

Razvoj i testiranje upravljanja prostornim vektorom autonomnog trofaznog izmjenjivača pomoću Typhoon HIL alata

Živković, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:010545>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**RAZVOJ I TESTIRANJE UPRAVLJANJA
PROSTORNIM VEKTOROM AUTONOMNOG
TROFAZNOG IZMJENJIVAČA POMOĆU TYPHOON
HIL ALATA**

Diplomski rad

Luka Živković

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 18.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

| | |
|---|---|
| Ime i prezime Pristupnika: | Luka Živković |
| Studij, smjer: | Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika |
| Mat. br. Pristupnika, godina upisa: | D-1434, 07.10.2021. |
| OIB studenta: | 29399625667 |
| Mentor: | prof. dr. sc. Denis Pelin |
| Sumentor: | Andrej Brandis, mag. ing. el. |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | prof. dr. sc. Marinko Barukčić |
| Član Povjerenstva 1: | prof. dr. sc. Denis Pelin |
| Član Povjerenstva 2: | dr. sc. Tin Benšić |
| Naslov diplomskog rada: | Razvoj i testiranje upravljanja prostornim vektorom autonomnog trofaznog izmjenjivača pomoću Typhoon HIL alata |
| Znanstvena grana diplomskog rada: | Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | Potrebno je proučiti upravljanje prostornog vektora napona te detaljno raspisati matematički model. Model upravljanja razviti u programskome alatu Typhoon HIL. Razvijeno upravljanje testirati na kreiranom Typhoon HIL simulacijskom modelu trofaznog izmjenjivača u mosnome spoju povezanog na model distribucijske mreže. Upravljanje izmjenjivačem treba biti mrežno sinkronizirano. Tema je vezana uz projekt USBSE voditelja izv.prof. D.Topića Sumentor: Andrej Brandis |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada): | Izvrstan (5) |
| Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina |
| Datum prijedloga ocjene od strane mentora: | 18.09.2023. |
| Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada: | <i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i> |
| | Datum: |



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 03.10.2023.

Ime i prezime studenta:

Luka Živković

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1434, 07.10.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj i testiranje upravljanja prostornim vektorom autonomnog trofaznog izmjenjivača pomoću Typhoon HIL alata**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Denis Pelin

i sumentora Andrej Brandis, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PREGLED PODRUČJA TEME | 2 |
| 3. ANALIZA RADA TROFAZNIH NAPONSKIH IZMJENJIVAČA | 3 |
| 3.1. Izmjenjivač s dostupnim zvjezdištem trošila | 3 |
| 3.2. Izmjenjivač u trofaznom mosnom spoju | 7 |
| 3.3. Pojam prostornog vektora | 12 |
| 3.4. Clarkova transformacija | 15 |
| 3.5. Parkova transformacija | 17 |
| 4. MODULACIJA PROSTORNOG VEKTORA | 20 |
| 4.1. Redoslijed uključivanja prostornih vektora unutar sklopne periode | 25 |
| 4.2. Valni oblici faznog i linijskog napona unutar sklopne periode | 29 |
| 5. RAZVOJ ALGORITMA MODULACIJE PROSTORNOG VEKTORA U MATLAB/SIMULINKU | 31 |
| 5.1. Simulacijski model | 31 |
| 5.2. Rezultati simulacije u Simulinku | 36 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO – UPRAVLJANJE TROFAZNIM IZMJENJIVAČEM POMOĆU MIKROKONTROLERA I TYPHOON HILA | 45 |
| 6.1. TMS320F2808 mikrokontroler | 45 |
| 6.2. Typhoon HIL | 47 |
| 6.3. Rezultati simulacije u Typhoon HIL-u | 50 |
| 7. ZAKLJUČAK | 59 |
| LITERATURA | 60 |
| SAŽETAK | 61 |
| ABSTRACT | 61 |
| ŽIVOTOPIS | 62 |

1. UVOD

U sustavima neprekidnog napajanja većih snaga te u praktički svim izmjeničnim elektromotornim pogonima potrebni su trofazni naponski izmjenjivači. Trofazni naponski izmjenjivači služe za pretvaranje istosmjernog napona (npr. baterije, fotonaponski sustavi) u trofazni sustav napona pri čemu su pojedine faze međusobno pomaknute za 120° . Pri povezivanju istosmjernog i izmjeničnog sustava formira se simetrični sustav napona fazno pomaknutih na željenoj frekvenciji. Frekvencija napona postiže se odabirom sklopne frekvencije komponenata energetske elektronike pomoću kojih se postiže pretvorba snage na frekvenciji. Jedna od modulatorskih tehnika kojom se postiže sinusni napon trošila na odabranoj frekvenciji je modulacija prostornog vektora napona (*engl. Space Vector Modulation – SVM*).

Tema ovog rada je razvoj algoritma prostorno-vektorske modulacije te testiranje istog na Typhoon HIL platformi. Typhoon HIL (*engl. Hardware-in-the-Loop*) omogućava prikaz valnih oblika dobivenih implementacijom izvedenog algoritma u MATLAB/Simulink okruženju. Sam algoritam modulacije izveden je u Simulink programu te prebačen na DSP (*engl. Digital Signal Processor*) kontroler. Algoritam modulacije izvršava se na DSP kontroleru TMSF2808 proizvođača Texas Instruments.

Diplomski rad podijeljen je na tri glavna dijela. U prvom dijelu rada provedena je detaljna analiza rada trofaznih izmjenjivača napona. Dana su teorijska objašnjenja i pretpostavke s kojima se provodi matematičko modeliranje sustava upravljanja izmjenjivačem. Na kraju je prezentiran algoritam modulacije prostornog vektora koji predstavlja način upravljanja izmjenjivačem za dobivanje trofaznog napona. U drugom je dijelu implementiran algoritam modulacije prostornog vektora u MATLAB/Simulink programu. Opisani su svi koraci i dijelovi modela koji se koriste u algoritmu. Na temelju dobivenog modela moguće je dobiti odzive na izlazu izmjenjivača kako bi se testirao implementirani algoritam. Treći dio rada sadrži eksperimentalni dio u kojem je izvedeni algoritam u Simulinku prebačen na DSP kontroler koji na svojem izlazu daje upravljačke signale za Typhoon HIL. Unutar Typhoon HIL-a nalazi se izmjenjivač čijim se sklopkama upravlja preko upravljačkih signala s DSP kontrolera. Na kraju je obavljeno testiranje algoritma gdje su dobiveni odgovarajući valni oblici faznih i linijskih napona i struja te upravljačkih impulsa.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Modulacija prostornog vektora je vrlo značajna tehnika upravljanja današnjim pretvaračima. Početna primjena je bila upravljanje trofaznim naponskim izmjenjivačima, a zatim se primjena ove tehnike proširila na upravljanje trofaznim naponskim ispravljačima, strujnim ispravljačima i izmjenjivačima, rezonantnim trofaznim pretvaračima, višerazinskim pretvaračima, matričnim pretvaračima itd.

Ivan Flegar u literaturi [1] predstavlja modulacijske tehnike za upravljanje jednofaznim i trofaznim izmjenjivačima napona. Iznosi osnovnu ideju modulacije kojom se sinusne volt-sekunde postižu na trošilu pomoću odgovarajućih sklopnih stanja pretvaračkih komponenti uz pomoć istosmjernog napona na ulazu izmjenjivača.

Paul C. Krause i ostali u knjizi [2] objašnjavaju određivanje faznih i linijskih napona trofaznog naponskog izmjenjivača u mosnom spoju. Trofazni izmjenjivač modeliran je pomoću šest pretvaračkih sklopki (MOSFET-a) koje uklapaju dovođenjem upravljačkog signala. Gornju granu izmjenjivača naziva visokonaponska grana, a donju niskonaponska grana. Sklopke u donjoj grani su protutaktno upravljane u odnosu na sklopke u gornjoj grani kako bi se izbjeglo kratko spajanje istosmjernog izvora na ulazu izmjenjivača.

Ned Mohan u [3] predstavlja implementaciju transformacija koordinata između dvoosnih i troosnih sustava unutar Simulink programa kako bi se izveo model za vektorsko upravljanje asinkronim motorom koji koristi frekvencijski pretvarač upravljani algoritmom prostornog vektora.

Bimal K. Bose u knjizi [4] opisuje određivanje vremena uključenosti pojedinih prostornih vektora kako bi se realizirao željeni odnosno referentni prostorni vektor napona trošila. Određivanje vremena uključenosti bazira se na usrednjavanju proizvedenih volt-sekundi te izjednačavanjem s volt-sekundama proizvedenim referentnim prostornim vektorom. Predlaže simetrični obrazac sklapanja ventila kako bi se smanjili gubici sklapanja pretvaračkih komponenti.

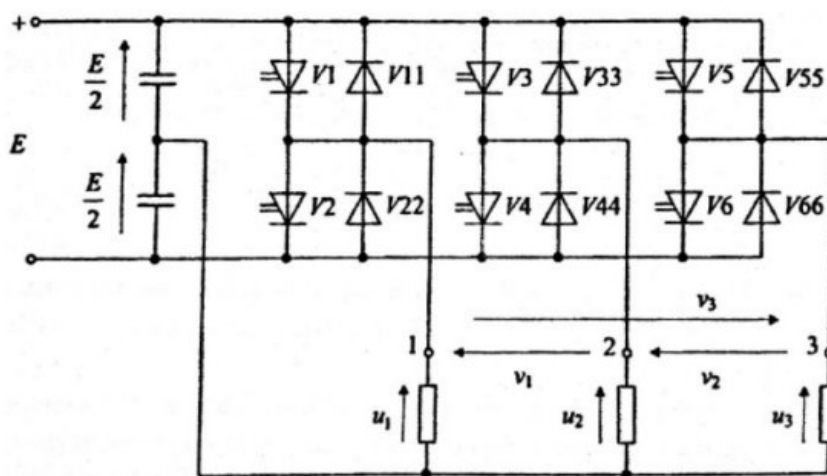
Gorislav Erceg u [5] piše kako je moguće okretno magnetsko polje predočiti prostornim vektorom, koji je po apsolutnoj veličini jednak amplitudi resultantnog sinusnog vala i usmjeren duž te amplitude. Taj se vektor u zračnom rasporu vrti sinkronom brzinom koja odgovara frekvenciji trofaznog napona napajanja.

3. ANALIZA RADA TROFAZNIH NAPONSKIH IZMJENJIVAČA

Jedan od načina izgradnje trofaznih izmjenjivača bio bi da se upotrijebe tri izmjenjivača u jednofaznom mosnom spoju, kod kojih bi izlazni naponi izmjenjivača bili na frekvenciji rada međusobno fazno pomaknuti za 120° . Taj način, ipak, nije spretan. Zahtijeva ili trofazni izlazni transformator ili da svaka faza trošila ima svoje priključke dostupne i odvojene od priključaka drugih faza trošila. Osim toga potrebno je i dvanaest naponskih jednosmjernih sklopki. Drugi bi način bio da se upotrijebe tri polumosna spoja. Polumosni spoj u jednoj grani sadrži dva kondenzatora jednakih kapacitivnosti te djeluje kao naponsko djelilo. Napon pojedinog kondenzatora jednak je polovini napona istosmjernog međukruga E . U drugoj grani nalaze se dvije upravljive naponske sklopke. Između dviju grana polumosnog spoja nalazi se trošilo, najčešće radno-induktivnog karaktera što odgovara asinkronim motorima [1].

3.1. Izmjenjivač s dostupnim zvjezdištem trošila

Kao što je ranije rečeno, trofazni izmjenjivač napona dobije se povezivanjem tri jednofazna polumosna spoja. Shema izmjenjivača prikazana je na slici 3.1. Svaka faza izmjenjivača napajana je iz zajedničkog istosmjernog izvora napona E . Kondenzatori u polumosnom spoju zajednički su za sve tri faze jer se radi o izmjenjivaču s dostupnim zvjezdištem trošila. Naime, zvjezdište trošila je spojeno na srednju točku izvora napona E .



Slika 3.1 Shema spoja trofaznog izmjenjivača s dostupnim zvjezdištem trošila [1]

Dostupnost zvjezdišta trošila omogućava nesimetrična opterećenja. Gornju granu izmjenjivača čine ventili V1, V3 i V5 dok donju granu čine V2, V4 i V6. Upravljivi ventili izmjenjivača upravljani su tako da za upravljačke impulse vrijedi:

$$x_{v3}(\omega t) = x_{v1}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad x_{v5}(\omega t) = x_{v1}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3-1)$$

pri čemu su upravljivi ventili u pojedinom polumosnom spoju upravljani protutaktno, tj. vrijedi

$$x_{v2} = 1 - x_{v1} \quad x_{v4} = 1 - x_{v3} \quad x_{v6} = 1 - x_{v5} \quad (3-2)$$

Protutaktnost ventila u pojedinom polumosnom spoju osigurava da je u svakom trenutku električna mreža dobro definirana. Naime, ako su oba upravljiva ventila u istoj grani uklopljena u isto vrijeme dolazi do kratkog spoja napona izvora što za posljedicu ima protjecanje prekostruje koja može oštetiti izmjenjivač. Na razini modela, struja bi poprimila beskonačnu vrijednost. Iz izraza (3-1) vidljivo je da su upravljački impulsi gornje grane izmjenjivača pomaknuti za 120° . Time je postignuto i da su izmjenični naponi na trošilima međusobno pomaknuti za 120° na osnovnoj frekvenciji rada. Fazne napone trošila moguće je izraziti preko upravljačkih impulsa. Za fazne napone trošila trošila vrijedi izraz (3-3).

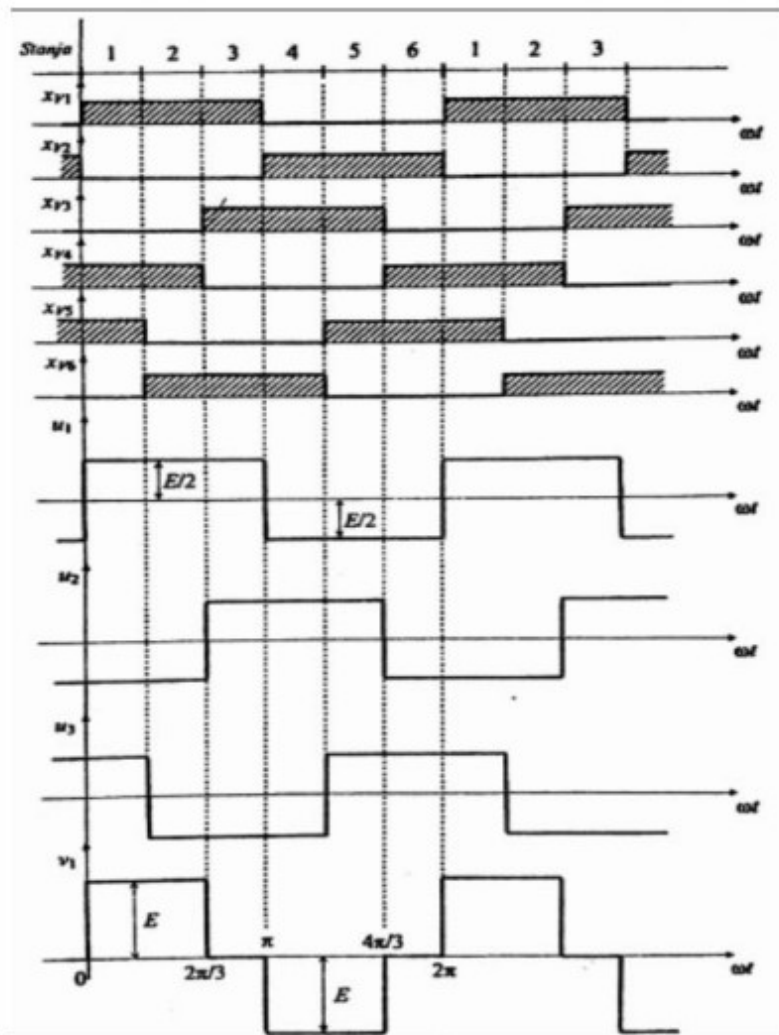
$$u_1 = E\left(x_{v1} - \frac{1}{2}\right) \quad u_2 = E\left(x_{v3} - \frac{1}{2}\right) \quad u_3 = E\left(x_{v5} - \frac{1}{2}\right) \quad (3-3)$$

Do izraza (3-3) dolazi se iz KZN-a primijenjenog na shemu izmjenjivača 3.1 uz uvažavanje uvjeta da uvijek jedan ventil vodi u istoj grani [2]. Isti postupak primjenjuje se i za određivanje linijskih napona. Linijski naponi jednaki su razlikama faznih napona, tj.

$$\begin{aligned} v_1 &= u_1 - u_2 = E(x_{v1} - x_{v3}) \\ v_2 &= u_2 - u_3 = E(x_{v3} - x_{v5}) \\ v_3 &= u_3 - u_1 = E(x_{v5} - x_{v1}) \end{aligned} \quad (3-4)$$

te su također međusobno pomaknuti za 120° . Slika 3.2 prikazuje karakteristične valne oblike napona za zadani slijed upravljačkih signala. Iz slike je vidljivo da je u svakom trenutku jedan upravljivi ventil svake grane uklopljen. Također, upravljački signali pomaknuti su za 120° te svaki traje 180° . Preostaje odrediti ukupni broj mogućih stanja istodobno uklopljenih upravljivih ventila. Svaki ventil gornje grane izmjenjivača posjeduje dva stanja. Stanje logičke jedinice je kada je ventil uklopljen i stanje logičke nule kada je iskllopljen. Ako se uzmu sva tri ventila gornje grane u obzir, dobije se da je ukupni broj mogućih sklopnih stanja jednak $2^3 = 8$. Dakle, izmjenjivačem

je moguće postići ukupno osam stanja od kojih dva stanja su karakterizirana logičkim jedinicama (111) i logičkim nulama (000). Linijski naponi za stanja (111) i (000) jednaki su nuli. Preostalih šest stanja prikazano je na slici 3.2. Stanja (111) i (000) nazivaju se stanje sedam i stanje osam[1].



Slika 3.2 Slijed upravljačkih signala i karakteristični valni oblici napona trošila neupravljivog izmjenjivača [1]

Iz dobivenih valnih oblika vidljivo je da nije moguće upravljati efektivnom vrijednosti faznih napona trošila za zadani slijed upravljačkih signala. Jedini je način promjena iznosa naponskog izvora E što nije praktično i zadovoljavajuće pri primjenama. Zbog toga se ovaj spoj naziva neupravljivi trofazni izmjenjivač napona. U radu neupravljivog izmjenjivača ne pojavljuju se stanja sedam (111) i osam (000) [3]. Sva moguća stanja upravljačkih ventila prikazana su u tablici 3.1. Brojevima u zagradi označavaju se stanja upravljivih ventila gornje grane izmjenjivača.

Tablica 3.1 Sva moguća dopuštena stanja upravljačkih signala

| Upravljivi ventili | STANJA UPRAVLJAČKIH SIGNALA | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| V1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| V3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| V5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| V2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| V4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| V6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Fazni naponi neupravljivog izmjenjivača su pravokutnog valnog oblika fazno pomaknuti za 120° . Srednja vrijednost izmjeničnog faznog napona jednaka je nuli, a efektivna vrijednost jednaka je $E/2$. Rastavom valnih oblika faznih napona u Fourierov red vidi se da postoje samo viši neparni harmonici u harmonijskom spektru. Prema izrazu (3-5) određuju se koeficijenti Fourierova reda.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T u \cos \omega t dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T u \sin \omega t dt \quad (3-5)$$

Rastav u Fourierov red proveden je za fazni napon prve faze izmjenjivača. Očigledno, koeficijent a_n jednak je nuli jer je valni oblik neparna funkcija. Koeficijent b_n određuje se izrazom (3-6).

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_1(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (3-6)$$

Uvrštavanjem faznog napona te integriranjem i sređivanjem izraza, dobije se konačni oblik koeficijenta b_n .

$$\hat{U}_B(n) = \frac{E}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \quad (3-7)$$

Vidljivo je iz izraza (3-7) da koeficijent b_n ovisi samo o narinutom istosmjernom naponu E te se jedino promjenom napona E može upravljati harmonijskim spektrom. Na osnovi izračunatih koeficijenata određuje se konačni oblik rastava u Fourierov red (3-8).

$$u_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \sin n\omega t \quad (3-8)$$

Osnovni harmonik i efektivna vrijednost osnovnog harmonika faznog napona računaju se prema izrazu (3-9).

$$u_1(1) = \frac{2E}{\pi} \sin \omega t \quad U_1(1) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E \quad (3-9)$$

Ukupna harmonička distorzija faznih napona jednaka je

$$THDU = \sqrt{\frac{U^2}{U_1^2(1)} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} = 0,4834 \quad (3-10)$$

Preostaje odrediti još harmoničku distorziju linijskog napona izmjenjivača. Iz valnog oblika linijskog napona v_1 proizlazi da je srednja vrijednost nula volti što je u skladu sa svojstvima izmjeničnih signala. Efektivna vrijednost linijskog napona jednaka je izrazu (3-11)

$$V = E \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3-11)$$

dok je efektivna vrijednost osnovnog harmonika jednaka

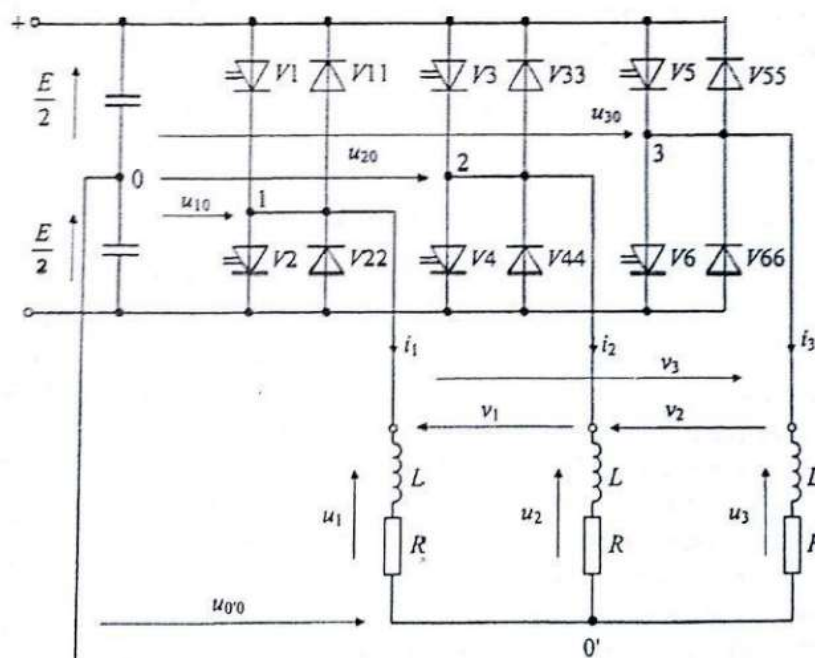
$$V(1) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} E \quad (3-12)$$

Konačno, ukupna harmonička distorzija linijskog napona jednaka je

$$THDV = \sqrt{\frac{V^2}{V^2(1)} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,3108 \quad (3-13)$$

3.2. Izmjenjivač u trofaznom mosnom spoju

Povratni vodič kod trofaznog izmjenjivača s dostupnim zvjezdištem omogućava napajanje nesimetričnih trošila kod kojih impedancije u sve tri faze nisu jednake. U slučaju nesimetričnog opterećenja, povratnim vodičem teče struja od zvjezdišta trošila do srednje točke istosmjernog izvora. Ako se pak radi o simetričnom opterećenju, povratni vodič više nije potreban jer je zbroj struja jednak nuli te struja ne teče. Tipični primjeri simetričnih trošila su asinkroni i sinkroni motori koji se koriste u izmjeničnim elektromotornim pogonima [4]. Odspoji li se povratni vodič dobije se shema spoja izmjenjivača u trofaznom mosnom spoju, slika 3.3.



Slika 3.3 Trofazni mosni spoj simetrično opterećen [1]

Trošilo izmjenjivača modelirano je serijskim spojem otpora R i prigušnice L . U slučaju da povratni vodič ne postoji javlja se razlika između napona zvjezdišta trošila i srednje točke izvora. Razlika se definira kao napon $u_{0'0}$. Iz sheme je vidljivo da su naponi priključaka trošila prema naponu srednje točke izvora jednaki faznim naponima trofaznog izmjenjivača s dostupnim zvjezdištem trošila. Prema tome vrijedi:

$$u_{10} = E \left(x_{v1} - \frac{1}{2} \right) \quad u_{20} = E \left(x_{v3} - \frac{1}{2} \right) \quad u_{30} = E \left(x_{v5} - \frac{1}{2} \right) \quad (3-14)$$

Nadalje, moguće je izraziti linijske napone trošila pomoću napona priključaka trošila prema srednjoj točki izvora iz nadomjesne sheme, izraz (3-15).

$$v_1 = u_{10} - u_{20} \quad v_2 = u_{20} - u_{30} \quad v_3 = u_{30} - u_{10} \quad (3-15)$$

Uvrštavanjem izraza (3-14) u (3-15) dobiju se linijski naponi trošila izraženi pomoću stanja upravljačkih ventila gornje grane izmjenjivača.

$$v_1 = E(x_{v1} - x_{v3}) \quad v_2 = E(x_{v3} - x_{v5}) \quad v_3 = E(x_{v5} - x_{v1}) \quad (3-16)$$

Preostaje još odrediti fazne napone trošila. Za simetrično trošilo vrijedi da je zbroj trenutnih vrijednosti faznih napona jednak nuli.

$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad (3-17)$$

Također, za fazne napone vrijede izrazi (3-18) dobiveni iz KZN-a prema nadomjesnoj shemi.

$$u_1 = u_{10} - u_{0'0} \quad u_2 = u_{20} - u_{0'0} \quad u_3 = u_{30} - u_{0'0} \quad (3-18)$$

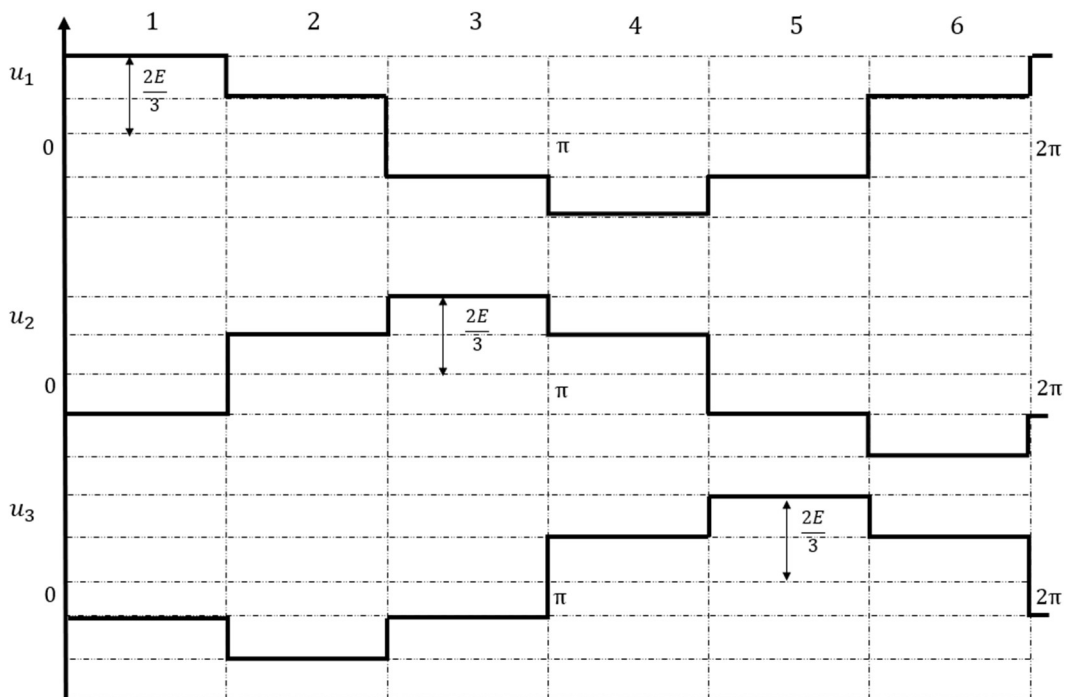
Međusobnim zbrajanjem faznih napona (3-18) te uzimanjem u obzir (3-17) dolazi se do izraza za napon $u_{0'0}$, izraženog preko stanja upravljivih ventila gornje grane izmjenjivača.

$$u_{0'0} = \frac{E}{3} (x_{v1} + x_{v3} + x_{v5} - \frac{3}{2}) \quad (3-19)$$

Konačno, uvrštavanjem (3-19) u (3-18) dobiju se fazni naponi (3-20) trošila izraženi preko stanja upravljivih ventila gornje grane izmjenjivača.

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{E}{3} (2x_{v1} - x_{v3} - x_{v5}) \\ u_2 &= \frac{E}{3} (2x_{v3} - x_{v1} - x_{v5}) \\ u_3 &= \frac{E}{3} (2x_{v5} - x_{v1} - x_{v3}) \end{aligned} \quad (3-20)$$

Na temelju izraza (3-16) i (3-20) lako se, za zadani slijed upravljačkih signala određuju svi fazni i linijski naponi trošila napajanog iz izmjenjivača u trofaznom mosnom spoju.



Slika 3.4 Fazni naponi trošila neupravljivog izmjenjivača

Na slici 3.4 prikazani su valni oblici faznih napona trošila za zadani slijed upravljačkih signala ako je izmjenjivač neupravljiv. Valni oblik faznog napona je dvorazinski.

Slijed upravljačkih signala ventila prikazan je tablicom 3.2.

Tablica 3.2 Pregled mogućih stanja upravljačkih ventila

| Ventili \ Stanje | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|
| V1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| V3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| V5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Iz tablice je vidljivo da se u analizi rada ne pojavljuju stanja sedam (111) i osam (000). Bitno je napomenuti da su sva stanja upravljačkih ventila u tablici 3.2 pomaknuta za jedno mjesto ulijevo u odnosu na tablicu 3.1. Time prvo stanje započinje uključenošću samo ventila V1 u gornjoj strani izmjenjivača. Svako stanje upravljačkih ventila traje 60° . Valni oblici napona su izmjenični, a efektivna vrijednost faznog napona jednaka je

$$U = \frac{\sqrt{2}}{3} E \quad (3-21)$$

Koeficijenti faznog napona rastavljenog u Fourierov red određuju se pomoću izraza (3-22).

$$\begin{aligned} \hat{U}_A(n) &= \frac{E}{3n\pi} \left(\sin \frac{n\pi}{3} + 2 \sin \frac{n2\pi}{3} - \sin \frac{n4\pi}{3} - 2 \sin \frac{n5\pi}{3} \right) \\ \hat{U}_B(n) &= \frac{E}{3n\pi} \left(1 - \cos \frac{n\pi}{3} - \cos n\pi + \cos \frac{n4\pi}{3} - 2 \cos \frac{n2\pi}{3} + 2 \cos \frac{n5\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (3-22)$$

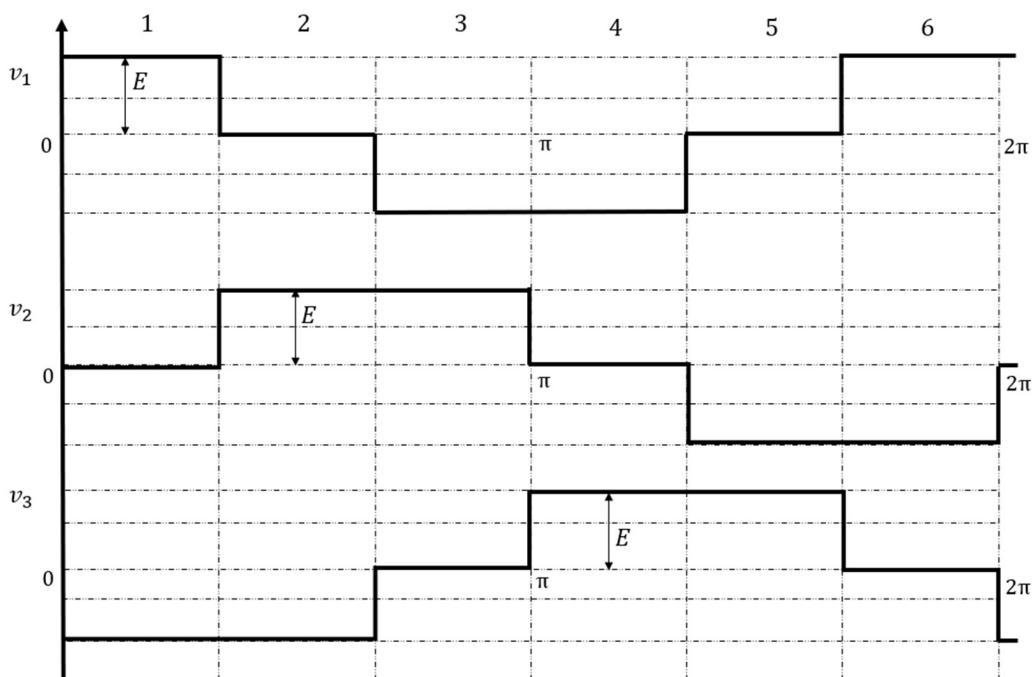
Iz Fourierovog zapisa moguće je odrediti osnovni harmonik faznog napona trošila. Za osnovni harmonik vrijedi

$$u_1(1) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} E \cos \omega t + \frac{E}{\pi} \sin \omega t = \frac{2E}{\pi} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) \quad (3-23)$$

Efektivna vrijednost osnovnog harmonika faznog napona iznosi

$$U_1(1) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E \quad (3-24)$$

Linijski naponi trošila prikazani su na slici 3.5. Valni oblik linijskog napona je dvorazinski izmjenični signal [4].



Slika 3.5 Linijski naponi trošila neupravljivog izmjenjivača

Efektivna vrijednost linijskog napona određuje se prema (3-25).

$$V = \frac{\sqrt{6}}{3} E \quad (3-25)$$

Rastav linijskog napona v_1 u Fourierov red određen je izrazom (3-26)

$$v_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E}{n\pi} \left(\sin \frac{n\pi}{3} - \sin \frac{4n\pi}{3} + \sin \frac{2n\pi}{3} - \sin \frac{5n\pi}{3} \right) \cos n\omega t \quad (3-26)$$

pri čemu je prvi harmonik linijskog napona jednak (3-27).

$$v_1(1)(t) = \frac{E}{\pi} 2\sqrt{3} \cos \omega t \quad (3-27)$$

Efektivna vrijednost prvog harmonika linijskog napona određuje se iz (3-28).

$$V_1(1) = \frac{E}{\pi} \sqrt{6} \quad (3-28)$$

Ukupne harmoničke distorzije faznog i linijskog napona su jednake te iznose 0,3108.

$$THDU = THDV = \sqrt{\frac{U^2}{U_1(1)^2} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,3108 \quad (3-29)$$

U tablici 3.3 nalaze se iznosi faznih i linijskih napona za svih šest sklopnih stanja neupravljivog izmjenjivača napona.

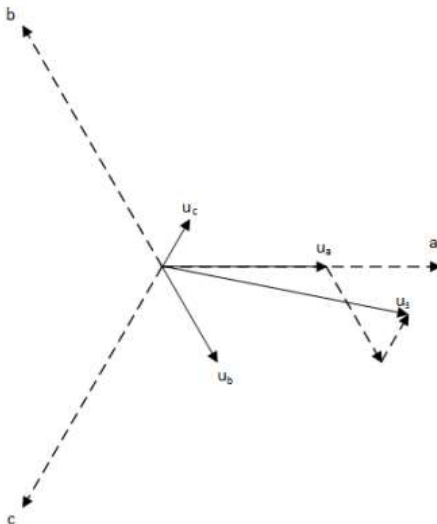
Tablica 3.3 Iznosi faznih i linijskih napona neupravljivog izmjenjivača

| Stanje | u_1 | u_2 | u_3 | v_1 | v_2 | v_3 |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| 1 | $\frac{2}{3}E$ | $-\frac{1}{3}E$ | $-\frac{1}{3}E$ | E | 0 | $-E$ |
| 2 | $\frac{1}{3}E$ | $\frac{1}{3}E$ | $-\frac{2}{3}E$ | 0 | E | $-E$ |
| 3 | $-\frac{1}{3}E$ | $\frac{2}{3}E$ | $-\frac{1}{3}E$ | $-E$ | E | 0 |
| 4 | $-\frac{2}{3}E$ | $\frac{1}{3}E$ | $\frac{1}{3}E$ | $-E$ | 0 | E |
| 5 | $-\frac{1}{3}E$ | $-\frac{1}{3}E$ | $\frac{2}{3}E$ | 0 | $-E$ | E |
| 6 | $\frac{1}{3}E$ | $-\frac{2}{3}E$ | $\frac{1}{3}E$ | E | $-E$ | 0 |

3.3. Pojam prostornog vektora

Prostorni vektor predstavlja matematički koncept kojim se žele opisati električne veličine poput napona, struja, magnetskih tokova itd. Koncept prostornih vektora primjenjuje se većinom na trofazne simetrične električne veličine. Kao što je poznato, naponi, struje i magnetski tokovi su skalarne veličine određene svojom veličinom, iznosom. U odnosu na skalarne veličine, vektorske veličine posjeduju orijentaciju i smjer uz spomenuti iznos, odnosno modul. Primjerice, sila je vektorska veličina određena iznosom, smjerom i orijentacijom djelovanja. U trofaznim simetričnim sustavima te električnim strojevima, namoti pojedinih faza međusobno su prostorno pomaknuti za 120° . Također, sustav napajanja sastoji se od simetričnog trofaznog napona gdje je fazni pomak između faza 120° . Posljedica navedenog je da sve električne veličine čine trofazne simetrične sustave s faznim pomakom od 120° . Zbog toga se razvila ideja da se trofazni simetrični sustav promatra kroz jedan prostorni vektor koji ima modul, orijentaciju i smjer. Time simetrični sustav postaje jedna neraskidiva cjelina koja se gleda kroz prostorni vektor umjesto kao tri fazne veličine međusobno pomaknute za 120° . Ako se svakoj faznoj električnoj veličini, npr. naponu, pridruži prostorni kut namota, skalarne veličina postaje vektor. Na ovaj način svaka skalarne električna veličina postaje vektorska električna veličina. Vektorskim zbrojem sva tri vektora faznih napona dobije se rezultatni prostorni vektor napona. Ovakav je prostorni vektor istodobni prikaz

sve tri fazne veličine te je funkcija vremena [5]. Projekcija prostornog vektora na koordinatne osi predstavlja trenutne vrijednosti odgovarajućih veličina.



Slika 3.6 Prostorni vektor napona u troosnom koordinatnom sustavu [6]

Na slici 3.6 prikazan je rezultatni prostorni vektor napona \vec{U}_S nastao vektorskim zbrojem vektora napona pojedinih faza. Osi namota pojedinih faza međusobno zatvaraju kut 120° u prostoru. Time za pojedine vektore faznih napona vrijedi izraz (3-30).

$$\begin{aligned}\vec{U}_A &= \hat{U} \sin(\omega t) e^{j0} \\ \vec{U}_B &= \hat{U} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ \vec{U}_C &= \hat{U} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) e^{j\frac{4\pi}{3}}\end{aligned}\quad (3-30)$$

Vektorskim zbrojem sva tri vektora dobije se rezultatni prostorni vektor napona (3-31).

$$\vec{U}_S = \vec{U}_A + \vec{U}_B + \vec{U}_C \quad (3-31)$$

Ako se izrazi (3-30) ubace u (3-31) dobije se sljedeći oblik prostornog vektora napona:

$$\vec{U}_S = \frac{3}{2} \hat{U} \sin(\omega t) - \frac{3}{2} \hat{U} \cos(\omega t) j \quad (3-32)$$

Prostorni vektor prikazan je u obliku kompleksnog broja pri čemu je vidljivo da su realni i imaginarni dijelovi funkcije vremena. Zapravo, algebra kompleksnih brojeva pogodna je za opisivanje prostornih vektora. Prostorni vektor čine dvije ortogonalne komponente koje su funkcije vremena. Time je prostorni vektor prikazan u kompleksnoj dvoosnoj ravnini.

Modul prostornog vektora moguće je dobiti iz uvjeta ortogonalnosti realnog i imaginarnog dijela vektora (3-33).

$$|\vec{U}_s| = \sqrt{\text{Re}(\vec{U}_s)^2 + \text{Im}(\vec{U}_s)^2}$$

$$|\vec{U}_s| = \frac{3}{2} \hat{U}$$
(3-33)

Prostorni vektor ima modul stalnog iznosa, 3/2 puta veći od amplitude faznog napona. Kut prostornog vektora vremenski je promjenjiv te se određuje pomoću Eulerove formule (3-34).

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j \sin(\omega t)$$
(3-34)

Nakon provedenih računskih operacija i korištenja Eulerove formule za kut prostornog vektora dobije se sljedeći izraz.

$$\varphi = \omega t - \frac{\pi}{2}$$
(3-35)

Prema izrazu (3-35), u početnom trenutku $t = 0$, prostorni vektor se nalazi na negativnom dijelu imaginarnog osi te zatvara kut -90° . Prolaskom vremena, prostorni vektor opisuje kružnicu u smjeru obrnutom od smjera kazaljki na satu. Kut je linearna funkcija vremena određena kružnom frekvencijom ω , odnosno frekvencijom mreže f . Na temelju navedenog, prostorni vektor napona moguće je zapisati pomoću modula i kuta (3-36).

$$\vec{U}_s = \frac{3}{2} \hat{U} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}$$
(3-36)

Za potrebe očuvanja amplitude mrežnog napona prostornog vektora, koristi se faktor 2/3 kojim se skalira prostorni vektor \vec{U}_s .

Općenito, prostorni vektor neke električne veličine \vec{X} , definira se prema jednadžbi (3-37)

$$\vec{X} = \frac{2}{3} (X_a + X_b \vec{a} + X_c \vec{a}^2) \quad \vec{a} = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} j$$
(3-37)

gdje \vec{a} predstavlja Steinmetzov operator. Ako se realna i imaginarna os dvoosnog sustava zamijene s d i q osima, dobiva se novi dvoosni ortogonalni dq sustav. Prostorni vektor u novom dq sustavu sastoji se od d i q komponente (3-38).

$$\vec{X}_{dq} = X_d + jX_q$$
(3-38)

Imaginarna jedinica se i dalje koristi u ovakvom zapisu vektora kako bi se naglasilo da su d i q osi ortogonalne. X_a , X_b i X_c predstavljaju trenutne vrijednosti faznih veličina. Komponente prostornog vektora u dq sustavu su

$$\begin{aligned} X_d &= X_a \\ X_q &= \frac{\sqrt{3}}{3} (X_b - X_c) \end{aligned} \quad (3-39)$$

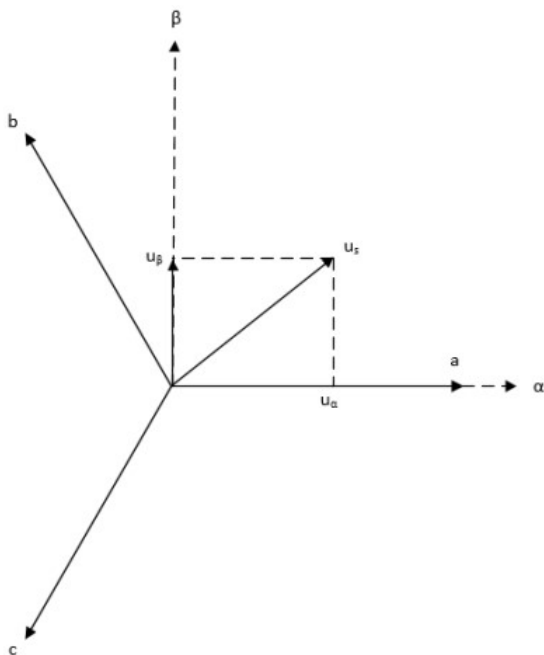
pri čemu je uzeto u obzir da je zbroj trenutnih faznih veličina u simetričnom trofaznom sustavu jednak nuli.

Primjerice, za prostorni vektor napona trofaznog simetričnog sustava faznih napona pod (3-30) ortogonalne komponente su

$$\begin{aligned} U_d &= \hat{U} \sin(\omega t) \\ U_q &= -\hat{U} \cos(\omega t) \end{aligned}$$

3.4. Clarkova transformacija

Transformacija iz troosnog abc sustava u mirujući dvoosni $\alpha\beta$ sustav naziva se Clarkova transformacija, slika 3.7.



Slika 3.7 Clarkova transformacija [6]

Transformaciju je izvela matematičarka Edith Clarke kao pojednostavljenje metode simetričnih komponentata. Troosni abc sustav sastoji se od tri međusobno zakrenute osi pod kutem 120° . Mirujući $\alpha\beta$ sustav vezan je stator izmjeničnog stroja te se α os postavlja u smjeru a osi troosnog sustava. Kao što je ranije rečeno, cilj transformacije je prikazati troosne veličine u dvoosnom mirujućem koordinatnom sustavu. Ovime se obavlja redukcija sustava s tri veličine na sustav s dvije veličine. Prostorni vektor neke veličine u troosnom abc sustavu definiran je na način (3-40)

$$\vec{X} = X_a \vec{a} + X_b \vec{b} + X_c \vec{c} \quad (3-40)$$

pri čemu su \vec{a} , \vec{b} i \vec{c} jedinični vektori koji čine troosni abc sustav[4]. Navedene jedinične vektore, moguće je prikazati u mirujućem dvoosnom $\alpha\beta$ koordinatnom sustavu upotrebom Eulerovog identiteta (3-41).

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \cos(0)\vec{\alpha} + \sin(0)\vec{\beta} \\ \vec{b} &= \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\vec{\alpha} + \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)\vec{\beta} \\ \vec{c} &= \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right)\vec{\alpha} + \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right)\vec{\beta} \end{aligned} \quad (3-41)$$

Gornji izraz moguće je prikazati u matričnom obliku.

$$\begin{bmatrix} \vec{a} \\ \vec{b} \\ \vec{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\alpha} \\ \vec{\beta} \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

Nakon toga, potrebno je prostorni vektor definirati u $\alpha\beta$ sustavu (3-43)

$$\vec{X}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \vec{\alpha} & \vec{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{\alpha} & \vec{\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3-43)$$

pri čemu su X_α i X_β komponente jednake (3-44).

$$\begin{aligned} X_\alpha &= X_a - \frac{1}{2}X_b - \frac{1}{2}X_c \\ X_\beta &= \frac{\sqrt{3}}{2}X_b - \frac{\sqrt{3}}{2}X_c \end{aligned} \quad (3-44)$$

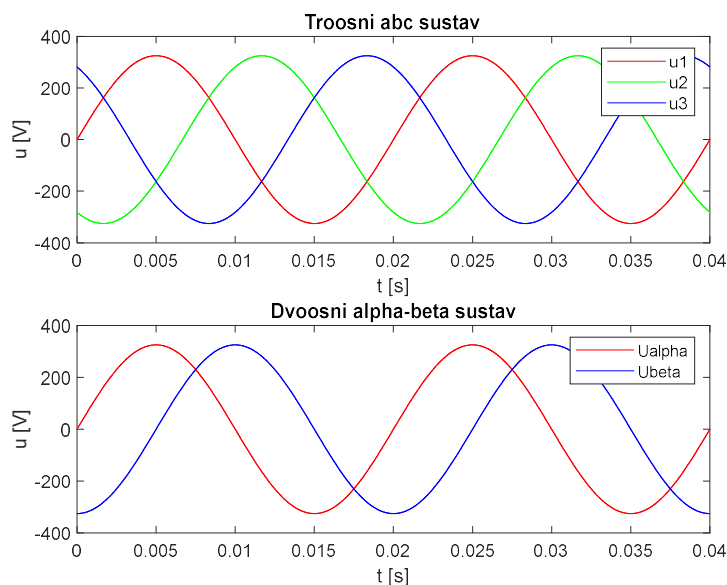
Na kraju, moguće je napisati vezu između $\alpha\beta$ i abc sustava u obliku Clarkove matrice transformacije (3-45).

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3-45)$$

Potpunu Clarkeovu transformaciju dobije se množenjem s faktorom $2/3$. Prijelaz iz $\alpha\beta$ sustava u abc sustav omogućuje inverzna Clarkeova transformacija (3-46).

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

Rezultat Clarkove transformacije trofaznog simetričnog sustava su dvije sinusoidalne veličine u $\alpha\beta$ sustavu prikazane na slici 3.8. Faktor $2/3$ koristi se za skaliranje na vršnu vrijednost faznih veličina.

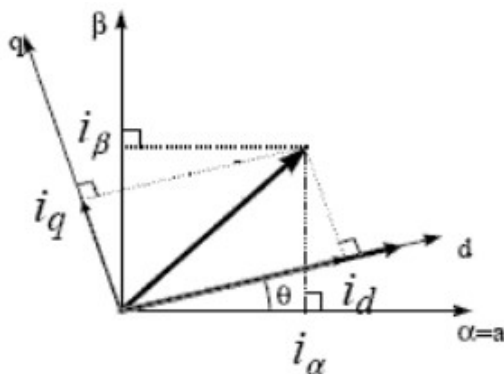


Slika 3.8 Prijelaz iz troosnog abc sustava u dvoosni $\alpha\beta$ sustav

3.5. Parkova transformacija

Transformacija iz mirujućeg dvoosnog $\alpha\beta$ sustava u rotirajući dq sustav naziva se Parkova transformacija. Ime dq sustava već je ranije spomenuto, u kontekstu dvoosnog mirujućeg sustava čije je ime izabrano po volji. Općenito, dq sustavom se naziva dvoosni ortogonalni rotirajući sustav

koji rotira proizvoljnom brzinom vrtnje ω_k . U teoriji električnih strojeva, najpogodnije je za brzinu vrtnje dq sustava uzeti sinkronu brzinu vrtnje ω_s . Naime, svi prostorni vektori električnih veličina rotiraju sinkronom brzinom vrtnje ω_s u odnosu na mirujući $\alpha\beta$ sustav te predstavljaju istosmjerne komponente u rotirajućem dq sustavu. Naravno, moguća je i izravna Parkova transformacija troosnog sustava u dq sustav o čemu će kasnije biti riječi. Na slici 3.9 prikazana je Parkova transformacija.



Slika 3.9 Parkova transformacija [7]

Transformacija prostornog vektora iz $\alpha\beta$ sustava u rotirajući dq sustav obavlja se tako da se traže projekcije vektora na d i q osi. Položaj dq sustava mijenja se u vremenu te se označava kutom ρ_k (na slici 3.9 položaj je označen kutom θ). Veza između kuta ρ_k i brzine vrtnje sustava predstavljena je izrazom (3-47).

$$\omega_k = \frac{d\rho_k}{dt} \quad (3-47)$$

Prostorni vektor u dq sustavu može se prema slici 3.8 izraziti na sljedeći način:

$$\vec{X}_{dq} = \vec{X}_{\alpha\beta} e^{-j\rho_k} = X_d + X_q j \quad (3-48)$$

Uvrštavanjem α i β komponenti prostornog vektora u gornji izraz, dobije se prostorni vektor u dq sustavu (3-49).

$$\vec{X}_{dq} = X_\alpha \cos \rho_k + X_\beta \sin \rho_k + (X_\beta \cos \rho_k - X_\alpha \sin \rho_k) j \quad (3-49)$$

Gornji izraz moguće je napisati u obliku matrice (3-50)

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho_k & \sin \rho_k \\ -\sin \rho_k & \cos \rho_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

$$X_{dq} = C_{dq} X_{\alpha\beta}$$

Također, vrijedi i inverz matrice (3-51).

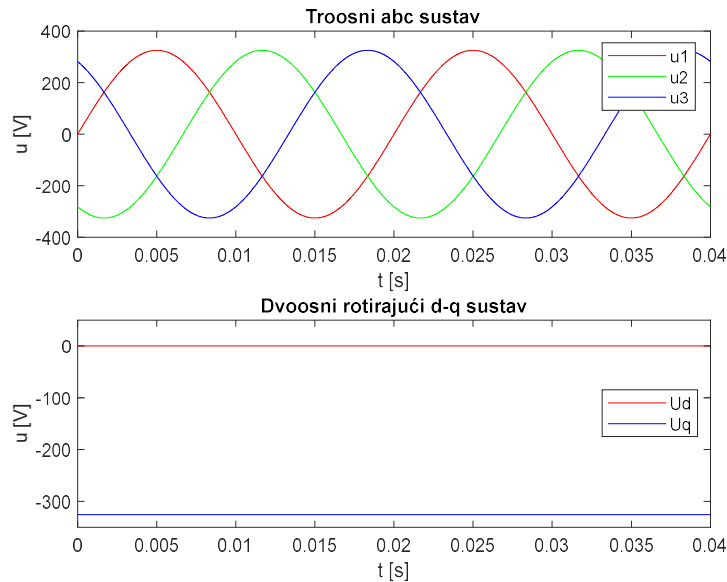
$$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho_k & -\sin \rho_k \\ \sin \rho_k & \cos \rho_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (3-51)$$

$$X_{\alpha\beta} = C_{dq}^{-1} X_{dq}$$

Preostaje odrediti još izravnu Parkovu transformaciju. Radi se o transformaciji troosnog abc sustava u rotirajući dq sustav. Umjesto X_{α} i X_{β} komponenti prostornog vektora uvrštava se izraz (3-44) te se dobiva izravna Parkova transformacija (3-52) i njezin inverz (3-53).

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\rho_k) & \cos\left(\rho_k - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\rho_k + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\rho_k) & -\sin\left(\rho_k - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\rho_k + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3-52)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho_k) & -\sin(\rho_k) \\ \cos\left(\rho_k - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\rho_k - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\rho_k + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\rho_k + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (3-53)$$



Slika 3.10. Prijelaz iz troosnog abc sustava u dvoosni rotirajući dq sustav

Na slici 3.10 prikazana je izravna Parkova transformacija pri čemu se troosni sustav transformira u sustav istosmjernih komponenti. Brzina rotacije dq sustava odgovara frekvenciji mreže.

4. MODULACIJA PROSTORNOG VEKTORA

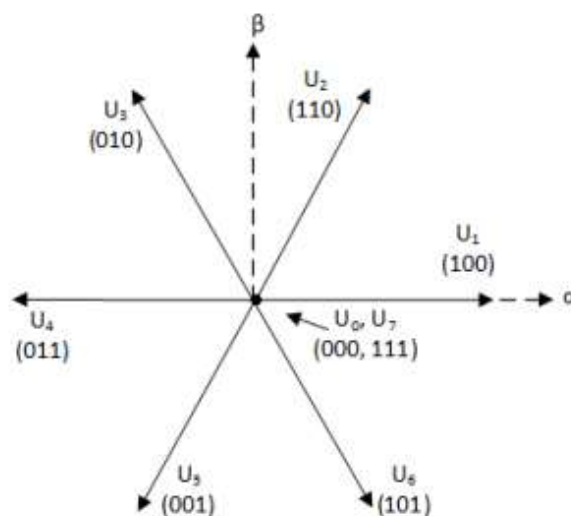
Modulacija prostornog vektora koristi se kako bi se volt-sekunde proizvedene sinusnim naponom oponašale na trošilu. Tok koji proizvodi referentni sinusni napon mora odgovarati toku proizvedenim algoritmom modulacije. Modulirani prostorni vektor unutar sklopne periode proizvodi željeni tok.

Danas postoji veliki broj različitih varijanti modulacija prostornog vektora koje se međusobno razlikuju s obzirom na kompleksnost realizacije i kvalitetu dobivenih rezultata.

Ranije je rečeno da se u analizi rada trofaznog izmjenjivača napona koristi šest upravljačkih stanja 1-6. Svako sklopno stanje predstavlja jedan položaj prostornog vektora napona koji ima odgovarajući kut i amplitudu. Prostorni vektor napona za svako sklopno stanje moguće je izraziti preko stanja uklopljenosti upravljačkih ventila gornje grane izmjenjivača x_{v1} , x_{v3} i x_{v5} . Prostorni vektor napona izražen po komponentama dobivenim pomoću Clarkeove transformacije određen je prema izrazu (4-1), gdje su u_1 , u_2 i u_3 fazni naponi trofaznog abc sustava.

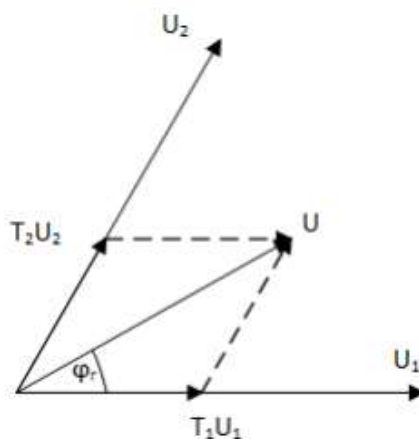
$$\begin{aligned} U_\alpha &= u_1 = \frac{E}{3}(2x_{v1} - x_{v3} - x_{v5}) \\ U_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(u_2 - u_3) = \frac{E}{\sqrt{3}}(x_{v3} - x_{v5}) \end{aligned} \quad (4-1)$$

Prikažu li se prostorni vektori u $\alpha - \beta$ ravnini dobije se slika 4.1.



Slika 4.1 Prostorni vektori u $\alpha - \beta$ ravnini [6]

Prostorni vektori napona dijele $\alpha - \beta$ ravninu na šest jednakih dijelova koji se nazivaju sekstantni, odnosno sektori. Sektore čine dva susjedna prostorna vektora koji čine kut od 60° . Modul prostornih vektora iznosi $2/3$ napona istosmjernog međukruga E . Na slici 4.1 prikazana su i dva nulta stanja U_0 i U_7 koja se koriste u algoritmu prostorno vektorske modulacije o čemu će kasnije biti više rečeno. Vidljivo je da se pomoću svih mogućih sklopnih stanja može realizirati ukupno osam prostornih vektora napona. Prostorni vektori zauzimaju fiksne položaje unutar $\alpha - \beta$ ravnine pri čemu „opisuju kružnicu“ u smjeru obrnutom od smjera kazaljke na satu. Ovakvim načinom upravljanja pomoću osam sklopnih stanja nije moguće postići željeni referentni prostorni vektor napona trofaznog sustava već samo osam diskretnih vrijednosti. Osnovna je ideja algoritma prostorno vektorske modulacije oponašati vektor napona simetričnog trofaznog sustava napona. Volt-sekunde koje proizvodi referentni vektor trebaju biti jednake volt-sekundama proizvedenim sklapanjem izmjenjivača. Referentni prostorni vektor napona moguće je proizvesti kombinacijom dvaju susjednih vektora ($U_1 - U_6$) i dvaju nultih vektora U_0 i U_7 . Perioda mrežnog napona T podijeli se na veliki broj sklopnih perioda izmjenjivača T_s . Cilj modulacije, kao što je ranije rečeno, je proizvesti jednake volt-sekunde na trošilu unutar sklopne periode T_s (kombinacijom odgovarajućih vektora) kao što bi ih proizveo referentni vektor napona unutar sklopne periode [6].



Slika 4.2 Dobivanje referentnog vektora u prvom sektoru [6]

Prema slici 4.2 referentni vektor napona u prvom sektoru dobije se vektorskim zbrojem udjela dvaju susjednih vektora koji raspoređuju sektor u kojem se referentni vektor nalazi. Sklopna perioda T_s podijeli se na tri dijela (4-2):

$$T_s = T_1 + T_2 + T_0 \quad (4-2)$$

gdje je T_1 vrijeme uključenosti prostornog vektora $U_1(100)$, T_2 vrijeme uključenosti prostornog vektora $U_2(110)$ i T_0 vrijeme za koje djeluju vektori $U_0(000)$ i $U_7(111)$. Važno je naglasiti da je vrijeme uključenosti vektora U_0 i U_7 unutar sklopne periode jednako, pri čemu vrijedi (4-3).

$$T_{0(0)} = \frac{T_0}{2} \quad T_{0(7)} = \frac{T_0}{2} \quad (4-3)$$

O redosljedu uključivanja prostornih vektora unutar sklopne periode kasnije će biti više rečeno.

Kao što je ranije rečeno, referentni vektor napona \vec{U}_{ref} dobije se vektorskim zbrojem udjela dvaju susjednih vektora koji raspoređuju sektor u kojem se referentni vektor nalazi (4-4)

$$\vec{U}_{ref} = \alpha \vec{U}_1 + \beta \vec{U}_2 \quad (4-4)$$

gdje je α udio vektora \vec{U}_1 , a β udio vektora \vec{U}_2 . Također, volt-sekunde proizvedene referentnim vektorom unutar sklopne periode jednake su volt-sekundama proizvedenim pomoću vektora \vec{U}_1 , \vec{U}_2 , \vec{U}_0 i \vec{U}_7 što prikazuje izraz (4-5).

$$\int_0^{T_s} \vec{U}_{ref} dt = \int_0^{\frac{T_0}{2}} \vec{U}_0 dt + \int_{\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}+T_1} \vec{U}_1 dt + \int_{\frac{T_0}{2}+T_1}^{\frac{T_0}{2}+T_1+T_2} \vec{U}_2 dt + \int_{\frac{T_0}{2}+T_1+T_2}^{T_s} \vec{U}_7 dt \quad (4-5)$$

Očigledno, volt-sekunde koje stvaraju nul vektori \vec{U}_0 i \vec{U}_7 jednake su nuli.

$$\int_0^{T_s} \vec{U}_{ref} dt = \int_{\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}+T_1} \vec{U}_1 dt + \int_{\frac{T_0}{2}+T_1}^{\frac{T_0}{2}+T_1+T_2} \vec{U}_2 dt =$$

Nakon provedenog integriranja i sređivanja dobije se izraz (4-6).

$$\vec{U}_{ref} T_s = T_1 \vec{U}_1 + T_2 \vec{U}_2 \quad (4-6)$$

Ako se gornji izraz podijeli s vrijednošću sklopne periode T_s , dobiju se izrazi za udjele α i β prostornih vektora \vec{U}_1 i \vec{U}_2 (4-7).

$$\alpha = \frac{T_1}{T_s} \quad \beta = \frac{T_2}{T_s} \quad (4-7)$$

Preostaje još odrediti izraze za računanje vremena uključenosti prostornih vektora T_1 , T_2 i T_0 .

Prostorni vektori \vec{U}_{ref} , \vec{U}_1 i \vec{U}_2 prikazani u polarnom obliku glase:

$$\vec{U}_{ref} = U_{ref} e^{j\varphi_{ref}} \quad \vec{U}_1 = \frac{2}{3} E e^{j0} \quad \vec{U}_2 = \frac{2}{3} E e^{j\frac{\pi}{3}} \quad (4-8)$$

Uvrštavanjem izraza (4-8) u jednadžbu (4-4) moguće je odrediti vremena uključenosti vektora.

$$U_{ref} e^{j\varphi_{ref}} = \frac{T_1}{T_s} \frac{2}{3} E e^{j0} + \frac{T_2}{T_s} \frac{2}{3} E e^{j\frac{\pi}{3}}$$

$$3T_s U_{ref} \cos \varphi_{ref} + 3T_s U_{ref} \sin \varphi_{ref} j = 2T_1 E + T_2 E + \sqrt{3} T_2 E j$$

Gornji izraz predstavlja jednakost između dva kompleksna broja. Dva kompleksna broja su jednaka ako su im jednaki realni i imaginarni dijelovi. Izjednačavanjem realnih i imaginarnih dijelova dobiju se izrazi za vremena vođenja (4-9).

$$T_1 = \frac{(3U_{ref} \cos \varphi_{ref} - \sqrt{3} U_{ref} \sin \varphi_{ref})}{2E} T_s$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} U_{ref} \sin \varphi_{ref}}{E} T_s \quad (4-9)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

Referentni vektor napona moguće je zapisati pomoću komponentni u $\alpha - \beta$ ravnini (4-10) pa izraz

$$\vec{U}_{ref} = U_\alpha + jU_\beta \quad U_\alpha = U_{ref} \cos \varphi_{ref} \quad U_\beta = U_{ref} \sin \varphi_{ref} \quad (4-10)$$

(4-9) prelazi u (4-11).

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} T_s}{2 E} (\sqrt{3} U_\alpha - U_\beta)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3}}{E} U_\beta T_s \quad (4-11)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

Pomoću izraza (4-11) računaju se vremena uključenosti prostornih vektora za realizaciju referentnog vektora napona koji se nalazi u prvom sektoru.

Općenito, moguće je odrediti vremena uključenosti vektora T_1 , T_2 i T_0 za bilo koji sektor prema izrazu (4-12)

$$U_{ref} \cos \varphi_{ref} T_s = \frac{2}{3} U_{DC} \cos \left((k-1) \frac{\pi}{3} \right) T_1 + \frac{2}{3} U_{DC} \cos \left(k \frac{\pi}{3} \right) T_2$$

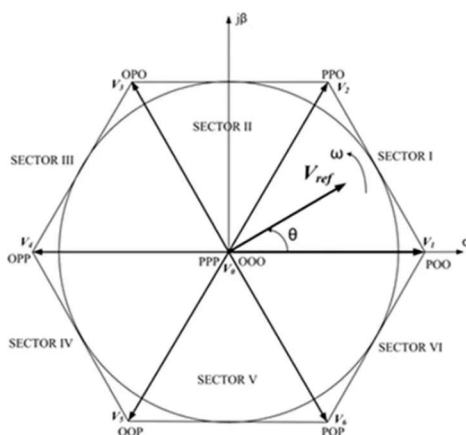
$$U_{ref} \sin \varphi_{ref} T_s = \frac{2}{3} U_{DC} \sin \left((k-1) \frac{\pi}{3} \right) T_1 + \frac{2}{3} U_{DC} \sin \left(k \frac{\pi}{3} \right) T_2 \quad (4-12)$$

gdje je k broj sektora u kojem se referentni vektor nalazi, a U_{DC} napon istosmjernog međukruga.

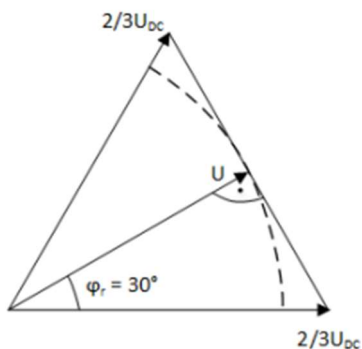
Sređivanjem gornjih jednažbi dobiju se konačni izrazi za izračun vremena uključenosti pojedinih vektora u bilo kojem sektoru (4-13).

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{U_{ref}}{U_{DC}} \sin\left(k \frac{\pi}{3} - \varphi_{ref}\right) T_s \\
 T_2 &= \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{U_{ref}}{U_{DC}} \sin\left(\varphi_{ref} - (k - 1) \frac{\pi}{3}\right) T_s \\
 T_0 &= T_s - T_1 - T_2 \\
 k &= 1, 2, \dots, 6
 \end{aligned}
 \tag{4-13}$$

Prostorni vektori prema slici 4.3 čine pravilni šesterokut u koji je upisana kružnica čiji radijus odgovara maksimalnoj amplitudi prostornog vektora napona. Maksimalna amplituda vektora napona jedna je od restrikcija prilikom implementacije algoritma prostorno-vektorske modulacije. Ukoliko se postavi veća vrijednost amplitude referentnog vektora prelazi se u nadmodulaciju. Maksimalnu amplitudu prostornog vektora napona moguće je odrediti iz pravokutnog trokuta (slika 4.4.) pri čemu je referentni kut vektora napona pod kutom 30° , odnosno u sredini sektora.



Slika 4.3 Pravilni šesterokut i maksimalna amplituda referentnog napona [8]



Slika 4.4. Određivanje maksimalne amplitude vektora napona [6]

Referentni vektor napona klizi po upisanoj kružnici te se nalazi pod kutom 30° .

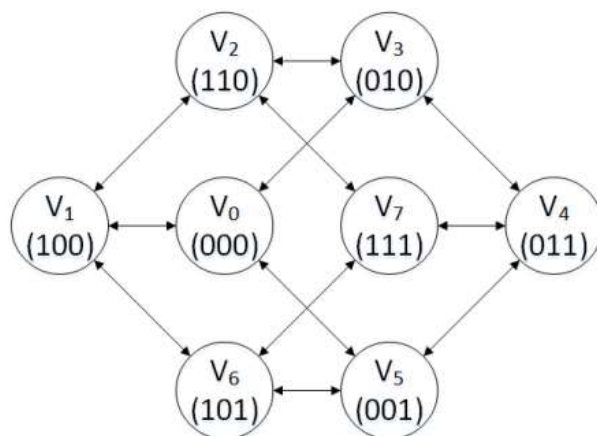
$$\vec{U}_{Rmax} = U_{Rmax} e^{j\frac{\pi}{6}} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{Rmax} + j \frac{1}{2} U_{Rmax} \quad (4-14)$$

Maksimalna amplituda prostornog vektora napona jednaka je:

$$U_{Rmax} = \frac{2}{3} U_{DC} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{DC} \quad (4-15)$$

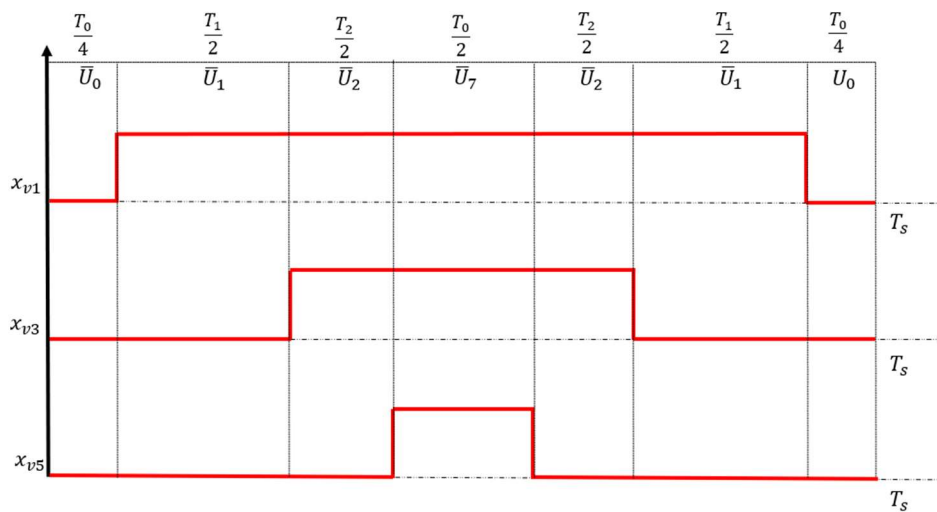
4.1. Redoslijed uključivanja prostornih vektora unutar sklopne periode

Kako bi se minimizirali sklopni gubici i postigao što povoljniji harmonijski spektar proizvedenih valnih oblika potrebno je definirati odgovarajući redoslijed uključivanja prostornih vektora unutar sklopne periode. Naime, ventili trofaznog izmjenjivača realne su komponente koje ne mogu trenutno uklopiti te imaju određeno mrtvo vrijeme [1]. Zbog toga je jedan od zahtjeva u definiranju redoslijeda uključivanja da prijelaz iz jednog u drugo stanje unutar sklopne periode bude ostvaren sklapanjem samo jedne grane izmjenjivača u trenutku prijelaza. Također, tranzicija iz jednog sklopnog stanja u drugo uključuje samo dva ventila u istoj grani izmjenjivača, jedan ventil isklapa dok drugi uklapa. Uzimajući u obzir sve navedeno, u praksi se pokazalo da od svih mogućih načina najmanja ukupna harmonijska distorzija struje trošila, uz prihvatljive gubitke poluvodičkih ventila, postiže se simetričnim obrascem sklapanja ventila. Dozvoljeni prijelazi među sklopnim stanjima prema definiranim uvjetima prikazani su na slici 4.5.

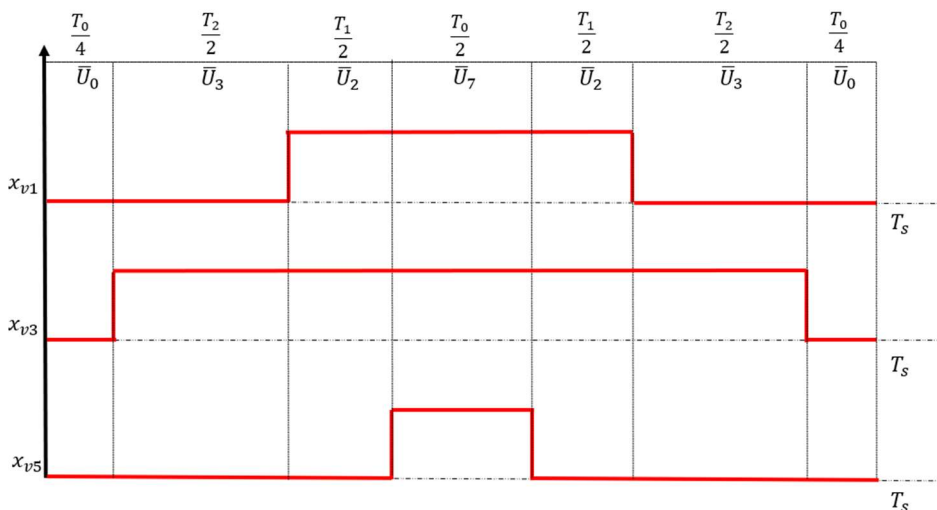


Slika 4.5 Dozvoljeni prijelazi među sklopnim stanjima [5]

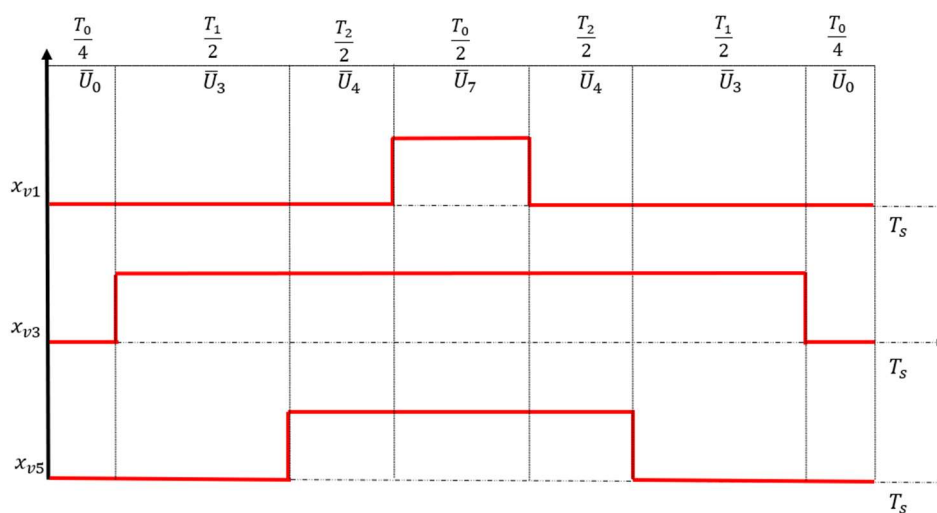
Simetrični obrazac sklapanja, kao što samo ime kaže, sastoji se od dva simetrična dijela koja počinju i završavaju s uključenim nulvektorom. Bitno je naglasiti da svaka sklopna perioda T_s počinje i završava nulvektorom \vec{U}_0 , a središnja dva stanja predstavlja vektor \vec{U}_7 . Između nulvektora, uključena su dva prostorna vektora koji raspoređuju sektor u kojem se referentni vektor trenutno nalazi. Trajanje uključenosti pojedinih vektora unutar sklopne periode dobije se na temelju ranije izvedenog algoritma modulacije prostornog vektora. Simetrični obrazac sklapanja za svaki sektor prikazan je slikama 4.6 - 4.11.



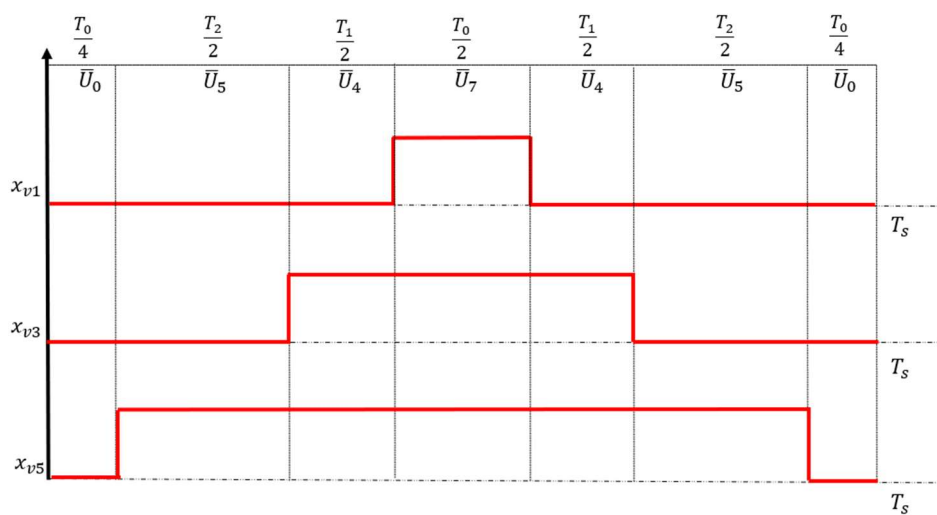
Slika 4.6 Simetrični obrazac sklapanja ventila za prvi sektor



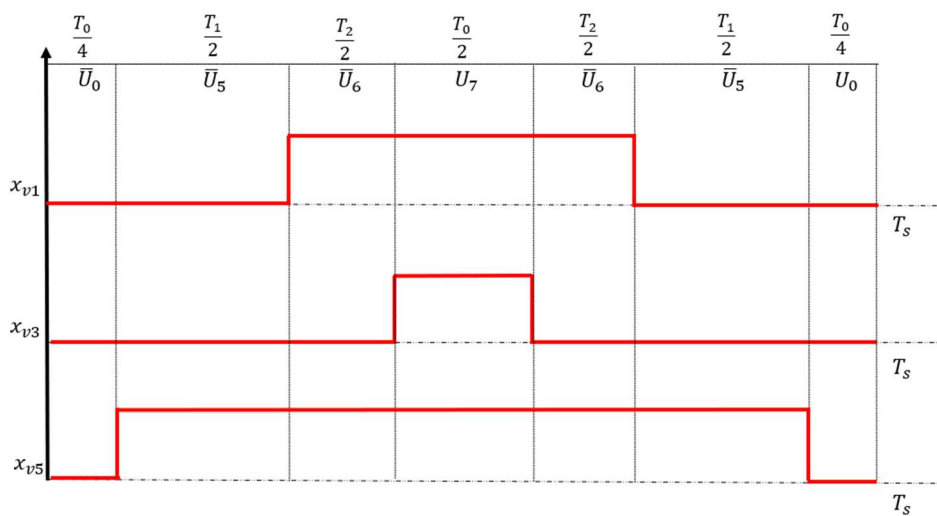
Slika 4.7 Simetrični obrazac sklapanja ventila za drugi sektor



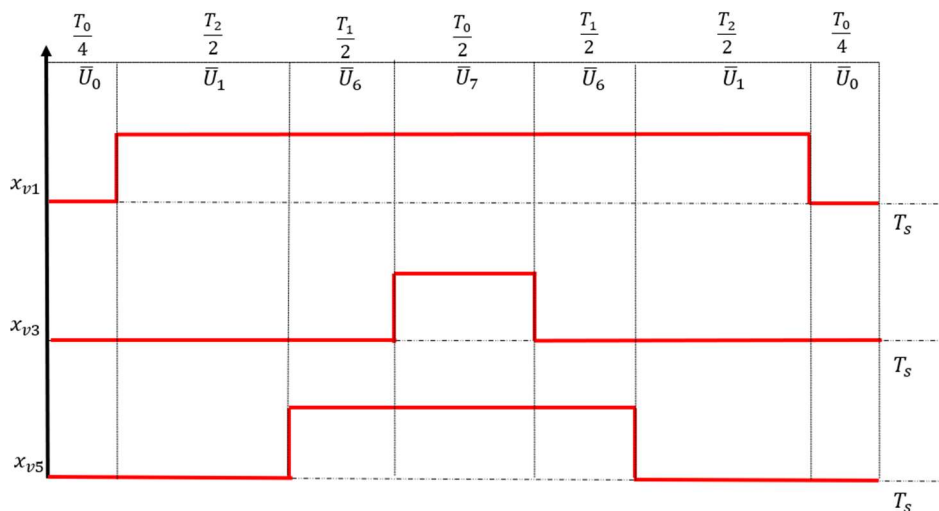
Slika 4.8 Simetrični obrazac sklapanja ventila za treći sektor



Slika 4.9 Simetrični obrazac sklapanja ventila za četvrti sektor



Slika 4.10 Simetrični obrazac sklapanja ventila za peti sektor



Slika 4.11 Simetrični obrazac sklapanja ventila za šesti sektor

Na gornjim slikama, x_{v1} , x_{v3} i x_{v5} predstavljaju impulse gornje grane izmjenjivača kojima se upravlja algoritmom prostorno-vektorske modulacije. Ventili u donjoj grani izmjenjivača su komplementarni ventilima u gornjoj grani. Iz slika su vidljivi simetrični impulsi koje dobiva svaki ventil gornje grane izmjenjivača što predstavlja simetrični obrazac sklapanja. Također, naznačena su vremena uključenosti svakog ventila pri čemu se lako odredi trajanje uključenosti odgovarajućih prostornih vektora. Uzme li se za primjer samo prvi sektor odnosno slika 4.6 vidljivo je da sklopna perioda počinje i završava nulvektorom \vec{U}_0 , u sredini periode uključen je nulvektor \vec{U}_7 , a između dvaju nulvektora nalaze se vektori \vec{U}_1 i \vec{U}_2 .

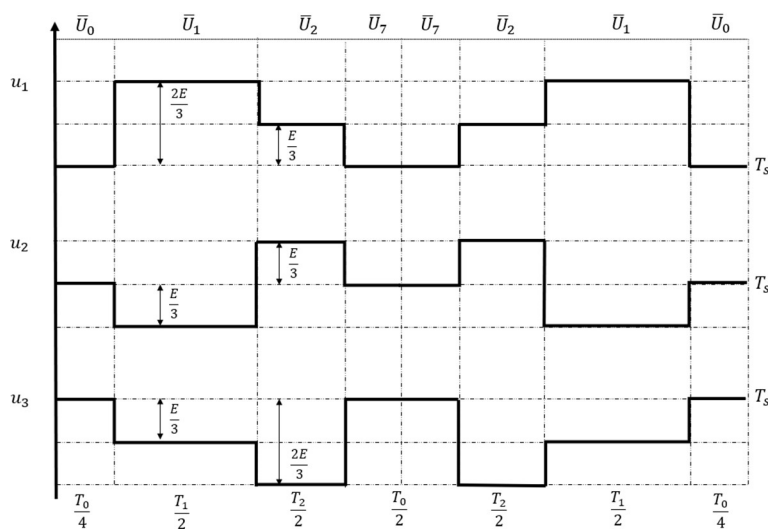
Tablica 4.1 Trajanje upravljačkih impulsa po sektorima

| Sektor \ Ventil | V1 | V3 | V5 |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | $T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ | $T_2 + \frac{T_0}{2}$ | $\frac{T_0}{2}$ |
| 2 | $T_1 + \frac{T_0}{2}$ | $T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ | $\frac{T_0}{2}$ |
| 3 | $\frac{T_0}{2}$ | $T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ | $T_2 + \frac{T_0}{2}$ |
| 4 | $\frac{T_0}{2}$ | $T_1 + \frac{T_0}{2}$ | $T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ |
| 5 | $T_2 + \frac{T_0}{2}$ | $\frac{T_0}{2}$ | $T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ |
| 6 | $T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$ | $\frac{T_0}{2}$ | $T_1 + \frac{T_0}{2}$ |

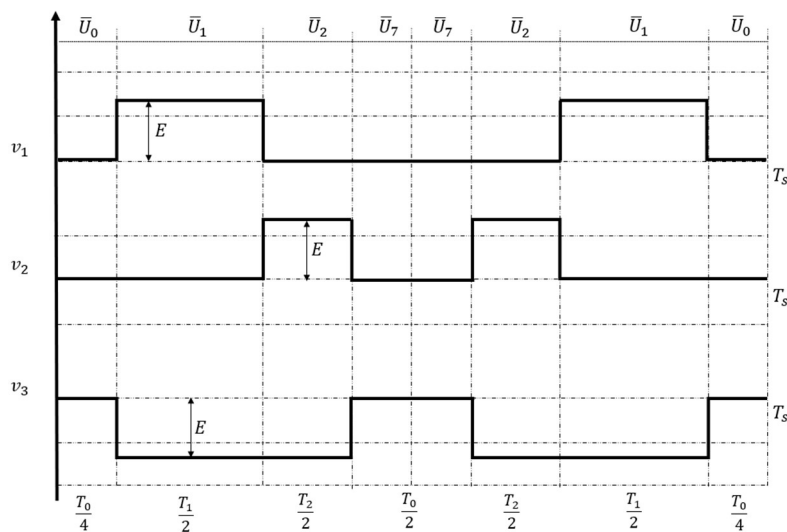
Trajanje upravljačkih impulsa po sektorima za ventile gornje grane izmjenjivača prema simetričnim obrascima sklapanja dano je tablicom 4.1.

4.2. Valni oblici faznog i linijskog napona unutar sklopne periode

Valni oblici faznih i linijskih napona trošila određeni su stanjima upravljačkih sklopki gornje grane izmjenjivača te se dobiju pomoću izraza (3-16) i (3-20). Nacrtaju li se dobiveni valni oblici dobiju se slike 4.11 i 4.12. Dobivene slike prikazuju valne oblike faznih i linijskih napona trošila unutar sklopne periode za prvi sektor.



Slika 4.11 Fazni naponi trošila u prvom sektoru



Slika 4.12 Linijski naponi trošila u prvom sektoru

Ovisno u kojem se sektoru referentni vektor napona trenutno nalazi, bit će i drugačiji valni oblici. Preostaje odrediti još srednje vrijednosti faznih i linijskih napona trošila prema gornjim slikama.

$$U_i(0) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} u_i dt$$

$$V_i(0) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_i dt$$

Rezultati su prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2 Srednje vrijednosti faznih i linijskih napona

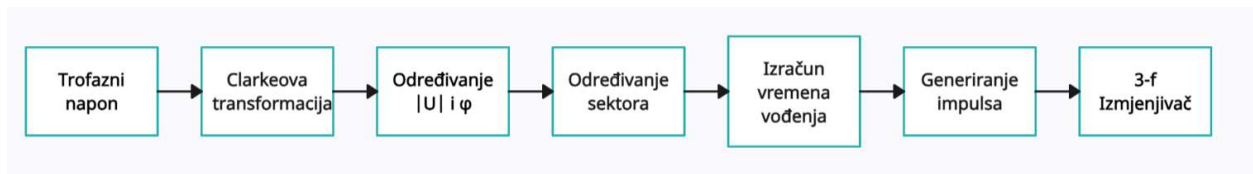
| | |
|----------|-------------------------------------|
| $U_1(0)$ | $\frac{U_{DC}}{3T_s} (2T_1 + T_2)$ |
| $U_2(0)$ | $\frac{U_{DC}}{3T_s} (-T_1 + T_2)$ |
| $U_3(0)$ | $\frac{U_{DC}}{3T_s} (-T_1 - 2T_2)$ |
| $V_1(0)$ | $\frac{T_1}{T_s} U_{DC}$ |
| $V_2(0)$ | $\frac{T_2}{T_s} U_{DC}$ |
| $V_3(0)$ | $-\frac{T_s - T_0}{T_s} U_{DC}$ |

Analognim postupkom određuju se efektivne vrijednosti faznih i linijskih napona za ostale sektore.

5. RAZVOJ ALGORITMA MODULACIJE PROSTORNOG VEKTORA U MATLAB/SIMULINKU

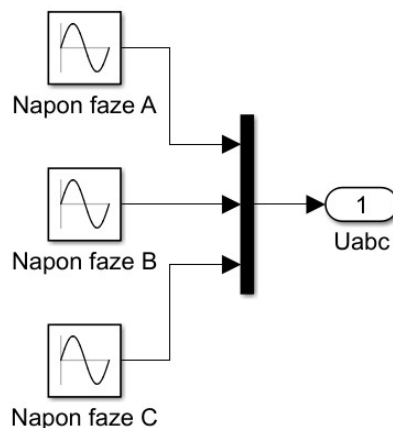
5.1. Simulacijski model

Algoritam modulacije prostornog vektora moguće je implementirati i testirati u MATLAB/Simulink programu. Na temelju samog algoritma izrađuje se Simulink model kojim se modelira trofazni izmjenjivač napona. Model se sastoji od sedam dijelova (*engl. Subsystem*) čija će uloga biti objašnjena u ovom poglavlju. Na slici 5.1 nalazi se blokovski dijagram algoritma koji je implementiran u Simulinku.



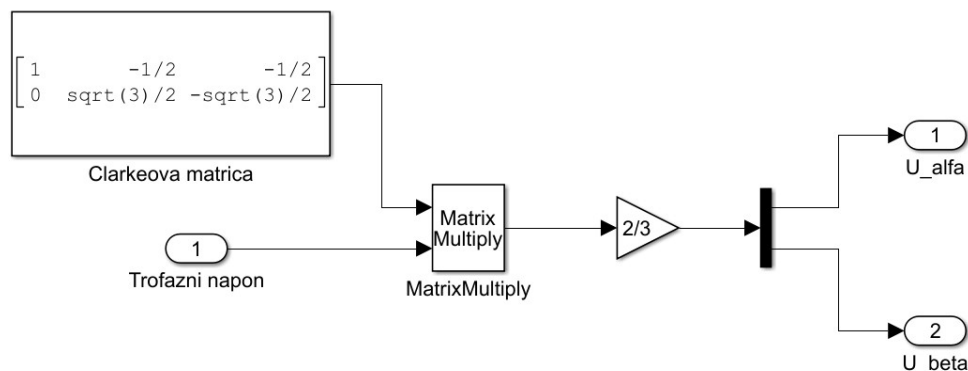
Slika 5.1 Blok dijagram algoritma modulacije prostornog vektora

Na početku algoritma generiraju se tri sinusna napona međusobno pomaknuta za 120° . Ti naponi čine simetrični trofazni sustav u *abc* troosnom mirujućem sustavu. Ovaj se sustav naziva referentnim jer je cilj algoritma ostvariti upravo te napone na izlazu izmjenjivača. Podsustav generiranja trofaznog napona prikazan je na slici 5.2.



Slika 5.2 Generiranje sinusnih napona

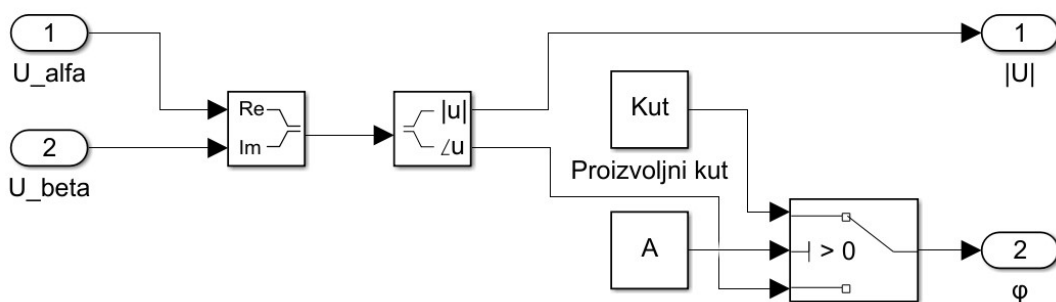
Nakon generiranja trofaznog napona potrebno je troosni sustav koji rotira brzinom $\omega = 2\pi f$ prikazati u dvoosnom mirujućem sustavu pomoću Clarkeove transformacije. Podsustav Clarkeove transformacije prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3 Clarkeova transformacija

Na slici 5.3 vidljivo je da se trofazni referentni napon u obliku matrice množi s Clarkeovom matricom te dalje množi s faktorom $2/3$. Ovdje je bitno paziti na redosljed množenja jer se radi o matričnom računu. Pomoću bloka 'Demux' moguće je rastaviti rezultat množenja na α i β komponentu. Ovime su određene α i β komponente napona u dvoosnom mirujućem sustavu.

Nadalje, potrebno je odrediti modul i kut referentnog prostornog vektora napona koji rotira u dvoosnom mirujućem sustavu. Podsustav određivanja modula i kuta prostornog vektora prikazan je na slici 5.4.

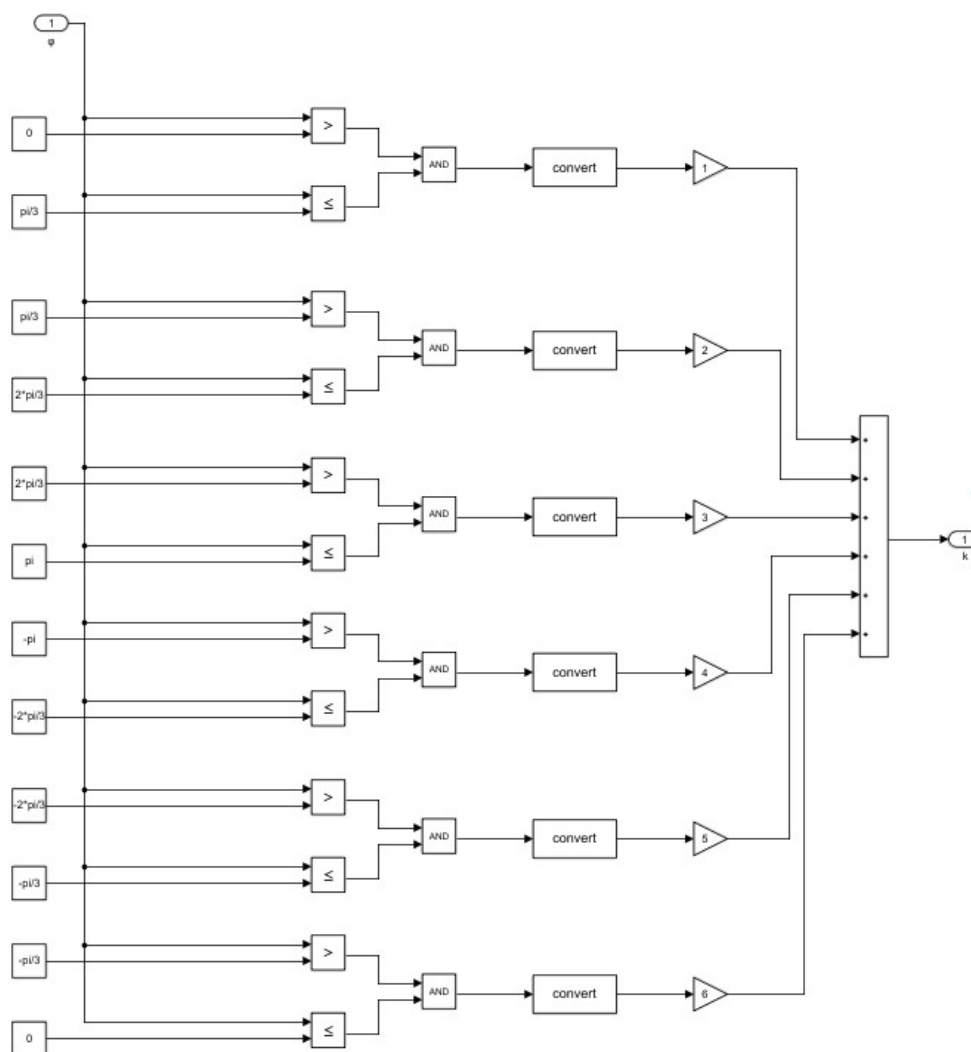


Slika 5.4 Određivanje modula i kuta prostornog vektora

Prostorni vektor određen je ranije izračunatim α i β komponentama. Polarni zapis prostornog vektora dobije se pomoću bloka 'Real-Imag to Complex' pri čemu su ulazi realne i imaginarne komponente. Za realnu komponentu postavljena je α komponenta napona, a za imaginarnu β komponenta napona. Zatim se iz polarnog oblika prostornog vektora određuju modul i kut pomoću

bloka 'Complex to Magnitude-Angle'. Rezultat podsustava su modul i kut vektora. Također, u samom podsustavu implementirana je mogućnost odabira fiksnog kuta prostornog vektora što je korišteno u eksperimentalnom dijelu rada.

Sljedeći korak je određivanje sektora k u kojem se referentni prostorni vektor trenutno nalazi. Od ranije je poznato da postoji ukupno šest sektora u $\alpha - \beta$ ravnini, slika 4.1. Svaki sektor raspriježe kut od 60° . Upravo na činjenici da postoji šest sektora i da svaki sektor zauzima kut od 60° , moguće je razviti sustav za prepoznavanje sektora. Podsustav za određivanje sektora prikazuje slika 5.5.

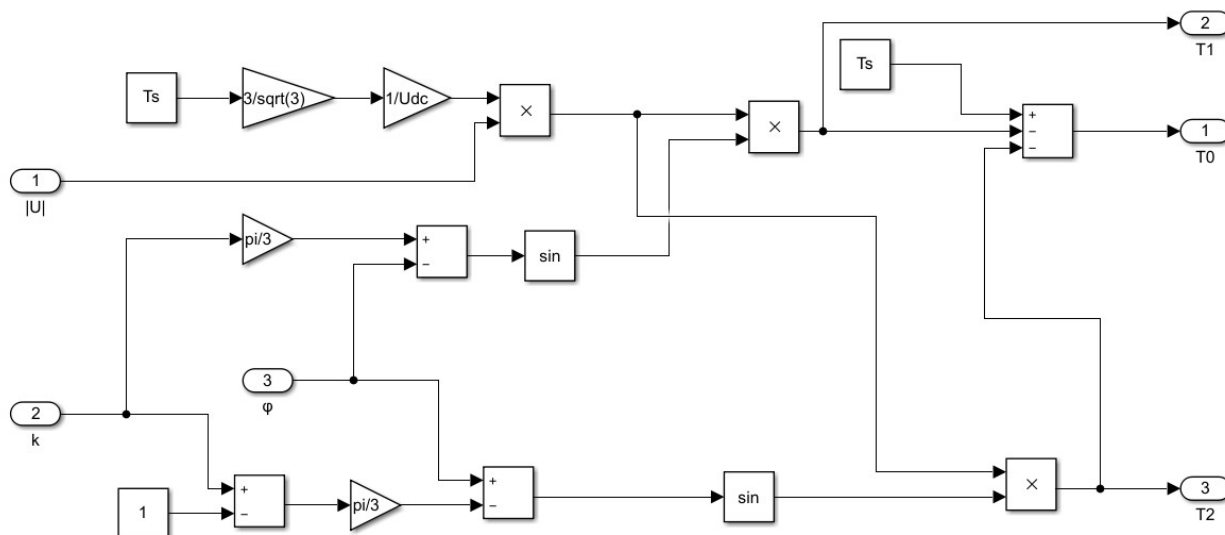


Slika 5.5 Određivanje sektora k

Ranije određeni kut referentnog prostornog vektora φ uspoređuje se s kutovima koji razapinju sektore unutar $\alpha - \beta$ ravnine. Naprimjer, ako se prostorni vektor nalazi u prvom sektoru, onda je kut φ veći od 0° i manji od 60° pri čemu će oba ova uvjeta biti zadovoljena. Ako su oba uvjeta zadovoljena, blok 'AND' daje logičku jedinicu na svojem izlazu. Logička se jedinica pomoću bloka

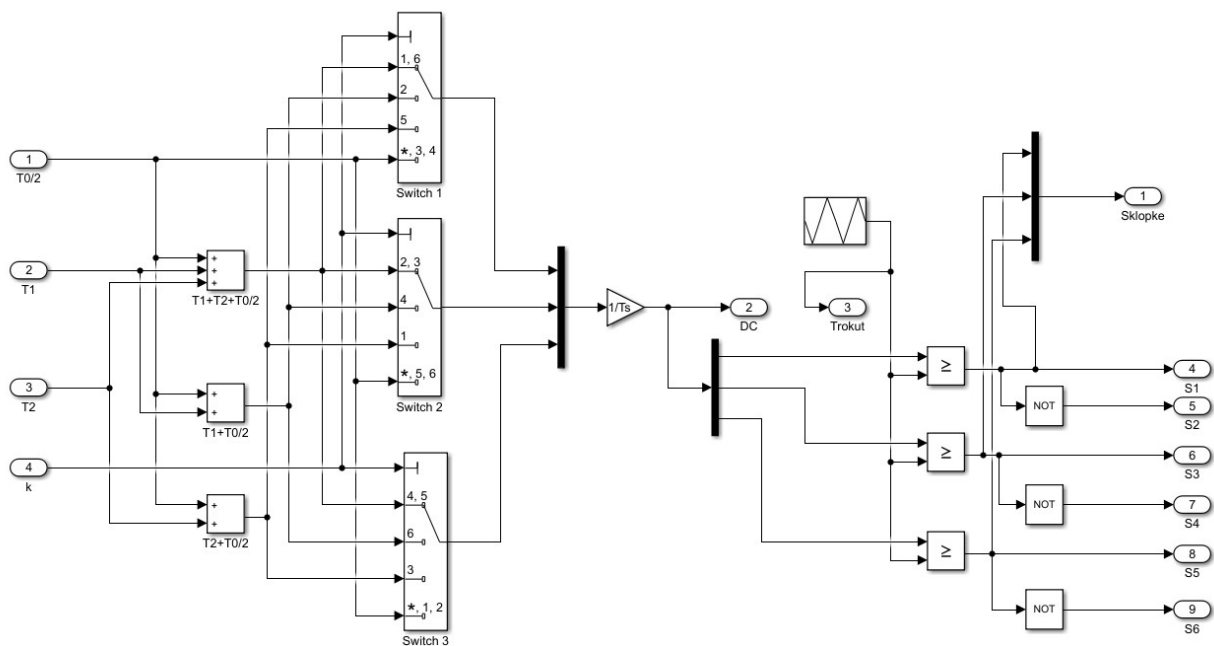
'convert' pretvara u integer tip podataka i množi s brojem sektora u kojem se vektor trenutno nalazi. Na kraju, izlaz iz ovog dijela modela je broj sektora k . Ista se provjera radi za ostalih pet sektora samo za njima odgovarajuće kutove.

Zatim je potrebno odrediti vremena vođenja T_1 , T_2 i T_0 prema izrazu (5-13). Podsustav za određivanje vremena vođenja prikazan je na slici 5.6.



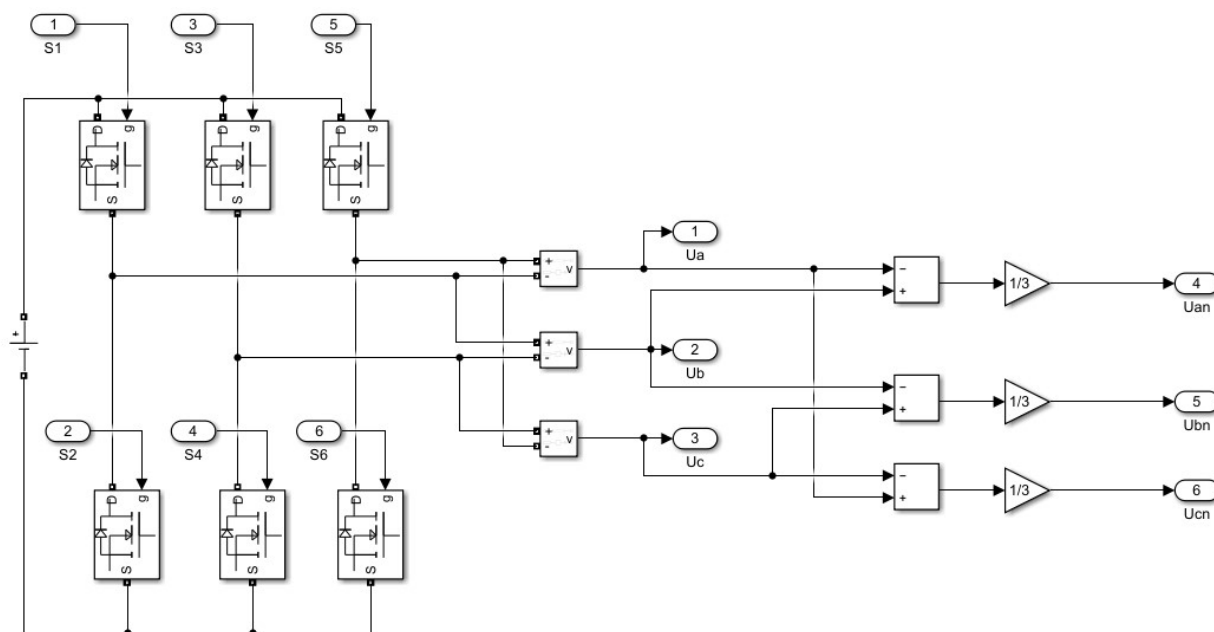
Slika 5.6 Izračun vremena vođenja

Predzadnji korak je generiranje upravljačkih impulsa za ventile izmjenjivača. Upravljačke impulse moguće je generirati uspoređivanjem vremena vođenja ventila gornje grane izmjenjivača s trokutastim signalom. U tablici 4.1 prikazani su izrazi za trajanje impulsa za ventile gornje grane po sektorima. Naprimjer, ako je vrijednost trajanja impulsa (*engl. Duty cycle*) za ventil $V1$ veća od trokutastog signala, onda dolazi do slanja upravljačkog impulsa na ventil $V1$. Ukoliko je vrijednost trokutastog signala veća, onda ventil $V1$ ne dobiva impuls. Analogan je postupak za ventile $V3$ i $V5$. Ventili donje grane izmjenjivača su komplementarni ventilima gornje grane. Upravo uspoređivanje s trokutastim signalom ima za posljedicu dobivanje simetričnog obrasca sklapanja ventila. Podsustav za generiranje upravljačkih impulsa prikazan je na slici 5.7.



Slika 5.7 Generiranje upravljačkih impulsa

Posljednji podsustav u simulacijskom modelu je trofazni izmjenjivač napona. Podsustav izmjenjivača prikazan je na slici 5.8. Izmjenjivač se sastoji od šest MOSFET-a i istosmjernog međukruga napona U_{DC} . Svaki MOSFET upravljan je upravljačkim impulsima definiranim u prethodnom koraku. Također, podsustav izmjenjivača sadrži i dio za mjerenje faznih i linijskih napona na izlazu.



Slika 5.8 Trofazni izmjenjivač napona

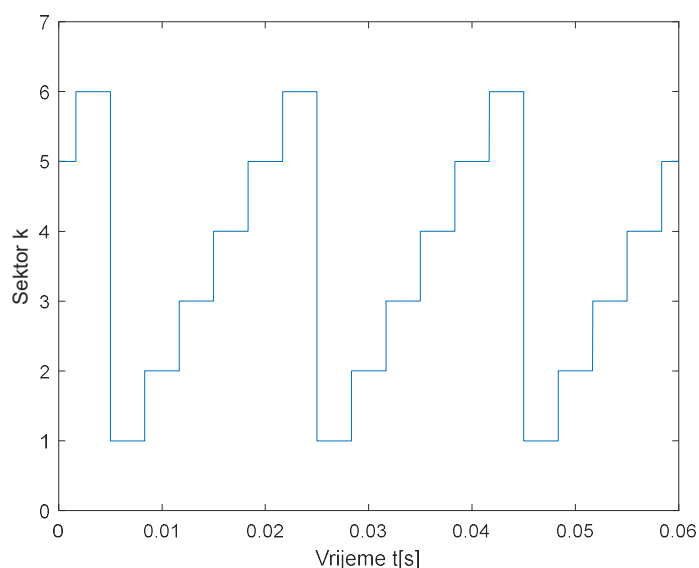
5.2. Rezultati simulacije u Simulinku

U nastavku su dani rezultati simulacije algoritma modulacije prostornog vektora u Simulinku. Simulacije su provedene za tri sklopne frekvencije: 1 kHz, 2,5 kHz i 10 kHz. U simulaciji je korišten napon istosmjernog međukruga $U_{DC} = 660$ V. Frekvencija mrežnog napona je 50 Hz, a efektivna vrijednost mrežnog napona 230 V. Parametri simulacije dani su u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Parametri simulacije u MATLAB-u

| f_{s1} | f_{s2} | f_{s3} | f | U_{DC} | \hat{U} |
|----------|----------|----------|-------|----------|-----------------|
| 1 kHz | 2,5 kHz | 10 kHz | 50 Hz | 660 V | $230\sqrt{2}$ V |
| T_{s1} | T_{s2} | T_{s3} | T | | U |
| 1 ms | 0,4 ms | 0,1 ms | 20 ms | | 230 V |

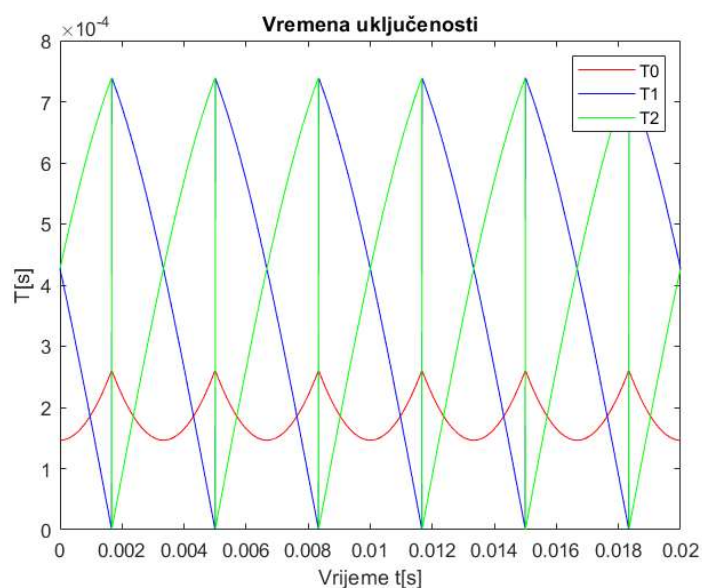
Slika 5.9 prikazuje sektor u kojem se referentni vektor napona trenutno nalazi. Na početku, prostorni vektor nalazi se u petom sektoru pod kutom $\varphi = -90^\circ$ što odgovara izrazu (3-35). Ovo je posljedica odabranih faznih pomaka napona mreže. Kako vrijeme odmiče, prostorni vektor opisuje kružnicu u smjeru obrnutom od smjera kazaljke na satu prema izrazu (3-36).



Slika 5.9 Sektor u kojem se prostorni vektor trenutno nalazi

Prostorni se vektor jednako vremena zadrži u svakom sektoru pri čemu zbroj pojedinih vremena odgovara periodu $T = 20 \text{ ms}$ mrežnog napona frekvencije $f = 50 \text{ Hz}$. Amplituda prostornog vektora cijelo je vrijeme stalnog iznosa.

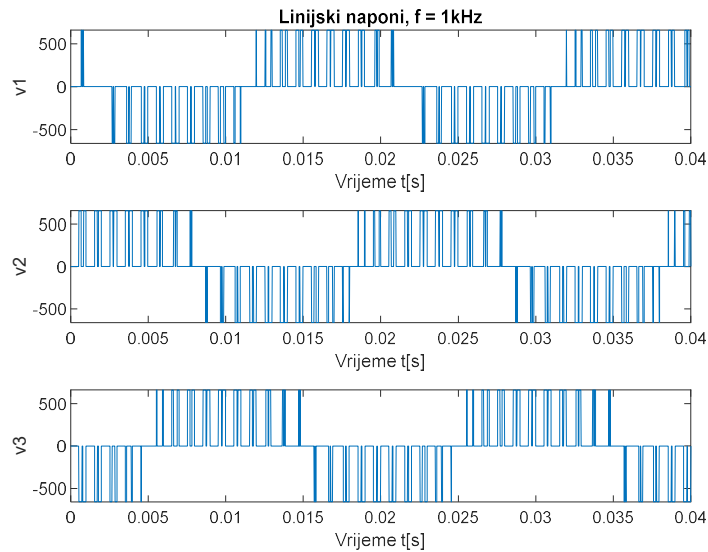
Kao što je ranije rečeno, referentni prostorni vektor opisuje kružnicu u $\alpha - \beta$ ravnini pa je potrebno odrediti vremena uključenosti prostornih vektora koji raspoređuju sektor u kojem se referentni vektor trenutno nalazi. Kako se položaj (kut) prostornog vektora mijenja tako se i mijenjaju vremena uključenosti vektora T_1 , T_2 i T_0 . Na slici 5.10 prikazana su vremena uključenosti vektora T_1 , T_2 i T_0 pri promjeni kuta odnosno vremena.



Slika 5.10 Vremena uključenosti vektora T_1 , T_2 i T_0

Zbroj vremena uključenosti jednak je sklopnoj periodi T_s . Vidljivo je da porastom vremena T_2 opada vrijeme T_1 . Onaj vektor, koji je bliži referentnom vektoru za taj sektor, imat će veće vrijeme uključenosti.

Na slici 5.11 prikazani su linijski naponi na izlazu izmjenjivača dobiveni modulacijom prostornog vektora napona pri sklopnoj frekvenciji 1 kHz. Prikazane su dvije periode mrežnog napona.



Slika 5.11 Linijski naponi pri sklopnoj frekvenciji 1 kHz

Valni oblik linijskog napona ima dvije naponske razine ($\pm U_{DC}, 0$) što se podudara s provedenom analizom rada izmjenjivača i slikom 3.5.

Iz gornje slike moguće je odrediti modulacijski indeks frekvencija m_f . Modulacijski indeks frekvencija definira se kao omjer prijenosne frekvencije f_s i modulacijske frekvencije f te se računa prema izrazu (5-1).

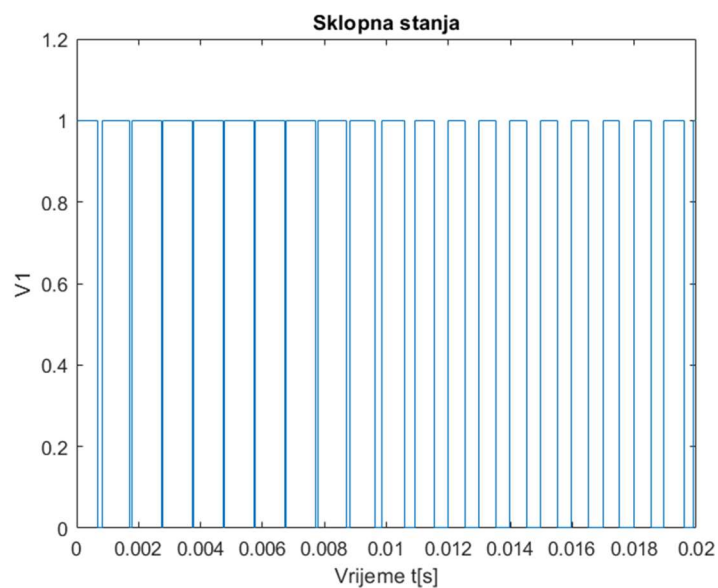
$$m_f = \frac{f_s}{f} \quad (5-1)$$

Za sklopnu frekvenciju $f_s = 1$ kHz, modulacijski indeks frekvencija iznosi:

$$m_{f,1} = \frac{f_s}{f} = \frac{1000}{50} = 20$$

Uzme li se u obzir perioda mrežnog napona $T = 20$ ms, moguće je izbrojati 20 sklopnih perioda. Svaka sklopna perioda predstavlja realizaciju jednog prostornog vektora napona. Ukupno je realizirano 20 prostornih vektora napona što odgovara modulacijskom indeksu frekvencija.

Na slici 5.12 prikazani su upravljački impulsi za ventil $V1$ unutar periode mrežnog napona. Ventil $V1$ uklopio je ukupno 20 puta pri čemu je realizirano 20 prostornih vektora referentnog napona.



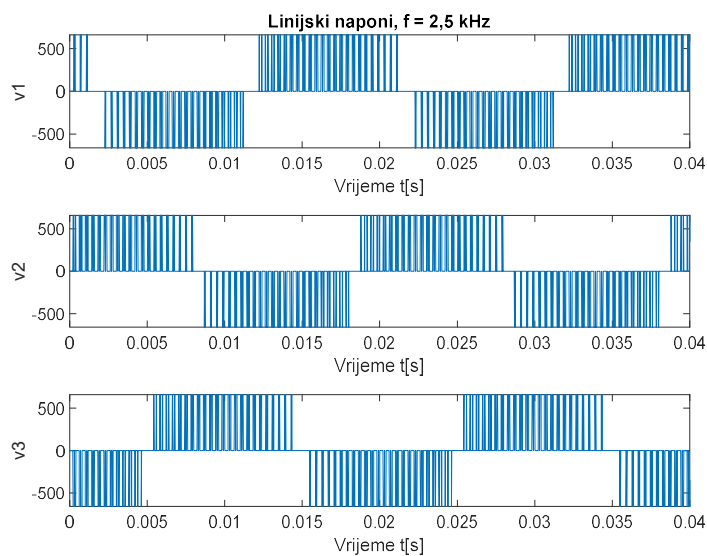
Slika 5.12 Upravljački impulsi za ventil V1

Analognim postupkom određuju se modulacijski indeksi za sklopne frekvencije 2,5 kHz i 10 kHz.

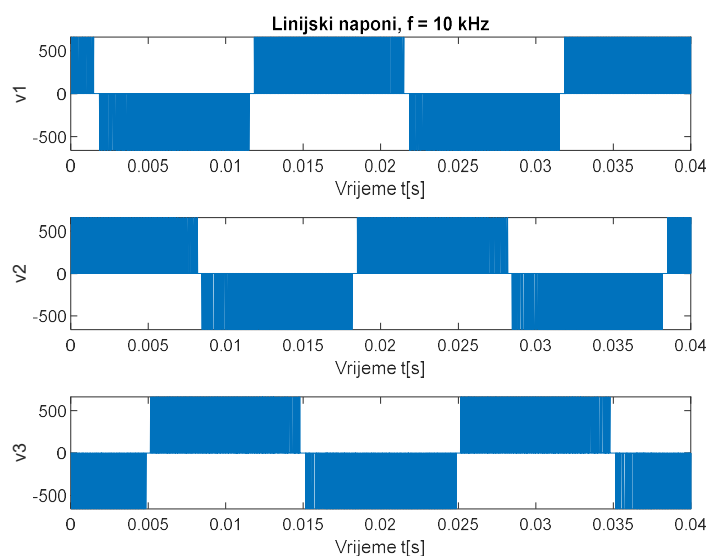
$$m_{f,2.5} = \frac{f_s}{f} = \frac{2500}{50} = 50 \quad m_{f,10} = \frac{f_s}{f} = \frac{10000}{50} = 200$$

Što je modulacijski indeks veći to je manje harmoničko izobličenje. Pri većim sklopnim frekvencijama realizirane volt-sekunde više odgovaraju sinusnim volt-sekundama.

U nastavku su prikazani linijski naponi za sklopne frekvencije 2,5 kHz i 10 kHz.

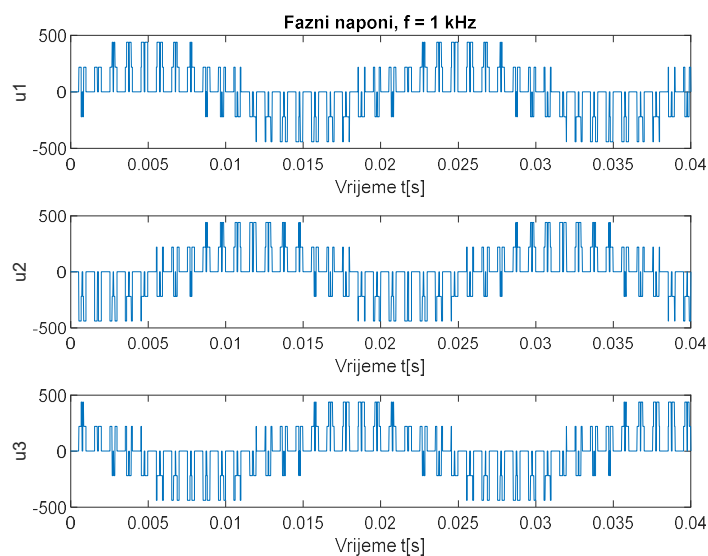


Slika 5.13 Linijski naponi pri sklopnoj frekvenciji 2,5 kHz



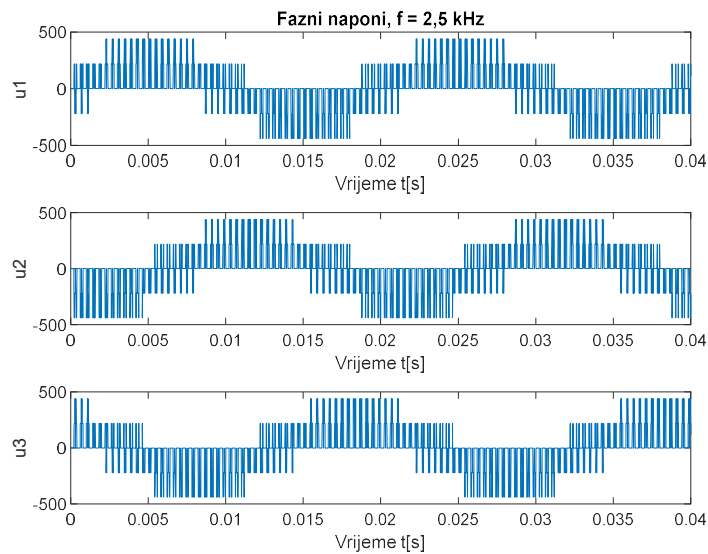
Slika 5.14 Linijski naponi pri sklopnoj frekvenciji 10 kHz

Nadalje, valni oblici faznog napona prikazani su na slici 5.15 pri sklopnoj frekvenciji 1 kHz. Također, valni oblici faznog napona podudaraju se s onima dobivenim analizom rada izmjenjivača prikazanim na slici 3.4. Valni oblik napona je dvorazinski ($\pm 2U_{DC}/3, \pm U_{DC}/3$).

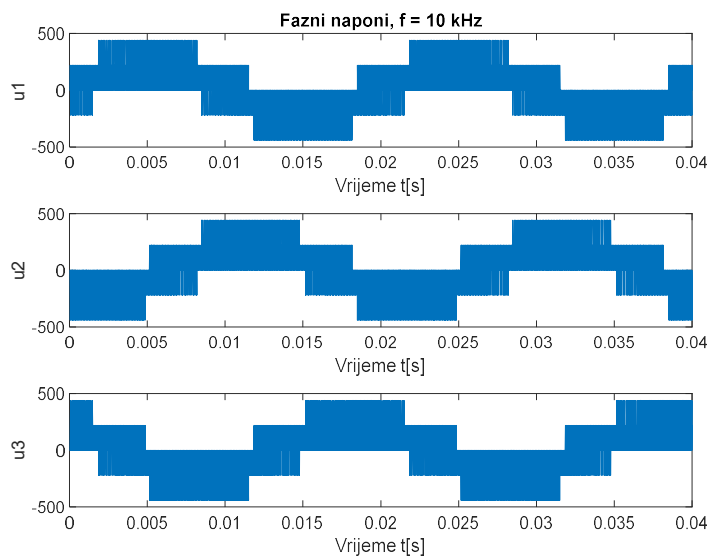


Slika 5.15 Fazni naponi pri sklopnoj frekvenciji 1 kHz

U nastavku su prikazani fazni naponi za sklopne frekvencije 2,5 kHz i 10 kHz.

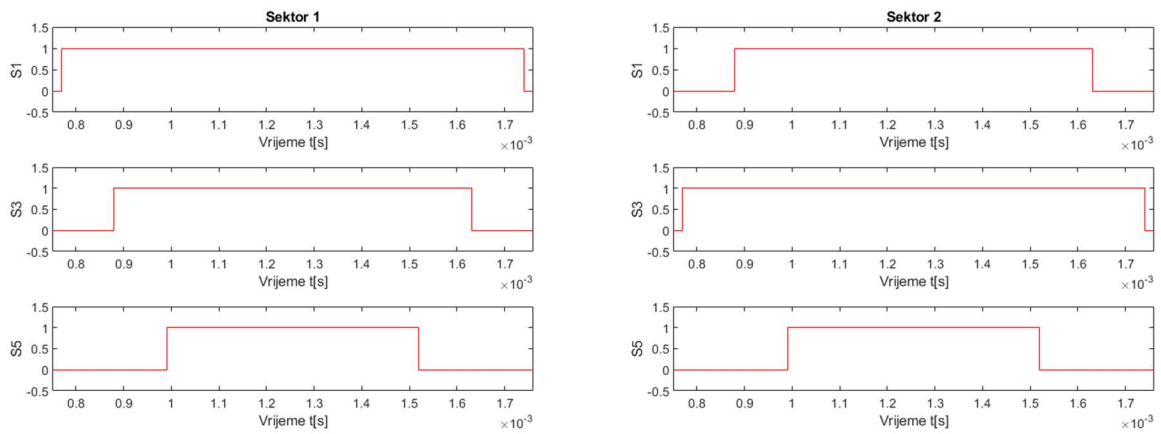


Slika 5.16 Fazni naponi pri sklopnoj frekvenciji 2,5 kHz

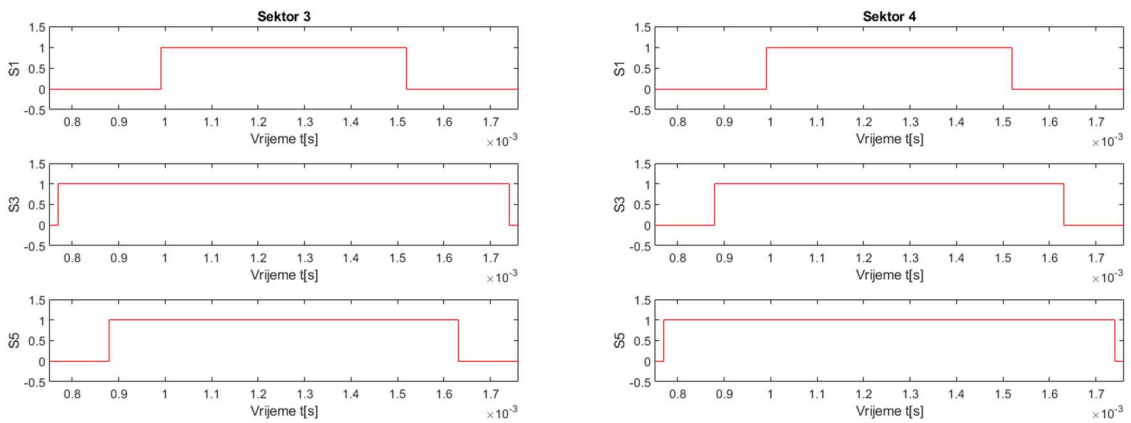


Slika 5.17 Fazni naponi pri sklopnoj frekvenciji 10 kHz

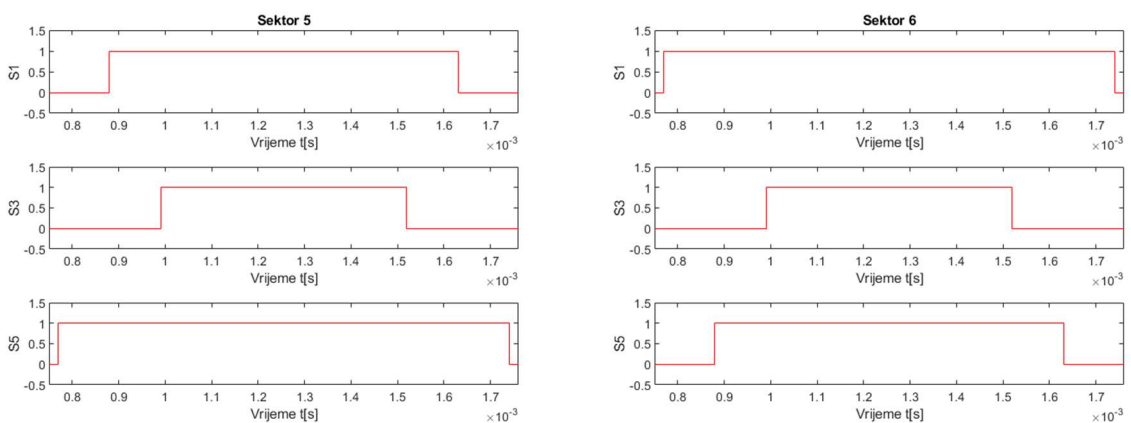
Preostaje prikazati još generirane upravljačke impulse za ventile gornje grane izmjenjivača. Upravljački impulsi donje grane su komplementarni impulsima gornje grane izmjenjivača. Na sljedećim slikama prikazani su generirani upravljački impulsi za ventile V_1 , V_3 i V_5 pri frekvenciji $f_s = 1$ kHz. Usporedi li se slika 5.18 sa slikama 4.6 i 4.7 prikazanim u provedenoj analizi rada izmjenjivača, vidljivo je da se slike podudaraju odnosno da je postignut simetričan obrazac sklapanja ventila s obzirom na polovicu sklopne periode. Svaka sklopna perioda počinje i završava nultim stanjem $U_0(000)$, a u sredini se nalazi nulto stanje $U_7(111)$.



Slika 5.18 Generirani upravljački signali za prvi i drugi sektor, $f_s = 1$ kHz

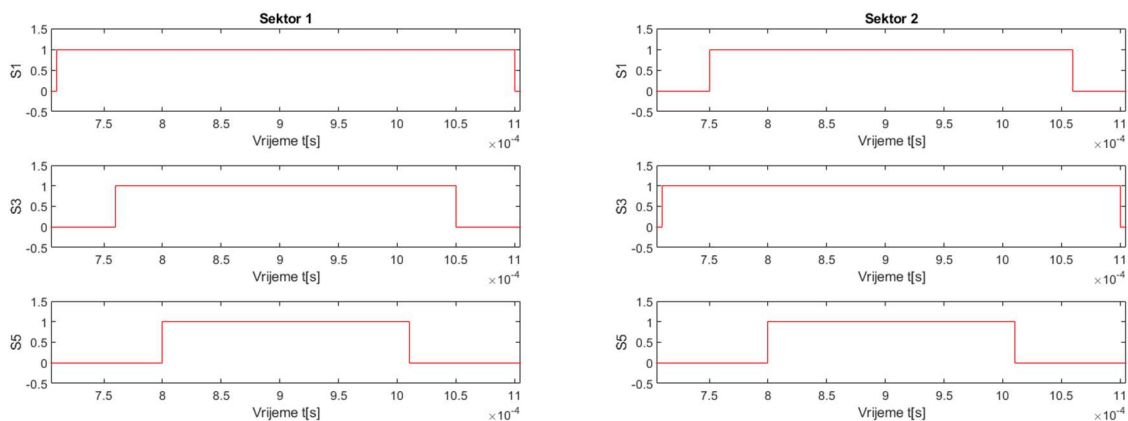


Slika 5.19 Generirani upravljački signali za treći i četvrti sektor, $f_s = 1$ kHz

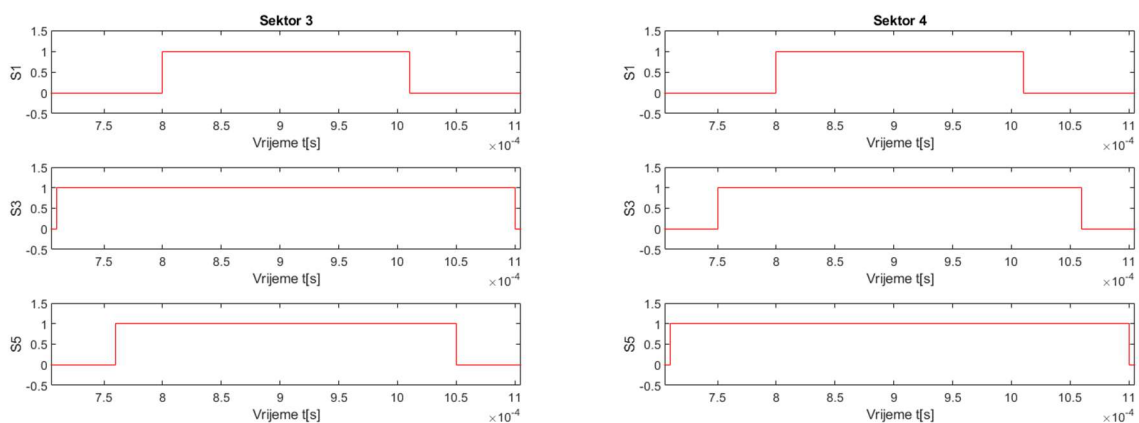


Slika 5.20 Generirani upravljački signali za peti i šesti sektor, $f_s = 1$ kHz

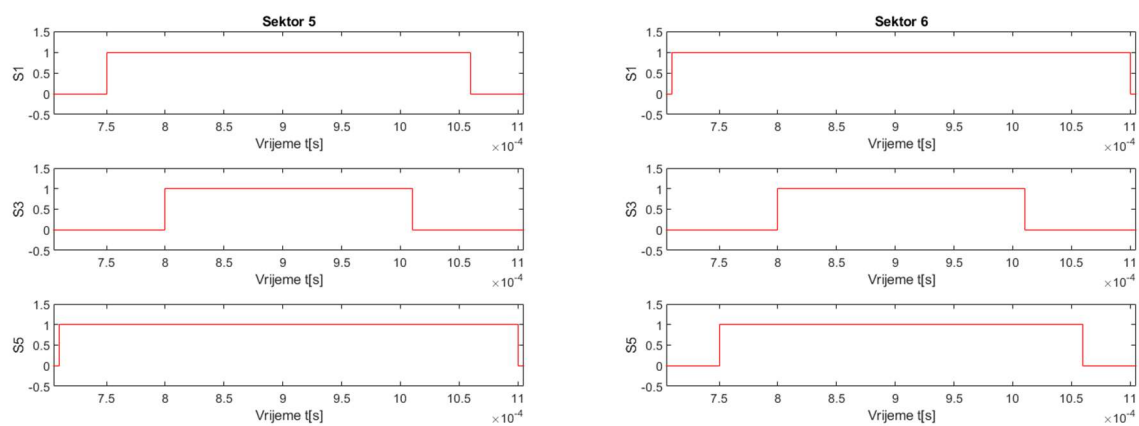
Simetrični obrazac sklapanja ventila za frekvencije 2,5 kHz i 10 kHz prikazan je u nastavku.



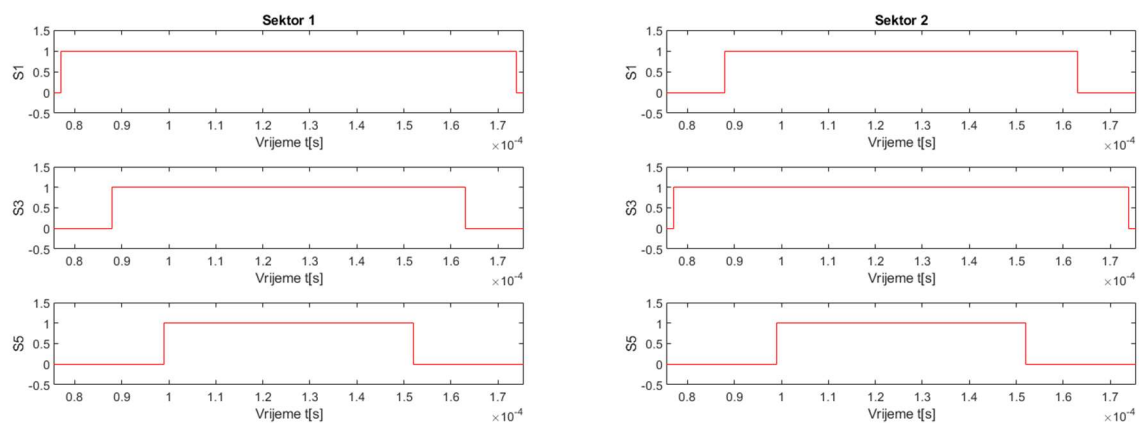
Slika 5.21 Generirani upravljački signali za prvi i drugi sektor, $f_s = 2,5 \text{ kHz}$



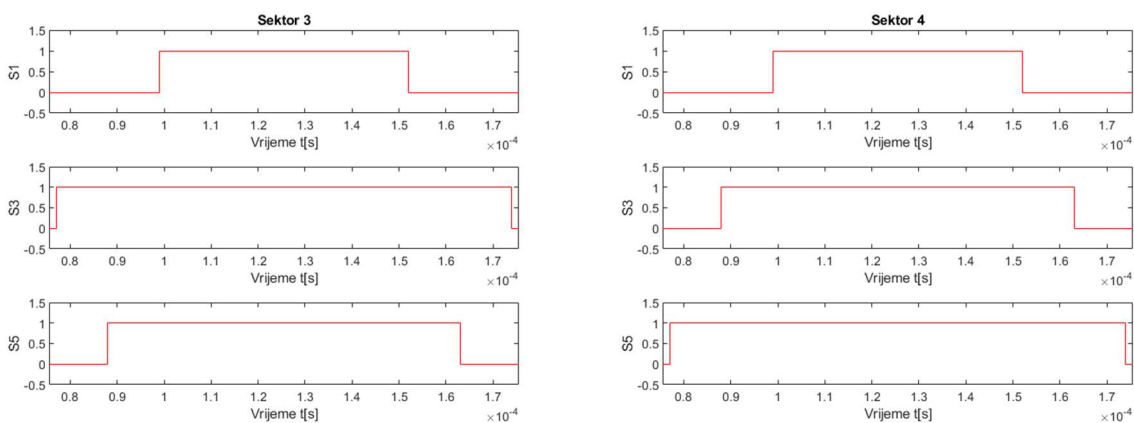
Slika 5.22 Generirani upravljački signali za treći i četvrti sektor, $f_s = 2,5 \text{ kHz}$



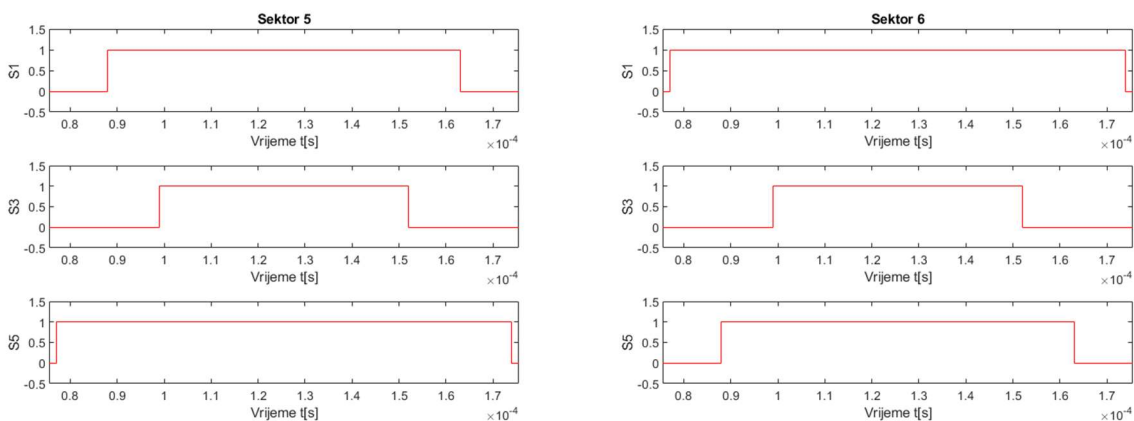
Slika 5.23 Generirani upravljački signali za peti i šesti sektor, $f_s = 2,5 \text{ kHz}$



Slika 5.24 Generirani upravljački signali za prvi i drugi sektor, $f_s = 10$ kHz



Slika 5.25 Generirani upravljački signali za treći i četvrti sektor, $f_s = 10$ kHz



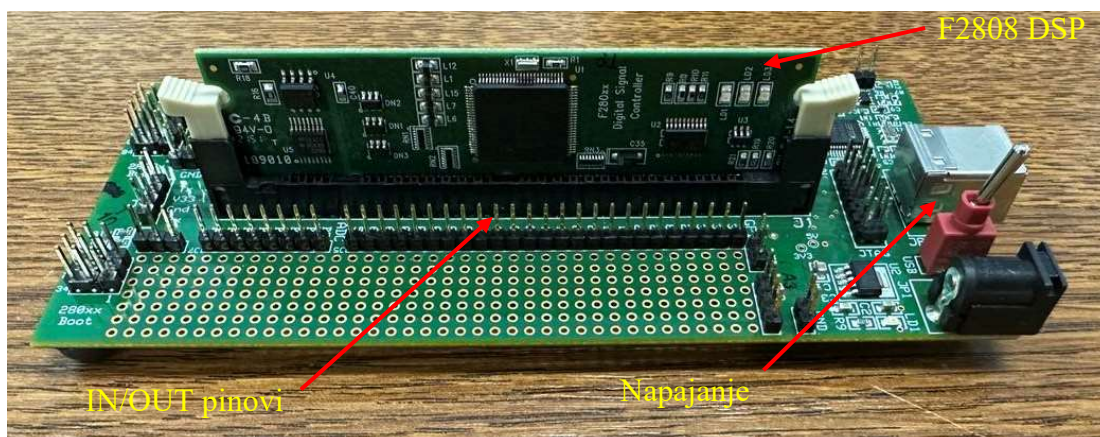
Slika 5.26 Generirani upravljački signali za peti i šesti sektor, $f_s = 10$ kHz

6. EKSPERIMENTALNI DIO – UPRAVLJANJE TROFAZNIM IZMJENJIVAČEM POMOĆU MIKROKONTROLERA I TYPHOON HILA

Razvijeni algoritam modulacije prostornog vektora u MATLAB/Simulinku moguće je testirati na Typhoon HIL 402 hardveru i njemu pripadajućem softveru. Simulink model implementiranog algoritma prenese se na mikrokontroler TMS320F2808 tvrtke Texas Instruments koji generira upravljačke impulse putem IN/OUT pinova za Typhoon HIL hardver. Unutar Typhoon HIL softvera napravljen je model trofaznog izmjenjivača napona s trofaznim simetričnim induktivnim trošilom te pripadajućim sustavom za mjerenje faznih i linijskih napona i struja. Generirani upravljački impulsi (šalju se s mikrokontrolera) služe za upravljanje sklopkama modeliranog izmjenjivača napona. Na kraju, Typhoon HIL softver omogućava mjerenje i prikaz odabranih signala (npr. faznih i linijskih napona i struja) putem virtualnog osciloskopa.

6.1. TMS320F2808 mikrokontroler

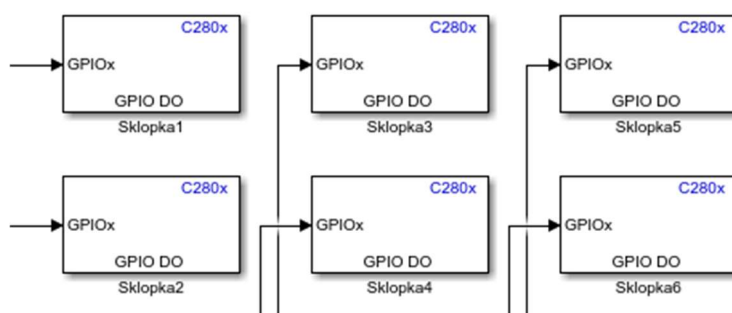
U praktičnom dijelu korišten je mikrokontroler TMS320F2808 tvrtke Texas Instruments za generiranje upravljačkih impulsa izmjenjivača. Mikrokontroler je prikazan na slici 6.1.



Slika 6.1 Mikrokontroler TMS320F2808 tvrtke Texas Instruments

Mikrokontroler se napaja putem računala preko USB veze. Istovremeno, komunikacija s računalom odvija se serijskim putem, također preko USB veze. IN/OUT pinovi omogućavaju primanje i slanje signala pri čemu je njihovu svrhu potrebno ranije definirati. Definirani su i korišteni samo OUT pinovi za slanje upravljačkih impulsa koji se šalju Typhoon HIL-u. OUT pinovi mikrokontrolera povezani su tankim vodičima s IN pinovima Typhoon HIL hardvera. Mikrokontroler sadrži DSP F2808 izmjenjivu karticu (jezgru). F2808 je 32-bitna DSP jezgra optimizirana za obradu signala [9]. Ova jezgra pruža visoku izvedbu za zahtjevne aplikacije digitalne obrade signala. Ima integriranu (*engl. Flash*) memoriju za pohranu programa i podataka te omogućava izvođenje aplikacija u stvarnom vremenu.

Da bi mikrokontroler generirao upravljačke impulse potrebno je prebaciti Simulink model algoritma modulacije prostornog vektora napona na sam mikrokontroler. Ovo je moguće učiniti unutar Simulink programa. Potrebno je postaviti hardversku konfiguraciju za korišteni mikrokontroler. U ovom slučaju odabire se TI F280x pločica te 'Embedded Coder Support Package for Texas Instruments C2000 Processors' paket unutar Simulink biblioteke. Unutar biblioteke prilagođene za Texas Instruments hardver odabiru se blokovi GPIO DO (*engl. Digital Output*) kako bi se definirali OUT pinovi. GPIO DO pinovi prikazani su na slici 6.2. Nakon postavljanja hardverske konfiguracije modela i OUT pinova može se pristupiti izvođenju algoritma na mikrokontroleru. Pokretanje algoritma na mikrokontroleru vrši se odabirom opcije 'Build, Deploy & Start'. Nakon što se model prenese i pokrene, mikrokontroler ciklički ponavlja preneseni kod sve dok se simulacija ne prekine. Za vrijeme trajanja simulacije generirani upravljački impulsi šalju se prema Typhoon HIL alatu.



Slika 6.2 GPIO DO blokovi za definiranje OUT pinova

Primjene TMS320F2808 mikrokontrolera su široke i obuhvaćaju kontrolu brzine motora, regulaciju napona, upravljanje izmjenjivačima, kontrolu energetske sustava i srodne aplikacije.

Posebno je koristan za aplikacije koje zahtijevaju preciznu i brzu obradu signala te visokokvalitetno upravljanje motorima i energetske sustavima.

6.2. Typhoon HIL

Typhoon HIL je tehnološka platforma koja se koristi za testiranje, razvoj i validaciju električnih i elektroničkih sustava. Omogućava simuliranje stvarnih uvjeta i okruženja kako bi se testirale različite komponente sustava ili čak cjelokupni sustavi prije nego što budu implementirani u stvarnom svijetu. Platforma Typhoon HIL koristi kombinaciju hardverske opreme i softverskog okruženja [10]. Hardverski dio služi kao fizička veza između softvera i osobe koja radi na uređaju. U ovom je slučaju hardverski dio Typhoon HIL-a povezan s TMS320F2808 mikrokontrolerom koji generira upravljačke impulse. Hardverski dio je prikazan na slici 6.3.



Slika 6.3 Hardverski dio Typhoon HIL-a

Hardver čine operacijska jedinica i izmjenjivi moduli (kartice). Operacijska se jedinica spaja na računalo i služi za obradu podataka u stvarnom vremenu. Izmjenjivi moduli koriste se za prikupljanje i slanje signala (*engl. Measurement Terminals*) putem IN/OUT pinova. Razlikuju se

analogni i digitalni IN/OUT pinovi. Za potrebe rada korišteni su digitalni IN pinovi za prikupljanje generiranih upravljačkih impulsa od strane mikrokontrolera. Softverski dio dijeli se na Schematic Editor i HIL SCADA (*engl. Supervisory Control and Data Acquisition*) sustav.

Schematic Editor u Typhoon HIL sustavu je alat koji omogućuje razvoj, uređivanje i simulaciju električnih mreža (shema) i modela energetskih sustava. Schematic Editor omogućava korisnicima da grafički konstruiraju električne sheme koje predstavljaju kompleksne električne sustave, kao što su energetski pretvarači, regulacijski krugovi ili drugi električni uređaji. Ovaj alat omogućava korisnicima da povlačenjem i spuštanjem komponenata poput generatora, transformatora, kondenzatora, otpornika, tranzistora i drugih elemenata stvaraju dijagram koji prikazuje željeni sustav.

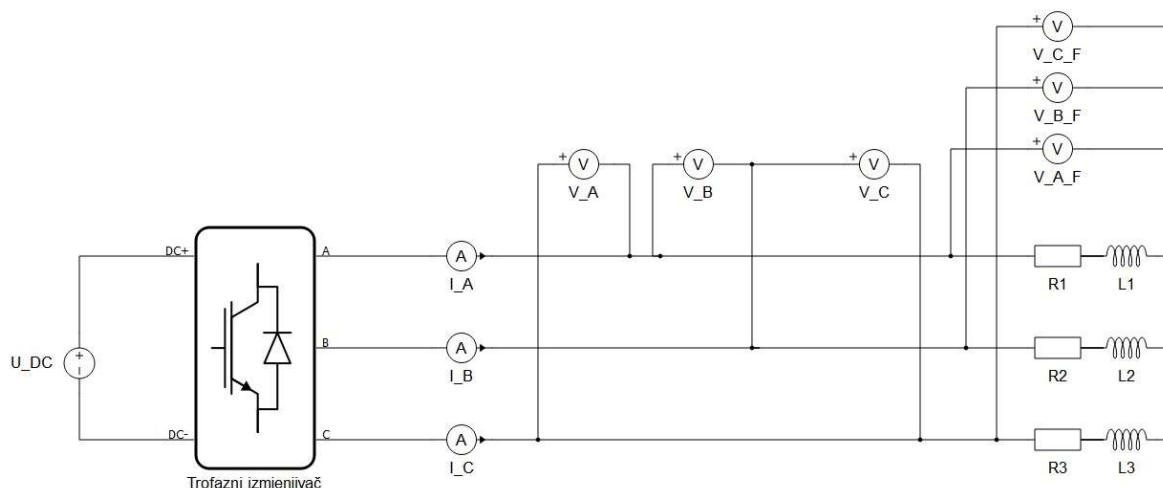
Nakon što je shema izgrađena, korisnici je mogu simulirati pomoću Typhoon HIL simulacijskog okruženja. To znači da će se model sustava koji su korisnici konstruirali stvarno simulirati i testirati na virtualnom hardveru kako bi se provjerila njegova izvedba i funkcionalnost. Ova vrsta simulacije korisna je za različite primjene, kao što su razvoj i testiranje upravljačkih algoritama, ispitivanje energetskih pretvarača, verifikacija regulacijskih sustava i slično. U ovom diplomskom radu simulira se algoritam modulacije prostornog vektora u Typhoon HIL simulacijskom okruženju.

HIL SCADA u Typhoon HIL sustavu je komponenta koja omogućava nadzor, upravljanje i prikupljanje podataka tijekom izvođenja HIL simulacija. Također, HIL SCADA omogućava korisnicima da prate simulirane procese i uređaje u stvarnom vremenu te prikupljaju relevantne podatke kao što su naponi, struje, brzine, temperature i drugi parametri. Unutar HIL SCADA nalazi se virtualni osciloskop (*engl. Scope*) na kojem su prikazani dobiveni generirani upravljački impulsi, fazni i linijski naponi te struje [10].

U opisanom Schematic Editoru konstruirana je shema trofaznog izmjenjivača napona pogodna za implementaciju algoritma modulacije prostornog vektora napona zajedno s mjernim instrumentima. Shema je prikazana na slici 6.4. Na ulazu trofaznog izmjenjivača napona nalazi se napon istosmjernog međukruga $U_{DC} = 660$ V. Trošilo je trofazno simetrično induktivnog karaktera u zvijezda spoju. Impedanciju svake faze trošila čini serijski spoj otpora R_i i induktiviteta L_i . Iznosi otpora R_1 , R_2 i R_3 u modelu postavljeni su na 10Ω , a vrijednosti induktiviteta L_1 , L_2 i L_3 iznose 1 mH. Parametri simulacije prikazani su sažeto u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Parametri simulacije u Typhoon HIL-u

| U_{DC} | R_1 | R_2 | R_3 | L_1 | L_2 | L_3 | T |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 660 V | 10 Ω | 10 Ω | 10 Ω | 1 mH | 1 mH | 1 mH | 20 ms |



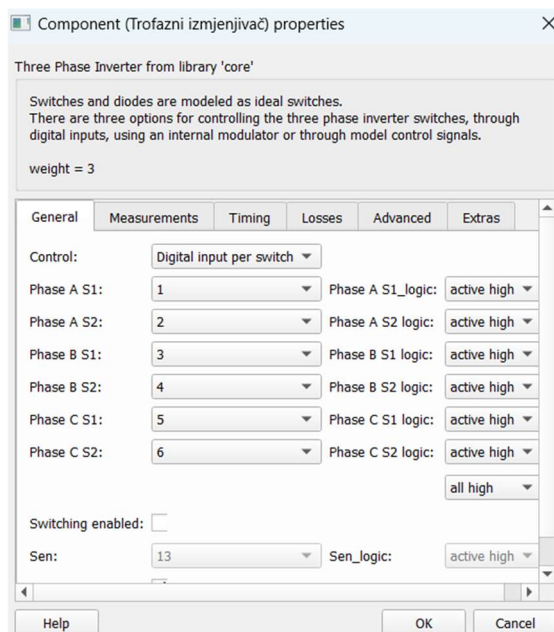
Slika 6.4 Trofazni izmjenjivač napona u Schematic Editoru

Mjerni sustav napona sastoji se od šest voltmetara koji mjere fazne i linijske napone. Voltmetri V_A , V_B i V_C mjere linijske napone na izlazu izmjenjivača. Voltmetri V_{Af} , V_{Bf} i V_{Cf} spojeni su paralelno fazama trošila i mjere fazne napone trošila. Mjerni sustav struja sastoji se od tri ampermetra spojenih u svaku fazu trošila. Ampermetri I_A , I_B i I_C mjere fazne i linijske struje trošila jer se radi o zvijezda spoju. Izmjerene vrijednosti napona i struja prate se putem virtualnog osciloskopa unutar HIL SCADA sustava. Upravljanje ventilima modeliranog izmjenjivača vrši se preko definiranih digitalnih IN pinova. U tablici 6.2 prikazani su OUT pinovi mikrokontrolera i IN pinovi izmjenjivača. Pinovi su podešeni od jedan do šest radi jednostavnosti implementacije.

Tablica 6.2 Raspored IN/OUT pinova

| OUT pin mikrokontrolera | IN pin izmjenjivača |
|-------------------------|---------------------|
| 1 | 1 |
| 2 | 2 |
| 3 | 3 |
| 4 | 4 |
| 5 | 5 |
| 6 | 6 |

Definiranje digitalnih IN pinova unutar Schematic Editora vrši se dvoklikom na ikonu trofaznog izmjenjivača i dodjeljivanjem pina svakoj sklopki. Prozor za definiranje digitalnih IN pinova izmjenjivača prikazan je na slici 6.5.



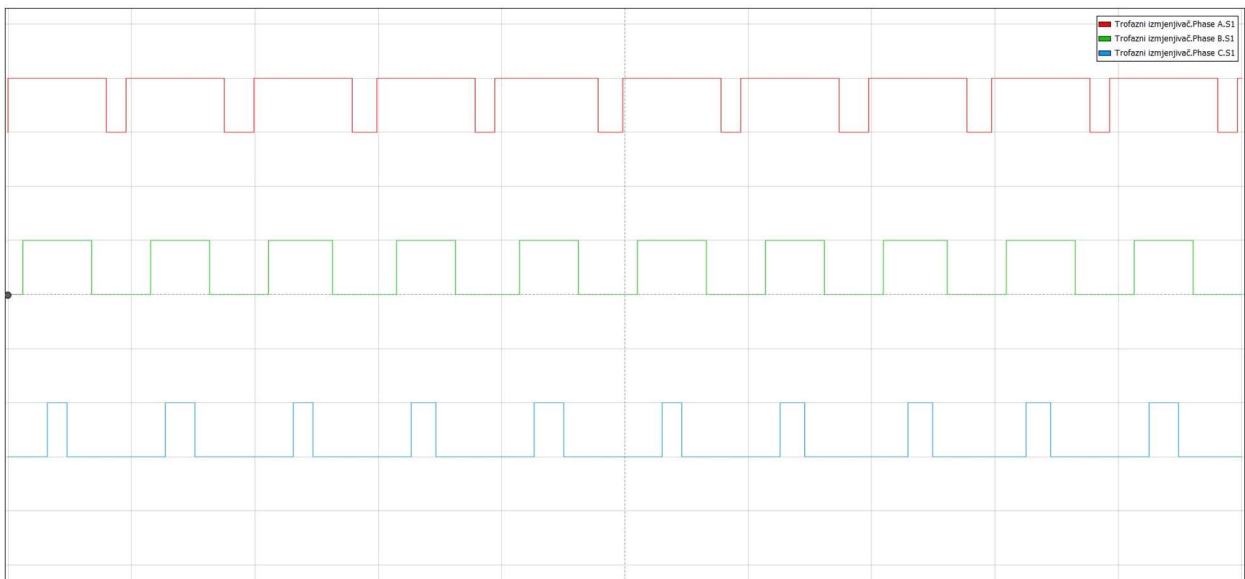
Slika 6.5 Definiranje digitalnih IN pinova

Ventilima gornje strane izmjenjivača $V1$, $V3$ i $V5$ dodijeljeni su redom pinovi 1, 3 i 5 dok su ventilima donje strane izmjenjivača $V2$, $V4$ i $V6$ dodijeljeni pinovi 2, 4 i 6. Definirani IN pinovi moraju odgovarati OUT pinovima mikrokontrolera. Na ovaj način su povezani mikrokontroler i model izmjenjivača u Typhoon HIL-u. Preostaje još pokrenuti simulaciju i vidjeti rezultate unutar HIL SCADA sustava. Simulacija se pokreće kompajliranjem modela pri čemu se automatski otvara HIL SCADA. Dobiveni valni oblici prikazani su na virtualnom osciloskopu Scope.

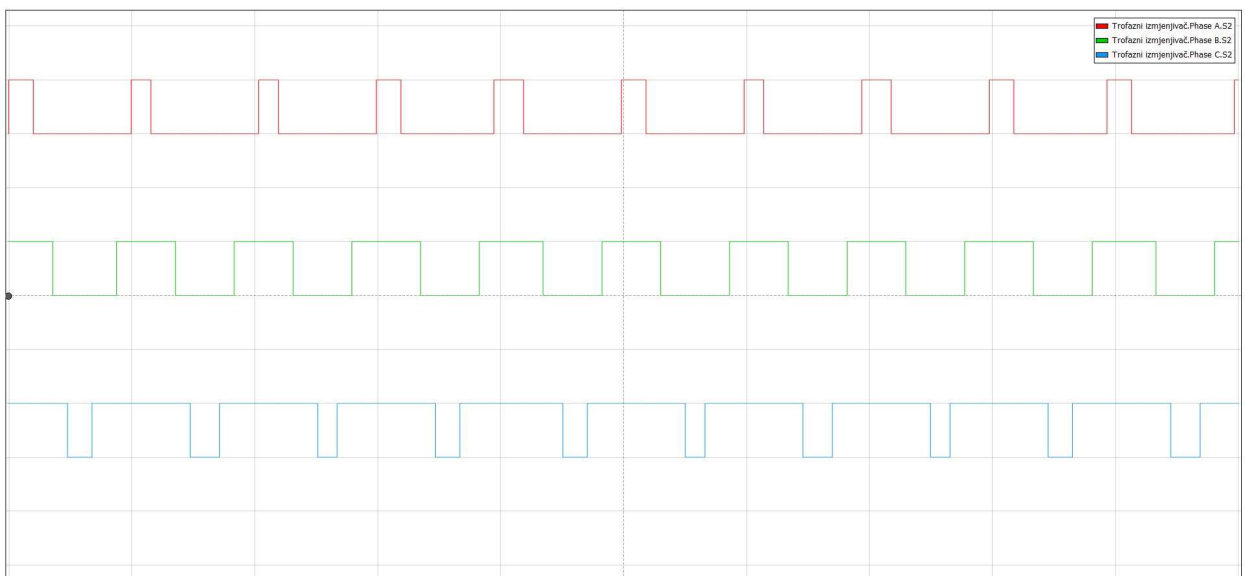
6.3. Rezultati simulacije u Typhoon HIL-u

Rezultati simulacije algoritma modulacije prostornog vektora prikazani su u HIL SCADA sustavu. Kao što je ranije navedeno, za potrebe prikaza valnih oblika koristi se virtualni osciloskop Scope. U simulaciji su korištene dvije sklopne frekvencije: 100 i 1000 Hz. Unutar hardverske konfiguracije u MATLAB/Simulinku podešeni su parametri simulacije koja radi pri navedenim frekvencijama. Tijekom provedbe praktičnog dijela ovog diplomskog rada nije pronađen optimalan skup parametara kojim je moguće realizirati frekvencije veće od 1 kHz. . Naime, pri

zadanim višim frekvencijama dolazilo je do ne slaganja frekvencije koju daje mikrokontroler na svom izlazu sa zadanom frekvencijom. Mikrokontroler je skalirao zadanu frekvenciju i isporučivao umanjenu frekvenciju na svom izlazu. Predlaže se rješenje problema potražiti u daljnjem optimiziranju parametara unutar hardverske konfiguracije modela te prilagođavanju brojača unutar samog mikrokontrolera. Na slikama 6.6 i 6.7 prikazan je simetrični obrazac sklapanja ventila pri frekvenciji 100 Hz za prvi sektor. Kut referentnog prostornog vektora napona je 30° .



Slika 6.6 Upravljački impulsi ventila $V1$, $V3$ i $V5$ pri frekvenciji $f_s = 100$ Hz



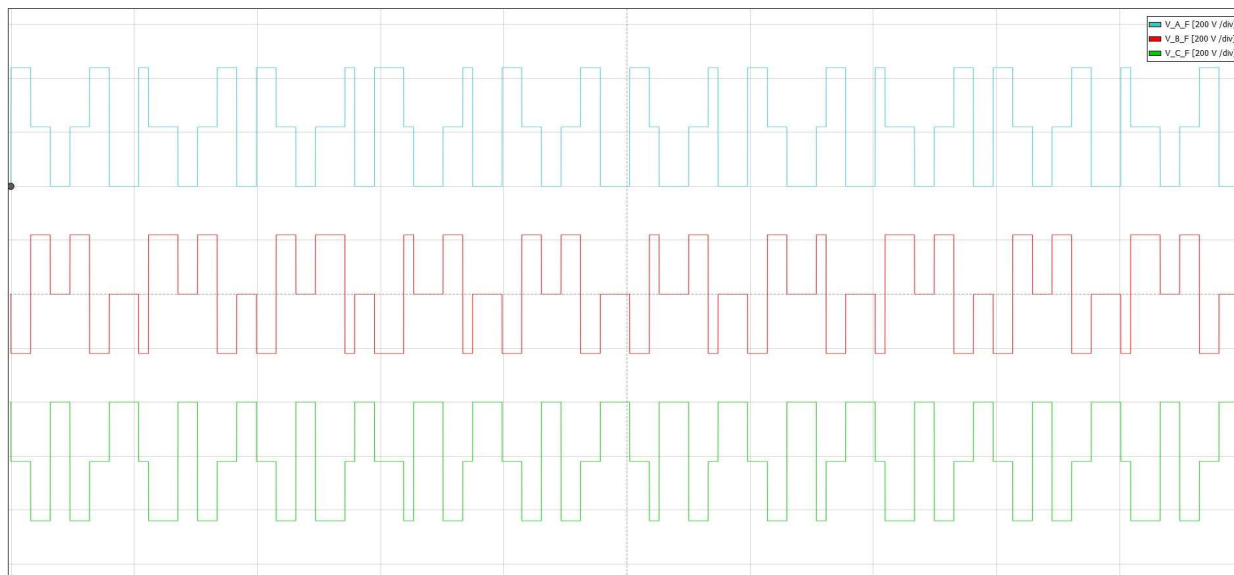
Slika 6.7 Upravljački impulsi ventila $V2$, $V4$ i $V6$ pri frekvenciji $f_s = 100$ Hz

Usporede li se upravljački impulsi dobiveni analizom rada na slici 4.6 sa generiranim impulsima na slici 6.6 vidljivo je da se oni podudaraju. Također, vidljivo je da su upravljački impulsi donje grane izmjenjivača prikazani na slici 6.7 komplementarni impulsima gornje grane izmjenjivača. Komplementarnost generiranih impulsa jamči da niti u jednom trenutku neće doći do kratkog spoja istosmjernog međukruga U_{DC} . Na ovaj je način osigurano da u svakom trenutku vrijede Kirchhoffovi zakoni napona i struje. Vremena uključenosti ventila T_1 , T_2 i T_0 za realiziranje gornjeg obrasca sklapanja računaju se prema izrazu (4-13) i iznose:

$$T_1 = 4,268 \text{ ms} \quad T_2 = 4,268 \text{ ms} \quad T_0 = 1,464 \text{ ms}$$

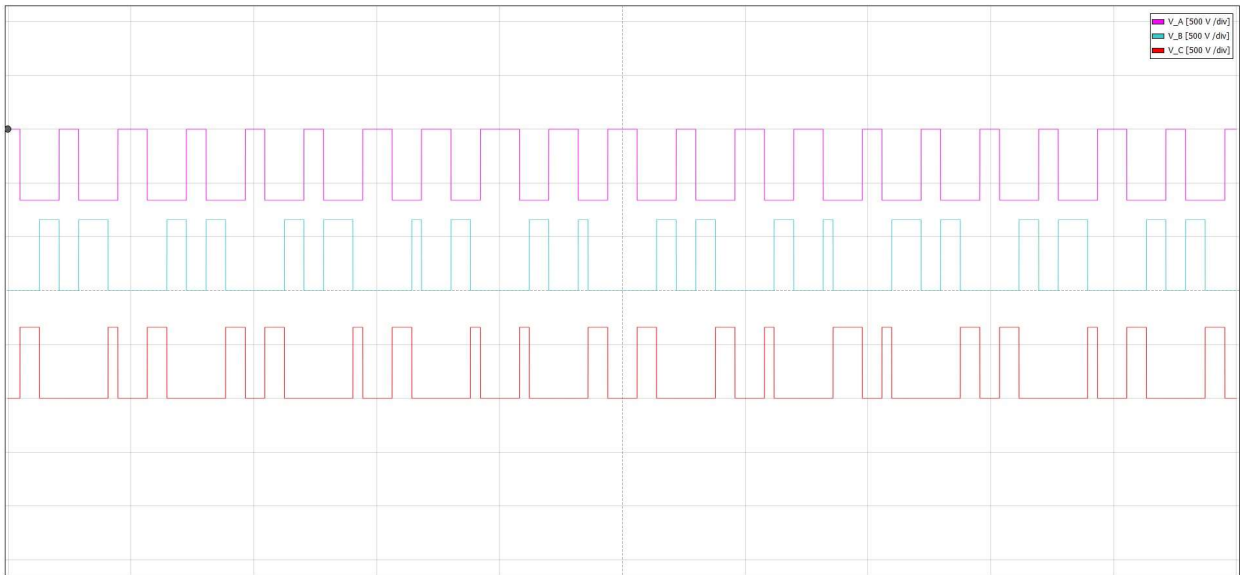
Zbroj vremena uključenosti jednak je sklopnoj periodi $T_s = 10 \text{ ms}$.

Na slikama 6.8 i 6.9 prikazani su valni oblici faznih i linijskih napona. Dobiveni valni oblici podudaraju se s valnim oblicima iz analize rada prema slikama 4.11 i 4.12. Valni oblik faznog napona je trirazinski ($\pm 2U_{DC}/3, \pm U_{DC}/3, 0$), a linijskog napona dvorazinski ($\pm U_{DC}, 0$). Na temelju dobivenih valnih oblika moguće je odrediti srednje vrijednosti faznih i linijskih napona koristeći se tablicom 4.2.



Slika 6.8 Valni oblik faznog napona u prvom sektoru pri sklopnoj frekvenciji 100 Hz

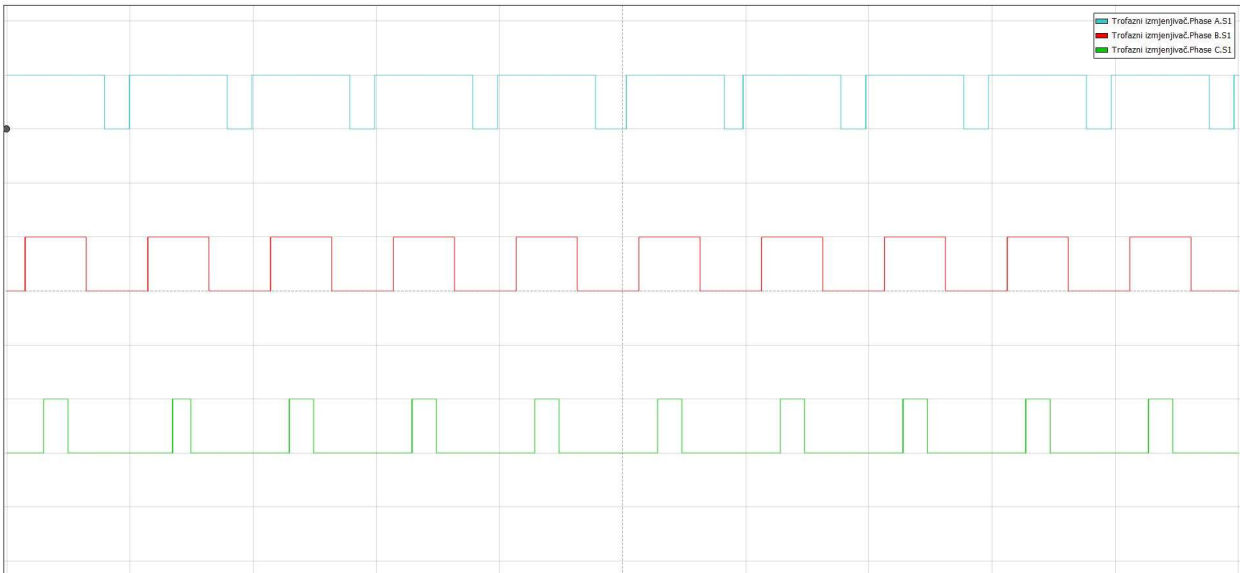
Vršna vrijednost faznog napona iznosi $2U_{DC}/3$, odnosno 440 V. Volt-sekunde generirane tijekom sklopne periode, odgovaraju volt-sekundama generiranim od strane realiziranog prostornog vektora napona unutar sklopne periode.



Slika 6.9 Valni oblik linijskog napona u prvom sektoru pri sklopnoj frekvenciji 100 Hz

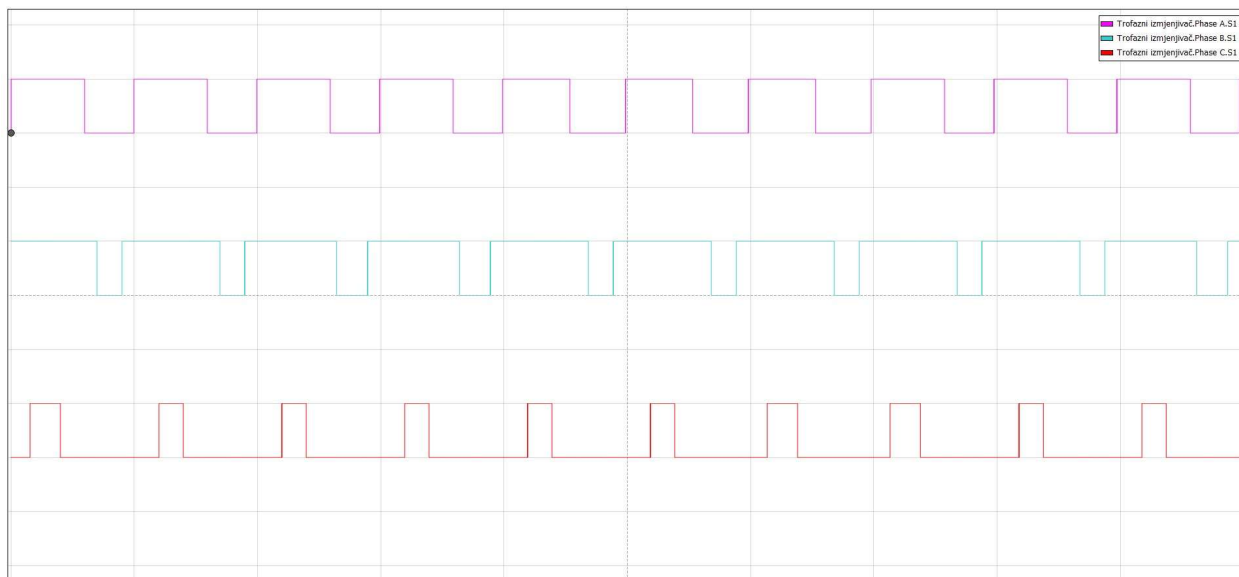
Vršna vrijednost linijskog napona (slika 6.9) iznosi U_{DC} , odnosno 660 V. Također, vidljivo je da zbroj trenutnih vrijednosti linijskih napona jednak nuli što je rezultat simetričnosti sustava.

U nastavku će na slikama od 6.10 do 6.15 biti prikazan obrazac sklapanja ventila za sve sektore pri frekvenciji 1 kHz. Uz generirane upravljačke impulse prikazana su vremena vođenja za realiziranje referentnog vektora pri određenom kutu.



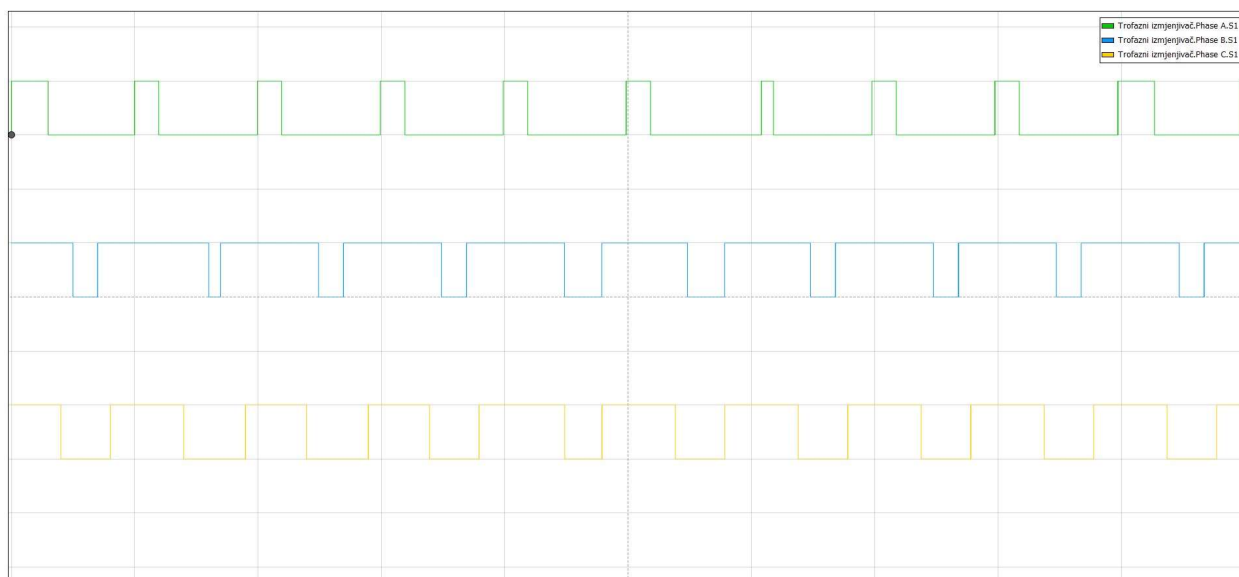
Slika 6.10 Upravljački impulsi ventila V_1 , V_3 i V_5 u prvom sektoru

$$T_1 = 0,4268 \text{ ms} \quad T_2 = 0,4268 \text{ ms} \quad T_0 = 0,1464 \text{ ms} \quad \varphi_{ref} = 30^\circ$$



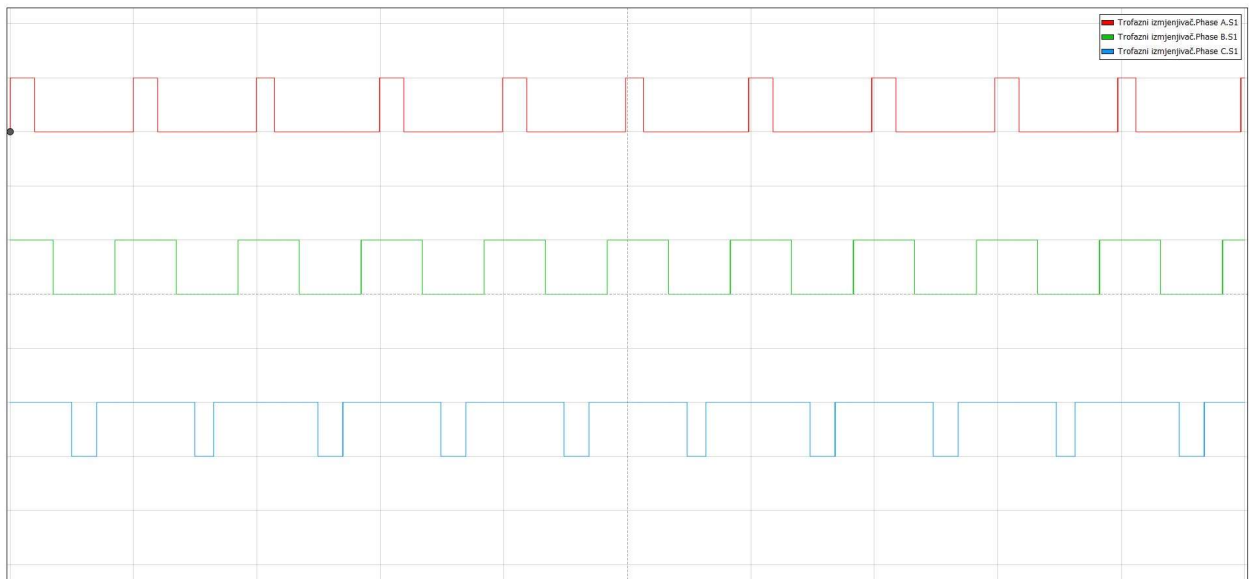
Slika 6.11 Upravljački impulsi ventila $V1$, $V3$ i $V5$ u drugom sektoru

$$T_1 = 0,5486 \text{ ms} \quad T_2 = 0,2919 \text{ ms} \quad T_0 = 0,1593 \text{ ms} \quad \varphi_{ref} = 80^\circ$$



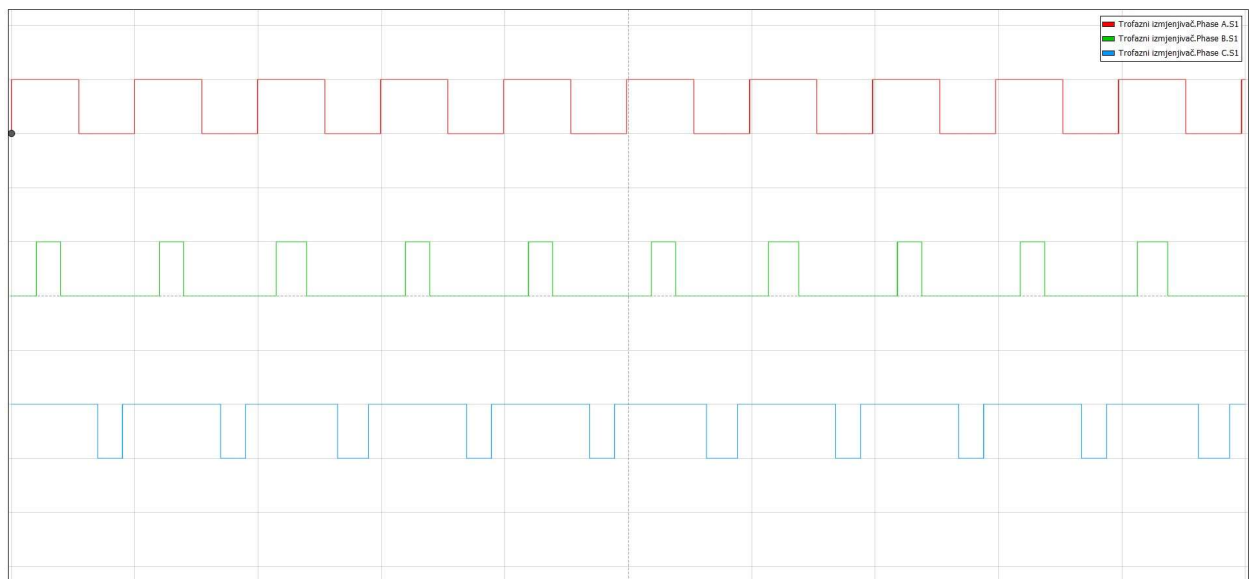
Slika 6.12 Upravljački impulsi ventila $V1$, $V3$ i $V5$ u trećem sektoru

$$T_1 = 0,2919 \text{ ms} \quad T_2 = 0,5486 \text{ ms} \quad T_0 = 0,1593 \text{ ms} \quad \varphi_{ref} = 160^\circ$$



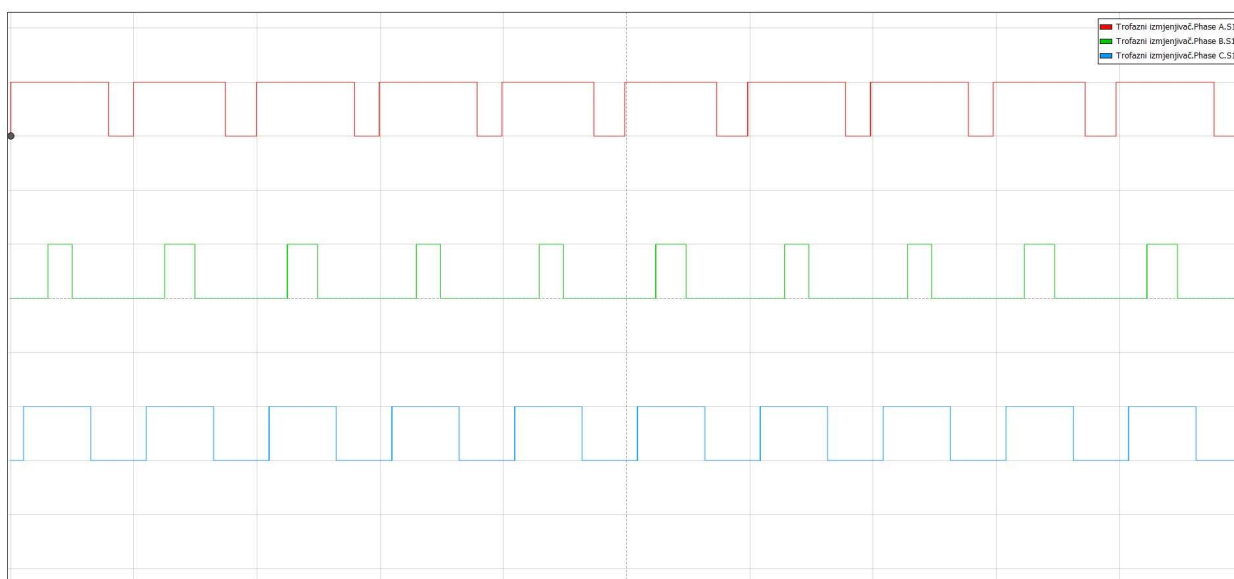
Slika 6.13 Upravljački impulsi ventila V1, V3 i V5 u četvrtom sektoru

$$T_1 = 0,4268 \text{ ms} \quad T_2 = 0,4268 \text{ ms} \quad T_0 = 0,1463 \text{ ms} \quad \varphi_{ref} = 210^\circ$$



Slika 6.14 Upravljački impulsi ventila V1, V3 i V5 u petom sektoru

$$T_1 = 0,2919 \text{ ms} \quad T_2 = 0,5486 \text{ ms} \quad T_0 = 0,1593 \text{ ms} \quad \varphi_{ref} = 280^\circ$$

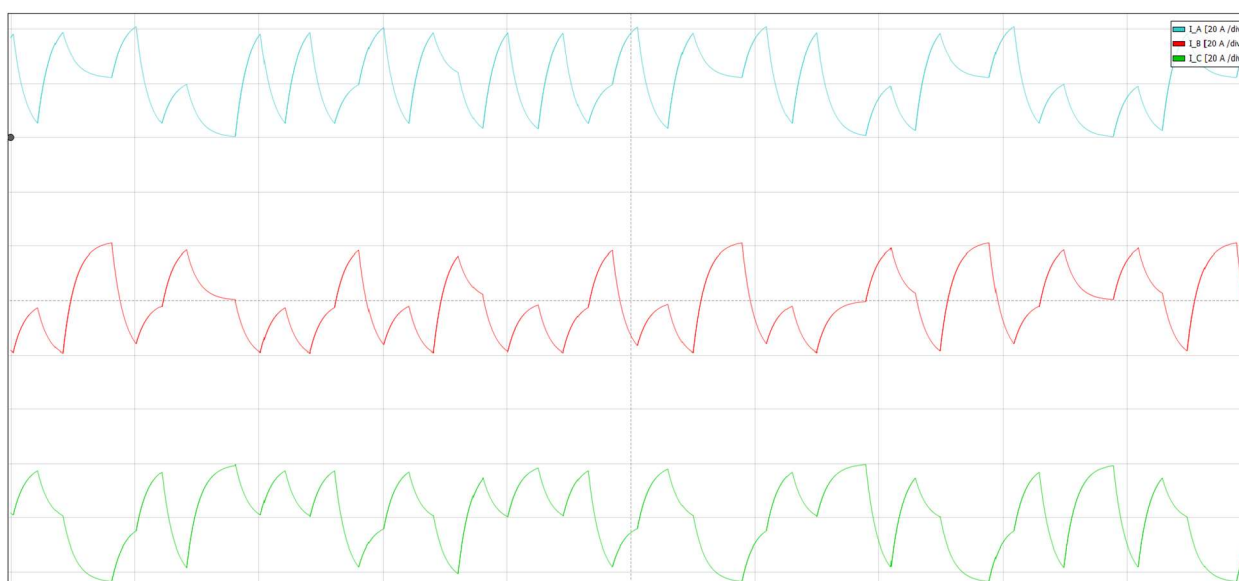


Slika 6.15 Upravljački impulsi ventila $V1$, $V3$ i $V5$ u šestom sektoru

$$T_1 = 0,5486 \text{ ms} \quad T_2 = 0,2919 \text{ ms} \quad T_0 = 0,1593 \text{ ms} \quad \varphi_{ref} = 320^\circ$$

Usporede li se dobiveni upravljački impulsi prema slikama 6.10 – 6.15 s onima dobivenim u provedenoj analizi rada, vidljivo je da se oni podudaraju. Postignut je simetrični obrazac sklapanja ventila.

Preostaje prikazati još struju i napone trošila izmjenjivača. Fazne i linijske struje su jednake jer se radi o trošilu u zvijezda spoju. Na slici 6.16 prikazana je struja trošila u prvom sektoru pri sklopnoj frekvenciji 1 kHz. Kut referentnog prostornog vektora napona je 30° .



Slika 6.16 Struje trošila u prvom sektoru, $f_s = 1 \text{ kHz}$

Valni oblik struje prema slici 6.16 je kontinuiran. Kontinuiranost funkcije struje je posljedica postojanja induktiviteta L_i u modelu trošila. Naime, induktivitet ne dopušta trenutnu promjenu vrijednosti struje. Pozitivne volt-sekunde narinute su na trošilo za vrijeme porasta struje, a negativne volt-sekunde za vrijeme smanjenja struje.

Primjenom Kirchhoffovih zakona moguće je opisati električni krug trošila. Struja trošila računa se iz diferencijalne jednadžbe (6-1).

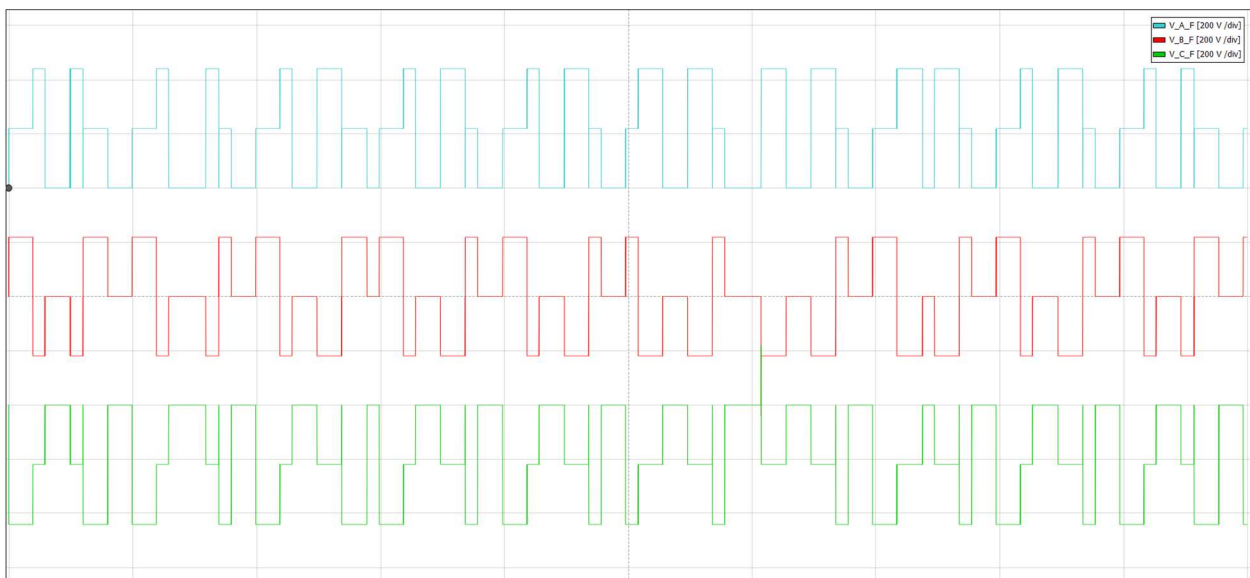
$$L_j \frac{di_j}{dt} + R_j i = u_j$$

$$j = 1, 2, 3$$

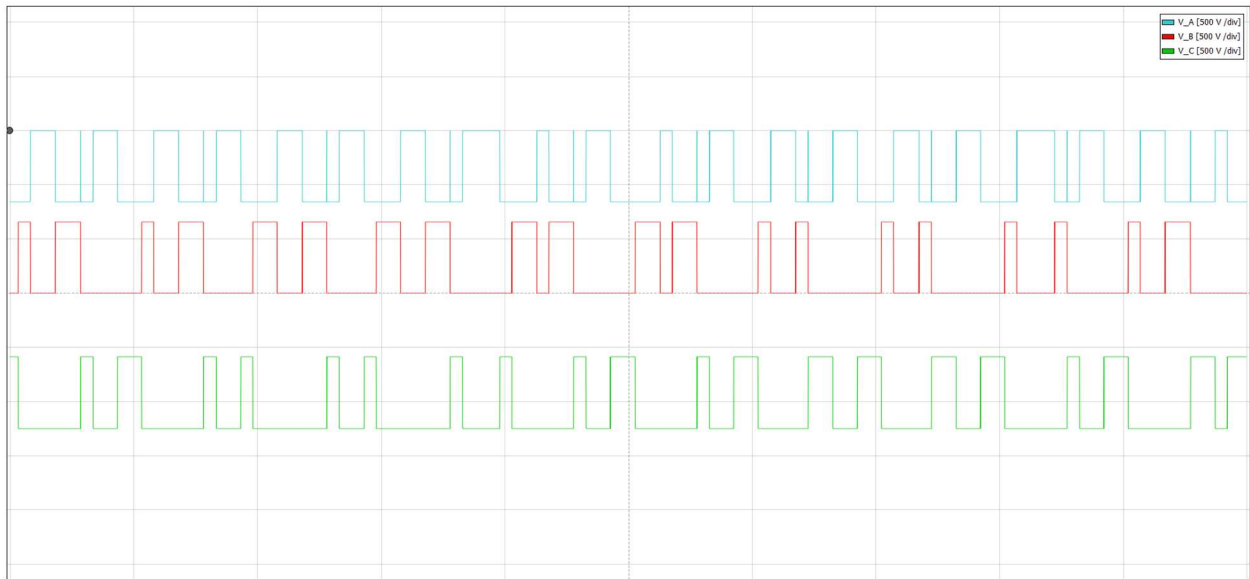
$$0 = i_1 + i_2 + i_3$$
(6-1)

Zbroj trenutnih vrijednosti struja iznosi nula jer je trošilo trofazno simetrično. Srednja vrijednost struje jednaka je nuli. Također, struja posjeduje više harmonike koji unose harmonijsku izobličenost. Zbog toga, valni oblik struje nije sinusni. Poboljšanje harmonijskog spektra vrši se povećanjem sklopne frekvencije, odnosno povećanjem modulacijskog indeksa.

Fazni i linijski naponi trošila prikazani su na slikama 6.17 i 6.18.



Slika 6.17 Valni oblik faznog napona u prvom sektoru, $f_s = 1$ kHz



Slika 6.18 Valni oblik linijskog napona u prvom sektoru, $f_s = 1$ kHz

Valni oblici faznog i linijskog napona na slikama 6.17 i 6.18 podudaraju se s onima u provedenoj analizi rada. Određivanje srednjih vrijednosti faznih i linijskih napona vrši se na analogan način kao i za sklopnu frekvenciju od 100 Hz. Iz valnog oblika faznog napona u prvom sektoru vidljivo je da je srednja vrijednost napona prve faze pozitivna pri čemu su na trošilo narinute pozitivne srednje volt-sekunde. Fazni naponi druge i treće faze imaju negativne srednje vrijednosti napona pri čemu su na trošilo narinute negativne srednje volt-sekunde. Uvrštavanjem faznih napona u izraz (6-1) moguće je dobiti analitički izraz za struju trošila izmjenjivača. Pri tome je nužno poznavati početne vrijednosti struje za svaku sklopnu periodu T_s .

Povećanjem sklopne frekvencije dolazi do većeg broja realiziranih referentnih prostornih vektora napona. Pri sklopnoj frekvenciji $f_s = 1$ kHz modulacijski omjer frekvencija iznosi $m_f = 20$. Ovo znači da se unutar periode T mrežnog napona realizira ukupno 20 prostornih vektora.

7. ZAKLJUČAK

Modulacija prostornog vektora je efikasna metoda generiranja sustava trofaznog napona. Razvoj matematičkog modela modulacije temeljen je na konceptu prostornog vektora napona. Određivanjem komponenti prostornog vektora unutar $\alpha - \beta$ ravnine dolazi se do izraza za vremena uključenosti upravljivih ventila gornje grane izmjenjivača. Uvođenje simetričnog obrasca sklapanja značajno je smanjilo sklopne gubitke. Upravljivi ventili nisu idealne sklopke i treba im određeno vrijeme za uklop i isklop. Zbog toga, trajanje sklopne periode treba biti puno veće od zbroja vremena uklopa i isklopa.

Kroz rezultate implementacije algoritma modulacije u MATLAB/Simulinku te kroz analizu rezultata vidljivo je kako primijenjena metoda modulacije ima očekivane rezultate te kako je prikladnija za primjenu pri većim frekvencijama sklapanja f_s . Povećanjem sklopne frekvencije, odnosno modulacijskog omjera frekvencija m_f , uzima se veći broj uzoraka referentnog mrežnog napona. Veći broj uzoraka za posljedicu ima da je proizvedeni tok bliži toku koji bi bio proizveden sinusnim trofaznim naponom. Što je sklopna frekvencija veća, to je bolji oblik proizvedenih volt-sekundi, odnosno napona. Dakle, volt-sekunde proizvedene pri frekvenciji sklapanja od 10 kHz najviše odgovaraju sinusnim volt-sekundama. Pri višim je frekvencijama manja harmonička izobličenosť valnih oblika napona s manjim utjecajem viših harmonika.

Testiranje algoritma obavljeno je pomoću Typhoon HIL sustava. Typhoon HIL omogućava realističnu simulaciju algoritma u stvarnom vremenu pri čemu korisnik zadaje parametre modulacije. Ovo je omogućilo da se provede simulacija brzo i precizno, bez potrebe za stvarnim hardverom. Izmjeren je valni oblik struje trošila koji nije sinusni te sadrži više harmonike. Struja je indikator kvalitete modulacije te se teži postizanju sinusnog valnog oblika. Povećanjem sklopne frekvencije smanjuje se udio viših harmonika u struji i izlaznom naponu. Daljnje poboljšanje simulacije odnosi se na podešavanje parametara simulacije te optimiziranje mikrokontrolera pri radu na frekvencijama višim od 1 kHz kako ne bi dolazilo do skaliranja izlazne sklopne frekvencije.

LITERATURA

- [1] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Kigen, Zagreb, 2010.
- [2] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, S. Pekarek, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [3] N. Mohan, Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink, Wiley, 2014.
- [4] B. K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall PTR, 2002.
- [5] G. Erceg, Upravljanje elektromotornim pogonima, Zagreb, 2006.
- [6] M. Ugljar, Implementacija modulacije prostornog vektora na CRIO FPGA platformi, diplomski rad, Osijek, 2018.
- [7] CMSIS-DSP, CMSIS DSP Software Library, verzija 1.10.0, dostupno na:
https://arm-software.github.io/CMSIS_5/DSP/html/group__park.html [7. 7. 2023.]
- [8] Electrical India, Advantages of space vector modulation, dostupno na:
<https://www.electricalindia.in/advantages-of-space-vector-modulation/> [14. 9. 2023.]
- [9] Texas Instruments, TMS320F2808, dostupno na:
<https://www.ti.com/product/TMS320F2808> [18. 8. 2023.]
- [10] Typhoon HIL, Documentation, dostupno na:
<https://www.typhoon-hil.com/documentation/> [27. 8. 2023.]

SAŽETAK

Modulacija prostornog vektora jedna je od najčešće korištenih metoda upravljanja trofaznim naponskim izmjenjivačima. U ovom radu, provedena je analiza rada trofaznih naponskih izmjenjivača napona te je predstavljen matematički model modulacije prostornog vektora. Definiran je pojam prostornog vektora kojim se prikazuje referentni trofazni sustav napona kako bi se odredila vremena uključenosti upravljačkih ventila. Također, izveden je MATLAB/Simulink model algoritma s ciljem testiranja modulacije unutar Typhoon HIL sustava. Generiranje upravljačkih impulsa izmjenjivača vršeno je pomoću TMS320F2808 mikrokontrolera spojenog na Typhoon HIL hardver. Snimljeni su dobiveni upravljački impulsi te fazni i linijski naponi koji su kasnije uspoređeni s onima dobivenim u provedenoj analizi rada.

Ključne riječi: trofazni izmjenjivač napona, prostorni vektor, Clarkeova transformacija, sklopna frekvencija, algoritam modulacije, Typhoon HIL, TMS320F2808 mikrokontroler

ABSTRACT

Space vector modulation is one of the most commonly used methods of controlling three-phase voltage inverters. In this paper, an analysis of the operation of three-phase voltage inverters was carried out and a mathematical model of space vector modulation was presented. The concept of a space vector is defined, which shows the reference three-phase voltage system in order to determine the on-times of the control valves. Also, a MATLAB/Simulink algorithm model was developed with the aim of testing the modulation within the Typhoon HIL system. The generation of control pulses of the inverter was performed using a TMS320F2808 microcontroller connected to the Typhoon HIL hardware. The obtained control pulses and phase and line voltages were recorded, which were later compared with those obtained in the performed work analysis.

Keywords: three-phase voltage inverter, space vector, Clarke transformation, switching frequency, modulation algorithm, Typhoon HIL, TMS320F2808 microcontroller

ŽIVOTOPIS

Luka Živković rođen je 25. svibnja 1999. godine u Osijeku. Živi i odrasta u Županji gdje pohađa Osnovnu školu Mate Lovraka, a potom upisuje Prirodoslovno - matematičku gimnaziju u Županji. Nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja, 2018. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, preddiplomski studij elektrotehnika. Opredjeljuje se za smjer elektroenergetika na drugoj godini preddiplomskog studija. Na diplomskom sveučilišnom studiju odabire izborni blok DEC - Industrijska elektroenergetika. Tijekom studija sudjeluje u izvođenju laboratorijskih vježbi iz kolegija Osnove energetske elektronike i Energetska elektronika. Za vrijeme trajanja studija, dobitnik je nagrade za postignut uspjeh u studiranju.

U Osijeku, rujan 2023.

Luka Živković