

# UPRAVLJANJE AKTIVNIM ISPRAVLJAČEM KAO VIRTUELNOM SINHRONOM MAŠINOM

Jovana GLUŠČEVIĆ, Mihailo TANASIĆ, Leposava RISTIĆ, Milan BEBIĆ

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet  
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd

**Apstrakt:** U radu je analiziran aktivni ispravljač kod koga je upravljanje realizovano sa ciljem da se obezbedi neophodna podrška stabilnosti mreže na koju je priključen u pogledu napona i učestanosti. Emulacijom inercije u upravljačkom delu aktivnog ispravljača, njegove performanse oponašaju sinhronu mašinu koja je direktno priključena na mrežu, a ovaj koncept upravljanja se naziva virtuelna sinhrona mašina. U radu je prikazan detaljan matematički model opisanog koncepta, izdvojeni su najbitniji parametri sistema i detaljno je opisana regulacija jednosmernog napona i reaktivne snage. Izvršene su simulacije na modelu virtuelne sinhronne mašine i izvedeni su odgovarajući zaključci, kao i smernice za budući rad.

**Ključne reči:** aktivni ispravljač, virtuelna sinhrona mašina, sinhroni generator, energetska efikasnost, obnovljivi izvori energije

## 1. UVOD

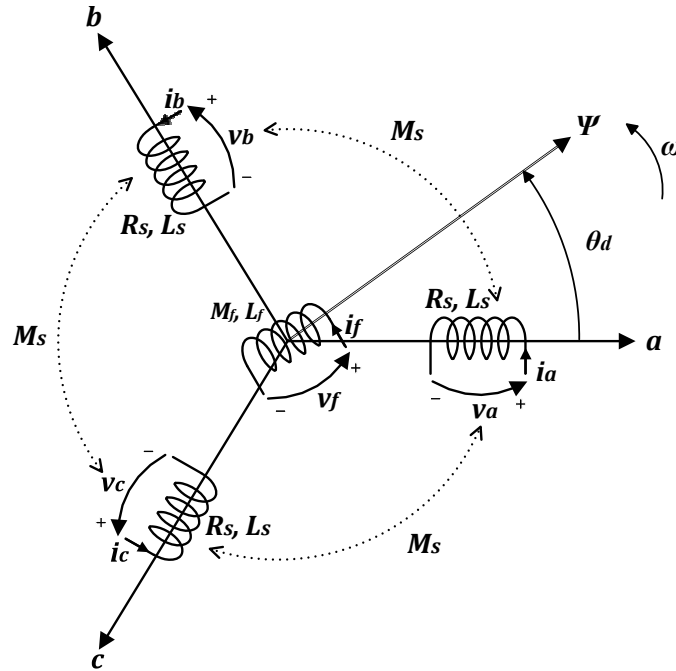
Konstantan porast potrošnje energije u svetu, smanjenje rezervi fosilnih goriva kao i negativni uticaj njihovog sagorevanja na životnu sredinu, postali su glavni podsticaj za razvoj novih proizvodnih kapaciteta elektroenergetskih sistema. To je razlog zbog koga se obnovljivim izvorima pridaje sve veći značaj i zbog čega su oni jedna od najaktuelnijih tema kada je reč o električnoj energiji i zaštiti životne sredine. Energetski pretvarači se sve češće koriste usled povećanih potreba za integracijom obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem, sa ciljem njegovog decentralizovanja. Takođe, njihova primena je sve češća i u industriji, koja je najveći potrošač električne energije, doprinoseći na taj način uštedi električne energije u regulisanim elektromotornim pogonima, pored omogućavanja složenih zahteva proizvodnih procesa. Standardni energetski pretvarači priključeni na mrežu imaju veoma brz odziv, jer je njihov moment inercije zanemarljiv. To je razlog zbog koga oni ne mogu da obezbede neophodnu podršku stabilnosti mreže u pogledu napona i učestanosti. Takođe imaju problem i sa podrškom u pogledu ukupne inercije sistema, a u skladu s tim i sa odgovarajućim prigušenjem oscilacija karakterističnih veličina u prelaznim procesima [1]. Ukoliko je udeo energetskih pretvarača u mreži mali, negativan uticaj njihove primene je zanemarljiv. Međutim, pri povećanju prisustva ovih uređaja sa standardnim upravljanjem, situacija se menja u pogledu promenljivosti inercije i učestanosti, što nije karakteristika tradicionalnih sistema [2]. Jedan od načina za prevazilaženje ovog problema jeste primena novog koncepta upravljanja, upravljanje energetskim pretvaračem kao virtuelnom sinhronom mašinom, koje se zasniva na matematičkom modelu sinhronne mašine [3, 4]. Na taj način, energetski pretvarači, iako fizički statički, dobijaju osobine obrtne sinhronne mašine. U radu je razmatran aktivni ispravljač, kod koga se ovim načinom upravljanja održava napon na jednosmernoj strani na zadatoj vrednosti i obezbeđuje jedinični faktor snage, regulacijom reaktivne snage.

Rad je organizovan na sledeći način: u prvom poglavlju je prikazan model sinhronne mašine (SM), čije su jednačine korišćene za upravljanje aktivnim ispravljačem, odnosno virtuelnom sinhronom mašinom (VSM). Model VSM je opisan u drugom poglavlju, nakon čega sledi poglavlje sa prikazanim

rezultatima simulacija na modelu razvijenom u *Matlab Simulinku*. Poslednje poglavlje predstavlja zaključak u kom su istaknuta glavna svojstva VSM.

## 2. MODEL SINHRONE MAŠINE

Analizirana je trofazna dvopolna sinhrona mašina sa cilindričnim, namotanim rotorom, u motornom režimu rada. Pretpostavljeno je da namotaji faza statora imaju provodnike sinusoidalno raspodeljene po obimu mašine, ali su oni radi jednostavnijeg grafičkog prikaza predstavljeni kao koncentrisani, kao na slici 1. Na isti način prikazan je i rotorski, odnosno pobudni namotaj. Jednačine kojima se modeluje sinhrona mašina date su u nastavku [5, 6].



Slika 1 Model sinhronne mašine sa koncentrisanim namotajima

Ugлом  $\theta_d$  definisan je položaj rotora u odnosu na referentnu osu statora, odnosno  $\theta_d$  predstavlja ugao između ose namotaja faze  $a$  statora i ose pobudnog namotaja na rotoru,

$$\theta_d = \omega t + \theta_{d0}, \quad (1)$$

gde  $\omega$  predstavlja ugaonu brzinu rotora, a  $\theta_{d0}$  definiše položaj rotora u trenutku  $t = 0$ . Međusobne induktivnosti namotaja statora i rotora su promenljive u vremenu, a definisane su kao proizvod konstante  $M_f$  i kosinusa ugla  $\theta_d$ :

$$L_{af} = M_f \cos \theta_d \quad (2)$$

$$L_{bf} = M_f \cos(\theta_d - 120^\circ) \quad (3)$$

$$L_{cf} = M_f \cos(\theta_d - 240^\circ) \quad (4)$$

Sada je moguće definisati flukseve koje stvaraju namotaji statora i rotora,

$$\lambda_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \quad (5)$$

$$\lambda_b = L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \quad (6)$$

$$\lambda_c = L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \quad (7)$$

$$\lambda_f = L_{af}i_a + L_{bf}i_b + L_{cf}i_c + M_f i_f, \quad (8)$$

gde su  $L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s$  sopstvene induktivnosti namotaja statora, odnosno  $L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = -M_s$  međusobne induktivnosti između namotaja statora, a  $i_f$  predstavlja struju rotorskog namotaja. Polazeći od izraza kojim se određuje trenutna vrednost napona namotaja statora,

$$v = R_s i + \frac{d\lambda}{dt}, \quad (9)$$

gde  $R_s$  predstavlja otpornost statorskog namotaja, kao i izraza koji važi kada je namotaj statora sa izolovanim zvezdištem,

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad (10)$$

dobijaju se izrazi od (11) do (13):

$$v_a = R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = R_s i_a + (L_s + M_s) \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (11)$$

$$v_b = R_s i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} = R_s i_b + (L_s + M_s) \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (12)$$

$$v_c = R_s i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} = R_s i_c + (L_s + M_s) \frac{di_c}{dt} + e_c. \quad (13)$$

U izrazima (11-13),  $e_a$ ,  $e_b$  i  $e_c$  predstavljaju kontraelektromotorne sile u fazama statorskog namotaja i izračunavaju se na osnovu izraza (14)-(16).

$$e_a = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d) \quad (14)$$

$$e_b = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d - 120^\circ) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d - 120^\circ) \quad (15)$$

$$e_c = -M_f i_f \omega \sin(\theta_d - 240^\circ) + M_f \frac{di_f}{dt} \cos(\theta_d - 240^\circ) \quad (16)$$

Energija sadržana u magnetskom polju električne mašine predstavlja sumu magnetske energije statorskog i rotorskog polja (17) [7], iz koje se u procesu elektromehaničke konverzije, pri odgovarajućoj brzini, stvara obrtni moment.

$$W = \frac{1}{2}(i_a \lambda_a + i_b \lambda_b + i_c \lambda_c) + \frac{1}{2} i_f \lambda_f \quad (17)$$

Prvi izvod energije po ugaonom, mehaničkom pomeraju, uz uvažavanje broja pari polova mašine, predstavlja elektromagnetski (obrotni) moment mašine (pri konstantnim fluksevima, odnosno strujama statora i rotora, kada se može zanemariti kontraelektromotorna sila i smatrati da se sva energija pretvara u mehaničku [7]).

$$T_e = -\frac{dW}{d\theta_m} = -p \frac{dW}{d\theta_d} = p M_f i_f (i_a \sin(\theta_d) + i_b \sin(\theta_d - 120^\circ) + i_c \sin(\theta_d - 120^\circ)) \quad (18)$$

Za kompletiranje modela preostaje Njutnova jednačina kojom je opisan mehanički sistem SM-e,

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m - D_p (\omega - \omega_{grid}), \quad (19)$$

gde  $J$  predstavlja moment inercije rotora mašine,  $T_m$  moment opterećenja, dok  $D_p$  modeluje postojanje prigušnog namotaja. U nastavku će biti analiziran uticaj ova dva parametra na ponašanje pretvarača, kojim se upravlja primenom VSM koncepta.

### 3. MODEL VIRTUELNE SINHRONE MAŠINE

Kao što je pomenuto u uvodnom delu, problemi stabilnosti uzrokovani povećanjem prisustva energetskih pretvarača u mreži, mogu se ublažiti upotrebom pretvarača kod kojih je upravljanje zasnovano na jednačinama matematičkog modela SM-e. U literaturi se energetski pretvarači sa ovakvim načinom upravljanja često nazivaju sinhrokonvertori [3]. Ukoliko se razmatra ispravljač,



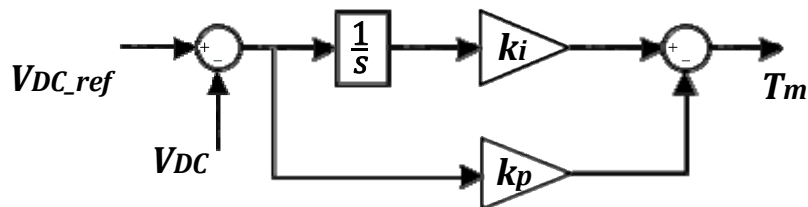
U modelu su korišćene jednačine SM-e za proračun elektromotornih sila (14-16) i elektromagnetskog momenta (18), kao i jednačina za proračun reaktivne snage (20) [11].

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c] \quad (20)$$

Održavanje vrednosti napona jednosmernog kola na zadatoj vrednosti je, uz jedinični faktor snage prema mreži, kod analiziranog aktivnog ispravljača obezbeđeno upotrebom *PI* i *I* regulatora, respektivno. Navedeni regulatori opisani su u nastavku, kao i blokovi za faznu sinhronizaciju (*Phase Locked Loop* – *PLL*) i za sinhronizaciju sa mrežom.

### 3.1.1. Regulacija jednosmernog napona

Usled velike kapacitivnosti kondenzatora u jednosmernom kolu na izlazu ispravljača, u ustaljenom režimu se može pretpostaviti da je vrednost jednosmernog napona  $V_{DC}$  konstantna. Takođe, pretpostavlja se da celokupna snaga koju generiše ispravljač predstavlja zbir snage koja je neophodna zadatom opterećenju i snage koja održava napon na kondenzatoru u uskom opsegu vrednosti oko referentne. Navedene pretpostavke su iskorišćene za proračun parametara regulatora jednosmernog napona. Realizovani *PI* regulator prikazan je na slici 4, a njegovi parametri su dobijeni primenom metode modulnog optimuma prema [12].



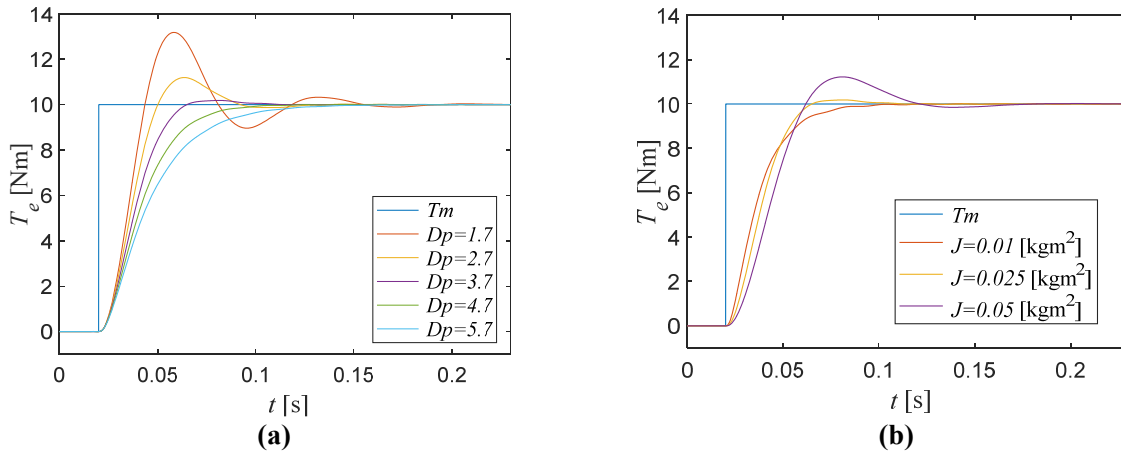
Slika 4 Blok 1 sa Slike 3:  $V_{DC}$  regulacija

Odstupanje vrednosti napona jednosmernog (DC) kola u odnosu na željenu vrednost, koje se tumači kao greška, dovodi se na ulaz *PI* regulatora. Izlaz regulatora predstavlja opterećenje VSM-a  $T_m$ , dok odziv sistema kojim je on modelovan predstavlja elektromagnetski moment,  $T_e$ . Dakle, referencu DC napona treba tumačiti kao opterećenje motora. Frekvencija mrežnog napona se menja u uskim granicama oko vrednosti 50 Hz pa je, u cilju lakšeg podešavanja regulatora, usvojeno da je ona konstantna. Proizvod ugaone brzine (proporcionalne frekvenciji mrežnog napona,  $\omega = 2\pi f$ ) i generisanog momenta  $T_e$  predstavlja mehaničku snagu VSM-a.

U sistemu u kojem je kondenzator jednosmerne strane predstavljen konstatnim izvorom DC napona, analiziran je odziv VSM-a na poremećaj izražen naglom, odskočnom promenom momenta opterećenja  $T_m$ . Odziv motora na navedeni poremećaj, odnosno elektromagnetski moment  $T_e$ , dominantno je uslovljen parametrima mehaničkog sistema i to momentom inercije  $J$ , kao i virtuelnim faktorom prigušenja  $D_p$ . Uticaj promene vrednosti parametra  $D_p$  za konkretne vrednosti momenta inercije, kao i uticaj promene momenta inercije  $J$  za prethodno utvrđenu vrednost parametra  $D_p$  prikazan je sa slici 5.

Jednačine električnog dela matematičkog modela SM-a ne uzimaju u obzir parametre prigušnog namotaja mašine, već on egzistira samo u jednačinama mehaničkog sistema kao parametar  $D_p$ . Može se uočiti da sistemi koji imaju veći moment inercije karakteriše sporiji odziv, duže oscilovanje, kao i veći preskok. Prednost upotrebe energetske pretvarača zasnovanih na VSM-i u odnosu na realnu mašinu se ogledaju upravo u činjenici da im se karakteristike sistema mogu menjati, jednostavnom promenom parametara  $J$  i  $D_p$  u upravljačkom delu. Tranzijent koji karakteriše SM-u je uslovljen realnim karakteristikama statora i rotora, određenih prilikom projektovanja, izrade mašine i formiranja statorskog i rotorskog namotaja. Međutim, kod VSM-e se adekvatnim podešavanjem regulatora može

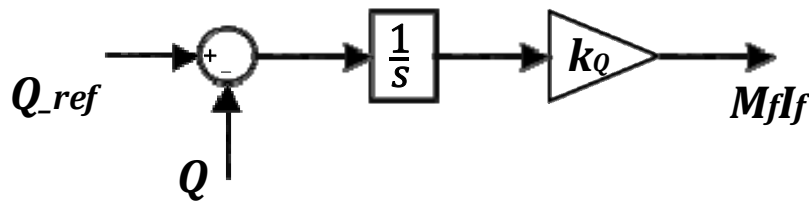
uticati na ponašanje energetskog prevarača i ostvariti željeni odziv u ustaljenom stanju sa očekivanim ponašanjem u prelaznim režimima. Sa slike 5 se može primetiti da se VSM-a pri određenim vrednostima  $J$  i  $D_p$  ponaša kao sistem prvog reda, što značajno olakšava projektovanje regulatora jednosmernog napona.



Slika 5 Uticaj promene parametara na odziv momenta: (a) Promena parametra  $D_p$  pri konstantnom  $J$  (b) Promena parametra  $J$  pri konstantnom  $D_p$

### 3.1.2. Regulacija reaktivne snage

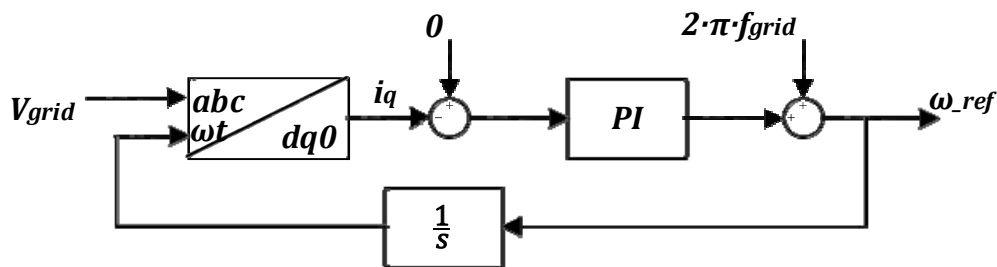
U slučaju VSM-a, odstupanje postignute vrednosti reaktivne snage od željene dovodi se na ulaz integratora. Kod aktivnog ispravljača se upravljanjem reaktivna snaga održava na nultoj vrednosti, u cilju postizanja jediničnog faktora snage. Pad reaktivne snage ispod željene vrednosti kod VSM-a zahteva povećanje napona pobude za povratak u definisani režim rada, dok je u suprotnom neophodno smanjiti napon pobude. Za ostvarenje opisanog rada, neophodno je dodati negativan znak ispred regulatora. Šematski prikaz  $I$  regulatora dat je na slici 6. Izlazna vrednost kod VSM-a je, dimenziono, fluks mašine, koji predstavlja proizvod pobudne struje i sopstvene induktivnosti rotorskog namotaja.



Slika 6 Blok 2 sa Slike 3: Regulacija reaktivne snage

### 3.1.3. Fazno sinhronizovana petlja (PLL)

Za rad aktivnog ispravljača na mreži neophodno je imati informaciju o frekvenciji mrežnog napona koju obezbeđuje trofazni PLL. Šema PLL-a prikazana je na slici 7. Estimirana vrednost kružne učestanosti prosleđuje se mehaničkom sistemu koji je potom poredi sa kružnom učestanošću koja je proporcionalna brzini obrtanja rotora. Razlika ovih vrednosti pomnožena faktorom  $D_p$  utiče na kružnu učestanost virtuelne mašine, kako bi je izjednačila sa mrežnom.



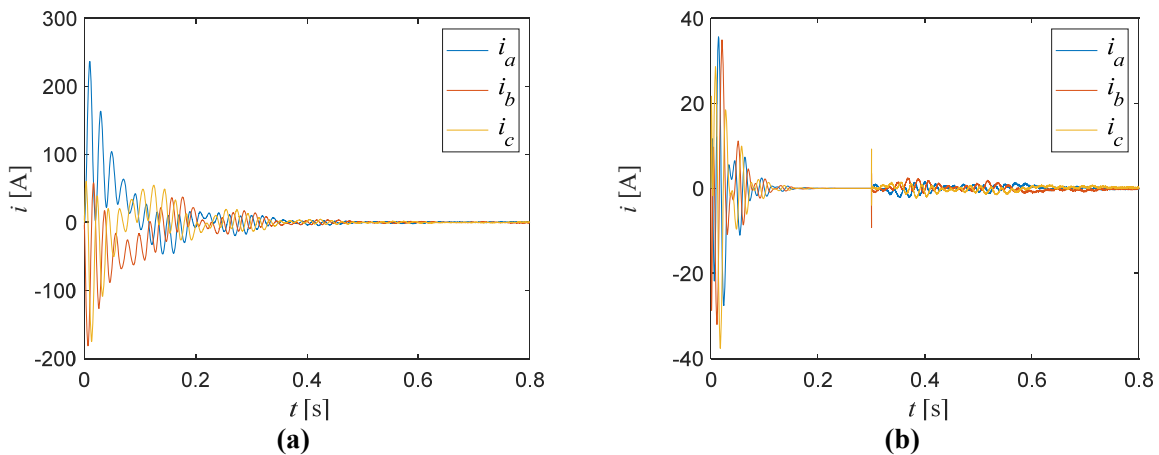
Slika 7 Blok 3 sa Slike 3: PLL petlja

### 3.1.4. Blok za sinhronizaciju sa mrežom

Prilikom priključivanja energetskog pretvarača na mrežu neophodno je da napon na njegovim priključcima bude jednak po amplitudi i faznom stavu sa mrežnim naponom. Za postizanje ovih vrednosti potrebno je algoritmu upravljanja dovesti „virtuelne struje“ dobijene na osnovu izraza

$$i_s = \frac{u - e}{sL + R} \quad (21)$$

gde je  $sL + R$  „virtuelna impedansa“ [3]. Na ovaj način smanjuju se struje koje bi se javile u prelaznom procesu prilikom priključenja u proizvoljnom trenutku i koje bi mogle da izazovu reagovanje zaštite ili da oštete pretvarač. Nakon priključenja, algoritmu upravljanja je neophodno dovesti stvarne, izmerene vrednosti struja. Na slici 8 (a) prikazane su struje koje se javljaju u slučaju kada nije izvršena sinhronizacija. Može se uočiti da su struje u trenutku priključenja, što je ujedno i početni trenutak simulacije, velike. Na slici 8 (b) u trenutku  $t = 0.3$  s izvršeno je priključenje ispravljača na mrežu, uz prethodno izvršenu sinhronizaciju. Na intervalu od 0 s do 0.3 s prikazane su virtuelne struje koje se računaju prema jednačini (21). Kada njihova vrednost postane jednaka nuli, tj. kada se napon na priključcima energetskog pretvarača izjednači po amplitudi i fazi sa mrežnim naponom, izvrši se sinhronizacija. U tom trenutku prekidač u bloku 4 na slici 3 menja položaj i stvarne struje pretvarača, prikazane na intervalu od 0.3 s do 0.8 s, postaju merodavne za algoritam upravljanja. Uočava se da je u ovom slučaju struja pri priključenju značajno manja u odnosu na struju koja se ima pri priključenju bez sinhronizacije.

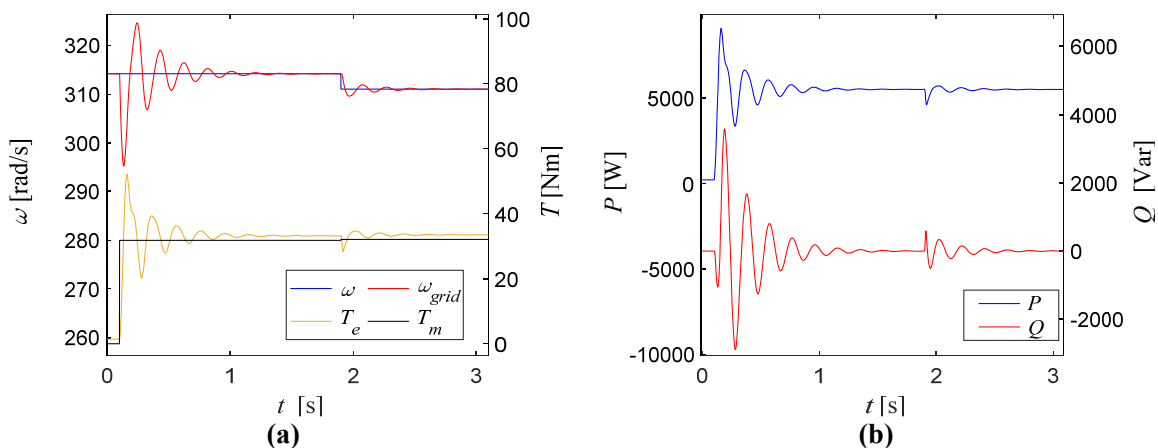


Slika 8 Talasni oblik struja koje se dovode algoritmu: (a) Bez algoritma za sinhronizaciju, (b) Uz postojanje algoritma za sinhronizaciju

#### 4. REZULTATI SIMULACIJE

Kako bi se potvrdila efikasnost predloženog algoritma, sprovedene su simulacije rada SM-a i VSM-a. Simulacija je izvršena u programu *Matlab/Simulink*. Četvoropolna sinhrona mašina, snage 8 kVA, momenta inercije  $0.04 \text{ kgm}^2$  priključena je na mrežni napon 400 V, frekvencije 50 Hz. Pri simulaciji rada SM-a regulisana je reaktivna snaga, čija je zadata vrednost jednaka nuli. Upoređen je odziv momenta, brzine i reaktivne snage SM-a i VSM-a pri promeni mrežne učestanosti i momenta opterećenja mašina.

Na slici 9 prikazani su rezultati simulacije rada SM-a. Prva promena, koja se javlja u trenutku  $t_1 = 0.1 \text{ s}$ , modeluje nagli porast snage opterećenja mašine iz praznog hoda na  $P = 5 \text{ kW}$ . Odziv momenta je oscilatoran i u ustaljenom stanju dostiže vrednost od približno  $T_e = 35 \text{ Nm}$ . Ova vrednost odgovara proceni momenta opterećenja  $T_m$  na osnovu zadate snage i postignute brzine, koja je crnom bojom prikazana na slici 9 (a). Poremećaj u vidu naglog smanjenja frekvencije mrežnog napona za 1% zadat je u trenutku  $t_2 = 2 \text{ s}$ . Oscilacije koje se javljaju u prelaznom procesu uslovljene su električnim i mehaničkim karakteristikama mašine. Uticaj navedenih promena na aktivnu i reaktivnu snagu prikazan je na slici 9 (b).



**Slika 9** Rezultati simulacije rada SM-a: (a) Kružna učestanost mrežnog napona, kružna učestanost mašine, moment koji generiše mašina i procena momenta opterećenja. (b) Aktivna i reaktivna snaga

Parametri VSM-a i pojačanja regulatora napona i reaktivne snage korišćeni u simulaciji rada VSM-a dati su tabeli 1. Radi poređenja rada VSM-a sa radom SM-a analizirani su odzivi momenta, brzine, aktivne i reaktivne snage i jednosmernog napona ispravljača. Opterećenje aktivnog ispravljača u vidu otpornika otpornosti  $R = 128 \Omega$  dodato je u trenutku  $t_1 = 1 \text{ s}$ . Vrednost napona u jednosmernom međukolu prethodno je dovedena do  $V_{DC} = 800 \text{ V}$ . Pri ovom naponu i zadatoj otpornosti opterećenja, izlazna snaga ispravljača iznosi  $P = 5 \text{ kW}$ . Kondenzator predstavlja lokalnu rezervu energije, pa pri priključenju opterećenja dolazi do kratkotrajnog pada napona na vrednost nešto višu od 600 V. Regulator jednosmernog napona ovo tumači kao porast momenta opterećenja i povećava virtuelni moment  $T_e$  na približno 35 Nm, što se može videti na slici 11 (b). Slično tome, pri porastu zadatog jednosmernog napona za 50 V, u trenutku  $t_2 = 2 \text{ s}$ , ponovo raste opterećenje VSM-a koje rezultuje višom vrednošću elektromagnetskog momenta VSM-a, kao i kod stvarnog SM-a. U  $t_3 = 3 \text{ s}$  pad frekvencije mrežnog napona za 1% dovodi do kratkotrajnog oscilovanja napona oko zadate vrednosti.

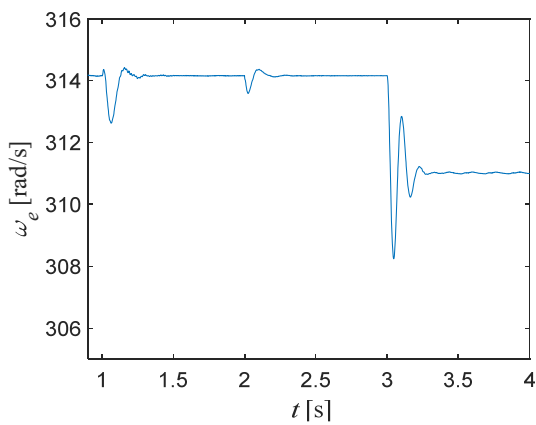
Može se primetiti da kod VSM-e, kao i kod SM-a, postoji sprega između brzine obrtanja, momenta, aktivne i reaktivne snage. Poremećaj u momentu se jasno odražava na brzinu, sve do uspešnog povratka u ravnotežno stanje uslovljeno frekvencijom mrežnog napona, kao i kod SM-a. Analizom postignute vrednosti snage VSM-a, merene na mrežnim priključcima, zaključuje se da je ona nešto veća od 5 kW, jer deo snage predstavljaju i gubici u LCL filtru. Snaga SM-a, kao što je



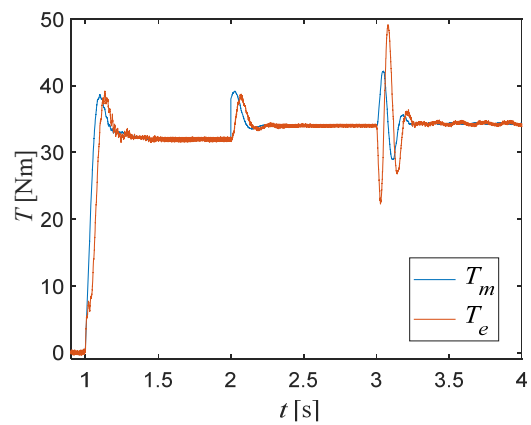
prethodno navedeno, varira u uskim granicama oko 5 kW. Bitna razlika je i u činjenici da kod VSM-a nema gubitaka usled trenja i gubitaka u gvožđu. Pored navedenog, predloženi algoritam upravljanja aktivnim ispravljačem ostvaruje i održava zadate vrednosti jednosmernog napona i reaktivne snage, za slučajeve promene reference jednosmernog napona, dodatnog opterećivanja VSM-a i poremećaja u mreži.

**Tabela 1.** Parametri VSM-a i pojačanja regulatora

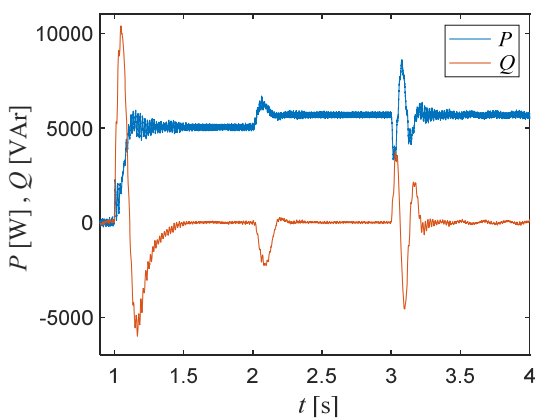
<i>parametar</i>	<i>Vrednost</i>	<i>parametar</i>	<i>vrednost</i>
$J$	0.025 kgm <sup>2</sup>	$V_{DC}$	800 V
$D_p$	4.7 $\frac{sNm}{rad}$	$C_{V_{DC}}$	1.1 mF
$Kp_{PLL}$	0.9	$R_{LCL1}$	50 mΩ
$Ki_{PLL}$	1000	$L_{LCL1}$	1 mH
$Kp_v$	0.0609	$R_{LCL2}$	50 mΩ
$Ki_v$	0.6619	$L_{LCL2}$	7 mH
$Ki_Q$	0.0003125	$C_{LCL}$	2.5 μF
$f_{PWM}$	10 kHz	$R_C$	10 Ω



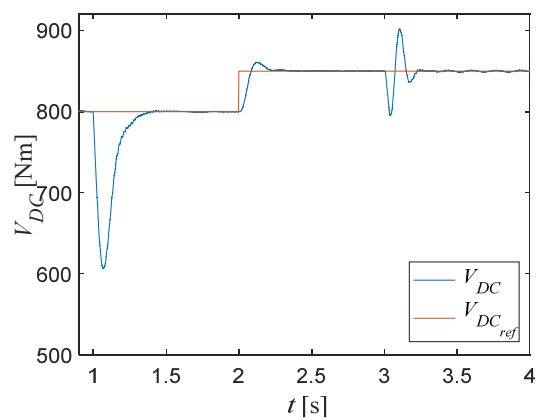
**(a)**



**(b)**



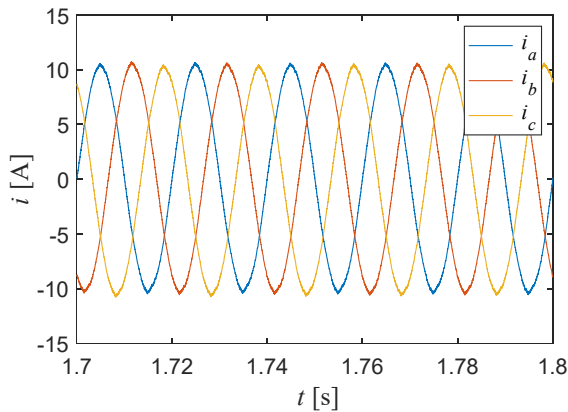
**(c)**



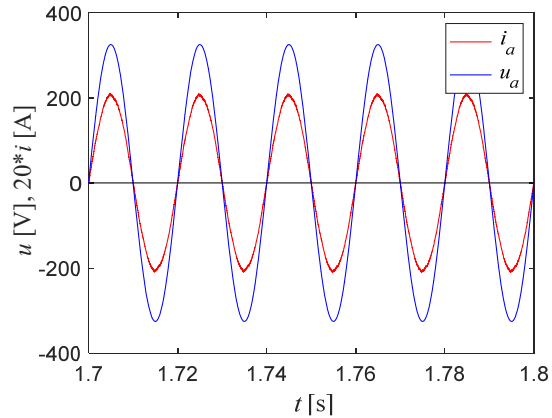
**(d)**

**Slika 11** Rezultati simulacije rada VSM: (a) Brzina obrtanja mašine (b) Elektromagnetski moment (c) Reaktivna snaga (d) Vrednost jednosmernog napona

Na slici 12 prikazane su mrežne struje, gde se može primetiti da je njihov oblik sinusoidalan pri čemu THD (*Total Harmonic Distortion*) iznosi 1.38%. Napon i struja jedne faze mreže predstavljeni su na slici 13. Uočava se da su u fazi, što je i očekivano pri zatom jediničnom faktoru snage.



Slika 12 Talasni oblik struja



Slika 13 Struja i napona faze *a*

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je aktivni ispravljač kojim se upravlja na takav način da se oponaša rad SM-a priključenog na mrežu. Priložen je matematički model mašine, izdvojeni su najbitniji parametri sistema, a potom je opisana regulacija jednosmernog napona i reaktivne snage. Izvršena je simulacija na osnovu modela i izvedeni su sledeći zaključci:

- Opisani regulatori obezbeđuju postizanje zadatih veličina pri sinhronizaciji sa mrežom, naglom opterećivanju, promeni reference jednosmernog napona i promeni frekvencije mrežnog napona.
- Mehanizam za sinhronizaciju sa mrežom definisanjem virtuelne impedanse obezbeđuje jednostavnu sinhronizaciju sa mrežom, čime su smanjene amplitude struja usled kojih bi došlo do oštećenja pretvarača.
- VSM koncept daje fleksibilnost pri odabiru parametara.

Kao jedan od planova za budući rad svakako predstavlja ispitivanje mogućnosti ublažavanja viših harmonika u struji primenom dodatnih elemenata implementiranih u postojećim algoritimima.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao tokom istraživanja koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije br. 2022/200103.

## LITERATURA

- [1] Y. Liu, M. Hao, Y. He, C. Zang and P. Zeng, "Review and Applications of Virtual Synchronous Machines Technologies," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 593-598
- [2] Peter Makolo, Ramon Zamora, Tek-Tjing Lie, "The role of inertia for grid flexibility under high penetration of variable renewables - A review of challenges and solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 147, 2021, 111223, ISSN 1364-0321
- [3] Q. Zhong, "Virtual Synchronous Machines: A unified interface for grid integration," in *IEEE Power Electronics Magazine*, vol.3, no. 4, pp. 18-27, Dec. 2016

- [4] Y. Chen, R. Hesse, D. Turschner and H. Beck, "Improving the grid power quality using virtual synchronous machines," 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011, pp. 1-6
- [5] John J Grainger, William D Stevenson, *Power system analysis*. New York, McGraw-Hill, 1994
- [6] Salvatore D'Arco, Jon Are Suul, and Olav B. Fosso. "A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids" *Electric Power Systems Research*, vol. 122, 2015.
- [7] Q. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, April 2011
- [8] Marian. Kazmierkowski, Frede Blaabjerg, Ramu Krishnan *Control in Power electronics – selected problems*. Academic Press Elsevier Science, 2002.
- [9] O. Mo, S. D'Arco and J. A. Suul, "Evaluation of Virtual Synchronous Machines With Dynamic or Quasi-Stationary Machine Models," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5952-5962, July 2017.
- [10] R. Peña-Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, R. Sebastián, J. Dannehl and F. W. Fuchs, "Analysis of the Passive Damping Losses in LCL-Filter-Based Grid Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 2642-2646, June 2013.
- [11] Z. Ma, Q. -C. Zhong and J. D. Yan, "Synchronverter-based control strategies for three-phase PWM rectifiers," 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012, pp. 225-230
- [12] S. K. Sahoo, R. Sultana and M. Rout, "Speed control of DC motor using Modulus Hugging Approach," *International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011)*, 2011, pp. 523-528