

Analiza magnetopobudnih sila u multifaznim mašinama u sklopu integrisanih punjača za električna vozila

ALEKSANDAR R. MILIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

SLOBODAN N. VUKOSAVIĆ, Univerzitet u Beogradu

Elektrotehnički fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 629.3-835

DOI: 10.5937/tehnika1803391M

Rad se bavi analizom magnetopobudnih sila (MPS) u multifaznim mašinama u sklopu integrisanih punjača u toku brzog punjenja baterija u električnim vozilima (EV). Analitička razmatranja su pokazala da se primenom odgovarajuće topologije energetskog pretvarača i korišćenjem raspoloživih stepeni slobode može ostvariti brzo punjenje bez stvaranja obrtnog polja u multifaznoj mašini. Pokazano je da je ovakav režim rada moguće postići korišćenjem osnovnih elemenata vučnog sistema i to bez promene konfiguracije pri prelasku iz vučnog u režim punjenja. Izvršene su simulacije dve različite topologije integrisanih punjača koje sadrže električne mašine sa asimetričnim šestofaznim i asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem. Kao rezultat simulacija dobijena je prostorno-vremenska raspodela rezultantnih MPS u mašinama. Na osnovu dobijenih rezultata formulisane su smernice za projektovanje motor-pretvaračke grupe za vuču i punjenje baterije EV.

Ključne reči: multifazne mašine, integrisani punjači, električna vozila, sistemi za brza punjenje baterija

1. UVOD

Automobili sa endotermičkim motorom sagorevaju fosilna goriva i emituju ugljen dioksid i druge štetne materije. Usled klimatskih promena i postepenog iscrpljivanja rezervi fosilnih goriva, u porastu je razvoj i komercijalna upotreba električnih vozila (EV). Problemi koji ograničavaju širu primenu EV vezani su za izvore električne energije u sklopu vozila i sisteme za punjenje. Punjač predstavlja deo sistema za punjenje koji se jednim svojim delom, ili u potpunosti, nalazi u sklopu EV.

Punjač koji se nalazi u okviru EV naziva se on-board, dok se kod off-board verzije jedan deo punjača nalazi u sklopu stanice za punjenje EV. Off-board sistemi omogućavaju punjenje baterije većim snagama i izvođenje galvanske izolacije u sklopu stanice za punjenje, istovremeno smanjujući gabarit, težinu i cenu onog dela punjača koji se nalazi u EV [1]. Sa druge strane, on-board sistemi pružaju manju zavisnost korisnika od infrastrukture [2]. On-board sistemi se mogu

realizovati korišćenjem integrisanih ili klasičnih topologija punjača [3].

Prihvatljivost EV za tipičnog korisnika zavisi od brzine punjenja. U idealnom slučaju, punjenje ne bi trebalo da traje značajno duže od prosečnog zadržavanja klasičnih vozila na benzinskim pumpama. Brzo punjenje podrazumeva veliku snagu koja se preuzima iz trofaznih sistema naizmeničnog napona ili sistema jednosmernih struja i napona [3]. U slučaju primene on-board sistema, brza punjenja su moguća jedino korišćenjem integrisanih punjača i trofaznog naizmeničnog sistema napajanja.

Integrisani punjači koriste elemente vučnog sistema u sklopu punjača EV. Funkciju ispravljača najčešće obavlja vučni inverter, dok namotaji vučnog motora preuzimaju ulogu filterskih prigušnica. Između jednosmernih sabirnica invertora i baterije EV koristi se čoper prikazan na slici 1, koji može obavljati pretvaranje u oba smera, i koji usklađuje napon invertora i napon baterije. Opisana realizacija integrisanog punjača oslanja se na okolnost da se režim električne vuče i režim punjenja ne preklapaju. Korišćenjem istih elemenata za potrebe vuče i punjenja smanjuje se ukupan broj elemenata električnog sistema EV. Vozilo je lakše, jeftinije, dok sistem za punjenje zauzima manje prostora. Kako se svi elementi punjača nalaze u EV, smanjuju se zahtevi korisnika za infrastrukturom za

Adresa autora: Aleksandar Milić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

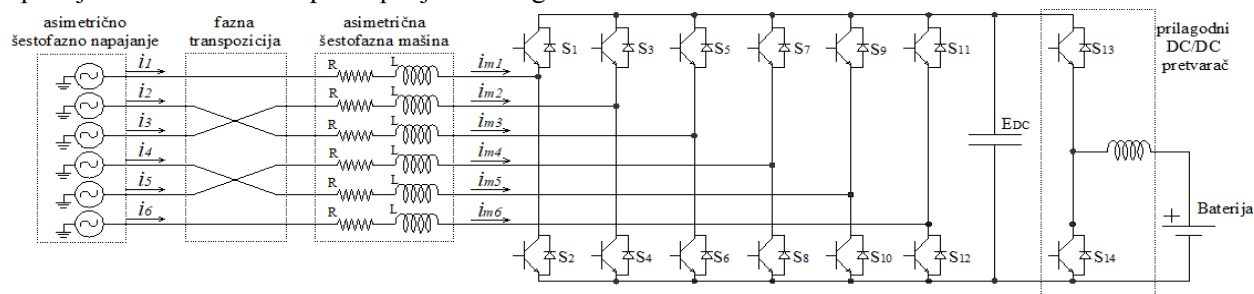
e-mail: milic.aleksandar@etf.ac

Rad primljen: 20.03.2018.

Rad prihvaćen: 18.05.2018.

punjenje. Sa druge strane, elementi vučnog sistema su predviđeni za velike snage, pa je njihovim korišćenjem u punjaču moguće postići velike brzine punjenja. Takođe, korišćenjem vučnog invertora kao aktivnog ispravljača u ulaznom stepenu punjača omogućava

proces punjenja sa jediničnim faktorom snage i minimalnim harmonijskim izobličenjima. Na taj način integrisani punjači rešavaju gotovo sve probleme koje unose klasične topologije punjača.



Slika 1 - Topologija integrisanog punjača sa šestofaznom mašinom sa asimetričnim statorskim namotajem

Ipak, integrisani punjači unose svoje probleme kao što su relativno složena hardverska i softverska implementacija i potreba za poluprovodničkim prekidačima za velike struje. Najveći nedostatak integrisanih punjača je stvaranje neželjenog obrtnog polja u električnoj mašini (tj. vučnom motoru) i posledičnog elektromagnetskog momenta tokom brzog punjenja baterije EV.

Namotaji vučnog motora se tokom punjenja koriste kao prigušnice u okviru ulaznog filtra integrisanog punjača. Krajevi faznih namotaja se priključuju na trofaznu mrežu. Usled uspostavljanja trofaznog sistema struja u namotajima mašine dolazi do stvaranja obrtnog polja. Kao posledica obrtnog polja stvara se momenat koji može pokrenuti rotor mašine i delove prenosnika koji su spregnuti sa rotorom. Neželjena rotacija prouzrokuje nepotrebno habanje mehaničkih delova, buku i smanjenje ukupne efikasnosti sistema. Problem je moguće rešiti primenom kvačila i odvajanjem mašine od ostatka mehaničkog sistema, čime se formirani momenat ne prenosi na elemente prenosnika niti na točkove vozila [4]. Postoje i topologije sa mehaničkim kočnicama koje rotor drže u stanju mirovanja i ne dozvoljavaju rotaciju [5]. Ipak, mirovanje rotora u obrtnom polju dovodi do uvećanja gubitaka na rotoru i velikih struja magnećenja. Ovo dovodi do smanjenja efikasnosti sistema za punjenje, a dodatni mehanički elementi smanjuju njegovu pouzdanost i povećavaju cenu. Proces brzog punjenja bez stvaranja obrtnog polja može se postići i primenom specijalnih mašina. Posebna realizacija statorskih namotaja može dovesti do poništavanja fluksa u pojedinim fazama na način koji smanjuje ili eliminiše obrtno magnetsko polje [6]. Ipak, da bi se ovo realizovalo, potrebno je izvršiti rekonfiguraciju hardvera pri prelasku iz vučnog u režim punjenja.

Takođe, potrebna je i specijalna mašina sa izvodima na sredini faznih namotaja, kao i pretvarač sa 12 prekidača. Brzo punjenje se može ostvariti i korišćenjem sinhronne mašine sa pobudnim namotajem,

čiji su krajevi u režimu punjenja otvoreni [7]. Mane ovog sistema su potreba za hardverskom rekonfiguracijom pri prelasku između radnih režima i potreba za pobudnim sistemom.

Može se zaključiti da primenom trofaznih mašina u integrisanim punjačima EV nije moguće ostvariti brzo punjenje bez stvaranja obrtnog polja u mašini. Ovaj proces je moguć uz korišćenje dodatnih ili specijalnih elemenata vučnog sistema ili uz izmene u topologiji. Predmet razmatranja u ovom radu je analiza i projektovanje multifaznih mašina u integrisanim punjačima. U drugom poglavlju data su analitička razmatranja mogućih primena multifaznih mašina u okviru brzih punjača. U trećem poglavlju su data analitička razmatranja i rezultati simulacija posmatranih sistema. Zaključci su dati u poglavlju IV.

2. ANALIZA MULTIFAZNIH INTEGRISANIH PUNJAČA

Integrisani punjači sa trofaznim mašinama se tokom brzog punjenja EV napajaju trofaznim simetričnim sistemom napona. Analiza ovih punjača pojednostavljuje se primenom transformacija kao što su Parkova i Klarkina. Kada se u punjaču koriste multifazne mašine i pretvarači, tada je fazni pomeraj napona u pojedinim namotajima zavisao od načina izvođenja statorskog namotaja. Stoga, statorski namotaj određuje i sistem napona koji neće dovesti do stvaranja obrtnog polja u režimu brzog punjenja.

Analiza n -faznog punjača sprovodi se transformacijom osnovnog sistema i posmatranjem uprošćenog modela namotaja i magnetskog kola. Transformacije koriste odgovarajuće n -dimenzione matrice određene konfiguracijom namotaja statora, brojem faza i brojem izolovanih zvezdišta integrisane mašine. Svaka mašina i svaki statorski namotaj ima odgovarajuću transformacionu matricu. Primenom transformacija na n -faznu mašinu dobija se sistem jednačina prikazan u radu [8] koji u potpunosti opisuje njeno ponašanje. Iz

sistema jednačina [8] može se videti da pored struja osnovnog $d-q$ sistema, koje postoje i kod standardne trofazne mašine, postoje i dodatne komponente struje koje nastaju usled prisustva većeg broja faza. Dobijeni strujni parovi ($i_d - i_q$, $x_k - y_k$, $k=1, 2, 3, \dots$) mogu se izraziti u formi kompleksnih brojeva, koji predstavljaju prostorne vektore. Svaki prostorni vektor opisuje jednu ravan sa dve komponente struje. Iz sistema [8] može se videti da je magnetska sprega između statora i rotora opisana isključivo jednačinama $d-q$ sistema.

Primenom navedenih transformacija na sistem od 6 faznih struja dobijaju se u opštem slučaju dve međusobno normalne ravni i dve nulte komponente struje, pri čemu stvaranje obrtnog polja određuje isključivo ravan koja sadrži $d-q$ komponente struje [7]. U motorom režimu rada nulte komponente struje se ne mogu uspostaviti ako su zvezdišta izolovana, dok će u slučaju gde su zvezdišta spojena doći do uspostavljanja jedne nulte komponente struje. Druga $x-y$ ravan ne doprinosi stvaranju obrtnog polja. Komponente $x-y$ ravni predstavljaju dodatne stepene slobode. Isti rezultat transformacije, dve međusobno normalne ravni, dobija se i transformisanjem sistema od 5 faznih struja. Razlika se ogleda u broju nultih komponenti struje. U opštem slučaju [7], petofazni sistem daje rezultat transformacija sa samo jednom nultom komponentom struje. Prednost petofaznog sistema je što za isti broj dodatnih stepena slobode koristi jednu granu manje u pretvaraču, dok se prednost šestofaznog sistema ogleda u uvećanju ukupne snage zbog prisustva dodatne faze.

Za brzo punjenje baterije EV bez stvaranja obrtnog polja u mašini potrebno je modifikovati struje $d-q$, odnosno $\alpha-\beta$ sistema. Ukoliko vektor struje $\alpha-\beta$ sistema ima samo realnu (ili samo imaginarnu) komponentu, tada u mašini ne postoje uslovi za stvaranje obrtnog magnetskog polja niti momenta. Polje u mašini je tada pulsacione prirode. Uz to, vrednosti strujnih komponenti dodatnih $x-y$ ravni tada postaju različite od nule. Potrebna modifikacija struja $\alpha-\beta$ ravni postiže se adekvatnim zadavanjem struja osnovnog multifaznog

sistema. Potrebne jačine faznih struja se određuju iz transformacione matrice za posmatranu mašinu.

Na slici 1 data je topologija integrisanog punjača koja u sebi sadrži mašinu sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem. Namotaj ove mašine može se predstaviti kao dve trofazne zvezde prostorno pomerene za ugao od 30° . Namotaji u okviru svake zvezde su prostorno pomereni za 120° tako da je za potrebe razvijanja vučnog momenta na krajeve mašine potrebno dovesti sistem struja koji je opisan jednačinama (1). Da bi se postigao proces brzog punjenja EV bez stvaranja obrtnog polja u mašini, prema [8], potrebno je izvršiti faznu transpoziciju kao što je prikazano na slici 1. Tada se u namotaje dovodi sistem jednačina struja (2).

$$\begin{aligned} i_1 &= I \sin(\omega t) & i_4 &= I \sin(\omega t - \pi/6) \\ i_2 &= I \sin(\omega t - 4\pi/6) & i_5 &= I \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_3 &= I \sin(\omega t - 8\pi/6) & i_6 &= I \sin(\omega t - 9\pi/6) \end{aligned} \quad (1)$$

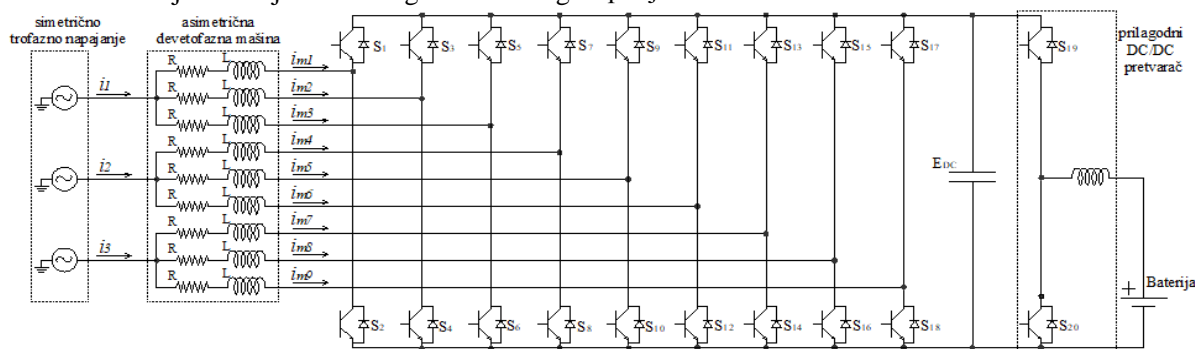
$$\begin{aligned} i_{m1} &= i_1 & i_{m4} &= i_5 \\ i_{m2} &= i_3 & i_{m5} &= i_4 \\ i_{m3} &= i_2 & i_{m6} &= i_6 \end{aligned} \quad (2)$$

Kada se na sistem jednačina (2) primeni odgovarajuća transformaciona matrica za mašinu sa šestofaznim asimetričnim namotajem iz [9], dobija se raspregnuti sistem jednačina (3).

$$\begin{aligned} i_\alpha &= 0 & i_x &= \sqrt{6}I \cos(\omega t) \\ i_\beta &= 0 & i_y &= \sqrt{6}I \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

Iz sistema (3) može se zaključiti su struje $\alpha-\beta$ sistema jednake nuli i da ne postoje uslovi za stvaranje obrtnog magnetskog polja u mašini. Punjenje EV se obavlja u potpunosti pomoću struja dodatnog $x-y$ sistema koje imaju učestanost ω i amplitudu $\sqrt{6} \cdot I$.

Dodatni stepen slobode koji postoji u šestofaznoj mašini sa asimetričnim namotajem iskorišćen je kako bi se postiglo brzo punjenje EV pomoću integrisanog punjača.



Slika 2 - Topologija integrisanog punjača sa devetofaznom mašinom sa asimetričnim statorskim namotajem

Gotovo identična analiza može se primeniti i na punjač prikazan na slici 2, koji u sebi integriše devetofaznu mašinu sa asimetričnim namotajem. Namotaj statora ove mašine može se posmatrati kao tri trofazne zvezde prostorno pomerene za ugao od 20° . Namotaji u zvezdama su prostorno pomereni za 120° . Za postizanje procesa brzog punjenja bez stvaranja obrtnog polja u mašini [8], na tri izolovana zvezdišta ove mašine potrebno je dovesti trofazni sistem struja (4). Tada u namotajima mašine postoje struje prikazane sistemom (5). Ako se na sistem struja (5) primeni transformaciona matrica iz [9] za devetofaznu mašinu sa asimetričnim statorkim namotajem, dobija se raspregnuti sistem struja (6).

$$\begin{aligned} i_1 &= I \sin(\omega t) \\ i_2 &= I \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_3 &= I \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_{m1} &= i_1/3 & i_{m4} &= i_2/3 & i_{m7} &= i_3/3 \\ i_{m2} &= i_1/3 & i_{m5} &= i_2/3 & i_{m8} &= i_3/3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_{m3} &= i_1/3 & i_{m6} &= i_2/3 & i_{m9} &= i_3/3 \\ i_\alpha &= 0 & i_{x1} &= I \left[2/3 \cos(\omega t) + \sqrt{3}/3 \sin(\omega t) \right] \\ i_\beta &= 0 & i_{y1} &= -I\sqrt{3}/3 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{x2} &= 0 & i_{x3} &= 0 \\ i_{y2} &= 0 & i_{y3} &= 0 \end{aligned}$$

Iz sistema struja (6) može se videti da za razliku od ranije analizirane šestofazne mašine ovde postoje tri dodatna stepena slobode (tri dodatna prostorna vektora). Kao i u ranije pruženoj analizi, struje osnovne α - β ravni imaju nulte vrednosti, dok struje ravni x_1 - y_1 imaju vrednosti različite od nule. Preostali prostorni vektori su jednaki nuli i mogu se iskoristiti za dalja poboljšanja sistema za punjenje.

Na osnovu sistema (3) i (6) može se zaključiti da je primenom odgovarajuće topologije pretvarača i multifazne mašine u integrisanom punjaču moguće postići brzo punjenje baterije EV bez stvaranja obrtnog polja u mašini, bez korišćenja dodatnih komponenti i bez rekonfiguracija hardvera između vučnog i režima za punjenje. U slučaju primene devetofazne topologije punjača, prikazane na slici 2, koristi se trofazni simetrični izvor i nema zahteva za prevezivanjem zvezdišta. Šestofazna topologija punjača zahteva dodatno prevezivanje zvezdišta i asimetrični šestofazni izvor napajanja (slika 1), koji se prema [10] može napraviti od simetričnog trofaznog izvora korišćenjem odgovarajućeg tronamotajnog transformatora. Ova topologija ima prednost u korišćenju manjeg broja prekidača snage.

3. ANALIZA MAGNETOPOBUDNIH SILA

Ranije je analitičkim razmatranjima pokazano da sistemi prikazani na slikama 1 i 2 imaju komponente vektora α - β ravni jednake nuli, i da postoje dodatni x - y vektori koji se mogu iskoristiti za potrebe brzog punjenja baterije EV pri kojem ne dolazi do stvaranja obrtnog magnetskog polja u mašini integrisanog punjača. U nastavku rada su simulacijama proverene teorijske tvrdnje da se adekvatnom realizacijom napajanja može postići brz proces punjenja bez stvaranja obrtnog polja. Sprovedene simulacije omogućavaju proučavanje fizičkih pojava u električnoj mašini koja se koristi u okviru integrisanog punjača.

Simulacije ovde podrazumevaju proračun prostorno-vremenske raspodele MPS u električnim mašinama na osnovu pretpostavljenih faznih struja i geometrije mašine. Na osnovu prostorno-vremenske raspodele MPS može se izvesti zaključak o prisustvu i jačini pulsacionih i obrtnih komponenti magnetskog polja u električnoj mašini.

U ovom radu, određivanje MPS podrazumeva proračun magnetskog polja u konačnom broju tačaka duž obima mašine, i to u konačnom broju ekvidistantnih trenutaka u okviru jednog perioda promene statorkih struja. Za broj tačaka u prostoru uzet je broj žlebova. U oba sistema razmatrana je mašina sa 36 žlebova na statoru, pa je MPS određivana u 36 tačaka, u zoni svakog pojedinačnog žleba.

Simulacije su sprovedene pod pretpostavkom da se u sistemima nalaze asinhronne mašine sa kaveznom rotorom i da je statorki namotaj realizovan kao jednoslojni sa jednim provodnikom po žlebu i bez skraćenog navojnog koraka. Rad pretvaračke grupe, preko koje se energija prenosi od mašine do baterije, nije analiziran u ovom radu.

Dodatno se pretpostavlja da je mrežna struja idealno prostoperiodična. Dakle, pretpostavlja se da u svakom žlebu postoji prostoperiodična struja koja ne sadrži više harmonike. Bez gubitka opštosti, polazi se od pretpostavke da u namotajima postoji struja jačine 1 A i frekvencije 50 Hz.

Za napajanje sistema prikazanih na slikama 1 i 2 koriste se sistemi jednačina struja (2) i (5), respektivno. U proračunu je usvojena pretpostavka da se magnetsko polje stvara pod uticajem statorkih struja, dok se uticaj drugih struja ili stalnih magneta može zanemariti. Nisu uvaženi efekti zasićenja u gvožđu mašine, uticaj vihornih struja i reakcije kaveznog rotora na raspodelu polja u mašini. Kao rezultat simulacija dobijaju se talasi rezultatnih MPS koji postoje mašinama u sistemima prikazanim na slikama 1 i 2 tokom procesa brzog punjenja, odnosno pri primenjenom trofaznom napajanju. Rezultati su dobijeni na osnovu proračuna sprovedenih u programskom alatu Matlab.

Proračun sadrži tri koraka. Najpre su navojci statora definisani i grupisani u fazne navojne funkcije. Dalje su navojne funkcije množene odgovarajućim faznim strujama. Sabiranjem ovako formiranih faznih MPS, dobijene su rezultatne MPS u mašinama. Tačnost simulacija je proverena primenom istog postupka na poznatom sistemu, monofazno napajanoj trofaznoj mašini. Svaki od koraka je detaljnije predstavljen u nastavku teksta.

U prvom koraku je za svaki od faznih namotaja utvrđena navojna funkcija, tj. funkcija koja opisuje prostornu raspodelu provodnika (žlebova) i koja direktno utiče na talasni oblik MPS, sadržaj viših harmonika. Najpre su definisani navojci u mašini. Uvažavajući način formiranja statora sa punim navojnim korakom, navojak čine provodnici u dijametralno postavljanim žlebovima. Postojanje struja u ovako definisanom navojku dovodi do pravougaone promene MPS duž obima statora, koja se predstavlja izrazom (7). Svaki navojak statora je definisan izrazom (7) u kojem je v oznaka faze, i oznaka navojka u posmatranom faznom navojnom pojasu, dx korak ožlebljenja statora, $k = f(v, i)$ pomeraj navojka i posmatrane faze v , a x ugaoni pomeraj koji uzima diskretne vrednosti. Pretpostavljeno je da se u svakom žlebu mašine nalazi jedan provodnik. U opštem slučaju za N provodnika po žlebu, dobijene rezultate je potrebno pomnožiti faktorom N .

$$U_{vi} = N \cdot \text{square}(x - kdx) \quad (7)$$

Za obe analizirane mašine definisano je osamnaest navojnih kontura koje doprinose ukupnom polju u mašini. Navojne konture su fazno pomerene za ugao koji odgovara žlebnom rastojanju $k \cdot dx$. Fazna navojna funkcija dobija se sabiranjem navojnih doprinosa posmatranog navojnog pojasa uvažavanjem međusobnog prostornog pomeraja između navojaka (8). Jednoj fazi je u slučaju šestofazne mašine dodeljeno 6 žlebova (3 navojka, $z = 3$), a 4 žleba po fazi je dodeljeno u slučaju devetofazne mašine (2 navojka, $z = 2$).

$$W_v = \sum_{i=1}^z U_{vi} \quad (8)$$

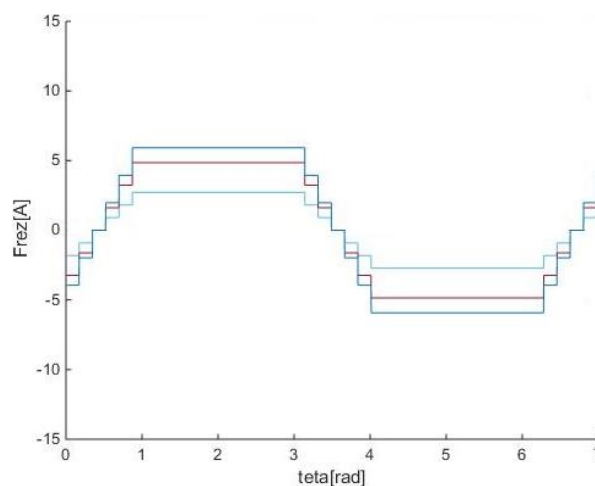
U drugom koraku, fazne MPS su dobijene množenjem faznih navojnih funkcija sistemima prostoperiodičnih struja (2) i (5), pri čemu svaka fazna navojna funkcija W_v ima odgovarajuću faznu struju i_{mv} , kao što je prikazano izrazom (9). Navojna funkcija W_v opisuje prostornu raspodelu MPS faze v , dok su promene faznih MPS u vremenu uvažene promenama faznih struja i_{mv} u vremenu. Kako je pri proračunu MPS izvršena diskretizacija po vremenu, fazne navojne funkcije se za svaki od analiziranih trenutaka množe odgovarajućim vrednostima struje. Usled promene jačina struja u vremenu menjaju se navojni

doprinosi, pa i fazne MPS. Uvažavanjem u izrazu (9) promene faznih struja u vremenu, dobijaju se vrednosti faznih MPS u 36 tačaka duž obima statora za svaki od analiziranih trenutaka.

$$F_v(t) = W_v \cdot i_{mv}(t) \quad (9)$$

Na slici 3 prikazana je familija talasnih oblika jedne fazne MPS kod šestofazne mašine. Fazne MPS imaju identične talasne oblike, međusobno fazno pomerene usled prostornog pomeraja žlebova.

Prikazani talasni oblici predstavljaju promenu jedne fazne MPS duž obima statora ($0-2\pi$), u tri definisana trenutka. Svaki talasni oblik odgovara jednoj jačini struje, odnosno jednom trenutku u vremenu. Talasni oblici su dobijeni primenom funkcije *plot* (x, F_v) u programskom alatu Matlab.



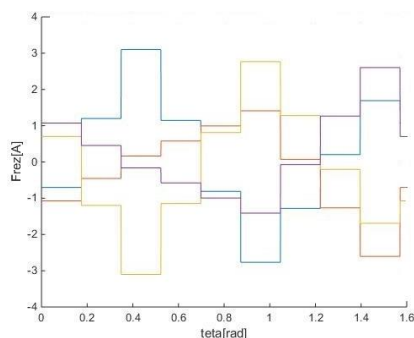
Slika 3 - Talasni oblik proizvoljne fazne MPS u tri definisana trenutka

Posmatrajući sliku 3, može se zaključiti da polje ne putuje duž obima statora već da samo pulsira usled promene jačine fazne struje u vremenu. Promene jačine struje u vremenu u posmatranom navojnom pojasu menjaju amplitudu oscilovanja fazne MPS, ali ne i relativni udeo viših harmonika u talasnom obliku MPS.

Dakle, način motanja statorskog namotaja i broj žlebova na statoru određuje harmonijski sastav MPS, dok jačina struje i broj provodnika po žlebu određuju amplitude harmonika u spektru. Stepenasta promena MPS posledica je konačnog broja statorskih žlebova. Usled uvažanih zanemarenja može se videti da je jačina magnetskog polja u oblasti zupca konstantna.

U poslednjem koraku proračuna dobijena je rezultatna MPS u mašini sabiranjem svih doprinosa faznih MPS. Rezultatne MPS u šestofaznoj i devetofaznoj mašini se dobija kada parametar n u izrazu (10) uzima vrednost 6 i 9, respektivno. Uvažavanjem u izrazu (10) promene faznih struja u vremenu, dobijaju se vrednosti

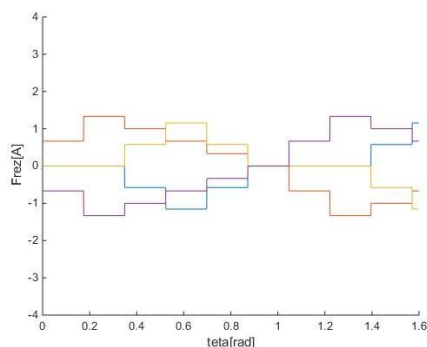
rezultantne MPS u 36 tačaka duž obima statora za svaki od analiziranih trenutaka u proračunu.



Slika 4 - Rezultantna MPS u mašini sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem u sklopu punjača na slici 1 u 4 analizirana trenutka

$$F_{na}(t) = \sum_{v=1}^n W_v \cdot i_{mv}(t) \quad (10)$$

Talasni oblici prikazani na slikama 4 i 5 predstavljaju prostorno-vremensku raspodelu rezultantnih MPS u električnim mašinama datim na slikama 1 i 2. Odnosno, predstavljene su promene jačine magnetskog polja duž obima statora u 4 analizirana trenutka (5 ms, 10 ms, 15 ms, 20 ms).

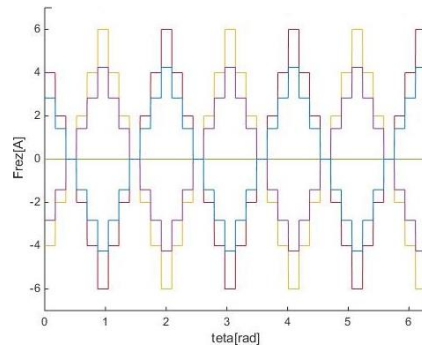


Slika 5 - Rezultantna MPS u mašini sa asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem u sklopu punjača na slici 2 u 4 analizirana trenutka

Može se videti sa slika 4 i 5 da kao posledica konačnog broja žlebova po obimu statora, rezultantno polje u mašini sadrži prostorne harmonike višeg reda. Rezultantne MPS se mogu predstaviti kao sume direktnih i inverznih komponenti polja, odnosno kao sume obrtnih i pulsacionih polja. Kumulativno dejstvo kod šestofazne mašine, slika 4, je takvo da postoje oscilacije MPS usled delovanja više obrtnih polja, u direktnom ili inverznom smeru rotacije, ali da ne postoje uslovi za stvaranje obrtnog polja koje bi dovelo do značajnijeg elektromagnetskog momenta. U slučaju devetofazne mašine, slika 5, može se zaključiti da rezultantna MPS u vremenu ima dominantno pulsacioni karakter sa manjim sadržajem obrtnih polja, pa ni u drugom slučaju ne postoje uslovi za stvaranje većeg elektromagnetskog momenta. Dakle, u kumulativnom

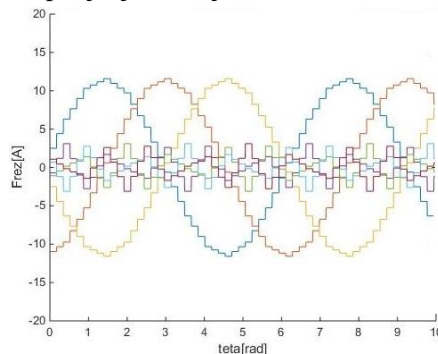
efektu u električnim mašinama u oba integrisana punjača postoje pulsacione promene polja koje nastaju kao posledica struja x-y ravni koje se koriste za punjenje baterije EV, i uz uvažene pretpostavke ne postoje uslovi za stvaranje elektromagnetskog momenta. Stoga, uklonjen je najveći nedostatak integrisanih punjača i stvorena mogućnost da se mašina u datim režimima rada koristi kao filterska prigušnica na ulazu u aktivni ispravljač.

U cilju provere predstavljenog proračuna, izvršena je simulacija poznatog sistema, integrisanog punjača sa monofazno napajanom trofaznom asinhronom mašinom [11]. Naime, u električnoj mašini u sklopu analiziranog punjača postoje pulsacione promene polja usled napajanja mašine nultim komponentama struje, pri čemu ne postoje uslovi za stvaranje većeg elektromagnetskog momenta. Simuliranjem sistema iz [11], prema ranije predstavljenom proračunu uz sve uvažene pretpostavke i zanemarenja, dobijen je talasni oblik prikazan na slici 6.

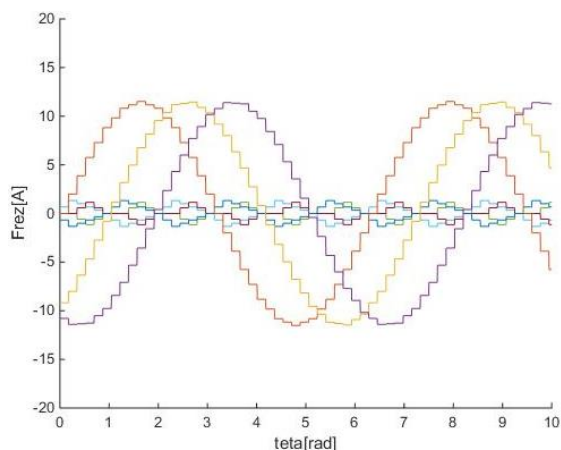


Slika 6 - Rezultantna MPS u monofazno napajanoj trofaznoj asinhronoj mašini sa uzemljenim zvezdištem

Dobijeni talasni oblici potvrđuju ispravnost priloženog simulacionog postupka, ali i ranije iznetih teorijskih tvrdnji. Sa slike 6 se može primetiti i da su pulsacije polja značajne, što dovodi do uvećanih gubitaka u bakru i gvožđu mašine. Takođe, veliki nedostatak ovakvog trofaznog punjača je to što podržava isključivo spora punjenja baterije EV.



Slika 7 – Poređenje rezultantnih MPS u mašini sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem u režimima punjenja i pražnjenja baterije



Slika 8 – Poređenje rezultantnih MPS u mašini sa asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem u režimima punjenja i pražnjenja baterije

Na slikama 7 i 8 predstavljeno je poređenje talasnih oblika rezultantnih MPS u električnim mašinama u režimima punjenja baterije i vučnom režimu (pražnjenje baterije). U oba radna režima posmatrani su identični sistemi sa jednim provodnikom po žlebu i strujom jačine 1A. Na slikama se mogu jasno uočiti putujuća (obrotna) polja, koja postoje u režimu vuče i koja imaju znatno veće amplitude od komponenti polja koja postoje u režimu punjenja baterije. Takođe, može se uočiti da su oscilacije polja manje kod devetofazne topologije punjača, što dovodi do veće energetske efikasnosti pri režimu punjenja baterije. Nedostatak devetofazne topologije se ogleda u korišćenju šest dodatnih prekidača snage u pretvaračkoj grupi.

4. ZAKLJUČAK

Primena integrisanih punjača rezultuje uvećanom snagom i skraćenim vremenom punjenja, manjom cenom, težinom i zapreminom onog dela punjača koji se nalazi u vozilu, kao i jednostavnijom infrastrukturu. Glavni nedostatak integrisanih punjača je stvaranje elektromagnetskog momenta i gubitaka u mašini tokom procesa brzog punjenja. U radu su predstavljene dve topologije integrisanih punjača, sa asimetričnim šestofaznim i devetofaznim statorskim namotajem mašina, koje ne dovode do stvaranja neželjenog obrtnog polja.

Simulacijama predstavljenih topologija dobijene su prostorno-vremenske raspodele rezultantnih MPS u električnim mašinama. Utvrđeno je da se u datim uslovima ne stvara obrtno magnetsko polje. U svrhu verifikacije predloženog simulacionog modela, izvršena je simulacija monofazno napajanog integrisanog punjača sa trofaznom asinhronom mašinom. Pored toga, prostorno-vremenska raspodela MPS je određena i predstavljena i za pomenuti sistem.

Kao glavne prednosti multifaznih topologija u odnosu na klasične trofazne navedene su veća energetska

efikasnost i veće ostvarive brzine punjenja. Poređenjem priloženih multifaznih topologija, iz dobijenih rezultata se može zaključiti da kod topologije sa asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem mašine energiju za punjenje EV prenose nulte komponente struje i da su pulsacije polja u mašini vrlo male. Takođe, kod topologije sa devetofaznom mašinom ne zahteva se promena veze zvezdišta, što je slučaj kod topologije sa šestofaznom mašinom. Ipak, devetofazna topologija punjača zahteva više prekidača u pretvaraču tako da je preporučljiva za veće snage punjenja. Topologija sa mašinom sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem ima neznatno veće pulsacije polja i prenos energije koji se deli na veći broj prostorno-vremenskih harmonika MPS. Pored toga, topologija integriše jednostavniji pretvarač što olakšava hardversku i softversku implementaciju, pa se može koristiti za manje snage punjenja. Predstavljene topologije ne koriste dodatne komponente van elemenata vučnog sistema i ne zahtevaju rekonfiguraciju hardvera pri prelasku iz vučnog u režim punjenja. Uz primenu harmonijske analize prostorno-vremenske raspodele MPS, dobijeni talasni oblici se mogu koristiti za određivanje obrtnih i pulsacionih komponenti magnetskog polja radi boljeg upoznavanja fizičkih pojava u mašini. Tako dobijen harmonijski sastav MPS se može upotrebiti za projektovanje električne mašine i za poboljšanje performansi procesa brzog punjenja u predstavljenim sistemima.

LITERATURA

- [1] S. Haghbin, K. Khan, S. Lundmark, M. Alakula, O. Carlson, M. Leksell, and O. Wallmark, "Integrated chargers for EV's and PHEV's: Examples and new solutions," in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines*, pp. 1–6, 2010.
- [2] L. Solero, Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 144–149, Jan. 2001.
- [3] Yilmaz, M., Krein, P.T, Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles', *IEEE Trans. Power Electron.*, 28, (5), pp. 2151–2169, 2013.
- [4] S. Haghbin, S. Lundmark, M. Alakula, and O. Carlson, An isolated high-power integrated charger in electrified vehicle applications, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4115–4126, Nov. 2011.
- [5] F. Lacressonniere and B. Cassoret, Converter used as a battery charger and a motor speed controller in an industrial truck, in *Proc. EPE*, pp. 1–7, 2005.
- [6] De Sousa, L, Silvestre, B, Bouchez, B, A combined multiphase electric drive and fast battery charger for

- electric vehicles. *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. VPPC*, pp. 1–6, 2010.
- [7] Subotic I, Bodo N, Levi E, Dumnicevic B, Milicevic D, Katic V, et al. Overview of fast on-board integrated battery chargers for electric vehicles based on multiphase machines and power electronics. *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 10, Iss. 3, pp. 217–229, 2016.
- [8] Levi E, Jones M, Vukosavic S.N, et al. A novel concept of a multiphase, multimotor vector controlled drive system supplied from a single voltage source inverter, *IEEE Trans. Power Electron.*, 19, (2), pp. 320–335, 2004.
- [9] Levi E, Bojoi R, Profumo F, et al. Multiphase induction motor drives – a technology status review, *IET Electric Power Appl.*, 1, (4), pp. 489–516, 2007.
- [10] I. Subotic, E. Levi, M. Jones, and D. Graovac, An integrated battery charger for EVs based on an asymmetrical six-phase machine, *IEEE Industrial Electronics Society Conf. IECON*, Vienna, Austria, pp. 7242–7247, 2013.
- [11] G. Pellegrino, E. Armando, and P. Guglielmi, An integral battery charger with power factor correction for electric scooter, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 751–759, Mar. 2010.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE MAGNETOMOTIVE FORCE IN THE MULTIPHASE MACHINES WITHIN INTEGRATED BATTERY CHARGERS FOR THE ELECTRIC VEHICLES

In this paper we discuss magnetomotive force (MMF) in the multiphase machines during fast charging of batteries in electric vehicles (EV). Analytical considerations show that using an adequate topology of power converter and additional levels of freedom one can achieve a fast charging without creating any revolving magnetic field within the machine. They also show that this regime can be achieved by using only the elements of the traction system and without changing the configuration between charging and traction regimes. The simulation models have been developed for the relevant configurations of the stator asymmetrical winding in six-phase and nine-phase integrated electrical machines within the charging system of an EV. As the result, the time-space distribution of the magnetic field in charging mode is obtained. Based on the results, suggestions are given for the design of an integrated traction / charging system within electric vehicles.

Key words: *Multiphase machines, electrical vehicles, integrated chargers, fast battery charger*