora I_s (MTPA).

Vrednosti koeficijenata polinoma (8), za m_{el} kao ulaz u referentni blok, su prikazani u nastavku:

$$A = (L_d - L_q)^3 \gamma$$

$$B = 3\psi_{PM} (L_d - L_q)^2 \gamma + (L_d - L_q)^3 \delta$$

$$C = 3\psi_{PM}^2 (L_d - L_q) \gamma + 3\psi_{PM} (L_d - L_q)^2 \delta$$

$$D = \psi_{PM}^3 \gamma + 3\psi_{PM}^2 (L_d - L_q) \delta$$

$$E = \psi_{PM}^3 \delta - m_{el}^2 \varepsilon$$

uz definicije dodatnih parametara eksplicitno zavisnih od R_{Fe} i ω_{dq} :

- $\gamma = K^2 [R_s R_{Fe}^2 + \omega_{dq}^2 L_d^2 (R_s + R_{Fe})]$
- $\delta = K^2 \omega_{dq}^2 L_d \psi_{PM} (R_s + R_{Fe})$
- $\varepsilon = R_s R_{Fe}^2 (L_d - L_q) + \omega_{dq}^2 L_q^2 (L_d - L_q) (R_s + R_{Fe})$

Rešavanjem polinoma četvrtog reda (8), može se dobiti optimalna referenca fluksa i_{do} . Na osnovu i_{do} , struja koja stvara momenat i_{qo} može se dobiti iz jednačine momenta.

3.1 LMC strategija za IPMSM

Optimalna kontrola zasnovana na LMC pristupu, koristi aproksimativni matematički model pogona i gubitaka u cilju izvođenje zakona optimalnog upravljanja. *Pristupi rešavanju polinoma četvrtog reda (8)*:

- Analitički metod korišćenjem Ferarijevog postupka proračuna: *analitika za rešavanje polinoma četvrtog reda* [4].
- *Newton – Raphson metod*: Iterativni numerički postupak za rešavanje, u opštem slučaju, nelinearnih jednačina, predložena u ovom radu.

Ferarijeva metoda je čisto analitička i opšta za polinom četvrtog reda ali je računarski zahtevna, pa nije pogodna za implementaciju u realnom vremenu.

U slučaju rešavanja nelinearnih jednačina, pogodnije je koristi iterativne postupke. *Newton – Raphsonov* iterativni pristup je specijalna vrsta iterativnih metoda koja predstavlja dobar kompromis između preciznosti i složenosti računanja. Omogućava da se izračuna optimalno rešenje u nekoliko koraka. Procedura je sledeća:

- Korak 1: Definisane početne pretpostavke i_{d0} , $i = 0$
- Korak 2: Izračunavanje $f(i_{d0+i})$ i prvog izvoda $f'(i_{d0+i})$
- Korak 3: Ponovni proračun ako novo rešenje pogodi $i_{d0+i+1} = i_{d0} - f(i_{d0+i})/f'(i_{d0+i})$, $i = i + 1$
- Korak 4: Provera uslova konvergencije $|f(i_{d0})| < \epsilon_f$,

Na osnovu valjanosti uslova u koraku 4:

- o Da – i_{d0+i+1} je optimalno rešenje, $i_{d0} = i_{d0+i+1}$
- o NE – Povratak na korak 2
- Korak 5: Proračun i_{q0}

$i_{q0} = m_{el}/\{K(\psi_{PM}i_{q0} + (L_d - L_q)i_{d0})\}$ za slučaj koji se razmatra a to je da je izlaz brzinskog regulatora momenat

Intenzivni iterativni proračuni mogu biti izostavljeni ako kontroler ne uzme u obzir efekat isturenosti polova unutar IPMSM. Uzimanjem $L_d = L_q$ dobija se:

$$i_{d0} = -\frac{\omega^2 L_d \psi_{PM} (R_s + R_{Fe})}{R_s R_{Fe}^2 + \omega^2 L_d^2 (R_s + R_{Fe})} \quad (9)$$

Uzimanjem i_{d0} iz prethodne relacije za početno rešenje za Newton – Raphsonov postupak dovodi do bržeg nalaženja optimalnog rešenja.

3.2. MTPA strategija za IPMSM

Zanemarivanjem komponente gubitaka u gvožđu, strategija minimizacije gubitaka u bakru se može koristiti kod IPMSM pogona. Ova metodologija takođe maksimizuje mehanizam za generisanje momenta s obzirom na struju pogona koja je na raspolaganju. Strategije koje se zasnivaju na MTPA/MAPT su manje zavisne od parametara sistema i u nekim slučajevima mogu značajno smanjiti ukupnu računsku složenost. To ih čini glavnim kandidatima za optimalnu kontrolu u baznom opsegu pogona.

Dakle, MAPT strategija je poseban slučaj uopštenog modela (8) kada je $R_{Fe} \rightarrow \infty$ i kad se kao ulazni parametar ima momenat m_{el} .

Kao i u slučaju LMC strategije i ovde je moguće izbeći intenzivne proračune ako se smatra da su L_d i L_q bliskih vrednosti i na osnovu te pretpostavke u nastavku će biti prikazan opšti zakon upravljanja za maksimizaciju momenta. Maksimizacija momenta može se ostvariti pomoću MTPA, MAPT i MPTF strategija. Prve dve su već pomenute dok poslednja predstavlja strategiju maksimalnog momenta po fluksu (*eng. Maximum Torque per Flux - MTPF*) i nalazi primenu u oblasti dubokog slabljenja polja gde se efikasno iskorišćavanje raspoloživog napona može dobiti odgovarajućom adaptacijom fluksa.

Opšti optimalni kontrolni blok može se izvesti iz razloga što se slična struktura nalazi tokom procesa istraživanja. Razlika se uočava u koeficijentima skaliranja a i L , i karakterističnoj vrednosti struje I .

$$x_{opt} = L \frac{\psi_{PM} - \sqrt{\psi_{PM}^2 + 8a(L_d - L_q)^2(I)^2}}{4a(L_q - L_d)} \quad (10)$$

Za MTPA metodu x_{opt} je i_{ds} , a i L su 1, dok je $I = I_s$. Za MAPT metodu x_{opt} je i_{ds} , a i L su 3/2 i 1, redom, dok je $I = T/(\psi_{PM}K)$. Za MPTF metodu x_{opt} je λ_{ds} , a i L su 1 i L_q , redom, dok je $I = V/(\omega L_q)$.

4. PARAMETRI POGONA ELEKTRIČNOG VOZILA ZASNOVANOG NA IPMSM

U cilju validacije optimalnih zakona upravljanja zasnovanih na minimizaciji gubitaka pogona kao i na maksimizaciji momenta (LMC i MAPT 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:

$$U_{sn} = 48 \text{ V}, I_{sn} = 120 \text{ A}, f_n = 60 \text{ Hz}, P_n = 5.4 \text{ kW}$$

$$n_n = 3500 \text{ o/min}, S2 - 60 \text{ min}$$

Parametri 5.4kW pogona IPMSM ACX-3434-12 su dobijeni putem implementacije metoda za samopodešavanje pogona IPMSM. Kao ulazni parametri u algoritam su korišćeni podaci sa natpisne pločice i dobijeni su sledeći parametri:

- Otpor statorskog namotaja: $R_s = 3.78 \text{ m}\Omega$
- Nazivna induktivnost d ose: $L_d = 86.17 \mu\text{H}$
- Nazivna induktivnost q ose: $L_q = 106.80 \mu\text{H}$
- Nazivni fluks magneta: $\psi_{PM} = 18.5 \text{ mWb}$
- Otpornosti gubitaka u gvožđu: $R_{Fe} = 2.35 \Omega$

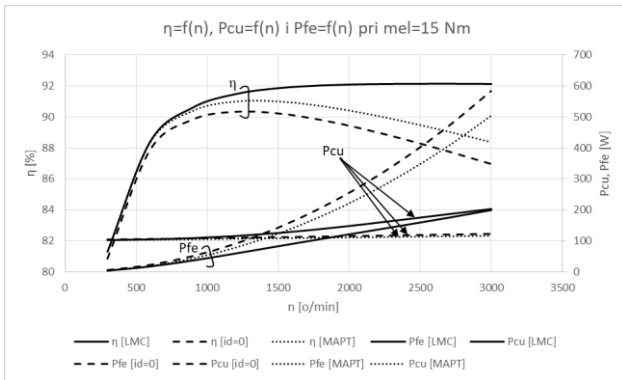
Parametar otpornosti koja modeluje gubitke u gvožđu R_{Fe} ima veliku parametarsku nesigurnost, ako se ne procesuiru putem preciznog merenja snage.

Ako se doda i njegova promenljivost sa frekvencijom napajanja, nije moguće očekivati njegovu preciznu estimaciju. Zbog toga je u simulaciji korišćena konstantna vrednost R_{Fe} .

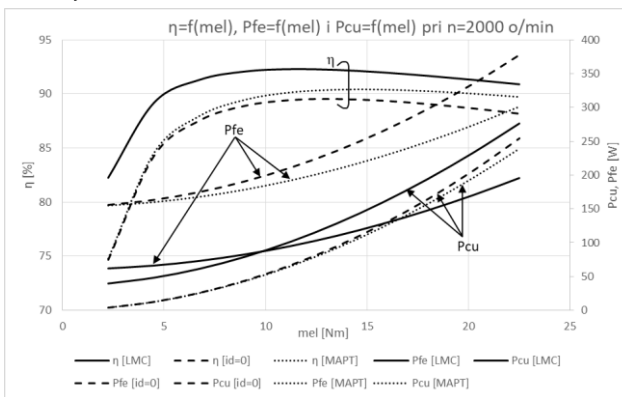
5. SIMULACIONA ANALIZA OPTIMALNOG KONTROLERA NA MODELU IPMSM

Simulacije rada LMC metode zasnovane na uopštenom modelu datom relacijom (8) kao i MAPT strategije (poseban slučaj uopštenog modela (8) kada je $R_{Fe} \rightarrow \infty$)

vršene su u Matlab Simulink modelu. Rezultati simulacije dati su na slici 2 i Slici 3.



Slika 2. Funkcija zavisnosti $\eta = f(n)$, $P_{cu} = f(n)$ i $P_{fe} = f(n)$ pri momentu opterećenja od 15 Nm



Slika 3. Funkcija zavisnosti $\eta = f(m_{el})$, $P_{cu} = f(m_{el})$ i $P_{fe} = f(m_{el})$ pri brzini obrtanja od 2000 0/min

Analizom rezultata simulacije, dolazi se do zaključka da se korišćenjem LMC metode postiže najveća efikasnost u svim radnim tačkama. Od svih prikazanih metoda LMC metoda postiže značajno manju P_{Fe} , a ovaj efekat je najvidljiviji i najznačajniji pri velikim brzinama obrtanja kada, za razliku od ostale dve metode, pada efikasnosti i nema. MAPT metod sa minimalnom strujom obezbeđuje potreban momenat i na taj način generišući minimalnu P_{cu} i pri manjim i srednjim brzinama postiže veliku efikasnost. S porastom momenta opterećenja dolazi i do rasta struje pa se minimizacijom P_{cu} postiže velika efikasnost, uporediva sa onom koju postiže LMC metod, što se i vidi na slici 3. MAPT metoda predstavlja odličan izbor u slučaju nepoznavanja parametra R_{Fe} kao i u slučaju kada se zahteva malo procesorsko opterećenje. I LMC metod i MAPT metod problem procesorskog opterećenja mogu rešiti primenom LUT (eng. *Lookup Table - LUT*), s tim što bi za LMC bila potrebna trodimenzionalna (brzina, momenat i struja) LUT, dok je za MAPT dovoljna dvodimenzionalana (momenat i struja).

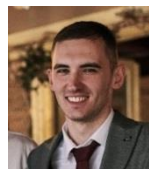
6. ZAKLJUČAK

LMC metod obezbeđuje maskimalnu efikasnost u čitavom radnom opsegu u slučaju poznavanja parametara IPMSM. Problem sa procesorskim opterećenjem može se rešiti primenom LUT. MAPT strategija je manje zavisna od parametara i u nekim slučajevima može značajno smanjiti ukupnu računsku složenost MAPT metod obezbeđuje odličan dinamički odziv i zbog manjeg procesorskog opterećenja može se koristiti i bez primene LUT. Naročito je koristan za veće momente opterećenja gde ima veliku efikasnost i kada je R_{Fe} nepoznat i primena LMC metode onemogućena.

7. LITERATURA

- [1] Morimoto S., Tong Y., Takeda Y., Hirasu T., "Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 5, pp. 511 – 517, 1994.
- [2] Mademlis C., Kioskeridis I., Margaris N., "Optimal Efficiency Control Strategy for Interior Permanent – Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4, pp. 715 – 723, 2004.
- [3] Lee J., Nam K., Choi S., Kwon S., "Loss-Minimizing Control of PMSM With the Use of Polynomial Approximations", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no 4, pp. 1071–1082, 2009.
- [4] Jung S. Y., Hong J., Nam K., "Current Minimizing Torque Control of IPMSM using Ferrari's Method", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5603 – 5617, 2013.
- [5] Pan C. T., Sue S. M., "A Linear Maximum Torque Per Ampere Control for IPMSM Drives Over Full – Speed Range", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 359 – 366, 2005.
- [6] Gallegos – Lopez G., Gunawan F. S., Walters J. E., "Optimum Torque Control of Permanent – Magnet AC Machines in the Field – Weakened Region", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 4, pp. 1020-1028, 2005.

Kratka biografija:



Stefan Simić rođen je u Kruševcu 1994. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2021.god.