Detekcija i kontrola struje curenja solarnih invertora

Željko V. Despotović^{*}, Miodrag Vuković^{**}

* Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija ** CONSEKO d.o.o, Beograd, Srbija

Rezime - Struja curenja u fotonaponskim (FN) sistemima, koja je takođe poznata kao rezidualna struja ili *"leakage current*" (engl.) je posledica parazitnog kapaciteta između FN sistema i zemlje (FN elektrane na tlu) ili FN sistema i konstrukcije objekta koji je uzemljen (FN elektrane na krovu objekta). Kada parazitna kapacitivnost između FN sistema i elektroenergetske mreže formira petlju, napon zajedničkog moda će proizvesti struju zajedničkog moda na parazitnoj kapacitivnosti. Motivacija za pisanje ove kratke studije je potekla iz prakse gde su se autori suočili sa pomenutim problemom na konkretnoj FN elektrani izlazne snage 10kW. Stoga će glavna tema u radu biti topologije solarnih invertora i njihov dodatni uticaj na rezidualnu struju, kao i načini njene detekcije. Takođe biće dat pregled relevantnih standarda u ovoj oblasti i neke moguće tehnike za kontrolu struja curenja u FN sistemima sa solarnim invertorima.

Ključne reči - FN elektrane, parazitna kapacitivnost, rezidualna struja, FN invertor, diferencijalna zaštita

I UVOD

bzirom na strukturu i mehaničke dimenzije, fotonaponski (FN) paneli (eng. "photovoltaic"-PV), bilo da su montirani na tlu ili na krovovima zgrada, uvek imaju izvesnu kapacitivnost prema zemlji ili bliskim uzemljenim metalnim delovima. Ova kapacitivnost nije neophodna za funkcionisanje pojedinačnog FN panela ili niza FN panela (stringova). Ona suštinski potiče od konačnih dimenzija i mehaničke strukture solarnih modula, ali i zavisi i od načina njihove instalacije i ugradnje. U praksi se često ovaj kapacitet naziva "parazitni" obzirom da postoji, a nema uticaj na funkcionalni rad FN nizova. Ovaj kapacitet je proporcionalan površini solarnih panela, obrnuto a proporcionalan rastojanju između solarnih panela i zemlje ili uzemljenih metalnih delova. Stoga FN niz ili više njih (kao na primer jedna FN elektrana) pokazuju relativno veliku parazitnu kapacitivnost prema "zemlji". Ona može biti dodatno povećana ako su površine pojedinačnih ili grupnih nizova FN panela vlažni, kao posledica kiše ili kondenzacije[1].

Pomenuti parazitni kapacitet ni na koji način ne utiče na izolacione karakteristike FN modula, međutim, može uticati na rad i ponašanje DC/AC pretvarača-invertora, koji su sastavni deo fotonaponskog sistema i koji su direktno preko DC strane galvanski povezani sa FN modulima. Ako se koriste invertori bez transformatora, kapacitivne struje, mogu da se pojave na AC strani invertora ili čak u AC napojnom vodu invertora, i tada se govori o tzv. preostalim (*rezidualnim*) strujama[1-2]. U jednom slučaju ova pojava prouzrokuje da se pod dejstvom automatske zaštite invertor privremeno isključuje sa mreže, pri čemu će se nakon određenog vremena ponovo vratiti na mrežno napajanje. U

drugom slučaju, dovod će biti prekinut sve dok se zaštitni uređaj za preostalu struju ručno ne aktivira (tzv. resetovanje zaštite). Prekidi ove vrste mogu se u velikoj meri sprečiti pažljivim i profesionalnim planiranjem sistema.

II FORMULACIJA PROBLEMA PARAZITNE KAPACITIVNOSTI

FN modul formira električno provodnu površinu koja je okrenuta prema uzemljenom nosećem okviru koji se nalazi obično na krovu objekta ili na metalnom nosaču montiranom na zemlji. Uprošćeni prikaz jednog ovakvog tipičnog detalja montaže FN modula je dat na Slici 1. Kompletan raspored FN modula ima odgovarajući parazitni kapacitet koji se sastoji od tri komponente: (1) C_1 - parazitni kapacitet vodenog ili kapljičastog sloja na površini FN modula u odnosu na sloj stakla, (2) C_2 - parazitni kapacitet FN modula prema uzemljenom nosećem ramu, (3) C_3 - parazitni kapacitet FN modula prema krovnoj konstrukciji [1-3].

Stoga je ukupna parazitna kapacitivnost $C_{PE}=C_1+C_2+C_3$. U praksi važi odnos $C_1 >> C_2 >> C_3$. Pomenute kapacitivnosti se mogu izračunati iz opšte relacije:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S/d \tag{1}$$

gde su:

 ε_0 - dielektrična konstanta vazduha (8,85·10⁻¹² As/Vm),

 ε_r - relativna dielektrična konstanta dielektrika (za staklo ε_r =5÷10)

S - površina FN modula ili grupe modula, $[m^2]$

d - karakteristična rastojanja između pojedinih površina [m].



Slika 1. Prikaz parazitnih kapacitivnosti FN modula na krovnoj konstrukciji [1]

Obično u kišnim i vlažnim uslovima ukupnim kapacitetom C_{PE} dominira C_1 , tako da se u tom slučaju C_2 i C_3 mogu zanemariti. U suvim uslovima, s druge strane, C_1 je toliko mali da se ova druga dva moraju uzeti u obzir.

Treba napomenuti da je u svim slučajevima ukupni kapacitet C_{PE} toliko mali da je bilo koji uticaj na radno ponašanje fotonaponskog sistema zanemarljiv. Ipak najveći uticaj na struje curenja invertora ima vrednost C_1 tokom kišnih i vlažnih uslova (slučaj kondenzacije vlage je tipičan), te će ona stoga biti predmet daljeg razmatranja u ovom radu. Primer procene parazitne kapacitivnosti C_{PE} za Tip1 - standardni (monokristalni i polikristalni) FN modul i za Tip2 - modul na bazi tankog filma su dati u Tabeli 1[1-2].

Tabela 1. Tipične vrednosti parazitne kapacitivnosti

Tip	Efikasnost (%)	Debljina stakla (mm)	Kapacitivnost /m ² (nF)	Kapacitivnost /kW istalisane DC snage (nF)	Kapacitivnost /100 kW instalisane DC snage (µF)
1	15÷20	3÷4	12÷17	60÷110	6÷11
2	10÷15	2÷3	16	100÷160	10÷16

Praktične vrednosti struje curenja *I* se mogu dobiti iz izraza za efektivnu vrednost:

$$I = \omega \cdot C \cdot U = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U \tag{2}$$

Za U=230V, f=50Hz i $C=8\mu$ F (tipično za FN elektranu 100 kW sa monokristalnim FN modulima) dobija se da je efektivna vrednost struje curenja 577 mA.

Ova struja curenja je reaktivna i njen fazni pomeraj je 90° u odnosu na linijski napon. U prvoj aproksimaciji ova struja ne prouzrokuje bilo kakve gubitke, međutim može uticati na rad invertora koji je povezan na elektroenergetsku mrežu.

III UTICAJ SPREGE INVERTOR-ELEKTROENERGETSKA MREŽA

Tokom rada FN moduli su povezani na AC mrežu preko invertorskog pretvarača bez transformatora, kao što pokazuje Slika 2.



Slika 2. Kontura struje curenja usled parazitne kapacitivnosti niza FN modula-neizolovan invertorski sistem

Kada se formira petlja između parazitnog kapaciteta C_{PE} fotonaponskog sistema (kućnog priključka) i električne mreže (sabirnice PE), u ovom FN sistemu, impedansa petlje je relativno mala, a zajednički napon ("common mode voltage") formira relativno veliku zajedničku struju ("common mode current"), odnosno struju curenja kroz parazitnu kapacitivnost. Na ovaj način deo amplitude naizmeničnog napona stiže do FN

modula. Kao rezultat ovog, kompletan FN niz (string) "pliva" na naizmeničnom potencijalu u odnosu na ostatak kola. Slično se dešava za kada je invertor povezan na mrežu preko transformatora (Slika 3), ali je u tom slučaju parazitna struja manja jer se u zajedničku konturu ubacuje i izolaciona kapacitivnost C_{12} između primara i sekundara.



Slika 3. Kontura struje curenja usled parazitne kapacitivnosti niza FN modula-izolovan invertorski sistem preko mrežnog transformatora

U skoro svim monofaznim invertorima bez transformatora, iz operativnih razloga, polovina amplitude mreže se prenosi na fotonaponski modul. U mnogim evropskim mrežama sa 230 V/50 Hz, ovaj raspored osciluje, na primer, na 115 V/50Hz. Ovo se odnosi na pretvarače *Sunny Boy* i *Sunny Mini Central* sa sufiksom "TL" u nazivu proizvoda [1-2].

Kod trofaznih invertora bez transformatora, iz sistemskih razloga, oscilacije su znatno manje amplitude u odnosu na monofazni slučaj i kao rezultat toga, stvaraju se manje struje curenja. Prolaz naizmeničnog napona do fotonaponskog modula je u velikoj meri potisnut, ali i dalje postoji. Ovo se odnosi na sve *Sunny TriPower* invertore[1-2].



Slika 4. Potencijali u MPP sistemu 400V za nekoliko tipova invertora proizvodnje SMA [4]

U invertorima sa transformatorima, napon unutar FN modula osciluje poput "talasanja" od samo nekoliko volti. Ovo daje porast do malog naizmeničnog AC napona u odnosu na PE (odnosno "zemlju") koji, međutim, nije ujednačen preko celog FN niza. Ovaj fluktuirajući napon konstantno menja stanje napunjenosti parazitnog kondenzatora C_{PE} opisanog u prethodnom odeljku. Ovo je povezano sa strujom pomeranja, koja je proporcionalna kapacitivnosti i amplitudi primenjenog napona.

Potencijal najnižeg FN modula (plava boja) ili najvišeg FN modula (crvena boja) u nizu (stringu) zavisi od korišćenog pretvarača, kao i od toga i da li je niz uzemljen. Primer za MPP napon od 400 V je dat na Slici 4 [1].

IV UTICAJ STRUJE CURENJA NA REZIDUALNU STRUJU

Kapacitivna struja curenja opisana u poglavlju II je reaktivna struja, bez gubitka. Međutim, ako kvar kao što je neispravna izolacija prouzrokuje da vod pod naponom dođe u kontakt sa uzemljenom osobom (Slika 5), dodatna struja će proticati u zemlju. Ova neželjena struja uzrokuje gubitke i naziva se *rezidualnom* strujom. Zbir obe ove struje (struja curenja i rezidualna struja) je *diferencijalna struja*. AC rezidualne struje veće od 30 mA mogu biti opasne po život

Da bi se obezbedila lična bezbednost, pored klase zaštite FN niza, invertori bez transformatora moraju biti isključeni sa energetske mreže odmah po pojavi rezidualne struje od 30 mA (DIN VDE 0126-1-1). U tu svrhu, tokom rada napajanja, diferencijalna struja (struja curenja + rezidualna struja) se meri pomoću jedinica za praćenje rezidualne struje (*"residual current monitoring unit"*- RCMU) koja je osetljiva na sve polove. Međutim, na ovaj način može samo da se meri diferencijalna struja (struja curenja + rezidualna struja). Moguće je samo u ograničenoj meri izvući rezidualnu struju, i to postaje sve teže sa povećanjem struje curenja. Od približno 50 mA naviše, slučajne fluktuacije u struji curenja postaju toliko velike da se mogu protumačiti kao iznenadni udari zaostalih struja od preko 30 mA. U takvim slučajevima, preventivno, invertor se automatski isključuje sa distributivne mreže[1-2], [4].



Slika 5.Formiranje preostale (rezidualne struje) usled oštećenja izolacije na DC strani

V STANDARDI I MERNE METODE

Prema standardima NB32004-2013, DIN VDE V 0-126-1-1:2006, IEC62109-2:2011, u slučajevima kada je solarni invertor priključen na mrežu naizmenične struje, a prekidač naizmenične struje isključen, pretvarač treba da obezbedi detekciju struje curenja. Detekcijom treba obuhvatiti otkrivanje ukupne struje (uključujući komponente jednosmerne i naizmenične struje), efektivnu vrednost struje, i rezidualnu struju u ustaljenom režimu. Ako stacionarna rezidualna struja prelazi niže navedene granice, pretvarač treba da se isključi i pošalje signal greške u roku od 0.3 s[5-6]:

1. Za invertore nominalne izlazne snage manje ili jednake 30kVA, ova vrednost je 300mA.

2. Za invertore nominalne izlazne snage veće od 30KVA, ova vrednost je 10mA/kVA.

Tri su veoma bitna aspekta, koji karakterišu struju curenja za FN invertorske sisteme. Kao prvo struja curenja je složen sadržaj. Postoje njene DC i AC komponente. Kao drugo, trenutna podvrednost je veoma niska, koja je na nivou miliampera. Kao treće, izuzetno su visoki zahtevi za preciznošću merenja, odnosno potreban je veoma specifičan strujni senzor za detekciju ove struje.

Na Slici 6 je dat izgled i principska šema senzora. Na Slici 6(a) je dat komercijalni izgled senzora, dok je na Slici 6(b) dat principski prikaz. U suštini je to AC/DC senzor struje curenja uzemljenja koji koristi magnetni senzor, koji obezbeđuje visoku osetljivost za detekciju struje širokog opsega. Senzor struje sopstvenim impulsnim pobudnim sistemom se koristiti za detekciju male AC/DC struje od 10mA. Za detekciju struje curenja u ovom slučaju se koriste širina impulsa i frekvencija impulsa. Na ovaj način je postignut široki opseg merenja od 1:1000. koncept realizovan Ovaj je jednostavnom konfiguracijom i niskom cenom senzora, koji predstavlja torusno jezgro zasnovano na tanko slojnom nano kristalnom mekom magnetnom materijalu, pobudnom namotaju i elektronskom kolu za detekciju struje curenja koje na svom izlazu daje napon Vo.

Fotonaponski standard predviđa da se za detekciju fotonaponske struje curenja mora koristiti takozvani tip B, odnosno strujni senzor koji može da meri i naizmeničnu i jednosmernu struju curenja. Upravo je takav senzor prikazan na Slici 6. Senzor struje je instaliran na spoljnom linijskim izlaznom vodovima invertora, tako da detektuje struju curenja (od bilo kojeg linijskog voda ka uzemljenju).



Slika 6. Senzor za detekciju struje curenja invertora; (a) komercijalni izgled i ugradnja, (b) principski prikaz

VI TEHNIKE KONTROLE STRUJE CURENJA

U ovom trenutku je tehnologija suzbijanja i kontrola struje curenja veoma aktuelna tema na nivou naučnih istraživanja ali i praktične implementacije u oblasti fotonaponskih sistema povezanih na elektroenergetsku mrežu.

Veličina struje curenja zavisi od parazitne kapacitivnosti C_{PE} između fotonaponskog sistema i zemlje, kao i od brzine promene napona zajedničkog moda (tzv. "*comon mode voltage*"). Vrednost parazitne kapacitivnosti je takođe povezana sa spoljnim uslovima životne sredine, meteorološkim uslovima, veličinom i strukturom fotonaponskih modula i drugim faktorima. Kao što je prethodno rečeno ova parazitna kapacitivnost može imati specifičnu vrednost po kW instalisane snage u opsegu 50-150nF/kW. Brzina promene napona zajedničkog moda je pre svega određena topologijom i strukturom i modulacionim algoritmom FN invertorskog pretvarača, a zatim i nekim drugim faktorima (mestom i načinom ugradnje, uticajima energetske mreže i sl.) [7].

Što se tiče tradicionalne jednofazne/trofazne fotonaponske invertorske topologije bez transformatora, dva su osnovna uslova za efikasno potiskivanje struja curenja: (1) potrebno je konzistentno dimenzionisati priključne sabirnice H mosta i težiti da njihove parazitne induktivnosti budu što manje, (2) u pogledu upravljanja treba težiti sintezi ne nultih vektora u referentnom vektorskom sistemu, kako bi se održao konstantan napon zajedničkog moda [7].

U nastavku će biti detaljnije izložene monofazne i trofazne topologije koje se koriste u cilju kontrole struje curenja u FN sistemima sa fotonaponskim invertorima.

A) Tehnike kontrole struje curenja monofaznih invertora

Na Slici 7 je prikazana topologija punog H mosta , tzv. topologija H4. Osnovu topologije čini H-most sa visokofrekventnim prekidačima S1-S4 i pripadajućim povratnim diodama. Na izlazu ka mrežnim priključcima sa koriste prigušnice L_a , L_b , kao i prigušnica u povratnom vodu L_g . Ulazni napon H mosta je U_{dc} .



Slika 7. Kontrola struje curenja u monofaznom H4-mosnom mrežnom invertoru

Da bi se rešio problem struje curenja u punom H-mosnom FN invertoru, može se koristiti bipolarna PWM modulacija (modulacija položaja prednje i zadnje ivice impulsa prirodnim odabiranjem)[7-9]. Karakteristični talasni oblici za ovaj tip modulacije su dati na Slici 8.



Slika 8. Karakteristični talasni oblici monofaznog H mosta i spektar izlaznog napona

Na Slici 8 su prikazane sledeće vrednosti: modulišući signal - U_r , modulacioni nosilac - U_c, perioda odabiranja - T_s, modulisani signal - U_m i spektar izlaznog napona invertora. S obzirom na to da se izlazni napon invertora menja od +E do -E ovakav tip modulacije naziva se bipolarna modulacija. Odnos maksimalnih trenutnih vrednosti modulišućeg signala i nosioca naziva se indeks modulacije. Spektar izlaznog napona invertora se sastoji od osnovnog harmonika niske učestanosti i niza viših harmonika grupisanih oko harmonika čija je učestanost celobrojni umnožak učestanosti odabiranja ω_s . U spektru mogu postojati samo neparni harmonici jer je ispunjen uslov f(t+T/2) = -f(t). Kako je u prikazanom primeru $\omega_s \approx 12 \omega_1$, sledi da ne postoje harmonici na učestanosti $\omega = k\omega_s$ jer bi to bili parni harmonici. Učestanost odabiranja (ω_s=5 kHz...20 kHz) i mnogo je veća od učestanosti osnovnog harmonika (obično 50 Hz ili 50 Hz), iz prenosne funkcije sledi da će harmonijska izobličenja napona na opterećenju biti veoma mala.



Slika 9. Kontrola struje curenja u jednofaznom H5-mosnom mrežnom invertoru

Ova vrsta modulacije eliminiše visokofrekventnu komponentu napona zajedničkog moda na u invertorskom sistemu, tako da napon zajedničkog moda generalno ima samo niskofrekventnu komponentu (pretežno prvog harmonika), čime se smanjuju efekti struje curenja.

Na Slici 9 je prikazana mosna H5 topologija monofaznog invertora kojom se takođe može postići kontrola struje curenja.

Ova topološka struktura zahteva dodavanje samo jednog dodatnog tranzistorskog prekidača S5 u poređenju sa tipom punog mosta. Ovo je razlog zašto se ova topologija naziva H5 topologija. FN modul se isključuje iz mreže tokom oporavka struje kroz zamajne (povratne) diode, kako bi se sprečilo da napon panela od (+) pola ili (-) pola ka "zemlji" fluktuira sa prekidačkom frekvencijom. Ovim se postiže da se napon zajedničkog moda održava skoro konstantnim.

Na Slici 10 je prikazana *HERIC* (eng. *highly efficient and reliable inverter concept*) topologija bazirana na AC prekidaču, odnosno AC bajpasu za kontrolu struje curenja u FN sistemu sa invertorskim pretvaračem [7-8].



Slika 10. Kontrola struje curenja u jednofaznom H-mosnom mrežnom invertoru HERIC topologija

Ova topološka struktura zahteva dodavanje samo jednog dodatnog tranzistorskog para S5 i S6 (jedan prekidački elemenat integrisan u tranzistorskom modulu) kojim se obezbeđuje AC prekidačka funkcija. Ovo je konfiguracija u kojoj su dva antiparalelna pomoćna prekidača dodata konvencionalnom pretvaraču H-mosta, mogu da provedu povratnu struju najkraćim putem tokom perioda kada je izlazni napon pretvarača H-mosta nula, i mogu smanjiti gubitke i šum (a time i struju curenja).



Slika 11. Kontrola struje curenja preko DC bajpasa

Pretpostavimo da posmatramo jednu polovinu H mosta, odnosno rad prekidača S1 i S4 u mostu HERIC AC bajpas topologije. Tokom pozitivnog polu ciklusa, prekidač S5 je uvek isključen i S6 je uvek uključen, a S1 i S4 su modulisani prekidačkom frekvencijom. Kada su S1 i S4 uključeni, naponi polova su U_{dc} i

0, a napon zajedničkog moda je $U_{dc}/2$. Kada su S1 i S4 isključeni, struja teče kroz anti-paralelnu diodu od S6 i prekidač S5, a konstantni napon je $U_{dc}/2$, dok je napon zajedničkog moda u ovom slučaju jednak $U_{dc}/2$. Slična situacija se ima kada se uključuju i isključuju prekidači S2 i S3.

Na Slici 11 je prikazana H6 invertorska topologija koja je bazirana na DC bajpasu [7]. H6 DC bajpas topologija je bazirana na sledećem principu rada: U pozitivnom polu-ciklusu, prekidači S1 i S4 su uvek uključeni, a S5, S6 i S2, S3 su naizmenično uključeni. Kada su S5 i S6 uključeni, S2 i S3 su isključeni, tada je napon zajedničkog moda $U_{dc}/2$. Kada su S2 i S3 uključeni, a S5 i S6 isključeni, postoje dve trenutne putanje povratne struje: (1) S1, S3 anti-paralelna dioda, (2) S4, S2 anti-paralelna dioda. Diode D7 i D8 spajaju napon na $U_{dc}/2$, a napon zajedničkog moda je tada $U_{dc}/2$ u ovom trenutku. Napon zajedničkog moda u negativnom polu-ciklusu je takođe $U_{dc}/2$, tako da se struja curenja može na ovaj način veoma efikasno ograničiti ili čak potisnuti.

Sve prethodno navedene topološke strukture smanjuju struju curenja snižavanjem napona zajedničkog moda (tzv. *common mode voltage*). Tehnologija invertora sa više nivoa kao što su sa 3 nivoa ili 5 nivoa, takođe se može koristiti za smanjenje napona zajedničkog moda (pozitivne i negativne tačke ka "zemlji"), čime je moguće smanjiti struju curenja kroz parazitne kapacitivnosti, kao posledicu ovih napona. U nastavku će biti više reči o ovim topologijama sa više nivoa, koje se u principu koriste u trofaznim primenama.

B) Tehnike kontrole struje curenja u trofaznim invertorskim FN sistemima

U ovom poglavlju su razmotrene trofazne topologije FN invertora koje omogućavaju ograničenje struja curenja. Na Slici 1 je data klasična invertorska topologija za ovu namenu. Invertor je direktno i bez galvanske izolacije (energetskog transformatora) povezan na elektroenergetsku mrežu.

Tipičan trofazni fotonaponski sistem bez transformatora povezan na mrežu sa korišćenjem induktivno-kapacitivnog LCL filtera je prikazan na Slici 1(a). Generalno je poznato da je LCL filter manjih gabarita i da ima bolje harmonijsko slabljenje nego L filter. Ipak, niska struja curenja ne može biti postignuta sa ovim klasičnim LCL filterom bez odgovarajućih tehnika redukcije struje curenja. S druge strane, upotreba MLCL filtera sa srednjom tačkom, kao što je prikazano na Slici 1(b), je najjednostavnije rešenje za smanjenje struja curenja u trofaznim FN invertorima [10].

MLCL filter obavlja dva zadatka u sistemu ovog energetskog pretvarača: (1) harmonijsko slabljenje struja u mreži i struje curenja se smanjuje; ima iste komponente kao i klasični LCL filter, osim spajanja filterskih kondenzatora zajedničku tačku (srednju tačku) na DC sabirnicama, kao što pokazuje Slika 1(b). Ova sprega ustvari predstavlja niskopropusni filter, koji prigušuje visokofrekventne komponente napona na parazitnoj kapacitivnosti CPV, smanjujući struju curenja u FN sistemu.

Na Slici 13 je prikazana H10 topologija koja obezbeđuje kontrolu struje curenja preko DC bajpasa. Ona u principskom smislu odgovara monofaznoj H5 topologiji, samo što se u ovom slučaju koristi trofazni invertor umesto monofaznog. Takođe topologija na Slici 13 se može raspregnuti na tri monofazne topologije, tako da važi isto objašnjenje kao u slučaju H5 topologije. U ovom slučaju treba skrenuti pažnju da se za ograničenje struja curenja koristi LCL filtar koji je povezan na neutralnu tačku elektroenergetske mreže. U ovom slučaju umesto tranzistora i diode (kao na Slici 11) u DC bajpasu u svakoj grani se koriste po dva tranzistorska prekidača S9,S7, odnosno S8, S10. U ovom slučaju u DC kolu se koriste tri kondenzatora (dva za svaki bajpas i jedan između) [10-13].







Slika 13. Kontrola struje curenja u trofaznim FN invertorima-H10 topologija

Topologija invertora sa tri nivoa i neutralnom spregnutom tačkom (NPC) je data na Slici 14. NPC topologija generiše linijski napon sa pet nivoa, poboljšavajući kvalitet talasnih oblika napona u harmonijskom smislu [10-14].



Slika 14. Kontrola struje curenja u trofaznom FN invertoru sa tri nivoa priključenim na mrežu preko MLCL filtera sa pasivnim prigušenjem

Štaviše, napon na poluprovodničkim prekidačkim elementima poluprovodnika je jednaka polovini DC napona, što omogućava visoki napon u FN nizu. Kondenzator (C_p) je uključen u DC magistralu na negativnom polu i on predstavlja ustvari parazitnu kapacitivnosti FN sistema. Impedansa mreže se smatra čisto induktivnom i predstavljena je induktorom L_g .



Slika 15. Principski prikaz kontrole trofaznog FN invertora sa tri nivoa; (a) blok šema upravljačkog kola u sinhronom referentnom sistemu, (b) ekvivalentna upravljačka šema sa funkcionalnim blokovima

Strategija modulacije FN invertora je ustvari modulacija širine impulsa (PWM) sa prisustvom faznog nosioca, koja predstavlja jednostavnu i laku implementaciju [11-14]. Koristi se uobičajeni signal za proširenje indeksa modulacije NPC pretvarača i za DC balans napona kondenzatora magistrale (C1 i C2). Pasivni filtar sa malim gubicima prigušenje se koristi za smanjenje rezonantnog vrha MLCL filtera u cilju izbegavanja nestabilnosti sistema upravljanja. Ova koncepcija sa prigušenjem zadržava visokofrekventno slabljenje filtera čak i povećanjem otpornosti prigušenja R_d . Štaviše, efekat prigušenja se povećava, kako se gubici snage povećavaju sa odnosom Cd/Cn. Detaljna analiza rada ove invertorske topologije je data u istraživanju [11-14].

Na Slici 15 je data principska šema kontrole trofaznog invertora sa tri nivoa sa NPC kojom se obezbeđuje smanjenje struja curenja. U principu analiza stabilnosti zavisi od korišćene tehnike kontrole. Na ovaj način je usvojena digitalna proporcionalno-integralna (PI) kontrola u sinhronom referentnom sistemu (d-q) za kontrolu mrežne struje, kao što je ilustrovano na Slici 4(a). Kontrolni sistem prikazan na slici 4b važi za obe ose (d i q). Jedinično kašnjenje z-1 je uključeno zbog digitalne implementacije, gde je T_s period semplovanja. Štaviše, zadržavanje nultog reda (ZOH) modelira FNM dinamiku. Efekat d-q transformacije nije uzet u obzir na Slici 4(b) pošto je prekidačka učestanost dovoljno veća od osnovne učestanosti 50Hz. Diskretni model filtera se može dobiti iz Z transformacije, uzimajući u obzir ZOH model i usvajajući da je učestanost semplovanja (odabiranja) dvostruko veća od prekidačke učestanosti. Dizajn PI kontrolera bi se mogao napraviti s obzirom na izlazni filter kao čisto induktivni filter (L1+L2), pošto se filterski kondenzator Cf može zanemariti za frekvencije niže od rezonantnog pika.

Takođe se za ovu topologiju pokazalo da induktivnost mreže utiče na ponašanje i struje curenja i stabilnost sistema, ograničavajući opseg primene za filtersku otpornost. Pristup se takođe može proširiti na druge topologije FN invertora bez transformatora i šeme za smanjenje struje curenja koje koriste MLCL filter.

VII EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kao što je prethodno rečeno, treba izbegavati velike struje curenja kako bi se sprečilo lažno okidanje zaštitnog uređaja od diferencijalne struje (ZUDS) u sistemu. Pošto je struja curenja direktno zavisna od kapacitivnosti FN modula prema zemlji, za svaki naizmenični napon prema zemlji može se odrediti granica kapaciteta iznad koje će biti rad podložan smetnjama. Granica kapacitivnosti se može izračunati iz relacije (2) i nakon toga proveriti sa kataloškim podacima za FN invertor.

U ovom poglavlju će biti prikazani neki karakteristični rezultati koji se tiču kontrole i ograničenja struje curenja u FN invertorskom sistemima iz prakse. Sveobuhvatno testiranje firme SMA sprovedeno na terenu otkrilo je da su vrednosti izračunate korišćenjem granice kapacitivnosti vršne vrednosti za većinu FN modula staklo-staklo, a do njih se dolazi samo po jakoj kiši. Vrednosti struje curenja su povišene ako postoji jutarnja kondenzacija, ali treba napomenuti da njene vrednosti padaju na prihvatljive nivoe tokom perioda najvećeg prinosa solarnog sistema, odnosno proizvodnje na DC strani (kada je sunčevo

zračenje intenzivno). U nastavku će biti prikazane reakcije struje curenja za pomenute slučajeve [1-2].

Na Slici 16 je prikazan dnevni snimak proizvedene snage i struje curenja na FN sistemu snage 10 kW za vreme jednog tipičnog letnjeg dana.



Slika 16. Snimak ulazne DC snage i struje curenja na FN sistemu snage 10 kW- uticaj jutarnje kondenzacije na FN panelima [1]

Uočava se da je u ranim jutarnjim satima kada je dominantna kondenzacija usled jutarnje rose na FN panelima dominantan uticaj struje curenja. Snimak je dat za primenjeni monofazni solarni invertor firme SMA tip SMC-1100TL, ulazne DC snage 10,8 kW i izlazne snage 10 kW i maksimalne vrednosti izlaznog napona 240 Vac. Uočava vršna vrednost struje curenja od 17 mA u jutarnjim satima, dok je u toku dana ustaljena vrednost ove struje ispod 10 mA.

Na Slici 17 je dat snimak istih veličina tokom tipičnog sparnog dana u mesecu julu, ali je akcenat u prikazu dat na trenutak kada se u popodnevnim satima usled oblačnosti javio intenzivan pljusak, odnosno obilna padavina, kada su FN paneli bili pod intenzivnim dejstvom kiše. U ovom slučaju, kao što se sa snimka na Slici 17 može zaključiti, se imala značajno veća vrednost struje curenja u tom trenutku u odnosu na jutarnju (od oko 20 mA) i da je ona iznosila oko 45 mA u trajanju od približno 2 h. Na istom snimku se uočava je kod invertora tipa WR03-SMC 11000 TL ova struja redukovana u odnosu na invertore SMS 10000TL, kao i da je smanjena na prihvatljivi nivo od par miliampera.

U nastavku su dati osciloskopski snimci koji se odnose na merenje struje curenja u trofaznom NPC FN invertoru sa tri nivoa priključenim na mrežu preko MLCL filtera sa pasivnoj prigušnoj otpornosti (topologija na Slici 14). U ovom slučaju parazitna kapacitivnost FN panela ("n" priključka) prema zemlji je iznosila $\approx 1 \mu F.$



Slika 17. Snimak ulazne DC snage i struja curenja na FN sistemu snage 10 kW - uticaj popodnevne intenzivne kiše na FN panelima; za dva tipa invertora SMC1000TL i SMC11000TL [1]

Na Slici 18 je su prikazani talasni oblici izlaznih struja invertora (kanal CH1) i talasni oblik trenutne vrednosti struje curenja (kanal CH2) za slučaj prigušne otpornosti od 8 Ω . Uočava se da je "*peak-peak*" amplituda struje curenja približno jednaka 0,9 A. Trenutna vrednost amplitude struje curenja je 0,45 A, dok je efektiva vrednost struje curenja 0,32 A. Ova vrednost je iznad dozvoljenog limita.



Slika 18. Snimak izlaznih struja trofaznog NPC invertora sa tri nivoa i struje curenja za slučaj otpornosti od 10Ω u MLCL filtru sa pasivnim omskim prigušenjem

Na Slici 19 je prikazan slučaj kada je vrednost prigušne otpornosti iznosila 1 Ω . U ovom slučaju je "*peak-peak*" amplituda struje curenja približno bila jednaka 0.5A. Trenutna vrednost amplitude struje curenja je 0.25A, dok je efektiva vrednost struje curenja iznosila 0.15A. Treba napomenuti da je ova vrednost ispod dozvoljenog limita i da je u skladu sa propisima.



Slika 19. Snimak izlaznih struja trofaznog NPC invertora sa tri nivoa i struje curenja za slučaj otpornosti od 1Ω u MLCL filtru sa pasivnim omskim prigušenjem

VIII ZAKLJUČAK

U radu je istaknut problem struja curenja i rezidualnih struja koje se najčešće susreću u FN sistemima (obično na većim FN elektranama). U nastavku je data analiza sistema FN invertormreža, kao i analiza struja curenja u ovom sistemu. U radu su takođe analizirane topologije monofaznih i trofaznih FN invertora koje obezbeđuju ograničenja i kontrolu struje curenja. Akcenat je dat na mosne topologije (monofazne i trofazne) i na trofaznu topologiju NPC invertora sa tri nivoa u kombinaciji sa pasivnim LCL i MLCL filtrima i sa prigušnom otpornošću. Na kraju su predstavljeni neki praktični eksperimentalnim rezultati koji se odnose na problematiku struja curenja monofaznih FN invertora i trofaznih NPC FN invertora koji su povezani na elektroenergetsku mrežu.

Izložena problematika bi mogla imati značaj za projektante i to prvenstveno u slučajevima kada je potrebno izvršiti izbor uređaja za zaštitu od diferencijalne struje, propisani u uslovima koje propisuju nadležne EDB. Sa druge strane, pogrešan odabir zaštite može da utiče na ispadanje invertora iz rada, čak i kada ne postoji curenje struje u instalaciji, u normalnim okolnostima. Stoga je problem parazitnih kapacitivnosti koje se imaju između FN panela i "zemlje" veoma značajan kod prorade uređaja za zaštitu od diferencijalne struje u slučajevima kada postoji kondenzacija (jutarnji period), a posebno pri kišovitim i intenzivno kišovitim vremenskim uslovima.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je delom podržano od strane Ministarstva Nauke, Tehnološkog razvoja i Inovacija Republike Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-66/2024-03/200034, a delom kroz komercijalne i razvojne projekte firme Conseko d.o.o iz Beograda u oblasti solarne energetike.

LITERATURA/REFERENCES

- Leading Leakage Currents, Information on the design of transformerless inverters of type Sunny Boy, Sunny Tripower, Sunny High power, SMA Leakage current-TI-en-26, Version 2.6, 2016, <u>http://www.sma-solar.com/</u> [pristupljeno 5.02.2024]
- [2] 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, <u>http://www.sma-solar.com/</u> [pristupljeno 5.02.2024]
- [3] Shaolin, Y., Wang, J., Zhang, X., Fei, L. Complete parasitic capacitance model of photovoltaic panel considering the rain water, Chinese Journal of Electrical Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 77-84, 2017. <u>https://doi.org/10.23919/CJEE.2017.8250427</u>
- [4] Module Technology, SMA inverters provide the optimum solution for every module, Duennschicht-TI-UEN114630, Version 3.0, 2016., <u>http://www.sma-solar.com/</u> [pristupljeno 5.02.2024]
- NB/T 32004-2018: Technical specification of FN grid-connected inverter, 2018. <u>https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/NBT32004-2018</u>
 [pristupljeno 10.02.2024]
- [6] IEC62109-2:2011, Safety of power converters for use in photovoltaic power systems - Part 2: Particular requirements for inverters, <u>https://webstore.iec.ch/en/publication/6471</u> [pristupljeno 10.02.2024]
- Kerekes, T. Analysis and Modeling of Transformerless Photovoltaic Inverter Systems, Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet, Danmark, 2009.
- [8] Behera, S., Behera, M. K., Majhi, H., Akram, F. Study of PWM control techniques for single phase inverter with variable DC input, in Proc. 2nd International Conference on Intelligent Computing and Control Systems

(*ICICCS*), Madurai, India, pp. 811-816, 14-15 June 2018. https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663144

- [9] Estévez-Bén, A.A., Alvarez-Diazcomas, A., Macias-Bobadilla, G., Rodríguez-Reséndiz, J. Leakage current reduction in single-phase gridconnected inverters-a review, Applied Science, Vol. 10, No. 7, pp. 2384, 2020. <u>https://doi.org/10.3390/app10072384</u>
- [10] Ma, H., Lan, Z., Chen, Z. Non-isolated H10 three phase inverter for leakage current suppression, Journal of Power Electronics, Vol. 20, pp. 1139-1148, 2020. <u>https://doi.org/10.1007/s43236-020-00121-8</u>
- [11] Giacomini, J.C., Michels, L., Pinheiro, H., Rech, C. Design methodology of a passive damped modified LCL filter for leakage current reduction in grid-connected transformerless three-phase FN inverters, IET Renewable Power Generation, Vol. 11, No. 14 pp. 1769-1777, 2017. <u>https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0256</u>
- [12] Dong, S., Lian, J., Yang, J. The leakage current suppression of transformerless threelevel photovoltaic grid-connected inverter, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 2479, pp. 012034, 2023. <u>https://doi.org/10.1088/1742-6596/2479/1/012034</u>
- [13] Jiang, L., Chen, Y., Dai, F., Liu, K., Chen, X., He, X. A nine-switch inverter with reduced leakage current for FN grid-tied systems using modelfree predictive current control, In Proc. 3rd International Conference on Power and Electrical Engineering (ICPEE 2022), Singapore, pp. 396-405, 29-31 December 2023. <u>https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.170</u>
- [14] Keramatzadeh, A., Kosarian, A., Ghodratollah, S.S. Reduction of leakage current in grid connected three-phase FN inverters, Journal of Basic and Applied Scientific Research, Vol. 3, No. 7, pp. 439-446, 2013.

AUTORI/AUTHORS

dr Żeljko V. Despotović, dipl.el.inž., Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID <u>0000-</u> 0003-2977-6710

dr Miodrag Vuković, dipl.inž., Conseko d.o.o, Beograd, m.vukovic@conseko.rs, ORCID <u>0000-0003-0158-192X</u>

Detection and Control of Leakage Current of PV Inverters

Abstract – The leakage current in photovoltaic (PV) systems, which is also known as residual current is a consequence of the parasitic capacitance between the PV and the ground (free-field PV plants) or the PV system and the structure of the object that is grounded (roof-top PV plants). When the PV system-power grid parasitic capacitance forms a loop, the common mode voltage will produce a common mode current across the parasitic capacitance. The motivation for writing this short study came from practice where the authors faced the mentioned problem on a specific PV power plant with an output power of 500kW. Therefore, the main topic of the paper will be the topologies of PV inverters and their additional impact on the residual current, as well as ways of its detection. An overview of the relevant standards in this field and some possible techniques for controlling leakage currents in FN systems with solar inverters will also be given.

Index Terms - PV plants, Parasitic capacitance, Residual current, FN inverter, Differential protection