



**СТРУЧНИ РАД - ПРИКАЗ МАСТЕР РАДА**  
**ФОРМУЛАР ЗА ПРЕДАЈУ РАДА ( ИЗ ОБЛАСТИ МАСТЕР РАДА МАСТЕР**  
**ЗА СТРУКОВНЕ СТУДИЈЕ)**

Студијски програм/модул:

Електротехника и рачунарство

Електроенергетика

**НАСЛОВ РАДА:**

Моделовање фотонапонског система повезаног на

електричну мрежу

Ментор рада:

(потпис ментора)

Кандидат:

Презиме:

Ивановић

Име:

Иван

Број индекса:

512/2022

(потпис кандидата)

Датум: 10.07.2024.

# Modelovanje fotonaponskog sistema povezanog na električnu mrežu

*dr Dragan Brajović prof.struk.stud<sup>1</sup>, Ivan Ivanović<sup>1</sup>*

## REZIME

Jedan od ključnih zahteva pri upotrebi fotonaponskih sistema povezanih na električnu mrežu jeste što efikasnija iskorišćenost dobijene električne energije od strane solarne energije. U radu je predstavljen model fotonaponskog sistema povezanog na električnu mrežu sa predlogom kontrole fotonaponskog invertora zasnovanom na principu MPPT algoritma. Konfiguracija pretvarača za povezivanje fotonaponskog sistema, kao i sam fotonaponski sistem, detaljno su prikazani. Modelovanje PWM invertora zasnovanog na SVM tehnici je takođe prikazano. Upotrebom programskog paketa MATLAB/Simulator, razvijen je model realnog fotonaponskog sistema i formirana simulacija rada sistema.

**Ključne reči:** fotonaponski sistem; fotonaponski inverter; MPPT algoritam, PWM, električna mreža; solarna energija.

## Modeling of the photovoltaic system connected to the electrical grid

### ABSTRACT

One of the key requirements when using photovoltaic systems connected to the electrical grid is the most efficient use of the obtained electrical energy by solar energy. The paper presents a model of a photovoltaic system connected to the electrical grid with a proposal for the control of a photovoltaic inverter based on the principle of the MPPT algorithm. The configuration of the converter for connecting the photovoltaic system, as well as the photovoltaic system itself, are shown in detail. Modeling of a PWM inverter based on the SVM technique is also presented. Using the MATLAB/Simulator software package, a model of a real photovoltaic system was developed and a simulation of the system's operation was created.

**Key words:** photovoltaic system; photovoltaic inverter; MPPT algorithm; PWM; electric grid; solar energy.

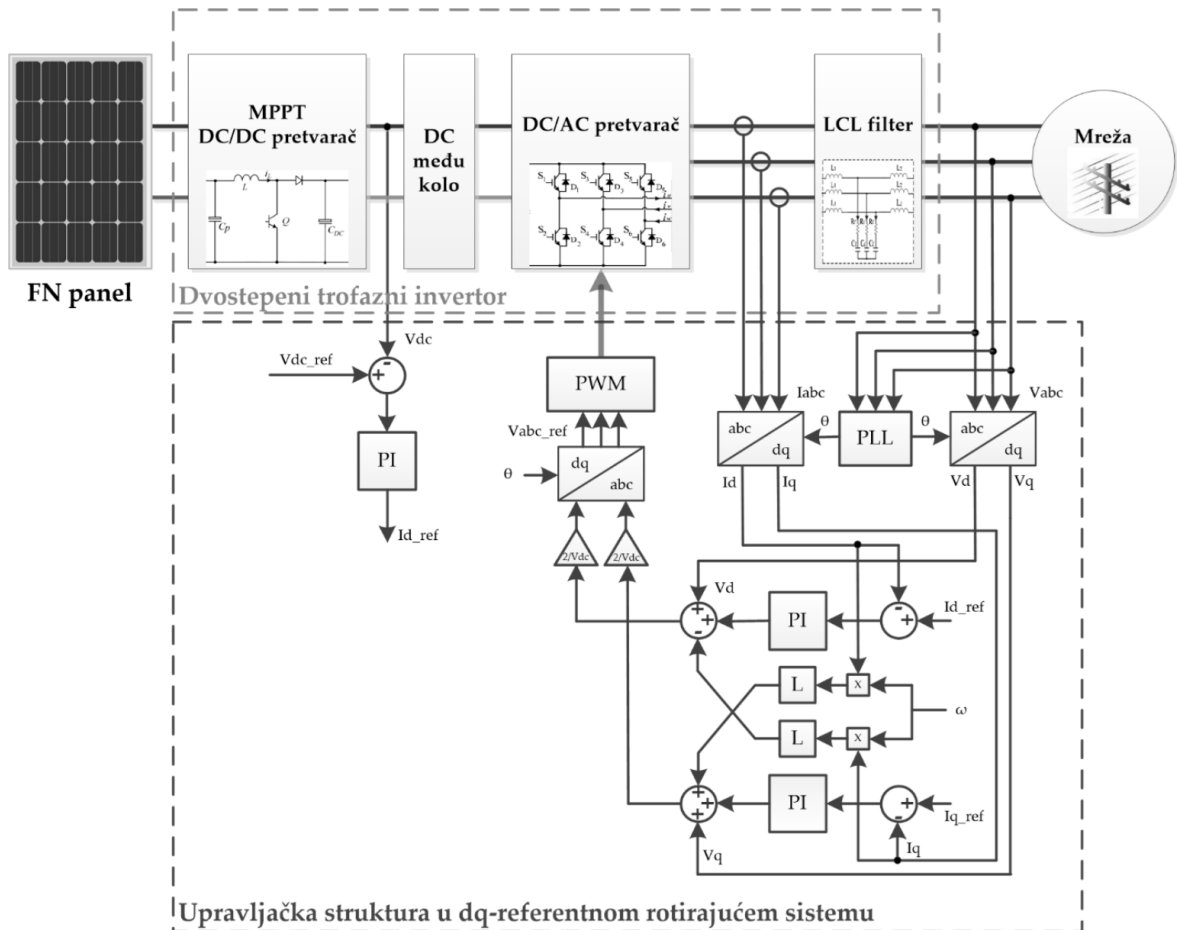
## 1. Uvod

Kako bi se istražio i utvrdio uticaj fotonaponskih sistema na harmonijska izobličenja napona i struja u tački priključenja pri različitim eksploatacionim uslovima, potrebno je izvršiti korektno modelovanje čitavog sistema, počevši od fotonaponskih modula, preko pretvarača, algoritama i struktura upravljanja do mreže na koju se povezuju. Na slici 1 dat je funkcionalni blok dijagram fotonaponskog sistema povezanog na mrežu na kojem su prikazani osnovni funkcionalni delovi: fotonaponski panel, pretvarač realizovan u dvostepenoj topologiji, izlazni filter i upravljačka struktura.

Odabir prikazane strukture fotonaponskog sistema za modelovanje odgovara svim komercijalnim rešenjima baziranim na multistring inverterima sa dva stepena za procesiranje snage. U prvom stepenu tj. na DC/DC pretvaraču se realizuje MPPT funkcija praćenja i iskorišćenja maksimalne snage FN panela. Drugi stepen vrši transformaciju jednosmjernu u naizmjeničnu struju preko trofaznog invertora na čijem je izlazu modelovan pasivni LCL filter čija je uloga smanjenja sadržaja viših harmonika injektirane struje u mrežu. Upravljačka struktura je zasnovana na dobro poznatoj upravljačkoj tehnici dq-referentnog rotirajućeg sistema.

---

<sup>1</sup> Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Svetog Save 65, Čačak



Slika 1. Funkcionalni blok dijagram fotonaponskog sistema povezanog na mrežu

## 2. Model fotonaponskog panela

Fotonaponski panel je sačinjen od rednih i paralelnih veza više FN modula u cilju dobijanja većih izlaznih snaga tj. većih vrednosti napona i struja koje su prihvatljive kao ulazni parametri za pretvarače. Priroda FN modula je takva da njegova izlazna (strujno-naponska) karakteristika odgovara izvoru jednosmerne struje. Kako se model FN modula zasniva na jednom od dobro poznatih modela za FN ćelije (jednodiodni najčešće), onda se i opšti model FN panela može opisati relacijom:

$$I_{PV} = N_p \cdot I_{SC} - N_p \cdot I_{RS} \left( e^{\frac{q}{A \cdot k \cdot T_C} \left( \frac{U_{PV}}{N_s} + \frac{I_{PV} \cdot R_S}{N_p} \right)} - 1 \right) - \frac{N_p}{R_p} \left( \frac{U_{PV}}{N_s} + \frac{I_{PV} \cdot R_S}{N_p} \right) \quad (1)$$

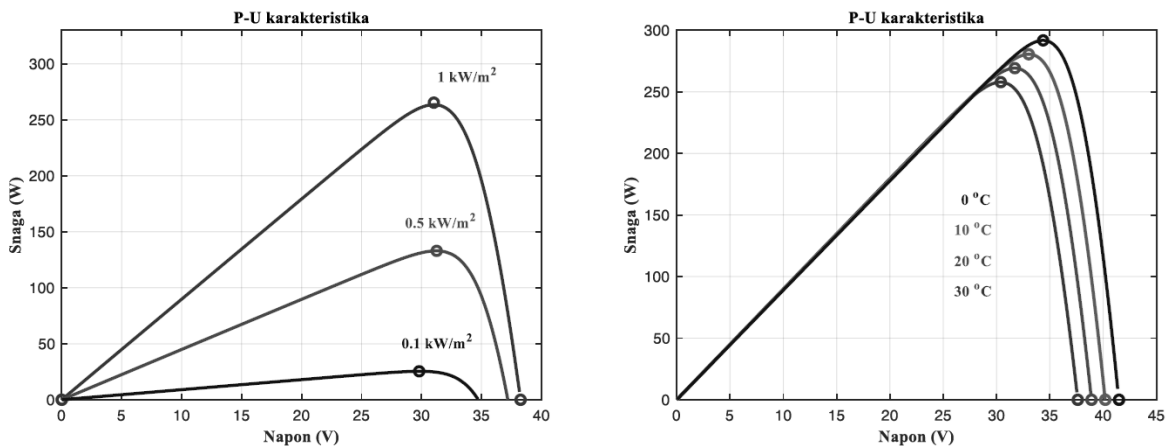
gde je:  $I_{PV}$  – izlazna struja FN panela;  $U_{PV}$  – izlazni napon FN panela;  $I_{SC}$  – struja FN ćelije;  $I_{RS}$  – inverzna struja zasićenja FN ćelije;  $T_C$  – temperatura FN ćelije (K);  $q$  – naelektrisanje elektrona;  $k$  – Boltzmanova konstanta;  $A$  – faktor idealnosti diode ( $\approx 1$ );  $R_s$  – serijski otpor FN ćelije;  $R_p$  – paralelni otpor FN ćelije;  $N_s$  – broj serijski vezanih FN modula;  $N_p$  – broj paralelno vezanih FN modula.

Struja FN ćelije zavisi od intenziteta sunčevog zračenja i temperature pa se može opisati relacijom:

$$I_{SC} = I_c \left[ I_{SCref} + k_I (T_C - T_{Cref}) \right] \quad (2)$$

gde je:  $I_c$  – intenzitet solarnog zračenja na površini modula;  $I_{SCref}$  – struja kratkog spoja FN ćelije pri standardnim uslovima ispitivanja;  $k_I$  – temperaturni koeficijent pri struji kratkog spoja FN ćelije;  $T_{Cref}$  – referentna temperatura FN ćelije.

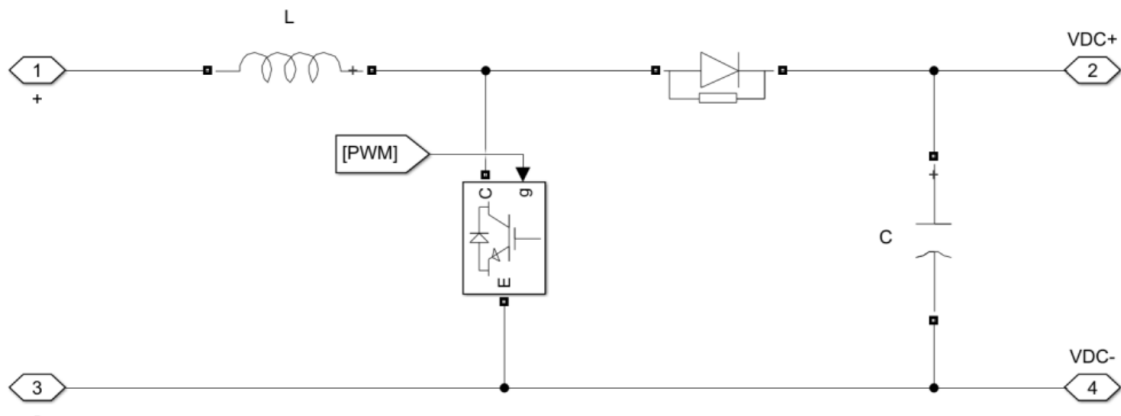
Uzimajući u obzir varijaciju intenziteta sunčevog zračenja i temperature zavisnost izlazne karakteristike se može prikazati na slici 2.



Slika 2. Zavisnost snage FN modula od intenziteta sunčevog zračenja (levo) i temperature (desno)

### 3. Model DC/DC pretvarača

Model DC/DC pretvarača je baziran na topologiji podizača napona (Boost converter) koji se često koristi kao rešenje pretvarača na kome se realizuje MPPT funkcija u sklopu fotonaponskih dvostepenih invertora. Model podizača napona realizovan u MATLAB/Simulatoru je prikazan na slici 3.



Slika 3. Model DC/DC pretvarača – podizača napona

Kako je već rečeno, uloga ovog pretvarača je da se na njemu implementira MPPT funkcija tj. da se omogući da se radna tačka FN panela održava u koljenu izlazne strujno-naponske karakteristike u toku različitih radnih uslova, čime se postiže maksimalna izlazna snaga FN panela. U osnovi, ovaj pretvarač je realizovan pomoću brzih MOSFET ili IGBT prekidača koji rade na visokim prekidačkim frekvencijama (reda nekoliko desetina kHz) i filterskih elemenata L i C. Upravljanje radom pretvaračem se vrši mijenjanjem faktora ispunje D (duty cycle) koji se određuje upotrebom impulsno-širinske modulacije koja se formira kao rezultat primijenjenog MPPT algoritma. Izbor filterskih komponenti pretvarača se vrši na osnovu zadovoljenja volt-sekundnog balansa na prigušnici L i amper-sekundnog balansa na kondenzatoru C, pri unapriod definisanim dozvoljenim ograničenjima na ripl izlaznog napona i struje. Minimalne vrijednosti elemenata se mogu odrediti sledećim relacijama:

$$L = \frac{U_{ul} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f_s} \quad (3)$$

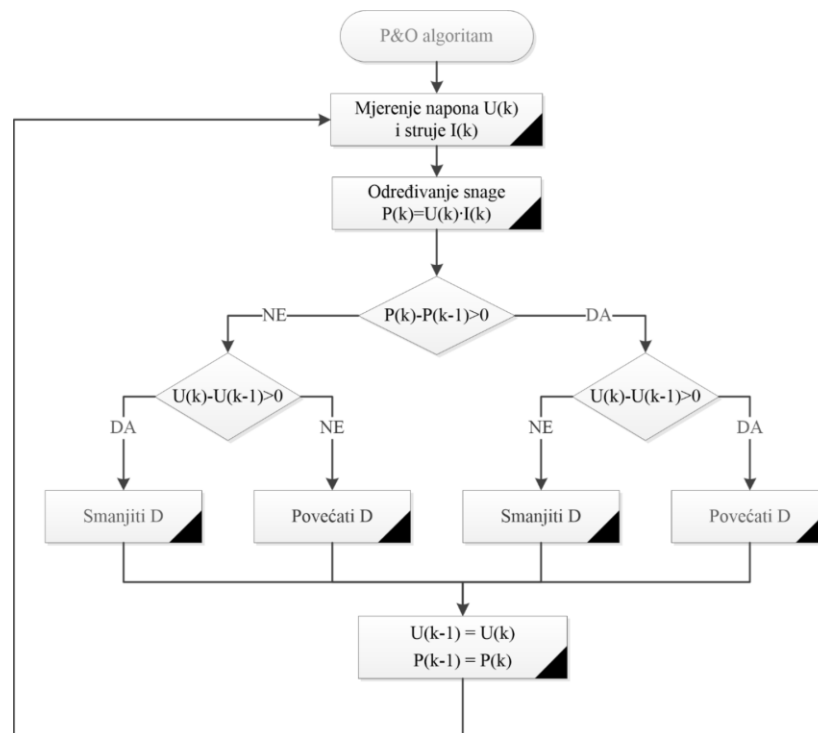
$$C = \frac{U_{izl} \cdot D}{\Delta U_{izl} \cdot R \cdot f_s} \quad (4)$$

gde je:  $U_{ul}$  – ulazni napon pretvarača;  $U_{izl}$  – izlazni napon pretvarača;  $\Delta U_{izl}$  – ripl izlaznog napona;  $\Delta i_L$  – ripl struje prigušnice;  $D$  – faktor ispunje;  $f_s$  – prekidačka frekvencija;  $R$  – izlazna otpornost.

### 3.1. MPPT algoritam

MPPT algoritam je neophodna upravljačka tehnika koja služi za određivanje i generisanje maksimalne snage FN sistema pri različitim eksploatacionim uslovima (pri kojima postoji zavisnost izlazne snage od varijacije intenziteta sunčevog zračenja i temperature). U literaturi su do sada razvijeni mnogi algoritmi za pronalaženje tačke maksimalne snage, a razlikuju se po svojoj složenosti, ceni implementacije, opsegu rada, brzini konvergencije, a i tačnosti tj. korektnosti praćenja radne tačke pri promenama intenziteta sunčevog zračenja i temperature. Neki od najpoznatijih i najupotrebljivijih algoritama su: P&O algoritam (Perturb and Observe; Poremeti i Prati) i algoritam inkrementalne provodnosti (Incremental Conductance). Oba ova algoritma za praćenje tačke maksimalne snage koriste priraštaj referentnog napona.

Na slici 4 prikazan je dijagram P&O algoritma. Suština rada ovog algoritma je u inkrementalnoj promeni inicijalne vrednosti faktora ispunje  $D$ , na osnovu praćenja snage i napona. Kada se promeni vrednost faktora ispunje vrši se merenje napona i struje panela te određivanje snage. Ukoliko je povećanje napona izazvalo povećanje snage nakon promene faktora ispunje, dalja promena faktora ispunje se odvija u istom smeru. U slučaju da je novo dobijena snaga manja od prethodne, pri povećanju napona, neophodno je promijeniti znak priraštaja faktora ispunje od prethodnog. Kada se dostigne maksimalna snaga, vrednost faktora ispunje varira oko konstantne vrednosti, što predstavlja nedostatak ovog algoritma koji se može nadomestiti uvođenjem adaptivne promene koraka ili određivanjem mrtve zone.



Slika 4. Dijagram toka P&O MPPT algoritma

### 3.2. Implementacija MPPT-a i upravljanje DC/DC pretvaračem

Kako se kod FN panela strujno-naponska karakteristika menja usled promene intenziteta sunčevog zračenja i temperature, radna tačka koja definiše napon i struju pri određenom opterećenju zavisi i od karakteristike samog tog opterećenja tj. u ovom slučaju ulazne otpornosti povezanog DC/DC pretvarača. Maksimalna snaga na izlazu FN panela je definisana proizvodom napona i struje u tački maksimalne snage ( $U_{MPP}$  i  $I_{MPP}$ , respektivno), koji su vezani Omovim zakonom prema relaciji:

$$R_{MPP} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (5)$$

DC/DC pretvarač svoju radnu tačku formira na bazi praćenja/podešavanja tačke maksimalne snage tako što menja vrednosti napona i struje FN panela kako bi njihov količnik uvek odgovarao vrednosti otpora  $R_{MPP}$ . U idealnom slučaju, zanemarujući gubitke u DC/DC pretvaraču, ulazna snaga bi trebala biti jednaka izlaznoj snazi:

$$P_{ul} = P_{izl} \rightarrow \frac{U_{MPP}^2}{R_{MPP}} = \frac{U_{DC}^2}{R_{izl}} \quad (6)$$

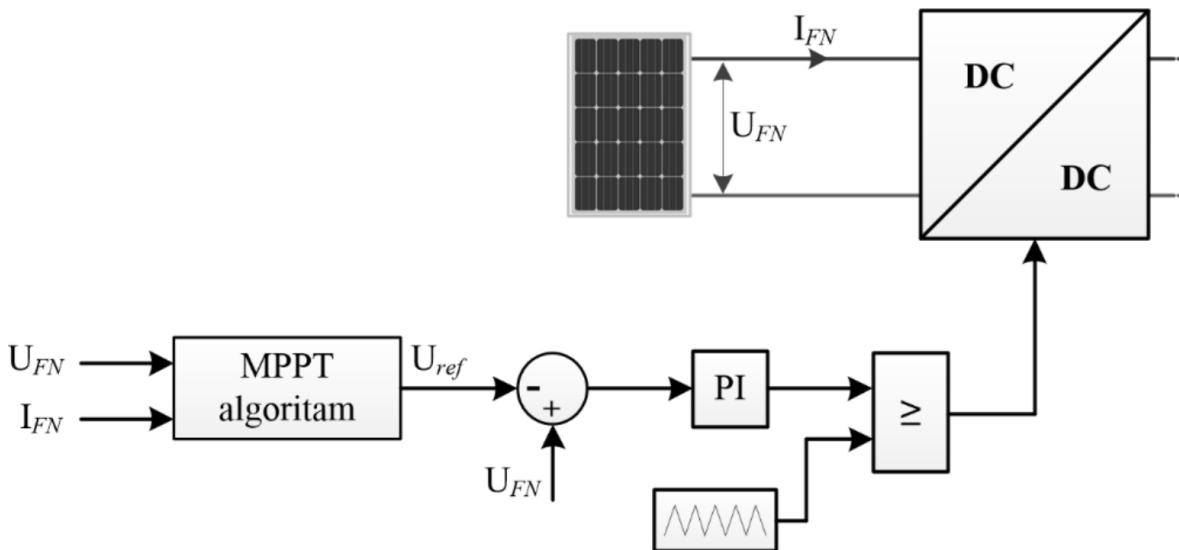
Jednačina za konverzioni odnos podizača napona data je sledećom relacijom:

$$\frac{U_{DC}}{U_{MPP}} = \frac{1}{1-D} \quad (7)$$

Iz prethodne relacije može se dobiti i zavisnost faktora ispune  $D$  od vrednosti otpora na izlazu pretvarača.

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{MPP}}{R_{izl}}} \quad (8)$$

Upravljačka struktura DC/DC pretvarača prikazana je blok dijagramom na slici 5.



Slika 5. Blok dijagramom upravljačke strukture DC/DC pretvarača

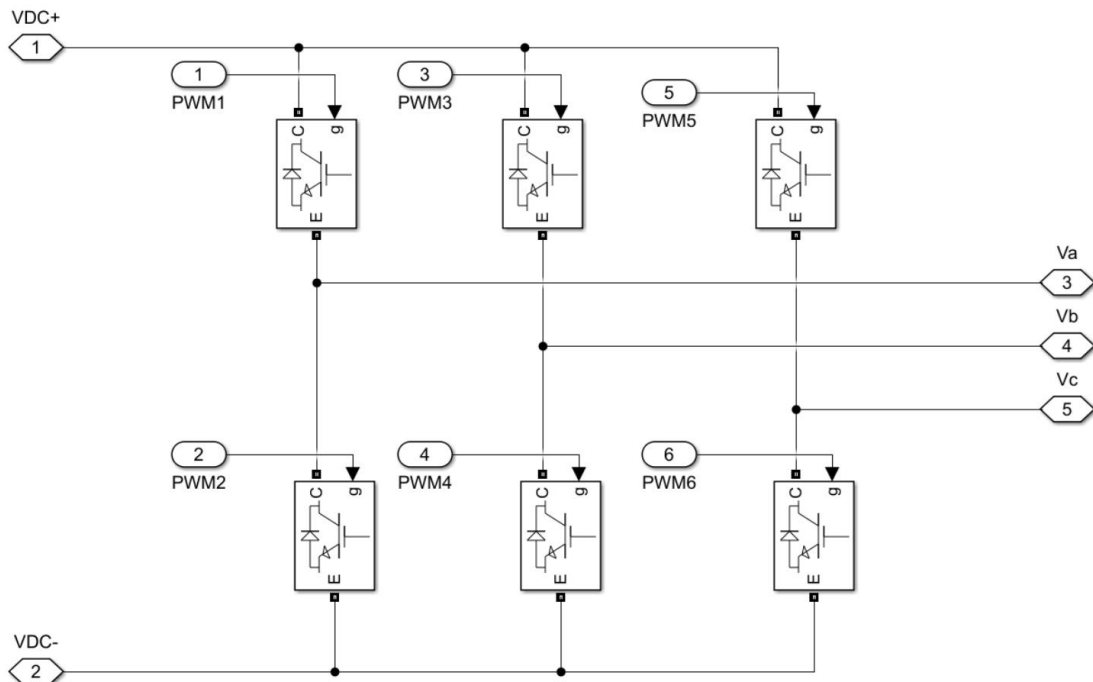
## 4. Model DC/AC pretvarača

Za povezivanje FN panela na mrežu neophodno je koristiti

DC/AC pretvarače ili invertore. Osnovni tip pretvarača koji se koristi je trofazni naponski inverter (VSI – Voltage Source Inverter), čiji je zadatak da ulazni DC napon pretvori u regulisani trofazni naizmjenični napon mrežne frekvencije i amplitude. Upravljanje inverterom se vrši impulsno, tj. uključivanje/isključivanje brzih prekidača reguliše se impulsno-širinskom modulacijom tako da se ostvari osnovni harmonik izlaznog napona željene amplitude i frekvencije. U primeni se mogu naći najčešće dva načina PWM upravljanja kojima se obezbeđuje željeni izlazni napon i to: trofazna sinusna PWM modulacija i PWM modulacija prostornog vektora (SVM – Space Vector Modulation).

U opisanom FN sistemu korišćena je dvostepena topologija FN pretvarača pri čemu je kao invertorski stepen modelovan standardni mosni šestopulsni trofazni inverter sa IGBT prekidačima (slika 6).

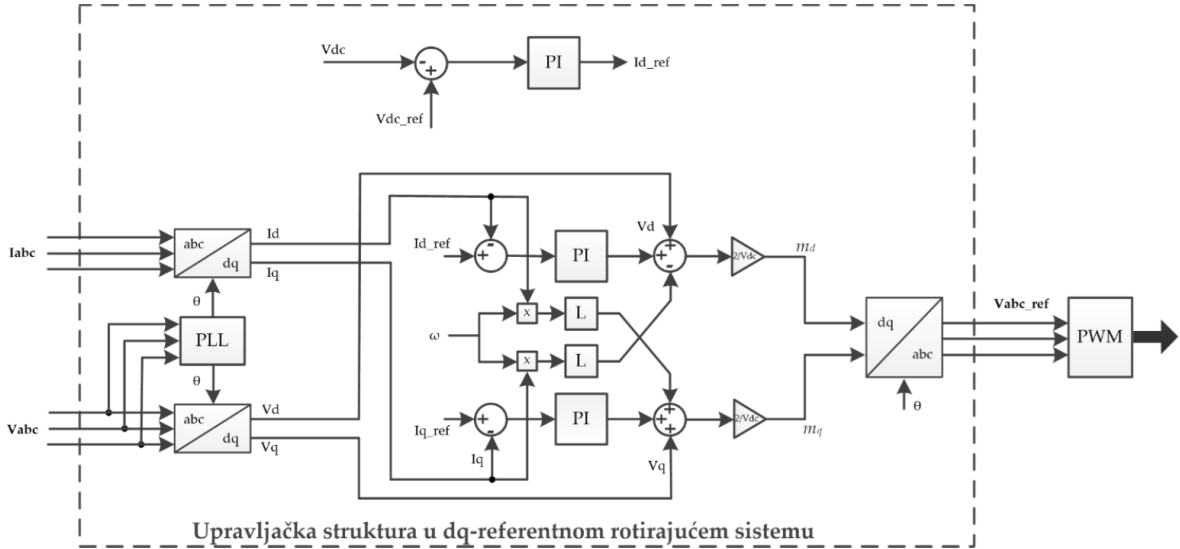
Model trofaznog invertora je upravljan primenom sinusne trofazne impulsno-širinske modulacije u kojoj su impulsi generisani upoređivanjem referentnog signala (modulišućeg) sa visokofrekventnim trougaonim talasnim oblikom nosioca signala. Pri generisanju ovih impulsa kao referentni signal se koristio napon mreže koji je obezbeđen sinhronizacionim blokom tj. Trofaznom PLL petljom, pomoću koje je estimiran fazni ugao  $\theta$  čime se kao rezultat upravljanja obezbeđuje korektno injektiranje struje u mrežu.



Slika 6. Model DC/AC pretvarača – trofazni inverter

#### 4.1. Upravljačka struktura invertora

FN invertori povezani na mrežu u većini slučajeva su naponski invertori čije je upravljanje zasnovano na regulaciji izlazne struje kroz upotrebu više upravljačkih petlji (slika 7). Vrednost napona jednosmjernog DC međukola se reguliše pomoću direktne komponente struje invertora ( $i_d$ ) upotrebom PI regulatora. Ukoliko je napon na izlazu prvog stepena manji od referentnog napona na kondenzatoru, kontroler smanjuje vrednost direktne komponente struje invertora čime obezbeđuje povećanje DC napona.



Slika 7. Upravljačka struktura invertora na bazi dq – referentnog rotirajućeg sistema

Za regulaciju i upravljanje izlaznim parametrima invertora poslužila je teorija sinhronog dq referentnog rotirajućeg sistema pomoću koje su trofazni naponi i struje iz prirodnog konvencionalnog abc sistema konvertovane u sinhroni rotirajući dq sistem sa jednosmjernim komponentama (d i q) pomoću kombinacije Klarkove i Parkove transformacije tj. Blondelove transformacije:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

gde je  $\theta$  – fazni ugao.

Masovna upotreba rotirajućeg dq – referentnog sistema se ogleda u činjenici da su u njemu sve koordinate/komponente vremenski nepromenljive vrednosti pa se relativno jednostavno mogu formirati regulacione konture po struji koje se regulišu upotrebom PI regulatora.

Aktivna i reaktivna snaga u tački priključenja invertora na mrežu u dq rotirajućem sistemu se može predstaviti sledećim relacijama:

$$P = \frac{3}{2} (v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q) \quad (11)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q) \quad (12)$$



PLL sinhronizacioni blok, pored uloge u generisanju referentnog signala ima funkciju i modifikacije prethodnih relacija u cilju minimizacije jedne od komponenti ( $v_q$ ) kako bi se sprečilo preklapanje d i q komponenti u izrazu za reaktivnu snagu.

$$P = \frac{3}{2} v_d \cdot i_d \quad (13)$$

$$Q = -\frac{3}{2} v_d \cdot i_q \quad (14)$$

Iz prethodne dve modifikovane relacije jasno se može uočiti da je aktivna snaga direktno proporcionalna  $i_d$  komponenti i da se njome reguliše. Takođe, reaktivna snaga je proporcionalna  $i_q$  komponenti i njome se reguliše. Regulacione strujne konture se formiraju na osnovu sljedećih relacija:

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}} \left[ \left( k_p + k_i \frac{1}{s} \right) (i_{dref} - i_d) - L \cdot \omega \cdot i_q + v_d \right] = \frac{2}{V_{DC}} (v_{dref} - L \cdot \omega \cdot i_q + v_d) \quad (15)$$

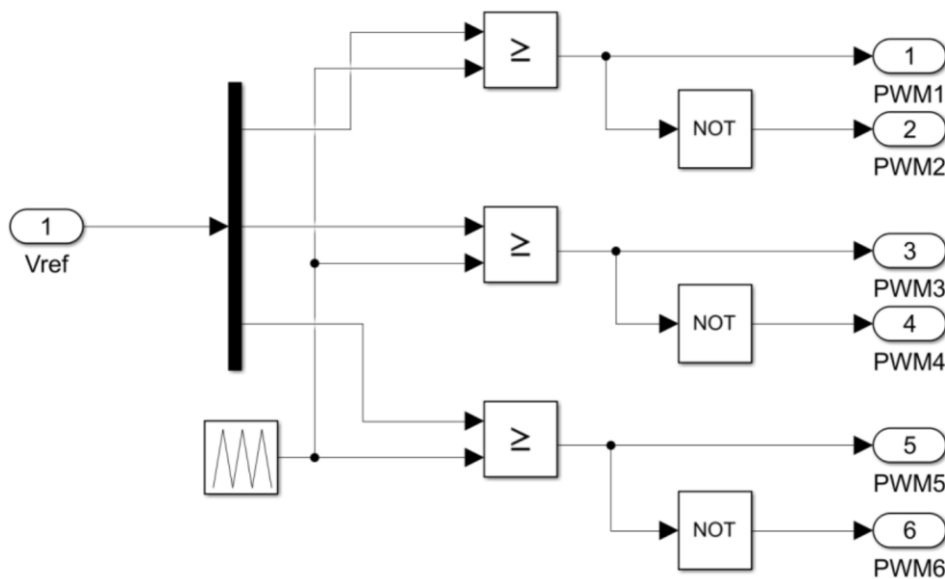
$$m_q = \frac{2}{V_{DC}} \left[ \left( k_p + k_i \frac{1}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + L \cdot \omega \cdot i_d + v_q \right] = \frac{2}{V_{DC}} (v_{qref} + L \cdot \omega \cdot i_d + v_q) \quad (16)$$

gde je:  $m_d$  i  $m_q$  – modulišući signali;  $v_{dref}$  i  $v_{qref}$  – referentni naponi regulišućih struja;  $L$  – induktivnost filtera na strani invertora;  $V_{DC}$  – ulazni napon invertora.

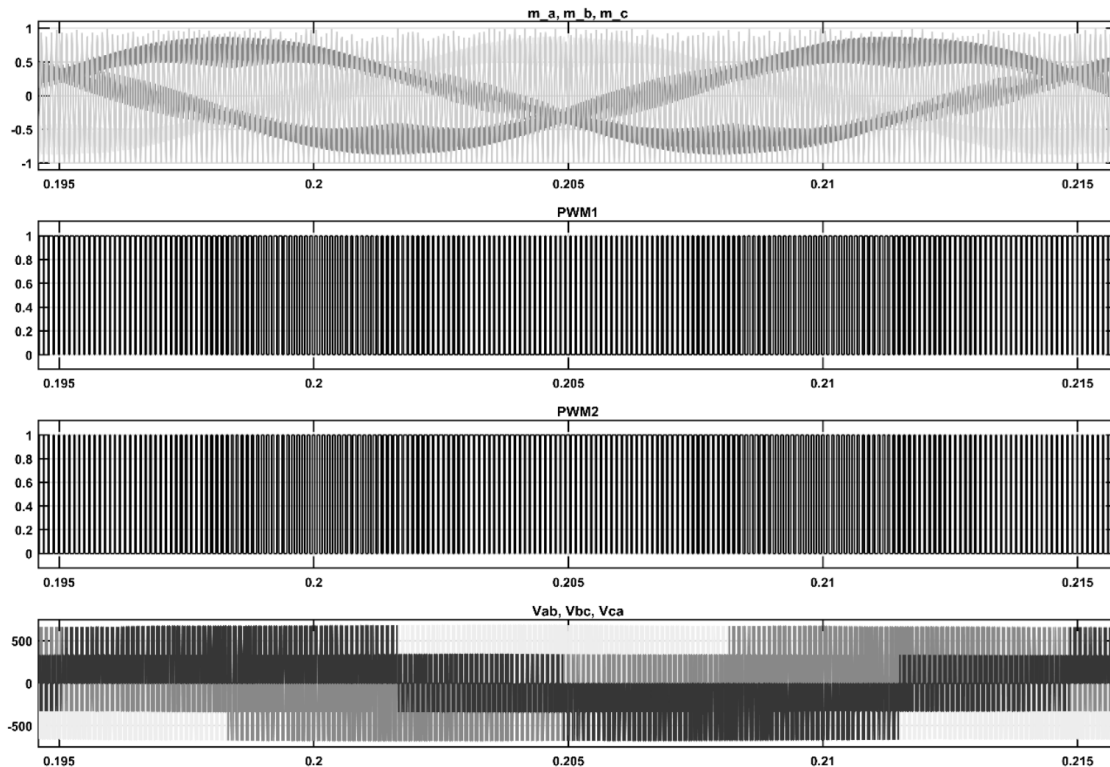
Kako je filterska induktivnost  $L$  sprežujući član obe ose, model regulacione strukture je nelinearan jer struja jedne ose utiče na napon u drugoj osi, čime svojim promenama remeti naponsku ravnotežu i struju druge ose. Budući da je jedan od ciljeva FN sistema proizvodnja samo aktivne snage kako bi faktor snage bio što bliže jedinici referentna vrednost reaktivne komponente struje  $i_{qref}$  jednaka je nuli.

#### 4.2. Trofazna sinusna impulsno-širinska modulacija

Upravljanje prekidačima trofaznog invertora je realizovano trofaznom sinusnom impulsno-širinskom modulacijom čiji je model prikazan na slici 8. Osnovni zadatak sinusne PWM je dobijanje izlaznog PWM signala čija je srednja vrednost tokom PWM periode jednaka modulišućem signalu tj. signalima  $m_d$  i  $m_q$  iz regulacionih kontura koje su prethodno konvertovane u prirodni konvencionalni abc sistem primenom inverzne Blondelove transformacije (dq/abc). PWM impulsi se generišu komparacijom modulišućeg signala ( $m_a$ ,  $m_b$ ,  $m_c$ ) i nosioca signala visoke učestanosti (kHz) najčešće trougaonog talasnog oblika (slika 9).



Slika 8. Model trofazne sinusne impulsno-širinske modulacije



Slika 9. Talasni oblici primjene sinusne širinsko-impulsne modulacije

## 5. Izbor komponenti LCL filtera

Kao što je navedeno, optimalan izlazni filter predstavlja LCL topologiju filtera, pri kojem se za male vrednosti L i C, mogu postići znatno dobre karakteristike slabljena filtera pri eliminaciji/ograničenju strujnih harmonika propisanih zahtevima iz standarda.

Minimalnu vrednost induktiviteta na strani invertora dobija se na osnovu sledeće relacije:

$$L_{1min} = \frac{10 \cdot U_{DC}}{8 \cdot 3 \cdot I_n \cdot f_s} \quad (17)$$

Dozvoljeni ripl struje induktiviteta  $L_1$  je:

$$\Delta I_{L_1} \cong \frac{U_{DC}}{8 \cdot \sqrt{3} \cdot L_1 \cdot f_s} \quad (18)$$

Dozvoljeni ripl struje induktiviteta na strani mreže  $L_2$  određuje se prema:

$$\Delta I_{L_2} \approx \frac{\Delta I_{L_1}}{L_2 \cdot C \cdot \omega_s^2} \quad (19)$$

Pri izboru komponenti  $L_2$  i C treba uvažiti ograničenja data relacijama:

$$C_{max} = \frac{I_n}{20 \cdot \omega \cdot U_n} \quad (20)$$

$$(L_1 + L_2)_{max} = \frac{U_n}{10 \cdot \omega \cdot I_n} \quad (21)$$

Kako bi se uprostio odabir komponenti moguće je izabrati da vrednosti induktiviteta na strani invertora i na strani mreže budu jednake ( $L_1=L_2=L$ ), i na osnovu toga sračunati vrednost kapacitivnosti kondenzatora, tako da vrednost proizvoda  $L_2C$  odgovara graničnoj vrednosti ripla struje induktiviteta  $L_2$  od 0,3%  $I_n$ .

## 6. Zaključak

Upotrebom programskog paketa MATLAB/Simulator, razvijen je model realnog fotonaponskog sistema i formirana simulacija rada sistema u cilju ispitivanja i boljeg razumijevanja uticaja različitih parametara na kvalitet električne energije u tački priključenja fotonaponskog sistema na mrežu.

Kao konfiguracija pretvarača predstavljen je koncept sa fotonaponskim sistemom povezan na električnu mrežu preko DC-AC invertora, upravljano od strane algoritma praćenja maksimalne snage – MPPT. Takođe, predstavljeni su načini modelovanja invertora, od kojih se za simulaciju izabrao SVM režim rada. Analizirane su prednosti i nedostaci ovakve konfiguracije.

Kao osnovna prednost date konfiguracije uočava se mogućnost invertora da isprati maksimalne tačke snage koju dobija od strane fotonaponskog sistema. Ovim se efikasnost sistema podiže na veoma visok nivo. Štaviše, uočeno je da se primenom pogodne dq transformacije može kontrolisati protok aktivne i reaktivne snage. Odnosno, mreža se može osloboditi prenosa reaktivne energije, kao i da se po potrebi injektuje reaktivna energija u mrežu. Ovim se zaključuje da se konfiguracija može koristiti i kao kompenzator reaktivne energije.

Sa druge strane uočen je nedostatak ovog koncepta koji se ogleda u gubicima konverzije jednosmernih veličina u naizmenične. Gubici koji se javljaju pri konverziji se mogu uočiti pri većim snagama koje generiše fotonaponski niz. Uz to postoji i problem generisanja viših harmonika koji prljaju električnu mrežu.

## 7. Literatura

- [1] D.Brajiović,Z.Lazarević,Kvalitet električne energije-Uticaj elektrotermičkih uređaja na električnu mrežu,Monografija,Zavod za fiziku tehničkih fakulteta Univerziteta u Beogradu, Beograd,2016.
- [2] H. Salkić, A. Bijedić, A. Softić, “Analiza uticaja solarne elektrane na kvalitet električne energije distributivne mreže“, CIRED 2016 - X Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije, 26. 09. - 30. 09. 2016, Vrnjačka Banja, Srbija
- [3] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić: Kvalitet električne energije, CEFES, EU Tempus Project CD\_JEP-18126-2003, Novi Sad, 2007.
- [4] A. Softić, Š. Gruhonjić Ferhatbegović, H. Salkić, I. Divković, H. Imamović, „Analiza uticaja solarne elektrane na distributivnu mrežu“, XI Savjetovanje BH CIGRE, 15-19.9.2013, Neum, BiH, STK C5
- [5] Auditorna predavanja dr Dragan Brajiović
- [6] SRPS EN 50160:2023 „Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža“, Instituta za standardizaciju Srbije, 29.12.2023. godine.
- [7] EN 50160:2022, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks”, CENELEC, December 2022
- [8] Pravila o radu distributivnog sistema iz oblasti kvaliteta električne energije, Operatora distributivnog sistema „EPS Distribucija“ d.o.o. Beograd, Beograd, jul 2017.