

UPRAVLJENJE ELEKTROMOTORIMA U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

Božo Ilić¹ Branko Savić² Rastovac Dragan³

Rezime: Električne automobile pogoni elektromotor, koristeći električnu energiju uskladištenu u bateriji. Delovi elektromotornih pogona električnih automobila su: punjač baterije, baterija u kojoj je uskladištena energija, vučni pretvarač i elektromotor. Cilj ovog rada jeste da prikaže kako se može upravljati radom elektromotora u elektromotornim pogonima električnih automobila.

Ključne reči: elektromotorni pogon, asinhroni motor, električni automobil, upravljanje, kontroler.

CONTROL OF ELECTRIC MOTORS IN ELECTRIC MOTOR DRIVES OF ELECTRIC CARS

Abstract: Electric cars are powered by an electric motor, using electricity stored in a battery. Parts of the electric motor drive of an electric car are: battery charger, battery in which energy is stored, traction converter and electric motor. The aim of this paper is to show how the operation of electric motors in the electric drives of electric cars can be managed.

Key words: electric drive, asynchronous motor, electric car, management, controller.

1. UVOD

Električni automobili su automobili koje pogoni elektromotor, umesto motora s unutrašnjim sagorevanjem, koristeći električnu energiju uskladištenu u bateriji.

Prednosti električnih u odnosu na automobile sa motorima s unutrašnjim sagorevanjem, su [1]:

1. **Električni automobili doprinose smanjenju zagađenja vazduha u gradovima i smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte.** Električni automobili ne ispuštaju štetne supstance u okolinu tokom rada, kao što su: ugljendioksid, ugljenmonoksid, čestice čađi, nezasićena organska jedinjenja, ugljovodonici, ozon, olovo i razni azotni oksidi, kao što to rade automobili sa motorom s unutrašnjim sagorevanjem. Koliko ovi automobili doprinose smanjenju zagađenja vazduha to zavisi od tehnologije koja se koristi za proizvodnju električne energije za punjenje baterija. Međutim, koristi od čistog vazduha su najčešće lokalnog značaja, zbog toga što su, zavisno od izvora iz koga je proizvedena električna energija za punjenje baterija, emisije štetnih gasova u vazduh pomerene na mesto proizvodnje električne energije.

2. **Troškovi za energiju za isti pređeni put električnih automobila su znatno niži.** Električni automobili za isti pređeni put (efekat) potroše tri puta manje energije izražene u MJ nego klasični automobili. Pri tome oni koriste električnu energiju, koja se može proizvesti iz obnovljivih izvora energije između ostalog i ugradnjom fotonaponskih panela na haubi i krovu automobila, čime se štede energetske resursi i produžava put koji se može preći između dva punjenja.

3. **Električni automobili imaju niže troškove održavanja.** Troškovi održavanja električnih automobila su znatno niži nego troškovi održavanja automobila sa motorom s unutrašnjim sagorevanjem, jer su elektromotori znatno jednostavnije konstrukcije od motora sa unutrašnjim sagorevanjem što ih čini znatno pouzdanijim i trajnijim. Motori sa unutrašnjim sagorevanjem imaju oko hiljadu pokretnih delova, dok elektromotori imaju od tri do pet pokretnih delova. Elektromotori nemaju ulja, niti uljnih i vazduših filtera, praktično nemaju delova koji se troše pa generalni remont

¹Dr, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom sadu, Školska 1, e-mail: ilic@vtsns.edu.rs

²Dr, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom sadu, Školska 1, e-mail: savic@vtsns.edu.rs

³Dr, Visoka tehnička škola strukovnih studija u Novom sadu, Školska 1, e-mail: rastovac@vtsns.edu.rs

elektromotora nisu potrebni. Praktično elektromotori ne zahtevaju nikakvo održavanje, čime su smanjeni troškovi njihovog održavanja.

4. Električni automobili imaju znatno veću energetska efikasnost. Iskorišćenost energije kod elektromotora je preko 90% (dok kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem iznosi oko 30%), što doprinosi uštedi i očuvanju energetske resursa. Motori s unutrašnjim sagorevanjem su relativno neefikasni u pretvaranju energije goriva za pogon, jer se kod njih većina energije troši na toplotne gubitke, dok su kod elektromotora gubici energije znatno manji.

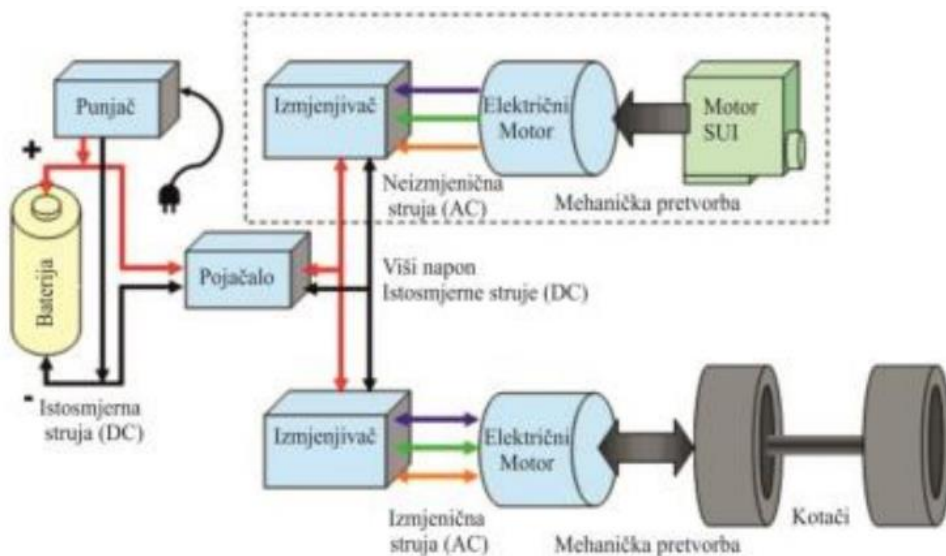
Nedostaci električnih automobila u odnosu na automobile sa motorima s unutrašnjim sagorevanjem, su [2]-[4]:

- Električni automobili su znatno skuplji.
- Rastojanje koje mogu preći električni automobili između dva punjenja je kraće i ta punjenja znatno duže traju.
- Nedostatak infrastrukture za punjenje baterija.

2. DELOVI POGONSKOG SISTEMA ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

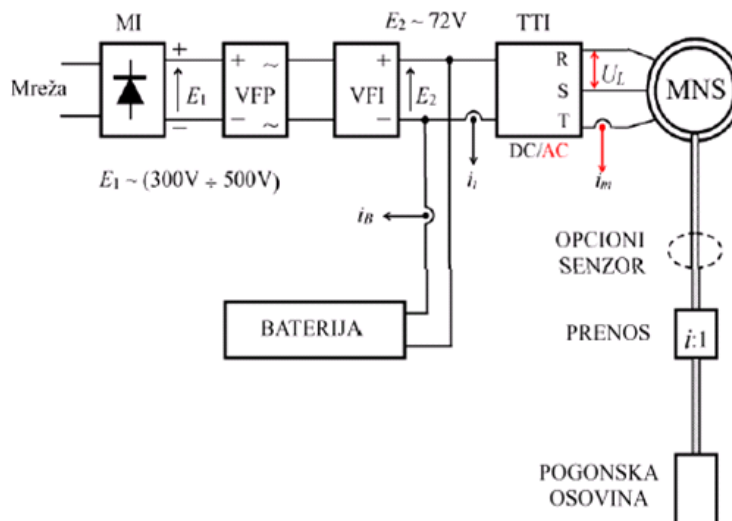
Delovi pogonskog sistema električnih automobila su, slika 1 [1], [5]:

- punjač baterije,
- baterija u kojoj je uskladištena energija,
- vučni pretvarač i
- elektromotor.



Slika 1 - Delovi pogonskog sistema električnih automobila [4]

Na slici 2. je prikazana uprošćena šema pogonskog sistema električnog automobila. Kao izvor energije koristi se baterija, koja daje jednosmerni napon, koji se u trofaznom tranzistorskom invertoru kao vučnom pretvaraču pretvara u simetrični trofazni promenljivi napon promenljive frekvencije potreban za pokretanje trofaznog asinhronog motora [1].



Slika 2. Šema pogonskog sistema električnog automobila; MI - mrežni ispravljač, VFP (DC/AC) – visokofrekventni pretvarač, VFI - ispravljački stepen visokofrekventnog pretvarača VFP-a, akumulatorska baterija 72 [V], TTI- trofazni tranzistorski inverter kao vučni pretvarač, MNS - motor naizmenične struje (trofazni asinhroni motor)[1]

2.1. Punjač baterija

Punjač baterija u vozilu služi za pretvaranje naizmeničnog napona mreže u jednosmerni napon baterije. Od njega zavisi vreme punjenja baterija. Punjači slabije snage baterije u električnom automobilu mogu napuniti za 6 do 10 h, dok punjači jače snage to čine puno brže i baterije u električnom automobilu napune čak i za 20-ak minuta. Punjač se može ugraditi u auto, ali i ne mora [1].

2.2. Baterije

Glavni razlog sporog razvoja električnih automobila je problem skladištenja električne energije. Skladištenje električne energije u baterije se zasniva na pretvaranju električne energije u hemijsku. Trenutno se koristi više vrsta baterija, kao što su:

- olovno-sulfatne (Pb-kiselina).
- litijum-jonske (Li-ion),
- nikl-kadmijumske (NiCd),
- nikl-metal hibridne (Ni-MH) i
- natrijum-sumporne (NaS).

U novije vreme na tržištu su se pojavile baterije zasnovane na litijumu. Litijum je jedan od najlakših metala. U pravilu litijumske baterije tri puta su lakše i manje od olovnih baterija za isti kapacitet. Neki tipovi podnose brza punjenja i uz upotrebu dovoljno snažnog punjača mogu se napuniti za dvadesetak minuta. Iako im je cena znatno veća od cene olovnih baterija (3-15 puta) svojom trajnošću i karakteristikama znatno su isplativiji izbor. Litijum-jonske baterije po pravilu mogu da izdrže od 1000 do 5000 ciklusa (punjenja-pražnjenja), odnosno do 10 kalendarskih godina, pre nego što izgube toliko kapaciteta da se moraju zameniti.

2.3. Električni motor

Elektromotor je glavni deo elektromotornog pogona. On pretvara električnu energiju (koju uzima iz mreže) u mehaničku energiju (koju predaje radnoj mašini). Elektromotor pokreće (pogoni) radnu mašinu pri čemu ona vrši mehanički rad.

Električni motor služi za pretvaranje električne energije u mehanički rad. Prednosti električnog motora su minimalni gubici energije do 10%, te jednostavna konstrukcija koja čini motor pouzdanijim

18. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM RIZIK I BEZBEDNOSNI INŽENJERING

i smanjuje troškove njegovog održavanja. Sigurno najprepoznatljivija razlika između električnih i drugih automobila je motor, dok kod benzinskog/dizel automobila motor učestvuje u ukupnoj ceni sa značajnim postotkom. Kod električnog automobila na motor otpada prilično mali deo cene. Elektromotori su znatno jeftiniji i jednostavnije konstrukcije od motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Savremeni motori sa unutrašnjim sagorevanjem sastoje se od oko hiljadu pokretnih delova. Elektromotori se u pravilu sastoje od tri do pet pokretnih delova što ih čini višestruko pouzdanijim i trajnijim te praktično ne zahtevaju nikakvo održavanje. Nemaju ulja niti uljnih i vazduših filtera, praktično nemaju delova koji se troše. Uz to su znatno lakši i manji. Postoji više vrsta elektromotora koji se znatno razlikuju po konstrukciji i principu rada.

Motori jednosmerne struje. Prednosti motora jednosmerne struje su: ukupna cena motora i pretvarača niža je za motor jednosmerne struje, ali se odnos tih cena menja. Nedostaci su: manji stepen korisnog dejstva, i veća cena motora, i postojanje kolektora i potreba za njihovim održavanjem.

Motori naizmjenične struje. Prednosti motora naizmjenične struje su: cena 2 do 3 puta niža nego motora jednosmerne struje, brzina za 50% do 150% veća od maksimalne brzine motora jednosmerne struje, efikasnost iznosi 95% do 97% za razliku od 85% do 89% kod motora jednosmerne struje. Nedostaci su: složena regulacija brzine i postojanje vučnog pretvarača za promenu napona i učestanosti. U motore naizmjenične struje spadaju: asinhroni motori sa kratko spojenim (kaveznim) rotorom, sinhroni motor sa permanentnim magnetima na rotoru i reluktantni motori.

Univerzalni motori. Univerzalni motori mogu da rade i na jednosmernu i na naizmjeničnu struju.

Do nedavno su motori jednosmerne struje suvereno vladali kao pokretači električnih vozila (u električnoj vuči: tramvaji, trolejbusi, vozovi i sl.), međutim sve više ih potiskuju motori naizmjenične struje koji su po svojoj konstrukciji jednostavniji, ali je upravljanje komplikovanije.

2.4. Trofazni tranzistorski inverter kao vučni pretvarač - kontroler

Upravljački sistem pre svega služi za prilagođavanje osnovnih karakteristika elektromotora uslovima rada koje zahteva tehnologija rada radne mašine pri pokretanju i kočenju, kao i za razne regulacije uobičajenih radnih režima mašine i elektromotora. Prilikom regulacije treba voditi računa o brojnim uslovima, kao npr.: o granicama regulacije, njenoj kontinualnosti, uslovima koje zahteva radna mašina prilikom regulaciji itd.

Složenost upravljačkog sistema zavisi od vrste pogona i zahteva za regulacijom brzine. Upravljački sistem je u savremenim pogonima elektronski (analogni ili digitalni) i sadrži tranzistore, integrisana kola, operacione pojačavače, logička kola, mikroprocesore i mikroračunare. Upravljački sistem može da sadrži: prekidače, vremenske releje, prekidače kraja hoda, otpornike, kondenzatore, tastere, kontrolere itd. Upravljački sistem često ima i zaštitnu funkciju. Upravljački sistem se napaja iz nekog izvora električne energije.

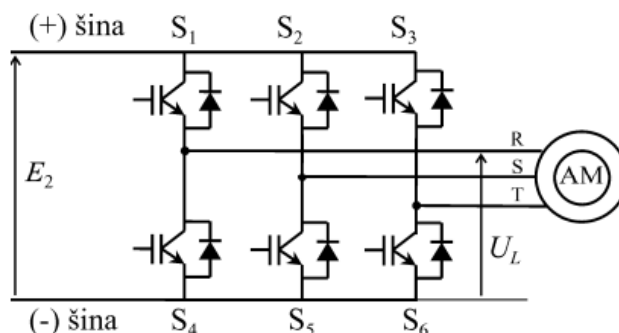
Sa aspekta polaznog momenta i rada u oblasti slabljenja polja asinhroni vučni motor se nameće kao jedno od najboljih rešenja problema pogona u električnoj vuči. Radi postizanja kontrolabilnosti vučne sile pribegava se vektorskom upravljanju asinhronim motorom. Skalarna ili U/f regulacija, predstavlja promenu brzine promenom učestanosti proporcionalno sa promenom napona napajanja. Pri rotorskim brzinama $\omega_r < \omega_n$ manjim od nominalne ($U/I = \text{const.}$) vučni motor radi u režimu konstantnog fluksa.

Elektromotorom se upravlja pomoću trofaznog tranzistorskog invertora kao vučnog pretvarača – kontrolera. Kontroler motora nadzire snagu, broj obrtaja motora, položaj rotora motora, te temperaturu motora. U kontroleru se jednosmerni napon baterije pretvara u naizmjenični koji je potreban za pokretanje motora. Kontroler je uređaj koji upravlja radom motora. U zavisnosti od pritiska na papučicu gasa ili kočnice kontroler će osigurati motoru potrebnu struju. Kontroler je vrlo složen i nezaobilazan uređaj te se može posmatrati kao funkcionalna celina sa elektromotorom. Cena kontrolera u pravilu iznosi 100-200% cene motora.

Trofazni tranzistorski inverter kao vučni pretvarač je napravljen tako da je njegov maksimalni izlazni napon jednak nominalnom naponu asinhronog motora (naponu trajnog rada bez oštećenja izolacije). Tranzistorski pretvarači frekvencije s IGBT tranzistorom primenjuju se za snage do oko 600 kVA.

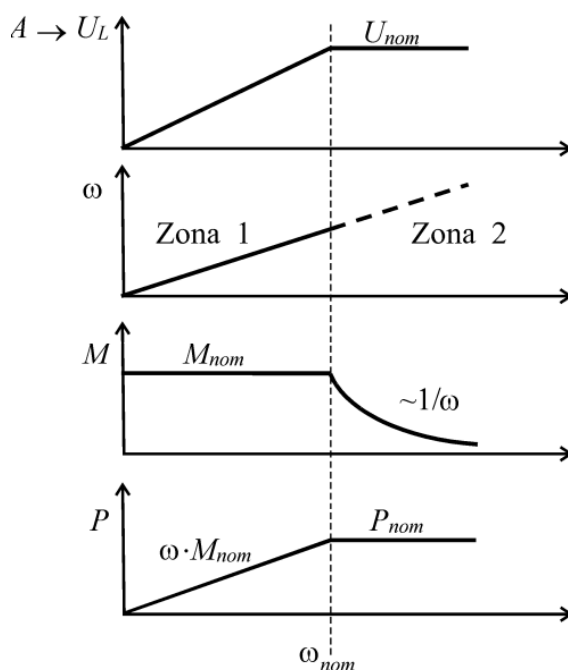
Umesto IGBT tranzistora, susreću se rešenja s MOSFET tranzistorima. MOSFET tranzistori upravljaju se s ekstremno malom strujom, imaju veliku brzinu delovanja u sklopnom režimu rada ($< 1 \mu s$). Pretvarači s MOSFET tranzistorima grade se za manje napone ($< 200 \text{ V}$) i snage uz veću frekvenciju ($> 25 \text{ kHz}$).

Na slici 3 je prikazan asinhroni motor i trofazni tranzistorski inverter sa impulsno-širinskom modulacijom [6].



Slika 3 - Trofazni tranzistorski inverter [6]

Na slici 4 su prikazani oblici napona, učestanosti, momenta i snage u zavisnosti od brzine asinhronog motora [7].



Slika 4. Oblik napona, učestanosti, momenta i snage u zavisnosti od brzine [7]: Zona 1: $U/f = \text{const.}$, sledi $\psi_m = \text{const.}$; Zona 2: $U = U_{nom}$ i $f(\uparrow)$, sledi $\psi_m(\downarrow) \sim 1/\omega$

Dobre osobine impulsno-širinske modulacije je široka oblast rada u režimu konstantne snage zahvaljujući asinhronom motoru koji radi u oblasti slabljenja polja. To omogućava da se eliminiše mehanički reduktor.

18. KONFERENCIJA SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM RIZIK I BEZBEDNOSNI INŽENJERING

Loše osobine impulsno-širinske modulacije jeste da gubici snage u rotoru asionhronog motora urokuju mali stepen iskorišćenja $\eta < 0,95$. Ovde je η jako bitan jer što je veći, vozilo sa istom baterijom ima veći radijus nego vozilo sa manjim η . Kod velikih vozila η bitno utiče na radijus kretanja. Zbog gubitaka u rotoru javljaju se i problemi hlađenja. Temperatura ležaja, rotora i statora ne sme da pređe 105°C. Toplota u statoru se odvodi rebrima na statoru ili cevima u zatvorenim sistemima. Hlađenje rotora je veći problem (može samo konvekcijom toplote sa rotora na stator) [7].

3. ZAKLJUČAK

Upravljački sistem služi za automatsko upravljanje radom elektromotora, tj. za pokretanje, kočenje, regulaciju karakterističnih veličina motora (brzine, ubrzanja, momenta, položaja i/ili trzaja), najčešće delujući svojim upravljačkim signalima na pretvarač energetske elektronike, ali ponekad i na sam motor (npr. pobudu motora) ili na mehanički prenosnik. Upravljački sistem uzima informacije o stanju pogona od odgovarajućih senzora koji se nalaze u povratnoj vezi, kao i od signala za zadavanje željenih vrednosti regulisanih veličina i obrađuje ih prema utvrđenim algoritmima.

Električni automobil Tesla Roadster kao električni motor koristi četvoropolni indukcioni Teslin motor snage 180 kW sa specijalno izrađenim rotorom. Pronalazač Martin Eberhard je prilagodio litijum-jonske baterije, slične onim u laptop-ovima. Naime on je pronašao način kako da spoji ove baterije u veća pakovanja, sa naponskim nivoom koji omogućava veći broj ciklusa punjenje-pražnjenje i bolje održavanje temperature. Vrlo velika baterija u Teslinom Roadsteru ima predviđeni životni vek od sedam godina pri tipičnoj vožnji i košta 12.000 \$. Kapacitet baterija je 50 kWh. DC/AC inverter se sastoji od 72 tranzistora koji emituju malo toplote što olakšava hlađenje. Električni automobil Tesla Roadster ubrzava od 0 do 100 km/h za manje od 4 s, dostiže maksimalnu brzinu od 230 km/h, može preći put od 415 km po jednom punjenju, a puni se za svega nekoliko sati po ceni od 2,5 \$ (USA).

4. LITERATURA

- [1] Ilić, B.; Adamović, Ž.: *Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost*, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
- [2] Cristian Lascy, Ion Boldea, Frede Blaabjerg: *A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 1, Jan/Feb 2000.
- [3] Domenico Casadei, Giovanni Serra, Angelo Tani: *Implementation of a Direct Torque Control Algorithm for Induction Motors Based on Discrete Space Vector Modulation*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 4, July 2000.
- [4] K. D. Hurst, T. G. Habetler: *A Simple, Tacho-Less, I.M. Drive with Direct Torque Control Down to Zero Speed*, 1992.
- [5] D. Casadei, G. Serra, A. Tani, L. Zarri, F. Profumo: *Performance Analysis of a Speed Sensorless induction Motor Drive Based on a Constant Switching Frequency DTC Scheme*, Proceedings IAS 2001.
- [6] S., Vukosavic, *Digital Control of Electrical Drives*, Springer, 2007.
- [7] S., Vukosavic, M., Stojic, *Suppression of Torsional Oscillations in a High-Performance Speed Servo Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 45, No. 1, February 1998, pp 108-117