

IZAZOVI U MODELOVANJU I PRORAČUNIMA DISTRIBUTIVNIH MREŽA USLED INTEGRACIJE OBNOVLJIVIH DISTRIBUIRANIH ENERGETSKIH RESURSA

Luka V. STREZOSKI, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Nikola R. VOJNOVIĆ, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Vladimir C. STREZOSKI, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Predrag M. VIDOVIĆ, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Cilj ovog rada je da se da sistematičan prikaz izazova u modelovanju i proračunima distributivnog menadžment sistema (DMS) za upravljanje distributivnim mrežama, usled integracije obnovljivih distribuiranih energetske resursa (DER). U poslednjoj deceniji, priključivanje obnovljivih DER na mrežu preko uređaja energetske elektronike postalo je izuzetno popularno. Ovi DER mogu da primene veliki broj različitih upravljačkih strategija za kontrolu snage, struje i napona, kako u normalnim režimima, tako i u režimima mreže s kvarovima. S obzirom da oni mogu da primene znatno kompleksnije upravljačke strategije u odnosu na tradicionalne generatore, oni se ne mogu predstaviti tradicionalnim PQ i PV tipovima čvorova u proračunima tokova snaga. Takođe, s obzirom da su struje kratkih spojeva ovih DER ograničene na struje vrlo bliske nominalnim, oni se ni u proračunima kratkih spojeva ne mogu predstaviti tradicionalnim modelima prikazanim preko idealnog naponskog izvora vezanog redno sa odgovarajućom impedansom. Međutim, većina današnjih DMS softvera i dalje koristi tradicionalne modele za predstavljanje svih DER, uključujući i one koji su povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike. U ovom radu je pokazano da ovakva praksa može da dovede do ozbiljnih grešaka u proračunima a samim tim i do grešaka u upravljanju distributivnim mrežama.

Ključne reči: Distributivne mreže, distribuirani energetske resursi, distributivni menadžment sistem

SUMMARY

The objective of this paper is to systematically review challenges imposed by integration of renewable distributed energy resources (DERs) to modeling in Distribution Management System (DMS) online calculations. In the last decade, electronically coupled DERs have become increasingly popular. These DERs can employ a wide range of control strategies for power, current, or voltage control, in both normal and faulted conditions. As they can employ different and more complex control strategies, these DERs cannot be modeled with the traditional PQ and PV bus types used for modeling synchronous and induction machines in online power flow calculations. Also, because their fault currents are limited to predefined maximal values, these DERs cannot be represented with traditional voltage source behind impedance models for online short-circuit calculations. However, most of the DMS software packages still use the traditional models for representing all DER types, including those that are electronically coupled. In this paper, it is shown that this practice could introduce high calculation errors that can cause the system model to be an inadequate representation of the system, in both normal and faulted conditions.

Key words: Distribution networks, distribution energy resources, distribution management system

UVOD

U cilju da na optimalan način nadgledaju i upravljaju svojim mrežama, operateri distributivnih mreža koriste napredne softverske alate, takozvane Distributivne Menadžment Sisteme (DMS). Pored sistema za nadgledanje, upravljanje i prikupljanje podataka („*Supervisory, Control and Data Acquisition – SCADA*“), DMS softver se sastoji od velikog broja naprednih, energetske funkcije (proračuna), za upravljanje i optimizaciju distributivne mreže. Dva osnovna proračuna DMS sistema jesu tokovi snaga i proračuni kratkih spojeva. Ova dva proračuna su osnovna s obzirom da se gotovo sve ostale DMS funkcije zasnivaju na rezultatima jednog od ova dva proračuna. Proračuni kao što su Estimacija stanja, Optimizacija napona i reaktivnih snaga, Optimalna rekonfiguracija, Restauracija napajanja, samo su neki od primera funkcija zasnovanih na rezultatima jednog ili više proračuna tokova snaga. S druge strane, Podešenje i koordinacija relejne zaštite, Odabir zaštitne opreme, Odabir novih elemenata mreže, zahtevaju precizne rezultate proračuna kratkih spojeva. Samim tim, od izuzetne je važnosti da DMS softver raspolaže sa preciznim proračunima tokova snaga i kratkih spojeva.

U poslednje dve decenije struktura distributivnih mreža se značajno menja. Najveći razlog ovih promena jeste integracija velikog broja Distribuiranih Energetskih Resursa (DER). Integracija DER je dovela do toga da se pasivne distributivne mreže velikom brzinom menjaju i postaju aktivni sistemi, u kojima je nadgledanje i upravljanje znatno složenije i zahteva znatna unapređenja, kao i nadogradnju i napredne promene samih energetskih proračuna.

DER mogu da implementiraju različite upravljačke strategije, u zavisnosti od tehnologije i načina povezivanja na mrežu. Pored tradicionalnih naizmeničnih mašina (sinhronih i asinhronih), povezanih direktno na mrežu, DER mogu biti povezani na mrežu potpuno preko uređaja energetske elektronike („*Inverter based DERs - IBDERs*“), a u nekim slučajevima i delimično preko uređaja energetske elektronike („*Doubly-fed induction machines - DFIMs*“). Ovakvi načini povezivanja DER na mrežu omogućuju i znatno naprednije mogućnosti upravljanja ovim DER i u poslednjim godinama uvedene su mnoge nove, napredne upravljačke strategije.

Integracija savremenih DER zahteva unapređenje tradicionalnih DMS funkcija, a posebno unapređenje osnovnih proračuna – tokova snaga i kratkih spojeva. Ceo koncept ovih funkcija je potrebno menjati, počevši od modelovanja, pa do samog matematičkog proračuna.

U ovom radu, diskutovana je potreba za naprednim modelovanjem i proračunima osnovnih DMS energetskih funkcija – tokova snaga i kratkih spojeva, izazvana integracijom velikog broja DER povezanih na mrežu uređajima energetske elektronike.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način: u Glavi 1 je ukratko opisan razvoj tradicionalnih proračuna tokova snaga i kratkih spojeva. U Glavi 2 opisane su moguće upravljačke strategije integrisane u savremenim DER, kako za normalno stanje, tako i za stanje s kratkim spojem. Takođe, u Glavi 2 su prikazani i nedostaci tradicionalnih proračuna kada su u pitanju savremene mreže sa DER zasnovanim na uređajima energetske elektronike. U Glavi 3 diskutovana su moguća rešenja ovih nedostataka. Zaključak rada je dat u Glavi 4.

1. OSNOVNI DMS PRORAČUNI – TOKOVI SNAGA I KRATKI SPOJEVI

U ovoj glavi dati su kratki opisi osnovnih DMS funkcija – tokova snaga i kratkih spojeva.

2.1 Tokovi snaga

Za proračune tokova snaga, u najvećem broju slučajeva, koristi se jedan od sledeća dva prilaza: 1) proračuni zasnovani na čvorovima (zasnovan na modelovanju mreže matricom admitansi) i 2) proračuni zasnovani na granama.

Tradicionalni proračun tokova snaga, zasnovan na čvorovima, utvrđen je pre gotovo pedeset godina [1]. Mreža je modelovana pofazno (u simetričnom režimu direktnog redosleda), s obzirom da su razmatrani samo uravnoteženi sistemi u simetričnim režimima. Ovaj proračun bio je zasnovan na tradicionalnoj klasifikaciji čvorova, i sastojao se od sledećih pofaznih tipova čvorova: θV (balansni čvor), PQ i PV. Ova klasifikacija nedvosmisleno određuje model tokova snaga [1]. Tradicionalni model tokova snaga sastoji se od sledećih nelinearnih relacija balansa aktivnih i reaktivnih snaga:

$$P_k = g'_k(\mathbf{X}), k \in \alpha_{PQ} \cup \alpha_{PV}, Q_k = g''_k(\mathbf{X}), k \in \alpha_{PQ}, \quad (1)$$

$$\mathbf{X}^T = [\theta_k, k \in \alpha_{PQ} \cup \alpha_{PV}; U_k, k \in \alpha_{PQ}]. \quad (2)$$

Skupovi indeksa PQ i PV tipova čvorova su označeni sa α_{PQ} i α_{PV} . Sa P_k i Q_k označene su specificirane injektirane aktivne i reaktivne snage u čvoru k . Poznate nelinearne funkcije $g'_k(\mathbf{X})$ i $g''_k(\mathbf{X})$ označavaju sume aktivnih i reaktivnih snaga koje otiču iz čvora k susjednim granama. Vektor nepoznatih veličina je označen sa \mathbf{X} . θ_k i U_k označavaju ugao i modul kompleksnog napona čvora k (\hat{U}_k). Broj komponenti u vektoru nepoznatih veličina (2) jednak je sa brojem relacija (1).

Proračun sistema relacija (1) je prvenstveno bio zasnovan na Njutn-Rafsonovom (*Newton-Raphson*) itereativnom metodu [1]. Brzi-raspregnuti proračun tokova snaga je usledio zatim, kao vrlo efikasna modifikacija Njutn-Rafsonovog metoda [2]. On je namenjen proračunu istog modela, ali u slučaju prenosnih mreža sa vrlo velikim odnosima X/R njihovih rednih grana. Oba prethodno-navedena postupka su u referencama [3] i [4] unapređena da rade za proračune neuravnoteženih tokova snaga, u faznom, i u domenu simetričnih komponenti, respektivno. Takođe, u reference [4] je pokazano da tradicionalna klasifikacija čvorova (θV , PQ i PV) nije dovoljna da bi se formulisao i rešio problem tokova snaga u nesimetričnom režimu, čak i za mreže koje sadrže samo tradicionalne naizmenične mašine.

Procedure čišćenja unapred/unazad ("*Backward/forward sweep – BFS*") sa kompenzacijom za petlje i generatore tipa PV, pojavile su se u poslednjih dvadeset godina [6-8]. Ove procedure su zasnovane na granama i takođe su zasnovane na tradicionalnoj klasifikaciji čvorova (θV , PQ i PV). BFS postupci su znatno efikasniji od svih procedura zasnovanih na Njutn-Rafsonovom proračunu, kada su u pitanju slaboupetljane distributivne mreže velikih dimenzija. U referenci [9] je pokazano da se BFS procedure efikasno mogu primeniti i na neuravnotežene distributivne mreže.

Međutim, kao što je navedeno u uvodu, priroda distributivnih sistema se znatno menja u poslednjoj deceniji. Uzrok ovih promena jeste priključenje velikog broja DER zasnovanih na obnovljivim izvorima energije i povezanih na mrežu uređajima energetske elektronike. Ovi DER mogu biti distribuirani generatori, distribuirana skladišta energije, ili hibridni sistemi sastavljeni od generatora i skladišta [10]. Stoga, nekadašnje pasivne distributivne mreže postaju aktivni sistemi, koji sadrže DER povezane na mrežu preko uređaja energetske elektronike, sa izuzetno kompleksnim upravljačkim strategijama. Ova kompleksnost modernih upravljačkih strategija dovodi do toga da tradicionalno modelovanje i tradicionalni proračuni postaju neadekvatni u modernim sistemima.

Cilj ovog rada, u delu posvećenom tokovima snaga, jeste da se pokaže da tradicionalan način klasifikacije čvorova na pofazne čvorove tipa θV , PQ i PV [11-13] nije adekvatan za formulaciju i rešavanje modela tokova snaga u modernim distributivnim sistemima koje sadrže DER povezane na mrežu preko uređaja energetske elektronike i da ukaže na potrebu da se ova klasifikacija proširi na adekvatan način.

2.2 Kratki spojevi

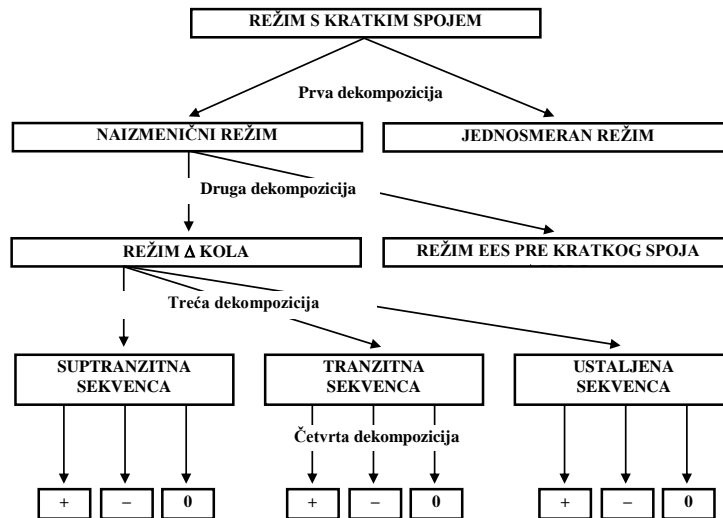
Cilj proračuna kratkih spojeva je da se izračuna stanje celog sistema koji je u nekom čvoru pogođen kratkim spojem. Ovi rezultati se koriste kao osnov za mnoge druge proračune, kao što su podešenje i koordinacija relejne zaštite, ispitivanje kapaciteta zaštitne opreme, itd.

Osnovna razlika proračuna tokova snaga i proračuna režima s kratkim spojem jeste u tome što je prvi problem nelinearan, dok je drugi linearan. U proračunima kratkih spojeva, naizmenične mašine se modeluju kao idealni naponski izvori vrezani na red sa (suptranzitnom, tranzitnom ili ustaljenom) impedansom, dok se potrošači modeluju konstantnim strujama ili konstantnim impedansama. Stoga je model mreže s kratkim spojem linearan, pa je i metod za njegovo rešavanje nekod matematičkih metoda za rešavanje sistema linearnih jednačina.

Slično proračunu tokova snaga, postoje dve osnovne grane proračuna kratkih spojeva: 1) metodi zasnovani na čvorovima (matrični metodi) i 2) metodi zasnovani na granama. Tradicionalni matrični metod za proračun kratkih spojeva nastao je otprilike u isto vreme kao i tradicionalni proračun tokova snaga – pre otprilike pedeset godina [14]. Zatim je razvoj novih proračuna kratkih spojeva pratio razvoj proračuna tokova snaga. Kad god bi nastao novi proračun tokova snaga, on bi ubrzo bio modifikovan i iskorišćen za proračun kratkih spojeva. Konačno, za potrebe prenosnih mreža, uspostavljene su varijacije postupaka zasnovanih na modelovanju mreže matricom admitansi i

rešavanju sistema jednačina primenom implicitne inverzije ove matrice. S druge strane, za velike, slaboupetljane distributivne mreže, kao najefikasniji pokazali su se postupci zasnovani na BFS metodu [15, 16].

Koji god metod bio korišćen za proračun mreže s kratkim spojem, ovaj proračun se u najvećem broju slučajeva sastojao od četiri dekompozicije prikazane na sici 1 [14-16].



Slika 1. Četiri dekompozicije režima EES s kratkim spojem

Jednosmerna komponenta struje kratkog spoja nije predmet ovog rada. S obzirom da je stanje mreže pre kratkog spoja poznato ili iz proračuna tokova snaga ili iz estimacije stanja, proračun kratkih spojeva svodi se na proračun Δ -kola. Osnovna karakteristika Δ -kola je da je pasivno svuda osim u čvoru s kratkim spojem [16]. Samo u ovom čvoru injektirane struje su različite od nule. Naizmenične komponente struje kratkih spojeva dobijaju se superpozicijom režima mreže pre kratkog spoja i režima Δ -kola.

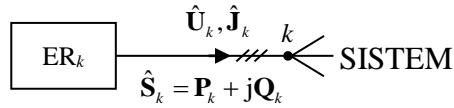
Dinamički suptranzitni i tranzitni režimi izazvani su postojanjem naizmeničnih mašina, ali su u proračunima kratkih spojeva aproksimirani kvaziustaljenim stanjima. Zbog toga je moguće vršiti proračune sva tri režima (suptranzitnog, tranzitnog i ustaljenog) u domenu kompleksnih brojeva. U pasivnom Δ -kolu, idealni naponski izvori naizmeničnih mašina su anulirani, a njihov uticaj je prepoznat iz režima mreže pre kratkog spoja.

Naizmenične mašine su do skoro bili jedini aktivni elementi u distributivnim sistemima i modelovanje i proračun takvih sistema na gore opisan način bilo je vrlo uspešno. Međutim, sa pojavom DER povezanih na mrežu preko uređaja energetske elektronike, tradicionalni načini modelovanja i proračuna kratkih spojeva postaju neadekvatni. Odziv ovih DER je potpuno drugačiji od klasičnih naizmeničnih mašina i oni ne mogu da se predstavie isitm modelima. S obzirom na veliki broj različitih upravljačkih strategija ovih DER u slučaju kratkih spojeva, njihovo modelovanje je znatno kompleksnije.

Cilj ovog rada, u delu posvećenom proračunu kratkih spojeva, je da se pokaže da su tradicionalni načini modelovanja i proračuna kratkih spojeva neodgovarajući u slučaju savremenih mreža koje sadrže DER povezane na mrežu preko uređaja energetske elektronike i da se ukaže na potrebu za razvijanjem novih adekvatnih modela.

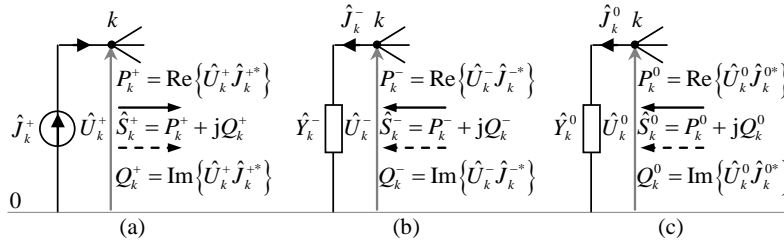
2. UPRAVLJAČKE STRATEGIJE RAZLIČITIH DER

Na slici 2 prikazan je jedan DER povezan na mrežu u trofaznom čvoru k . Ovaj DER može biti tradicionalna naizmenična mašina povezana direktno na mrežu, ili DER povezan na mrežu preko uređaja energetske elektronike. Vektori $\hat{\mathbf{U}}_k$, $\hat{\mathbf{J}}_k$, $\hat{\mathbf{S}}_k$, \mathbf{P}_k , i \mathbf{Q}_k (dimenzija 3×1) označavaju fazne napone, injektirane struje, prividne, aktivne i reaktivne snage, respektivno.



Slika 2. DER_k povezan na trofazni čvork

Kola DER_k u domenu simetričnih komponenti (u direktnom, inverznom i nultom redosledu) prikazana su na slici 3 [4, 11-13].



Slika 3. Nortonovi ekvivalenti DER_k u domenu simetričnih komponenti: direktni (a), inverzni (b) i nulti redosled (c)

2.1. Upravljačke strategije DER u normalnim nesimetričnim režimima

Tradicionalne naizmjenične mašine su reverzibilne, što znači da mogu da se ponašaju i kao generatori i kao motori.

Njihove upravljačke strategije u nesimetričnim režimima su sledeće: 1) trofazna aktivna snaga ($P_{k\Sigma}$) i modul napona direktnog redosleda (U_k^+) ili trofazna reaktivna snaga ($Q_{k\Sigma}$) su specificirane za sinhronu mašine; za sinhronu mašinu u bilo kom od tri operaciona moda – generator, motor ili kompenzator – poznate trofazne aktivne snage imaju vrednosti $P_{k\Sigma} > 0$, $P_{k\Sigma} = 0$, $P_{k\Sigma} < 0$, respektivno. Isto važi i za trofazne reaktivne snage. 2) U slučaju asinhroni mašine, trofazna aktivna snaga je specificirana; ona može biti pozitivna (generator) ili negativna (motor). Trofazna reaktivna snaga je negativna i zavisi od parametara mašine. Namotaji naizmjeničnih mašina su najčešće povezani u trougao ili neuzemljenu zvezdu, pa su admitanse u nultom režimu (Y_k^0 na slici 3) jednake nuli.

Iz gornje diskusije je jasno da čak i u mrežama koje sadrže samo klasične naizmjenične mašine, tradicionalna klasifikacija čvorova (θV , PQ i PV) nije dovoljna za modelovanje tokova snaga u nesimetričnim režimima. Naime, da bi se tačno obuhvatile sve upravljačke strategije tradicionalnih naizmjeničnih mašina u nesimetričnim režimima potrebno je uvesti sledeće trofazne čvorove, predložene u [4]: 1) $(\theta V)_\Sigma$ (“three-phase slack bus”), 2) $P_\Sigma Q_\Sigma$ and 3) $P_\Sigma V$. Supskript Σ ukazuje na trofazne veličine. Direktna komponenta modula napona i fazni stav čvora tipa $(\theta V)_\Sigma$ su specificirani. Trofazne aktivne i reaktivne snage su specificirane za čvor $P_\Sigma Q_\Sigma$. Za čvor $P_\Sigma V$ specificirana je trofazna aktivna snaga i modul napona direktnog redosleda. Uvođenjem ovih čvorova znatno je unapređena tačnost proračuna tokova snaga neuravnoteženih mreža u nesimetričnim režimima.

Međutim, kada su u pitanju DER povezani na mrežu preko uređaja energetske elektronike (uključujući i DFIM) koriste se i druge, kompleksnije upravljačke strategije. U [11-13] su posebno obrađene sledeće dve upravljačke strategije IBDER i DFIM: 1) specificiranje trofazne aktivne snage, uz održavanje simetričnih napona direktnog redosleda, 2) specificiranje trofaznih aktivnih i reaktivnih snaga, uz kontrolu (najčešće anuliranje) komponente struje inverznog redosleda. Druga strategija je od posebnog interesa u slučaju mikromreža, gde se komponenta struje inverznog redosleda koristi kao signal da je mikromreža prešla iz rada priključenog na glavnu mrežu, u ostrvski rad ili obrnuto. Za komponente struje nultog redosleda važi isto kao i za tradicionalne naizmjenične mašine [4, 11-13]. Konačno, distribuirani balansni čvor je predložen u [11-13] za mikromreže u ostrvskom radu.

Prethodna diskusija jasno ukazuje da je tradicionalna klasifikacija čvorova za proračune tokova snaga (θV , PQ, i PV) potpuno neadekvatna za modelovanje i proračune tokova snaga neuravnoteženih mreža u nesimetričnim režimima, koje sadrže DER zasnovane na uređajima energetske elektronike.

2.2. Upravljačke strategije DER u režimima mreže s kratkim spojem

Prema modelovanju za potrebe proračuna kratkih spojeva, DER se mogu podeliti na sledeća četiri tipa: 1) Tip 1 – Sinhrona mašina direktno povezana na mrežu; 2) Tip 2 – Asinhrona mašina direktno povezana na mrežu; 3) Tip 3 – DFIM i 4) Tip 4 – IBDER.

Tradicionalne naizmenične mašine u slučaju kratkog spoja potpuno gube kontrolu nad svojim odzivom, i njihova struja potpuno zavisi od fizičkih karakteristika mašina. Ovo je modelovano kroz suptranzitne, tranzitne i ustaljene impedanse kratkog spoja. Modeli se sastoje od idealnih naponskih izvora vezanih na red na odgovarajuće impedanse i ovi modeli su verifikovani u praksi u poslednjih nekoliko decenija [14-16].

Za razliku od naizmeničnih mašina direktno povezanih na mrežu, DER zasnovani na uređajima energetske elektronike imaju mogućnost da kontrolišu struje kratkog spoja.

Kada su u pitanju DFIM, ovo jako zavisi od uređaja koji se koristi za zaštitu konvertora sa strane rotora [17]. DFIM je delimično povezan na mrežu uređajima energetske elektronike, s obzirom da mu je stator direktno povezan na mrežu, dok je rotor povezan na mrežu preko uređaja energetske elektronike. Do skoro, za zaštitu rotora od kratkih spojeva, korišćen je takozvani *crowbar*. Crowbar je impedansi povezana na terminale rotora preko uređaja energetske elektronike, koja kratkospoji rotor u slučaju “jakog” kratkog spoja sa visokim strujama kvara [17]. U ovom slučaju, model DFIM postaje identičan kao model klasične asinhroni mašine, sa dodatom otpornosti *crowbar*-a. Međutim, ako kratak spoj nije “jak”, odnosno ako struje kvara nisu visoke, *crowbar* neće reagovati i struja kratkog spoja će ostati kontrolisana i jednaka struji pre kratkog spoja [17, 18]. Pored toga, u poslednjim godinama pojavila se unapređena varijanta zaštite namotaja rotora, takozvani *chopper*. Kada se *chopper* koristi za zaštitu namotaja, postiže se kontrola struje kratkog spoja čak i u slučaju “jakih” kratkih spojeva [18]. U poslednja dva slučaja struja kvara DFIM je kontrolisana i ne može se modelovati na način kao asinhrona mašina. U ovim slučajevima, model DFIM će potpuno zavisiti od upravljačke strategije implementirane u uređajima energetske elektronike.

IBDER su potpuno odvojeni od mreže trofaznim inverterima. Model IBDER za proračun kratkih spojeva potpuno zavisi od upravljačke strategije implementirane u inverteru. Kada se kratak spoj desi u mreži, i napon na priključcima invertora padne ispod dozvoljene granice, IBDER počinje da se ponaša kao kontrolisan strujni izvor, sa predefinisanim vrednostima struje [17, 18]. Kontrolna strategija ugrađena u inverter je takva da ili daje isključivo simetričnu struju direktnog redosleda, ili (ređe) da daje struje sa komponentama direktnog i inverznog redosleda. U oba slučaja vrednost modula struje kratkog spoja je ograničena i ne prelazi vrednost od 1,5 nominalne struje [17, 18]. Stoga, IBDER se nikada ne može predstaviti modelima tradicionalnih naizmeničnih mašina.

Prethodna diskusija jasno ukazuje na nedostatke tradicionalnog modelovanje mreža s kratkim spojem, kada su u pitanju moderne distributivne mreže koje sadrže DFIM i/ili IBDER. Zato je potrebno razviti nove modele, adekvatne za predstavljanje ovih vrsta DER. Pored toga, koncept pasivnog Δ -kola (slika 1) ne može se koristiti u slučaju mreža koje sadrže DFIM i IBDER, s obzirom da se njihovi aktivni elementi ne mogu anulirati u Δ -kolu.

U sledećoj glavi diskutovana su potencijalna rešenja za izazove navedene u ovoj glavi.

3. POTENCIJALNA REŠENJA IZAZOVA USLED INTEGRACIJE DER ZASNOVANIH NA UREĐAJIMA ENERGETSKE ELEKTRONIKE

U ovoj glavi diskutovana su potencijalna rešenja za izazove u modelovanju i proračunima distributivnih mreža usled integracije DER zasnovanih na uređajima energetske elektronike i date su smernice za dalja istraživanja na ovu temu. Prvo su diskutovani normalni, nesimetrični režimi (deo 4.1), a zatim i režimi s kratkim spojem (deo 4.2).

3.1. Normalni nesimetrični režimi

Kako je pokazano u delu 3.1, potreban je razvoj novih modela i metoda za proračune tokova snaga neuravnoteženih mreža u prisustvu DER zasnovanih na uređajima energetske elektronike. Ovi modeli zahtevaju novu klasifikaciju čvorova s obzirom da tradicionalna klasifikacija (θV , PQ iPV) mora biti znatno proširena.

Proračun tokova snaga neuravnoteženih mreža u domenu simetričnih komponenti [11-13] zasnovan je na generičkom Njutm Rafsonovom postupku za proračun režima direktnog redosleda, a za proračun režima inverznog i

nultog redosleda korišćena je faktorizacija matrice sistema. DER zasnovani na uređajima energetske elektronike tretirani su tradicionalnim PQ i PV čvorovima, pridružujući im dodatne karakteristike u zavisnosti od upravljačke strategije. Ovo jeste jedan način da se ovi DER uzmu u obzir u proračunima tokova snaga, ali ovakav način nije konzistentan, rigidan, niti sistematičan.

Proširena klasifikacija čvorova, predložena u referenci [4] pored tradicionalnih pofaznih čvorova predlaže uvođenje sledećih trofaznih tipova čvorova: $P_{\Sigma}Q_{\Sigma}$ i $P_{\Sigma}V$. Ovakva proširena klasifikacija dovoljna je za uspešno modelovanje i proračun tokova snaga neuravnoteženih mreža koje sadrže tradicionalne naizmenečne mašine, kao i DER zasnovane na uređajima energetske elektronike u kojima su implementirane standardne upravljačke strategije. Međutim, ova klasifikacija nije dovoljna u slučaju mreža koje sadrže DER sa naprednim upravljačkim strategijama navedenim u delu 3.1 (simetrični naponi, kontrolisana inverzna komponenta struje, distribuirani balansni čvor). U referenci [19] predložena je sistematična klasifikacija čvorova kojom su uspešno obuhvaćene sve upravljačke strategije navedene u ovom radu. Primenjujući ovu klasifikaciju čvorova, moguće je razviti robusnu proceduru za proračun tokova snaga neuravnoteženih distributivnih mreža koje sadrže DER sa naprednim upravljačkim strategijama. Međutim, upravljačke strategije savremenih DER se često menjaju i razvijaju se nove, unapređene verzije strategija, pa je stoga potrebno pratiti nove trendove i kontinualno unapređivati klasifikaciju čvorova predloženu u [19].

3.2. Režimi s kratkim spojem

S obzirom na izazove navedene u delu 3.2, jasno je da tradicionalni modeli nisu adekvatni za predstavljanje DFIM i IBDER u režimima s kratkim spojem i da je potrebno razviti nove modele za ove DER.

U referencama [20-22], predloženi su modeli IBDER za proračune dinamičkih procesa. Modeli su verifikovani na malim sistemima. Međutim, korišćenje ovih modela za proračune kratkih spojeva velikih mreža nije moguće, s obzirom da bi kompleksnost ovih modela jako usporila sam proračun.

Za IBDER najpogodniji modeli bili bi kontrolisani strujni izvori. Kontrolna strategija implementirana u ove modele trebala bi da bude u saglasnosti sa specifikacijom potrošača, ukoliko je ova specifikacija dostupna, ili u saglasnostima sa zahtevima definisanim u *Pravilima okorišćenju distributivnih mreža* ("Grid Codes"). Prvi korak ka cilju razvijanja ovakvih modela, predložen je u referenci [23], gde su predloženi modeli zasnovani na zahtevima definisanim u nemačkim Pravilima okorišćenju distributivnih mreža. Predloženi modeli se sastoje od strujnih izvora, čije vrednosti se određuju na osnovu vrednosti napona na priključcima IBDER u trenutku kratkog spoja i specifičnih zahteva iz Pravilima okorišćenju distributivnih mreža. Međutim, da bi se razvili generički modeli, kojima bi se obuhvatili zahtevi različitih zemalja i kojima bi se obuhvatile različite upravljačke strategije, potrebno je dodatno istraživanje na ovu temu, uz pristup odgovarajućim laboratorijama u kojima bi se modeli mogli verifikovati.

S druge strane, DFIM predstavljaju drugačiju vrstu izazova, s obzirom da njihov odziv u slučaju kratkog spoja zavisi od više različitih faktora, kako je diskutovano u delu 3.2. Zato i modeli kojima bi se ovakvo njihovo ponašanje korektno predstavilo, moraju biti fleksibilni – u zavisnosti od "jačine" kratkog spoja i u zavisnosti od uređaja korišćenog za zaštitu konvertora, DFIM se modeluju ili kao asinhronne mašine ili kao kontrolisani strujni izvori. U referenci [16] predložen je algoritam kojim bi se na osnovu lokacije kratkog spoja u odnosu na DFIM, kao i nivoa pada napona na priključcima DFIM odlučivalo o adekvatnom modelu. Koristeći se ovim algoritmom, modeli DFIM bili bi određeni sa visokom tačnošću.

Konačno, još jedan izazov u proračunima kratkih spojeva, usled integracije DER zasnovanih na uređajima energetske elektronike jeste u tome što se njihovi aktivni elementi ne mogu anulirati u Δ -kolu. Tako se osnovna osobina Δ -kola, da je ono pasivno svuda osim u čvoru s kratkim spojem, gubi. U prisustvu ovih DER, modelovanih strujnim izvorima sa strujama većim od njihovih nominalnih struja, Δ -kolo postaje aktivno i na mestima priključenja ovih DER. Ovaj izazov je detaljno diskutovan u referenci [16], a za njegovo rešenje je predloženo uvođenje Generalizovanog Δ -kola, u kome bi se delovi struja IBDER koje prelaze vrednosti struja ovih DER pre kratkog spoja injektirale i u čvorove njihovog priključenja. Na ovaj način bi se i dalje mogao koristiti princip superpozicije mreže sa režimom pre kratkog spoja i Generalizovanog Δ -kola da bi se dobio režim mreže s kratkim spojem.

4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je da se ukaže na izazove u modelovanju i osnovnim DMS proračunima usled sve veće integracije DER zasnovanih na uređajima energetske elektronike.

U normalnom režimu rada, koji se računa proračunom tokova snaga, tradicionalna klasifikacija čvorova mora znatno da se proširi da bi se obuhvatile sve upravljačke strategije implementirane u DER. Takođe, potrebno je kontinualno pratiti uvođenje novih upravljačkih strategija i na osnovu njih razvijati odgovarajuće tipove čvorova.

U režimu mreže s kratkim spojem, koji se računa proračunom kratkih spojeva, modelima tradicionalnih naizmeničnih mašina nije moguće na adekvatan način predstaviti IBDER i DFIM. S obzirom da ovi DER mogu da ograniče i kontrolišu svoje struje u režimu mreže s kratkim spojem, potrebno je razviti modele kojima će se na adekvatan način predstaviti ova osobina. Pored toga, tradicionalni koncept pasivnog Δ -kola nije moguće koristiti za proračun kratkih spojeva u prisustvu ovih DER.

5. LITERATURA

- [1] Tinney W, Hart C, 1967, "Power Flow Solution by Newton's Method", "IEEE Trans. on Pow. Syst.", "86(11)", 1449–1460.
- [2] Stott B, Alsac O, 1972, "Fast Decoupled Load Flow", "IEEE Trans. on Pow. Syst.", "93(3)", 859–867.
- [3] Arrillaga J, Arnold C, 1983, "Computer Modelling of Electrical Power Systems", "John Wiley & Sons"
- [4] Strezoski V, Trpezanovski Lj, 2000, "Three-phase asymmetrical load-flow", "Electrical Power and Energy Systems", "22", 511–520.
- [5] Zhang X, Chen H, 1994, "Asymmetrical three-phase load-flow study based on symmetrical component theory", "IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib", "3", 248–252.
- [6] Shirmohammadi D, Hong W, Semlyen A, Luo X, 1988, "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Network", "IEEE Trans. on Pow. Syst.", "3(2)", 753–762.
- [7] Luo X, Semlyen A, "Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Distribution and Transmission Network", 1990, "IEEE Trans. on Pow. Syst.", "5(4)", 1309–1316.
- [8] Rajicic D, Taleski R, 1998, "Two Novel Methods for Radial and Weakly Meshed Network Analysis", "Electric Power Systems Research", "48", 79–87.
- [9] Strezoski V, Vidovic P, 2015, "Power Flow for General Mixed Distribution Networks", "Int. Trans. Electr. Energ. Syst.", "25", 2455–2471.
- [10] Kramer W, Chakraborty S, Kroposki B, Thomas H, 2008, "Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems", "National Renewable Energy Laboratory. Report TP-581-42672", 132.
- [11] Kamh Z, Iravani R, 2010, "Unbalanced Model and Power-Flow Analysis of Microgrids and Active distribution Systems", "IEEE Trans. on Pow. Del.", "25(4)", 2851–2858.
- [12] Kamh Z, Iravani R, 2011, "Unified Three-Phase Power-Flow Analysis Model for Electronically Coupled Distributed Energy Resources", "IEEE Trans. on Pow. Del.", "26(2)", 899–909.
- [13] Kamh Z, Iravani R, "Active Distribution Networks – Modeling and Real-time Power Management", "LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, USA".
- [14] Laughton M, 1969, "Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase co-ordinates. Part 2: Fault analysis", "Proc. IEE", 116(5), 857–865.
- [15] Xiaofeng Z, Soudi F, Shirmohammadi D, Cheng C, 1995, "A Distribution Short Circuit Analysis Method Using Hybrid Compensation Method", "IEEE Trans. Power Syst.", 10(4), 2053–2059.
- [16] Strezoski L, Prica M, Loparo K, 2017, "Generalized Δ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generation in Real-Time Short-Circuit Calculations", "IEEE Trans. Power Syst.", 32(4)3237–3245.
- [17] Howard D, 2013, Ph.D. dissertation, "Short-Circuit Currents in Wind-Turbine Generator Networks", "Dept. Elec. Eng., Georgia Inst. of Tech., Atlanta, GA".
- [18] Joint Working Group, 2015, "Fault Current Contribution from Wind Plants", "Report to the T&D Committee of the IEEE Power and Energy Society, Pro Relay".
- [19] Strezoski V, Vojnović N, Vidović P, 2018, "New bus classification and unbalanced power flow of large-scale networks with electronically interfaced energy resources", "28(3)".
- [20] Erlich I, Kretschmann J, Fortmann J, Mueller-Engelhardt S, Wrede H, 2007, "Modeling of Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generators for Power System Stability Studies", "IEEE Trans. On Pow. Syst.", "22(3)", 1–11.
- [21] Howard D, Habetler T, Harley R, 2012, "Improved Sequence Network Model of Wind Turbine Generators for Short-Circuit Studies", "IEEE Trans. On Energy Conv.", "27(4)", 968–977.
- [22] Howard D, Liang J, Harley R, 2014, "Short-Circuit Modeling of DFIGs with Uninterrupted Control", "IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Pow. Elect.", "2(1)", 47–57.
- [23] Strezoski L, Katic V, Dumnic B, Prica M, 2016, "Short-Circuit Modeling of Inverter Based Distributed Generators Considering the FRT Requirements", "IEEE North American Power Symposium (NAPS), Denver, CO".