

Primer koordinacije izolacije mrežnog fotonaponskog invertora sa tri naponska nivoa sa fiksiranom neutralnom tačkom

Željko V. Despotović*, Miodrag Vuković**, Marko Tajdić*

* Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Beograd

** CONSEKO d.o.o, Beograd

Rezime - Trofazni fotonaponski mrežni invertori sa tri naponska nivoa sa fiksiranom neutralnom tačkom ("*three level neutral point clamped*"-3L NPC) su postali veoma interesantni za fotonaponske sisteme velikih snaga sa aspekta kvaliteta izlaznog napona i smanjenja harmonika koji se injektiraju u elektroenergetsku mrežu. Ovaj tip invertora pokazuje niz prednosti u odnosu na klasične trofazne invertore sa dva nivoa. Jedan od bitnih aspekata pouzdanog i sigurnog rada mrežnog fotonaponskog invertora su tipovi izolacije koji su primenjeni u njemu. Kada se govori o izolaciji, misli se na izolaciju između energetske sklopove invertora i mrežnog napajanja sa jedne strane, i izolaciju između upravljačkih i komunikacionih elektronskih sklopova i energetske modula invertora sa druge strane. U radu je dat jedan primer analize i koordinacije izolacije mrežnog fotonaponskog invertora sa tri naponska nivoa sa fiksiranom neutralnom tačkom baziran na standardu EN62109-1. Ulazni DC napon analiziranog fotonaponskog invertora je ≤ 1500 V, 50Hz, mrežni napon 3×400 V, 50Hz, sistem zaštite od previsokog napona dodira TN-C, a sam fotonaponski inverter je na mrežu vezan preko trofaznog energetskeg transformatora prenosnog odnosa 2:1 (800 Vac/400 Vac).

Ključne reči - Fotonaponski sistemi, 3L NPC PV inverter, koordinacija izolacije, mrežno napajanje, galvanska izolacija, TN-C sistem zaštite

I UVOD

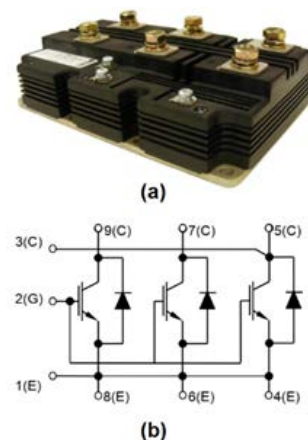
Razvojem obnovljivih izvora energije (OIE), došlo je do značajnog porasta upotrebe uređaja energetske elektronike, odnosno energetske pretvarača kao interfejsa između distribuirane proizvodnje i elektroenergetske mreže. Električni pretvarači snage su postali veoma značajan deo u prenosnim i elektro-distributivnim sistemima, počev od uređaja za kompenzaciju reaktivne energije (na niskom i srednjem naponu) pa sve do visokonaponskih sistema jednosmernog prenosa (tzv. "*High Voltage DC*"-HVDC). U novije vreme sa intenzivnim ekspanzijom korišćenja OIE, na značaju dobijaju DC/AC energetske pretvarači, koji se dominantno primenjuju u solarnim sistemima, popularno nazvani fotonaponskim invertorima [1-6].

Fotonaponski invertori koji su bazirani na primeni poluprovodničke tehnologije velikih snaga su energetska sprega pomoću kojih je moguće obezbediti kontrolisanu predaju električne energije iz fotonaponskih panela ka elektroenergetskoj mreži. Bilo da su oni direktno ili preko transformatora povezani sa električnom mrežom, poluprovodnici unutar njih postaju

veoma osetljivi na razne mrežne uticaje i poremećaje: (1) prenaponi različitog porekla (sklopni, atmosferski), (2) prekidi mrežnog napajanja (privremeni, povremeni i trajni), (3) padovi napona i naponski propadi, (4) naponski kratkotrajni tranzijenti i (5) naponski pikovi različitog porekla, kao i drugi poremećaji koji bi mogli dovesti do smanjenja njihove pouzdanosti i funkcionalnosti. Kao posledica ovoga dolazi do narušavanja kvaliteta napajanja i isporuke električne energije iz fotonaponskog postrojenja.

Na osnovu prethodno pomenutih činjenica nameće se između ostalog i rešavanje problema koji se tiču koordinacije izolacije fotonaponskih invertora, u cilju sprečavanja njihovog privremenog ili trajnog uništenja. Rešavanje ovih problema na adekvatan način se direktno reflektuje i na sam kvalitet napajanja na izlaznim sabirnicama fotonaponske elektrane.

U poređenju sa pasivnim komponentama koje se koriste u fotonaponskim sistemima, uređaji energetske elektronike, kao što su fotonaponski invertori, imaju veoma slabu sposobnost izdržavanja prenapona. Tranzijentni prenaponi čak i relativno malih vrednosti mogu oštetiti ove uređaje. Iz tog razloga je od velike važnosti imati pouzdanu i efikasnu zaštitu od prenapona, kao i sprovesti adekvatne mere koje se odnose na koordinaciju izolacije, unutar pomenutih uređaja energetske elektronike.



Slika 1. IGBT modul 6.5kV/750A, DIM750ASM65-PS500; (a) kućište modula sa priključcima, (b) šematski prikaz modula

Uzimajući u obzir karakteristike jednog standardnog IGBT prekidačkog modula, kao što je na primer snažni IGBT modul DIM750ASM65-PS500 proizvodnje DYNEX [7-8] (Slika 1) maksimalnih performansi: podnosivog inverznog napona od

$V_{CES}=6.5$ kV, trajne podnosive struje od $750A/1500A_{peak}$, vremena uključenja od $1\mu s$ (tipično) i vremena isključenja $4\mu s$ (tipično). Podnosivi porasti napona i struje na ovom energetskom modulu se približno mogu kvantifikovati kao:

$$\max(dv/dt) = 6,5kV/4\mu s = 1,6kV/\mu V$$

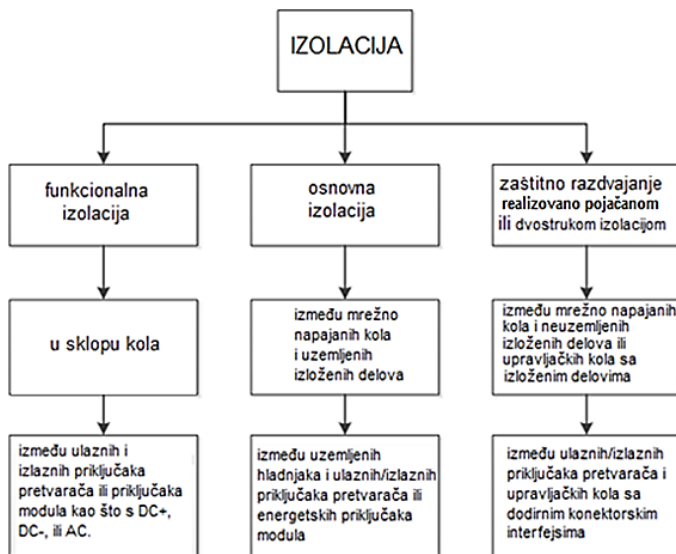
$$\max(di/dt) = 1500A/1\mu s = 1,5kA/\mu s$$

Na osnovu standarda IEC61000[3] za talas prenaponskog impulsa 60 kV i odnosa trajanja strmine čela i začelja prenaponskog talasa od $1,2/50\mu s$, maksimalni porast napona je:

$$\max(dV/dt) = 60kV/1,2\mu s = 50kV/\mu s \gg 1,6kV/\mu s$$

Na osnovu prethodnog sledi zaključak, da kad god su povezani na električnu mrežu (distributivnu ili prenosnu) uređaji energetske elektronike moraju biti zaštićeni, odnosno na date sklopove se moraju primeniti adekvatne mere koje se prvenstveno odnose na koordinaciju izolacije.

Prema standardima IEC 61000[9] i IEC 60071 [10], visokofrekventni impulsni transformatori i druge snažne poluprovodničke komponente, ali i uređaji (između ostalog i energetske pretvarače), moraju se testirati kratkotrajnim impulsom i moraju izdržati udarni impuls $1.2kV/50\mu s$ vršne vrednosti koje je definisana standardom IEC 60071 [10]. Vršna vrednost ovog impulsa se naziva podnosivi udarni napon izolacije, eng. "Basic Insulation Level" (BIL). U zavisnosti od nazivnog naizmeničnog napona, vrednost BIL može varirati.



Slika 2. Strukturalni prikaz tipova izolacije u elektroenergetskim pretvaračima [11]

Koordinacija izolacije je u oblasti projektovanja elektroenergetskih pretvarača postala veoma bitan, ako ne i ključni elemenat. Međutim pored interesa za projektante, koordinacija izolacije energetskih pretvarača postala veoma bitan elemenat i za korisnike, ali i za realizaciju i implementaciju različitih pretvaračkih topologija. Stoga ova problematika svakako zaslužuje veliku pažnju u stručnoj i inženjerskoj populaciji koja se ovom oblašću bavi. Tokom višedecenijskog iskustva u ovoj oblasti, prikupljeno je dosta iskustvenih i praktičnih podataka, što je dokumentovano u nekoliko ključnih

standarda.

U oblasti projektovanja i primene elektroenergetskih pretvarača razlikuju se tri osnovna tipa izolacije u zavisnosti od njihove namene:

1. funkcionalna izolacija,
2. osnovna izolacija i
3. zaštitno razdvajanje.

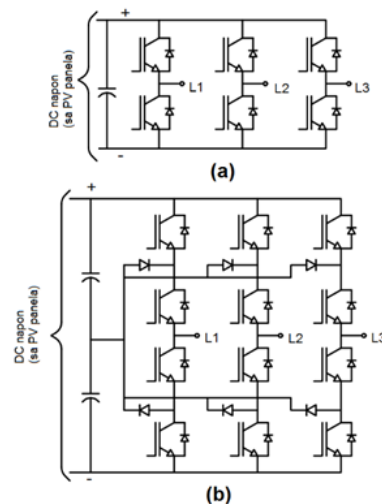
U referenci [11] su detaljno opisani i prikazani tipovi izolacije koji se koriste u elektroenergetskim pretvaračima, načini njihove realizacije kao i pregled i prikaz strukture relevantnih standarda koji se koriste u ovoj oblasti.

Svi pomenuti tipovi izolacije moraju da ispunjavaju hijerarhijske zahteve. Na Slici 2 su strukturno prikazani osnovni tipovi izolacije, kao i opisi pozicija na koje se oni odnose i između kojih priključnih krajeva u uređajima energetske elektronike se primenjuju.

II OSNOVNE TOPOLOGIJE NAPONSKIH INVERTORA

Na Slici 3 su prikazane dve osnovne IGBT topologije invertora koje se primenjuju u solarnim sistemima, odnosno fotonaponskim elektranama. Na Slici 3(a) je prikazana topologija invertora sa dva nivoa (tzv. "two-level"), dok je na Slici 3(b) prikazana topologija invertora sa tri nivoa (tzv. "three-level").

U cilju objašnjenja rada prethodno navedenih topologija pretpostavljeno je da su opterećenja invertora induktivna (R, L opterećenje).

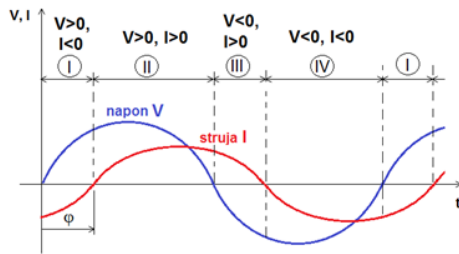


Slika 3. Osnovne topologije solarnih invertora; (a) topologija sa dva nivoa, (b) topologija sa tri nivoa

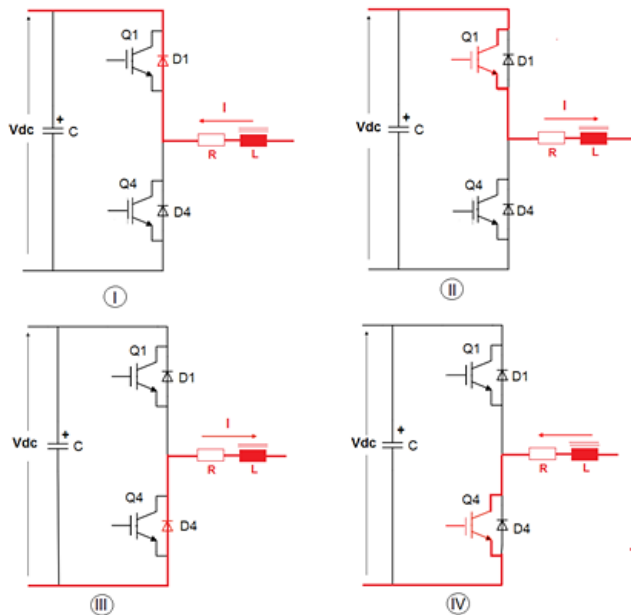
Da bi se utvrdilo koji IGBT prekidač ili dioda su aktivnoj fazi tokom rada, shodno prethodnom, pretpostavljeno je da u uslovima ustaljenog stanja struja na izlazu invertora zaostaje za naponom, za ugao faktora snage označenog sa ϕ . Na Slici 4 su prikazani talasni oblici struje i napona jedne faze gde se vidi zaostajanje struje u odnosu na napon. Osnovnu periodu napona možemo podeliti u četiri oblasti od interesa: I, II, III i IV.

Na Slici 5 su za invertorsku topologiju sa dva nivoa prikazani aktivni prekidački elementi za svaku od oblasti od interesa i za jednu vertikalnu trofaznu IGBT mosta (jedna faza). Oblasti su

okarakterisane sa znakom napona i struje, kao što je prikazano na Slici 4. Oblast I: $V>0$ i $I<0$, oblast II: $V>0$ i $I>0$, oblast III: $V<0$ i $I>0$, oblast IV: $V<0$ i $I<0$.



Slika 4. Talasni oblici struje i napona za induktivno opterećenje invertora sa naznačenim oblastima od interesa I,II,III, IV



Slika 5. Sekvence uključanja prekidačkih elemenata (dioda i IGBT prekidača) za topologiju invertora sa dva nivoa i za induktivno opterećenje po naznačenim oblastima od interesa I,II,III, IV

Na prethodno prikazanim slikama se uočava da su prekidački elementi (IGBT prekidači i diode) u neprovodnom stanju izloženi maksimalnim naponima koji su jednaki naponu DC međukola, odnosno $+V_{dc}$.

Na Slici 6 su prikazani karakteristični talasni oblici za slučaj sinusne modulacije širine impulsa invertora sa dva nivoa. Na Slici 6(a) je prikazana trougaona modulacija tri referentne sinusoide pomerene za 120° . Na Slici 6(b) su prikazani upravljački signali i talasni oblici napona dve faze i na kraju talasni oblik međufaznog napona V_{L1-L2} , koji je najinteresantniji za razmatranje u ovom radu.

Na Slici 7 su za invertorsku topologiju sa tri nivoa prikazani aktivni prekidački elementi za svaku od oblasti od interesa i za jednu vertikalu trofaznog IGBT mosta (jedna faza). Oblasti su kao i u prethodnom slučaju okarakterisane sa znakom napona i struje, kao što je prethodno prikazano (Slika 4).

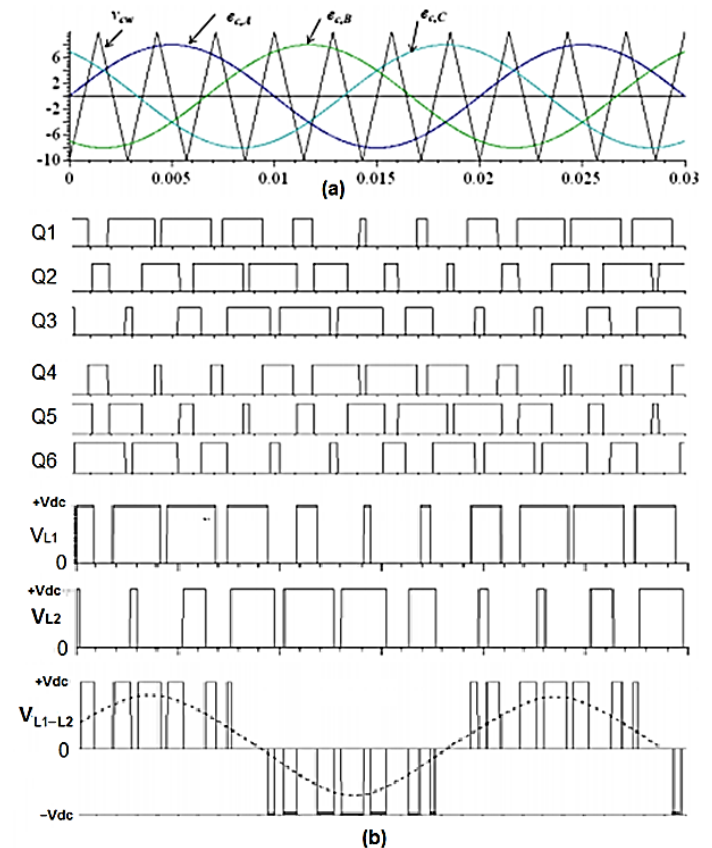
U Tabeli 1 su dati pregledno prekidački statusi prekidačkih

elemenata (IGBT prekidača i dioda) za topologiju invertora sa tri nivoa.

Tabela 1. Prekidački statusi za topologiju 3L NPC

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

Na Slici 8 su dati karakteristični talasni oblici napona za ovu topologiju: fazni naponi V_{L1-N} , V_{L2-N} , V_{L3-N} u odnosu na neutralnu tačku N u DC-međukolu i međufazni naponi V_{L1-L2} , V_{L1-L3} , V_{L2-L3} .



Slika 6. Karakteristični talasni oblici za topologiju invertora sa dva nivoa; (a) trougaona modulacija, (b) karakteristični naponi u kolu

U nastavku je dat uporedni pregled nekih osnovnih parametara 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 pretvaraču da prebaci izlaz između ova dva nivoa

Kod invertora sa tri nivoa i sa neutralnom simetričnom tačkom

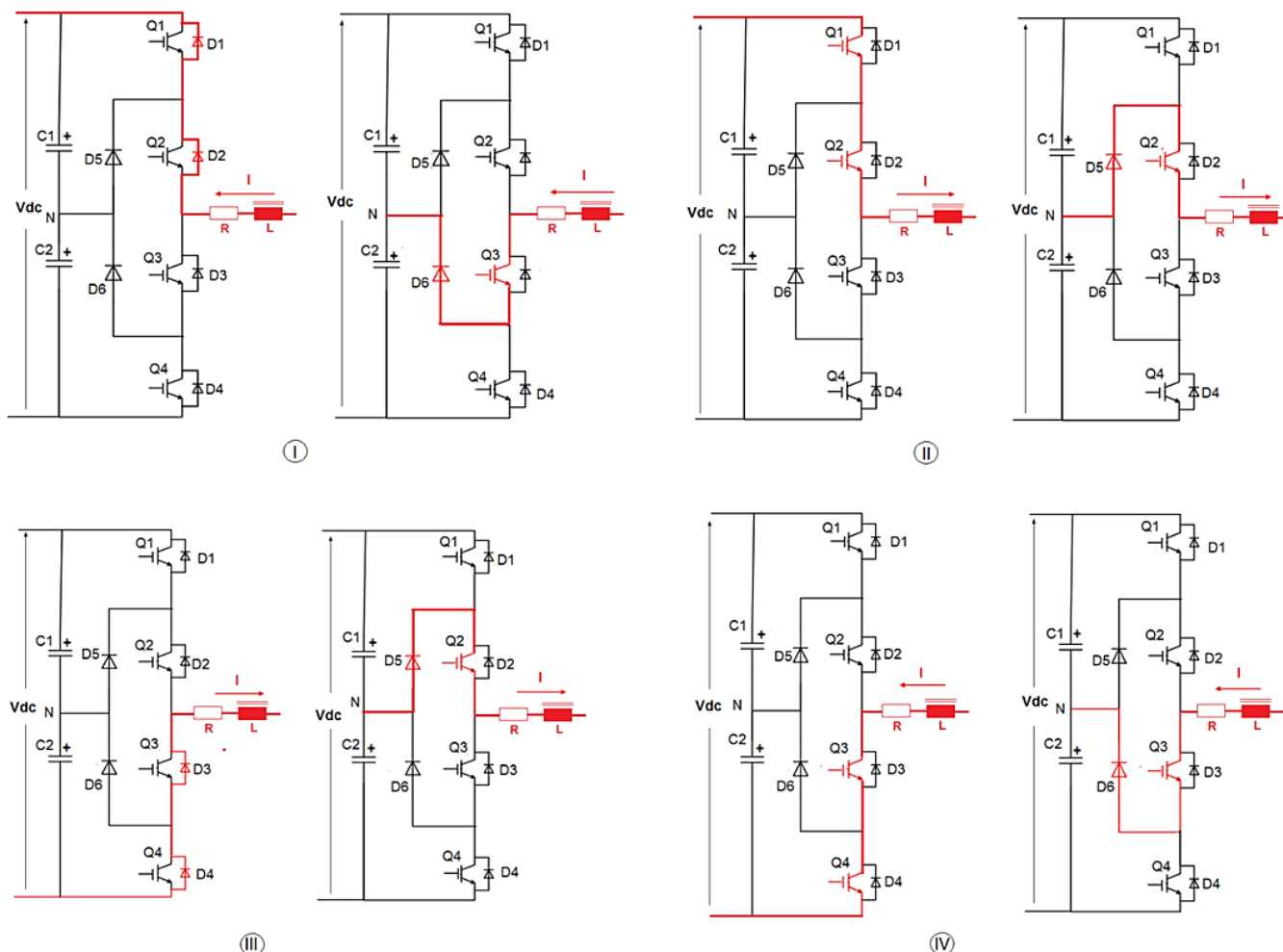
(tzv. "Neutral Point Clamped-NPC"), se uvodi jedan dodatni naponski nivo, tipične vrednosti 0 V između nivoa +Vdc i -Vdc. Ova konfiguracija omogućava finiju stepenastu aproksimaciju sinusnog talasa naizmenične struje, zbog manjih koraka napona u odnosu na topologiju sa dva nivoa. Ovo poboljšava kvalitet 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 (faktori harmonijskog izobličenja struja i napona).

Prekidanje i harmonici



Slika 7. Sekvence uključivanja 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

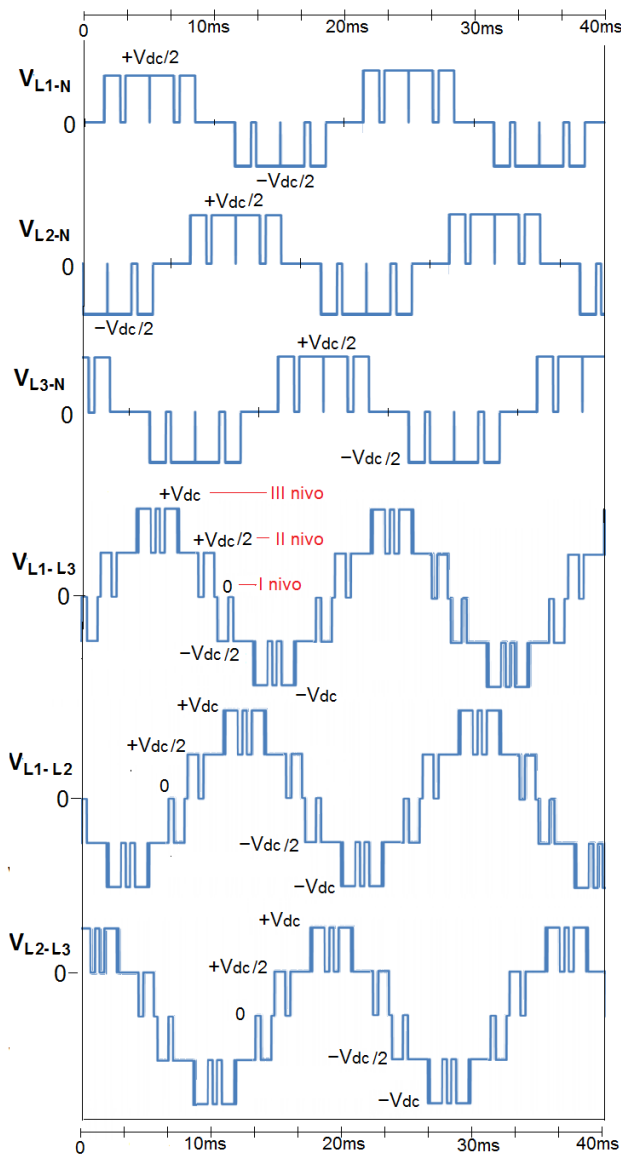
Invertori sa dva nivoa generalno proizvode veći sadržaj harmonika zbog manjeg broja nivoa napona. Visok sadržaj harmonika može dovesti do povećanja nivoa elektromagnetnih smetnji (tzv. "Electromagnetic Interference"-EMI) i može zahtevati složenije sisteme filtriranja struja i napona.

Kod invertora sa tri nivoa, dodatni treći nivo napona pomaže u smanjenju ukupne harmonijske distorzije (tzv. "Total Harmonic Distortion"-THD), što dovodi do niže 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 i stvaranja i povećanja disipacionih gubitaka. Ovo bi moglo zahtevati 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 niže promene napona, što smanjuje ukupni stres na njima.



Slika 8. Talasni oblici faznih napona i jednog međufaznog napona za topologiju invertora sa tri nivoa

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.

Poređenje u pogledu primena

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 specifičnih zahteva aplikacije,

uključujući cenu, efikasnost, kvalitet talasnih oblika napona i struje, i na kraju od složenosti.

Obzirom da se u fotonaponskim elektranama većih snaga koristi invertorska topologija sa tri nivoa u ovom radu je dat akcenat na koordinaciju izolacije za ovaj tip invertora. Tako će u nastavku rada biti razmatrana ova problematika za invertore sa tri nivoa i sa fiksiranom neutralnom tačkom.

III KOORDINACIJA IZOLACIJE ZA 3L NPC INVERTOR

U ovom poglavlju se razmatra koordinacija izolacije fotonaponskog invertora sa tri naponska nivoa i fiksnom neutralnom tačkom čiji su sledeći podaci: ulazni PV napon ≤ 1500 Vdc, izlazni napon $V_{LL} = 3 \times 800$ Vac 50Hz, TN-C sistem, mrežni transformator; prenosnog odnosa 2:1, nadmorska visina ≤ 3000 m, unutrašnja upotreba u prostoriji bez klimatizacije, kućište invertora u stepenu mehaničke zaštite IP54, inverter poseduje komunikacioni interfejs kojim je fotonaponski regulator povezan sa upravljačkim i energetske delom invertora.

Na Slici 9 je data principna šema fotonaponskog pretvarača koji se razmatra u ovom poglavlju. Relevantni standard za fotonaponske pretvarače je EN62109-1[12-13]. Postupak koordinacije izolacije koji je ovde opisan zasnovan je na ovom standardu. Kao što se sa Slike 9 vidi, ova topologija ima i poseban deo koji se odnosi na kontrolnu logiku i fotonaponski kontroler, elektronske drajvere za pobudu IGBT prekidača, kola za mrežnu sinhronizaciju i na kraju i korisnički interfejs (tipično *Field BUS*). Ova upravljačka kola su označena plavom bojom na Slici 9.

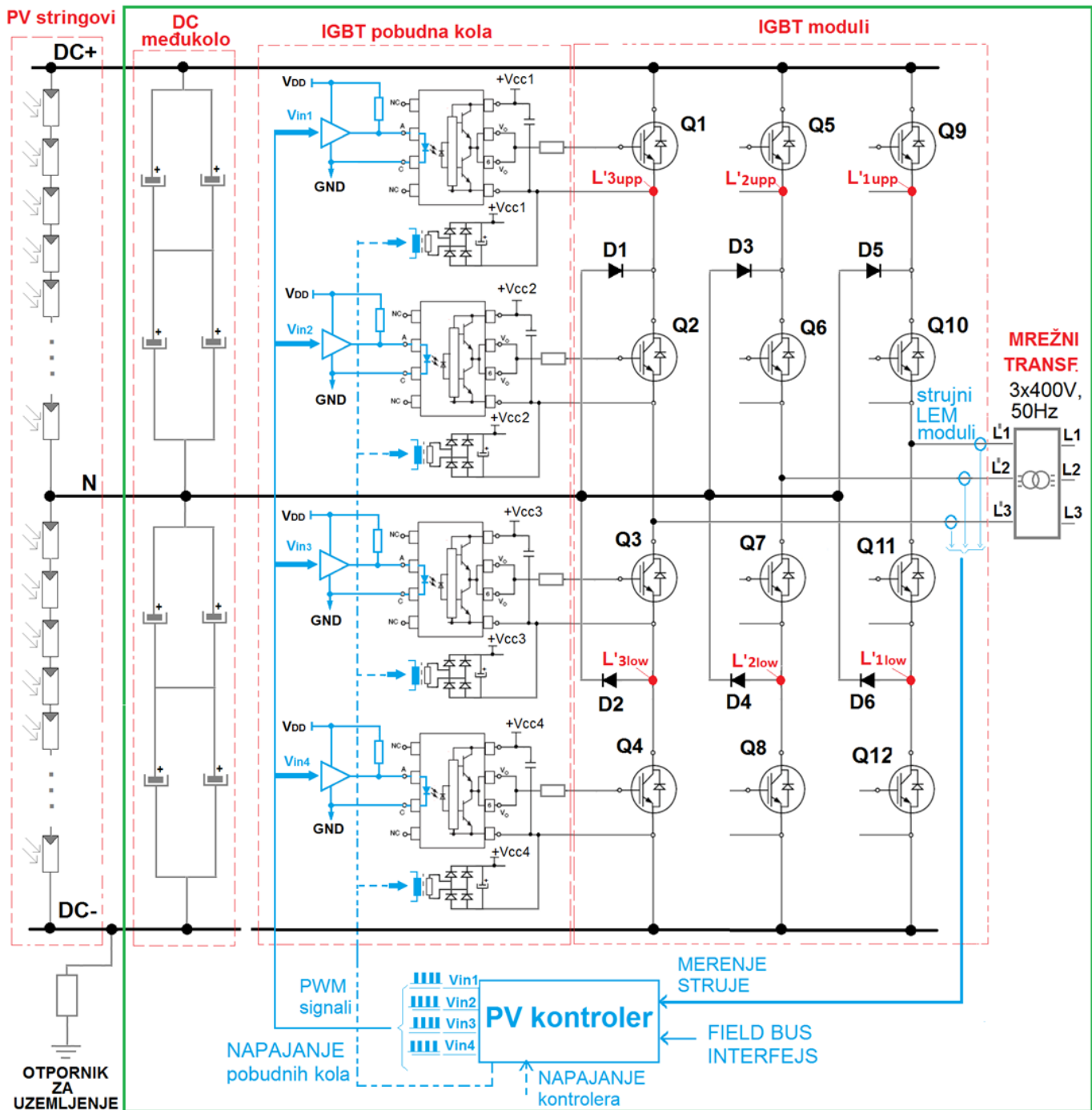
Iz prethodno pomenutih razloga je potrebno obezbediti zaštitno razdvajanje bazirano na pojačanoj (dvostrukoj izolaciji) između energetske delu (IGBT prekidači) i kontrolne elektronike. Između energetske delu i uzemljenih delova potrebna je osnovna izolacija, prema EN62109-1 (Tabela 8) [12-13]. Energetski deo se u ovom slučaju sastoji se od IGBT fotonaponskog kola invertora i elektroenergetske mreže. Ova dva dela su međusobno izolovana galvanskom izolacijom pomoću energetske transformatora. Shodno prethodnom, može se usvojiti prenaponska kategorija 2 za fotonaponski deo (EN62109-1, 7.3.7.1.2,b) i prenaponska kategorija 3 za mrežni deo (EN62109-1, 7.3.7.1.2,a). Prenaponska kategorija koja se primenjuje interno u ovim podsistemima je za jednu kategoriju niža (prema EN62109-1, 7.3.7.1.2, f[12-13]). Tako da se u ovom slučaju „može usvojiti kategorija 1 za fotonaponsko kolo invertora i kategorija 2 za mrežni deo.

Zbog specifičnosti ove invertorske topologije, mora se uzeti u obzir da prenaponski nivo mrežnog kola ima uticaj na fotonaponsko invertorsko kolo i obrnuto. Galvanska izolacija ostvarena putem mrežnog energetske transformatora smanjuje prenaponsku kategoriju za jedan nivo i u oba smera (prema EN62109-1, 7.3.7.1.2, c)[12-13]. Sistemski napon se i u ovom slučaju koristi za određivanje izolacionih zahteva (prema EN62109-1, 7.3.7.2.1[12-13]). Na mrežnoj strani je sistem sa međufaznim naponom od 800 V, 50Hz uz napomenu da je usvojen TN-C sistem zaštite i fazni napon na strani mreže je $800 \text{ V} / \sqrt{3} = 462 \text{ V}$.

Napon fotonaponskog sistema (sistemi napon) je jednak maksimalnoj vrednosti napona praznog hoda (maksimalni napon tzv. otvorenog kola) stringova fotonaponskog sistema (EN62109-1, 7.3.7.2.3) [12-13], i u ovom slučaju je pretpostavljeno da on iznosi 1500 Vdc. Za određivanje sistemskog napona irelevantno je da li je fotonaponsko kolo uzemljeno preko otpornika ili ne.

Treba napomenuti da na izolaciju IGBT energetskog pretvarača (Slika 9), utiču i klimatski uslovi, a ponajviše zagađenje okoline u kojoj se ugrađuje fotonaponski inverter. Ovo je jedna razumna

pretpostavka, obzirom da se u većini slučajeva fotonaponski invertori montirani na otvorenom i bivaju izloženi spoljašnjim uticajima. Zahtevi da je energetski pretvarač za unutrašnju upotrebu i u prostorijama bez klimatizacije se odnose na stepen zagađenja 3 (prema EN 62109-1, Tabela 4). Kućište pretvarača ili razvodni orman u koji je ugrađen pretvarač je obično u stepenu zaštite IP54 prema EN60529 i bez internog zagađenja. Stoga se stepen zagađenja može smanjiti sa stepena 3 na stepen 2 (prema EN62109-1, Tabela 5).



Slika 9. Topologija i kontrolno kolo trofaznog invertora sa tri nivoa i fiksiranom neutralnom tačkom [14]

U nastavku će biti detaljnije razmatrana koordinacija izolacije fotonaponskog invertora sa tri aspekta: (1) vazdušnih razmaka ("clearance"), (2) puznih staza ("creepage") i (3) čvrste izolacije.

III-1 Koordinacija izolacije koja se odnosi na vazdušne razmake ("clearance")

Fotonaponski pretvarači ovog tipa su predviđeni za nadmorske visine maksimalno do 3000 m, tako da se faktor korekcije nadmorske visine mora uzeti u obzir za sve razmake. Obično se usvaja korekcionni faktor 1,14 (prema EN62109-1, Tabela F.1) [12-13]. Kada je u pitanju vazdušna izolacija, ima smisla razmotriti vazdušni razmak za tri karakteristična slučaja kada se on koristi kao: (1) funkcionalna izolacija, (2) osnovna izolacija, (3) zaštitno razdvajanje.

Vazdušni razmak korišćen kao funkcionalna izolacija

Za funkcionalnu izolaciju relevantan je samo radni napon. Impulsni podnosivi napon koji je rezultat prenaponske kategorije ne uzima se u obzir, osim ako je potrebna prenaponska kategorija 1 (EN62109-1, 7.3.7.3) [12-13]. U najgorem slučaju radni naponi fotonaponskog kola su probojni naponi korišćenih IGBT prekidača i dioda. Prema EN62109-1 (Tabela 13, kolone 2 i 4) potrebno vazdušno rastojanje za ponavljajući vršni radni napon od 1200 V je 0,9 mm, pod pretpostavkom da se za fotonaponski pretvarač koriste poluprovodnici koji su dimenzionisani za probojni napon od 1200 V, što je tipično za NPC invertorsku topologiju [15]. Vrednost razmaka od 0,9 mm je rezultat linearne interpolacije između vrednosti 960 V i 1600 V (korišćeni standard inače to dozvoljava), uz napomenu da se ide na stranu sigurnosti zaokruživanjem vrednosti na jednu decimalu [16]:

$$d = 0,5\text{mm} + \frac{1,5\text{mm} - 0,5\text{mm}}{1600\text{V} - 960\text{V}} \cdot (1200\text{V} - 960\text{V}) = 0,875\text{mm} \approx 0,9\text{mm}$$

Uzimajući u obzir faktor korekcije nadmorske visine od 1,14, potreban vazdušni razmak za funkcionalnu izolaciju je 1 mm. Ovo rastojanje mora se uzeti za preskočne staze preko svih poluprovodnika (IGBT prekidača i dioda) u pretvaračkom mostu.

U NPC invertorskoj topologiji dva poluprovodnička IGBT prekidača moraju istovremeno podneti puni napon [15]. Stoga je potrebno za vazdušno rastojanje od (2·0.9mm=1.8 mm) usvojiti maksimalnu vršnu vrednosti napona od 2·1200 V=2400 V. Prema EN62109-1 (Tabela 13, kolone 2 i 4) [12-13] i uz primenu linearne interpolacije dobija se da je vazdušno rastojanje u ovom slučaju [16]:

$$d = 1,5\text{mm} + \frac{3\text{mm} - 1,5\text{mm}}{2600\text{V} - 1600\text{V}} \cdot (2 \cdot 1200\text{V} - 1600\text{V}) = 2,7\text{mm}$$

Uzimajući u obzir faktor korekcije nadmorske visine od 1,14, potrebno vazdušno rastojanje za funkcionalnu izolaciju u ovom slučaju je ≈3,1mm

Potrebna preskočna staza preko transformatora određuje se impulsnim naponom, koji se smanjuje za jednu prenaponsku kategoriju sa strane transformatora (prema EN62109-1, 7.3.7.1.2 c) [12-13].

Fazni napon mrežnog sistema od 462V rms i za prenaponsku kategoriju 3 je u korelaciji sa impulsnim naponom od 6000 V, a za prenaponsku kategoriju 2 je u korelaciji sa 4000 V (prema

EN62109-1, Tabela 12) [12-13]. To znači da su vazdušni razmaci 5,5 mm i 3 mm (razlika je 2,5 mm) kao što je prikazano u Tabeli 12.

Isti postupak se mora ponoviti za napon fotonaponskog sistema od 1500 Vdc i za prenaponsku kategoriju 2 (impulsni napon 6000 V, koji odgovara preskočnom razmaku od 5,5 mm) i za prenaponsku kategoriju 1 (impuls napona od 4000 V, za koji je preskočni razmak 3mm). U ovom slučaju je razlika 2,5 mm. Uzimajući u obzir faktor korekcije nadmorske visine, potreban vazdušni razmak je ≈2,9 mm.

Prenaponska kategorija mrežnog međufaznog napona je za jednu kategoriju manja u odnosu na fazni napon prema zemlji (u skladu sa EN62109-1, 7.3.7.1.2 f) [12-13]. Stoga je to prenaponska kategorija 2 i za sistemski napon do 600 V, a to podrazumeva impulsni napon od 4000 V (prema EN62109-1, Tabela 12) [12-13]. Prema datoj tabeli, vazdušni razmak je 3 mm. Uz uvažavanje faktora korekcije nadmorske visine, dobija se potreban vazdušni razmak između faza od 3.5 mm. Iz ovog razloga, stvarni naponi u krugu napajanja moraju biti niži od probojnih napona, a vazdušni razmaci (preskočne staze) mogu biti i manji. S druge strane, dužina puzanja je strožiji zahtev za tu funkcionalnu izolaciju. Stoga nije od neophodno uzeti probojni napon za određivanje sigurnosnog razmaka.

Vazdušni razmak korišćen kao osnovna izolacija

Vazdušni razmak (preskočna staza) za osnovnu izolaciju se određuje ponaosob za fotonaponsko i mrežno kolo.

(A) Fotonaponsko invertorsko kolo

Za napon fotonaponskog sistema je 1500 Vdc i prenaponsku kategoriju 2, se konstatuje da je ovaj slučaj odgovara impulsnom naponu od 6000 V (EN62109-1, Tabela 12) [12-13]. Za fazni napon mrežnog sistema od 462 Vac i prenaponsku kategoriju 2 (kategorija 3 je smanjena na prenaponsku kategoriju 2), za fotonaponsko kolo sa transformatorom, podrazumeva impulsni napon od 4000 V [16]. Zahtevi za naponom fotonaponskog sistema su 6000 V umesto 4000 V impulsnog napona i stoga ovo treba uzeti za određivanje vazdušnog razmaka. Za napon 6000 V vazdušni razmak (preskočna staza) je 5,5 mm. Uzimajući u obzir faktor korekcije nadmorske visine, potreban vazdušni razmak za osnovnu izolaciju u kolu fotonaponskog sistema je 6,3 mm.

(B) Mrežno kolo

Napon mrežnog sistema od 462Vac i prenaponska kategorija 3 su u korelaciji sa impulsnim naponom od 6000 V. Upotrebom transformatora napon fotonaponskog sistema 1500 Vdc za prenaponsku kategoriju 2 podrazumeva impulsni napon 6000 V. Za impulsni napon 6000 V vazdušni razmak (preskočna staza) je 5,5 mm. Uzimajući u obzir faktor korekcije nadmorske visine, vazdušni razmak za osnovnu izolaciju mrežnog kola je 6,3mm..

U Tabeli 2 je prikazan način određivanja vazdušnog razmaka u fotonaponskom kolu i mrežnom kolu prema EN62109-1.

Vazdušni razmak korišćen kao zaštitno razdvajanje

Napon sistema, prenaponska kategorija i određivanje rezultujućeg impulsnog napona u ovom slučaju su isti kao i kod osnovne izolacije.

Potreban vazdušni razmak je veći za zaštitno razdvajanje nego za slučaj osnovne izolacije, jer kvar na izolaciji može biti fatalan za korisnika. Impulsni napon koji odgovara sledećoj većoj vrednosti u tabeli koristi se za zaštitno razdvajanje ostvareno pojačanom izolacijom (prema EN62109-1, 7.3.7.4.1) [12-13]. Stoga je odgovarajući impulsni napon 8000 V za fotonaponsko kolo i 6000 V za mrežno kolo (umesto 6000 V i 4000 V koji su se imali za osnovnu izolaciju).

Vazdušni razmak (preskočna staza) za fotonaponsko kolo je 8 mm i za mrežno kolo 5,5 mm (prema EN62109-1, Tabela 13) [12-13]. Uzimajući u obzir faktor korekcije nadmorske visine, potreban vazdušni razmak za pojačanu izolaciju je 9,2 mm za fotonaponsko kolo i 6,3 mm za mrežno kolo. Ova rastojanja moraju se uzeti za sve preskočne staze, odnosno vazdušne razmake između energetske priključaka: ulazni priključci, izlazni priključci, DC međukolo, gejtovi IGBT prekidača i elektronskih kola PV regulatora (kao što su korisnički interfejs i povratna sprega po struji, odnosno strujni senzori - Slika 9).

Tabela 2. Određivanje vazdušnog razmaka za fotonaponsko i mrežno kolo prema EN62109-1[16]

	Fotonaponsko kolo	Mrežno kolo
Sistemska napona	1500 Vdc	460 Vrms
Prenaponska kategorija	2	3
Rezultujući impulsni napon	6000 V	6000 V
Redukcija prenaponske kategorije za ostatak kola usled prisustva transformatora	2	1
Rezultujući impulsni napon za druga kola	2500 V	6000 V
Relevantan impulsni napon	6000 V	6000 V
Razmak za osnovnu izolaciju (EN62109-1, Tabela 13)	5,5 mm	5,5 mm
Vazdušni razmak za osnovnu izolaciju uzimajući u obzir korekcionni faktor za nadmorsku visinu od 1,14	6,3 mm	6,3 mm
Vazdušni razmak za zaštitno razdvajanje	8 mm	5,5 mm
Vazdušni razmak za zaštitno razdvajanje uzimajući u obzir korekcionni faktor nadmorske visine	9,2 mm	6,3 mm

III-2 Koordinacija izolacije fotonaponskog invertora koja se odnosi na puznu stazu ("creepage")

Prema normi EN62109-1, 7.3.7.6[12-13], materijali za zalivanje ili premazivanje mogu se koristiti za zaštitu štampanih ploča od zagađenja, ali takođe u cilju poboljšanja zaštite komponenti i delova koji se nalaze ispod premaza. Kada se premaz koristi za smanjenje stepena zagađenja u cilju smanjenja zahteva za sigurnosnim razmakom, onda se on naziva "konformni premaz". Step zagađenosti 1 važi za premazanu površinu. Konformni materijal za premazivanje je tanak polimerni film koji je dimenzija štampane ploče. Obično se ovi premazi izvode debljine (25÷250) µm.

Izolacioni premaz se primenjuje na elektronska kola radi zaštite od vlage, prašine, hemikalija i ekstremnih temperatura. Materijal za premaz mora zadovoljiti test u skladu sa standardom EN60664-3. Za razmatrani fotonaponski inverter je

pretpostavljeno da se za zaštitu od zagađenja ne koriste materijali za zalivanje i premazi. U analizi se smatra da se razmatrani fotonaponski inverter sastoji isključivo od štampanih ploča u vazduhu i da se ne koriste izolacioni premazi ili smole, kao komponente izolacije.

Standard EN62109-1 (Tabela 14, kolona 3) je relevantan za dužinu puzne staze do napona 1250 V. Za veće napone ili druge izolacione materijale na štampanoj ploči, kategorija izolacije je uzeta u obzir uzimajući dužinu puzne staze (kolone 5 do 8), kao što je na primer izolaciona folija između DC(+) i DC(-) priključaka. Fazni pomeraj između primarnog i sekundarnog napona transformatora je u principu nepoznat, ali se mora uzeti u obzir kroz korekcije, bazirane na uvećanju efektivnih vrednosti napona i za najkritičniji slučaj. Za efektivne vrednosti napona se koristi koren iz kvadratne sume naponskih komponenti.

Puzna staza korišćena kao funkcionalna izolacija

Mrežni napon od 800 V između faza L1, L2 i L3 je redukovan transformatorom prenosnog odnosa 2:1. Stoga su naponi između faza L1', L2' i L3' jednaki 400 V. Ako fotonaponski pretvarač nije opterećen, jednosmerni DC link biće izložen maksimalnom naponu fotonaponskog sistema, odnosno naponu koji je u ovom slučaju VDC +, DC- = 1500 V.

Solarni regulator osigurava da se ukupni jednosmerni napon ravnomerno deli između priključaka u jednosmernom međukolu: DC(+), N i N, DC(-). Prema tome maksimalni primenjeni napon je u ovom slučaju: VDC(+)N= VDC(-)N=750 V.

Napon na pojedinačnim IGBT prekidačima i diodama modula može se izračunati prema njihovim koeficijentima radnih ciklusa napona δ (tzv. "duty cycles"), koji zavise od indeksa modulacije M pretvarača [1-5],[15-16]. Fazni pomeraj ϕ između napona i struje ne utiče ni na koeficijent radnog ciklusa napona i na indeks modulacije M.

$$M = \frac{\text{vršna_međufaz_vrednost}}{0,5 \cdot V_{dc}} = \frac{400 \text{ V} \cdot \sqrt{2}}{0,5 \cdot 1500 \text{ V}} = 0,754$$

Koeficijent radnog ciklusa spoljnih IGBT prekidača je:

$$\delta = 1 - \frac{M}{\pi} = 1 - \frac{0,754}{\pi} = 0,76$$

Na unutrašnjim IGBT prekidačima i centralnim diodama je:

$$1 - \delta = \frac{M}{\pi} = \frac{0,754}{\pi} = 0,24$$

$$V_{DC+,L'upp} = V_{DC-,L'low} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\left(1 - \frac{M}{\pi}\right) \cdot 0,5 \cdot V_{dc} \right]^2 dt}$$

$$= \left(1 - \frac{M}{\pi}\right) \cdot 0,5 \cdot V_{dc} = 0,76 \cdot 0,5 \cdot 1500 \text{ V} = 570 \text{ V}$$

$$V_{L'1,L'1upp} = V_{L'1,L'1low} = V_{N,L'upp} = V_{N,L'low} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{M}{\pi} \cdot 0,5 \cdot V_{dc} \right]^2 dt} = \frac{M}{\pi} \cdot 0,5 \cdot V_{dc} = 0,24 \cdot 0,5 \cdot 1500 \text{ V} = 180 \text{ V}$$

Svi ostali karakteristični naponi će biti izračunati iz sledećih relacija:

$$V_{L',DC+} = V_{DC+,L'upp} + V_{L',L'1} = 570 \text{ V} + 180 \text{ V} = 750 \text{ V}$$

$$V_{DC+,L'low} = V_{DC-,L'upp} = V_{dc} - V_{DC+,L'upp} = 1500 \text{ V} - 570 \text{ V} = 930 \text{ V}$$

$$V_{L'1upp,L'1low} = V_{L'2upp,L'2low} = V_{L'3upp,L'3low} = \\ = V_{L'1,L'1upp} + V_{L'1,L'1low} = 180 \text{ V} + 180 \text{ V} = 360 \text{ V}$$

$$V_{L'1upp,L'2upp} = V_{L'1low,L'2low} = \frac{V_{DC+,L'upp}}{V_{L',DC+}} \cdot V_{L'L'} = \\ = \frac{570 \text{ V}}{750 \text{ V}} \cdot 400 \text{ V} = 304 \text{ V}$$

$$V_{L'1,L'2upp} = V_{L'1,L'2low} = \sqrt{V_{L'1,L'2}^2 + V_{L'1,L'1low}^2} = \sqrt{400^2 + 180^2} \text{ V} = 440 \text{ V}$$

$$V_{L'1upp,L'2low} = \sqrt{V_{L'1upp,L'2upp}^2 + V_{L'1upp,L'1low}^2} = \sqrt{304^2 + 360^2} \text{ V} = 471 \text{ V}$$

$$V_{L'1,N} = \sqrt{V_{N,L'1upp,L'2upp}^2 + V_{L'1,L'1upp}^2} = \sqrt{180^2 + 180^2} \text{ V} = 253,4 \text{ V}$$

U ovom primeru DC(-) priključak je povezan sa "zemljom" preko otpornika za uzemljenje. Stoga su naponi prema "zemlji" jednaki:

$$V_{DC-,e} = 0 \text{ V}$$

$$V_{N,e} = V_{DC-,e} + V_{DC-,N} = 0 \text{ V} + 750 \text{ V} = 750 \text{ V}$$

$$V_{DC+,e} = V_{DC-,e} + V_{dc} = 0 \text{ V} + 1500 \text{ V} = 1500 \text{ V}$$

Proračun napona između faznih priključaka L1', L2' i L3' do uzemljenog DC(-) priključka, ima smisla radi bolje razumevanja koristiti modifikovani ekvivalentni dijagram fotonaponskog kola koji je prikazan na Slici 10. U tom slučaju, se uzima da DC(-) sabirnica nije povezana sa "zemljom" preko otpornika, već da je umesto toga povezana sa zvezdištem transformatora koje je uzemljeno.

Ovo modifikovano kolo je u principu isto kao i kolo koje je razmatrano na primeru frekventnog regulatora u referencama [14-16]. Shodno tome napon između sabirnica DC(+) ili DC(-) do referentne "zemlje" je jednak polovini napona DC međukola. Prema tome, napon između srednje tačke DC međukola i "zemlje" je u ovom slučaju jednak 0. To znači da se ekvivalentno može uzeti da su zvezdište transformatora i srednja tačka DC međukola spojeni na priključak za uzemljenje PE (na Slici 10 je simbolički označen sa "e"). To takođe znači da će napon zvezdišta prema uzemljenju biti jednak polovini napona DC međukola [14-16]

Na osnovu prethodnog, lako se dobijaju naponi fotonaponskog kola u odnosu na „zemlju“ preko sledećih relacija:

$$V_{L,DC-} = V_{L,e} = 800 \text{ V} / \sqrt{3} = 462 \text{ V}$$

$$V_{L,DC+} = V_{L,e} + V_{dc} = 462 \text{ V} + 1500 \text{ V} = 1962 \text{ V}$$

$$V_{L,N} = V_{L,e} + 0,5V_{dc} = 462 \text{ V} + 0,5 \cdot 1500 \text{ V} = 1212 \text{ V}$$

Takođe mora se uzeti u obzir da ulazni i izlazni napon transformatora mogu biti proizvoljno fazno pomereni (u zavisnosti od sprege transformatora):

$$V_{L,L'} = V_{L,DC+} - V_{L',DC+} = 1962 \text{ V} - 750 \text{ V} = 1212 \text{ V}$$

$$V_{L,L'upp} = V_{L,DC+} - V_{DC+,L'upp} = 1962 \text{ V} - 570 \text{ V} = 1392 \text{ V}$$

$$V_{L,L'low} = V_{L,DC-} + V_{DC-,L'low} = 462 \text{ V} + 570 \text{ V} = 1032 \text{ V}$$

Dužine puznih staza preuzete iz EN62109-1 (Tabela 14, kolona 3) se baziraju na ovim naponima. Nisu svi naponski nivoi dati u Tabeli 14, pa se inače može koristiti dozvoljena interpolacija. Na primer za napon $V_{L,L'1} = 1212 \text{ V}$ dužina puzne staze se izračunava kao:

$$d_{L,L'1} = 5 \text{ mm} + \frac{6,3 \text{ mm} - 5 \text{ mm}}{1250 \text{ V} - 1000 \text{ V}} \cdot 212 \text{ V} = 6,1 \text{ mm}$$

Puzna staza korišćena kao osnovna izolacija

Primenjeni naponi na osnovnoj izolaciji izračunati su za funkcionalnu izolaciju zbog uzemljenog priključka DC(-). Takođe se mora proveriti da li je vazdušni razmak (preskočna staza) veći od dužine puzne staze. Ako je potrebno, dužina puzne staze mora biti povećana do nivoa vazdušnog razmaka. U Tabeli 3 su date zahtevane dužine puzne staze za osnovnu izolaciju

Tabela 3. Primenjeni RMS naponi karakterističnih tačaka u odnosu na DC(-) priključak i zahtevana dužine puzne staze za osnovnu izolaciju

	L ₁ , L ₂ , L ₃	L'-DC	L' _{1upp} , L' _{2upp} , L' _{3upp}	L' _{1low} , L' _{2low} , L' _{3low}	DC+	N	DC-
Primenjeni RMS napon [V]	462	750	930	570	1500	750	0
Dužina puzne staze prema EN62109-1 Tabela 14 [mm]	2,3	3,8	4,7	2,9	15	3,8	3,8
Zahtevana dužina puzne staze obzirom na vazdušni razmak sa korekcionim faktorom 1,14 [mm]	5,5	6,3	6,3	5,5	15	6,3	6,3

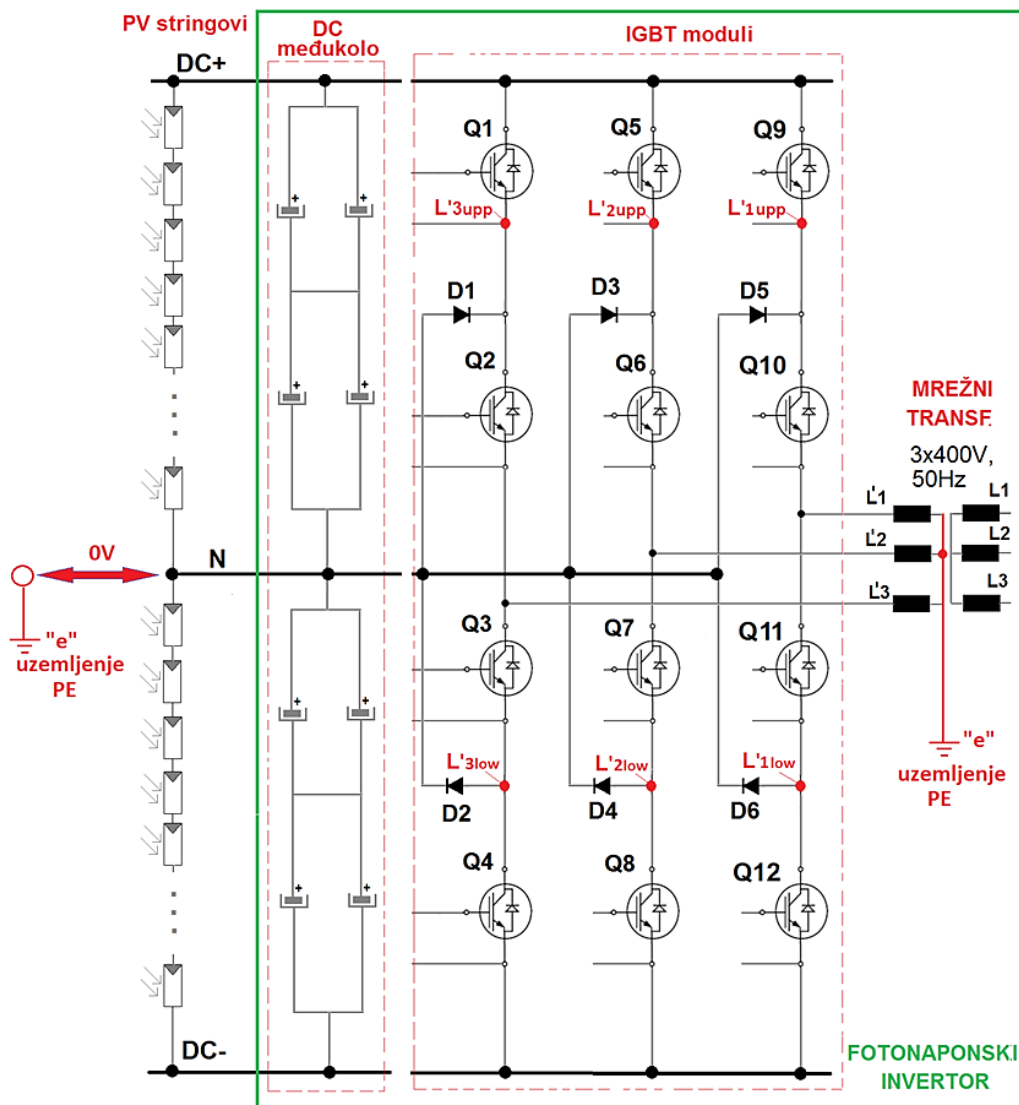
Tabela 4. Primenjeni RMS naponi karakterističnih tačaka u odnosu na DC(-) priključak i zahtevana distanca puzanja za zaštitno razdvajanje

	L ₁ , L ₂ , L ₃	L'-DC	L' _{1upp} , L' _{2upp} , L' _{3upp}	L' _{1low} , L' _{2low} , L' _{3low}	DC+	N	DC-
Primenjeni RMS napon [V]	462	750	930	570	1500	750	0
Dvostruka dužina puzne staze prema EN62109-1 Tabela 14 [mm]	3,5	7,6	9,4	6,0	30	7,6	7,6
Zahtevana dužina puzne staze obzirom na vazdušni razmak [mm]	6,3	9,2	11	9,2	30	9,2	9,2

Puzna staza korišćena kao zaštitno razdvajanje

Naponi za određivanje puzne staze za zaštitno razdvajanje ostvareni pojačanom ili dvostrukom izolacijom isti su kao i kod osnovne izolacije, ali su zahtevi za dužinom puzne staze strožiji. Rastojanja koja figurišu u EN62109-1 (Tabela 14) [12-13], moraju se udvostručiti, kao što je dato u EN62109-1, 7.3.7.5.1) [12-13].

Ponovo se mora proveriti da li je vazdušni razmak (preskočna staza) veći od udvostručene dužine puzne staze. Ako je potrebno, dužina puzne staze se mora povećati do nivoa vazdušnog razmaka. U Tabeli 4 su date zahtevane dužine puzne staze za izolaciju sa zaštitnim razdvajanjem.



Slika 10. Principialna blok šema fotonaponskog pretvarača sa modifikovanim uzemljenjem [14]

III-3 Koordinacija izolacije fotonaponskog invertora koja se odnosi na čvrstu izolaciju

Kao čvrste izolacije štampanih ploča (PCB) i elektronskih modula, se mogu koristiti postupci zalivanja ili premazivanja. Za ovu primenu, materijali moraju proći ispitivanje u skladu sa EN60664-3 (odnosno EN62109-1, 7.3.7.8.4.2). U ovom slučaju se pretpostavlja da razmatrani fotonaponski pretvarač nema čvrstu izolaciju koje je dobijena prethodno pomenutim postupcima.

Za unutrašnje slojeve višeslojnih štampanih ploča izolacija između susednih vodova na istom sloju mora biti tretirana ili kao puzna staza za stepen zagađenja 1 i vazdušni razmak (kao što je

navedeno u prethodnim zahtevima) ili kao čvrsta izolacija (EN62109-1, 7.3.7.8.4.1) [12-13].

Čvrsta izolacija korišćena kao funkcionalna izolacija

Standard nema posebne zahteve za funkcionalnu izolaciju, već je samo opisano određivanje relevantnih napona u standardima (EN62109-1, 7.3.7.3 i 7.3.7.8.2.2) [12-13]. U ovom slučaju nisu potrebne nikakve test procedure.

Čvrsta izolacija korišćena kao osnovna izolacija

Izolacioni materijal tanji od 700µm ne sme biti podvrgnut mehaničkom naprezanju, što je slučaj kod unutrašnjih slojeva štampanih ploča (PCB). Na komponentama i na pod-sklopovima

se moraju se obaviti dva ispitivanja u cilju provere da čvrsta izolacija može da izdrži naponski stres. Ispitivanje podnosivog napona na impuls mora se izvršiti kao tipsko ispitivanje prema EN62109, Tabela 15 [12-13].

Prema EN62109-1 (Tabela 16, kolona 4) ispitni napon fotonaponskog pretvarača je 6000 V za mrežno kolo i za napon 600 V (bez korišćene interpolacije, obzirom da nije dozvoljena u ovom slučaju), dok je prema EN62109-1 (Tabela 16, kolona 2) ispitni napon za fotonaponsko kolo 3310 V (sa korišćenom interpolacijom za 462 V, koja je u ovom slučaju dozvoljena).

Ispitivanje dielektrične čvrstoće mora biti izvedeno i kao tipsko ispitivanje i kao rutinsko ispitivanje (prema EN62109-1, 7.3.7.8.2.1). Ispitni naponi su 1662 Vac ili 2350 Vdc za mrežno kolo, prema EN62109-1 (Tabela 17, kolona 2 za 462 V) i 1660 Vac ili 2300 Vdc za fotonaponsko kolo, prema EN62109-1 (Tabela 18, kolona 2 za 1500 V) [12-13].

Čvrsta izolacija korišćena kao zaštitno razdvajanje

Razmatrani fotonaponski pretvarač ima zaštitno razdvajanje samo prema fotonaponskom kolu. Uzeti su u obzir optokapleri za razdvajanje PWM signala i razdvojni transformatori za napajanje pobudnih kola (drajvera) IGBT prekidača. Sve ove komponente se montiraju na štampanu ploču-PCB.

Ako je debljina izolacije po sloju manja od 0,2 mm, za zaštitno razdvajanje su potrebna najmanje tri sloja materijala. Za deblji materijal dovoljna su dva sloja (prema EN62109-1, 7.3.7.8.3.2) [12-13].

U cilju provere zaštitnog razdvajanja za dati fotonaponski inverter moraju se izvršiti tri ispitivanja na komponentama, podsklopovima i slojevima višeslojnih štampanih ploča (PCB):

(1) *Ispitivanje na podnosivi impulsni napon* mora se izvršiti kao tipsko ispitivanje. Ispitivanje uzorka mora se izvršiti ako se izolacija dodatno sastoji od jednog sloja materijala (EN62109-1, 7.3.7.8.2.1) [12-13]. Ispitni naponski impuls je 8000 V za mrežno kolo prema EN62109-1, (Tabela 16, kolona 5 za 600 V) i 5080 V za fotonaponsko kolo, prema EN62109-1 (Tabela 16, kolona 3 za 462V).

(2) *Ispitivanje dielektrične čvrstoće* mora se izvršiti kao tipsko ispitivanje za mrežno i fotonaponsko kolo. Ispitni napon mrežnog kola je 3324 Vac ili 4700 Vdc, prema EN62109-1 (Tabela 17, kolona 3 za 462V), a ispitni napon fotonaponskog kola je 2760 Vac ili za 4000 Vdc, prema EN62109-1 (Tabela 18, kolona 3 za 1500 V) [12-13].

(3) *Rutinsko ispitivanje fotonaponskog kola* je dodatno neophodno za implementirane transformatore za napajanje IGBT pobudnih kola sa ispitnim naponom od 2060 Vac ili 2400 Vdc, prema EN62109-1 (Tabela 18, kolona 2 za 1500 V) [12-13]. Za napone veće od 700 V_{peak} i naponska naprezanja veća od 1000 V/mm kroz čvrstu izolaciju neophodno je ispitivanje na parcijalna pražnjenja i to kao tipsko ispitivanje i ispitivanje na uzorku (prema EN62109-1, 7.3.7.8.2.1) [12-13].

Nazivni napon pražnjenja je zbir ponavljajućih vršnih napona u svakom od krugova odvojenih izolacijom (EN62109-1, Tabela 19) pri maksimalnom PV naponu (u ovom slučaju 1500 V) plus tranzijentni napon na IGBT prekidaču od 50 V. U ovom slučaju

je pretpostavljeno samo 50 V tranzijentnog napona, obzirom da je struja opterećenja ograničena pri maksimalnom PV naponu, kako upravo ne bi došlo do tranzijentnog prenapona.

Minimalni napon gašenja parcijalnog pražnjenja je:

$$V_{PDext} = 1,5 \cdot V_{recurring_peak} = 1,5 \cdot (1500 \text{ V} + 50 \text{ V}) = 2325 \text{ V}$$

Ova vrednost je u stvari minimalna vršna vrednost ispitnog napona parcijalnih pražnjenja za učestanost 50Hz.

III-4 Sumarni rezultati koordinacije izolacije za razmatrani fotonaponski inverter

Rezultati koordinacije izolacije za 3L NPC solarni inverter čija je topologija prikazana na Slikama 9 i 10, a u skladu sa standardom EN62109-1, su sumarno prikazani u Tabeli 5.

Tabela 5. Zahtevi izolacije za razmatrani 3L NPC fotonaponski pretvarač (inverter) u skladu sa EN62109-1

EN62109-1		Tip izolacije		
		Funkc. izolac.	Osnovna izolacija	Zaštitno razdvajanje
Realizacija izolacije	Vazdušni razmak ("clearance")	3,1 mm	6,3 mm	9,2 mm
	Puzna staza ("creepage")	15 mm	15 mm	30 mm
	Čvrsta izolacija			
	Impulsni test podnosivog napona	-	3310 V* i 6000 V**	5080 V* i 8000 V**
	AC ili DC ispitni napon	-	(1660 Vac/2300 Vdc) * i (1662Vac/2350 Vdc) **	(2760 Vac/4000 Vdc) * i (3324Vac/4700 Vdc) **
	Minimalni napon gašenja parcijalnog pražnjenja	-	-	2325V _{peak} *
* za fotonaponsko kolo, ** za mrežno kolo				

IV ZAKLJUČAK

U radu su dati postupci za koordinaciju izolacije za fotonaponski inverter sa tri nivoa i fiksiranom neutralnom tačkom, koji se koristi u solarnim "on-grid" sistemima. Razmatrani su postupci za koordinaciju izolacije obzirom na vazdušne razmake (preskočne staze), puzne staze i čvrstu izolaciju. Celokupna analiza i dobijanje rezultata su bazirani na relevantnom standardu IEC/EN 62109-1, 2010. Na kraju su dati sumarni rezultati koordinacije izolacije za jedan tipični fotonaponski inverter. Prikazani postupci koordinacije izolacije mogu biti od značaja kako za projektantsku praksu, ali iza korisnike fotonaponskih invertora.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru istraživanja koja su finansirana 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.

LITERATURA/

- [1] Moussa, F.H.M.S., Morsli, A., Tlemčani,1A., Belmili, H., Nouri, H. A Comparison Analysis between Two and Three Levels Inverter to Grid-

- Connected Used the Photovoltaic System, in Proc. *2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM)*, Medea, Algeria, pp. 1-6, 28-29 November, 2023.
<https://doi.org/10.1109/IC2EM59347.2023.10419754>
- [2] Chen, L., Amirahmadi, A., Zhang, Q., Kutkut, N., Batareseh, I. Design and implementation of three-phase two-stage grid-connected module integrated converter, *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 29, No. 8, pp. 3881-3892, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2294933>
- [3] Lahouar, F., Ben Hadj Slama, J., Hamouda, M., Ben Mustapha, F. Comparative study between two and three-level topologies of grid-connected photovoltaic converters, in Proc. *Proceedings of the 5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Tunisia, pp. 1-6, 25-27 March, 2014. <https://doi.org/10.1109/IREC.2014.6826907>
- [4] Chakraborti, A., Chanda, M., Sarkar, A., Das, B., Kasari, P., Saha, A., Pandit, D., Sunny, A.C. Improved single stage grid connected solar PV system using multilevel inverter, in Proc. *2016 IEEE International Conference on Power Electronics Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India, 14-17 December, 2016. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914484>
- [5] Manandhar, U., Zhang, X., Gooi, H.B., Wang, B., Fan, F. Active DC-link balancing and voltage regulation using a three-level converter for split-link four-wire system, *IET Power electron*, Vol. 13, No. 12, pp. 2424-2431, 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2020.0067>
- [6] Jani, R.G., Kapil, P.N. Analysis of different modulation techniques for multilevel inverters, in Proc. *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, India, pp. 3017-3022, 04-06 July, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853179>
- [7] Single switch IGBT module, DYNEX Semiconductor Ltd. 2020 Technical Documentation
https://www.dynexsemi.com/Portals/0/assets/downloads/DNX_DIM750AS_M65-PS500.pdf [pristupljeno 24.01.2025]
- [8] Calculating Power Losses in an IGBT Module Application Note Replaces AN6156-1 AN6156-2 February 2021 LN40671,
https://www.dynexsemi.com/Portals/0/assets/downloads/DNX_AN6156.pdf [pristupljeno 24.01.2025]
- [9] International Electrotechnical Commission, IEC-61000-4-19, Electromagnetic compatibility 2014,
<https://webstore.iec.ch/en/publication/4188> [pristupljeno 24.01.2025]
- [10] International Electrotechnical Commission, IEC-60071-1, Insulation coordination, 2006, <https://webstore.iec.ch/en/publication/578> [pristupljeno 24.01.2025]
- [11] Despotović, Ž.V. Razmatranje koordinacije izolacije u energetske pretvaračima: osnovni pojmovi i pregled standarda u oblasti, in: Janda Ž. (Ed.), *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, No. 31, pp. 39-56, 2021. <https://doi.org/10.5937/zeint31-34666>
- [12] International Electrotechnical Commission, IEC 62109-1, IEC *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems –Part 1: General requirements*, 2010, <https://webstore.iec.ch/en/publication/6470> [pristupljeno 24.01.2025]
- [13] Institut za standardizaciju Srbije, SRPS EN 62109-1:2011, *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 1: General requirements*, 2011, <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:33814> [pristupljeno 24.01.2025]
- [14] Despotović, Ž.V. Karakteristični primeri koordinacije izolacije u energetske pretvaračima, in: Janda Ž. (Ed.), *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, No. 31, pp. 57-84, 2021. <https://doi.org/10.5937/zeint31-34667>
- [15] Semikron Danfoss International, Application Note 3L NPC, TNPC, ANPC Topology, 2015,
<https://assets.danfoss.com/documents/latest/468748/AB501636827467en-000301.pdf> [pristupljeno 24.01.2025]
- [16] Semikron Danfoss International, Application Note AN 14-005,
<https://assets.danfoss.com/documents/latest/444049/AB501647957491en-000201.pdf> [pristupljeno 24.01.2025]

AUTORI

dr **Željko V. Despotović**, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovice@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
 dr **Miodrag Vuković**, CONSEKO d.o.o., m.vukovic@conseko.rs, ORCID [0000-0003-0158-192X](https://orcid.org/0000-0003-0158-192X)
 Marko **Tajdić**, dipl.el.inž., Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, marko.tajdic@pupin.rs, ORCID [0009-0000-1187-2988](https://orcid.org/0009-0000-1187-2988)

Challenges for the Energy Sector and the Impact of Energy Inflation on Inflation in Southeast European Countries

Abstract – Three-phase photovoltaic "on-grid" three level with neutral point clamped (3L NPC) have become very interesting for high-power photovoltaic systems from the aspect of output voltage quality and reduction of harmonics injected into the power grid. This type of inverter shows several advantages compared to classic three-phase inverters with two levels. One of the important aspects of the reliable and safe operation of this grid photovoltaic inverter is the types of insulation applied in it. When we talk about isolation, it means the isolation between the power circuits of the inverter and the grid power supply on the one hand, and the isolation between the control and communication electronic circuits and the power stage of the inverter. The paper presents an example of the analysis and coordination of the insulation of a "on-grid" 3L NPC photovoltaic inverter, based on the EN62109-1 standard. The input DC voltage of the analysed PV inverter is ≤ 1500 V, the mains voltage is 3×400 V, 50Hz, the protection system is TN-C, and the photovoltaic inverter is connected to the power grid via a three-phase power transformer with a transmission ratio of 2:1 (800 Vac/400 Vac).

Index terms – Photovoltaic systems, 3L NPC PV inverter, Coordination insulation, On-grid, Galvanic insulation, TN-C protection system