

OPTIMALNO UPRAVLJANJE ASINHRONOM MAŠINOM U POGONU ELEKTRIČNIH VOZILA

Vladimir Popović, Miloš Kukić, Đura Oros, Roberto Varga, Darko Marčetić, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*

Sadržaj – U ovom radu je predstavljena optimalna strategija upravljanja asinhronom mašinom, AM, u pogonu električnih vozila u celokupnom opsegu brzina i momenata mašine. Strategija je definisana na osnovu dva kriterijuma – minimizacije gubitaka u pogonu i maksimalnog iskorišćenja strujnih kapaciteta za dobijanje obrtnog momenta mašine. Strategija u potpunosti zadovoljava uslove koje nameće konkretna primena pogona za električna vozila i automobile. Opisana je način za minimizaciju gubitaka AM upotrebom kontrolera zasnovanog na modelu gubitaka AM kao primarnog kriterijuma za optimalnost u stacionarnom stanju pogona. Kao kriterijum optimalnosti pogona u dinamičkim režimima, predstavljen je kriterijum dobijanja maksimalnog momenta mašine za raspoloživi vektor struje statora, koji stavlja u prvi plan dinamičke karakteristike pogona kojim se upravlja.

Ključne reči—asinhrona mašina, MTPA, energetska efikasnost;

1. UVOD

Elektromotorni pogoni predstavljaju najznačajnije potrošače električne energije u svetu. Procenjuje se da oko 60% ukupne energije u svetu zahtevaju sami elektromotorni pogoni. Uvođenjem energetski efikasnijih elektromotornih pogona kao i pažljivom konstrukcijom električnih mašina (odabir materijala i tehnoloških postupaka u fazi proizvodnje), može se smanjiti potrošnja električne energije kako u pogonskim uslovima tako i samoj fazi proizvodnje mašine. Asinhroni motori predstavljaju potrošače 50% ukupne proizvedene električne energije i čak 90% električne energije svih elektromotornih pogona u svetu. Zbog toga je izuzetno važno da se postigne energetski efikasno upravljanje asinhronim motorima, [1].

Asinhroni motori se danas masovno koriste i unutar sopstvenih mreža: u sistemima besprekidnih napajanja, sistemima za transport, plovila, električnih vozila itd. U tim aplikacijama se od AM zahteva brza regulacija momenta, energetska efikasnost itd. AM se u električnim vozilima napajaju iz baterija ograničenog kapaciteta. Stoga, neophodno je primeniti energetski efikasno upravljanje AM, kako bi radni vek baterija bio što duži. Sa druge strane, prilikom tranzijentnih procesa se zahteva da vozilo dostigne željenu brzinu i/ili pogonski momenat u najkraćem mogućem roku i tada se strategija upravljanja AM prvenstveno zasniva na dobijanju kvalitetnih dinamičkih performansi, dok energetska efikasnost pada u drugi plan. Aspekt efikasnosti pogona dobija na značaju prilikom ulaska pogona u stacionarni režim rada.

Postoje dva osnovna pristupa u okviru aspekta energetske efikasnosti upravljanja. Prvi je metod zasnovan na tehnici traženja energetskog optimuma, tzv. SC metod (eng. *Search Control* metod), [2-4]. Algoritmi pretrage pronalaze optimalnu vrednost fluksa, odnosno struje magnećenja na osnovu izmerene vrednosti ulazne snage. Brojna literatura se bavi ovim pitanjem i navedena je u [4]. Drugi pristup predstavlja upotrebu kontrolera zasnovanog na

modelu gubitaka mašine, LMC metod, (eng. *Loss Model Control method*), koji predstavlja matematičku metodu kojom se eksperimentalno dobijaju optimalne karakteristike struje i fluksa, jedinstvene za određeni motor, [5-10]. Parametri unutar samog kontrolera (npr. otpornosti, induktivnosti mašine...) se uobičajeno smatraju konstantnim, međutim ukoliko se uzmu obzir i njihove promene efikasnost i praktičnost ove metode se značajno povećava. Tako se umesto suboptimalne kontrole dobijaju prave optimalne karakteristike pogona, [10].

Prednosti SC metoda u odnosu na pristup zasnovan na LMC-u se ogledaju u činjenici da one ne zavise od tačnosti poznavanja parametara pogona. Sa druge strane, LMC pristup daje brži odziv a njegova složenost se može značajno umanjiti uproščavanjem modela uz dodatne korekzione mehanizme [4]. Pokazuje se da posmatrana uprošćenja ne utiču značajno na degradaciju optimalnosti algoritma i pomeranje radne tačke iz optimalne te je ovaj pristup uglavnom i eksploatisan u praksi.

U ovom radu su obrađene dve optimalne strategije upravljanja pogonom: strategija upravljanja motorom tokom prelaznih procesa kada je potrebno da mašina razvije maksimalan momenat za raspoložive kapacitete struje (poglavlje 3), kao i strategija za rad mašine sa minimalnim gubicima, odnosno energetski efikasno upravljanje (poglavlje 4). Model gubitaka AM na kome će se zasnivati LMC je pre svega razmotren u poglavlju 2. Predstavljena je i ekvivalentna šema AM sa izvesnim uprošćenjima koja će uz koncept vektorske kontrole implementirane u pogonu biti podloga za konstrukciju optimalne strategije u pogonu. Korišćen pristup za minimizaciju gubitaka biće zasnovan isključivo na LMC metodi koja će biti obrađena u ovom radu.

2. ENERGETSKI BILANS ASINHRONE MAŠINE

Ukupni gubici u AM, P_{uk} , se sastoje od gubitaka u bakru statora i rotora, P_{cu} , gubitaka u feromagnetnom jezgru usled postojanja promenljivog magnetisanja kola, P_{Fe} , i mehaničkih gubitaka, P_{meh} , usled trenja obrtnih delova mašine i ventilacije.

$$P_{uk} = P_{cu} + P_{Fe} + P_{meh} \quad (1)$$

U stacionarnom stanju, gubici u bakru statora i rotora usled postojanja odgovarajućih struja kroz namotaje su:

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

gde su sa R_s i R_r označeni otpornosti namotaja statora i rotora. Komponente struje statora i rotora po d i q osi mašine su respektivno, i_{ds} i i_{qs} za stator i i_{dr} i i_{qr} za rotor.

Gubici u feromagnetnom jezgru nastaju usled efekata histerezisa i vrtložnih struja pri naizmeničnom magnetisanju u magnetnom kolu:

$$P_{Fe} = k_h \omega \psi_m^2 + k_{vs} \omega^2 \psi_m^2 \quad (3)$$

gde su k_h i k_{vs} koeficijenti gubitaka histerezisa i vrtložnih struja, respektivno. Ovi gubici zavise od nivoa magnetnog fluksa u mašini ψ_m i frekvencije napajanja ω .

Mehanički gubici zavise od brzine obrtanja rotora i mogu se u dobroj aproksimaciji svesti na sledeći oblik:

$$P_m = k_m \omega_r^2 \quad (4)$$

gde je k_m koeficijent mehaničkih gubitaka.

Prve dve vrste gubitaka, gubici u bakru i gvožđu, predstavljaju kontrolabilne gubitke, iz razloga što se na iste može uticati odgovarajući utiskivanjem vektora struje statora AM, [3]. Treća vrsta gubitaka, mehanički gubici, nisu kontrolabilni i neće se nadalje razmatrati.

Gubici u gvožđu opisani sa (3) pokazuju izrazito nelinearnu zavisnost od frekvencije i magnetne indukcije. U opsegu malih i srednjih brzina ovi gubici su zanemarivi u odnosu na gubitke u bakru. To je naročito slučaj prilikom razmatranja mašina sa dugim rotorom gde se konstrukcijom same mašine postižu značajni obrtni momenti uz redukciju indukcije a samim tim i smanjenje gubitaka u gvožđu. U konkretnoj aplikaciji za električne automobile prethodna svojstva su uzeta u obzir, stoga je smisljeno gubitke u gvožđu zanemariti.

Model gubitaka AM će biti predstavljen u konstelaciji sa algoritmom vektorske kontrole, što je značajno u slučaju da se žele postići superiorne dinamičke karakteristike pogona.

Ukoliko je implementirana vektorska kontrola AM, postiže se nezavisna kontrola momenta i fluksa AM. Sledeći skup jednačina je u tom slučaju validan:

$$i_{dr} = 0; i_{qr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{qs}; \psi_{rd} = L_m i_{ds}; \quad (6)$$

Iskorištavanjem (6) i uvrštavajući iste u relacije za gubitke, (2) i (5) dobija se:

$$P_{cu} = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} i_{qs}^2 \quad (7)$$

Ukupni kontrolabilni gubici se mogu izraziti kao:

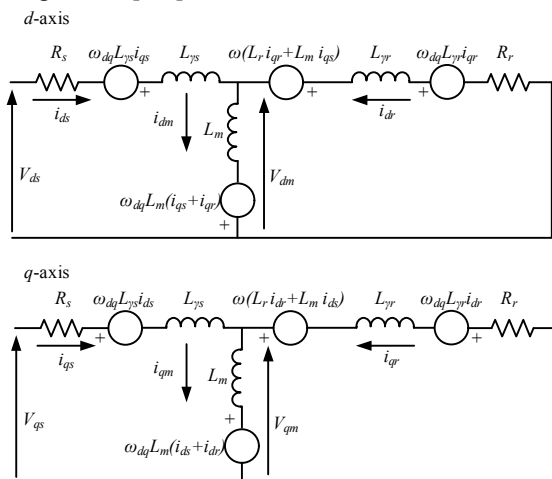
$$P_{gubkon} = R_d i_{ds}^2 + R_q i_{qs}^2 \quad (8)$$

gde su

$$R_d = R_s \quad (9)$$

$$R_q = R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \quad (10)$$

Model opisan sa (8–10) pokazuje da se kontrolabilni gubici mogu izraziti kao funkcija upravljačkih komponenti u vektorskom pogonu, komponentama struja statora po d i q osi. Kontrolisanjem istog vektora, gubici se mogu menjati i konačno, može se dobiti optimalan pogon koji poseduje minimalne gubitke, [6-8].



Sl. 1. Dinamička ekvivalentna šema asinhronne mašine u dq koordinatnom sistemu osa

Predstavljeni model gubitaka je izveden pod izvesnim uprošćenjima i zasnovan je na ekvivalentnoj šemi AM predstavljenoj na sl. 1, [5]. Ova aproksimacija podrazumeva da se aktivna komponenta struje grane magnetisanja koja pravi gubitke u gvožđu zanemaruje u okviru celokupne dinamike sistema. Zasnovanost ove aproksimacije, pored već ranije navedenih činjenica koji joj idu u prilog, u okviru traženja optimalnosti u pogonu, minimizacije gubitaka ili maksimalnog iskorišćenja momenta, se može pravdati, činjenicom da je kriva u okolini optimalne tačke ravna i široka bez obzira na upotrebljen tip mašine, [4]. Stoga se predstavljena aproksimacija može prihvatiti jer se iskorišćenje u pogonu neće značajno promeniti.

Razmatrani model gubitaka, (8–10), biće iskorišćen za već pomenute potrebe traženja optimalnosti tačke pogona za minimizaciju gubitaka AM.

Za potrebe implementacije algoritma maksimalnog iskorišćenja kapaciteta pogonskog momenta pogona biće korišćena relacija za elektromagnetni momenat u zavisnosti od komponenti struja statora po d i q osi mašine:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} i_{ds} i_{qs} = K_t i_{ds} i_{qs} \quad (11)$$

gde je sa K_t definisano pojačanje momenta pogona:

$$K_t = \frac{3}{2} p \frac{L_m^2}{L_r} \quad (12)$$

Ova relacija podrazumeva da je implementirana vektorska kontrola u pogonu kao i da je uticaj efekta gubitaka u gvožđu na degradaciju elektromagnetnog momenta zanemariv.

Relacija opisana sa (11) i (12) uz model gubitaka, (8–10) predstavlja polaznu osnovu u postupku traženja optimalnog algoritma za upravljanje AM u pogonu električnog vozila.

3. OPTIMALNI ALGORITAM UPRAVLJANJA U POGONU AM U ELEKTRIČNOM VOZILU

Kao što je već i diskutovano, optimalni algoritam za upravljanje pogonom AM u aplikaciji električne vuče i transporta mora da obuhvati potrebu za minimizaciju gubitaka kao i maksimizaciju kapaciteta obrtnog momenta za savladavanje otpornih sila u toj aplikaciji.

Energetska efikasnost i maksimizacija stepena iskorišćenja u pogonu predstavlja primarni zadatak koga je potrebno ostvariti u stacionarnom stanju pogona, tj. kada se električno vozilo kreće ustaljenom brzinom.

Prilikom tranzijentnih režima pogona, neophodno je ostvariti što brže uspostavljanje momenta i njegovo maksimalno iskorišćenje pri postojećim strujnim i naponskim kapacitetima pogona. U slučaju kretanja pogona na velikim usponima potrebno je ostvariti maksimalan obrtni momenat za dati vektor struje da bi se savladao otporni momenat usled gravitacione sile koja se suprotstavlja pogonskom momentu. Prilikom preticanja i obilaženja pogona vozila, neophodno je ostvariti velike brzine i momenat za efikasno manevarisanje. Usled ograničenih strujnih i naponskih mogućnosti pogona, neophodno je za potreban pogonski momenat ostvariti minimalan intenzitet vektora struje statora kako bi se ovi kapaciteti rasteretili i kako bi se omogućila šira margina za dobijanje obrtnog momenta pogona.

U nastavku će biti analizirana svaka od pojedinačnih strategija i biće izvedeni odgovarajući analitički obrasci koji definišu optimalne kriterijume u tim pojedinačnim slučajevima. Pokazaće se da je moguće ostvariti univerzalan

algoritam upravljanja koji se lako može realizovati u okviru upravljačkog sistema od interesa. Dobiće se odgovarajuća skalarna relacija koja će važiti i u slučaju kada se razmatraju promene parametara od interesa. U zavisnosti od režima rada pogona pojedini faktori skaliranja u odgovarajućoj relaciji će korigovati optimalan odnos strujnih komponenti ili neće biti uzeti u razmatranje. Kao glavni parametar koji je potrebno adaptirati u okviru optimalnog algoritma kontrole AM pogona biće induktivnost magnetisanja.

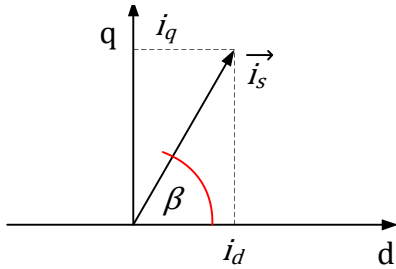
3.1. Algoritam ostvarenja maksimalnog momenta za datu amplitudu struje statora – MTPA strategija

Algoritam ostvarenja maksimalnog momenta za datu amplitudu struje statora AM, tzv. MTPA algoritam (eng. *Maximum Torque per Ampere*) predstavlja optimalnu strategiju upravljanja pogona električnog vozila u slučaju kretanja pogona po velikim usponima gde je potrebno obezbediti što više obrtnog momenta za savladavanje gravitacione sile koja se suprotstavlja kretanju vozila.

MTPA daje maksimum momenta za konstantnu vrednost amplitude struje statora tako što podešava ugao strujnog vektora relativno u odnosu na d osu mašine, ugao β . Dakle rešenje se dobija izjednačavanjem prvog izvoda momenta mašine po uglu struje statora β sa nulom.

$$\frac{dm_{el}}{d\beta} = 0 \quad (13)$$

Sa sl. 2 se vidi da je potrebno promenom ugla vektora struje statora za istu amplitudu dobiti što veću vrednost momenta.



Sl. 2. Optimalna pozicija vektora struje statora relativno u odnosu na d osu mašine za ostvarenje MTPA algoritma

Ukoliko se u početnoj aproksimaciji smatra da je kritičan parametar, induktivnost magnećenja L_m konstantan parametar, može se lako pokazati da se dobija da je optimalan ugao strujnog vektora:

$$\beta_{MTPA} = 45^\circ \quad (14)$$

Optimalne komponente struje statora na osnovu sl. 2 su stoga:

$$i_{dSMTPA} = i_s \cdot \cos \beta_{MTPA} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_s \quad (15)$$

$$i_{qSMTPA} = i_s \cdot \sin \beta_{MTPA} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot i_s \quad (16)$$

Jasno je stoga da je optimalan odnos struja:

$$MTPA: \frac{i_{ds}}{i_{qs}} = 1 \quad (17)$$

Skalarna relacija opisana sa (17) je jednostavna i laka za implementaciju. Relacija definiše optimalan odnos komponenti struja statora da bi se dobio maksimalan momenat u pogonu, [9]. Međutim, relacija ima izvesno ograničenje u samom postupku izvođenja jer podrazumeva da je parametar induktivnosti magnećenja konstantan. Ovaj parametar se menja sa nivoom fluksa i zasićenosti magnetnog

kola. Stoga (17) daje suboptimalan odnos koji može da značajno degradira maksimalnu efikasnost u slučaju da se pogon značajno opteretiti. Sa porastom opterećenja povećava se referenca momenta i_{qs} , a zbog relacije optimalnosti $i_{ds} = i_{qs}$ dobijene u (17) komanda fluksa se povećava. Stvarna vrednost fluksa se u realnom slučaju neće ostvariti zbog efekta zasićenja magnetnog kola mašine pa optimalna tačka u pogonu neće biti ostvarena.

Za pronalaženje optimalne strategije MTPA potrebno je poznavati zavisnost induktivnosti magnećenja sa strujom, tj. $L_m = f(i_{ds})$. Pretpostaviće se da je ova zavisnost linearna i u oblasti zasićenja feromagnetnog jezgra izražena relacijom:

$$L_m = L'_m i_{ds} + L_{m0} \quad (18)$$

gde je L'_m inkrementalna induktivnost koja ima vrednost manju od nule a L_{m0} induktivnost

Relacija opisana sa (18) nagoveštava da se sa porastom struje magnetisanja i_{ds} , induktivnost magnećenja L_m opada (inkrementalna induktivnost L'_m je negativna).

Kasnije će na konkretnom primeru AM koja se ugrađuje u okviru pogona električnog vozila i koji je iskorišćen u svrhe testova pokazati da se u oblasti blagog zasićenja zavisnost opisana sa (18) potpuno konzistentna i zasnovana.

Međutim, ukoliko se uvaži promena međuinduktivnosti sa promenom d struje statora, (18), izraz za momenat, (11), postaje:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (L'_m i_{ds} + L_{m0}) i_{ds} i_{qs} \quad (19)$$

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \frac{1}{2} (L'_m i_s \cos \beta + L_{m0}) i_s^2 \sin 2\beta \quad (20)$$

Uz uvažavanje $L_m \gg L_{rr}$, može se smatrati da je $L_m \approx L_r$ i dobija se:

$$m_e = \frac{3}{2} p \frac{1}{2} (L'_m i_s \cos \beta + L_{m0}) i_s^2 \sin 2\beta \quad (21)$$

Sada se izraz opisan sa (13), nakon sređivanja može svesti na polinom trećeg reda po $\cos \beta$:

$$3L'_m i_s \cos^3 \beta + 2L_{m0} \cos^2 \beta - 2L'_m i_s \cos \beta - 2L_{m0} = 0 \quad (22)$$

Implementacija algoritma opisanog relacijom (22) je komplikovana za proračun na kontroleru. Potrebno je za parametre grane magnećenja pri svakoj vrednosti amplitude struje statora numerički rešiti jednačinu, pronaći inverznu vrednost kosinusa ugla β i na osnovu iste proračunati komponente struje statora koje definišu optimalni kriterijum MTPA, (15) i (16). Praktičan prilaz podrazumeva definisanje *look-up* tabele kojom se automatski može izračunati optimalne struje. Pokazaće se da postoji optimalna relacija izražena u drugačijem obliku koja takođe definiše optimalnost po MTPA a koja je numerički pogodnija za implementaciju. Ona će biti izvedena iz modifikovanog kriterijuma koji će se po smislu optimalnog odnosa pokazati identičnim kao i za MTPA.

3.2. Algoritam ostvarenja minimalne amplitude struje statora za dati momenat – MAPT strategija

Algoritam ostvarenja minimalne amplitude struje za datu referencu momenta AM, tzv. MAPT algoritam (eng. *Minimum Ampere per Torque*) predstavlja optimalnu strategiju upravljanja pogona električnog vozila u slučaju kretanja pogona pri velikim brzinama kada je potrebno uspostaviti značajan obrtni momenat. U tom slučaju se proširuje margina napona i struje mašine, a time i obrtnog momenta za efikasnije manevrisanje. Biće pokazano da se

ova metoda poklapa sa MTPA strategijom u smislu dobijanja optimalnog odnosa upravljačkih komponenti u pogonu, komponenti struja statora. Osnovna razlika između opisanih strategija se ogleda u tome da li je komanda iz nadređenog sistema unutar kontrolera referenca momenta ili amplituda struje. Ukoliko je to momenat, onda se teži dobijanju MAPT, u suprotnom ukoliko je izlaz iz nadređenog regulatora struja, MTPA se izvršava.

Do rešenja se dolazi pronalaskom minimuma sledeće težinske funkcije po dve upravljačke promenljive:

$$J(i_{ds}, i_{qs}) = i_s + \lambda_1(K_t i_{ds} i_{qs} - T_L) \quad (23)$$

gde je T_L momenat opterećenja a λ_1 Lagranžov koeficijent.

Težinska funkcija čiji se minimum po moment traži uključuje pored amplitude struje statora takođe i član koji uzima u obzir i ograničenje da se mora ostvariti momenat koji uravnotežava momenat opterećenja T_L .

Minimum funkcije se pronalazi izjednačavanjem prvog izvoda ove funkcije po momentu sa nulom:

$$\frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial m_e} = \frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial i_{xs}} \frac{1}{\frac{\partial m_e}{\partial i_{xs}}} = 0 \quad (24)$$

gde $x \in \{d, q\}$.

Lako se može pokazati da, u slučaju kada se induktivnost magnetisanja smatra konstantnom, je optimalni strujni odnos identičan kao i u slučaju MTPA strategije ukoliko se reši sistem (24) po odnosu komponenti struja statora. Praktično, MAPT pristup predstavlja drugačiju konstelaciju istog pristupa optimalnoj kontroli AM u tranzijentnom režimu.

$$MAPT : \frac{i_{ds}}{i_{qs}} = 1 \quad (25)$$

Ukoliko se uvaži zavisnost opisana sa (18) može se sistem (24) po odnosu struja rešiti i dobiti relacija:

$$MAPT : \frac{i_{ds}}{i_{qs}} = 1 \cdot \sqrt{1 + \frac{L'_m i_{ds}}{L'_m i_{ds} + L_{m0}}} \quad (26)$$

Množitelj u izrazu definiše korekciju odnosa optimalnih struja. Na osnovu (26) je jasno da u slučaju povećanja i_{ds} ovaj faktor se smanjuje i teži prema nuli smanjujući optimalni odnos struja. Ultimativno, iz izraza se vidi da u slučaju zasićenja odnos teži ka nuli što je i u intuitivnom smislu jasno, ne postoji promena struje i_{ds} sa i_{qs} usled nemogućnosti dobijanja promene fluksa. Naravno, izraz za optimalnost, (26) je uopštenje izraza (25) gde je prirodno ubačena i zavisnost usled promene induktivnosti sa nivoom zasićenja; ukoliko se posmatra linearno područje gde je $L'_m = 0$ izraz se transformiše u (25). Korekcionni faktor usled uvažavanja zasićenja pri aproksimaciji induktivnosti po (23) glasi:

$$k_L = \sqrt{1 + \frac{L'_m i_{ds}}{L'_m i_{ds} + L_{m0}}} \quad (27)$$

Izraz opisan sa (26) je pogodniji za implementaciju na kontroleru iako sam faktor k_L zavisi od struje i_{ds} koju treba proračunati. U nastavku se daje procedura koja služi za dobijanje optimalnih komponenti struja.

Sređivanjem (26) dobija se polinom trećeg reda koji direktno za rešenje daje komponentu struje i_{ds} za referencu momenta kao parametar i_{qs} .

$$L'_m i_{sd}^3 + L_{m0} i_{sd}^2 - 2L'_m i_{sq}^2 i_{sd} - L_{m0} i_{sq}^2 = 0 \quad (28)$$

Kako (28) predstavlja polinom trećeg stepena po i_{sd} moguće ga je rešiti numeričkim Njutn-Rapsonovim postupkom. Dodatna pogodnost primene ovog postupka je mogućnost izbora dobre početne aproksimacije $i_{sd0} \approx i_{sq}$. Ta činjenica favorizuje napred opisani numerički postupak pronalazjenja rešenja.

Za zadatu vrednost reference i_{sq} i početnu aproksimaciju $i_{sd0} \approx i_{sq}$ (28) postaje:

$$f_0(i_{sd0}) = L'_m i_{sd0}^3 + L_{m0} i_{sd0}^2 - 2L'_m i_{sq}^2 i_{sd0} - L_{m0} i_{sq}^2 = f_0 \quad (29)$$

Linearizacijom (29) oko radne tačke $(i_{sd0}, f_1(i_{sd0}))$, razvojem u Tejlorov red, dobija se:

$$f \approx f_0(i_{sd0}) + \frac{\partial f_1(i_{sd0})}{\partial i_{sd}} \Delta i_{sd1} = 3L'_m i_{sd0}^2 + 2L_{m0} i_{sd0} - 2L'_m i_{sq}^2 \quad (30)$$

Dalje se iz (30) proračuna korekcija Δi_{sd1} :

$$\Delta i_{sd1} = \frac{0 - f_0(i_{sd0})}{\frac{\partial f_1(i_{sd0})}{\partial i_{sd}}} \quad (31)$$

Tada nova vrednost i_{sd} postaje:

$$i_{sd1} = i_{sd0} + \Delta i_{sd1} \quad (32)$$

i dobija se nova funkcija:

$$f_1(i_{sd1}) = L'_m i_{sd1}^3 + L_{m0} i_{sd1}^2 - 2L'_m i_{sq}^2 i_{sd1} - L_{m0} i_{sq}^2 = f_1 \quad (33)$$

Ukoliko tačka $(i_{sd1}, f_1(i_{sd1}))$ zadovoljava uslove konvergencija, i_{sd1} se proglašava rešenjem (28), odnosno optimalnom vrednošću d struje statora za MAPT strategiju. Ukoliko to nije slučaj, postupak se nastavlja na isti način sve dok uslovi konvergencije ne budu ispunjeni. S obzirom da je početna aproksimacija bliska optimalnom rešenju, a Njutn Rapsonov postupak efikasno konvergira u slučaju polinomne jednačine višeg reda, do rešenja bi trebalo da se dođe u najviše 3 iteracije. Konvergencija rešenja stoga nije prikazana u radu.

3.2. Algoritam minimizacije gubitaka AM – optimalna kontrola u stacionarnom stanju pogona AM

Minimizacija gubitaka AM podrazumeva pronalazjenje optimalnih upravljačkih signala potrebnih za ostvarenje maksimalnog stepena efikasnosti pogona. Jedini ograničenje u tom slučaju predstavlja činjenica da momenat mašine mora da pokrije momenat opterećenja. Pošto se jedino može uticati na kontrolabilne gubitke u mašini u težinsku funkciju se upravo oni uvrštavaju:

$$J(i_{ds}, i_{qs}) = P_{gubkon} + \lambda_1(K_t i_{ds} i_{qs} - T_L) \quad (34)$$

Ovi gubici su po modelu gubitaka, (8–10) i izraženi u funkciji upravljačkih promenljivih, stoga se minimum težinske funkcije može lako pronaći diferenciranjem (34) po i_{ds} i i_{qs} i izjednačavanjem izraza sa nulom. Tako se dobija sistem:

$$\frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial i_{ds}} = 2R_d i_{ds} + \lambda_1 K_t i_{qs} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial J(i_{ds}, i_{qs})}{\partial i_{qs}} = 2R_q i_{qs} + \lambda_1 K_t i_{ds} = 0 \quad (36)$$

Nije teško pokazati da je rešenje sistema opisanog sa (35) i (36) daje optimalnu tačku:

$$(i_{ds}, i_{qs}) = \left(\left(\frac{R_q T_e^2}{R_d K_t^2} \right)^{\frac{1}{4}}, \left(\frac{R_d T_e^2}{R_q K_t^2} \right)^{\frac{1}{4}} \right) \quad (37)$$

Optimalni odnos se dobija iz relacije (37) i iznosi, [10]:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{\frac{R_q}{R_d}} = \sqrt{\frac{R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}}{R_s}} \quad (38)$$

Izraz opisan sa (38) pokazuje da je optimalni strujni odnos konstantan i definisan kao:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} = C \quad (39)$$

Za razliku od izraza za MTPA i MAPT ovaj odnos se razlikuje od 1 i zavisi od parametara omskih otpora namotaja i induktivnosti magnećenja i namotaja rotora. Bez obzira na to, može se uvideti sličnost optimalnih strategija, strujni odnos kod optimalnosti gubitaka je samo drugačiji u smislu drugačijeg faktora.

I u slučaju uzimanja efekta zasićenja nije teško pokazati da ukoliko se (18) ubaci u težinsku funkciju (34) (K_t zavisi od L_m) može se dobiti

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} k_L \quad (40)$$

Optimalno rešenje opisano u (40) se može dobiti na isti način kao i u slučaju MAPT pristupa, samo umesto i_{qs} se dodaje faktori C koji množe i_{qs} u (28). Postupak proračuna je analogan kao u slučaju MAPT.

$$L'_m i_{sd}^3 + L_{m0} i_{sd}^2 - 2L'_m (C i_{sq})^2 i_{sd} - L_{m0} (C i_{sq})^2 = 0 \quad (41)$$

4. UNIVERZALNA FORMULA I ALGORITAM ZA OPTIMALNU KONTROLU AM

U ovom poglavlju objedinjeni su na jednom mestu svi zaključci iz prethodnog poglavlja u jednu kompaktnu skalarnu formulu koja je jednostavna za implementaciju na modernom kontroleru. Analitička zavisnost obuhvata sve tri opisane klase optimalne kontrole, MTPA, MATP i LMC metod. Uzet je u obzir i efekat zasićenja u okviru formule:

$$\frac{i_{ds}}{i_{qs}} = C k_L \quad (42)$$

gde su:

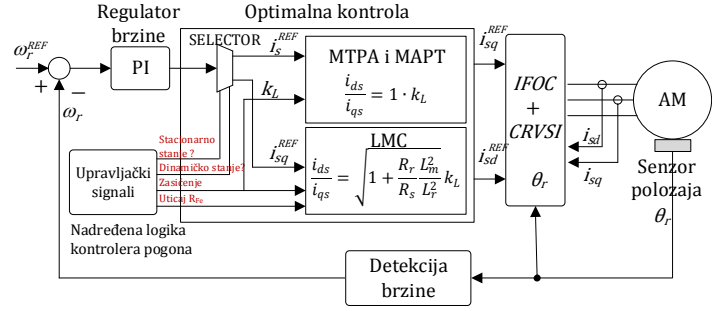
$$C = \begin{cases} 1 & \text{MTPA i MAPT} \\ \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} & \text{LMC} \end{cases} \quad (43)$$

$$k_L = \sqrt{1 + \frac{L'_m i_{ds}}{L'_m i_{ds} + L_{m0}}} \quad (44)$$

Korekcionni faktor opisan u (44) se bira na osnovu karakteristika same mašine, tj. na osnovu karakteristike magnećenja mašine. Njegovo uvažavanje/zanemarenje je pitanje karakteristika samog pogona i tolerancija koje nameće sama primena što nije diskutovano detaljnije.

Kompletan algoritam upravljanja predloženim pogonom zasnovanim na predloženoj univerzalnoj formuli je dat na

sl. 3:



Sl. 3. Kompletan algoritam upravljanja pogonom zasnovanog na predloženoj univerzalnoj formuli

5. GRAFIČKI PRIKAZ OPTIMALNIH ZAVISNOSTI U KORIŠĆENOM POGONA AM

Za potrebe lakšeg razumevanja izvedenih analitičkih zavisnosti u ovom poglavlju je data grafička predstava istih zavisnosti. Za detaljniju predstavu korišćeni su parametri pogona koji je iskorišćen upravo u aplikaciji električne vuče za koju je i predložen optimalni model opisan (42–44).

Pogon čiji su parametri iskorišćeni za potrebe dobijanja grafičke zavisnosti optimalnih odnosa je zasnovan na 4-polnoj asinhronoj mašini YDQ5_4 6730 nominalne izlazne snage 5kW, napona 48V i struje 90A. Pogon je predviđen za napajanje iz akumulatorske baterije preko DC-AC pretvarača za dobijanje odgovarajućeg naizmeničnog napona promenljive frekvencije i napona u okviru vektorskog pogona AM.

Na pređašnje opisanom pogonu izvršena i grafička predstava pojedinih zavisnosti od interesa. Za konkretne vrednosti pojedinih parametara modela AM dobijene se grafičke zavisnosti koje su u uskoj korespondenciji sa predstavljenom analitikom u radu. Parametri samog modela se dobijeni iz oglada praznog hoda i kratkog spoja AM. Konačni rezultati ovih oglada su tabelarno prikazani u tabeli I.

Tabela I. Rešenja polinoma trećeg stepena po uglu β , d i q komponente struje statora i njihov odnos za traženi ugao

R_s [mΩ]	R_r [mΩ]	L_{mn} [mH]	L_{ys} [mH]	L_{yr} [mH]
4.45	5.45	0.98	0.03	0.03

U tabeli I su prikazani nominalni podaci za parametre ekvivalentne šeme. Za potrebe dobijanja optimalnih kriterijuma neophodno je dati zavisnost induktivnosti magnećenja od sistemskih veličina od interesa, struje magnećenja, $i_{ds} = I_m$.

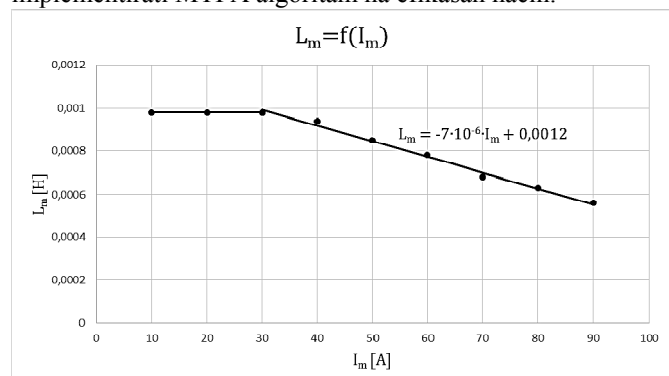
Na sl. 4 prikazana je induktorska karakteristika korišćene AM, zavisnost induktivnosti magnećenja od struje magnećenja. Vidi se da je u opsegu do 30A ova induktivnost konstantna. Iznad 30A mašina ulazi u blago zasićenje i vidi se sa sl. 4 da induktivnost opada približno linearno. Ovo ide u prilog razmatranjima opisanim (18). Na istoj slici je stoga i prikazana i broјčano ova zavisnost:

$$L_m = L'_m i_{ds} + L_{m0} = -7 \cdot 10^{-6} i_{ds} + 0.0012 \quad (45)$$

Na osnovu dobijenih parametara i zavisnosti u konkretno korišćenom pogonu može se doći do grafičkih zavisnosti zasnovanih na kriterijumu optimalnosti, (42–44).

U tabeli I predstavljene su optimalne komponente struje statora i_{sdMTPA} i i_{sqMTPA} kao i optimalni uglovi i njihov odnos za pojedine vrednosti amplitude struje statora i_s . Jasno

je uočljivo da pri malim vrednostima amplitude struje statora odnos je blizak 1 dok sa iste struje ovaj odnos se smanjuje usled efekta zasićenja. Vrednosti u tabeli II dobijeni su *off-line* procedurom, gde je za parametar i_s rešavana nelinearna (22). Korišćenjem *look-up* tabele moguće je stoga implementirati MTPA algoritam na efikasan način.

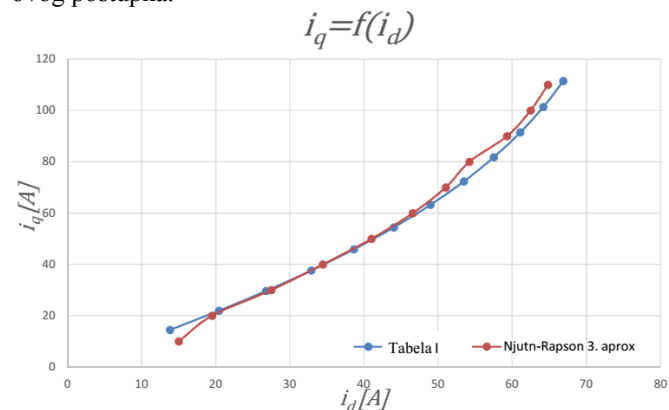


Sl. 4 Karakteristika magnećenja korišćene AM dobijene iz oglada praznog hoda AM

Tabela II. Rešenja polinoma trećeg stepena po uglu β , d i q komponente struje statora i njihov odnos za traženi ugao

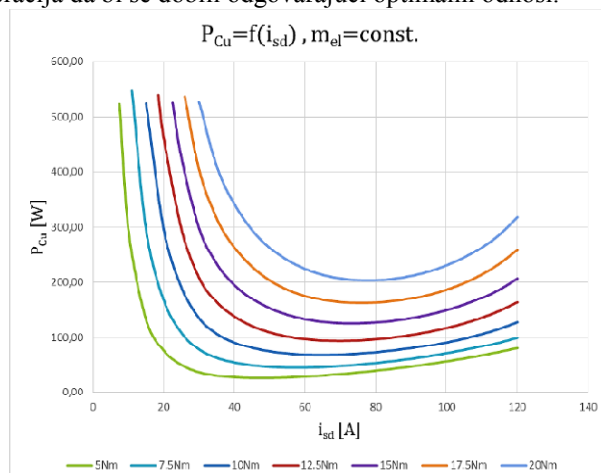
i_s [A]	$\cos(\beta_{MTPA})$	β_{MTPA} [°]	i_{sdMTPA} [A]	i_{sqMTPA} [A]	$\frac{i_{sdMTPA}}{i_{sqMTPA}}$
20	0,691	46,314	13,81	14,46	0,955
40	0,670	47,931	26,80	29,69	0,903
60	0,644	49,903	38,65	45,90	0,842
80	0,612	52,241	48,99	63,25	0,775
100	0,575	54,876	57,54	81,79	0,703
120	0,535	57,651	64,21	101,38	0,633
140	0,494	60,381	69,19	121,71	0,569
160	0,455	62,923	72,83	142,46	0,511
180	0,419	65,208	75,48	163,41	0,462
200	0,387	67,223	77,43	184,40	0,420
220	0,359	68,987	78,89	205,37	0,384

U MAPT poglavlju naglašeno je da se ista zavisnost optimalnih komponenti može i analitički dobiti čak i ako se uvaži efekat zasićenja. Dobijanje optimalnog odnosa opisanog sa (26) je dobijena rešavanjem (28) koja je zasnovana na Njutn-Rapsonovom iterativnom postupku. Na sl. 5 prikazana je zavisnost koja opisuje odnos komponenti struje statora dobijene rešavanjem (28) za pojedine vrednosti i_{qs} . Predstavljeni su rezultati dobijeni nakon druge iteracije ovog postupka.



Sl. 5 Poređenje optimalnih vrednosti d i q komponenti struje statora iz tabele II i dobijenih primenom Njutn-Rapsonovog iterativnog postupka

Na istoj slici je prikazana zavisnost dobijena za slučaj MTPA strategije, gde su tačke iz tabele II unesene. Može se uočiti zadovoljavajući nivo poklapanja tačaka između dva srodna pristupa. To daje eventualnu prednost i favorizuje upotrebu analitičkog pristupa jer je potreban mali broj iteracija da bi se dobili odgovarajući optimalni odnosi.



Sl. 6 Zavisnost gubitaka u bakru od d komponente struje statora za momente 5-20 Nm

U slučaju korišćenja LMC pristupa za određene vrednosti momenata u pogonu, iz (37) za optimalnu trajektoriju pogona je moguće izračunati optimalne komponente struje statora i gubitke u bakru. Na sl. 6 prikazane su zavisnosti gubitaka u bakru od upravljačke komponente fluksa mašine, i_{ds} . Sa sl. 6 se vidi da postoji minimum gubitaka za određenu vrednost d struje statora i da sa porastom momenta taj minimum je prisutan pri većim vrednostima i_{ds} .

U tabeli III prikazane su optimalne struje po d osi za različite vrednosti momenata AM po kriterijumu minimizacije gubitaka AM.

Tabela III. Optimalna vrednost i_{sd} za momente 5-20 Nm po kriterijumu optimizacije gubitaka AM

m_{el} [Nm]	i_{sdOPT} [A]
5	50
7,5	60
10	65
12,5	70
15	75
17,5	75
20	80

Na osnovu rezultata iz tabele III prikazani su optimalni odnosi strujnih komponenti.

Tabela IV. Optimalne vrednosti komponenti statorske struje i njihov odnos po kriterijumu optimizacije gubitaka AM

m_{el} [Nm]	i_{sdOPT} [A]	i_{sqOPT} [A]	i_{sdOPT}/i_{sqOPT}
0,5	15	11,04	1,36
1	25	18,37	1,36
2	30	22,05	1,36
2,5	35	25,66	1,35
5	50	40,51	1,23
7,5	60	55,34	1,08
10	65	71,42	0,91
12,5	70	87,14	0,80
15	75	102,86	0,73
17,5	75	120,01	0,62
20	80	135,9	0,59

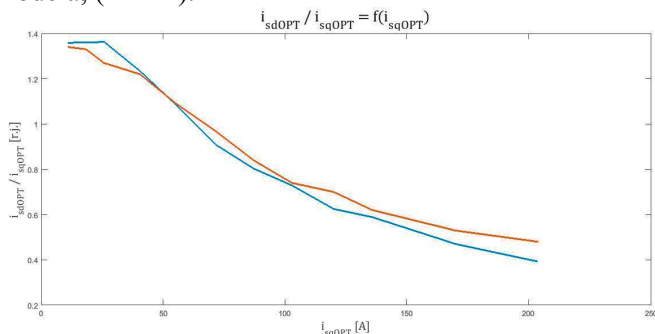
m_{el} [Nm]	i_{sdOPT} [A]	i_{sqOPT} [A]	i_{sdOPT}/i_{sqOPT}
25	80	169,88	0,47
30	80	203,86	0,39

Iz table IV se vidi da je za momente do 2Nm odnos d i q struja jednak:

$$C = \sqrt{1 + \frac{R_r L_m^2}{R_s L_r^2}} \approx 1.36 \quad (46)$$

dok za veće momente opada usled zasićenja magnetnog kola.

Da bi se pokazala zasnovanost modela kada je zasićenje uvaženo upoređeni su rezultati odnosa struja sa pristupom opisanim (44) koja daje analitičku zavisnost gde je uvažan i efekat zasićenja. Plava kriva na sl. 7 predstavlja optimalan odnos komponenti struja statora u zavisnosti od reference momenta, i_{qs} , preslikan iz table IV dok narandžasta kriva predstavlja istu zavisnost dobijenu putem Njutn-Rapsonovog iterativnog postupka koji rešava optimalni model. Poklapanje krivih implicira zasnovanost predloženog modela, (42–44).



Sl. 7 Odnos optimalnih vrednosti d i q komponenti struje statora

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena optimalna strategija upravljanja AM, u pogonu električnih vozila u celokupnom opsegu brzina i momenata mašine. Opisan je način za minimizaciju gubitaka AM upotrebom kontrolera zasnovanog na modelu gubitaka AM kao primarnog kriterijuma za optimalnost u stacionarnom stanju pogona. Prilikom tranzijenata u pogona, predstavljen je kriterijum dobijanja maksimalnog momenta mašine za raspoloživi vektor struje statora, koji stavlja u prvi plan dinamičke karakteristike pogona kojim se upravlja. Relevantne zavisnosti u vidu odnosa strujnih komponenti struja statora kojima se postižu optimalni kriterijumi su opisani za strategije MTPA, MATP i LMC-a. Pokazano je da se može na osnovu predstavljenih zavisnosti dobiti univerzalna skalarna analitička formula koja obuhvata i efekat zasićenja feromagnetog materijala. Predstavljen je numerički proračun preko koga se dobijaju vrednosti struja statora po d i q osi, za postizanje optimalnosti u pogonu.

7. LITERATURA

[1] M. Waheeda Beevi, A. Sukesh Kumar, H.S. Sibin, "Loss minimization of vector controlled induction motor drive using genetic Algorithm," Green

Technologies (ICGT), 2012 International Conference on , vol., no., pp.251,257, 18-20 Dec. 2012

- [2] M. N. Uddin, and Sang Woo Nam, "New Online Loss-Minimization- Based Control of an Induction Motor Drive," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 2, pp. 926-933, March 2008.
- [3] G. C. D. Sousa, B. K. Bose, and J. G. Cleland, "A fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 42, pp. 192-198, Apr. 1995.
- [4] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in scalar controlled Induction motor drives with search controllers", IEEE Trans, on Ind. Electronics, vol.11, no.2, pp. 213-220, Mar. 1996.
- [5] Jingchuan Li, Longya Xu, Zheng Zhang, "A New Efficiency Optimization Method on Vector Control of Induction Motors," Electric Machines and Drives," 2005 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1995,2001, 15-15 May 2005
- [6] Cao-Minh Ta and Y. Hori, "Convergence improvement of efficiency optimization control of induction motor drives", IEEE Trans, Ind Appl. , vol.37, no.6, pp. 1746-1753, Nov / Dec 2001.
- [7] I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in Induction motor adjustable speed drives", IEEE Trans, on Ind. Electronics, vol.43, no.1, pp. 226-231, Feb 1996.
- [8] S. Lim and K. Nam, "Loss-minimising control scheme for induction motors," Electric Power Applications, IEE Proceedings - , vol.151, no.4, pp.385-397, 7 July 2004
- [9] D.S. Krischen and D. W. Novotny, "On-line efficiency optimization of a variable frequency Induction motor drive", IEEE Trans, Ind. Appl., vol.1A-21, no.4, pp. 610-616, May/June 1985.
- [10] P. Famouri and J. J. Cathey, "Loss minimization control of an Induction motor drive", IEEE Trans, Ind. Appl., vol.27, no.1, pp. 32-37, Jan/Feb 1991.

Abstract – In this paper the optimal strategy for controlling the induction machine drives in the application of electric vehicle is presented within whole speed region. Strategy is based on two criteria – criteria of obtaining minimum losses in IM drive and criteria for maximum torque capacity exploitation in the IM drive. Presented strategy completely satisfies the conditions which are demanded from considered application in electric vehicles. Approach based on loss model controller is described as a primary method for optimality in steady state condition of a drive. In dynamic state of a drive the primal and therefore the optimal criterion is suggested so as to obtain the maximization of torque capacity in drive concerning the available current and voltage constraints. Graphical approach based on the latter analytics is presented within the drive application of interest.

OPTIMAL CONTROL STRATEGY IN ELECTRIC VEHICLE BASED IM DRIVE IN WHOLE SPEED REGION

Vladimir Popovic, Milos Kukic, Djura Oros, Roberto Varga, Darko Marčetić