

Otočni rad trofaznog izmjenjivača kvazi Z-tipa s regulacijom napona trošila

Matija Bubalo, Mateo Bašić, Ivan Grgić, Dinko Vukadinović

Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje

Sveučilište u Splitu

Split, Republika Hrvatska

Email: {mbubalo, mabasic, igrgic00, dvukad}@fesb.hr

Sažetak - U radu su ispitana statička i dinamička radna svojstva sustava trofaznog izmjenjivača kvazi Z-tipa bez priključka na mrežu s reguliranim izlaznim naponom. Regulacijski sustav je realiziran s razvojnim računalnim sustavom MicroLabBox opisanim u radu. Opisan je osnovni princip rada izmjenjivača kvazi Z-tipa i regulacijski sustav kojim se postiže željena efektivna vrijednost osnovnog harmonika izmjeničnog napona. Za potrebe eksperimentalnog ispitivanja sustava realizirana je pripadajuća laboratorijska maketa. Ispitivanja su provedena za različite postavke ulaznog napona, trajanja prostrijelnog stanja i otpora trošila. Određen je optimalni raspon ulaznog istosmjernog napona s obzirom na korisnost i stabilnost rada izmjenjivača te točnost regulacije izlaznog napona.

Ključne riječi-MicroLabBox; MATLAB-Simulink; izmjenjivač kvazi Z-tipa; otočni režim rada; regulacija napona

I. UVOD

Energetski pretvarači zasnovani na energetskoj elektronici su nezamjenjivi u modernom svijetu. Većina modernih uređaja i energetskih izvora (konvencionalnih i obnovljivih) na mrežu se povezuje preko nekog oblika energetskog pretvarača. U tu svrhu danas se uglavnom koriste standardni naponski pulsno-širinski modulirani (engl. pulse width modulated, PWM) izmjenjivači. Nedostatak spomenutih izmjenjivača je visok istosmjerni napon nužan da bi se na izlazu dobio trofazni napon mreže. Jedno od rješenja za podizanje istosmjernog ulaznog napona izmjenjivača je upotreba dodatnih istosmjernih naponskih pretvarača što dodatno povećava troškove i kompleksnost cijelog sustava [1]. U radu [2] kao alternativno rješenje ovog problema je predstavljen izmjenjivač Z-tipa koji može raditi s nižim vrijednostima ulaznog napona u odnosu na standardne izmjenjivače. Izmjenjivači Z-tipa na ulazu imaju LC krug koji omogućuje dodatno podizanje razine ulaznog istosmjernog napona tranzistorskog mosta. Razlika u upravljanju standardnim izmjenjivačima i izmjenjivačima Z-tipa je dodatno sklopno stanje kod izmjenjivača Z-tipa, tzv. prostrijelno (engl. shoot-through, ST) stanje, u kojem se u isto vrijeme uključuju obje sklopke jedne ili svih grana mosta. Neki nedostaci klasičnog izmjenjivača Z-tipa su ispravljani u novijoj topologiji poznatoj kao izmjenjivač kvazi Z-tipa (engl. quasi Z-source inverter, qZSI) [3], kod kojeg je promijenjen raspored komponenti LC kruga. Time je postignuta kontinuirana struja izvora te je smanjeno naponsko opterećenje jednog od kondenzatora LC kruga.

U literaturi su prethodno razmatrane konfiguracije s qZSI izmjenjivačem i trošilom u otočnom režimu rada [4]-[6] kao i u spoju s mrežom [7]. U radovima [4], [6] i [7] za napajanje qZSI-a je korišten fotonaponski sustav (engl. Photovoltaic system, PV) u kombinaciji s baterijama za pohranu energije. Ono što je karakteristično za qZSI-e koji se napajaju iz PV sustava je da im ulazni napon i struja (tj., snaga) mogu značajno varirati s promjenama osunčanosti, temperature i opterećenja PV sustava. Baterije se mogu priključiti na izmjenjivač paralelno s jednim od kondenzatora u LC krugu qZSI-a [4]-[7]. Korištenjem baterija kompenziraju se oscilacije izlazne snage PV sustava nastale zbog promjene osunčanosti ili temperature. Baterije različite naponske razine su korištene u radu [5] za pohranu energije, gdje je jedna spojena na ulaz za napajanje sustava a druga paralelno s kondenzatorom u LC krugu qZSI-a. U ovakvoj konfiguraciji sustava ulazni napon qZSI-a je približno konstantan. Sustav s qZSI izmjenjivačem u otočnom režimu koji se napaja samo iz PV sustava dan je u [8]. Zadavanjem indeksa amplitudne modulacije M_a upravlja se naponom trošila u otočnom režimu [5], [6] i [8], odnosno izlaznom snagom izmjenjivača u spoju s mrežom [7]. U radovima [4]-[6] se za regulaciju napona trošila koriste $d-q$ komponente napona trošila u povratnoj vezi, a u [8] je dana i mogućnost korištenja efektivne vrijednosti osnovnog harmonika napona trošila. Regulacijom trajanja ST stanja upravlja se radnom točkom PV sustava [6]-[8] odnosno strujom baterija [5].

Kako bi se odabrao adekvatan istosmjerni izvor za sustav s qZSI izmjenjivačem u otočnom radu potrebno je znati potreban raspon ulaznog napona kojim bi se osigurao stabilan rad sustava za različite iznose opterećenja. Pri tome je nužno osigurati efektivnu vrijednost osnovnog harmonika izmjeničnog napona koja je prilagođena zahtjevima trošila (npr. 230 V uz toleranciju od $\pm 10\%$). Pri odabiru optimalnog radnog područja, u obzir treba uzeti i pokazatelje kvalitete regulacije i korisnost cijelog sustava.

U ovom radu eksperimentalno je ispitano izmjenjivač kvazi Z-tipa u otočnom režimu rada. Određene su statičke i dinamičke karakteristike izmjenjivača s obzirom na promjenu ulaznog istosmjernog napona izmjenjivača. Uz to, ispitana je i kvaliteta regulacijskog sustava s obzirom na skokovite promjene parametara. Regulacija efektivne vrijednosti osnovnog harmonika faznog napona trošila na temelju korekcije indeksa

amplitudne modulacije izvedena je u realnom vremenu korištenjem razvojnog računalnog sustava MicroLabBox (dSpace). Pritom je trajanje ST stanja ručno postavljeno s obzirom na različite kombinacije ulaznog istosmjernog napona i otpora trošila.

II. NAČELO RADA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA

Topologija izmjenjivača kvazi Z-tipa prikazana je na Sl. 1. Istosmjerni krug sastoji se od dva kondenzatora (C_1 i C_2), dvije prigušnice (L_1 i L_2) i diode (D_1). Trofazni tranzistorski most sastoji se, kao i kod standardnih topologija, od šest tranzistora s porednim diodama. Između izmjenjivača i mreže nalaze se prigušnice za filtriranje izlazne struje izmjenjivača.

Standardni PWM izmjenjivač ima šest aktivnih sklopnih stanja, kada je istosmjerni napon s ulaza tranzistorskog mosta prenesen na trošilo, te dva nulta stanja kada su svi gornji ili svi donji tranzistori isključeni te je linijski napon trošila nula. Izmjenjivač kvazi Z-tipa ima dodatno sklopno stanje (ST stanje) pri kojem su uključena oba tranzistora jedne ili svih grana u mostu pretvarača. Za vrijeme ST stanja tranzistorski most kratko spaja ulazni LC krug. Ulazna dioda je za to vrijeme nepropusno polarizirana, kondenzatori C_1 i C_2 se prazne a prigušnice se nabijaju magnetskom energijom. S druge strane, kad nije ST stanje, kondenzatori se pune, a zavojnice L_1 i L_2 se ponašaju kao strujni izvori te se kao posljedica javlja napon u_{pn} većeg iznosa od napona istosmjernog izvora. Povećanjem trajanja ST stanja dodatno se podiže napon na ulazu tranzistorskog mosta u_{pn} . Naponsko pojačanje izmjenjivača G određeno je izrazom [8]:

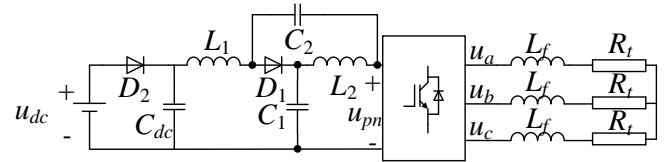
$$G = \frac{\hat{U}_{ac}}{U_{dc}/2} = M_a \cdot B \quad (1)$$

uz faktor pojačanja B :

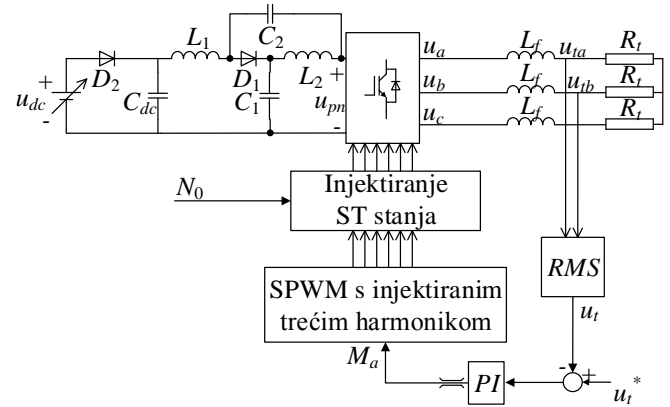
$$B = \frac{1}{1 - 2\frac{T_0}{T}} = \frac{1}{1 - 2D_0} \quad (2)$$

gdje je: T_0 trajanje prostrijelnog stanja, T period sklapanja sklopki izmjenjivača, M_a indeks amplitudne modulacije izmjenjivača, D_0 faktor trajanja ST stanja, \hat{U}_{ac} vršna vrijednost osnovnog harmonika faznog napona na trošilu, U_{dc} srednja vrijednost napona istosmjernog izvora.

Do sada su razvijene različite metode upravljanja kvazi Z izmjenjivačem [11]-[14], a u ovom radu se koristi upravljanje s konstantnim, ručno podešenim trajanjem ST stanja i s konstantnim zadanim iznosom \hat{U}_{ac} .



Slika 1. Topologija trofaznog qZSI izmjenjivača u otočnom radu s priključenim radnim trošilom



Slika 2. Sustav regulacije efektivne vrijednosti osnovnog harmonika napona trošila u otočnom režimu rada qZSI-a

III. SUSTAV REGULACIJE IZLAZNOG NAPONA IZMJENJIVAČA KVAZI Z-TIPA

Na Sl. 2. prikazan je sustav regulacije efektivne vrijednosti osnovnog harmonika napona trošila priključenog na qZSI. Izmjenjivač se napaja iz upravljivog istosmjernog naponskog izvora. Između izvora i izmjenjivača postavljena je dioda D_2 koja sprječava tok struje u izvor te kondenzator C_{dc} za filtriranje ulaznog napona. Izlaz iz izmjenjivača priključen je preko induktivnog filtra (L_f) na trofazno radno trošilo. Za potrebe regulacije osnovnog harmonika napona na trošilu, koristeći naponske mjerne senzore, mjerena su dva fazna napona (u_{ia} i u_{ib}), dok je treći rekonstruiran. Na temelju mjerenih faznih napona se u regulacijskom algoritmu računa pripadajuća efektivna vrijednost osnovnog harmonika (50 Hz), koja se potom uspoređuje s referentnom vrijednosti postavljenom na 230 V. Signal pogreške se dovodi na ulaz PI regulatora koji na izlazu kao upravljačku veličinu daje indeks modulacije M_a . Indeks modulacije M_a je zatim korišten za sinusnu pulsno-širinsku modulaciju (SPWM) s utisnutim trećim harmonikom amplitude jednake 1/6 amplitude osnovnog harmonika. Nakon što su kreirani impulsi za upravljanje tranzistorima, detektiraju se nulta stanja unutar kojih se onda injeckiraju ST stanja zadanog vremena trajanja. Trajanje ST stanja određeno je izrazom:

$$T_0 = N_0 T_s \quad (3)$$

gdje je T_s vrijeme uzorkovanja regulacijskog algoritma, a faktor $N_0 = [0,1,2,3,\dots]$. Dakle postavljanjem vrijednosti faktora N_0 određeno je trajanje ST stanja kao višekratnik vremena uzorkovanja.

Regulacijski algoritam je razvijen u programskom paketu Matlab/Simulink, a u realnom vremenu je izvođen koristeći razvojni računalni sustav MicroLabBox.

A. Razvojni računalni sustav MicroLabBox

Arhitektura razvojnog računalnog sustava MicroLabBox je prikazana na Sl. 3. MicroLabBox se sastoji od dvije osnovne upravljačke ploče, DS1202 i DS1302. Upravljačka ploča DS1202 sadrži Ethernet sučelje, USB sučelje za snimanje podataka, komunikaciju i razmjenu

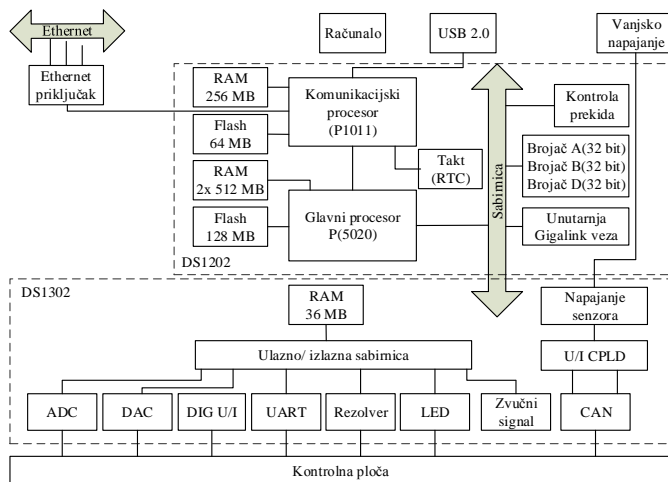
podataka s pločom DS1302, a pokreće je procesor P5020 koji radi u realnom vremenu uz dodatni komunikacijski procesor P1011. Dvojezgreni P5020 procesor ima pristup RAM memoriji kapaciteta 2x512 MB i flash memoriji kapaciteta 128 MB. Komunikacijski procesor P1011 sadrži RAM memoriju kapaciteta 256 MB i flash memoriju kapaciteta 64 MB.

Upravljačka ploča DS1302 namijenjena je za obradu ulaznih i izlaznih signala te sadrži analogne ulazne i izlazne kanale, digitalne ulazne i izlazne kanale, RS232 i RS422/485 sučelja i CAN sučelje.

Analogni ulazi MicroLabBoxa podijeljeni su u dvije klase prema analogno-digitalnom pretvorniku (ADC) koji posjeduju. ADC klase 1 sastoji se od 24 neovisna ADC-a. Svaki od 24 kanala ima sljedeće karakteristike: 16 bitna rezolucija, maksimalno vrijeme A/D pretvorbe 1 μ s, razine ulaznog napona ± 10 V. Moguća su dva načina uzorkovanja i pretvorbe: brzi način uzorkovanja (engl. *burst mode*) do 8192 analognih uzoraka u jednoj skupini uzoraka te standardni pojedinačni način uzorkovanja.

Proces čitanja se odvaja od procesa pretvorbe privremenim spremnikom. Šest analognih ulaza s ADC-om klase 1 je korišteno u ovom radu. Za razliku od njih, ADC-i klase 2 imaju fiksno vrijeme pretvorbe od 100 ns s 14 bitnom rezolucijom. Čini ih 8 paralelnih kanala, a u ovom radu nisu korišteni.

MicroLabBox posjeduje i dvije klase DIO (engl. *Digital Input Output*) kanala, koji mogu biti konfigurirani kao ulazni i kao izlazni kanali. DIO klase 1 sastoji se od 48 dvosmjernih kanala grupiranih u 3 porta, od kojih svaki ima 16 kanala. Za aktivaciju digitalnog ulaza moguće je odabrati uzlazni, silazni ili uzlazno-silazni brid. Ulazni signali se mogu filtrirati filtrom šuma koji ignorira signale kraćeg trajanja od zadanog. DIO kanali podržavaju naponske razine od 2,5 V, 3,3 V i 5 V. Digitalni izlazi klase 1 koriste se za generiranje upravljačkih impulsa svih 6 tranzistora u mostu izmjenjivača. DIO klase 2 su diferencijalni digitalni ulazi i izlazi koji se sastoje od 12 kanala i nisu korišteni u ovom radu.



Slika 3. Arhitektura sustava MicroLabBox [15]

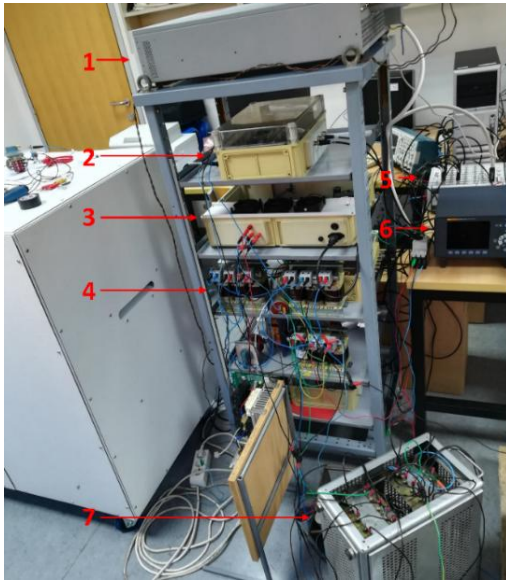
Programiranje MicroLabBoxa se može izvesti koristeći nekoliko programskih jezika, no u razvojnim primjenama, kao što je to ovdje slučaj, najjednostavnije je koristiti Matlab/Simulink. Tako kreiran model regulacijskog sustava jednostavno se prevodi u programski jezik prikladan za MicroLabBox.

Regulacijski algoritam se, nakon prevođenja, ethernet komunikacijom učitava u radnu memoriju MicroLabBoxa a postoji i mogućnost spremanja u flash memoriju. Ovaj način programiranja pruža mogućnost korištenja istog regulacijskog algoritma u simulacijama i eksperimentima.

Mjerene i upravljačke varijable se mogu zadavati i prikazivati u realnom vremenu koristeći programski paket Control Desk, koji je dio sustava MicroLabBox te pruža mogućnost izrade grafičkog upravljačkog sučelja.

B. Laboratorijska maketa izmjenjivača kvazi Z-tipa s radnim trošilom

Laboratorijska maketa sustava s izmjenjivačem je prikazana na Sl. 4. Kao izvor napajanja korišten je programabilni istosmjerni naponski izvor Chroma (62000H-S) označen brojem 1 na fotografiji. Navedeni izvor napajanja pruža mogućnost postavljanja ulaznog napona sustava na zadani iznos u rasponu 0 V – 600 V. Na Sl. 4. još su označeni: 2- naponski mjerni senzori (CV 3-500, LEM), 3- trofazni most izmjenjivača sa 6 tranzistora i porednih dioda, 4- prigušnice filtra, 5- računalni sustav MicroLabBox, 6- mjerni uređaj Fluke (Norma 4000), 7- radno trošilo. Na slici nisu prikazani strujni senzori (LA 55-P, LEM), prigušnice L_1 i L_2 (vrsta jezgre 26, Micrometals) s induktivitetom iznosa 20,26 mH u nezasićenom dijelu karakteristike, kondenzatori C_1 i C_2 kapaciteta 20 μ F te ulazni kondenzatori C_{dc} ukupnog kapaciteta 470 μ F, ulazna dioda D_2 (DSEP60-12A) te dioda D_1 (poredna dioda tranzistora IRG8P25N120KDPbF). Mjerni uređaj Fluke je korišten za dodatno mjerenje efektivne vrijednosti osnovnog harmonika faznog napona trošila i radne snage trošila.



Slika 4. Fotografija laboratorijske makete regulacijskog sustava s qZSI-em

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Ispitivanje rada sustava je provedeno u više stacionarnih radnih točaka, za različite postavke ulaznog napona, otpora trošila i trajanja ST stanja. Osim toga snimljen je dinamički odziv karakterističnih varijabli razmatranog sustava za skokovite promjene trajanja ST stanja, ulaznog istosmjernog napona te iznosa otpora trošila.

A. Statičke karakteristike

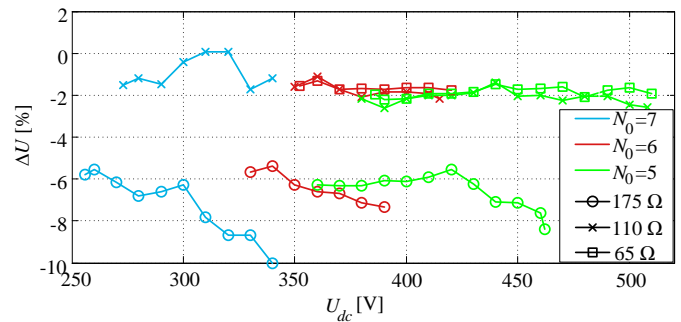
Mjerenja su izvedena postepeno mijenjajući ulazni napon u koracima od 10 V kako bi se odredio raspon stabilnog područja rada izmjenjivača za tri vrijednosti faktora N_0 . Veći N_0 predstavlja dulje trajanje ST stanja i veće naponsko pojačanje G prema izrazima (1)-(3). Za određeno trajanje ST stanja, raspon ulaznog napona je ograničen maksimalnom i minimalnom vrijednosti indeksa modulacije M_a . Maksimalnu vrijednost indeksa modulacije M_a za zadano vrijeme trajanja ST stanja moguće je odrediti prema izrazu:

$$M_{a_max} = \frac{2}{\sqrt{3}}(1 - D_0) \quad (4)$$

Navedeni izraz za određivanje maksimalne vrijednosti amplitudnog indeksa modulacije M_a slijedi iz strategije upravljanja s maksimalnim konstantnim pojačanjem (engl. maximum constant boost) [12]. Ukoliko bi vrijednost indeksa modulacije M_a prekoračila vrijednost dobivenu ovim izrazom, to bi značilo da trajanje ST stanja premašuje trajanje nultog sklopnog stanja izmjenjivača, što rezultira izobličenjem valnog oblika izlaznog napona izmjenjivača. Minimalna vrijednost indeksa modulacije M_a korištena u eksperimentima, s obzirom na postavljene iznos ulaznog napona qZSI-a, određena je maksimalnim dopuštenim naponom na tranzistorskom mostu u_{pn} . Uz maksimalno dopušteni napon u_{pn} od 1200 V, u eksperimentu je najniža dostignuta vrijednost indeksa modulacije $M_a = 0,535$.

Fazni naponi trošila mjereni su za potrebe regulacijskog kruga pomoću naponskih mjernih senzora. Efektivna vrijednost istog napona mjerena je također korištenjem valnog analizatora visoke točnosti Norma 4000 (FLUKE) radi provjere točnosti regulacije. Postotna pogreška regulacije napona prikazana je na Sl. 5. Najveća pogreška od približno -10% javlja se kod najmanjeg trošila ($175\ \Omega$) za vrijednost $N_0 = 7$, a smanjuje se sa smanjenjem ulaznog napona. Pogreška za isto trošilo uz $N_0 = 6$ i $N_0 = 5$ je približno jednaka i kreće se od -5% do $-8,4\%$. Za veća trošila pogreška je približno jednaka za sve iznose ulaznog napona i trajanja ST stanja a mijenja se u rasponu od 0% do $-2,6\%$. Važno je naglasiti da je najveća zabilježena pogreška unutar dozvoljenog odstupanja napona u elektroenergetskoj mreži.

Naponska pogreška javlja se, između ostalog, i kao posljedica digitalne obrade mjerenih analognih signala (uzorkovanje i računanje efektivne vrijednosti u realnom vremenu). Frekvencija uzorkovanja je postavljena na 10 kHz, a ograničena je mogućnostima računalnog sustava MicroLabBox budući da se na 80 kHz izvršava usporedba trokutastog i referentnih signala za SPWM.



Slika 5. Pogreška regulacije napona u ovisnosti o ulaznom naponu za različite vrijednosti otpora trošila i parametra N_0

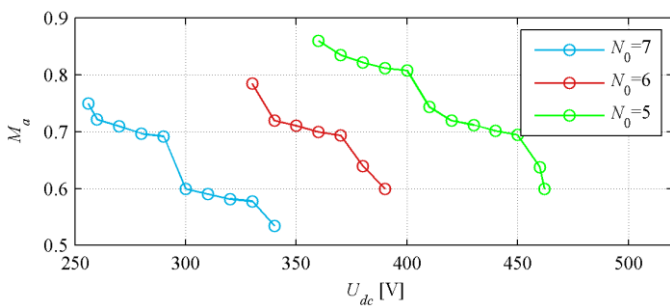
Na Sl. 6 je prikazana ovisnost indeksa modulacije M_a o istosmjernom naponu napajanja U_{dc} za tri različite vrijednosti otpora radnog trošila i parametra N_0 . Karakteristike za iznos otpora od $175\ \Omega$ prikazane su na Sl. 6a. Iz karakteristika je uočljivo da je za ulazni napon u rasponu od 330 V do 340 V moguć stabilan rad s dvije vrijednosti N_0 : 6 i 7. Međutim, radi se o uskom području preklapanja karakteristika od svega 10 V. Preklapanje karakteristika za $N_0 = 5$ i $N_0 = 6$ je veće i pokriva raspon od 360 V do 390 V. Kada je na izmjenjivač spojeno trošilo otpora $110\ \Omega$ (Sl. 6b), preklapanja karakteristika između $N_0 = 5$ i $N_0 = 6$ obuhvaća 30 V kao i u slučaju manjeg trošila, a jednako je i preklapanje za trošilo od $65\ \Omega$ (Sl. 6c). Treba naglasiti da za najmanji otpor trošila ($65\ \Omega$) nisu rađena mjerenja za $N_0 = 7$, jer u tom slučaju napon u_{pn} raste preko 1200 V čime se riskira uništenje tranzistora.

Činjenica da postoje spomenuta preklapanja karakteristika govori da je moguće u odgovarajućim ograničenim rasponima ulaznog napona postići stabilan rad sustava za različite konstantne iznose faktora N_0 . Međutim, sa stanovišta korisnosti sustava, poželjno je da je ovaj faktor što manji, kako se vidi na

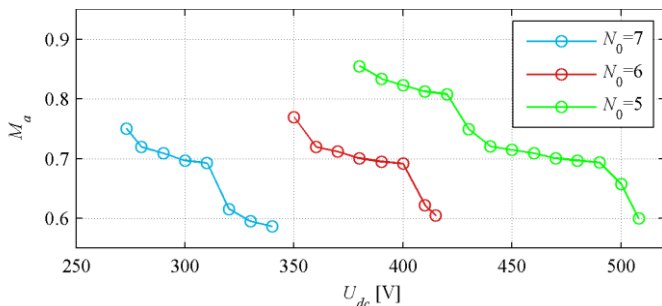
Sl. 7. To zapažanje je u skladu s prethodno poznatim proračunima gubitaka izmjenjivača Z-tipa [16]. Za $N_0=5$ korisnost je iznad 80 %, a za veće trošilo dostiže gotovo 90 %. S druge strane, za $N_0=7$ korisnost sustava je između 70 % i 80 %.

Korisnost izmjenjivača raste i s povećanjem opterećenja za isti ulazni napon i isti N_0 . Također, vidljivo je da se sa smanjenjem indeksa modulacije M_a gubici povećavaju, što je karakteristično i za standardne SPWM izmjenjivače.

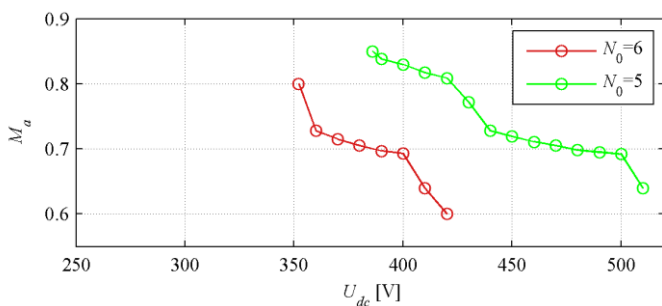
Prema prikazanim pokazateljima kvalitete, u regulaciji ovakvog sustava za razmatrane vrijednosti N_0 bilo bi poželjno radnu točku držati u području vrijednosti $N_0=5$. Međutim, kako se ide na manje vrijednosti faktora N_0 , potrebni ulazni napon izmjenjivača postaje sve veći te se qZSI po radnim svojstvima sve više približava klasičnom SPWM izmjenjivaču. Stoga je u ovom radu minimalna vrijednost faktora N_0 ograničena na 5. Kao najbolji raspon ulaznog istosmjernog napona pokazao se raspon od 390 V do 440 V, gdje je postignuta relativno visoka korisnost, mogućnost rada s $N_0=5$ i $N_0=6$ te je greška regulacije napona u tom području svega 2 %.



a)

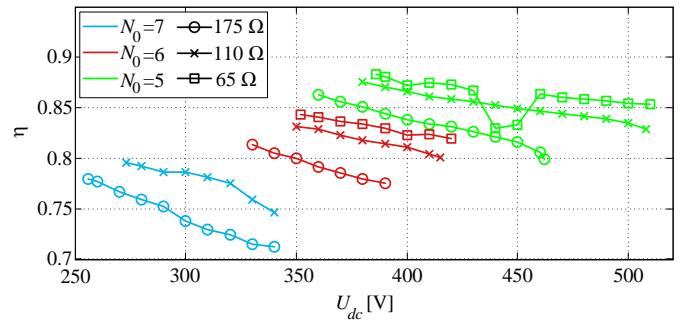


b)



c)

Slika 6. Indeks modulacije M_a u ovisnosti o ulaznom istosmjernom naponu za različite vrijednosti parametra N_0 i otpore trošila 175 Ω (a), 110 Ω (b) i 65 Ω (c).



Slika 7. Korisnost sustava za različite vrijednosti otpora trošila i parametra N_0 .

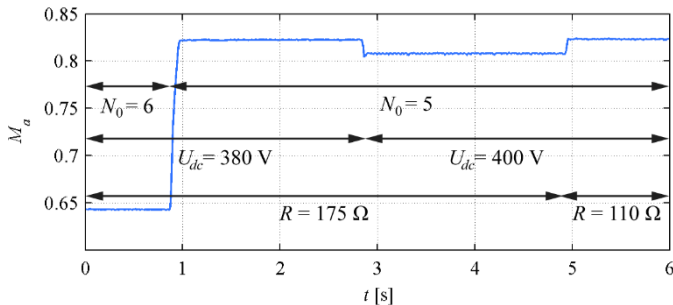
B. Dinamička analiza

Za potpun uvid u rad sustava snimljeni su dinamički odzivi indeksa modulacije M_a i regulirane efektivne vrijednosti osnovnog harmonika napona trošila na promjene ulaznog napona, trajanja ST stanja i otpora trošila. U provedenom testu izmjenjivač je najprije doveden u stabilnu stacionarnu radnu točku s ulaznim naponom od 380 V, $N_0=6$ i otporom trošila $R=175 \Omega$. U trenutku $t=0,87$ s izvršena je promjena N_0 sa 6 na 5, zatim u trenutku $t=2,82$ s skok ulaznog napona na 400 V te u $t=4,93$ s skokovita promjena otpora trošila na 110 Ω .

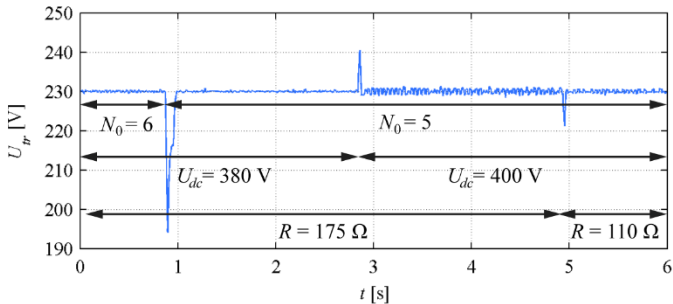
Snimljeni odziv indeksa modulacije M_a prikazan je na Sl. 8. Kao posljedica promjene faktora N_0 sa 6 na 5, zbog smanjenog naponskog pojačanja qZSI-a, indeks modulacije M_a skokovito raste kako bi se napon na trošilu održao na zadanoj vrijednosti. Pritom je indeks modulacije M_a s približno donje granične vrijednosti gotovo dostigao gornju graničnu vrijednost. Sl. 9 prikazuje odziv efektivne vrijednosti osnovnog harmonika faznog napona trošila. Na odzivu se vidi kratkotrajni propad napona trošila od približno 15 % u trenutku promjene N_0 . Napon se vratio na zadanu vrijednost unutar 0,1 s.

U trenutku skoka ulaznog napona na 400 V, vrijednost indeksa modulacije M_a padne na 0,81 a u efektivnoj vrijednosti reguliranog napona se pojavi kratkotrajno nadvišenje od približno 4 %. Ponovno se sustav vrlo brzo stabilizira iako uz nešto više šuma prisutnog u snimljenom naponu. Šum u računatoj efektivnoj vrijednosti napona javlja se kao posljedica povećanog sadržaja viših harmonika u valnom obliku napona trošila.

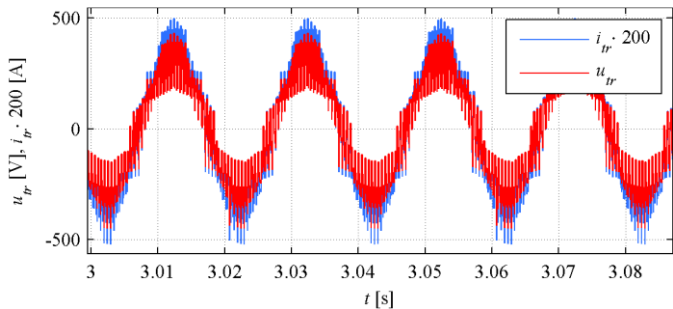
Smanjenjem otpora trošila povećava se izlazna snaga te očekivano raste indeks modulacije M_a (Sl. 8). Ponovno se javlja kratkotrajni propad napona trošila od približno 4 %. Smanjenjem otpora trošila porasla je izlazna snaga iz izmjenjivača te se i smanjilo izobličenje struje. Valni oblici faznog napona i struje iste faze trošila za trošilo od 175 Ω , ulazni istosmjerni napon iznosa 400 V i $N_0=5$ prikazani su na Sl. 10. Na slici se vidi da su napon i struja u fazi te imaju približno sinusni valni oblik zahvaljujući filtriranju.



Slika 8. Odziv indeksa modulacije M_a



Slika 9. Odziv efektivne vrijednosti napona trošila



Slika 10. Valni oblik struje i napona jedne faze trošila

ZAKLJUČAK

U ovom radu je eksperimentalno ispitan rad sustava s izmjenjivačem kvazi Z-tipa u otočnom režimu rada s regulacijom napona trošila. Utvrđena su stacionarna i dinamička radna svojstva sustava za tri različita fiksna trajanja ST stanja i tri vrijednosti otpora trošila. Dopusnjeni raspon ulaznog istosmjernog napona uz određeno vrijeme ST stanja određen je donjim i gornjim granicama indeksa modulacije M_a . Uz $N_0 = 7$ i više, indeks modulacije M_a poprima vrijednosti približno 0.53 zbog čega se javlja visoki napon na spoju mosta izmjenjivača u_{pn} , koji za veće trošilo prelazi dozvoljene granice. Sustav se pokazao robusnim na skokovite promjene opterećenja, ulaznog napona i trajanja ST stanja, a najveće prijelazne pojave javljaju se pri promjeni trajanja ST stanja. Korisnost sustava raste povećanjem trošila i smanjenjem trajanja ST stanja te je za zadano trajanje ST stanja korisnost veća uz manji ulazni napon. Pogreška regulacije napona ne ovisi o trajanju ST stanja, smanjuje se povećanjem trošila, a samo za manja trošila je uočljivo da je manja za niže vrijednosti ulaznog napona. Uzevši u obzir gubitke, dinamička svojstva i kvalitetu regulacije, kao optimalno područje rada nameću se vrijednosti ulaznog napona od 390 V do 440 V uz $N_0 = 5$.

LITERATURA

- [1] J. Khajesalehi, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, and E. Afjei, "Maximum constant boost approach for controlling quasi-z-source-based interlinking converters in hybrid ac-dc microgrids," IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 10, no. 4, pp. 938–948, 2016
- [2] F. Z. Peng, "Z- source inverter", in Proc. IEEE Ind. Applic. Soc., vol. 2, pp. 775-781, 13-18 October 2002.
- [3] J. Anderson and F. Z. Peng, "Four quasi-Z-source inverters," in Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2743-2749, 15-19 June 2008
- [4] J. Khajesalehi, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, and E. Afjei, "High performance hybrid photovoltaic-battery system based on quasi-Zsource inverter: application in microgrids," IET Gener. Transm. Distrib., vol. 9, no. 10, pp. 895-902, June 2015.
- [5] J. Khajesalehi, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, and E. Afjei, "Modeling and control of quasi Z-source inverters for parallel operation of battery energy storage systems: Application to microgrids," Electric Power Systems Research, vol. 125, pp. 164-173, August 2015
- [6] H. Abu-Rub, A. Iqbal, Sk. Moin Ahmed, F. Z. Peng, Yuan Li, and Ge Baoming, "Quasi-Z-Source Inverter-Based Photovoltaic Generation System With Maximum Power Tracking Control Using ANFIS," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, no. 1, Jan 2013
- [7] H. Abu-Rub, A. Iqbal, Sk. Moin Ahmed, F. Z. Peng, Yuan Li, and Ge Baoming, "An Energy Stored Quasi-Z-Source Inverter for Application to Photovoltaic Power System," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, no. 1, Jan 2013.
- [8] Yuan Li, F. Z. Peng, Jorge G. Cintron-Rivera, Shuai Jiang, "Controller Design for Quasi-Z-Source Inverter in Photovoltaic Systems," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 12-16 Sept. 2010.
- [9] P. K. Dhara, P. K. Gayen and R. Garai, "Study on modeling & control of three phase quasi Z-source inverter for power conversion", IEEE 2016 Int. Conf. on Computer, Electrical & Comm. Engineering, 16-17 Dec. 2016.
- [10] M. Bašić, D. Vukadinović, M. Polić, "Dynamic Simulation Model of Quasi-Z-Source Inverter with Parasitic Resistances and Saturable Inductor", 19th International Symposium Power Electronics Ee 2017, 19-21 October 2017.
- [11] M. Shen, J. Wang, A. Joseph, F. Z. Peng, L. M. Tolbert and D. J Adams, "Constant Boost Control of the Z-Source Inverter to Minimize Current Ripple and Voltage Stress," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 42, no. 3, pp. 770-778, May/June 2003.
- [12] F. Z. Peng, M. Shen and Z. Qian, " Maximum Boost Control of the Z-Source Inverter", IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 833-838, Jul. 2005.
- [13] M. Shen, J. Wang, A. Joseph, F. Z. Peng, L. M. Tolbert and D. J Adams, "Maximum Constant Boost Control of the Z-Source Inverter," in Proc. IEEE IAS Annual Meeting 2004, Oct. 2004.
- [14] H. Rostami and D. A. Khaburi, "Voltage Gain Comparison of Different Control Methods of the Z-Source Inverter," in Proc. IEEE ELECO 2009, pp. 268-272, Nov. 2009.
- [15] dSPACE Support, "MicroLabBox Features", Release 2017-A-May 2017
- [16] A. Ayad, S. Hanafiah, R. Kennel "A Comparison of Quasi-Z-Source Inverter and Traditional Two-Stage Inverter for Photovoltaic Application", International Exhibition and Conference for power electronics, intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 19-20 May 2015.

Abstract

In this paper, the static and dynamic behaviour of a stand-alone quasi-Z-source inverter (qZSI) with load voltage control is tested and presented. The control system is implemented with the described MicroLabBox development system. The basic operating principle of the qZSI is given, along with the description of the ac voltage RMS control loop. For the purpose of experimental testing, a laboratory setup of the considered system is built. Experiments for different settings of the input voltage, load resistance, and shoot-through state duration have

been carried out. Optimal input voltage range is defined based on the system efficiency, stability, and voltage control accuracy.

Stand-alone Operation of a Three-Phase Quasi-Z-Source Inverter with Load Voltage Control

Matija Bubalo, Mateo Bašić, Ivan Grgić, Dinko Vukadinović