Broj rada: R5-12
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-12_138

ODREĐIVANJE KAPACITETA ZA PRIKLJUČENJE NOVIH IZVORA I POTROŠAČA PRIMJENOM PROGRAMSKOG PAKETA DIGSILENT POWERFACTORY

DETERMINATION OF HOSTING CAPACITY FOR THE CONNECTION OF NEW SOURCES AND LOADS USING DIGSILENT POWERFACTORY

Manuela BEVANDA, JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar, Bosna i Hercegovina*
Ivan VIDOVIĆ, JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar, Bosna i Hercegovina
Ivan GOLEMAC, JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar, Bosna i Hercegovina

KRATAK SADRŽAJ

Povećana integracija distribuiranih izvora električne energije predstavlja jedan od ključnih izazova u planiranju i pogonu distribucijskih elektroenergetskih mreža. Sve veći udio obnovljivih izvora, poput fotonaponskih sustava i manjih proizvodnih jedinica, zahtijeva pouzdanu procjenu tehničkih mogućnosti postojeće mrežne infrastrukture za prihvat novih izvora i potrošača. U tom kontekstu, od posebne je važnosti odrediti raspoloživi kapacitet priključenja uz očuvanje sigurnosti pogona, kvalitete napona i pouzdanosti opskrbe. Ovaj rad bavi se razvojem i primjenom metodologije za određivanje kapaciteta distribucijske mreže za priključenje novih distribuiranih izvora električne energije. Analiza se temelji na detaljnom modelu stvarne distribucijske mreže, pri čemu su kao ulazni podaci korišteni dostupni mjereni podaci iz pogona, uključujući opterećenja, struje, napone i topologiju mreže. Model obuhvaća sve relevantne mrežne elemente, kao što su transformatori, vodovi i postojeći potrošači, čime se omogućuje realističan prikaz stvarnog stanja mreže. Proračuni i simulacije potrebni za dobivanje rezultata provedeni su uz primjenu programskog paketa DIgSILENT PowerFactory. U okviru rada razmatrani su različiti scenariji priključenja novih distribuiranih izvora, s ciljem procjene njihovog utjecaja na radne uvjete mreže. Poseban naglasak stavljen je na analizu naponskih profila, opterećenja mrežnih elemenata i pojave tehničkih ograničenja koja mogu utjecati na mogućnost priključenja dodatnih proizvodnih kapaciteta. Metodologija omogućuje identifikaciju kritičnih točaka u mreži te procjenu raspoloživih sigurnosnih margina za integraciju novih izvora bez potrebe za neposrednim ulaganjima u rekonstrukciju infrastrukture. Analiza kapaciteta provedena je uz razmatranje stvarnih pogonskih uvjeta i promjenjivosti opterećenja, što je osobito važno u mrežama s visokim udjelom obnovljivih izvora. Time se omogućuje objektivna procjena mogućnosti mreže u različitim radnim režimima, uključujući vršna opterećenja i povećanu proizvodnju iz distribuiranih izvora. Dodatno, razmatrana je i mogućnost optimizacije rada mreže kroz bolje iskorištenje postojećih resursa. Rezultati ovog istraživanja pružaju temelj za sustavan i transparentan pristup određivanju kapaciteta priključenja u distribucijskim mrežama. Predložena metodologija može poslužiti kao podrška operatorima distribucijskih sustava u procesu donošenja odluka vezanih uz priključenje novih

* Manuela Bevanda manuela.bevanda@ephzhb.ba; Ivan Vidović ivan.vidovic@ephzhb.ba; Ivan Golemac ivan.golemac1@ephzhb.ba

izvora, planiranje razvoja mreže i prilagodbu distribucijskog sustava zahtjevima energetske tranzicije.

Ključne reči: Distribucijska elektroenergetska mreža, Distribuirani izvori električne energije, Kapacitet priključenja, Obnovljivi izvori energije, Analiza pogonskih uvjeta

ABSTRACT

The increased integration of distributed electricity generation sources represents one of the key challenges in the planning and operation of distribution power systems. A growing share of renewable energy sources, such as photovoltaic systems and small-scale generation units, requires a reliable assessment of the technical capabilities of the existing network infrastructure to accommodate new sources and consumers. In this context, determining the available connection capacity while maintaining operational security, voltage quality, and supply reliability is of particular importance. This paper focuses on the development and application of a methodology for determining the capacity of a distribution network to connect new distributed electricity generation sources. The analysis is based on a detailed model of a real distribution network, using available measured operational data as input, including loads, currents, voltages, and network topology. The model encompasses all relevant network elements, such as transformers, lines, and existing consumers, enabling a realistic representation of the actual network state. The calculations and simulations required to obtain the results were carried out using the DIgSILENT PowerFactory software package. Within the scope of this work, various scenarios for connecting new distributed generation sources were considered in order to assess their impact on network operating conditions. Special emphasis was placed on the analysis of voltage profiles, loading of network elements, and the occurrence of technical constraints that may affect the possibility of connecting additional generation capacity. The methodology enables the identification of critical points in the network and the assessment of available safety margins for integrating new sources without the need for immediate investments in infrastructure reinforcement. The capacity analysis was conducted while taking into account real operating conditions and load variability, which is particularly important in networks with a high share of renewable energy sources. This allows for an objective assessment of network capabilities under different operating regimes, including peak load conditions and increased generation from distributed sources. Additionally, the potential for optimizing network operation through improved utilization of existing resources was also considered. The results of this research provide a basis for a systematic and transparent approach to determining connection capacity in distribution networks. The proposed methodology can serve as support for distribution system operators in decision-making processes related to the connection of new sources, network development planning, and the adaptation of the distribution system to the requirements of the energy transition.

Keywords: Distribution power network, Distributed energy resources, Connection capacity, Renewable energy sources, Operating conditions analysis

UVOD

Razvoj elektroenergetskih sustava posljednjih desetljeća obilježen je značajnim promjenama u strukturi proizvodnje i potrošnje električne energije. Sve veća integracija distribuiranih izvora, posebno obnovljivih izvora energije poput sunčanih i vjetroelektrana, kao i povećanje broja novih potrošača s promjenjivim i ponekad izrazito zahtjevnim profilima opterećenja, postavljaju nove izazove pred planiranje i pogon distribucijskih i prijenosnih mreža. U takvim okolnostima, ključno pitanje postaje sposobnost postojeće elektroenergetske mreže da prihvati nove izvore i potrošače bez narušavanja sigurnosti napajanja, kvalitete električne energije i pouzdanosti rada sustava.

Određivanje kapaciteta za priključenje novih izvora i potrošača predstavlja složen tehnički problem koji zahtijeva detaljnu analizu stanja mreže u različitim pogonskim uvjetima. Tradicionalni pristupi temeljeni na pojednostavljenim proračunima i statičkim sigurnosnim rezervama sve češće se pokazuju nedostatnima, osobito u mrežama s visokim udjelom distribuirane proizvodnje. Zbog toga se u suvremenoj elektroenergetskoj praksi sve veći naglasak stavlja na primjenu naprednih programskih alata koji omogućuju precizno modeliranje mreže te provedbu raznovrsnih analiza, uključujući analize tokova snaga, naponskih prilika, opterećenja elemenata i ponašanja sustava u izvanrednim pogonskim stanjima.

Jedan od najčešće korištenih programskih paketa u području analize i planiranja elektroenergetskih sustava je **DIgSILENT PowerFactory**. Riječ je o sveobuhvatnom alatu koji omogućuje detaljno modeliranje prijenosnih i distribucijskih mreža, integraciju različitih tipova izvora i potrošača te provedbu brojnih proračuna relevantnih za procjenu priključnih kapaciteta. Njegova primjena posebno dolazi do izražaja u situacijama kada je potrebno evaluirati granične uvjete rada mreže, identifikaciju uskih grla te procjenu mogućih mjera za povećanje kapaciteta priključenja bez značajnih infrastrukturnih zahvata.

Cilj ovog rada je odrediti kapacitete elektroenergetske mreže za priključenje novih izvora i potrošača primjenom programskog paketa DIgSILENT PowerFactory. U sklopu rada izrađuje se detaljan model promatrane mreže, provode se odgovarajuće analize tokova snaga te se ispituje utjecaj postupnog povećanja priključenih snaga na naponske razine i opterećenje mrežnih elemenata. Posebna pažnja posvećuje se identifikaciji ograničavajućih čimbenika koji definiraju maksimalno dopuštene priključne kapacitete, kao i mogućnostima njihovog ublažavanja.

1 DUGOROČNI PLAN RAZVOJA PRENOSNE MREŽE

Dugoročni plan razvoja prenosne mreže predstavlja temeljni planski dokument kojim se definira smjer razvoja visokonaponske elektroenergetske infrastrukture Bosne i Hercegovine u srednjoročnom razdoblju. Njegova osnovna svrha jest osigurati pouzdan, siguran i ekonomičan prijenos električne energije uz istodobno stvaranje tehničkih preduvjeta za priključenje novih proizvodnih kapaciteta, povećanje potrošnje te jačanje prekograničnih interkonekcija u regionalnom kontekstu. Plan se izrađuje u skladu s važećim mrežnim kodeksom i regulatornim zahtjevima, uz sudjelovanje relevantnih institucija zaduženih za upravljanje i razvoj prijenosnog sustava.

Polaznu osnovu dugoročnog planiranja čini analiza postojećeg stanja prijenosne mreže, koja obuhvaća raspored i karakteristike dalekovoda i transformatorskih stanica naponskih razina 400 kV, 220 kV i 110 kV, kao i njihovu opterećenost u različitim pogonskim režimima. Utvrđeno je da je veći dio prijenosne infrastrukture građen u ranijim razdobljima, što zahtijeva sustavno planiranje obnove i rekonstrukcije pojedinih elemenata mreže kako bi se osigurala dugoročna pouzdanost i usklađenost s tehničkim kriterijima sigurnosti.

Ključni ulazni podaci za izradu plana uključuju projekcije razvoja proizvodnje i prognoze potrošnje električne energije. Posebno je naglašen očekivani rast proizvodnih kapaciteta iz obnovljivih izvora, čija prostorna raspršenost i promjenjiva raspoloživost značajno utječu na tokove snaga u prijenosnoj mreži. Zbog toga se razvoj mreže ne promatra isključivo kao odgovor na rast ukupne potrošnje, već i kao potreba prilagodbe novoj strukturi proizvodnje, pri čemu se vode računa o tehničkim ograničenjima elemenata mreže, naponskim prilikama i kriteriju sigurnosti pogona N-1

Planirani razvoj prijenosne mreže obuhvaća izgradnju novih dalekovoda i transformatorskih kapaciteta, kao i rekonstrukciju postojećih objekata s ciljem povećanja prijenosne moći i rasterećenja pojedinih kritičnih čvorova sustava. Poseban značaj pridaje se unapređenju međunarodnih interkonekcija, čime se omogućuje veća fleksibilnost rada elektroenergetskog sustava, bolja integracija u regionalno tržište električne energije te sigurnije upravljanje viškovima i manjkovima proizvodnje.

Dugoročni plan prenosne mreže ne predstavlja statičan dokument, već dinamičan okvir koji se prilagođava promjenama u razvoju proizvodnje, potrošnje i regulatornog okruženja. Njegova primjena osigurava koordiniran razvoj mreže, racionalno ulaganje sredstava i smanjenje tehničkih ograničenja koja mogu utjecati na priključenje novih izvora i potrošača. U tom smislu, plan ima ključnu ulogu u stvaranju pouzdane tehničke osnove za daljnji razvoj elektroenergetskog sustava Bosne i Hercegovine.

1.1 Izračun prihvatnog kapaciteta iz OIE za određeno trafopodručje

Prihvatni kapacitet obnovljivih izvora energije (OIE) unutar određenog trafopodručja predstavlja maksimalnu snagu proizvodnih postrojenja koja se može priključiti na elektroenergetsku mrežu bez narušavanja sigurnosti pogona i kvalitete isporučene električne energije. Njegovo određivanje postaje sve značajnije s porastom broja distribuiranih izvora, posebice fotonaponskih i vjetroelektrana, čiji je rad karakteriziran promjenjivošću i ovisnošću o vanjskim uvjetima.

Izračun prihvatnog kapaciteta započinje detaljnom analizom promatranog trafopodručja, uključujući topologiju mreže, nazivni napon, karakteristike transformatora, presjeke i duljine vodova te postojeća opterećenja. Posebna se pažnja posvećuje trenutačnom pogonskom stanju mreže, kako u vršnim, tako i u minimalnim potrošačkim uvjetima, budući da upravo ti ekstremni slučajevi često definiraju raspoloživi prostor za dodatnu proizvodnju iz OIE.

1.2 Granične vrijednosti priključnih snaga elektrana u distribucijskim područjima TS x/10(20) kV

Razvoj distribuirane proizvodnje električne energije, osobito iz obnovljivih izvora, doveo je do sve većih zahtjeva za priključenje elektrana na srednjenaponske (SN) i niskonaponske (NN) razine distribucijske mreže. U tom kontekstu, transformatorske stanice TS x/10(20) kV zauzimaju središnje mjesto jer predstavljaju glavnu poveznicu između prijenosne ili subprijenosne mreže i krajnjih priključnih točaka proizvođača i potrošača. Definiranje graničnih vrijednosti priključnih snaga elektrana u ovim distribucijskim područjima ključno je za siguran, pouzdan i kvalitetan rad elektroenergetskog sustava.

Granična priključna snaga elektrane uvjetovana je prije svega tehničkim mogućnostima postojeće mreže. Transformator u TS x/10(20) kV ima ograničenu nazivnu snagu, a njegov stupanj opterećenja mora ostati unutar dopuštenih granica kako bi se izbjeglo pregrijavanje, ubrzano starenje izolacije i skraćenje životnog vijeka opreme. Priključenje elektrane čija snaga značajno prelazi lokalnu potrošnju može dovesti do obrnutog toka snage prema višim naponskim razinama, što dodatno opterećuje transformatore i vodove koji izvorno nisu projektirani za takav režim rada.

Osim termičkih ograničenja, iznimno su važni i naponski kriteriji. Ubrizgavanje veće snage u distribucijsku mrežu uzrokuje porast napona na sabirnicama i duž SN i NN vodova. Ako se napon na mjestu priključenja ili na krajnjim točkama mreže približi ili prijeđe dopuštene granice, može doći do smetnji u radu potrošača, neželjenih isključenja zaštite te narušavanja kvalitete električne energije. Zbog toga se maksimalna dopuštena snaga elektrane često ograničava upravo naponskim proračunima, a ne samo nazivnom snagom transformatora. Naponski kriteriji koje FNE trebaju zadovoljiti prikazani su na slici 1.

Smjer energije	Napo-nska razina	Max. Δu (% U_n)	Ukupni max. Δu (% U_n)	Sveuku-pno max Δu	Nepou-zdanost ARN (%U_n)	Ukupni raspon napona (% U_n)	Propis. Raspon napona (% U_n)	Preuzeti rizik ODS-a (%)
1	2	3	4	5	6	7	8	9=7-8
Proizvodnja	SN	+2%	+5%	18 %	3 % (±1,5 %)	21%	20%	1%
	NN	+3%						
Potrošnja	SN	-5%	-13%					
	NN	-8%						

Slika 1Naponski kriteriji[1]

Dodatni čimbenik koji utječe na granične vrijednosti priključnih snaga jest kratkospojna izdržljivost opreme. Priključenjem elektrana povećava se razina kratkospojne snage u čvorištima mreže, što može premašiti projektne mogućnosti rasklopne opreme, sabirnica i zaštitnih uređaja u TS x/10(20) kV. U takvim slučajevima nužne su rekonstrukcije ili zamjena opreme, što ima izravne financijske i operativne posljedice. Stoga, da bi bio zadovoljen uvijet negativnog utjecaja na distribucijsku mrežu, sve elektrane, odnosno zbroj svih elektrana, priključenih na 10(20) i 35 kV sabirnicu u TS x/10(20) kV ne smije prelaziti 3% snage tropolnog kratkog spoja na pripadajućoj TS x/10(20) kV. Dodatno, uz ovaj uvijet, negativan utjecaj proizvođača na distribucijskoj mreži neće se razmatrati ukoliko se radi o priključenju manjih snaga, odnosno, ukoliko je zadovoljen uvijet:

- Za niskonaponsku distribucijsku mrežu:

$$\frac{S_k}{S_p} \geq 150$$

- Za srednjenaponsku distribucijsku mrežu:

$$\frac{S_k}{S_p} \geq 1000$$

Gdje je:

- Sk - snaga tropolnog kratkog spoja na mjestu priključenja (bez doprinosa razmatranih elektrana)
- Sp - priključna snaga proizvođača

Treba naglasiti da granične vrijednosti nisu jedinstvene i fiksne, već ovise o specifičnostima svakog distribucijskog područja. Topologija mreže, duljina i presjek vodova, udio postojeće proizvodnje, lokalna potrošnja te mogućnosti regulacije napona igraju značajnu ulogu. U nekim slučajevima, primjenom dodatnih mjera poput regulacijskih transformatora, ugradnje kompenzacijskih uređaja ili ograničavanja radne snage elektrane u određenim režimima, moguće je omogućiti priključenje veće instalirane snage bez ugrožavanja pogona mreže.

Zaključno, određivanje graničnih vrijednosti priključnih snaga elektrana u područjima TS x/10(20) kV predstavlja složen inženjerski zadatak koji zahtijeva detaljne analize i individualni pristup svakom zahtjevu za priključenje. Takav pristup omogućuje uravnotežen razvoj

distribuirane proizvodnje uz očuvanje sigurnosti, pouzdanosti i kvalitete distribucijskog elektroenergetskog sustava.

1.3 Analitički izračun granične vrijednosti priključne snage generirane iz distribuiranih izvora za određeno trafopodručje

Prvi korak određivanja granične vrijednosti snage priključenja proizvođača na nekom trafopodručju kreće od pojne trafostanice, tj., treba biti zadovoljen kriterij od 3% snage kratkog spoja na pripadajućoj TS x/10(20) kV, te je analitički izračun prikazan u nastavku.

Podatci:

Tronamotni transformator TS 110/35/10 kV:

- nazivne naponske razine: Un= 110/35/10,5 kV
- nazivna snaga transformatora: Sn= 20/14/20 MVA
- postotni napon kratkog spoja: uk12 = 13,1%
  uk23 = 3,9%
  uk13 = 11,4%
- snaga tropolnog kratkog spoja na VN sabirnici: Sk3 110 kV= 1743,3 MVA

Transformator TS 35/10 kV :

- nazivna naponska razina: Un= 35/10,5 kV
- nazivna snaga transformatora: Sn= 4 MVA
- postotni napon kratkog spoja: uk12 = 5,88%

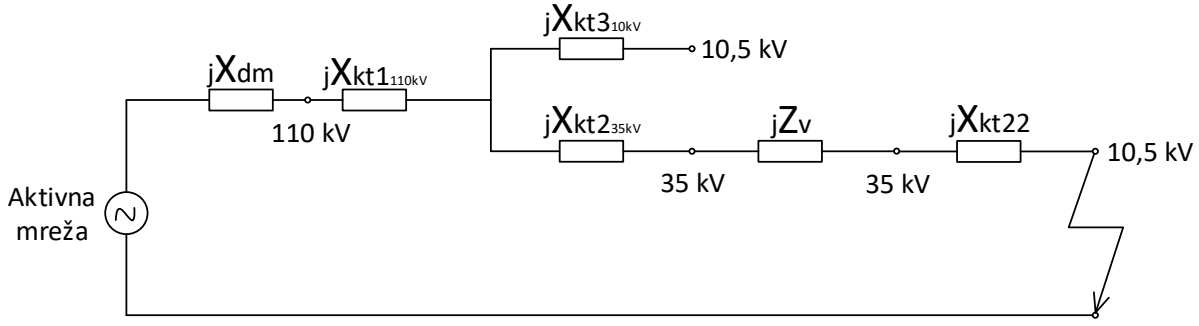
Dalekovoda Al-Če 3x95 + 1x50 mm2 (veza TS 110/35/10 kV – TS 35/10 kV):

- nazivna naponska razina: Un= 35kV
- impedancija voda: Zv = 0,306 + j0,337 Ω/km
- duljina dalekovoda: l=5 km

Iznos struje tropolnog kratkog spoja 110 kV sabirnici TS 110/35/10 kV:

- struja tropolnog kratkog spoja: Ik3= 9,15 kA

Nadomjesna shema:



Slika 2Nadomjesna shema (Theveninov model)

Bazni napon: $\boldsymbol{Ub = 10,5\ kV}$

1.) Tronamotni transformator 110/35/10 kV:

Impedancije:

$$X_{dt12} = \frac{u_{k12}}{100} \times \frac{U_b^2}{S_{n12}} = \frac{13,1}{100} \times \frac{10,5^2}{14} = j1,032\ \Omega$$

$$X_{dt23} = \frac{u_{k23}}{100} \times \frac{U_b^2}{S_{n23}} = \frac{3,9}{100} \times \frac{10,5^2}{14} = j0,307\ \Omega$$

$$X_{dt13} = \frac{u_{k13}}{100} \times \frac{U_b^2}{S_{n13}} = \frac{11,4}{100} \times \frac{10,5^2}{20} = j0,0,628\ \Omega$$

Korekcijski faktor:

$$K_T = 0,95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times u_k}$$

$c_{max} = 1,1$ – faktor ekvivalentnog naponskog izvora (na SN strani)

$x_{T\ 12} = \frac{13,1\%}{100}$ – jedinična reaktancija transformatora (p. u.)

$x_{T\ 12} = \frac{3,9\%}{100}$ – jedinična reaktancija transformatora (p. u.)

$x_{T\ 13} = \frac{11,4\%}{100}$ – jedinična reaktancija transformatora (p. u.)

$$K_{T12} = 0,95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times X_{t12}} = 0,95 \times \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,131} = 0,969$$

$$K_{T23} = 0,95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times X_{t23}} = 0,95 \times \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,039} = 1,021$$

$$K_{T13} = 0,95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \times X_{t13}} = 0,95 \times \frac{1,1}{1 + 0,6 \times 0,114} = 0,978$$

Korigirana impedancija transformatora:

$$X_k = K_T \times X_{dt}$$

$$X_{12k} = K_{T12} \times X_{dt12} = 0,969 \times j1,032 = j1\ \Omega$$

$$X_{23k} = K_{T23} \times X_{dt23} = 1,021 \times j0,307 = j0,313\ \Omega$$

$$X_{13k} = K_{T13} \times X_{dt13} = 0,978 \times j0,628 = j0,614\ \Omega$$

Reaktancije ekvivalentne sheme:

$$X_{KT1} = \frac{1}{2} \times (X_{12K} + X_{13K} - X_{23K}) = \frac{1}{2} \times (j1 + j0{,}614 - j0{,}313) = j0{,}6505\ \Omega$$

$$X_{KT2} = \frac{1}{2} \times (X_{12K} + X_{23K} - X_{13K}) = \frac{1}{2} \times (j1 + j0{,}313 - j0{,}614) = j0{,}3495\ \Omega$$

$$X_{KT3} = \frac{1}{2} \times (X_{13K} + X_{23K} - X_{12K}) = \frac{1}{2} \times (j0{,}614 + j0{,}313 - j1) = -j0{,}0365\ \Omega$$

2.) Impedancija aktivne mreže:

$$S_{3p110kV} = \sqrt{3} \times U_n \times I_{k3} = \sqrt{3} \times 110 * 9{,}15 = 1743{,}3\ MVA$$

$$X_{dm} = \frac{1{,}1 \times U_b^2}{S_{3p110kV}} = \frac{1{,}1 \times 10{,}5^2}{1743{,}3} = j0{,}07\ \Omega$$

3.) Impedancija voda:

$$Z_v = (R_v + jX_v) \times l \times \frac{U_b^2}{U_n^2} = (0{,}306 + j0{,}337) \times 5 \times \frac{10{,}5^2}{35^2} = 0{,}1377 + j0{,}1517\ \Omega$$

4.) Impedancija dvonamotnog (novog) transformatora:

$$X_{dt12} = \frac{u_{k12}}{100} \times \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{5{,}88}{100} \times \frac{10{,}5^2}{4} = j1{,}6207\ \Omega$$

$$K_{T12} = 0{,}95 \times \frac{c_{max}}{1 + 0{,}6 \times u_{k12}} = 0{,}95 \times \frac{1{,}1}{1 + 0{,}6 \times 0{,}0588} \approx 1$$

$$X_{kT22} = K_{T12} + X_{dt12} = j1{,}6207\ \Omega$$

5.) Ukupna impedancija:

$$Z_{uk} = X_{KT1} + X_{KT2} + X_{dm} + Z_v + X_{kT22} =$$

$$= j0{,}6505 + j0{,}3495 + j0{,}07 + 0{,}1377 + j0{,}1517 + j1{,}6207 =$$

$$= 0{,}1377 + j2{,}8424\ \Omega$$

$$|Z_{uk}| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0{,}1377^2 + 2{,}8424^2} = 2{,}8457\ \Omega$$

6.) Snaga tropolnog kratkog spoja na 10,5 kV sabirnici TS 35/10,5 kV:

$$S_{k3,10kV} = \frac{1{,}1 \times U_b^2}{|Z_{uk}|} = \frac{1{,}1 \times 10{,}5^2}{2{,}8457} = 42{,}616\ MVA$$

7.) Dozvoljena vrijednost snage priključenja distributivnih izvora na 10,5 kV sabirnici TS 35/10,5 kV:

$$3\%\ od\ S_{k3,10kV} = 0{,}03 \times 42{,}616 = 1{,}2785\ MVA \approx 1{,}3\ MVA$$

2 ULAZNI PODATCI

Ulazni podatci u ovoj analizi koriste se s ciljem realnog i tehnički utemeljenog sagledavanja mogućnosti priključenja elektrana na distribucijsku mrežu u području transformatorskih stanica TS x/10(20) kV. Polaznu osnovu čine tehničke karakteristike promatranih transformatorskih stanica, uključujući nazivnu snagu energetskih transformatora, nazivni omjer napona, kratkospojnu snagu te raspoložive regulacijske mogućnosti. Posebna pažnja posvećuje se stupnju postojećeg opterećenja transformatora u normalnim pogonskim uvjetima, kao i očekivanim promjenama opterećenja u promatranom razdoblju.

Uz podatke o transformatorskim stanicama, koriste se i detaljni podatci o srednjenaponskoj mreži koja se napaja iz promatranih TS x/10(20) kV. Ti podatci obuhvaćaju konfiguraciju mreže, duljine vodova, presjek i vrstu vodiča, kao i električne parametre vodova relevantne za proračun padova i porasta napona. U analizu se uključuju i podatci o postojećim potrošačima priključenima na mrežu, s naglaskom na vršne snage, karakteristike opterećenja te prostorni raspored potrošnje.

Važan skup ulaznih podataka odnosi se na već priključene ili planirane proizvodne izvore u promatranom distribucijskom području. U tom smislu razmatraju se instalirane snage, tehnologija proizvodnje, predviđeni radni režimi te mogućnosti regulacije jalove snage. Ovi podatci imaju značajan utjecaj na ukupnu raspodjelu tokova snaga u mreži, kao i na naponske prilike u pojedinim čvorištima.

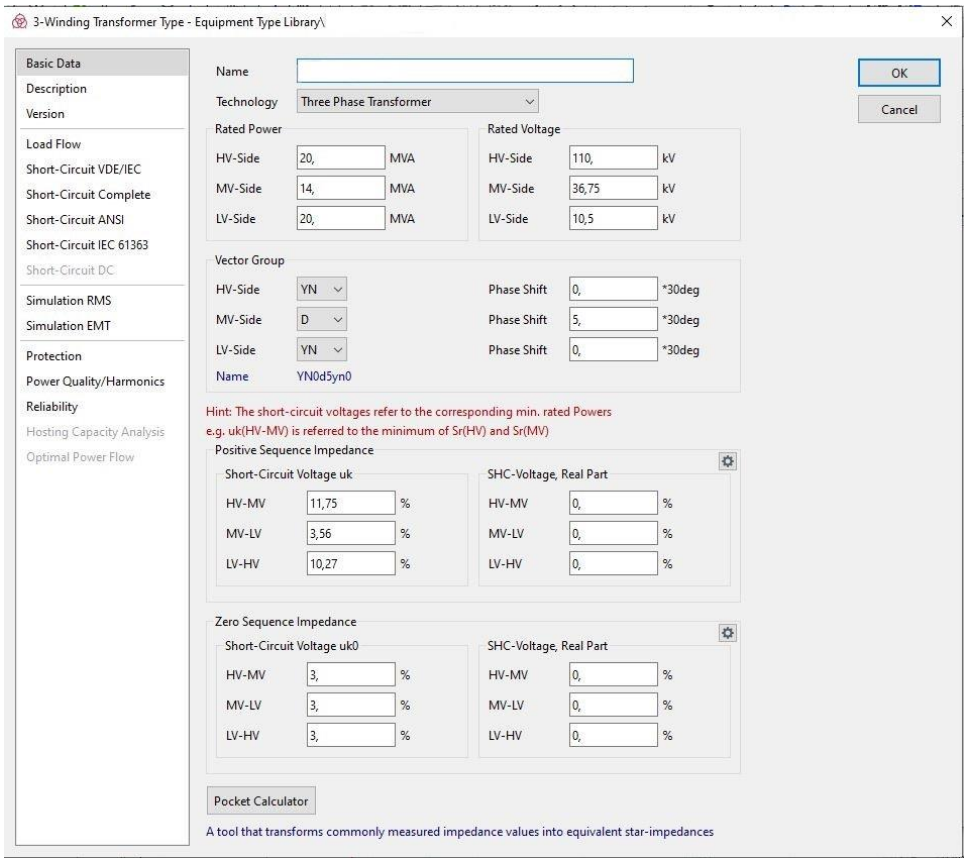
Dodatno se koriste tehnički uvjeti i kriteriji operatora distribucijskog sustava, koji definiraju dopuštene granice napona, maksimalna dopuštena opterećenja mrežnih elemenata te zahtjeve vezane uz kvalitetu električne energije. U obzir se uzimaju i važeći normativni dokumenti te preporuke vezane uz priključenje proizvodnih postrojenja na razine napona 10 i 20 kV. Svi navedeni ulazni podatci predstavljaju temelj za provođenje proračuna i analiza graničnih vrijednosti priključnih snaga elektrana u promatranim distribucijskim područjima.

3 PROGRAMSKI PAKET „DIGSILENT POWERFACTORY“

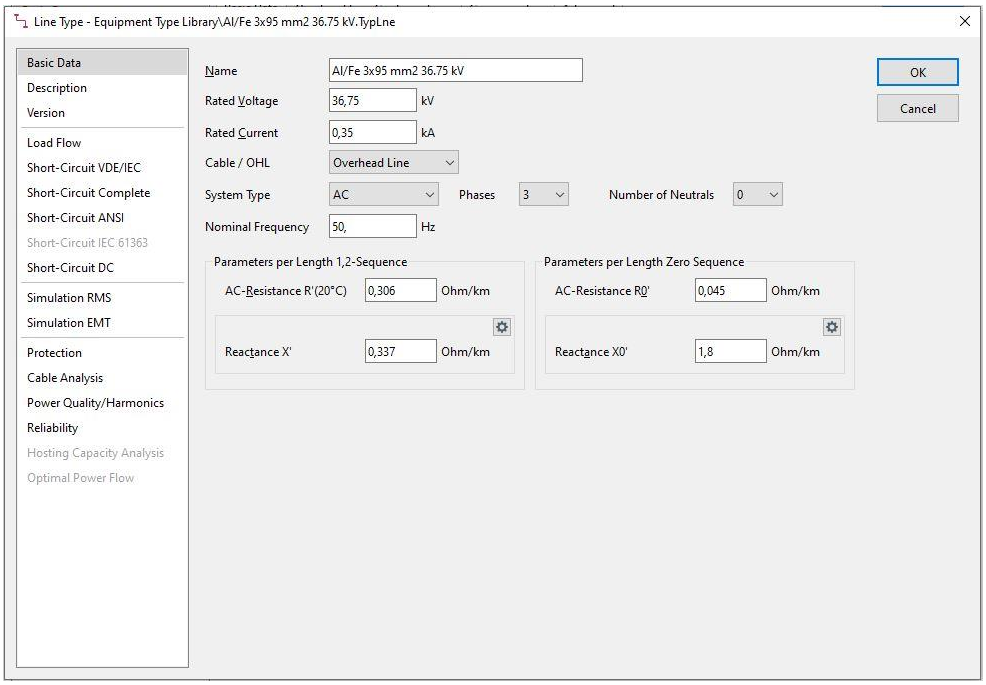
DIgSILENT PowerFactory predstavlja jedan od najčešće korištenih softverskih alata za analizu i modeliranje elektroenergetskih sustava, kako u prijenosnim tako i u distribucijskim mrežama. Njegova široka primjena u inženjerskoj praksi, istraživačkom radu i kod operatora elektroenergetskih sustava temelji se na mogućnosti detaljnog i pouzdanog proračuna različitih pogonskih stanja mreže. Posebno je pogodan za analizu integracije distribuiranih izvora energije, koji zbog svoje promjenjive proizvodnje i sve većeg udjela predstavljaju značajan izazov za planiranje i pogon distribucijskih mreža.

Jedna od ključnih prednosti programskog paketa PowerFactory jest mogućnost preciznog modeliranja distribucijske mreže s uključenim svim relevantnim elementima, poput

transformatorskih stanica, vodova, potrošača i proizvodnih postrojenja. Program omogućuje definiranje stvarnih tehničkih parametara mrežnih elemenata, uključujući impedancije vodova, regulacijske mogućnosti transformatora te ograničenja napona i struja. Takav pristup omogućuje realno sagledavanje utjecaja priključenja distribuiranih izvora na postojeću mrežnu infrastrukturu. Primjer modeliranja nekih elemenata prikazani su na slikama ispod. Pored mogućnosti modelirana elemenata, programski paket sadrži i opsežnu biblioteku već modeliranih tipova kabela, transformatora, itd.

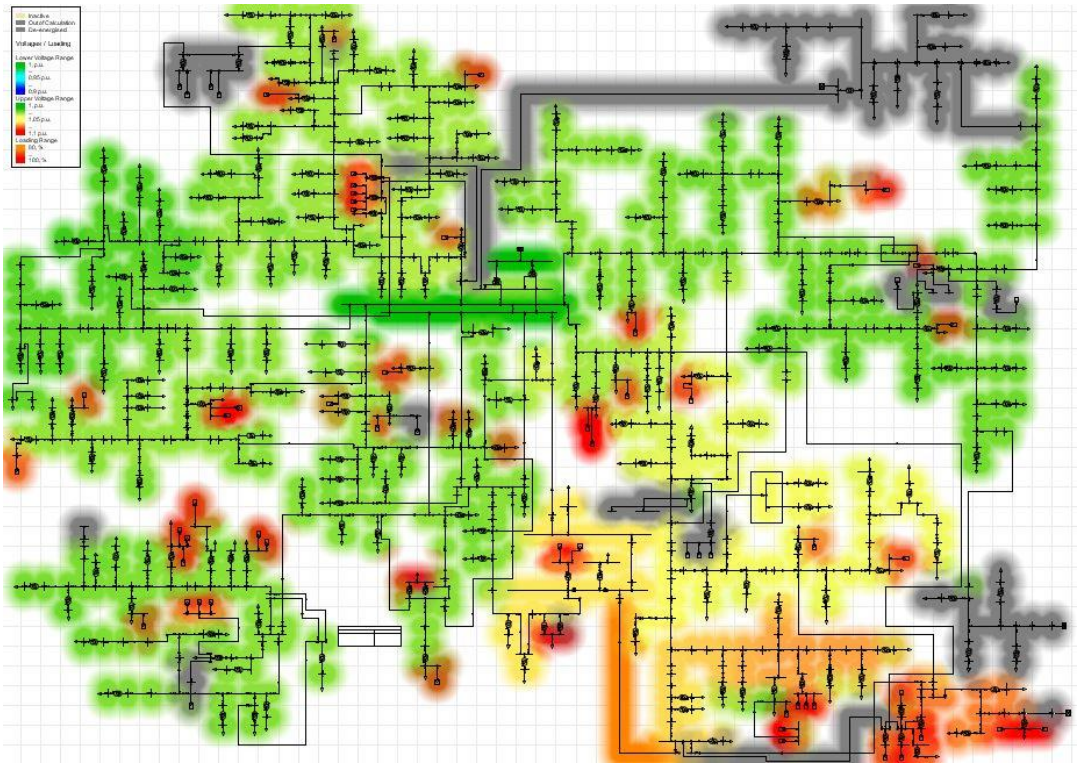


Slika 3Modeliranje tronamotnog transformatora

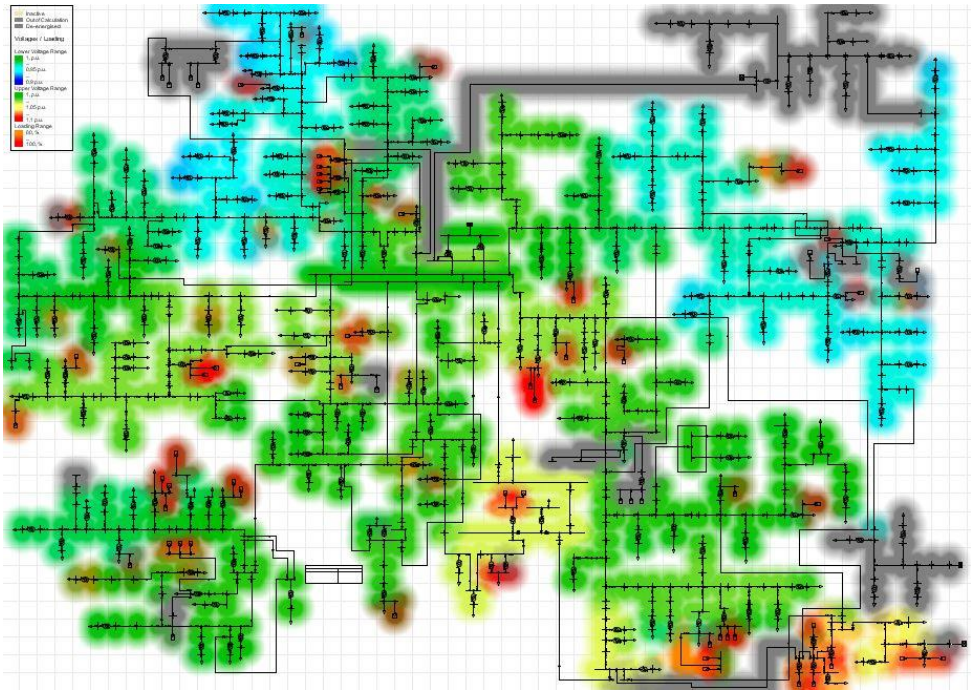


Slika 4Modeliranje kablova i DV

Pri određivanju granične vrijednosti snage priključenja distribuiranih izvora, PowerFactory se pokazuje posebno korisnim kroz proračune tokova snaga i analizu naponskih prilika u mreži. Program omogućuje simulaciju različitih scenarija rada, uključujući rad pri minimalnom i maksimalnom opterećenju mreže, kao i maksimalnoj proizvodnji distribuiranih izvora. Na taj se način mogu identificirati kritična stanja u kojima dolazi do prekoračenja dopuštenih naponskih granica, preopterećenja transformatora ili vodova te pojava nepovoljnih tokova snaga prema višim naponskim razinama. Obično se ta dva stanja definiraju kao scenariji MIN (trenutak kada je minimalna potrošnja u distribucijskoj mreži) i MAX (trenutak kada je opterećenje mreže najviše), što je prikazano na slici 5 i 6.



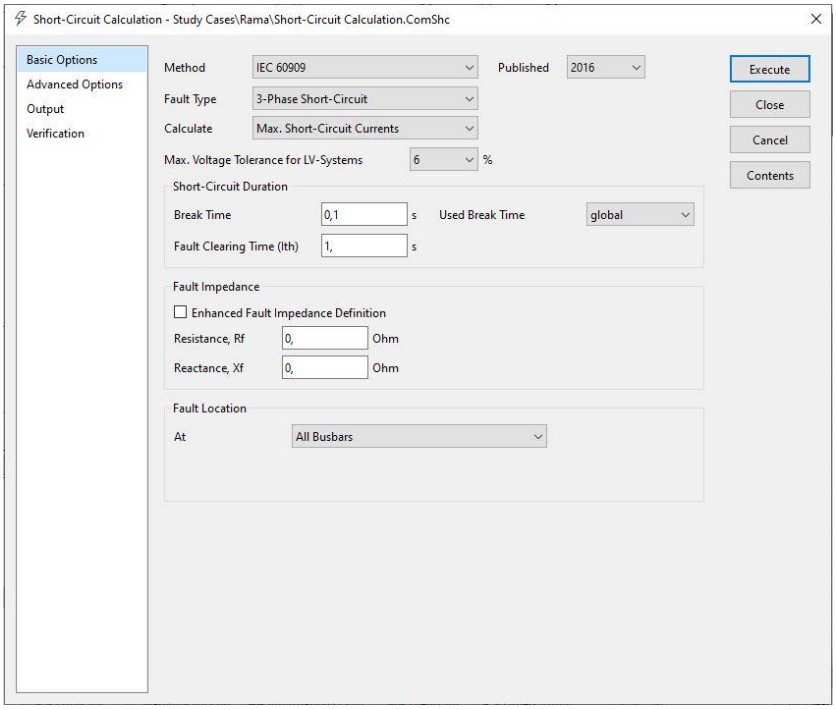
Slika 5Scenarij miniamlne potrošnje



Slika 6Scenarij maksimalne potrošnje

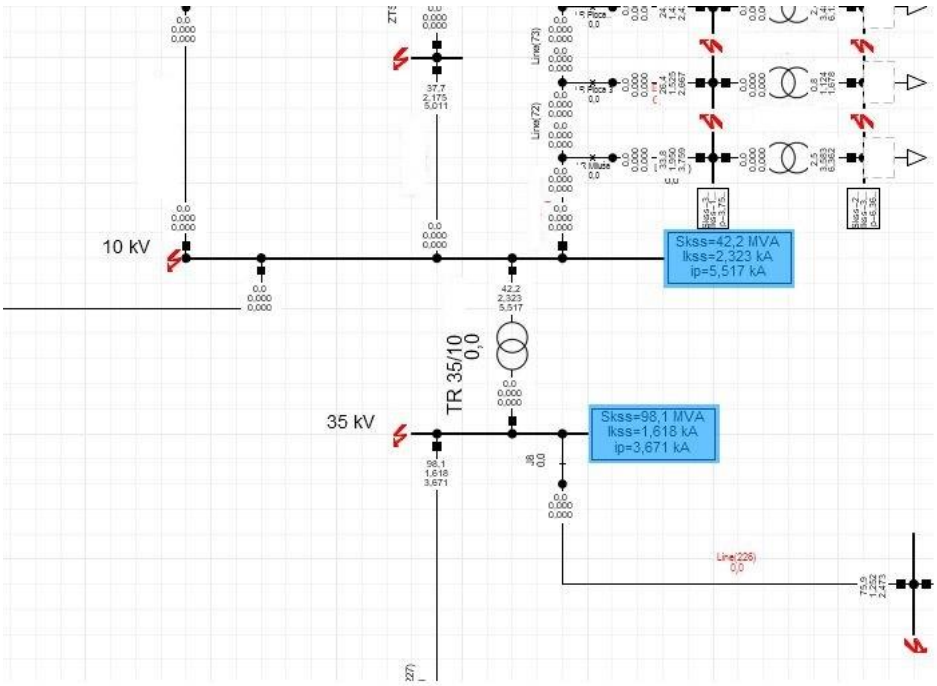
Osim stacionarnih proračuna, PowerFactory pruža mogućnost analize kratkospojnih stanja i provjere kratkospojnih razina u čvorištima mreže. To je od posebne važnosti pri priključenju novih izvora jer povećanje kratkospojne snage može dovesti do prekoračenja dopuštenih vrijednosti za rasklopnu i zaštitnu opremu u transformatorskim stanicama. Integriranjem ovih

analiza moguće je utvrditi ograničenja priključenja koja ne proizlaze samo iz naponskih prilika, već i iz sigurnosnih i pogonskih kriterija mreže. Programski paket raspolaže proračunom svih vrsta kratkih spojeva, kao i odabir metode koje koristi pri proračunu, prikazano na slici 7.



Slika 7Simulacija proračuna kratkog spoja

Vezano za primjer analitičkog izračuna odrađenog iznad, programski paket bitno ubrzava proces dobivanja rezultata te daje točnije rezultate proračuna obzirom da su svi elementi detaljno definirani. Primjer dobivanja rezultata za proračun prikazan je na slici 8.



Slika 8Rezultat simulacije tropolnog kratkog spoja

Dodatna prednost PowerFactoryja jest mogućnost modeliranja regulacije jalove snage i napona distribuira-nih izvora, što ima značajan utjecaj na povećanje dopuštene priključne snage. Analizom različitih strategija upravljanja može se procijeniti u kojoj mjeri primjena naponske ili jalovinske regulacije omogućuje bolje iskorištenje postojeće mreže bez potrebe za opsežnim rekonstrukcijama. Time PowerFactory postaje vrijedan alat ne samo za provjeru postojećih ograničenja, već i za pronalaženje optimalnih tehničkih rješenja.

Zbog navedenih mogućnosti, DIgSILENT PowerFactory predstavlja pouzdanu i učinkovitu platformu za analizu graničnih vrijednosti priključne snage distribuiranih izvora u distribucijskoj mreži. Njegova primjena omogućuje donošenje tehnički utemeljenih odluka, uzimajući u obzir stvarne pogonske uvjete i ograničenja mreže, čime se osigurava siguran i stabilan rad elektroenergetskog sustava uz istodobno poticanje razvoja distribuirane proizvodnje.

4 METODOLOGIJA IZRAČUNA KVOTA

4.1 Deterministička analiza

Deterministička analiza predstavlja temeljni i najčešće korišteni pristup pri analizi priključenja distribuiranih izvora energije na distribucijsku mrežu. Ova metoda temelji se na unaprijed definiranim i točno određenim ulaznim podacima, pri čemu se promatraju konkretna pogonska stanja mreže za koja se pretpostavlja da reprezentiraju najnepovoljnije ili referentne uvjete rada. Cilj determinističke analize jest provjera zadovoljenja tehničkih kriterija mreže pri priključenju određenog izvora snage, bez razmatranja slučajnosti ili vjerojatnosnih raspodjela.

U okviru determinističke analize najčešće se razmatra ograničen broj karakterističnih scenarija rada mreže. To su, primjerice, stanje maksimalne proizvodnje distribuiranog izvora uz minimalno lokalno opterećenje, stanje maksimalnog opterećenja mreže uz smanjenu ili zanemarivu proizvodnju te nominalni pogonski uvjeti. Za svaki od tih scenarija provodi se proračun tokova snaga, pri čemu se analiziraju naponske prilike, opterećenja transformatora i vodova te smjer i iznos tokova snage unutar mreže.

Ključna prednost determinističkog pristupa leži u njegovoj jasnoći i jednostavnosti primjene. Budući da su svi ulazni podatci točno definirani, rezultati analize izravno ukazuju na to jesu li prekoračeni dopušteni tehnički limiti, poput maksimalno dopuštenih odstupanja napona ili termičkih kapaciteta mrežnih elemenata. Takav pristup posebno je pogodan za preliminarne analize priključenja te za potrebe izdavanja tehničkih uvjeta priključenja, gdje je nužno brzo i jednoznačno utvrditi prihvatljivost zahtjeva.

Deterministička analiza također obuhvaća provjeru kratkospojnih uvjeta u mreži. Priključenjem distribuiranih izvora povećava se razina kratkospojne snage u čvorištima, što se determinističkim proračunima može izravno kvantificirati za najnepovoljniji slučaj. Na temelju tih rezultata provjerava se zadovoljavaju li rasklopni aparati i zaštitni uređaji projektne vrijednosti, čime se osigurava siguran pogon distribucijske mreže.

Međutim, ograničenje determinističke analize proizlazi iz činjenice da ona ne uzima u obzir promjenjivost proizvodnje i potrošnje tijekom vremena. Odabirom nekoliko unaprijed definiranih scenarija pretpostavlja se da oni obuhvaćaju sve relevantne pogonske uvjete, što u praksi ne mora uvijek biti slučaj. Zbog toga deterministički pristup često rezultira konzervativnim procjenama granične vrijednosti priključne snage, budući da se mreža

dimenzionira prema najnepovoljnijem mogućem stanju, bez obzira na njegovu stvarnu učestalost.

Unatoč navedenim ograničenjima, deterministička analiza ostaje nezaobilazan alat u planiranju i analizi priključenja distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu. Njena primjena osigurava jasno definirane tehničke granice rada mreže te predstavlja osnovu na koju se nadograđuju naprednije metode, poput stohastičkih analiza. Kombinacijom determinističkog i stohastičkog pristupa moguće je postići ravnotežu između sigurnosti pogona i optimalnog iskorištenja raspoloživih mrežnih kapaciteta.

4.2 Stohastička analiza

Zbog toga se klasične determinističke metode analize često pokazuju nedostatnima, pa se sve češće primjenjuje stohastička analiza kao prikladniji pristup za procjenu stvarnih mogućnosti priključenja.

Stohastička analiza temelji se na uvažavanju slučajnih varijabli koje utječu na pogon distribucijske mreže, poput fluktuacija proizvodnje distribuiranih izvora, promjena opterećenja potrošača te varijabilnih pogonskih uvjeta mreže. Umjesto razmatranja jednog ili nekoliko unaprijed definiranih scenarija, stohastički pristup obuhvaća veliki broj mogućih stanja mreže, čime se dobiva realističniji uvid u ponašanje sustava tijekom vremena. Takav pristup omogućuje procjenu vjerojatnosti pojave nepovoljnih stanja, kao što su prekoračenje naponskih granica, preopterećenje mrežnih elemenata ili neželjeni tokovi snaga.

U praksi se stohastička analiza najčešće provodi primjenom metoda poput Monte Carlo simulacija. U tom postupku se ulazni podatci, primjerice snaga proizvodnje distribuiranih izvora i razine opterećenja, modeliraju kao slučajne varijable s odgovarajućim statističkim distribucijama. Za svaki generirani skup ulaznih podataka provodi se proračun pogonskog stanja mreže, najčešće proračun tokova snaga, a rezultati se statistički obrađuju. Na temelju velikog broja simulacija moguće je odrediti ne samo granične vrijednosti priključne snage, već i pouzdanost njihova prihvaćanja u stvarnom pogonu.

Primjena stohastičke analize posebno je korisna pri određivanju maksimalne dopuštene snage priključenja distribuiranih izvora u uvjetima neujednačene lokalne potrošnje. U trenucima visoke proizvodnje i niske potrošnje, distribucijska mreža izložena je najvećim naponskim i termičkim opterećenjima, dok se u suprotnim uvjetima ograničenja često ne pojavljuju. Stohastički pristup omogućuje kvantifikaciju učestalosti takvih kritičnih stanja i donošenje odluka temeljenih na prihvatljivoj razini rizika, a ne isključivo na najnepovoljnijem mogućem scenariju.

Dodatna prednost stohastičke analize ogleda se u mogućnosti vrednovanja različitih mjera ublažavanja ograničenja mreže, poput regulacije jalove snage distribuiranih izvora, promjena naponskih stupnjeva transformatora ili upravljanja priključnom snagom. Usporedbom statističkih rezultata za različite varijante pogona moguće je procijeniti učinkovitost pojedinih rješenja u povećanju prihvatljive priključne snage uz zadržavanje sigurnog i stabilnog rada mreže.

Zaključno, stohastička analiza priključenja distribuiranih izvora predstavlja napredan i realističan alat za planiranje razvoja distribucijske mreže. Njezina primjena omogućuje detaljnije razumijevanje utjecaja nesigurnosti na pogon sustava te donošenje tehnički i

ekonomski utemeljenih odluka o priključenju novih izvora, uz uravnoteženje između maksimalnog iskorištenja mreže i očuvanja njezine pouzdanosti.

4.3 DIgSILENT PowerFactory

Korištenjem istog modela mreže, ali uz različite pristupe definiranju ulaznih podataka i pogonskih scenarija, moguće je dobiti cjelovit uvid u tehnička ograničenja mreže i realne mogućnosti integracije novih proizvodnih postrojenja.

Deterministička analiza u DIgSILENT PowerFactoryj-u temelji se na jasno definiranim pogonskim stanjima mreže. Parametri poput snage distribuiranog izvora, razina opterećenja potrošača, položaja regulacijskog sklopnika transformatora te mrežna topologija zadavaju se kao fiksne vrijednosti. U okviru takvog pristupa u PowerFactoryju se najčešće koriste proračuni tokova snaga (Load Flow) za unaprijed određene scenarije, primjerice maksimalnu proizvodnju distribuiranog izvora uz minimalno lokalno opterećenje. Ovi scenariji predstavljaju najnepovoljnije uvjete s aspekta naponskih prilika i opterećenja mrežnih elemenata.

U determinističkoj analizi priključna snaga distribuiranog izvora u PowerFactoryju se postupno povećava, a za svaki korak prate se naponi u čvorištima, opterećenja transformatora TS x/10(20) kV i struje u vodovima. Trenutak u kojem dolazi do prekoračenja dopuštenih tehničkih granica definira graničnu vrijednost priključne snage. Uz proračune tokova snaga, PowerFactory omogućuje i determinističke proračune kratkog spoja, čime se provjerava utjecaj priključenog izvora na kratkospojne razine i sigurnost rasklopne opreme u mreži.

Za razliku od determinističkog pristupa, stohastička analiza u DIgSILENT PowerFactoryj-u uzima u obzir promjenjivu prirodu proizvodnje distribuiranih izvora i opterećenja potrošača. U ovom slučaju ulazni podatci ne definiraju se kao jedinstvene vrijednosti, već se modeliraju skupom različitih stanja mreže koja odražavaju realne fluktuacije tijekom vremena. U PowerFactoryj-u se to postiže primjenom više studijskih slučajeva, varijanti ili automatiziranih simulacija, pri čemu se za svaki slučaj provodi proračun tokova snaga.

Stohastička analiza u PowerFactoryj-u često se oslanja na ponovljene proračune za različite kombinacije proizvodnje i potrošnje, koje mogu biti generirane na temelju statističkih pretpostavki ili vremenskih profila. Rezultati takvih simulacija omogućuju procjenu učestalosti pojave nepovoljnih pogonskih stanja, poput prekoračenja naponskih granica ili preopterećenja mrežnih elemenata. Na taj način granična priključna snaga ne određuje se isključivo prema najnepovoljnijem slučaju, već u odnosu na prihvatljivu razinu rizika za pogon mreže.

Prednost PowerFactoryja u kombiniranju determinističke i stohastičke analize očituje se u mogućnosti usporedbe rezultata unutar istog modela mreže. Deterministički proračuni pružaju jasnu i konzervativnu procjenu tehničkih ograničenja, dok stohastički pristup omogućuje procjenu realnog ponašanja mreže tijekom vremena. Time se PowerFactory pokazuje kao učinkovit alat za donošenje uravnoteženih odluka o priključenju distribuiranih izvora, uz istodobno osiguravanje sigurnog pogona i bolje iskorištenosti postojeće distribucijske infrastrukture.

5 PROBLEMATIKA STVARNOG STANJA

Stvarno stanje u distribucijskoj mreži često se značajno razlikuje od idealiziranih pretpostavki koje se koriste u planerskim i proračunskim analizama. Distribucijske mreže, osobito na srednjenaponskoj i niskonaponskoj razini, u pravilu su projektirane i građene za jednosmjerni

tok energije od viših prema nižim naponskim razinama, uz relativno stabilne obrasce potrošnje. Razvojem distribuiranih izvora energije takvi se uvjeti mijenjaju, što dovodi do niza tehničkih izazova u stvarnom pogonu mreže.

Jedan od glavnih problema odnosi se na naponske prilike u mreži. U uvjetima visoke proizvodnje distribuiranih izvora i istodobno niske lokalne potrošnje dolazi do porasta napona u čvorištima mreže, posebno na krajevima vodova. U stvarnom sustavu regulacija napona često je ograničena, osobito u mrežama bez regulacijskih transformatora ili bez aktivne regulacije jalove snage izvora. Posljedično, pojavljuju se lokalna prekoračenja dopuštenih naponskih granica koja nisu uvijek sustavno zabilježena, ali mogu negativno utjecati na rad potrošača i mrežne opreme.

Uz naponske prilike, značajan problem predstavlja i nedovoljno poznavanje stvarnih struja kratkog spoja u mreži. Priključenjem distribuiranih izvora, osobito onih koji mogu doprinositi kratkospojnoj struji, povećava se ukupna kratkospojna razina u određenim čvorištima. U praksi se često oslanja na projektne ili procijenjene vrijednosti, dok stvarni doprinos izvora i promjene u topologiji mreže nisu uvijek ažurno evidentirani. Takva situacija može dovesti do podcjenjivanja ili precjenjivanja kratkospojnih struja, što ima izravan utjecaj na sigurnost i selektivnost zaštite.

Dodatni ograničavajući čimbenik u analizi stvarnog stanja mreže jest nedostatak mjernih podataka. U mnogim dijelovima distribucijske mreže ne postoji kontinuirano mjerenje napona, struja i tokova snage, već se raspolaže tek povremenim očitanjima ili procjenama temeljenima na obračunskim podacima. Takav nedostatak informacije otežava pouzdanu procjenu stvarnih pogonskih uvjeta, osobito u dinamičkim situacijama s promjenjivom proizvodnjom distribuiranih izvora. Posljedično, analize se često temelje na konzervativnim pretpostavkama, što može rezultirati nepotrebnim ograničavanjem priključne snage novih izvora.

Osim navedenog, stvarno stanje mreže dodatno se komplicira promjenama u topologiji, poput privremenih preklopa, radova na mreži ili pogonskih intervencija koje nisu uvijek odmah reflektirane u mrežnim modelima. Takva odstupanja između modela i stvarnog pogona mogu uzrokovati razlike između proračunskih rezultata i stvarnih mjerenja, čime se smanjuje pouzdanost analize graničnih vrijednosti priključenja.

Zbog svih navedenih razloga, analiza priključenja distribuiranih izvora na temelju stvarnog stanja u mreži predstavlja složen zadatak. Pouzdano određivanje graničnih vrijednosti priključne snage zahtijeva kombinaciju proračunskih metoda, kvalitetnih ulaznih podataka i razumijevanja ograničenja postojećeg mjernog sustava. Upravo ta odstupanja između teorijskog modela i realnog pogona predstavljaju jedan od ključnih izazova u daljnjem razvoju distribucijske mreže i integraciji distribuiranih izvora energije.

6 ZAKLJUČAK

Analiza priključenja distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu pokazuje da je određivanje graničnih vrijednosti priključne snage složen zadatak uvjetovan tehničkim ograničenjima stvarnog pogona mreže. Primjenom determinističkih i stohastičkih analiza u programskom paketu DIgSILENT PowerFactory moguće je pouzdano sagledati naponske, termičke i kratkospojne uvjete u mreži te procijeniti njihov utjecaj na sigurnost i stabilnost pogona. Kombinacija tih pristupa omogućuje donošenje tehnički utemeljenih odluka koje uravnotežuju

pouzdan rad distribucijskog sustava i potrebu za daljnjom integracijom distribuiranih izvora energije.

LITERATURA

[1] Trogodišnji plan investicija u distribucijski sustav za razdoblje 2025. god. – 2027. god.
[2] Mrežna pravila distribucije Operatora distribucijskog sustava Javnog poduzeća "Hrvatske zajednice Herceg – Bosne" dioničko društvo Mostar
[3] Ivšinović "Kvaliteta električne energije", Zagreb, lipanj 2003.