

UTVRĐIVANJE OPTIMALNIH KONTROLNIH PARAMETARA ZA MAKSIMIZIRANJE IZLAZNE KARAKTERISTIKE SRM-A

Vladan Vujičić¹

Ključne riječi: *Prekidački reluktantni motor, model, kontrolni parametri*

SAŽETAK:

U ovom radu opisan je postupak za utvrđivanje optimalnih kontrolnih parametara prekidačkog reluktantnog motora (switched reluctance motor - SRM) koji obezbjeđuju razvijanje maksimalnog momenta motora, pri nominalnoj struji i za bilo koju brzinu motora. Prezentovan je relativno jednostavan, eksperimentalno verifikovan, model SRM-a koji obezbjeđuje preciznu simulaciju njegovog rada, što je i predulsov za simulacino utvrđivanje kontrolnih parametara pogona sa SRM-om. Za konkretan SRM pogon utvrđeni su optimalni kontrolni parametri, a rezultati simulacije ukazuju da se, na taj način, mogu znatno poboljšati izlazne karakteristike SRM pogona u odnosu na slučaj kada se primjenjuje neka od standardnih upravljačkih tehnika.

1. UVOD

Prekidački reluktantni motor (SRM) po konstrukciji spada u grupu najprostijih električnih mašina. Njegov rotor ne sadrži namotaje niti stalne magnete, što ga čini veoma robustnim, a omogućava mu postizanje velikih brzina [1]-[3]. Takođe, neke od pozitivnih osobina ovog motora su velika specifična iznazna snaga u odnosu na masu i zapreminu [1], [4], visok startni momenat [1], [5], visok nivo tolerantnosti na pogrešna stanja [6]-[9], kao i visok odnos momenat / inercija [1], [10], [11].

Jedna od negativnih osobina SRM-a je nemogućnost rada direktno iz naizmjenične mreže, već je neophodna upotreba pogonskog pretvarača i kontrolera, što, uglavnom, ograničava njegovu primjenu na slučajeve gdje je neophodno vršiti regulaciju brzine. Motor, pogonski pretvarač i kontroler projektuju se kao jedna cjelina za konkretnu primjenu. Karakteristike SRM pogona umnogome zavise od topologije primijenjenog pretvarača i tipa kontrolera. Ovo je posljedica činjenice da se motor pobuđuje strujnim

¹Dr Vladan Vujičić, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet Podgorica.

impulsima, čiji položaj, trajanje i veličina direktno utiče na njegovu izlaznu karakteristiku. Izlazna karakteristika biće utoliko bolja ukoliko pogonski pretvarač i kontroler obezbjeđuju vjerodostojniju implementaciju predviđenog strujnog impulsa.

Da bi SRM pogon razvio maksimalni momenat za datu efektivnu vrijednost struje u fazi motora, neophodno je utvrditi položaj i veličinu strujnog impulsa u funkciji brzine motora. Položaj i veličina strujnog impulsa definiše se kontrolnim parametrima, a to su: ugao uključenja faze θ_{uk} , ugao isključenja faze θ_{is} i vrijednost referentne struje I_{ref} . Određivanje optimalnih kontrolnih parametara nije jednostavan zadatak, imajući u vidu da se male varijacije u njihovim vrijednostima znatno odražavaju na izlaznu karakteristiku. Standardna tehnika [12], [13] za njihovo utvrđivanje obezbjeđuje da se rad SRM-a može podijeliti u tri regiona: region konstantnog momenta, region konstantne snage i region u kome snaga opada proporcionalno brzini. Međutim, najnovija istraživanja [11] pokazuju da se, preciznijim utvrđivanjem kontrolnih parametara, u opsegu brzine koji odgovara regionu konstantne snage može postići znatno veći nivo snage. Jedan od načina da se kontrolni parametri preciznije utvrde je pomoću simulacije rada motora zasnovanoj na pouzdanom matematičkom modelu SRM-a.

U radu je prezentovan pouzdan i jednostavan matematički model SRM-a koji je poslužio kao osnova za izgradnju softverskog alata namijenjenog simulaciji rada ovog motora. Demonstriran je način utvrđivanja optimalnih kontrolnih parametara na konkretnom trofaznom 6/4 (šest polova na statoru i 4 pola na rotoru) motoru i prikazane izlazne karakteristike motora dobijene njihovim korišćenjem u simulaciji SRM pogona napajanim klasičnim pretvaračem [14].

2. KONTROLNE KARAKTERISTIKE SRM-a

Korisno je pri diskusiji kontrole SRM-a najprije razmotriti njegove prirodne karakteristike, tj. one koje se javljaju pri fiksnom naponu napajanja i fiksnom prekidačkom uglu. Linearna analiza pokazuje da je kriva moment-brzina, u tom slučaju, istog oblika kao i kod jednosmjernog serijskog motora [15], [16]. Ovo slijedi iz činjenice da se vrijeme za koje se pobuđuje jedna faza obrnuto proporcionalno povećava sa smanjenjem brzine, a time i vrijednost fluksa. Kako je momenat M proporcionalan kvadratu fluksa, to je resultantna momenat-brzina kriva definisana količnikom konstante k i kvadrata ugaone brzine obrtanja:

$$M = \frac{k}{\omega^2} \quad (1)$$

a snaga P je definisana sa:

$$P = \frac{k}{\omega}. \quad (2)$$

Analogno kao kod jednosmjerne serijske mašine postoji mogućnost naponskog ili strujnog napajanja SRM-a. Kod SRM-a postoje još dva važna parametra, a to su ugao uključenja θ_{uk} i ugao isključenja θ_{is} , odnosno, njihov ekvivalent, ugao provođenja $\theta_p = \theta_{is} - \theta_{uk}$. Podešavanjem kontrolnih uglova θ_{uk} i θ_{is} može se postići veoma širok rang performansi i kontrolnih mogućnosti. U praksi se ovi kontrolni parametri biraju tako da se ostvare optimalne performanse čitavog sistema (npr. minimalna struja, maksimalni stepen iskorišćenja) ili da se postignu posebne karakteristike. Treba napomenuti da ugao

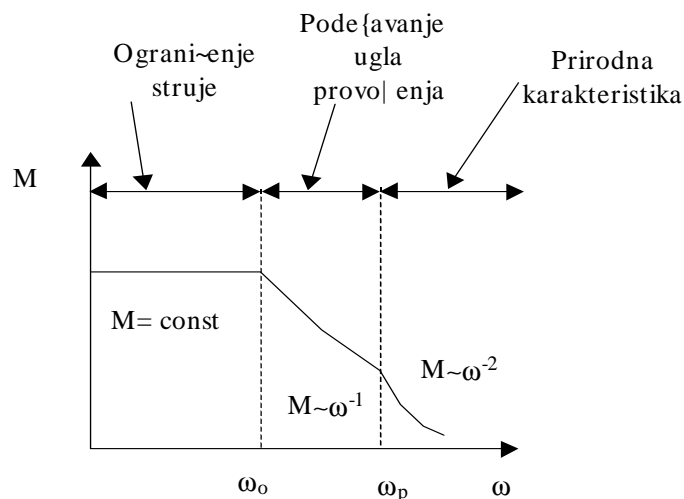
provođenja θ_p predstavlja interval u kome se vrši magnetizacija faze u toku jednog ciklusa. Struja kroz fazu protiče i nakon toga intervala, ali je u tom dijelu vrši demagnetizacija faze, tj. primjenjuje se napon suprotnog polariteta. Ova struja se često naziva struja repa.

Pri malim brzinama motora ne može se primjenjivati nominalni magnetizirajući napon za vrijeme koje odgovara uglu provođenja θ_p . To je iz razloga što je vrijeme koje odgovara uglu θ_p dovoljno dugačko da struja dostigne isuviše veliku vrijednost, pa se ona mora ograničiti u cilju zadovoljenja termalnog limita motora ili limita koji postavljaju poluprovodnički prekidački elementi. Pri tom, ograničenje se postiže primjenom neke od tehnika naponske širinsko impulsne modulacije ili strujne regulacije. Ograničavanjem struje ograničava se i vrijednost momenta motora. Kada se brzina poveća do vrijednosti pri kojoj se maksimalna struja postiže za primijenjeni napon nominalne vrijednosti, pri fiksnim uglovima θ_{uk} i θ_{is} , riječ je o osnovnoj brzini ω_o . Do osnovne brzine srednji momenat približno ima konstantnu vrijednost, struju je potrebno ograničavati, a uglovi θ_{uk} i θ_{is} su konstantni.

Za brzine iznad ω_o , snagu je moguće održavati konstantnom (momenat je $\sim 1/\omega^2$) pomjeranjem kontrolnih uglova θ_{uk} i θ_{is} , odnosno povećavanjem ugla provođenja θ_p . Naime, ako bi se držali konstantni parametri θ_{uk} i θ_{is} , vrijeme koje odgovara uglu provođenja bilo bi obrnuto proporcionalno brzini, pa bi fluks, takođe, bio obrnuto proporcionalan brzini (fluks ϕ je, pri određenoj brzini, proporcionalan primijenjenom naponu U i vremenu provođenja t_p tj. $\phi \approx \int U dt = Ut_p$, $t_p = \theta_p \omega^{-1}$), a time bi momenat opadao sa kvadratom brzine. Povećavanjem ugla provođenja θ_p povećava se i vrijeme t_p , a time se gubi zavisnost $\phi \sim \omega^{-1}$. Postizanje karakteristike sa konstantnom snagom je od posebnog interesa, pa se u cilju toga ugao provođenja podešava tako da se dobije zavisnost $\phi \sim \omega^{-1/2}$ tj. produkovan momenat M je obrnuto proporcionalan brzini ($M \sim \omega^{-1}$). Ovakvo podešavanje, povećavanjem ugla provođenja, moguće je samo do neke brzine ω_p pri kojoj ugao provođenja dostigne vrijednost jednaku polovini polnog koraka rotora (polovina električnog ciklusa). Ako bi θ_p bilo veće od pomenute vrijednosti, onda se fluks, odnosno struja ne bi u toku demagnetizacije vratili na nulu (pretpostavka da su primijenjeni magnetizirajući i demagnetizirajući naponi jednaki), što bi rezultiralo u njihovom stalnom rastu.

Kada brzina postane viša od maksimalne brzine za režim konstantne snage ω_p , podešavanje ugla provođenja više nije moguće, pa motor prelazi na ranije pomenutu prirodnu karakteristiku gdje je momenat $M \sim \omega^{-2}$, a snaga $P \sim \omega^{-1}$. Eventualno održavanje konstante snage bilo bi jedino moguće povećanjem napona napajanja U .

Shodno izloženom, zavisnost momenta u funkciji brzine izgleda kao na slici 1 i može se svrstati u tri regiona: 1) $\omega < \omega_o$, $M = \text{const}$, 2) $\omega_o < \omega < \omega_p$, $M \sim \omega^{-1}$ 3) $\omega > \omega_p$, $M \sim \omega^{-2}$. U regionu $\omega < \omega_o$ vrši se ograničavanje struje, u regionu $\omega_o < \omega < \omega_p$ podešavanje ugla provođenja, a u regionu $\omega > \omega_p$ se razvijaju prirodne karakteristike. Kontrolni parametri u regionu 1) predstavljaju ugao uključenja θ_u , ugao isključenja θ_{is} i referentna struja I_{ref} , u regionu 2) ugao uključenja θ_u i ugao isključenja θ_{is} , dok u regionu 3) ugao isključenja θ_{is} .



Slika 1. Karakteristika momentat-brzina SRM-a

3. JEDNAČINE MODELA

Principi elektromehaničke konverzije ukazuju da se karakteristike SRM-a mogu utvrditi ukoliko je poznata veza između položaja rotora θ , struje u fazi motora i i obuhvatnog fluksa Ψ . Eksperimentalno verifikovani model, detaljno opisan u [17], obezbjeđuje vezu između ovih promenljivih u vidu zavisnosti struje u fazi motora u funkciji obuhvatnog fluksa Ψ i položaja rotora θ :

$$i(\Psi, \theta) = i_o(\Psi, \theta) + i_{fe}(\Psi), \quad (3)$$

gdje su:

$$i_o(\Psi, \theta) = c_{o5} \left[(1 - c_{o1}) \Psi - c_{o1} c_{o3} + c_{o1} \sqrt{(\Psi - c_{o3})^2 + c_{o4}^2} \right] \quad (4)$$

i

$$i_{fe}(\Psi, \theta) = c_{fe1} \Psi + c_{fe2} \Psi^\alpha. \quad (5)$$

Koeficijenti c_{o1} , c_{o2} , c_{o3} , c_{o4} , c_{o5} , c_{fe1} i c_{fe2} koji figurišu u jednačinama (4) i (5) definisani su u [17], a za njihovo određivanje neophodno je poznavanje geometrijskih parametara motora, broja navojaka po fazi, određena magnetna svojstva željeza motora, kao i vrijednost induktivnosti faze pri neusaglašenom položaju rotora (položaj u kome su dva susjedna pola rotora podjednako udaljena od pola statora posmatrane faze). Pri tom, koeficijenti c_{o1} , c_{o2} , c_{o3} , c_{o4} i c_{o5} predstavljaju funkcije položaja rotora θ , dok koeficijenti c_{fe1} i c_{fe2} predstavljaju konstante.

Elektromagnetni moment motora M dobija se pomoću jednačine [18]:

$$M(\Psi, \theta) = - \frac{\partial W_m(\Psi, \theta)}{\partial \theta}, \quad (6)$$

gdje je W_m akumulirana energija magnetnog polja. Ova energija može se izračunati integraljenjem struje $i(\Psi, \theta)$ po fluksu Ψ , tako da se, imajući u vidu (3), dobija:

$$W_m(\Psi, \theta) = \int_0^{\Psi} i(\Psi, \theta) d\Psi = \int_0^{\Psi} i_o(\Psi, \theta) d\Psi + \int_0^{\Psi} i_{fe}(\Psi) d\Psi = W_{mo}(\Psi, \theta) + W_{mfe}(\Psi) \quad (7)$$

Imajući u vidu da je energija W_{mfe} u (7) funkcija samo fluksa Ψ , a ne i ugla θ tj. da važi $\partial W_{mfe}/\partial\theta=0$, za određivanje momenta neophodno je poznavati samo energiju W_{mo} koja se na može izračunati osnovu (4) i (7):

$$W_{mo} = c_{o5} \left[\frac{1-c_{o1}}{2} \Psi^2 - c_{o1}c_{o2} \Psi + \frac{c_{o1}}{2} (\Psi - c_{o3}) \sqrt{(\Psi - c_{o3})^2 + c_{o4}^2} + \frac{c_{o1}c_{o2}c_{o3}}{2} + \frac{c_{o1}c_{o4}^2}{2} \ln \left(\frac{\Psi - c_{o3} + \sqrt{(\Psi - c_{o3})^2 + c_{o4}^2}}{c_{o2} - c_{o3}} \right) \right] \quad (8)$$

Elektromagnetni momenat M moguće je dobiti rješavanjem jednačine (6) u koju je prethodno potrebno uvrstiti W_{mo} iz jednačine (8). S obzirom da su u jednačini (8) koeficijenti c_{o1} , c_{o2} , c_{o3} , c_{o4} , c_{o5} funkcije položaja rotora θ , to se, rješenjem jednačine (6), dobija prilično glomazan izraz. Zbog toga je, prilikom simulacije, jednostavnije momenat tražiti po približnoj formuli:

$$M_e(\Psi, \theta) = - \frac{\Delta W_{mo}(\Psi, \theta)}{\Delta \theta} = - \frac{W_{mo}(\Psi, \theta) - W_{mo}(\Psi, \theta - \Delta \theta)}{\Delta \theta}, \quad (9)$$

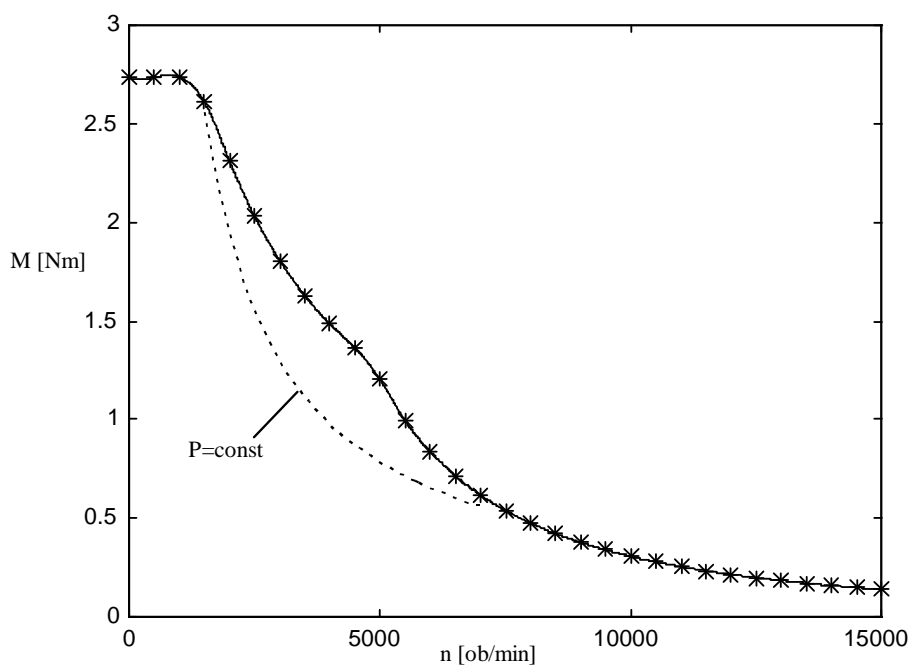
gdje su Ψ i θ trenutne vrijednosti fluksa i struje, $\Delta\theta$ inkrement položaja u toku simulacije, a $\theta - \Delta\theta$ položaj rotora u prethodnom koraku simulacije. Za računanje momenta po jednačini (9) neophodno je utvrditi na osnovu (8) trenutnu vrijednost magnetne energije $W_{mo}(\Psi, \theta)$, ali i fiktivnu vrijednost energije $W_{mo}(\Psi, \theta - \Delta\theta)$ za trenutnu vrijednost obuhvatnog fluksa i položaj rotora koji odgovara prethodnom koraku simulacije. Ovaj način je implementiran u program za simulaciju pogona sa SRM-om.

4. PRIMJER ODREĐIVANJA KONTROLNIH PARAMETARA

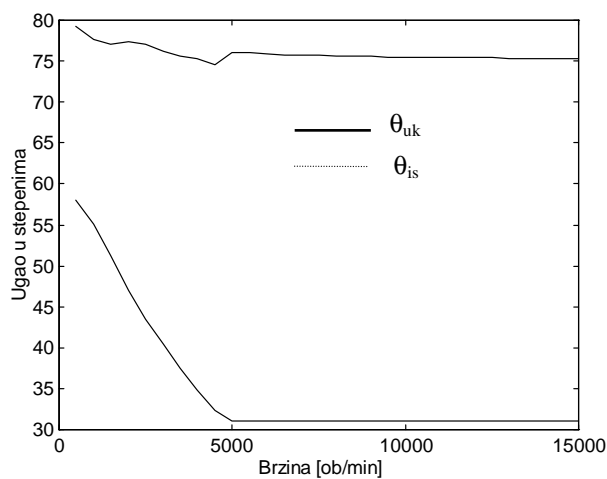
Za trofazni 6/4 motor čiji su podaci dati u Tabeli I izvršena je simulacija rada za slučaj kada se motor napaja klasičnim pretvaračem [14]. Simulacija je izvršena za brzine obrtanja motora od $n=500$ ob/min do $n=15000$ ob/min sa korakom od 500ob/min, korišćenjem razvijenog programa na bazi prezentovanog modela. Program, za zadate ulazne parametre, određuje talasne oblike struje i momenta, kao i njihove srednje vrijednosti. Za svaku od naznačenih brzina vršena je simulacija, uz variranje kontrolnih parametara. Na taj način, posmatranjem rezultata, utvđeni su optimalni kontrolni parametri (uglovi uključenja i isključenja faze, kao i referentna struja I_{ref}) kojima se obezbjeđuje maksimalni srednji momenat motora, a da efektivna struja u fazama motora ostane u okviru nominalne vrijednosti I ($I=2A$). Dio dobijenih rezultata sumiran je na slikama 2 i 3. Dobijene maksimalne

Tabela I. Parametri eksperimentalnog motora

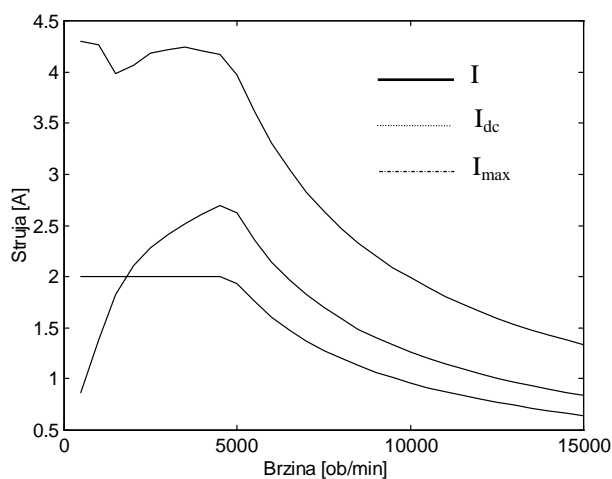
Parametar	Vrijednost	Jedinica
Aksijalna dužina magnetnog kola	4.8	cm
Manji poluprečnik rotora	1.85	cm
Veći poluprečnik rotora	2.9	cm
Manji polupr. statora	4.7	cm
Veći poluprečnik statora	5.8	cm
Vazdušni procjep	0.5	mm
Ugao pola rotora	32	°
Ugao pola statora	30	°
Broj polova rotora	4	-
Broj polova statora	6	-
Broj navojaka po fazi	580	-
Otpornost faze	6.9	Ω
Napon magnetizacije	270	V
Napon demagnetizacije	-271.2	V

Slika 2. $M-\omega$ karakteristika referentnog simetričnog motora

vrijednosti momenta u funkciji brzine, ilustrirane su na slici 2, zajedno sa $M-\omega$ krivom dobijenom pomoću kubne interpolacije (*cubic-spline interpolation*).



(a)



(b)

Slika 3. Rezultati simulacije za referentni simetrični motor;

(a) Uglovi θ_{uk} i θ_{is} u funkciji brzine obrtanja motora;(b) Struje I , I_{dc} i I_{max} u funkciji brzine obrtanja motora

Na slici 3(a) data je zavisnost uglova θ_{uk} i θ_{is} u funkciji brzine, dok su na slici 3(b) prikazane zavisnosti efektivne vrijednosti struje u fazi I , srednje vrijednosti struje napajanja I_{dc} i maksimalne trenutne vrijednosti struje I_{max} u funkciji brzine obrtanja motora.

Na osnovu rezultata sa slike 2 može se zaključiti da je osnovna brzina motora negdje oko 1500 ob/min. Može se primijetiti da optimalni kontrolni parametri obezbjeđuju da snaga u opsegu od 1500 do 7000 ob/min bude i znatno veća od one na 1500ob/min. Time se potvrđuju rezultati najnovijih istraživanja da, kao rezultat optimalne kontrole koja

maksimizira izlaznu karakteristiku, motor ne razvija konstantnu snagu u teorijskom režimu konstantne, kao i da motor može razviti snagu znatno veću od snage koju razvija pri osnovnoj brzini.

5. ZAKLJUČAK

Kontrolni parametri SRM pogona imaju ključni uticaj na njegovu izlaznu karakteristiku. Zbog toga je precizno utvrđivanje vrijednosti kontrolnih parametara u funkciji brzine preduslov za ostvarivanje željenih izlaznih karakteristika SRM pogona. Jedan od načina da se izvrši precizno utvrđivanje njihovih optimalnih vrijednosti je uz pomoć simulacije korišćenjem softvera baziranog na prezentovanom modelu SRM-a. Kao primjer, u radu je izvršeno utvrđivanje optimalnih kontrolnih parametara za maksimiziranje izlazne karakteristike konkretnog pogona. Rezultati pokazuju da se, na ovaj način, u znatnoj mjeri mogu poboljšati izlazne karakteristike SRM pogona u odnosu na slučaj kada se primjenjuju uobičajeni kontrolni algoritmi.

LITERATURA

- [1] J.M.Stephenson, S.R.MacMinn, J.R.Hendershot: "Switched reluctance drives", 25th *IAS Annual Meeting*, Seattle, October 1990.
- [2] N.Matsui, T.Kosaka, N.Minoshima, Y.Ohdachi: "Development of SRM for spindle motor system", *IEEE IAS Annual Meeting*, St. Luis, October 1998.
- [3] S.R.MacMinn, W.D.Jones: "A very high speed switched-reluctance starter-generator over a very wide speed range", in *Proc. NAECON '89*, Dayton, Ohio, pp. 1758-1764, May 1989.
- [4] T.J.E.Miller: "Switched reluctance motor and their control", *Hillsboro, OH: Magna Physics Publishing and London UK: Oxford University Press*, 1993.
- [5] R.Welburn: "Ultra high torque motor system for direct drive robotics", in *Proc. of Robots 8 Conf.*, Detroit, MI, Vol 2, pp 19-63 - 19-71, June 1984.
- [6] C.M.Stephens: "Fault Detection and Management System for Fault-Tolerant Switched Reluctance Motor Drives", in *Proceedings of the 1989 IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 574-578, October 1989.
- [7] T.J.E.Miller: "Faults and Unbalance Forces in the Switched Reluctance Machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.31, no.2, pp.319-328, March/April 1995.
- [8] T.Sawata, P.C.Kjaer, C.Cossar, T.J.E.Miller, Y.Hayashi: "Fault-tolerant operation of single-phase SR generator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 4, pp. 774-781, July/August 1999.
- [9] V.K.Sharma, S.S.Murthy, B.Singh: "Analysis of switched reluctance motor drive under fault conditions", *IEEE IAS Annual Meeting*, St. Luis, October 1998.
- [10] M.R.Harris, T.J.E.Miller: "Comparision of design and performance parameters in switched reluctance and induction motors", *IEE Fourth Internat. Conference on Electrical Machines and Drives*, 13-15 September 1991, pp 303-307.
- [11] K.M.Rahman, B.Fahimi, G.Suresh, A.V.Rajarathnam, M.Ehsani: "Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues", *IEEE IAS Conference Record*, St. Louis, 1998.

- [12] B.K.Bose, T.J.E.Miller, P.M.Szczesny, W.H.Bicknell: "Microcomputer control of switched reluctance motor", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.IA-22, no.4, pp.708-715, July/August, 1986.
- [13] S.R.MacMinn, J.W.Sember: "Control of a switched-reluctance aircraft engine starter-generator over a very wide speed range", in *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*, Washington, August 1989.
- [14] S.Vukosavić, V.R.Stefanović: "SRM inverter topologies: a comparative evaluation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.27, no.6, pp.1034-1047, Nov./Dec.1991.
- [15] J.Čorda, *Switched reluctance machine as a variable-speed drive*, Ph. D. thesis, University of Leeds, 1979.
- [16] P.T.Belkinsop, *A novel, self-commutating, singly-excited motor*, Ph.D. thesis, University of Leeds, 1976.
- [17] V.Vujičić, S.N.Vukosavić: "A simple nonlinear model of the switched reluctance motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, accepted for publication.
- [18] N.J.Nagel, R.D. Lorenz: "Modeling of a saturated switched reluctance motor using an operating point analysis and the unsaturated torque equation", *IEEE IAS Annual Meeting*, Phoenix, October 1999.