

Inteligentni DTC algoritam sa automatskom reorganizacijom u zavisnosti od ripla momenta

Marko Rosić

Apstrakt — Rad prezentuje karakteristike algoritma direktne kontrole momenta bazirane na diskretizovanim naponskim intenzitetima sa mogućnošću automatske modifikacije u cilju ograničenja ripla (pulsacija) momenta ispod njegove definisane maksimalno dozvoljene vrednosti u pogonu. Algoritam je baziran na konvencionalnoj prekidačkoj tabeli sa proizvoljnim brojem diskretizovanih naponskih intenziteta omogućavajući na taj način veću prostornu rezoluciju naponskih vektora u $\alpha\beta$ ravni i rezultujući manjim intenzitetom ripla momenta. Broj raspoloživih naponskih intenziteta (vektora) može biti jednostavno definisan ili izmenjen bez potrebe za odgovarajućom izmenom prekidačke table. U zavisnosti od definisanog broja naponskih intenziteta odgovarajuće izmene upravljačke strukture algoritma su automatizovane, čineći ovaj algoritam jednostavnim, efikasnim i pogodnim za implementaciju u pametnim pogonima koje zahteva ubrzano dolazeća Industrija 4.0. Eksperimentalna verifikacija rezultata na digitalnoj platformi MSK28335, potvrđuje značajnu redukciju ripla momenta asinhrono mašine u zavisnosti od broja naponskih intenziteta istovremeno zadržavajući jednostavnost, efikasnost i dobre dinamičke osobine DTC pogona sa asinhronom mašinom.

Ključne reči—direktna kontrola momenta, asinhrona mašina, automatska modifikacija algoritma, pametni pogon, Industrija 4.0, ripl momenta, indukovana EMS, MSK28335.

I. UVOD

Principi konvencionalne direktne kontrole momenta (cDTC) su dobro poznati i prezentovani u brojnoj naučnoj i stručnoj literaturi. Jednostavnost i dobre dinamičke osobine ovog vida kontrole čine ga i dalje aktuelnim u savremenim industrijskim pretvaračima. Kada se radi o metodama DTC zasnovane na prekidačkim tabelama, ripl momenta kao najveći nedostatak ove metode, pored ostalog, u najvećoj meri zavisi od broja raspoloživih naponskih vektora. Sa povećanjem broja raspoloživih naponskih vektora, korišćenjem invertora sa više nivoa ili kombinacije aktivnih naponskih vektora, DTC algoritmi zahtevaju definisanje nove, složenije prekidačke table koja zavisi od broja aktivnih naponskih vektora i brzine obrtanja motora [1, 2].

Sa druge strane, savremeni upravljački algoritmi, pored osnovnog dela, zahtevaju implementaciju i brojnih pratećih algoritamskih struktura kao što su estimacija parametara mašine u toku rada, self-tuning metode, napredni estimatori fluksa, opserveri stanja, kompenzacija efekta mrtvog vremena [3-5], itd. Iako ovi prateći algoritmi doprinose kvalitetu i stabilnosti pogona u širokom opsegu radnih brzina i režima

Marko Rosić – Fakultet tehničkih nauka Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, Sv. Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: marko.rosic@ftn.kg.ac.rs).

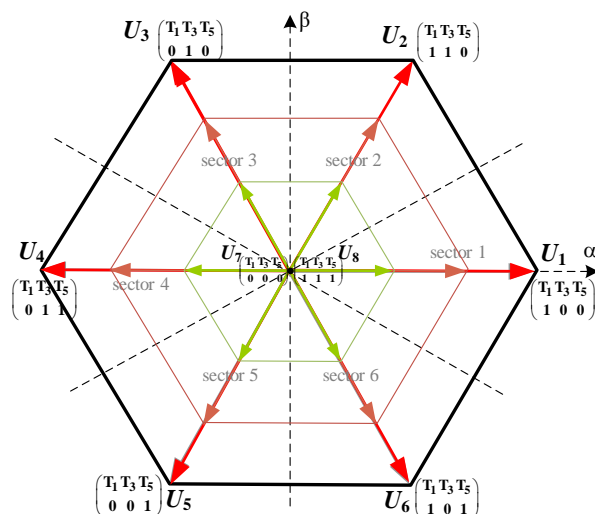
rada, oni povećavaju ukupno proračunsko vreme algoritma ($T_s \approx 50-100 \mu s$) smanjujući frekvenciju izvršavanja algoritma odnosno ograničavaju propusni opseg regulisane veličine. Iz tog razloga potrebno je da glavni deo algoritma bude što je moguće jednostavniji i manje vremenski zahtevan kako se ne bi umanjile dinamičke karakteristike sistema.

Industrija 4.0 takođe zahteva razvoj inteligentnih elektromotornih pogona sposobnih da izvrše samo evaluaciju, procenu stanja i životnog veka, autodetekciju kvara itd. [6-7]. Iz tog razloga upravljački algoritmi sa jedne strane treba da imaju sposobnost brze optimizacije i modifikacije u toku rada, a sa druge strane proračunsku jednostavnost i efikasnost koja ostavlja dovoljno prostora za implementaciju pomenutih pratećih kompenzacionih algoritamskih struktura.

Imajući u vidu navedeno, postoji potreba za robusnim, što jednostavnijim algoritmima, kao što je cDTC, sa visokim dinamičkim osobinama i malim riplom struje / momenta. Ovaj rad prezentuje karakteristike DTC algoritma baziranog na prekidačkoj tabeli sa mogućnošću njegove automatske adaptacije u cilju smanjenja ripla momenta, a u zavisnosti od broja raspoloživih diskretizovanih naponskih intenziteta (DVI). Definisanje broja naponskih intenziteta moguće je ručno (od strane korisnika) ili automatski, u zavisnosti od definisane maksimalne vrednosti ripla momenta u pogonu i ne zahteva izmene konvencionalne prekidačke table.

II. TEORIJSKA POZADINA DVI-DTC ALGORITMA

DVI-DTC metod baziran je na primeni više diskretizovanih naponskih intenziteta u svakom od šest osnovnih pravaca kod standardnog naponskog invertora kao što je prikazano na Sl.1.



Sl. 1. Rezolucija naponskih vektora u $\alpha\beta$ ravni sa definisana 3 naponska int.

U zavisnosti od definisanog broja naponskih intenziteta formira se odgovarajući komparator momenta. Komparator fluksa i prekidačka tabela (Tabela I) ostaju isti kao kod cDTC nezavisno od broja naponskih intenziteta. Ova osobina DVI-DTC omogućava da se broj naponskih vektora može jednostavno definisati ili promeniti bez potrebe za izmenom prekidačke tabele, kao što je to slučaj u [2, 8] gde je potrebno definisati novu prekidačku tabelu pri svakoj promeni broja raspoloživih naponskih intenziteta (vektora).

TABELA I – KONVENCIONALNA PREKIDAČKA TABELA

D_ψ	D_T		
	1	0	-1
1	U_{k+1}	U_7 or U_8	U_{k-1}
-1	U_{k+2}	U_7 or U_8	U_{k-2}

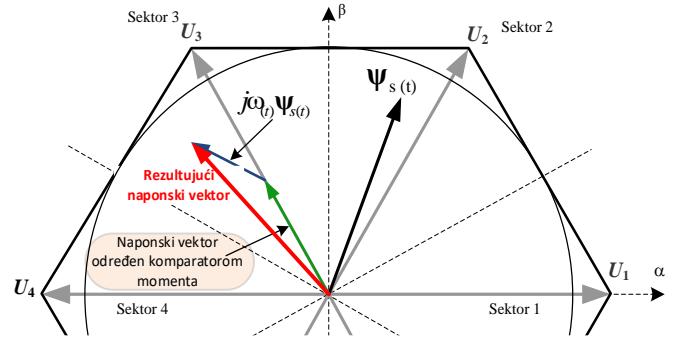
Izmene u broju naponskih intenziteta n kod DVI-DTC zahtevaju samo redefinisane granice novog komparatora momenta T_{ba} , koja se može izvršiti prema (1).

$$T_{ba} = \frac{T_{ba_c}}{3} \cdot i = \frac{T_{ba_c}}{3} \cdot (2 \cdot n + 1) \quad (1)$$

Negativan efekat indukovane elektromotorne sile (EMS) na inkremente momenta pri visokim (dokumentovan u [9]) može se jednostavno kompenzovati prema (2).

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{s\text{new}} &= \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_{\text{add}} \\ &= \mathbf{u}_s + j\omega \boldsymbol{\psi}_s = u_{\alpha s} + ju_{\beta s} + j\omega(\psi_{\alpha s} + j\psi_{\beta s}) \quad (2) \\ &= \underbrace{u_{\alpha s} - \omega\psi_{\beta s}}_{\text{Re}(\mathbf{u}_{s\text{new}})} + j \underbrace{(u_{\beta s} + \omega\psi_{\alpha s})}_{\text{Im}(\mathbf{u}_{s\text{new}})} \end{aligned}$$

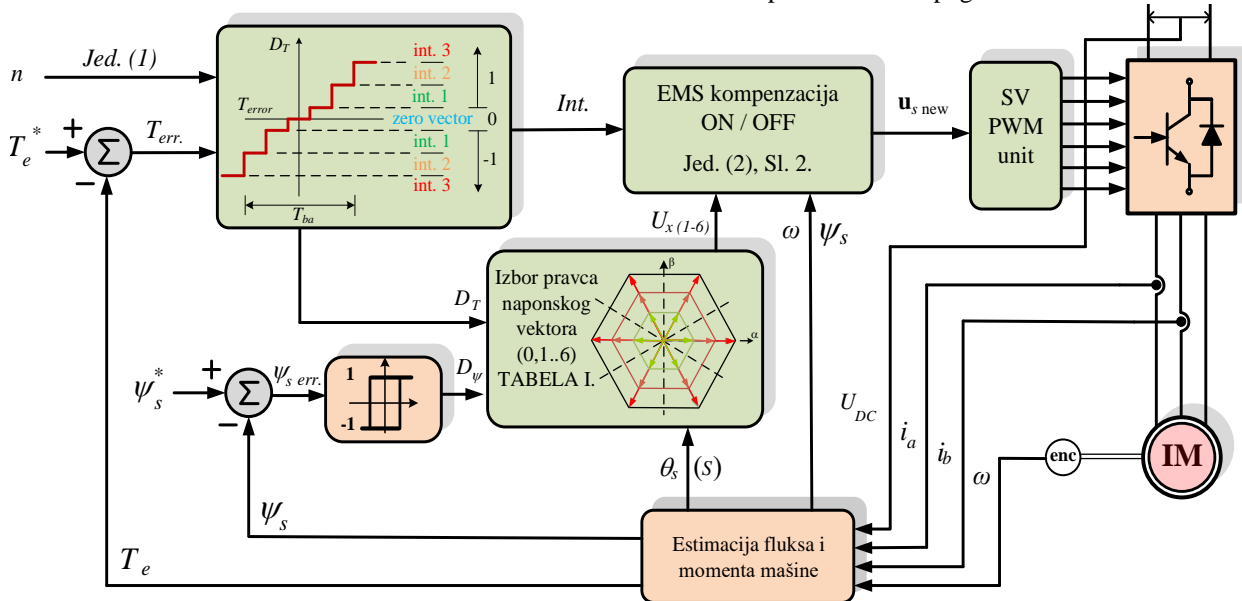
Vrednost indukovane EMS potrebno je dodati prethodno izabranom naponskom vektoru odgovarajućeg intenziteta (kao izlaza iz komparatora momenta) formirajući rezultujući naponski vektor, kao što je to prikazano na slici 2. Blok dijagram DVI-DTC algoritma prikazan je na slici 3, gde su zelenom bojom obeleženi delovi koji su izmenjeni u odnosu na cDTC.



Sl. 2. Kompenzacija EMS i formiranje rezultujućeg naponskog vektora

Broj definisanih naponskih intenziteta teorijski može varirati od 2 pa do maksimalnog broja ograničenog brojačem DSP. Ipak, u [10] pokazano je da ripl momenta eksponencijalno opada sa povećanjem broja naponskih intenziteta i da je sa 6 naponskih intenziteta ripl smanjen 8 puta u poređenju sa riplom momenta koji se ima kod cDTC.

DVI-DT može biti dalje unapređen definisanjem više pravaca (8, 12, 16 ili više) naponskih vektora dalje povećavajući prostornu rezoluciju vektora statorskog napona. U tom slučaju bilo bi potrebno modifikovati prekidačku tabelu u zavisnosti od definisanog broja pravaca. Ipak, rezultati prezentovani u [11] pokazuju da stepen smanjenja ripla momenta kod DT algoritama baziranih na prekidačkim tabelama ne zavisi u velikoj meri od izabranog pravca naponskog vektora koliko od njegovog intenziteta. Stoga, zadržavanje konvencionalne prekidačke table sa 6 aktivnih naponskih vektora se čini opravdanim. Zahvaljujući odsustvu koordinatnih transformacija, složenih matematičkih operacija, PI regulatora itd., DVI-DTC algoritam ima veoma malo vreme izvršavanja i zadržava visoke dinamičke osobine karakteristične za cDTC. Navedene osobine promovisu DVI-DTC algoritam kao pogodnog kandidata za implementaciju u savremenim upravljačkim sistemima koji zahtevaju širok propusni opseg po momentu i kontrolu maksimalnog intenziteta ripla momenta u pogonu.



Sl. 2. Blok struktura DVI-DTC algoritma

III. AUTOMATSKA MODIFIKACIJA DVI-DTC ALGORITMA

U cilju adekvatnog smanjenja ripla momenta, broj diskretizovanih naponskih intenziteta može biti definisan na dva načina:

- Od strane korisnika (ručno) ili
- Automatski, od strane algoritma, bazirano na estimiranim vrednostima momenta i ripla.

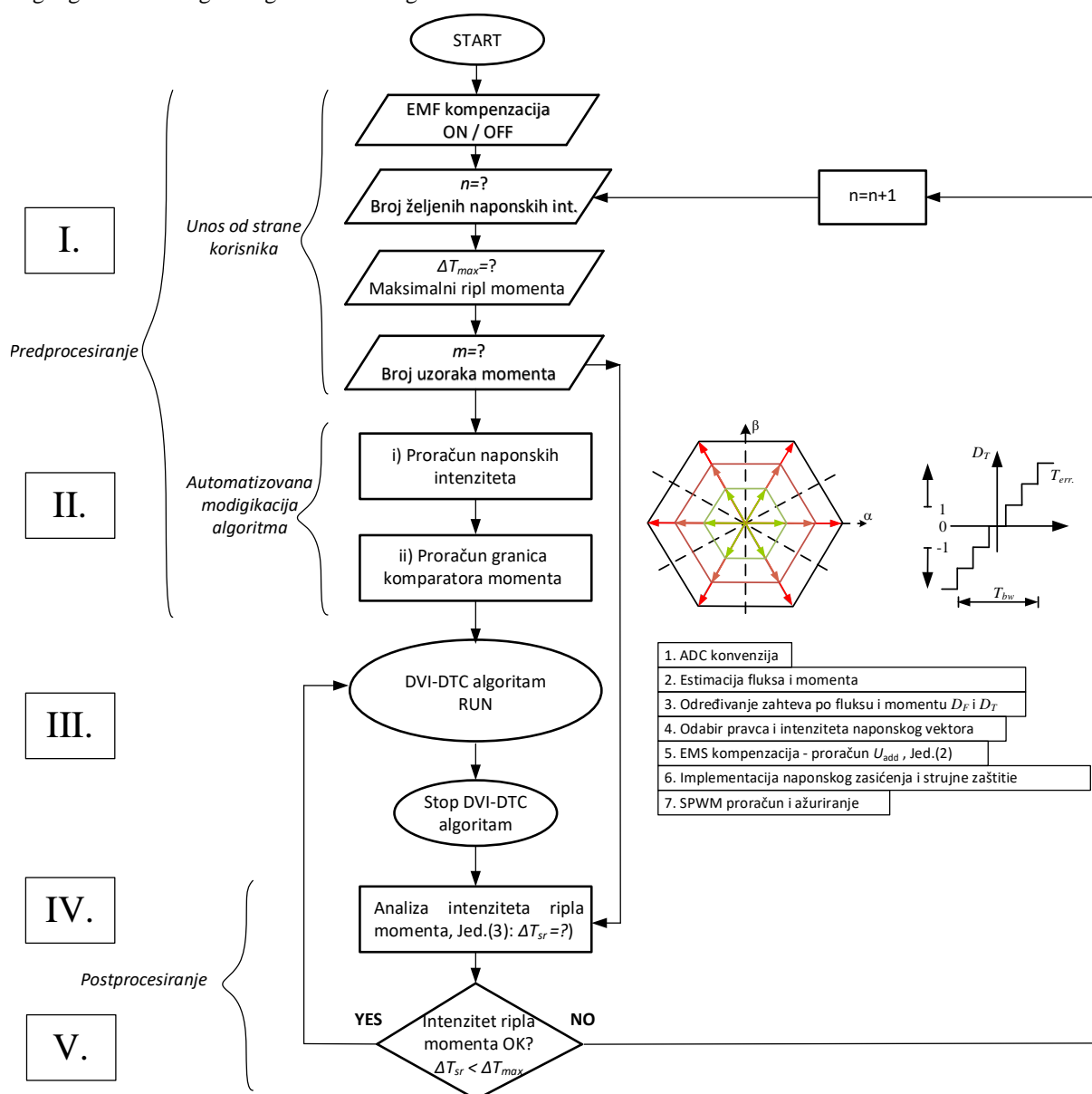
Na početku algoritma korisnik definiše broj naponskih intenziteta n , na osnovu koga se DVI-DTC algoritam dalje modifikuje pre starta. Pored ovoga, potrebno je definisati i maksimalno dozvoljeni intenzitet ripla momenta u pogonu ΔT_{max} , kao i broj uzoraka estimiranog momenta m na osnovnu koga će biti određen trenutna vrednost ripla momenta. Ukoliko je ripl momenta veći od definisane vrednosti ΔT_{max} , broj naponskih intenziteta se uvećava za jedan i algoritam nanovo modifikuje pre sledećeg starta. Slika 3 daje prikaz kompletnog algoritma inteligentnog DVI-DTC algoritma.

Inteligentni DVI-DTC algoritam je podeljen na 5 sekcija. U sekciji I zahteva se definisanje inicijalnih karakteristika pogona kao što su početni broj naponskih intenziteta i opcija kompenzacije EMS (uključena ON ili isključena OFF) od strane korisnika. Takođe u sekciji I definišu se i vrednosti za ΔT_{max} i m potrebne za analizu ripla momenta u sekciji IV.

Kao što je rečeno, uvećanje broja naponskih intenziteta ne zahteva izmene u prekidačkoj tabeli. Dalja automatska modifikacija algoritma svodi se na sledeća dva koraka:

- predefinisavanje odgovarajućih naponskih intenziteta u SVPWM jedinici i
- modifikacije granica komparatora momenta sa n nivoa.

Ova dva koraka, definisana u sekciji II, predstavljaju glavni deo automatske modifikacije DVI-DTC algoritma. Jednostavna automatizovana modifikacija u dva koraka omogućena je zahvaljujući raspregnutom izboru pravca i (prekidačka tabela) i intenziteta (komparator momenta sa n nivoa) kao glavnoj prednosti DVI-DTC algoritma.



Sl. 3. Inteligentni DVI-DTC algoritam

Predefinisane odgovarajućih naponskih intenziteta podrazumeva podelu punog opsega SVPWM generisanog naponskog vektora na jednake delove. Izuzimajući oblast nadmodulacije i negativan efekat mrtvog vremena, maksimalni intenzitet naponskog vektora generisanog uz SVPWM ograničen je radijusom upisanog kruga u heksagon koga formiraju šest aktivnih naponskih vektora (Sl.1), što predstavlja 86.7% od intenziteta maksimalnog naponskog vektora. Dalje se ovaj intenzitet deli na jednake delove na osnovu čega se definišu odgovarajuća vremena vođenja prekidačkih elemenata kod SVPWM. Odgovarajući komparator momenta i njegove granice određene su prema (1) ravnomernom raspodelom nivoa komparatora i odgovarajućih naponskih intenziteta u okviru širine komparatora T_{ba} .

Kako se opisane sekcije algoritma I i II izvršavaju pre starta glavnog dela DVI-DTC algoritma definisani su kao predprocesiranje. Ovo omogućava da glavni deo algoritma (sekcija III) zadrži proračunsku jednostavnost sličnu kao kod cDTC. Glavni deo DVI-DTC algoritma startuje sa ADC konverzijom statorskih struja i prikazan je na slici 3 koracima od 1 do 7.

Postprocesiranje odnosi se na sekcije IV i V koji se realizuju nakon zaustavljanja glavnog dela DVI-DTC algoritma. Ovaj deo zadužen je za analizu rezultata (ripla momenta) i odgovarajuće donošenje odluka u sekciji V. Ukoliko je rezultujući ripl momenta u okviru definisanih granica DVI-DTC algoritam može biti startovan opet. U suprotnom, broj definisanih naponskih intenziteta će biti uvećan u okviru sekcije I. Ova petlja (od sekcije V do sekcije I) omogućava uvećanje broja predefinisanih naponskih vektora za jedan nakon čega se na odgovarajući način algoritam automatski modifikuje u sekciji II. Odluka da li trenutna vrednost ripla momenta zadovoljava maksimalno definisanu vrednost ΔT_{max} (definisana od strane korisnika u sekciji I) donosi se na osnovu proračuna procentualne srednje vrednosti ripla momenta ΔT_{sr} u odnosu na nominalnu vrednost momenta motora T_n prema (3).

$$\Delta T_{sr} = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{x=1}^m (T_x - T_{ref.})^2}}{T_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Gde je m broj semplova estimiranog momenta prikupljenih u cilju analize ripla momenta T_x , a $T_{ref.}$ predstavlja aktuelnu referentnu vrednost momenta. U cilju što objektivnije ocene srednje vrednosti ripla momenta ΔT_{sr} , i odabira odgovarajućeg broja potrebnih naponskih intenziteta, potrebno je da budu ispunjeni sledeći uslovi:

- kompenzacija EMS mora biti uključena (ON)
- broj semplova estimiranog momenta m treba da obuhvata vrednosti momenta pri konstantnoj referentnoj vrednosti momenta.

Ova dva uslova obezbeđuju eliminisanje greške momenta kao posledice uticaja EMF (naročito pri visokim brzinama) i trenutne greške momenta koja se javlja kao posledica nagle promene referentne vrednosti i kašnjenja usled ograničene

dinamike odziva momenta kao i kašnjenja usled digitalne implementacije.

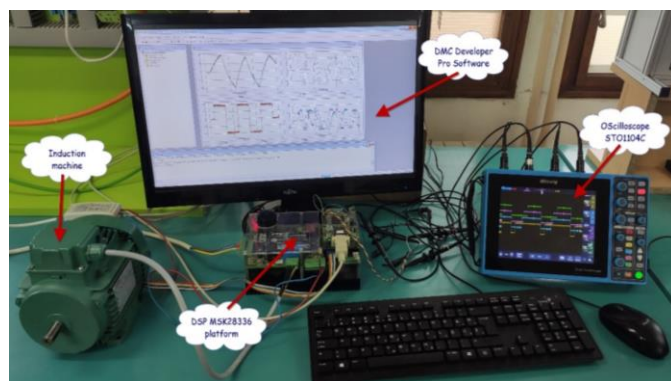
Očigledno, ova petlja zahteva da DVI-DTC algoritam najpre bude stopiran sa svakom novom iteracijom sve dok uslov maksimalnog ripla momenta ne bude ispunjen (sekcija V). Razlog ovome leži u činjenici što su delovi algoritma koji nisu prioritetni izmešteni u predprocesiranje i postprocesiranje i kao takvi pogodni su za implementaciju zajedno sa drugim *self-tuning* algoritmima opisanim u uvodu. Sa druge strane, ovim je omogućeno očuvanje jednostavnosti glavnog dela DVI-DTC algoritma.

Automatska regulacija ripla momenta moguća je i bez zaustavljanja DVI-DTC pogona u slučaju kada se sekcije I, II, IV i V izvršavaju paralelno sa sekcijom III. Ovo bi zahtevalo implementaciju ovih delova koda koji se izvršavaju sa manjom frekvencijom kao što su poziciona ili brzinska petlja. Drugi način odnosi se na implementaciju ovih delova u posebne delove koji se izvršavaju na zahtev korisnika ili nadređene upravljačke strukture.

DVI-DTC algoritam pretenduje da pokaže svoj pun potencijal sa višefaznim mašinama i odgovarajućim višefaznim pretvaračima gde mogu biti implementirani ne narušavajući originalnu jednostavnost. Prirodno veća prostorna rezolucija naponskog vektora kod višefaznih pretvarača može biti dalje umnožena uvođenjem diskretizovanih naponskih intenziteta što bi dovelo većeg stepena redukcije ripla momenta. Takođe implementacija DVI-DTC algoritma sa višefaznim mašinama bi omogućila unapređenje robusnosti i otpornosti sistema (eng. *fault tolerant*) na potencijalne kvarove na pojedinačnim fazama.

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

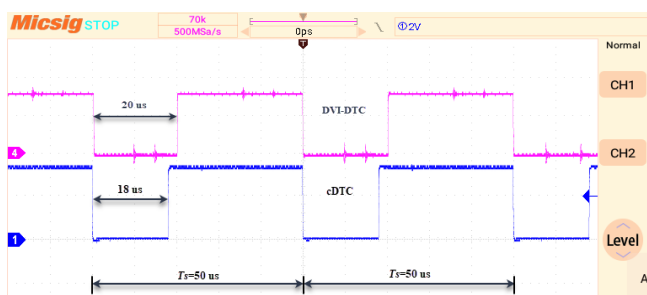
DVI-DTC algoritam implementiran je i testiran na MSK28335 DSP digitalnoj platformi u EMPA laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka u Čačku. DSP platforma sastoji se od TMS320F28335 procesora sa pokretnom tačkom, 150 MHz, konvencionalnog naponskih invertora sa 6 IGBT 750 W i 310 V DC kolom. Eksperimentalna platforma je prikazana na slici 4 dok su podaci motora dati u priložima.



Sl. 4. Eksperimentalna postavka sa merenjem vremena izvršavanja

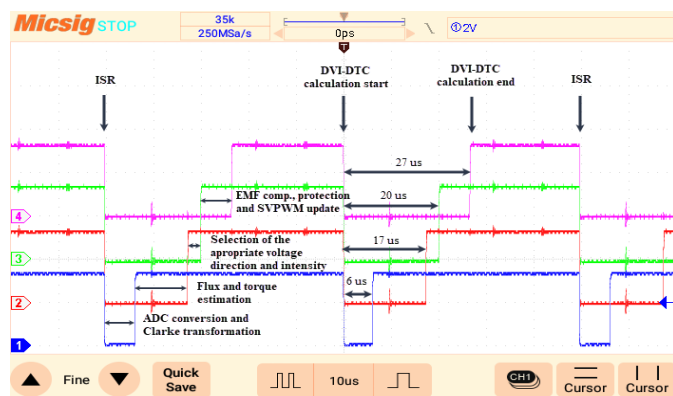
Prekidačka frekvencija je definisana na 20kHz, ostavljajući na raspolaganju $T_s=50 \mu s$ za izvršenje DTC algoritma.

Estimacija fluksa realizovana je sa *Gopinath* fluks opserversom [12] koji kombinuje strujni i naponski model mašine. Osciloskop ST01104C je korišćen za snimanje vremena izvršavanja pojedinih DVI-DTC algoritma praćenjem digitalnog izlaza procesora koji pri startu praćenog dela algoritma daje logičku nulu a pri završetku se opet vraća na nivo logičke jedinice. Vremena trajanja cDTC i DVI-DTC su snimljena i prikazana na slici 5.



Sl. 5. Vremena izvršavanja DVI-DTC (gore) i cDTC algoritama (dole)

Slika 5 potvrđuje da glavni deo DVI-DTC algoritma zahvaljujući svojoj jednostavnosti ima oko 2 μ s ($\approx 10\%$) duže vreme izvršavanja u poređenju sa cDTC. Pri aktiviranju kompenzacije EMS (ON), ovo vreme izvršavanja DVI-DTC produžava se oko 7 μ s kao što je prikazano na slici 6.



Sl. 6. Vremena izvršavanja delova DVI-DTC algoritma (sekcija III) sa uključenom kompenzacijom EMS

Eksperimentalni rezultati DVI-DTC sa 3, 4, 5 i 6 naponskih intenziteta sa ili bez kompenzacije indukovanе EMS prikazani su na slici 7. Vremenska osa odgovara uzorkovanju rezultata na 1 ms. Na brzinskoj osi 15 pulseva odgovara brzini od 900 min^{-1} dok je osa momenta izražena u Nm. Rezultati prikazani na slici 7 potvrđuju da se ripl momenta značajno smanjuje sa rastom broja definisanih naponskih intenziteta.

V. ZAKLJUČAK

Ovaj rad prezentuje inteligentni DTC algoritam baziran na diskretizovanim naponskim intenzitetima koji ima mogućnost se automatske adaptacije u zavisnosti od intenziteta ripla momenta. Odgovarajući broj naponskih intenziteta može biti definisan od strane korisnika ili automatski kroz iterativni postupak u cilju zadovoljenja definisanom maksimalnog ripla momenta u pogonu. Originalna jednostavnost i dobre dinamičke osobine koje karakterišu cDTC su zadržane kod DVI-DTC. Dobijeni eksperimentalni rezultati potvrđuju

proračunsku jednostavnost DVI-DTC algoritma u poređenju sa konvencionalnom DTC i značajno smanjenje ripla momenta sa porastom broja predefinisanih diskretizovanih naponskih intenziteta. Navedene karakteristike DVI-DTC sa mogućnošću automatske modifikacije u cilju redukcije ripla momenta čine ovaj metod kontrole pogodan za implementaciju u pametnim pogonima sledeće generacije.

DODATAK

TABELA II - PARAMETRI ASINHRONOG MOTORA SIEBER LS71

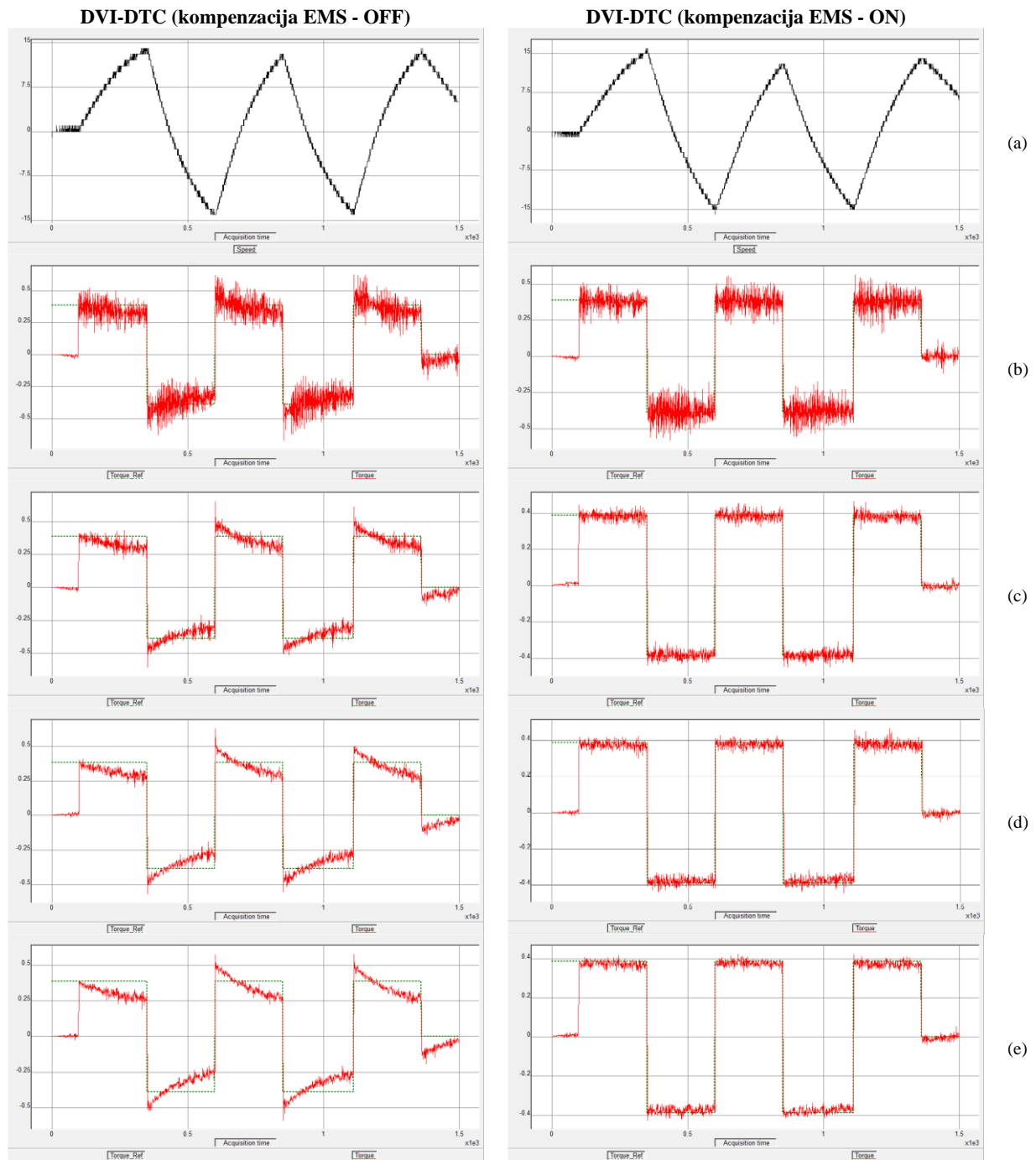
U_n [V]	400	R_s [Ω]	24.6
I_n [A]	0.95	R_r [Ω]	16.1
P_n [W]	370	L_m [H]	1.46
n_n [min^{-1}]	2860	L_s [H]	1.48
p [p.p.]	1	L_r [H]	1.48

ZAHVALNICA

Prikazani rezultati predstavljaju deo aktivnosti u okviru projekta pod ugovornim br. 451-03-68/2022-14/200132 zaključenog između Ministarstva prosvete nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i Fakulteta tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu.

LITERATURA

- [1] D. Mohan, X. Zhang, and G. H. Beng Foo, "Generalized DTC Strategy for Multilevel Inverter Fed IPMSMs with Constant Inverter Switching Frequency and Reduced Torque Ripples", *IEEE Trans. on Ener. Conv.* vol. 32, no. 3, pp. 1031–1041, 2017.
- [2] Casadei D, Serra G, Tani A., "Implementation of a direct control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation", *IEEE Trans. on P. Elec.*, vol. 15, no. 4, pp.769-777, 2012.
- [3] M. Holakoole, M. Ojaghi, A. Taheri, "Direct Torque Control of Six-Phase Induction Motor with a Novel MRAS-Based Stator Resistance Estimator", *IEEE Trans. on Ind. El.*, vol. 65, no.10, pp.7685-7696, 2018
- [4] M. N. Uddin, M. Hafeez and N. A. Rahim, "Self-tuned NFC and adaptive torque hysteresis-based DTC scheme for IM Drive", *Proc. of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-8, 2011.
- [5] L. Q. Zhou, "A new dead-time compensation method on direct torque control system based on DSP", *Proc. of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2359-2362, 2009.
- [6] M. N. S. K. Shabbir, X. Liang and S. Chakrabarti, "An ANOVA-Based Fault Diagnosis Approach for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors", *IEEE Trans. on Ener. Conv.*, vol. 36, no. 1, pp. 500-512, 2021.
- [7] S. Shi, Y., et al., "Moving Integration Filter-Based Open-Switch Fault-Diagnosis Method for Three-Phase Induction Motor Drive Systems", *IEEE Trans. on Tr. Electr.*, vol. 6, no. 3, pp. 1093-1103, 2020.
- [8] S. Suresh and R. P. P., "Virtual Space Vector-Based Direct Torque Control Schemes for Induction Motor Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 3, pp. 2719-2728, 2020.
- [9] M. Rosic, M. Bjekic, M. Bebic and B. Jcftenic, "Electromotive force compensation in direct torque control with discretized voltage intensities", *Proc. of the 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, pp. 1-6, 2016
- [10] M. Rosić, S. Antić, M. Bebić, "Improvements of torque ripple reduction in DTC IM drive with arbitrary number of voltage intensities and automatic algorithm modification", *Turk. Jour. of El. Eng. & Comp. Sci.*, vol. 29, no.2, pp. 687-703, 2021.
- [11] Arumugam S, Thathan M., "Novel switching table for direct torque controlled permanent magnet synchronous motors to reduce torque ripple", *Jour. of Power Electr.*, vol. 13 no. 6, pp. 939-954, 2013.
- [12] West, N. T., and Lorenz, R. D., "Digital Implementation of Stator and Rotor Flux-Linkage Observers and a Stator-Current Observer for Deadbeat Direct Torque Control of Induction Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 2, pp.729-736, 2009.



Sl. 7. Brzina (a) i estimirani moment (b) kod DVI-DTC sa 3 (b), 4 (c), 5 (d) i 6 (e) naponskih intenziteta sa i bez kompenzacije indukovane EMS

ABSTRACT

The paper presents characteristic of direct torque control method based on discretised voltage intensities with possibilities of automatic algorithm modification in terms of torque ripple reduction. The algorithm uses the conventional switching table with an arbitrary number of discretized voltage intensities allowing higher space-voltage resolution and consequently lower torque ripple. The number of available voltage intensities can be easily changed without the need to modify the conventional switching table. Depending on the number of defined, discretized voltage intensities corresponding

algorithm structures are automatized, making this kind of control method simple, effective, and suitable for upcoming smart drives in the rapidly growing industry 4.0. Experimental validation presented in the paper confirms improvements in torque ripple reduction retaining the simple and time-effective control structure of the induction machine DTC drive.

Intelligent DTC algorithm with automatic reorganisation based on the torque ripple intensity

Marko Rosić