

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.03)**B4.03****UTICAJ UREĐAJA ENERGETSKE ELEKTRONIKE PV ELEKTRANA NA KVALITET
ISPORUKE ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUTIVNU MREŽU****THE INFLUENCE OF POWER ELECTRONICS DEVICES OF PHOTOVOLTAIC POWER
PLANTS ON THE POWER QUALITY DELIVERY TO THE DISTRIBUTION NETWORK****Željko V. Despotović***

Kratak sadržaj: Tokom poslednje decenije potražnja za energijom iz elektroenergetske mreže značajno je porasla zbog povećanja korisnika i uvećanja zahteva u industrijama i postrojenjima velikih snaga (čeličane, naftna postrojenja, industrija hrane, industrije za preradu i prečišćavanje voda i sl.). Ovo je dovelo do značajnog povećanja globalnih emisija zagađivača vazduha, koje su posledica konvencionalne proizvodnje energije (pre svega termoelektrana). Stoga je u cilju smanjenja emisija udeo obnovljivih izvora energije (OIE) u elektroenergetskoj mrežu značajno povećan. Fotonaponski sistemi su postali najpopularniji resursi jer je njihov potencijal ogroman, tako da je svetski instalisani fotonaponski kapacitet poslednjih godina povećan na više od 635 GW, pokrivajući oko 2% svetske potražnje za električnom energijom. Energetska elektronika je postala suštinski deo fotonaponske generacije. Napori za razvojem nove generacije energetski efikasnih pretvarača sve više dobijaju na značaju. Trenutno su invertori (DC/AC pretvarači) sa više nivoa tzv. *multi level inverters* (MLI) postali interesantniji u poređenju sa invertorskim pretvaračima sa dva nivoa, zbog njihove sposobnosti da obezbede manji harmonijski sadržaj, manje elektromagnetne smetnje, veću efikasnost i da prime veći ulazni DC napon sa PV panela. U ovom radu je dat pregled invertora sa dva i tri nivoa, razvoj i izazovi sa praktičnim preporukama za njihovo korišćenje u PV sistemima. Takođe, u radu su naznačeni mogući problemi i uticaj ovih uređaja energetske elektronike, kao sastavnog dela PV elektrana, na elektroenergetsku distributivnu mrežu i dat je kraći osvrt na relevantne standarde u ovoj oblasti.

Ključne reči: *Fotonaponske elektrane, energetska elektronika, kvalitet napajanja, solarni invertori, harmonici, standardi*

Abstract: During the last decade, the demand for energy from the power grid has grown significantly due to the users' increase and the demand increase in industries and large power plants (steel mills, oil plants, food industry, water treatment and purification industries, etc.). This has led to a significant increase in global emissions of air pollutants due to conventional energy production (dominantly from thermal power plants). This has led to a significant increase in global pollutant emissions air, which are a consequence of conventional energy production (primarily thermal power plants). Photovoltaic systems have become the most

* Željko V. Despotović, Institut Mihajlo Pupin, zeljko.despotovic@pupin.rs

popular resources because their potential is very big, so the world's installed photovoltaic capacity has increased to more than 635 GW in the last years, covering about 2% of the world's electricity demand. Power electronics have become an essential part of photovoltaic generation. Efforts to develop a new generation of energy-efficient converters are gaining more and more importance. Currently, multi-level inverters (MLI) have become more interesting compared to two-level inverters, due to their ability to provide fewer harmonics, less electromagnetic interference, higher efficiency and to operate a higher input DC voltage from the PV panels. This paper provides an overview of two and three-level inverters, their development and challenges with practical recommendations for their use in PV systems. The paper will also indicate possible problems and the impact of these power electronics devices as an integral part of PV power plants, on the electric distribution power network, and a brief overview of relevant standards in this area will be given.

Key words: *Photovoltaic power plants, power electronics, power quality, PV inverters, harmonics, standards*

1 UVOD

U poslednjoj deceniji potražnja za električnom energijom je povećana kako bi se zadovoljili energetske zahteve i energetska proširenja u elektroenergetskom sistemu. Globalne temperature promene i iscrpljivanje fosilnih goriva, ali i njihova cena postali su motivacija za novčanim ulaganjem u istraživanja i razvoj sistema obnovljivih izvora energije (OIE). Takođe jedna od motivacija je smanjenje emisija ugljen-dioksida CO₂ i smanjenje karbonskog otiska (tzv. dekarbonizacija). Većina zemalja su uložile dodatne napore i novčana sredstva za promovisanje istraživanja, razvoja i implementacije raznih oblika obnovljive energije u praksi i svakodnevnom životu. Ambiciozni ciljevi se pre svega odnose na proizvodnju energije iz tzv. „zelenih“ izvora pri čemu je u narednim godinama veoma bitan aspekt ispunjenje zahteva za potražnjom i unapređenje kako ekoloških zahteva, tako i zahteva za kvalitetom isporučene električne energije [1].

Solarna energija se u suštini ne razlikuje od ostalih vidova prirodne obnovljive energije (vetra, biomase, plime i oseke, energije talasa i sl.). Ona je relativno čista jer ima nizak uticaj na životnu sredinu, a takođe ublažava iscrpljivanje rezervi fosilnih goriva, pre svega uglja i gasa. Treba napomenuti da uprkos ovim prednostima, promena izlazne snage jednog tipičnog fotonaponskog (eng. *photovoltaic*-PV) postrojenja je značajno uslovljena pre svega, prirodnim ponašanjem Sunca tokom dnevnog vremenskog intervala. Izlazak i zalazak Sunca dovode do varijacije proizvodnje električne energije iz PV panela. Pored ovoga, nastupanjem oblačnosti energetske izlaz PV postrojenja može biti redukovano i do 60%-80% [1], [2]. U ovom slučaju će biti potrebno rezervno napajanje u cilju kompenzacije promene energetske izlaza u cilju održavanja izlaznog napona PV postrojenja u propisanim granicama i zadovoljenje standarda kvaliteta napajanja električnom energijom i kvaliteta isporuke električne energije u elektroenergetsku mrežu (EEM). Ako je odziv rezervnog napajanja prespor, onda i kvalitet isporučene energije sa jedne strane utiče na prilike u elektroenergetskoj mreži, a sa druge strane spori odziv može negativno da utiče na rad samog PV postrojenja.

Uprkos prethodno pomenutim nedostacima i poteškoćama, PV sistemi i dalje imaju najbrži rast od svih ostalih tipova obnovljive energije. Najnovija tržišna analiza Međunarodne energetske agencije govori da je globalna solarna proizvodnja premašila granicu od 2000 TWh u 2024. i da je porasla je za 30% u odnosu na prethodnu godinu, što predstavlja najveću stopu rasta od 2017. (475 TWh po kalendarskoj godini). Predviđa se da će solarna proizvodnja zadovoljiti otprilike polovinu rasta globalne potražnje za električnom energijom do 2027. [3].

S druge strane, povećanje integracije PV sistema u ovom obimu bi potencijalno moglo doneti probleme u pogledu rada sistema, gde bi obrnut tok snage, pri višim nivoima penetracije, mogao dovesti do porasta napona na sabirnicama i shodno tome porasta gubitaka u prenosu [1], [4]. U nekim radovima se razmatra ova problematika i pokazuje se da injektiranje snage od strane PV postrojenja dovodi do lokalnog opterećenja na sabirnicama, što dovodi do smanjenja gubitaka i poboljšanja profila napona [5], [6]. Prethodno pomenuti slučaj je očigledan dokle god se ima tok snage od transformatorske stanice (TS) do strane korisnika (kada je potrošnja veća od PV proizvodnje). Ako je proizvodnja PV sistema veća od snage opterećenja „nizvodno” od PV lokacije, tok snage prema TS može biti i obrnut. Kao rezultat ovoga može doći do porasta napona duž distributivnog voda sistema. Porast napona kod krajnjeg korisnika ograničava iznos nivoa penetracije koji se želi ugraditi u distributivnu mrežu. Prirodno ponašanje PV postrojenja u ovom slučaju je blisko fluktuirajućem profilu. Relativno brze varijacije snage PV postrojenja dovode do fluktuacija napona u toku njegovog rada, tako da iz ovoga proizilazi i njegov mogući uticaj na regulaciju napona.

Usled scenarija intenzivne penetracije distribuiranih energetske resursa, između ostalog i PV postrojenja u elektroenergetskom sistemu, došlo je do značajnog povećanja korišćenja uređaja energetske elektronike povezanih na EEM. PV postrojenja se baziraju dominantno na uređajima energetske elektronike DC/AC pretvaračima - invertorima. Ovi uređaji, popularno nazvani „solarni invertori” ili „PV invertori” su prilagođeni ulaznom DC naponu sa stringova solarnih panela koji su pozicionirani na DC strani solarne elektrane, a na svom izlazu obezbeđuju trofazni sinusni napon sa relativno niskim faktorom izobličenja. Na ulaznom DC delu invertora je po pravilu implementirano praćenje tačke maksimalne snage solarnih panela (tzv. *maximum power point tracking* – MPPT).

PV invertori u principu rade u različitim režimima, uključujući veoma česte fluktuacije sunčevog zračenja. Kao rezultat ovih okolnosti, PV invertori mogu injektirati više harmonike napona i struja, utičući na kvalitet isporuke električne energije u tački povezivanja na EEM. Viši harmonici dovode do povećanja gubitaka snage i energije, smanjenja proizvodnog kapaciteta PV sistema, degradacije i smanjenja veka trajanja mrežnih komponenti i prouzrokuju kvarove na zaštitnoj opremi. Stoga postoji motivacija za dodatno proučavanje PV sistema povezanih na mrežu da bi se razumeli problemi koji su posledica velikih instalacija PV invertora [7].

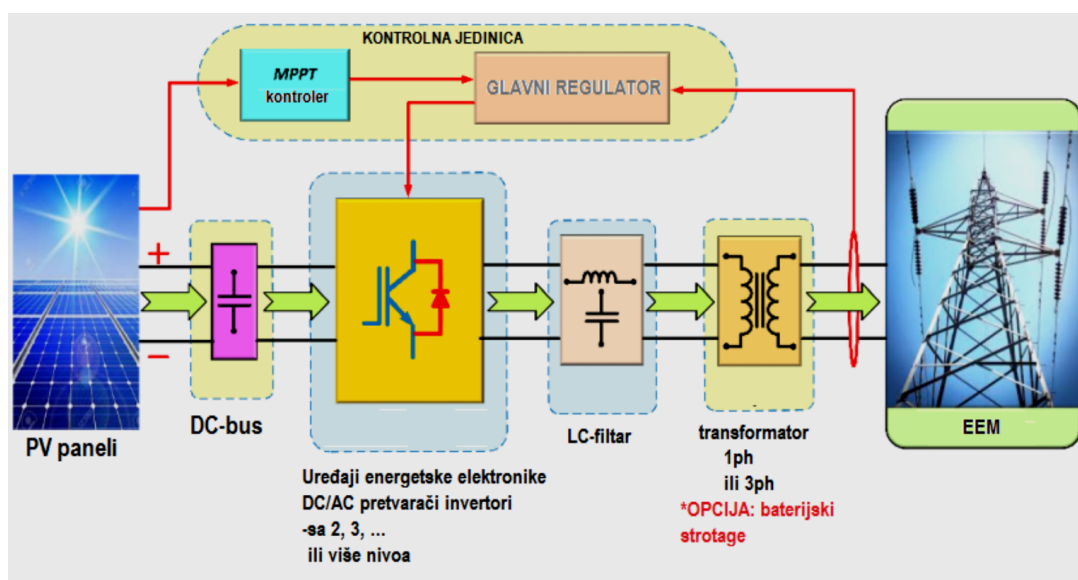
Važan parametar kvaliteta isporučene električne energije PV elektrana je DC komponenta struje ili „DC offset”. Treba napomenuti da energetski transformatori, kako na pragu, tako i u samom elektroenergetskom sistemu „jako pate” od jednosmernog zasićenja magnetnog jezgra, koje uslovljava značajniju struju magnetizacije, što može dovesti do pregrevanja magnetnog jezgra. Vrlo često dolazi do tzv. „ekskurzije” magnetnog fluksa, magnetno jezgro odlazi u zasićenje što dovodi do nastanka kratakog spoja. Pored ovoga, posledično može doći do termičkog stresa, koji na kraju skraćuje životni vek transformatora [8], [10].

Struja curenja u PV sistemima, koja je posledica primene PV invertora, takođe poznata kao rezidualna struja ili eng. „leakage current”, je posledica parazitnog kapaciteta između PV sistema i zemlje (PV elektrane na tlu) ili PV sistema i konstrukcije objekta koji je uzemljen (PV elektrane na krovu). Kada parazitna kapacitivnost između PV sistema i elektroenergetske mreže formira petlju, napon zajedničkog moda će proizvesti struju zajedničkog moda na parazitnoj kapacitivnosti. Topologije PV invertora i načini PWM modulacije primenjeni u njima će imati dodatni uticaj na rezidualnu struju, kao i na načine njene detekcije i kontrole [11]-[13].

2 KONCEPTI „ON-GRID” SOLARNIH SISTEMA

Solarni mrežni sistem, popularno nazvan „On-grid” PV sistem jeste jedan složeni sistem u kome se jednosmerna struja koju generiše sistem solarnih panela raspoređenih u nizove (stringove), putem mrežnog DC/AC pretvarača pretvara u naizmeničnu struju. Ova struja mora da ispunji odgovarajuće zahteve EEM kako bi PV sistem mogao biti na nju priključen. Standardno se ovi sistemi projektuju bez baterijske banke, ali u novije vreme sve više insistira na baterijskim skladištima (eng. *battery storage*) koja obezbeđuju skladištenje proizvedenih viškova električne energije u PV sistemima [14].

Na Slici 1 je dat prikaz standardnog „On-grid” sistema koji u sebi ne sadrži baterijsko skladište. Ovaj sistem je baziran na upotrebi standardnih PV invertora sa dva, tri ili više nivoa. Na ulaznoj DC strani invertora se nalaze stringovi PV panela i pripadajuće DC međukolo (DC-Bus) sastavljeno od elektrolitskih kondenzatora, DC međukolo je standardno na naponu 800Vdc, ali u nekim novijim verzijama invertora sa više nivoa ovaj napon ide i do 1500V.

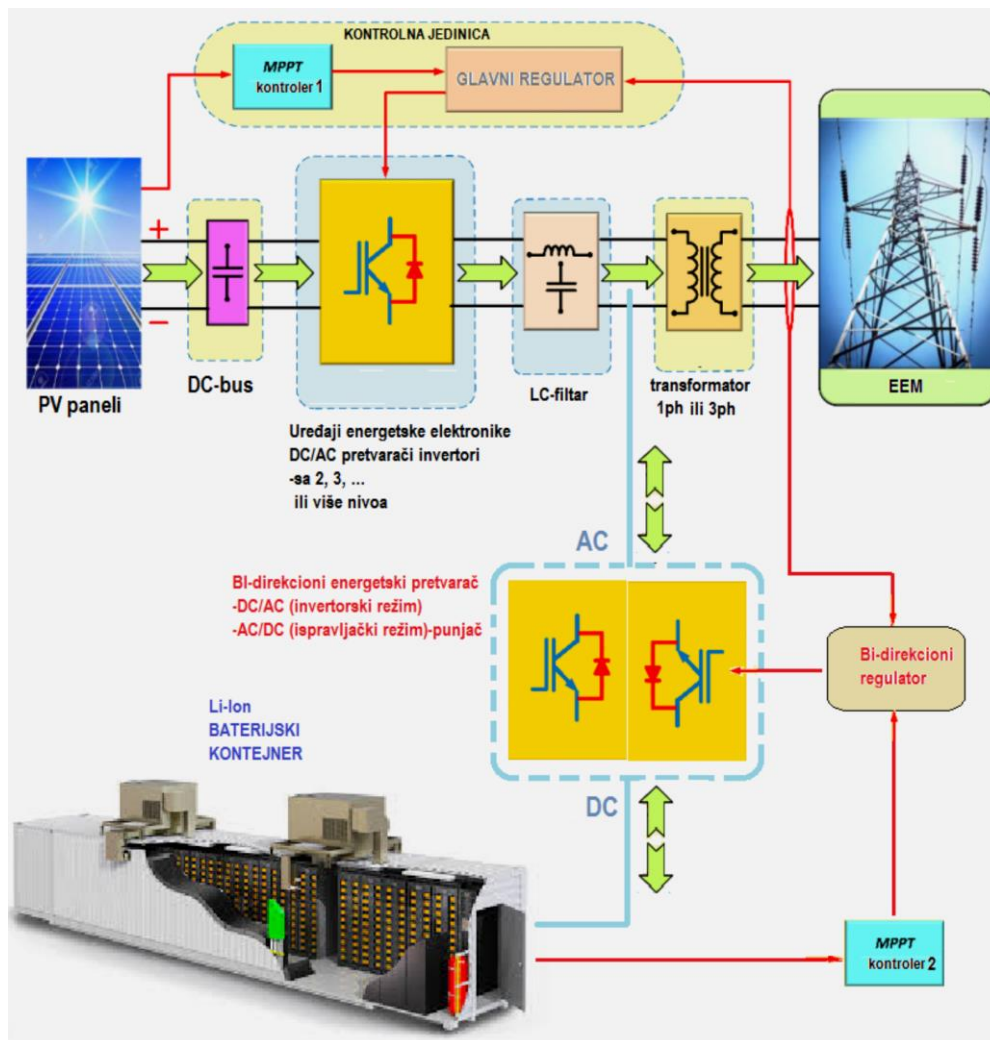


Slika 1: Principski prikaz standardnog „On-grid” fotonaponskog sistema

Na izlazu invertora se koristi L-C filtar kako bi se izlazni PWM napon invertora filtrirao i kako bi se na ovaj način zadovoljio kvalitet izlaznog sinusnog napona invertora (pre svega u pogledu ukupnog faktora izobličenja-THD). Energetski transformator (za manje snage monofazni, a za veće snage trofazni) služi da prilagodi izlazni napon invertora sredjenaponskoj (SN) EEM. Ovaj transformator u trofaznim sistemima je obično prenosnog odnosa 0,4 kV/10 kV ili 0,4 kV/20 kV. Ukoliko je PV inverter projektovan za direktno priključenje na mrežu, onda energetski transformator nije neophodan i u tom slučaju je sprega sa mrežom ostvarena preko trofaznog L-C ili L-C-L filtra. Ključni deo (tzv. „srce”) fotonaponskog sistema čini kontrolna jedinica koja u principu sadrži glavni regulator kojim se obezbeđuje kontrola izlaznog napona i struje PV invertora (odnosno kontrola snage) i MPPT kontroler kojim se obezbeđuje praćenje tačke maksimalne snage PV panela.

Na Slici 2 je dat prikaz „On-grid” solarnog sistema sa baterijskim skladištem i dvosmernim (bi-direkcionim) AC/DC pretvaračem. U ovom slučaju se standardnom „On-grid” PV sistemu dodaje još jedan uređaj energetske elektronike. Reč je o bi-direkcionom pretvaraču koji može raditi u (1) ispravljačkom režimu (AC/DC) i u tom slučaju se puni Li-Ion baterijsko skladište

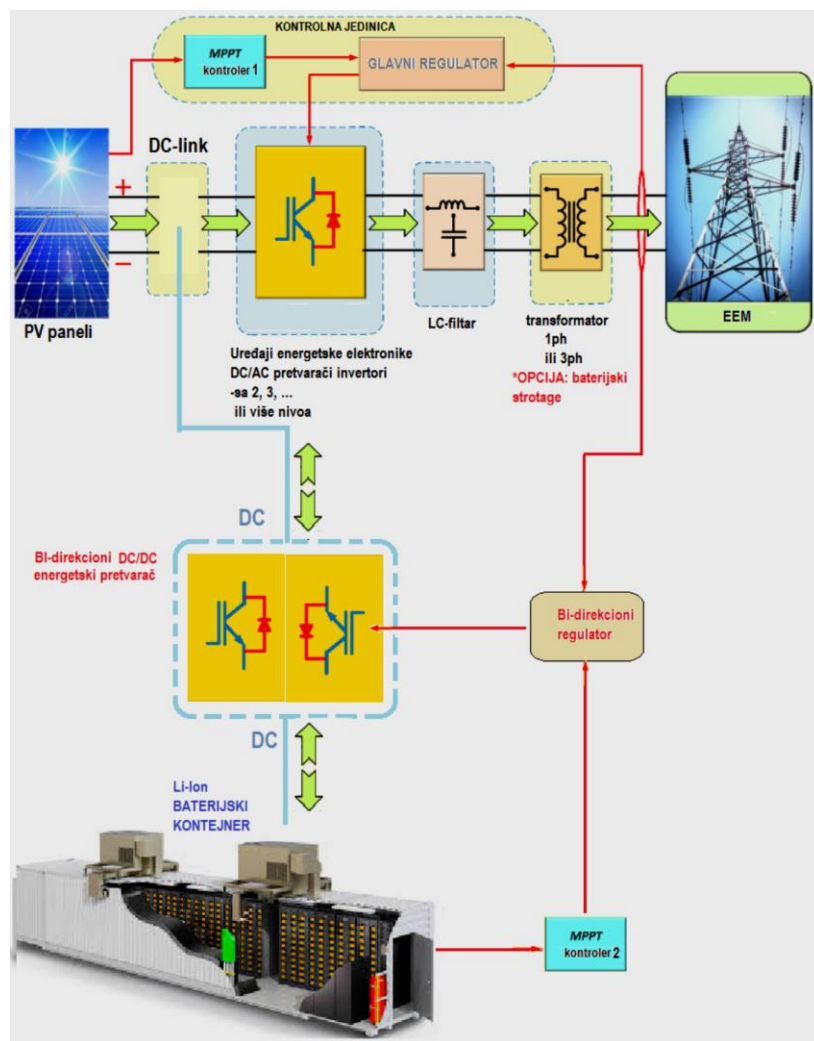
ili (2) invertorskom režimu, kada se prazni baterijsko skladište i energija se usmerava ka glavnom transformatoru, odnosno preko njega ka EEM. Pored MPPT-1 koji prati tačku maksimalne snage PV panela u sistemu figuriše i MPPT-2 koji prati maksimalne performanse baterijske banke: napon, struju, energiju, stanje napunjenosti i dubinu pražnjenja i sl. (U_{bat} , I_{bat} , P_{bat} , SOC%, DOD%).



Slika 2 : Principski prikaz standardnog „On-grid“ fotonaponskog sistema sa baterijskim skladištem i bi-direkcionim AC/DC pretvaračem

Na Slici 3 je dat prikaz „On-grid“ solarnog sistema sa baterijskom bankom i dvosmernim DC/DC pretvaračem. U ovom slučaju se standardnom „On-grid“ PV sistemu se dodaje još jedan uređaj energetske elektronike. Reč je o bi-direkcionom DC/DC pretvaraču koji može obezbediti protok energije od PV panela ka baterijskoj banci (punjenje sistema Li-Ion baterija) ali i obrnuti smer toka energije od baterijskog skladišta ka glavnom invertoru PV elektrane.

U ovom režimu se prazni baterijsko skladište i energija se usmerava ka glavnom invertoru, odnosno transformatoru, preko koga se isporučuje u EEM. Pored MPPT-1 regulatora, koji prati tačku maksimalne snage PV panela u sistemu figuriše i MPPT-2 regulator koji prati radnu tačku maksimalnih performansi baterijskog skladišta.



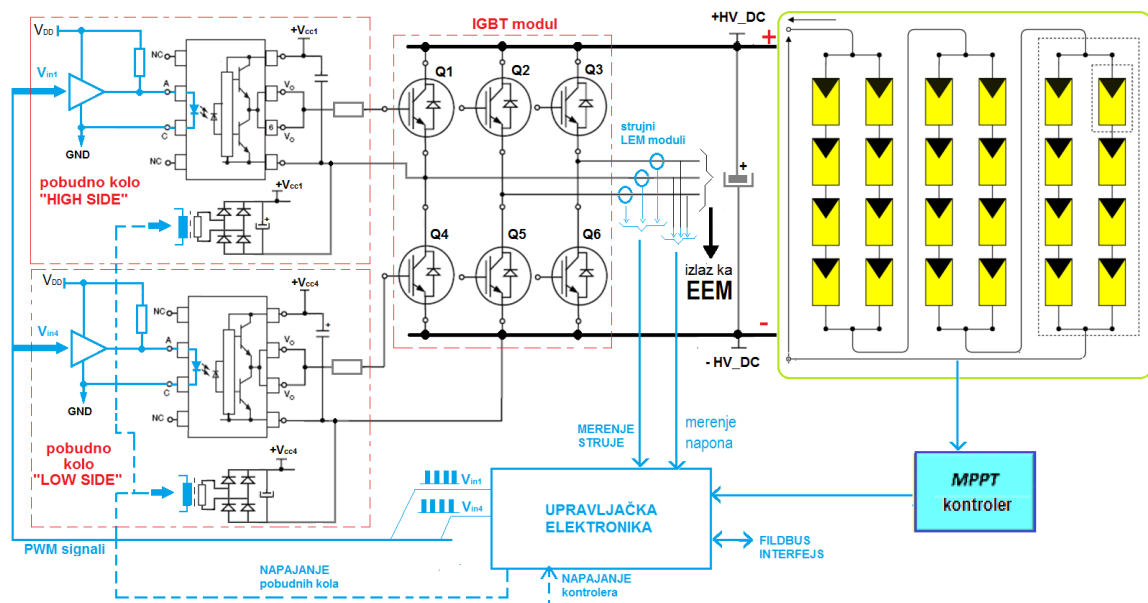
Slika 3 : Principski prikaz standardnog „On-grid” fotonaponskog sistema sa baterijskim skladištem i DC/DC bidirekcionim pretvaračem

3 TOPOLOGIJE PV INVERTORA

U ovom poglavlju će biti razmotrene dve najčešće korišćene topologije invertora koje se primenjuju u solarnim sistemima: (1) topologija sa dva nivoa („*two level*”) i (2) topologija sa tri nivoa („*three-level*”).

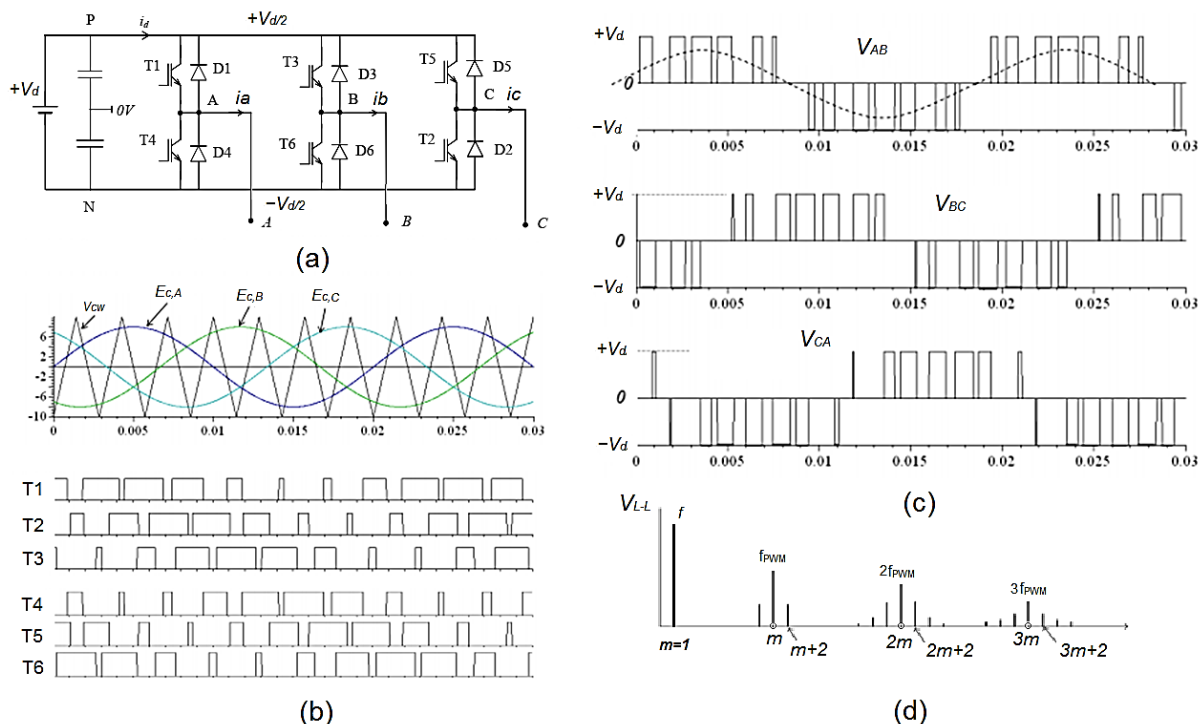
3.1. Invertorska topologija sa dva nivoa

U fotonaponskim mrežnim postrojenjima se standardno koristi topologija PV invertora sa dva nivoa i sa DC ulaznim naponom koji je dobijen od stringova solarnih panela. Ova topologija i pripadajuće pobudno kolo IGBT prekidača, kao i upravljačka struktura su prikazani na Slici 4. U okviru sistema se koriste MPPT kontroler i PWM kontroler. MPPT kontroler obezbeđuje praćenje tačke maksimalne snage PV panela, dok je u PWM kontroleru implementirana PWM modulacija (unipolarna ili bipolarna). Pobuda IGBT prekidača se obezbeđuje putem galvanski opto-izolovanih drajvera („*high side*” i „*low side*”) i za svaki od njih su obezbeđena nezavisna i galvanska izolovana napajanja. Svaki od drajvera je preko TTL kola povezan sa upravljačkim PWM podsistemom. Od veoma bitnog značaja je merenje izlaznog napona i izlazne struje PV invertora, koje se obezbeđuje naponskim i strujnim LEM modulima baziranim na Holovom senzoru.



Slika 4: Principski prikaz topologije solarnog invertora sa dva nivoa i pripadajućih pobudnih kola i upravljačke elektronike

Na Slici 5 su prikazani topologija, karakteristični talasni oblici i upravljački signali za inverter sa dva nivoa, kao i spektar izlaznog linijskog napona. Na Slici 5(a) je prikazana IGBT topologija invertora sa dva nivoa i DC međukolom sa srednjom tačkom. Na Slici 5(b) su prikazani talasni oblici referentnih sinusoida i trougaonog nosioca, kao i upravljački signali IGBT prekidača.



Slika 5: IGBT inverter sa dva nivoa; (a) osnovna topologija, (b) upravljački signali, (c) međufazni naponi, (d) harmonijski spektar međufaznog napona

Na slici 5(c) su dati talasni oblici izlaznih linijskih napona V_{AB} , V_{BC} i V_{CA} . Na Slici 5(d) je prikazan harmonijski spektar jednog od linijskih napona. U spektru se uočava osnovni

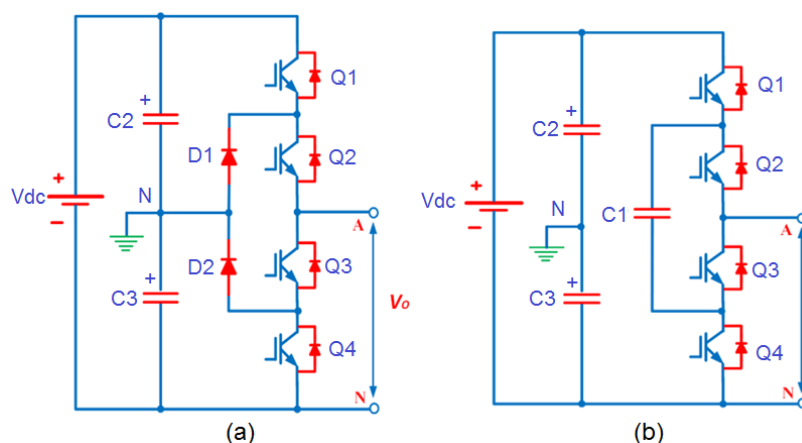
harmonik i viši harmonici. Ovi viši harmonici se bez većih problema mogu relativno lako potisnuti sa L-C ili L-C-L filtrima.

Na osnovnoj učestanosti f u spektru se uočava dominantna komponenta napona (sinusna promena srednje vrednosti napona). Spektar takođe obuhvata i izraženu komponentu pri učestanosti PWM-a, f_{PWM} . Dve vidljive bočne komponente postavljene su na rastojanju $\pm 2f$. Pored ovoga spektar ima još dve grupe postavljene pored $2f_{PWM}$ i pored $3f_{PWM}$. Postoje i spektralne komponente sa manjom amplitudom, kao i komponente u opsegu frekvencija iznad $3f_{PWM}$. Sve komponente iznad osnovne učestanosti f su posledica PWM i talasnih oblika faznih napona [15].

3.1. Invertorska topologija sa tri nivoa

Invertorska topologija sa tri nivoa („*three-level*”) u novijim generacijama invertora dobija na značaju obzirom da je njen harmonijski sadržaj povoljniji od topologije invertora sa dva nivoa. Takođe ova topologija se može uspešno primeniti u sistemima sa relativno visokim naponima DC međukola, a ovaj slučaj se upravo ima u sistemima PV panela koji sadrže veći broj solarnih panela u nizu po stringovima (tipično za ukupni napon DC međukola od 1500V, odnosno $\pm 750V$, ako se koristi srednja tačka u DC međukolu). Treba napomenuti da ova topologija sadrži veći broj IGBT prekidača što u izvesnoj meri vodi ka složenijem upravljanju.

U ovim topologijama je od suštinskog značaja „čvrsto držanje” i simetriranje neutralne tačke. Shodno prethodnom, razlikujemo dva najčešće razmatrane topologije: (1) topologija sa tri nivoa sa diodama za simetriranje i fiksiranje neutralne tačke (eng. *three-level neutral point clamped-3L NPC*) i (2) topologija sa tri nivoa sa „lebdećim” kondenzatorom (eng. *three-level flying capacitor-3L FC*). Prikaz ovih topologija po jednoj fazi (vertikali) trofaznog invertorskog mosta je dat na Slici 6.

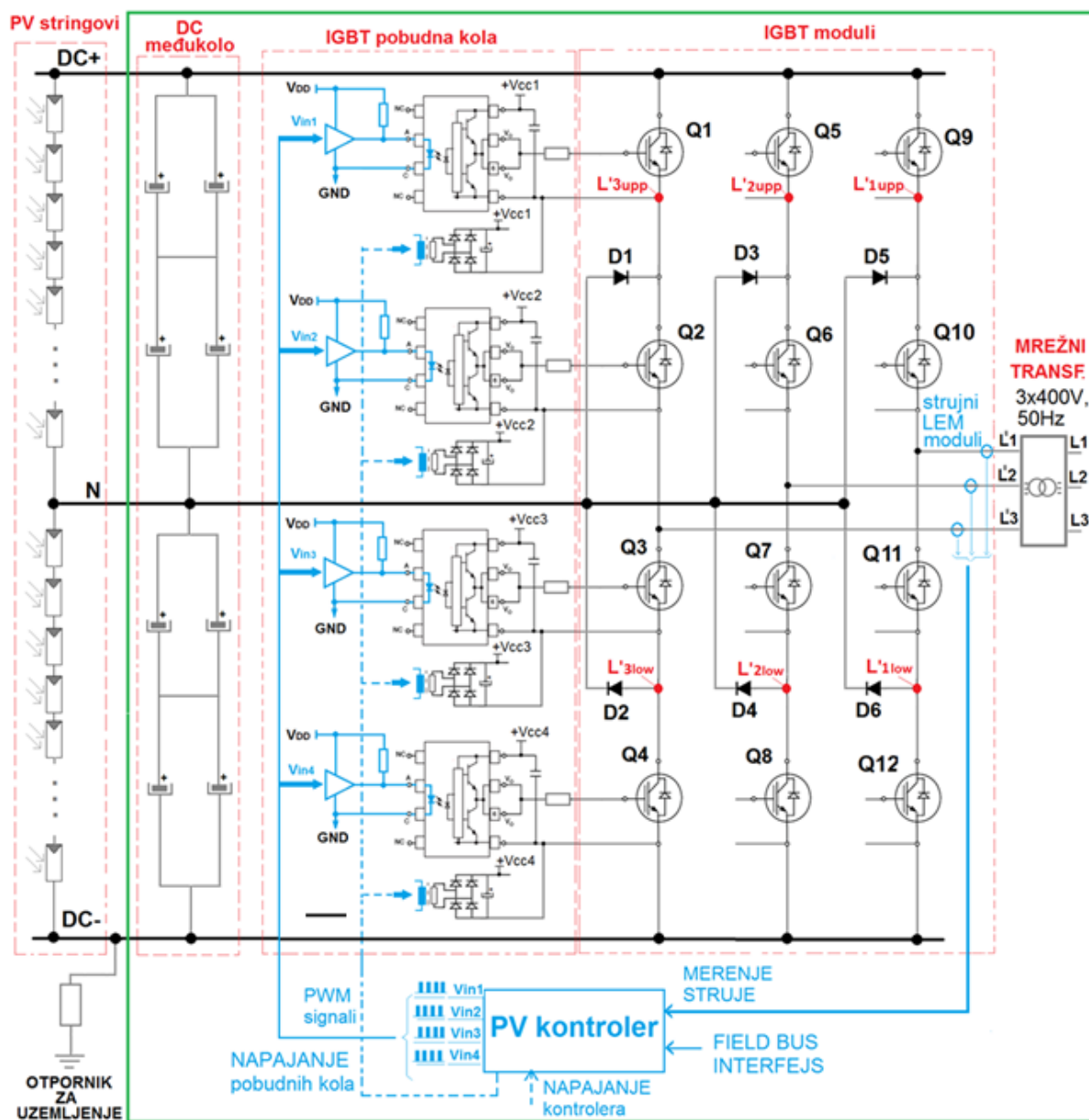


Slika 6 : Topologije invertora sa tri nivoa; (a) 3L NPC, (b) 3L FC

Na Slici 6(a) je prikazana 3L NPC topologija. Ova topologija se odlikuje relativno visokom efikasnošću na prekidačkoj učestanosti (tipično 10kHz-20kHz), relativno jednostavnom kontrolom, redukovanim brojem DC izvora. Ova topologija je podesna za „*fault-tolerant*” primene strujne regulacije. Upotreba neutralnih spregnutih dioda može rešiti pitanje balansiranja napona, neujednačenih gubitaka i napona između IGBT prekidača i neutralne tačke. Mane ove topologije su kompleksnost kola za balansiranje napona, nejednaka raspodela gubitaka između IGBT prekidača na donjoj i gornjoj strani polumosta, kao i porast broja primenjenih dioda sa porastom nivoa invertora (za nivoa > 3).

Na Slici 6(b) je prikazana 3L FC topologija. Prednosti ove topologije su smanjenje broja potrebnih DC izvora, fazni viškovi su dostupni za balansiranje nivoa napona kondenzatora, pogodna je za primene jednostavne kontrole aktivne i reaktivne snage. Za ovu topologiju nisu neophodni filtri za redukciju viših harmonika ili su oni značajno gabaritno manji u odnosu na slučaj 3L NPC topologije. Mane ove topologije su složenija kola za uravnoteženje napona, neophodnost brojnih kondenzatora za relativno visoke nivoe napona, visoka prekidačka učestanost za prenos aktivne snage, a shodno tome i visoki prekidački gubici i manja efikasnost u odnosu na 3L NPC topologiju. Takođe, ova topologija je skuplja od 3L NPC topologije.

Na Slici 7 je prikazana implementacija 3L NPC topologije u jednom PV invertoru čiji je ulazni DC napon 1500V (odnosno $\pm 750V$ referisanih u odnosu na neutralnu tačku N). DC međukolo je podeljeno na dva dela: od DC+ do N je primenjena grupa kondenzatora na naponu $+V_{dc}/2$ (tipično +750V) i od DC- do N je primenjena grupa kondenzatora na naponu $-V_{dc}/2$ (tipično -750V) [16].



Slika 7 : Principski prikaz PV invertora sa implementiranom 3L NPC topologijom)[16]

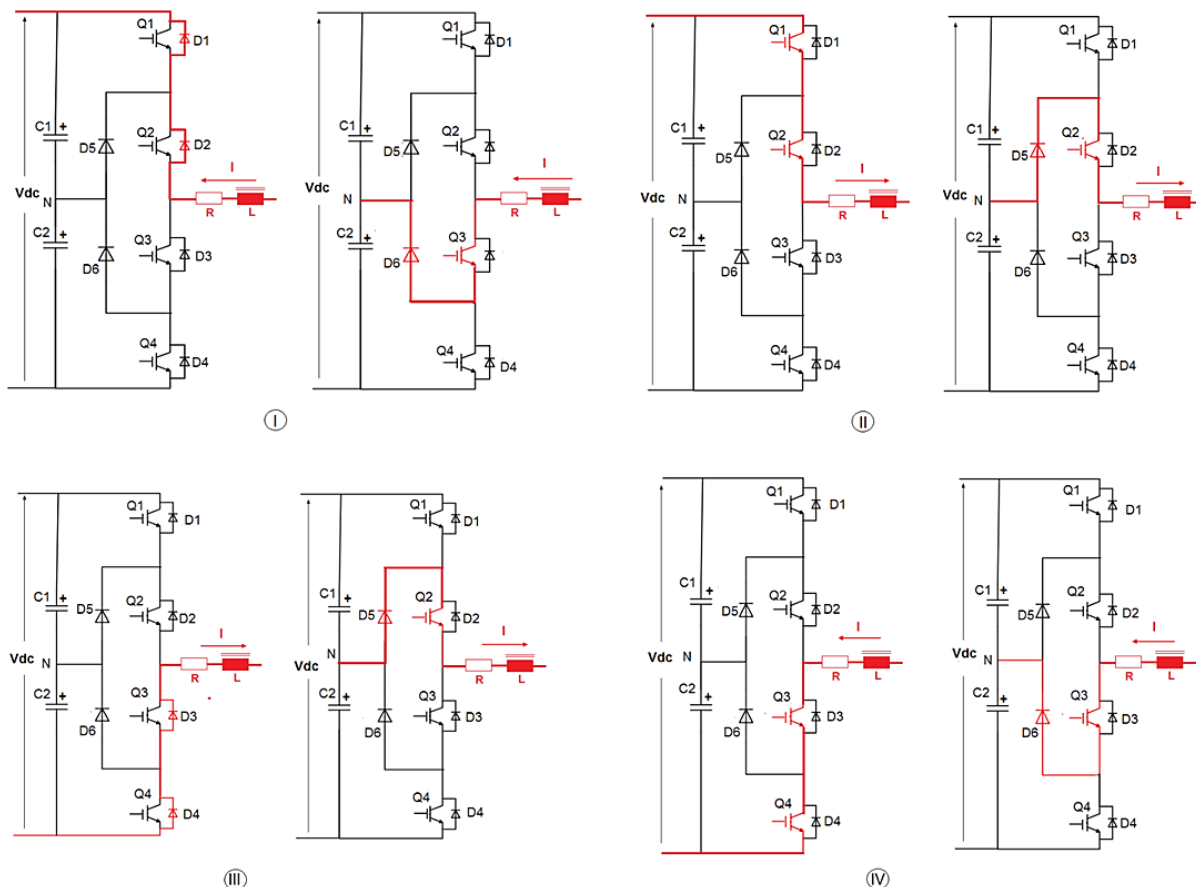
Kao i u slučaju topologije sa dva nivoa, u ovom slučaju su sva pobudna kola IGBT prekidača galvanski izolovana optokaplerima i preko odgovarajućih TTL kola su spregnuta sa PV kontrolerom. Svaki od IGBT drajvera U cilju strujne regulacije je obezbeđeno merenje izlazne struje PV invertora. Kao komunikacioni interfejs je ovde najčešće korišćen *Field BUS*.

U Tabeli 1 su dati pregledno statusi prekidačkih elemenata (IGBT prekidača i dioda) za jednu fazu invertora sa tri nivoa (jedna vertikalna trofaznog 3L NPC mosta) koja je data na Slici 7. Posmatrani su prekidači Q1-Q4 i diode D1-D2.

Tabela 1: Prekidački statusi za topologiju 3L NPC

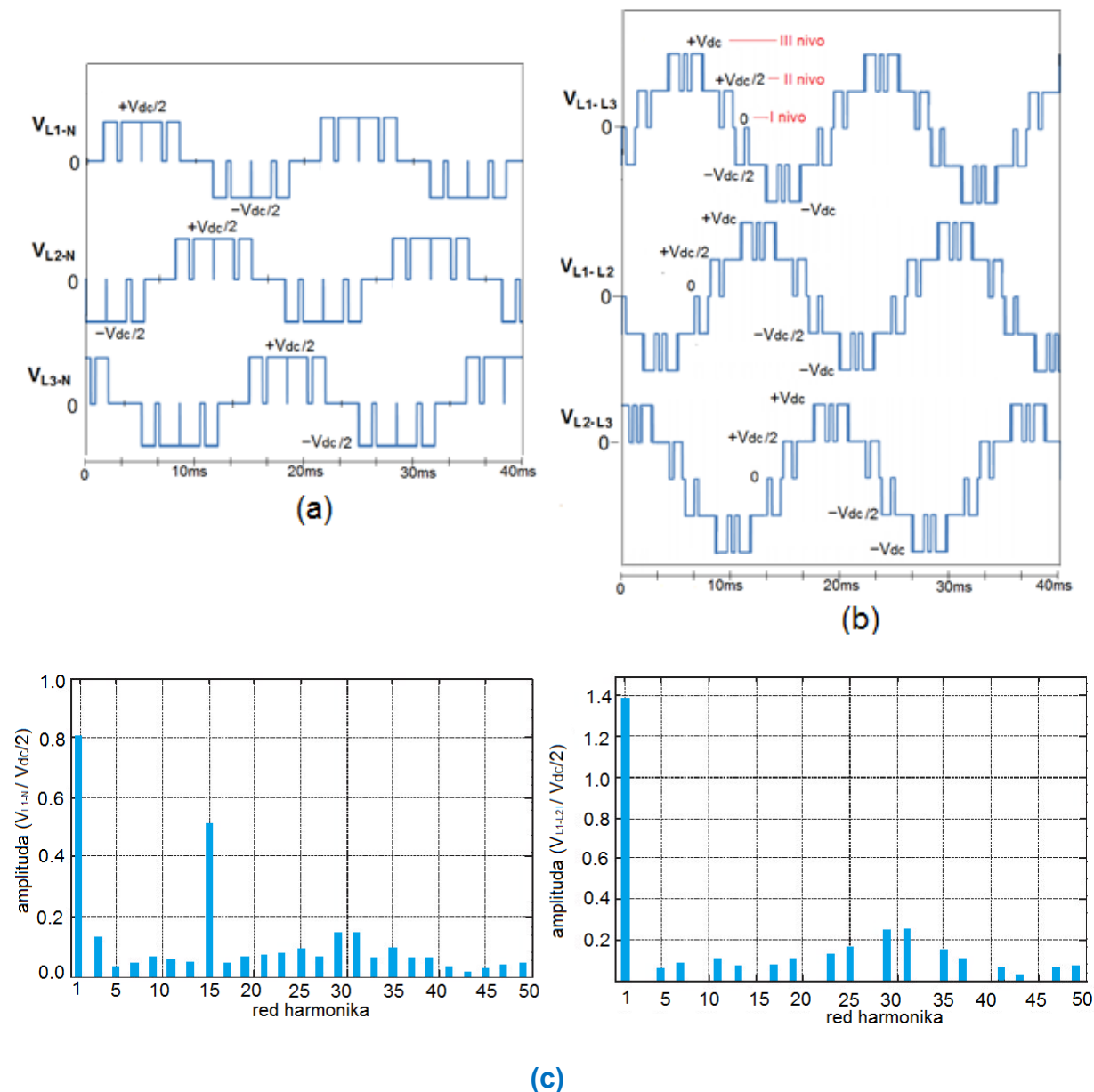
IGBT	$V_{out}=+V_{dc}/2$	$V_{out}=V_N=ref\ 0$	$V_{out}=-V_{dc}/2$
Q1	ON	OFF	OFF
Q2	ON	ON	OFF
Q3	OFF	ON	ON
Q4	OFF	OFF	ON

Na Slici 8 su prikazane sekvence uključivanja prekidačkih elemenata (IGBT prekidača i NPC dioda) u skladu sa statusima koji su prikazani u Tabeli 1. Prikazane sekvence uključjenja se odnose na jednu fazu trofaznog izlaza PV invertora (vertikalna 1 IGBT invertorskog trofaznog mosta).



Slika 8 : Sekvence uključjenja prekidačkih elemenata (dioda i IGBT prekidača) za topologiju invertora sa tri nivoa i za induktivno opterećenje po naznačenim oblastima od interesa I, II, III, IV

Na Slici 9 su dati karakteristični talasni oblici napona za ovu topologiju. Na Slici 9(a) su prikazani talasni oblici faznih napona V_{L1-N} , V_{L2-N} , V_{L3-N} u odnosu na neutralnu tačku N u DC-međukolu solarnog invertora, dok su na Slici 9(b) prikazani talasni oblici međufaznih napona V_{L1-L2} , V_{L1-L3} , V_{L2-L3} . Na Slici 9(c) su prikazani spektri relativnih amplituda (amplituda u odnosu na napon $V_{dc}/2$) harmonika jednog faznog i jednog linijskog napona.



Slika 9: Talasni oblici i spektri harmonika faznih napona i jednog međufaznog napona za topologiju invertora sa tri nivoa (3L NPC); (a) talasni oblici tri fazna napona, (b) talasni oblici tri međufazna napona, (c) spektri harmonika faznog (levo) i međufaznog napona (desno)

U nastavku je dat uporedni pregled nekih osnovnih karakteristika dve prethodno predstavljene topologije (nivoi napona, kvalitet izlaznih talasnih oblika, prekidačke karakteristike i harmonici, efikasnost i stres komponenti i na kraju ekonomsko poređenje u pogledu cene).

Naponski nivoi

Invertori sa dva nivoa, daju na faznom izlazu napon sa dva nivoa ($+V_{dc}$, pozitivni napon DC međukola i $-V_{dc}$, odnosno negativni napon DC međukola). Ovo omogućava visokofrekventno prebacivanja izlaza između ova dva nivoa. Kod 3L NPC invertora se uvodi jedan dodatni

naponski nivo (vrednosti 0V) između nivoa $+V_{dc}$ i $-V_{dc}$. Ova konfiguracija omogućava finiju stepenastu aproksimaciju sinusnog talasa naizmenične struje, zbog manjih koraka napona u odnosu na topologiju sa dva nivoa. Ovo poboljšava kvalitet izlaznog talasnog oblika napona, a takođe posledično i kvalitet talasnog oblika struje na faznom izlazu invertora.

Kvalitet izlaznih talasnih oblika

Izlazni talasni oblik invertora sa dva nivoa sadrži značajnije harmonijsko izobličenje usled naglog prelaza između dva nivoa napona. Ovo zahteva dodatno filtriranje (obično se koristi L-C-L filter u solarnim aplikacijama) da bi se dobio zadovoljavajući sinusni talasni oblik struje za osetljive aplikacije u pogledu smanjenog izobličenja. Za topologiju sa tri nivoa uključivanje srednjeg nivoa napona (0 volti) pomaže u smanjenju harmonijske distorzije u izlaznom talasnom obliku, što rezultuje bližom aproksimacijom čistom sinusnom talasu. Ovo obično znači smanjenje zahteva za filtriranje i bolje performanse u aplikacijama koje su osetljive na kvalitet talasnog oblika (redukovani faktori harmonijskog izobličenja struja i napona).

Prekidanje i harmonici

Invertori sa dva nivoa generalno proizvode veći sadržaj harmonika zbog manjeg broja nivoa napona. Visok sadržaj harmonika može dovesti do povećanja nivoa elektromagnetnih smetnji (tzv. „*Electromagnetic Interference*”-EMI) i može zahtevati složenije sisteme filtriranja struja i napona. Kod invertora sa tri nivoa, dodatni treći nivo napona pomaže u smanjenju ukupne harmonijske distorzije (tzv. „*Total Harmonic Distortion*”-THD), što dovodi do smanjenja EMI i potencijalno manje strogih zahteva za filtriranje. Ovo može biti posebno korisno u aplikacijama koje su osetljive na kvalitet talasnog oblika izlazne struje (tipična aplikacija invertora u solarnim elektranama).

Efikasnost i stres prekidačkih komponenti

U slučaju invertorske topologije sa dva nivoa, prekidači podnose veće napone i struje, što može dovesti do povećanog stresa na prekidačkom elementu i do stvaranja i povećanja disipacionih gubitaka. Ovo zahteva robusnija i skuplja rešenja za hlađenje poluprovodničkih modula. Kod invertora sa tri nivoa, napon na svakom prekidaču je smanjen zbog prisustva srednjeg nivoa napona, koji potencijalno može povećati efikasnost i životni vek komponenti. Prekidači trpe manje promene napona, što smanjuje ukupni stres na njima.

Kompleksnost topologije i cena

Invertori sa dva nivoa su jednostavniji u dizajnu i generalno koštaju manje zbog manjeg broja komponenti i složenosti upravljanja. Invertori sa tri nivoa zahtevaju više prekidačkih elemenata i složenije upravljanje. Ovo obično rezultuje većim cenama i troškovima za komponente i potencijalno povećanim zahtevima za održavanjem. Invertori sa dva nivoa se veoma često koriste u aplikacijama manje snage ili gde je trošak značajan faktor, kao što su solarni pretvarači za rezidencijalnu primenu. Invertori sa tri nivoa su poželjni u aplikacijama velikih snaga kao što su solarne instalacije velikih snaga, pogoni električnih vozila i industrijski elektromotorni pogoni velike snage, gde su kvalitet talasnog oblika i efikasnost kritičniji. Izbor između prethodno razmatrane dve topologije zavisi od složenosti i specifičnih zahteva aplikacije, uključujući cenu, efikasnost, kvalitet talasnih oblika napona i struje.

4 PRIMER PROCENE UTICAJA PV INVERTORA NA EEM U POSTROJENJU SNAGE 1,5MW

Svaka PV elektrana priključena na EEM ima veoma složeni uticaj na promenu naponskih prilika u kvalitet napajanja na mestu priključenja. Celokupni uticaj se može sagledati kroz nekoliko ključnih komponenti kao što su: (1) uticaj na strujno opterećenja elemenata EEM, (2) uticaj na promene napona u stacionarnom režimu, (3) uticaj na promene napona u prelaznom režimu, (4) flikeri (koji su inače dominantniji u vetroelektranama), (5) uticaj viših harmonika napona i struja (koji su inače prisutni u PV postrojenjima priključenim preko invertorskih pretvarača), (6) uticaj na snagu kratkog spoja na mestu priključenja.

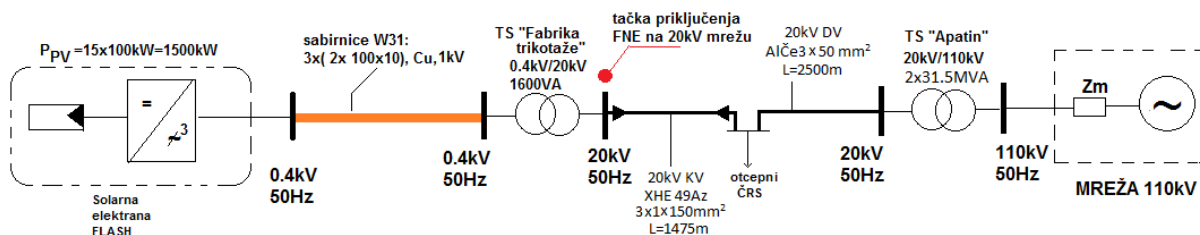
U ovom poglavlju je akcenat dat na uticaj jednog konkretnog PV invertorskog postrojenja na EEM. Inače je u literaturi problem viših harmonika identifikovan i detaljno proučavan u studijama [17]-[19]. U ovom radu je analiziran uticaj PV invertora u sklopu solarne elektrane izlazne AC snage 1,5MW, koja je realizovana na krovu fabrike „FLASH” Calcedonia-Apatin i izvršena je procena uticaja viših harmonika struje PV invertora na srednje-naponsku (SN) EEM. Procena uticaja je izvršena na osnovu dispozicije invertora i po kriterijumima viših harmonika struje, koji su propisani od strane Operatora distributivnog sistema u Republici Srbiji kroz dokument „Pravila o radu distributivnog sistema” [20], sa jedne strane, kao i kroz standarde [21]-[25], sa druge strane.

U skladu sa dokumentom „Pravila o Radu distributivnog sistema – EPS Distribucija d.o.o. Beograd” [20] i Pravila o izmenama i dopunama [26], izvršene su odgovarajuće provere i procena uticaja priključenja invertorskog PV postrojenja sa aspekta kvaliteta električne energije i njegovog uticaja na SN EEM u tački priključenja [27]-[28].

Fabrika FLASH – Apatin se napaja preko priključnog voda 20 kV. Priključni 20 kV vod od TS 110/20kV „Apatin” do TS 20/0,4 kV „Fabrika trikotaže” sastoji se od deonice 20 kV vodova, kao što pokazuje jednopolna šema napajanja prikazana na Slici 10:

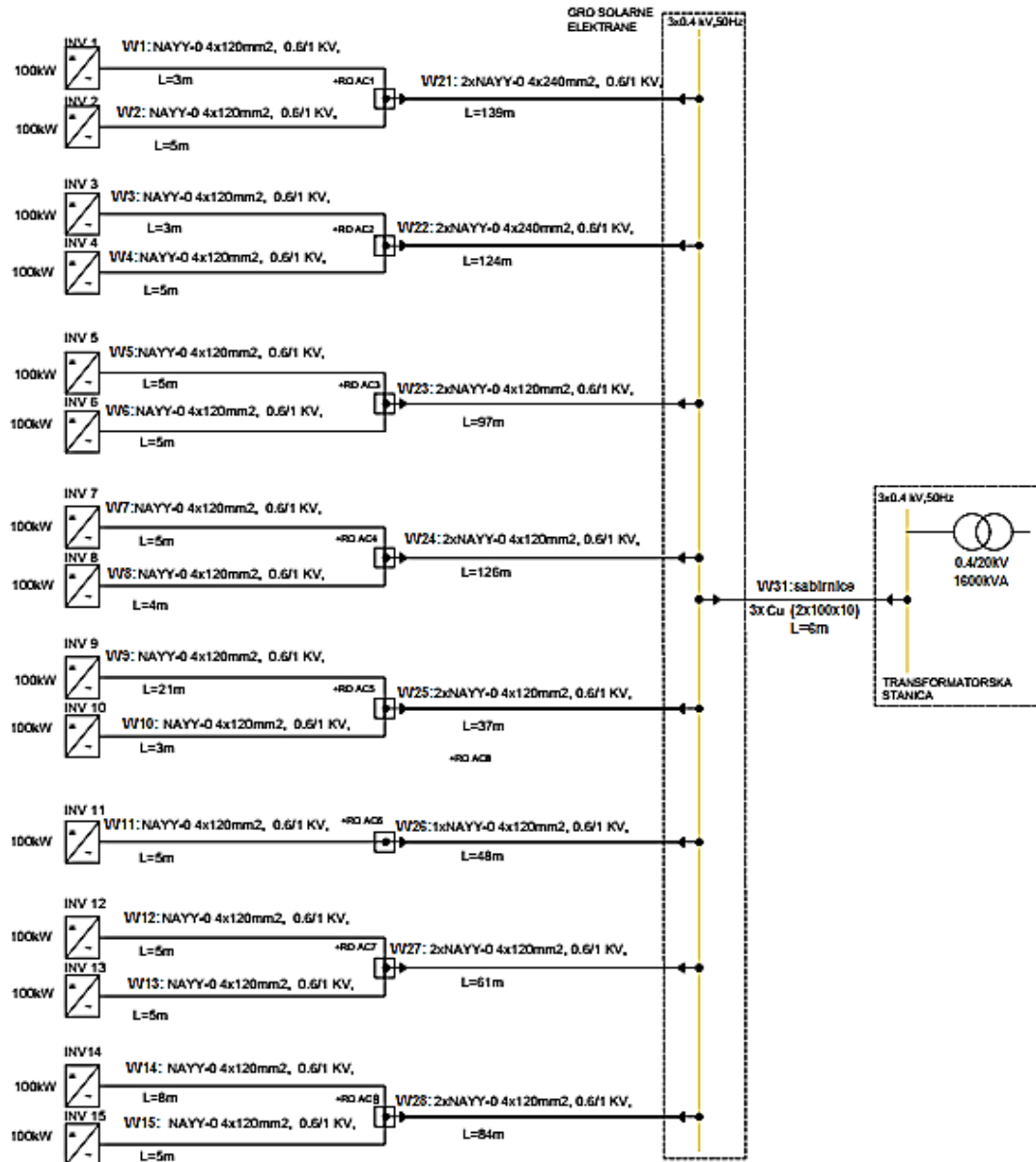
(1) 20 kV distributivni vod (DV) Al-Če 3x50 mm² od TS 110/20 kV „Apatin” 2x31.5MVA do otepnog čvora rastavnog spoja (ČRS) u dužini od 2500 m.

(2) 20 kV kablovski vod (KV) XHE 49AZ 3x(1x150mm²) od otepnog ČRS do TS 20/0.4 kV „Fabrika trikotaže” u dužini od 1475 m.



Slika 10 : Priključni 20 kV vodovi fotonaponske elektrane „Flash”-Apatin izlazne snage 1500 kWac[27]

Na Slici 11 je prikazana struktura jednopolne šeme AC invertorskog razvoda PV elektrane (odnosno detaljni prikaz bloka „Solarna elektrana FLASH”, sa jednopolne šeme na Slici 10).



Slika 11: Struktura AC invertorskog 0,4 kV razvoda fotonaponske elektrane „Flash“- Apatin ukupne snage 1,5MW [27]-[28]

Kriterijum dozvoljenih struja viših harmonika i interharmonika se proverava pomoću izraza:

$$I_{vhg} \leq I_{vhdoz} = I_{vhs,v,\mu} \cdot S_{ks} \quad (1)$$

gde su:

I_{vhg} - stvarna vrednost struje višeg harmonika/interharmonika koju generator injektira u DS, svedena na mesto priključenja u [A]

I_{vhdoz} - dozvoljena vrednost struje višeg harmonika/interharmonika na mestu priključenja u [A]

$I_{vhs,v,\mu}$ - dozvoljena vrednost struje višeg harmonika/interharmonika svedena na jediničnu snagu kratkog spoja na mestu priključenja na EEM u [A/MVA]

S_{ks} – snaga trofaznog kratkog spoja sa priključenom elektranom

U Tabeli 2 date su dozvoljene vrednosti struja viših harmonika i interharmonika svedene na snagu kratkog spoja na mestu priključenja na SN EEM 20 kV. Na osnovu Tabele 4.2 koja je deo

dokumenta „Pravila o radu distributivnog sistema” [20], koje je izdala ODS EPS Distribucija d.o.o. izračunava se dozvoljena struja višeg harmonika prema jednačini:

$$I_{vhdoz} = I_{vhs,v,\mu} \cdot S_{ksmin} \quad (2)$$

gde je S_{ksmin} minimalna snaga trofaznog kratkog spoja na mestu priključenja.

U skladu sa standardom SRPS IEC 60909, pri proračunu ove snage uzeti u obzir minimalni naponi u mreži i topologija (uklopno stanje) distributivne mreže koja dovodi do minimalne snage trolnog kratkog spoja na mestu priključenja. Ova snaga je iz dobijena na osnovu minimlne vrednosti napona (18 kV) i struje trolnog kratkog spoja (prema podacima EDB na SN sabirnicama njena vrednost je 4,8 kA). Minimalna snaga trolnog kratkog spoja se dobija iz relacije (2):

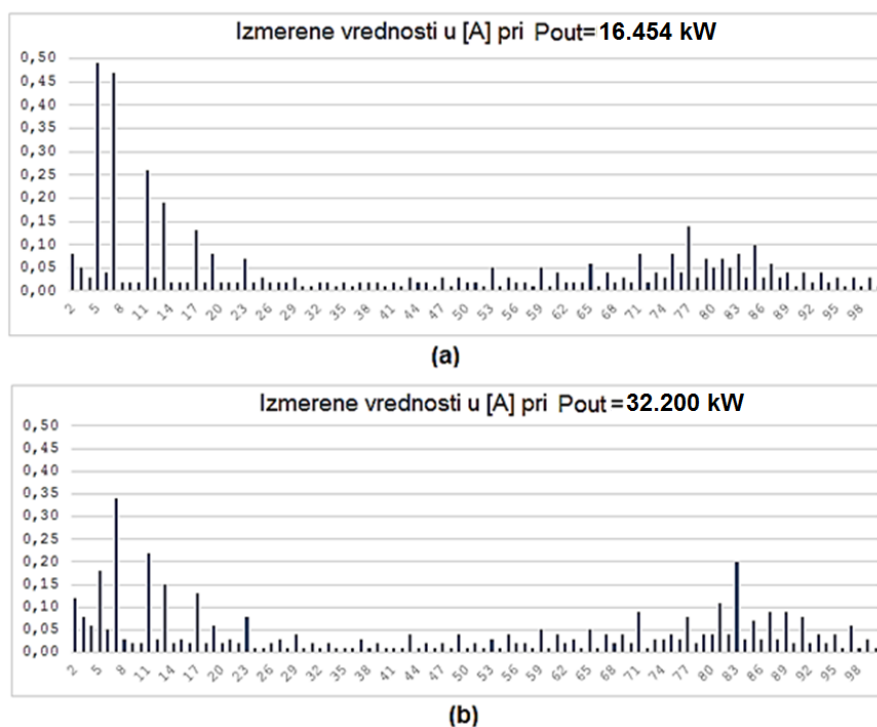
$$S_{ksmin} = 1,732 \cdot 28 \text{ kV} \cdot 4,8 \text{ kA} = 152,24 \text{ MVA}$$

Tabela 2: Dozvoljene vrednosti struje v-tog harmonika svedene na snagu kratkog spoja u tački priključenja elektrane na SN strani pri minimalnom naponu od 18kV.

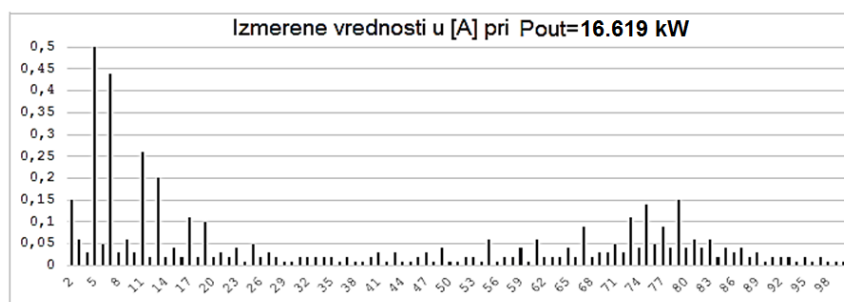
Red.br.harmonika	2	4	5	6	7	8	10	11	12
$I_{vhs,v,\mu}$ (A/MVA)	0,029	0,009	0,029	0,012	0,041	0,004	0,007	0,026	0,005
I_{vhdoz} (A)	4,414	1,370	4,414	1,827	6,24	0,609	1,066	3,96	0,761

Red.br.harmonika	13	14	16	17	18	19	23	25	25 do 40
$I_{vhs,v,\mu}$ (A/MVA)	0,019	0,003	0,003	0,011	0,002	0,009	0,006	0,005	0,026·25/v
I_{vhdoz} (A)	2,893	0,457	0,457	1,675	0,304	1,37	0,913	0,761	-

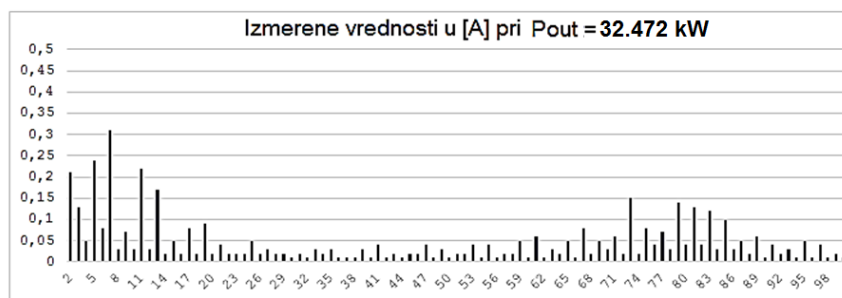
Na Slikama 12-14 je prikazan harmonijski sadržaj i izmerene vrednosti viših harmonika za invertore SE100K proizvodnje SOLAR EDGE, ukupne trofazne izlazne snage od 100 kW. Merenja su data po fazama L1, L2, L3 respektivno i za dve vrednosti izlazne snage po fazi (pri 45% -55% od nominalne i pri 100% od nominalne).



Slika 12 : Izmerene vrednosti struja viših harmonika za inverter SE100K Solar Edge izlazne snage 100 kW za fazu L1; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16,454 kW (b) pri faznoj nominalnoj snazi od 32,200 kW

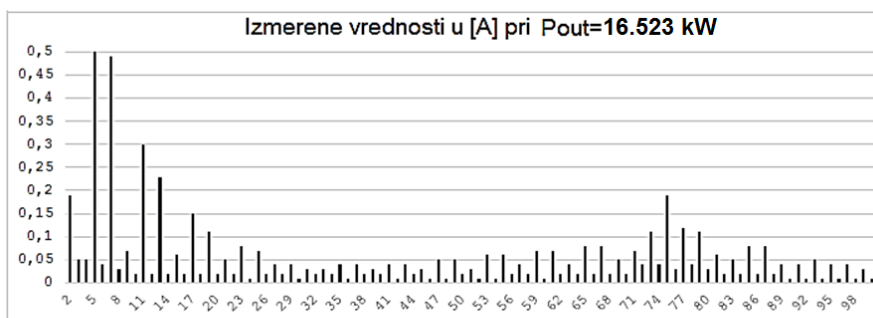


(a)

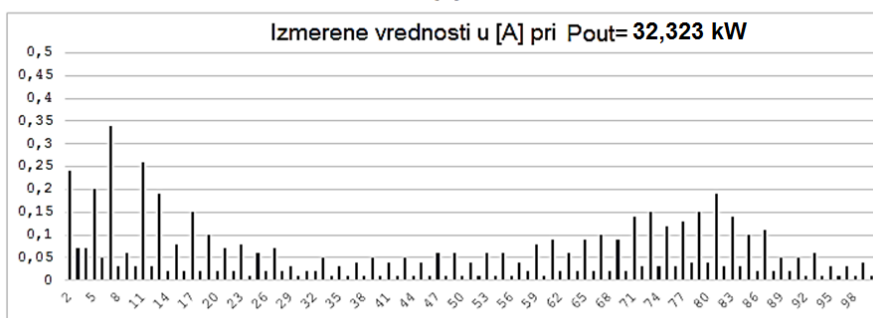


(b)

Slika 13: Izmerene vrednosti struja viših harmonika za inverter SE100K Solar Edge izlazne snage 100 kW za fazu L2; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16,619 kW (b) pri faznoj nominalnoj snazi od 32,472 kW



(a)



(b)

Slika 14 : Izmerene vrednosti struja viših harmonika za inverter SE100K Solar Edge izlazne snage 100 kW za fazu L3; (a) pri polovini fazne nominalne snage 16,523 kW (b) pri faznoj nominalnoj snazi od 32,323 kW

Na osnovu izmerenih struja viših harmonika se uočava da su dominantni neparni harmonici reda 5,7, 11,13. Takođe se za sva tri prikazana slučaja uočava da je sadržaj ovih harmonika veći pri (45÷55)% nominalne snage u odnosu na slučaj kada je snaga nominalna (100%).

Faktor totalne harmonijske distorzije struje THDi (%) za izabrane invertore koji su predviđeni na izlaznoj AC strani fotonaponske elektrane, je prema kataloškim podacima $\leq 3\%$ [29]-[30].

U ovom radu je na osnovu rezultata merenja harmonika struje za različita opterećenja invertora, a koji su prikazana na Slikama 12-14, računat je stvarni THDi (%) na osnovu relacije:

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

Nominalna vrednost struje invertora SE100K je 145A. Ova vrednost je data u kataloškim podacima, ali je dobijena i merenjem u realnim eksploatacionim uslovima pri punoj snazi od

100kW. Koren sume kvadrata struja viših harmonika počev od drugog harmonika $\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$,

odnosno vrednost u brojiocu izraza (3), je dobijena na osnovu izmerenih vrednosti koje su date na Slikama 12-14. Rezultati su sređeni u Tabeli 3 za sve tri faze, za dve vrednosti snage po fazi i za slučaj kada se uzme harmonijski niz od harmonika reda h=2 do harmonika reda h=25, odnosno h=100.

Tabela 3: Koren sume kvadrata struje viših harmonika

Srednja kvadratna vrednost $\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$		h=25	h=100
Faza L1	16,454 kW	0,7813	0,8494
	32,200 kW	0,5284	0,6492
Faza L2	16,619 kW	0,7920	0,8672
	32,472 kW	0,5765	0,7005
Faza L3	16,523 kW	0,8581	0,9565
	32,323 kW	0,6256	0,8202

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 3 se uočava da je nakritičniji slučaj za fazu L3 i kada se uzme puni niz od 100 harmonika (h=100) počev od harmonika reda h=2. Usvajajući da je najkritičnija vrednost korena sume kvadrata struja viših harmonika za fazu L3 dobijamo vrednosti za THDi(%) pri izlaznim snagama invertora $0.5P_n$ i P_n i pri izmerenim strujama prvog harmonika $I_{1_{0.5P_n}}$ i $I_{1_{P_n}}$:

$$THD_i(\%)_{0.5P_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{1(0.5P_n)}} \cdot 100\% = \frac{0,9565A}{70,66A} \cdot 100 = 1,35\% \leq 3\%$$

$$THD_i(\%)_{P_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{1(P_n)}} \cdot 100\% = \frac{0,8202A}{140,53A} \cdot 100 = 0,583\% \leq 3\%$$

Zaključuje se da je stvarni faktor totalne harmonijske distorzije (izobličenja) pri $0.5P_n$ i P_n u najnepovoljnijem slučaju značajno manji od vrednosti 3%.

Stvarna vrednost struje viših harmonika koja potiče od PV invertora koji rade u režimu nominalne snage P_n , svedena na mesto priključenja (vrednost struje viših harmonika koja se povećava 15 puta jer se sistem sastoji od 15 invertora):

$$I_{vhgFNE1} = 15 \cdot I_{vhP_n} \cdot \frac{0,4kV}{20kV} = 15 \cdot 0,8202 \cdot \frac{0,4}{20} = 0,246 A$$

Stvarna vrednost struje viših harmonika koja potiče od PV invertora koji rade u režimu $0,5P_n$, svedena na mesto priključenja u ovom slučaju iznosi :

$$I_{vhgFNE2} = 15 \cdot I_{vhPn} \cdot \frac{0,4kV}{20kV} = 15 \cdot 0,9565 \cdot \frac{0,4}{20} = 0,287 A$$

Za najkritičniji slučaj kada se usvoji da je faktor izobličenja maksimalan odnosno da mu je vrednost jednaka 3% pri punoj snazi (krajnje pesimistička pretpostavka), dobija se da su proračunske struje viših harmonika I_{vh} i I_{vhg} jednake:

$$I_{vh} = 144,9 \cdot \frac{3\%}{100\%} \approx 4,35 A = I_{vhg}$$

$$I_{vhgFNE3} = 15 \cdot I_{vhPn} \cdot \frac{0,4kV}{20kV} = 15 \cdot 4,35 \cdot \frac{0,4}{20} = 1,305 A$$

Ukupna vrednost efektivne vrednosti struje koja potiče od svih viših harmonika je data relacijom:

$$I_{vh_ukup} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} \quad (4)$$

$$I_{vh_ukup} = \sqrt{4,414^2 + 1,37^2 + 4,414^2 + 1,827^2 + 6,24^2 + 0,609^2 + 1,066^2 + 3,96^2 + 0,761^2 + 2,893^2 + 0,457^2 + 1,675^2 + 0,304^2 + 1,37^2 + 0,913^2 + 0,761^2}$$

Ukupna efektivna vrednost struje svih harmonika, koja je izračunata prema relaciji (4) iznosi:

$$I_{vh_ukup} = 10,763A$$

Stvarna vrednost struje viših harmonika koja potiče od PV invertora u najgorem slučaju, svedena na mesto priključenja 20kV iznosi 1,305A, (I_{vhg}) i manja je od ukupne efektivne vrednosti struje viših harmonika, odnosno $I_{vh} > I_{vhg} \rightarrow 10,763A > 1,305A$.

5 ZAKLJUČAK

U radu je dat pregledno uticaj uređaja energetske elektronike (invertora) implementiranih u PV elektranama i njihov uticaj na kvalitet isporuke električne energije EEM. U radu je akcenat stavljen na harmonijski sadržaj izlaznog invertorskog napona i struje. U tom cilju je dat primer procene uticaja jedne konkretno realizovane PV elektrane izlazne snage 1500 kWac. Kao osnova za procenu ovog uticaja su poslužili eksperimentalno snimljeni spektri izlazne struje konkretnih invertora sa dva nivoa i izlazne snage 100 kW. Snimljeni harmonijski spektri su dobijeni za dva režima izlazne snage PV invertora ($0,5P_n$ i P_n). Na osnovu ovih rezultata procenjen je uticaj 15 PV invertora (svaki snage 100 kW) na mesto priključenja solarne elektrane. Treba napomenuti da su dobijene vrednosti struja viših harmonika relativno male i da će i sa uticajem kablova i transformatora uslovi u tački priključenja verovatno biti zadovoljeni u konkretnom slučaju, ali da bi se izvršila tačna provera na mestu priključenja, moraju se ispitati uslovi upravo u mestu priključenja uz uvažavanje podužnih impedansi priključnih kablova, impedanse NN sabirnica i transformatora.

6 ZAHVALNICA

Istraživanje u ovom radu je podržano finansiranjem od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2024.-2025., Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034 od 04.02.2025.

7 LITERATURA

- [1] J. Kleissl, M. Lave, M. Jamaly, and J. Bosch, Aggregate solar variability, 2012 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., pp. 1–3, Jul. 2012.

- [2] W. E. Ibraheem, C.K.Gan, M.R. Ab. Ghani, Impact of Photovoltaic (PV) Systems on Distribution Networks, International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), Vol 7, No 2 (2014).
- [3] Analysis and forecast to 2027, Electricity 2025, IEA-International Energy Agency, February 2025.
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/0f028d5f-26b1-47ca-ad2a-5ca3103d070a/Electricity2025.pdf>
- [4] Y. P. Agalgaonkar, S. Member, B. C. Pal, R. A. Jabr, and S. Member, Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators, IEEE Trans. Power Syst., vol. PP, no. 99, pp. 1–11, 2013.
- [5] N. Diabi, R. Belizidia, Distributed generation influence on the electric network voltage level, Int. Rev. Electr. Eng., vol. 3, no.2, pp. 248–252, 2008.
- [6] S. Porkar, P. Poure, A. Abbaspour-Tehrani-fard, S. Saadate, Distributed Generation Planning for Losses, Voltage Profile, Line Congestion and Total System Cost Improvement, Int. Rev. Electr. Eng., vol. 4, no. 3, pp. 434–440, 2009.
- [7] T. A. Naidu, S. K. Sadanandan, and T. Ghaoud, Power Quality in Grid-Connected PV Systems: Impacts, Sources, and Mitigation Strategies, Bulletin IEEE Smart Grid, June 2022,
<https://smartgrid.ieee.org/bulletins/june-2022/power-quality-in-grid-connected-pv-systems-impacts-sources-and-mitigation-strategies>
- [8] V. Salas, E. Olías, M. A. Abella, F. Chenlo, A. Barrado, DC Current Injection into the Network from PV Grid Inverters, 2, 2371 - 2374. 10.1109/WCPEC.2006.279668.
- [9] M. A. Rahman, M. R. Islam, A. M. Mahfuz-Ur-Rahman, K. M. Mutaqi and D. Sutanto, Investigation of the Effects of DC Current, Injected by Transformer-Less PV Inverters on Distribution Transformers, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 2, pp. 1-4, March 2019, Art no. 0602904, doi: 10.1109/TASC.2019.2895580.
- [10] R. Buerger, Direct Current (DC) injection from renewable energies -When accuracy matters in Power Quality measurements, DANISENSE A/S,
<https://danisense.com/wp-content/uploads/Direct-current-injection-from-renewable-energies.pdf>
- [11] Y. Shaolin, J.Wang, X.Zhang, L.Fei, Complete parasitic capacitance model of photovoltaic panel considering the rain water, Chinese Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 77-84, 2017, <https://doi.org/10.23919/CJEE.2017.8250427>
- [12] Criteria for Selecting a Residual-Current Device Use of Residual-Current Devices for SUNNY BOY, SUNNY MINI CENTRAL and SUNNY TRIPOWER, RCD-TI-en-43, Version 4.3, 2016, <http://www.sma-solar.com/>
- [13] Ž.V. Despotović, M.Vuković, Detekcija i kontrola struje curenja solarnih invertora / Detection and Control of Leakage Current of PV Inverters, Energija, ekonomija, ekologija, 2, XXVI (2024) (pp. 38-46)
- [14] GRID CONNECTED PV SYSTEMS WITH BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS DESIGN GUIDELINES, The Pacific Power Association (PPA) and the Sustainable Energy Industry Association of the Pacific Islands (SEIAPI), 2020,
<https://www.ppa.org.fj/wp-content/uploads/2020/10/Grid-Connected-PV-Systems-with-Battery-Energy-Storage-Systems-Design-Guideline-V1-July-2020.pdf>
- [15] S. N. Vukosavić, Grid-Side Converters Control and Design-Interfacing Between the AC Grid and Renewable Power Sources, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018.

- [16] Ž. V. Despotović, Karakteristični primeri koordinacije izolacije u energetskim pretvaračima", Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Vol 31, pp.39-55 doi:10.5937/zeint31-34667, Decembar 2021.
- [17] Z. Čorba Z., D. Milićević , B. Dumnić, V. Katić, B. Popadić B., Ispunjenje kriterijuma dozvoljenih struja viših harmonika pri priključenju fotonaponskih elektrana na distributivni sistem“, XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama sa regionalnim učešćem, Kopaonik, 24 – 28. 09. 2018., Rad br. R-2.131.
- [18] V. Katić, Istraživanje viših harmonika u mreži Elektrovojvodine, Prvo jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, Zlatibor, 5-8. 10. 1998, Rad br. R.2.03, CD ROM
- [19] V. Katić, S. Mujović, Pregled istraživanja kvaliteta električne energije u Crnoj Gori i regionu sa aspekta uticaja rada malih nelinearnih potrošača i distribuiranih generatora“, CIRED Crna Gora, Prvo savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Crne Gore, Budva, 10-13. 06. 2024. Rad. br. R2-03, pp.1-9.
- [20] Pravila o radu distributivnog sistema “EPS Distribucija”, d.o.o. Beograd, jul 2017
https://elektrodistribucija.rs/usluge/dokumenta/Pravila_o_Radu_20072017.pdf
- [21] SRPS EN 50160:2023, Karakteristike napona isporučene električne energije iz javnih električnih mreža/Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, Datum objavljivanja 29.12.2023.
- [22] SRPS EN 60909-0:2020 Struje kratkog spoja u trofaznim sistemima naizmenične struje-Deo 0:Proračun struja/ Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents, Datum objavljivanja 31.12. 2020.
- [23] IEC/TR 61000-3-7:2020, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems
- [24] IEC/TR 61000-3-6 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems
- [25] VDE-AR-N 4110:2018-11: Technical requirements and operation of customer installations to the medium voltage network (TCR medium voltage).
- [26] Pravila o izmenama i dopunama Pravila o radu distributivnog sistema “EPS Distribucija”, d.o.o. Beograd, Februar 2025.
https://elektrodistribucija.rs/regulativa/propisi/dokumenta/Pravila_o_radu_2025_merged.pdf
- [27] Ž.V. Despotović, M. Đurović, Procena uticaja fotonaponske elektrane izlazne snage 1.5MW na elektroenergetsku mrežu, XII SAVETOVANJE ENERGETSKA EFIKASNOST i OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE – 22.10.2024, Požarevac.
- [28] M. Đurović, Ž.V. Despotović, A. Ćirić, Projektovanje i realizacija fotonaponske elektrane izlazne snage 1500kW na krovu fabrike „Flash“ Apatin, Energija, ekonomija, ekologija, 2024, god. XXVI, br. 1, pp.59-71, doi: 10.46793/EEE24-1.59D.
- [29] <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se-three-phase-inverter-with-synergy-400v-480v-datasheet-eu.pdf>
- [30] <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se-single-and-three-phase-inverter-user-manual-na.pdf>