

UTICAJ MRTVOG VREMENA FREKVENTNOG PRETVARAČA NA STABILNOST ASINHRONOG MOTORA

Veran Vasić, Miodrag Zubić, *Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu*
 Vladan Vučković, Slobodan Vukosavić, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj - U radu je razmotren uticaj mrtvog vremena impulsno širinski modulisanog invertora, na stabilnost asinhronog motora. Prikazani su odzivi brzine motora sa zanemarenim i sa uvažanim mrtvim vremenom pretvarača i date su osnovne smernice za procenu rizika od podržanih oscilacija.

1. UVOD

Za invertore mostnog tipa sa impulsno širinskom modulacijom (PWM) neophodno je izvesno vreme tokom koga su isključena oba prekidača u grani, kako bi se izbeglo da istovremeno vode oba prekidača. Taj vremenski period zove se mrtvo vreme (*dead time*). Tokom trajanja mrtvog vremena napon invertora je neupravljiv, polaritet napona je određen smerom struje, a amplituda izlaznog napona je određena naponom jednosmernog međukola.

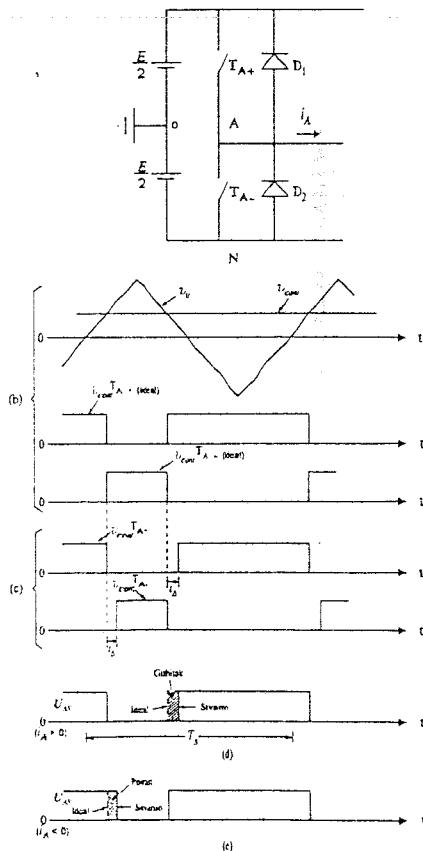
Ako se postave strogi uslovi kvaliteta izlaznog napona invertora, potrebno je izvršiti kompenzaciju napona usled prisustva mrtvog vremena. Koriste se različite metode za kompenzaciju izobličenja napona usled efekta mrtvog vremena. Modifikovanjem vremena vođenja prekidača, u [1] se predlaže kompenzacija napona, usled mrtvog vremena i usled pada napona na prekidačima na osnovu smera struje. Za realizaciju kompenzacije napona usled efekta mrtvog vremena Yu-Kang Lo [2] uvodi naponski ofset pozitivnog i negativnog predznaka u odnosu na sinusnu referencu napona.

Pri napajanju asinhronog motora iz frekventnog pretvarača uobičajeno se ne primenjuje kompenzacija napona usled efekta mrtvog vremena. U ovom radu cilj je bio da se napravi dovoljno tačan model pogona sa asinhronim motorom, PWM invertorom i L-C filtrom u jednosmernom međukolu, kako bi se dobijeni rezultati uporedili sa rezultatima dobijenim na eksperimentalnom prototipu. U radu su prikazani odzivi brzine asinhrog motora pri napajanju iz PWM invertora za različite učestanosti prvog harmonika napona, različita opterećenja i za različite vrednosti trajanja mrtvog vremena. Određena je oblast u f (učestanost) - m_e (moment) ravni u kojoj bar jedna svojstvena vrednost linearizovanog modela pogona ima pozitivan realan deo.

2. MODELOVANJE EFEKTA MRTVOG VREMENA PWM INVERTORA

Tokom trajanja mrtvog vremena napon invertora je određen smerom struje i naponom jednosmernog međukola. Za realizaciju simulacija bilo je potrebno generisati napon usled efekta mrtvog vremena koji se potom sabira sa

naponom generisanim pri zanemarenom efektu mrtvog vremena. Uticaj mrtvog vremena na izlazni napon invertora objašnjen je na primeru jedne grane trofaznog invertora što je prikazano na sl. 1a. Prikazan je izgled naponske referencе V_{CONT} za koju se pretpostavlja da je konstantna tokom jedne prekidačke periode. Poređenjem napona V_{CONT} sa trougaonim nosiocem V_D određeni su uglovi paljenja prekidačkih komponenti. Upravljački signali za gornji prekidač (T_{A+}) i donji (T_{A-}) su prikazani na sl. 1b.



Sl. 1. Efekat mrtvog vremena

U praksi, zbog konačnog vremena uključenja i isključenja prekidača mora se uvažiti mrtvo vreme, tako da se prekidači uključuju u trenucima kao na sl. 1c. Tokom mrtvog vremena isključena su oba prekidača, polaritet napona usled mrtvog vremena određen je smerom struje, kao što je prikazano na sl. 1d. i 1e. Napon usled efekta mrtvog vremena U_{ϵ} definisan je kao razlika napona U_{AN} bez uvažavanja mrtvog vremena i napona U_{AN} sa uvaženim efektom mrtvog vremena [3].

$$U_{\epsilon} = (U_{AN})_{ideal} - (U_{AN})_{stvarno} \quad (1)$$

Uticao mrtvog vremena je moguće uvažiti usrednjavanjem napona usled mrtvog vremena tokom komutacione periode (T_D) [4], tako da se dobija sledeći izraz za napon usled efekta mrtvog vremena.

$$\Delta U_{AN} = \frac{t_D}{T_s} E \quad I_A > 0 \quad (2)$$

$$\Delta U_{AN} = -\frac{t_D}{T_s} E \quad I_A < 0$$

U narednom delu prikazani su odzivi brzine asinhronog motora, pri napajanju iz PWM invertora sa uvažavanjem efekta mrtvog vremena uz pomoć jednačine (1).

3. ISPITIVANJE UTICAJA MRTVOG VREMENA NA DNAMIČKO PONAŠANJE ASINHRONOG MOTORA PUTEM SIMULACIJA NA RAČUNARU

Radi pogodnog matematičkog opisa uvode se uobičajene pretpostavke [5]. Smatra se da je magnetopobudna sila po obimu zavora sinusno raspodeljena, zanemaruje se magnetno zasićenje, parametri su konstantni. Vrednosti parametara asinhronog motora i filtra prikazani su u tabeli 1.

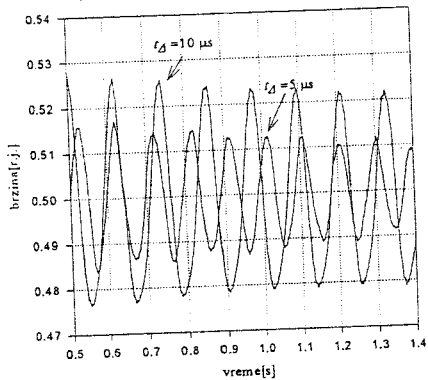
Tabela 1. Vrednosti parametara pogona

otpor statora	2,044	[Ω]
otpor rotora	1,873	[Ω]
induktivnost statora	0,1995	[H]
induktivnost rotora	0,2	[H]
međusobna induktivnost	0,1915	[H]
induktivnost filtra	0,0011	[H]
kapacitivnost filtra	0,0022	[F]

Matematički model asinhronog motora, L-C filtra, PWM invertora sa uvaženim efektom mrtvog vremena sastoji se od šest nelinearnih diferencijalnih jednačina. Učestanost trougaonog modulišućeg nosioca iznosi 4kHz. Trenuci komutacije prekidača su određeni poređenjem trougaonog modulišućeg nosioca i sinusne reference napona. Izlazni napon koji je na ovaj način generisan ne uvažava efekat mrtvog vremena. Na ovako generisan izlazni napon potrebno je dodati napon usled efekta mrtvog vremena, kao što je objašnjeno u drugom delu ovog rada. Vrednost mrtvog vremena zavisi od vrste prekidačkih komponenata, za bipolarne tranzistore je reda 10μs, za IGBT je 5μs. Male vrednosti mrtvih vremena nameću vrednost koraka

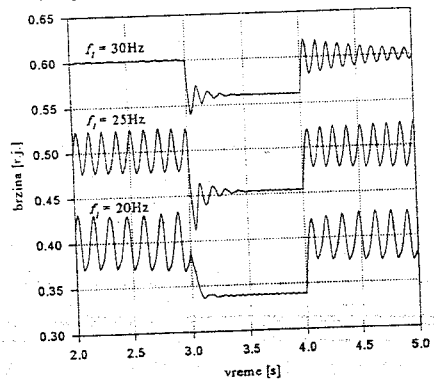
proračuna od desetog dela mrtvog vremena. Ako se efekat mrtvog vremena, uvaži pomoću usrednjenog napona usled mrtvog vremena tokom komutacione periode, izbegava se potreba za ekstremno malim korakom proračuna. Mrtvo vreme ima uticaj na odziv asinhronog motora pri vrednostima učestanosti prvog harmonika koje su ispod 50% nominalne učestanosti.

Na sl. 2. prikazan je izgled brzina pri učestanosti osnovnog harmonika (f_f) od 25Hz za dve različite vrednosti mrtvog vremena $t_D = 10\mu s$ i $t_D = 5\mu s$. Pri ovoj učestanosti prvog harmonika pojavljuju se podržane oscilacije, brzina osciluje oko sinhronne brzine. Za veće vrednosti mrtvog vremena amplituda oscilacije je veća.



Sl.2. Odziv brzine pri $t_D = 10\mu s$ i $t_D = 5\mu s$

Opterećenje pogona utiče na prigušenje oscilacije brzine, što je prikazano na sl. 3.

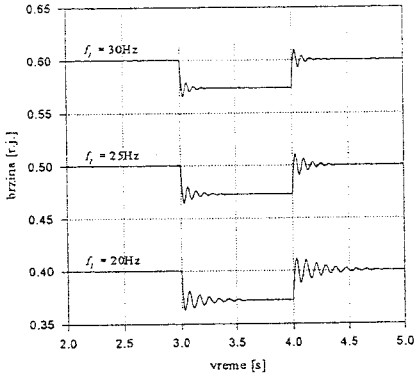


Sl.3. Odziv brzine pri $t_D = 10\mu s$ i $f_f = 30Hz, 25Hz$ i $20Hz$.

Na sl. 3. prikazan je odziv brzine za tri različite učestanosti prvog harmonika za $f_f = 30Hz, 25Hz$ i $20Hz$, dok mrtvo vreme iznosi 10μs. Pri $f_f = 30Hz$ ne postoje podržane oscilacije. Podržane oscilacije se javljaju pri $f_f = 25Hz$ i $f_f = 20Hz$. U trenutku $t = 3s$ pogon je opterećen

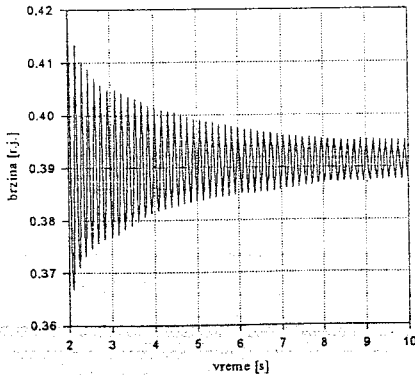
momentom od 8Nm, pri čemu dolazi do iščezavanja podržanih oscilacija. Nakon rasterećenja pogona u $t = 4s$ pojavljuju se podržane oscilacije pri $f_f = 25Hz$ i $f_f = 20Hz$. Pri učestanosti od $f_f = 30Hz$ faktor prigušenja pogona je mali po iznosu ali pozitivan, usled čega oscilacije sporo iščezavaju.

Ako ne uvažimo mrtvo vreme invertora podržane oscilacije se ne pojavljuju. Simulirana je promena opterećenja kao na prethodnoj slici a rezultati simulacija su prikazani na sl. 4.



Sl. 4. Odziv brzine pri $t_d = 0 \mu s$ i $f_f = 30Hz, 25Hz$ i $20Hz$

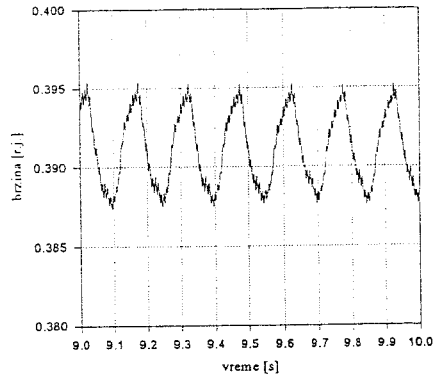
Na sl. 5. i 6. prikazan je vremenski tok brzine pri opterećenju od 2Nm. Promena opterećenja je usledila u trenutku $t = 2s$. Amplituda podržanih oscilacija brzine je manja nego za slučaj neopterećenog motora. Na sl. 6. prikazan je uvećan detalj brzine motora pri opterećenju od 2Nm.



Sl. 5. Odziv brzine pri opterećenju od 2Nm

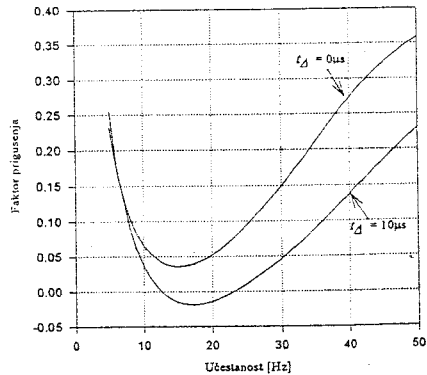
Skup diferencijalnih jednačina koji predstavlja matematički model pogona asinhronog motora je nelinearan. Analiza stabilnosti nelinearnog sistema zahteva primenu složene teorije stabilnosti Ljapunova. Da bi primenili relativno jednostavne kriterijume stabilnosti razvijene za

linearne sisteme potrebno je izvršiti linearizaciju skupa diferencijalnih jednačina. U svakoj tački $f \cdot m_e$ ravni izračunate su svojstvene vrednosti Jakobijeve matrice linearizovanog sistema, kako bi se dobila oblast u kojoj bar jedna svojstvena vrednost ima



Sl. 6. Odziv brzine pri opterećenju od 2Nm

pozitivan realan deo, dakle oblast nestabilnosti. Faktor prigušenja pogona opada sa smanjenjem učestanosti dok pri učestanosti od 25Hz faktor prigušenja postaje negativan, što dovodi do pojave podržanih oscilacija. Slika 7. prikazuje promenu faktora prigušenja sistema sa zanemarenim i sa uvažanim efektom mrtvog vremena. Oblast nestabilnosti u $f \cdot m_e$ ravni je prikazan na sl. 8.

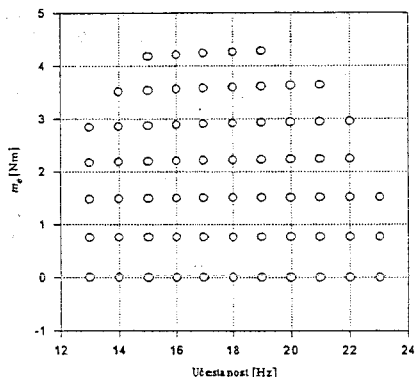


Sl. 7. Faktor prigušenja

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmotren je odziv brzine asinhronog motora napajanog iz PWM invertora sa uvažanim mrtvim vremenom. Zadavanjem referentne učestanosti prvog harmonika, koje su manje od polovine nominalne učestanosti, postoji mogućnost nastanka podržanih oscilacija, usled čega je potrebno uvažiti mrtvo vreme pri

simulacijama. Povećanje opterećenja dovodi do smanjenja amplitude oscilacija i postepenog iščezavanja podržanih oscilacija. Amplituda podržanih oscilacija opada sa smanjenjem mrtvog vremena. Na osnovu simulacija pokazano je postojanje podržanih oscilacija za učestanosti 2.5Hz i 20Hz što se poklapa sa rezultatima prikazanim na sl. 7 i sl.8.



Sl. 8. Oblast nestabilnosti

LITERATURA

- [1] I.W. Choi, 'Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation', *IEEE IAS Annual Meeting*, Atlanta, GA, pp.100-106, 1994.
- [2] Y.K. Lo, 'A voltage-mode controlled high-input-power-factor AC line conditioner with minimized output voltage harmonics', *IEEE Trans. on Power Electronics*, pp.369-374, 1989.
- [3] N. Mohan, 'Power electronics', John Wiley & Sons, 1989.
- [4] S.G. Jeong, M.H. Park, 'The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters' *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp.108-114, 1991.
- [5] V. Vučković, 'Opšta teorija električnih mašina', Nauka, Beograd, 1992.

Abstract - The paper investigates influence of dead time on the instability of induction motor. The influence of the dead time on velocity is also shown.

The Influence of Inverter Dead-Time on the Instability of Induction Motor

Veran Vasić
 Miodrag Zubić
 Vladan Vučković
 Slobodan Vukosavić