Broj rada: R4-02
DOI:10.46793/CIRED2026.R4-02_141

KVAZI-DINAMIČKA ANALIZA UTJECAJA PRIKLJUČENJA DISTRIBUIRANIH IZVORA NA RAD SREDNJENAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE

QUASI-DYNAMIC ANALYSIS OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCE INTEGRATION IMPACT ON MEDIUM-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

Ivan ŠIMOVIĆ*, JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar; Bosna i Hercegovina
Drago BAGO, JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar; Bosna i Hercegovina
Lucija MEDIĆ, JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar; Bosna i Hercegovina
Mia PREVIŠIĆ, JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar; Bosna i Hercegovina
Marin MAJSTOROVIĆ, JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar; Bosna i Hercegovina

KRATAK SADRŽAJ

Priključenje distribuiranih izvora električne energije na srednjonaponske distribucijske mreže predstavlja jedan od ključnih izazova suvremenog razvoja elektroenergetskih sustava. Povećani udio proizvodnje iz obnovljivih izvora, posebice fotonaponskih elektrana, značajno utječe na pogonske uvjete mreže, koji se razlikuju od onih za koje su postojeće distribucijske mreže izvorno projektirane. Utjecaj priključenja distribuiranih izvora očituje se kroz promjene naponskih prilika, pojavu reverznih tokova snage, povećana opterećenja pojedinih elemenata mreže te veću složenost upravljanja mrežom tijekom različitih pogonskih stanja. Uobičajeni pristupi analizi priključenja distribuiranih izvora često se temelje na statičkim proračunima tokova snaga za ograničen broj karakterističnih scenarija. Takvi proračuni ne omogućuju potpun uvid u vremensku varijabilnost pogonskih uvjeta niti u trajanje i učestalost potencijalnih prekoračenja dopuštenih tehničkih granica. Zbog toga se u ovom radu primjenjuje kvazi-dinamički pristup analizi, koji omogućuje detaljniju procjenu utjecaja priključenja distribuiranog izvora na rad srednjenaponske mreže tijekom duljeg vremenskog razdoblja. Kvazi-dinamička analiza provedena je na modelu srednjenaponske distribucijske mreže, pri čemu je rad mreže promatran kroz godišnji vremenski horizont uz primjenu vremenski promjenjivih profila potrošnje i proizvodnje distribuiranih izvora. Posebna pozornost posvećena je analizi pogonskih stanja u kojima su učinci priključenja distribuiranih izvora najizraženiji, kao što su razdoblja visoke proizvodnje uz nisku potrošnju te razdoblja povećanog opterećenja mreže uz smanjenu proizvodnju iz obnovljivih izvora. Rezultati kvazi-dinamičke simulacije obuhvaćaju analizu naponskih profila u srednjenaponskoj mreži, opterećenja vodova i transformatorskih stanica. Na temelju dobivenih rezultata moguće je procijeniti učestalost i trajanje prekoračenja dopuštenih naponskih i termičkih granica te identificirati mrežne elemente koji predstavljaju ograničavajući faktor za priključenje fotonaponskih elektrana kao distribuiranih izvora. Na temelju provedene analize razmotrene su i mogućnosti ublažavanja negativnih utjecaja priključenja distribuiranih izvora na rad srednjenaponske mreže. Zaključno, rad pokazuje da kvazi-dinamički pristup predstavlja učinkovit alat za sveobuhvatnu procjenu utjecaja priključenja distribuiranih izvora na rad srednjenaponskih distribucijskih mreža te

* Ivan Šimović; ivan.simovic@ephzhb.ba

pruža kvalitetnu podlogu za donošenje tehnički i ekonomski utemeljenih odluka u procesu planiranja i priključenja novih izvora.

Ključne reči: distribucijska mreža, distribuirani izvori, kvazi-dinamička analiza

ABSTRACT

The integration of distributed electricity sources to medium-voltage distribution networks represents one of the key challenges in the modern development of power systems. The increasing share of electricity generation from renewable energy sources, particularly photovoltaic power plants, significantly affects network operating conditions, which differ from those for which existing distribution networks were originally designed. The impact of integrating distributed sources is reflected in changes in voltage conditions, the occurrence of reverse power flows, increased loading of individual network elements, and greater complexity of network operation under different operating states. Conventional approaches to the analysis of distributed source integration are often based on static power flow calculations performed for a limited number of characteristic operating scenarios. Such analyses do not provide comprehensive insight into the temporal variability of operating conditions, nor into the duration and frequency of potential violations of permissible technical limits. Therefore, this paper applies a quasi-dynamic analysis approach, enabling a more detailed assessment of the impact of connecting distributed sources on the operation of a medium-voltage network over an extended time period. The quasi-dynamic analysis was carried out on a model of a medium-voltage distribution network, in which network operation was observed over an annual time horizon using time-varying load demand and generation profiles of distributed energy resources. Particular attention was paid to operating conditions in which the effects of distributed source integration are most pronounced, such as periods of high generation combined with low demand, as well as periods of increased network loading with reduced renewable energy production. The results of the quasi-dynamic simulation include an analysis of voltage profiles in the medium-voltage network, loading of lines and transformer stations. Based on the results obtained, it is possible to estimate the frequency and duration of violations of permissible voltage and thermal limits and to identify network elements that represent limiting factors for the integration of photovoltaic power plants as distributed energy resources. Furthermore, based on the analysis, potential measures for mitigating the negative impacts of distributed source integration on medium-voltage network operation were considered. In conclusion, the paper demonstrates that the quasi-dynamic approach represents an effective tool for comprehensive assessment of the impact of distributed source integration on the operation of medium-voltage distribution networks and provides a solid basis for technical and economically sound decision-making in the planning and connection of new generation sources.

Keywords: Distributed Energy Resources, Distribution Network, Quasi-Dynamic Analisis

1. UVOD

U posljednjih nekoliko godina distribucijske mreže suočavaju se s izraženim porastom priključenja distribuiranih izvora, posebno fotonaponskih elektrana (FNE). Takav razvoj posljedica je energetske tranzicije, dekarbonizacijskih ciljeva i sve veće ekonomske isplativosti FNE. Iako fotonaponski izvori donose značajne koristi u pogledu smanjenja emisija i lokalne proizvodnje električne energije, njihova integracija u postojeće distribucijske mreže otvara niz

tehničkih pitanja koja se odnose na naponske prilike, opterećenje elemenata mreže, tokove snaga i promjene kratkospojnih prilika [1]-[2].

Distribucijske mreže su u najvećoj mjeri projektirane za tradicionalan način pogona, pri kojem se električna energija prenosi od viših prema nižim naponskim razinama, odnosno od izvora prema krajnjim potrošačima. Priključenjem distribuiranih izvora, osobito na srednjenaponskoj razini, dolazi do promjene takve pogonske paradigme te se sve češće javljaju dvosmjerni tokovi snaga, lokalni porasti napona i promjene opterećenja vodova i transformatora. Zbog toga je pri planiranju priključenja novih izvora nužno provesti detaljne analize kojima se može procijeniti stvarni utjecaj na rad mreže u različitim pogonskim stanjima [3].

U stručnoj i znanstvenoj literaturi utjecaj distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu najčešće se analizira primjenom statičkih proračuna tokova snaga i kratkih spojeva, dok se u novije vrijeme sve više naglašava važnost kvazi-dinamičkih analiza. Za razliku od klasičnog statičkog pristupa, kvazi-dinamička analiza omogućuje promatranje rada sustava kroz vremenski promjenjive uvjete opterećenja i proizvodnje, zbog čega daje realniji uvid u ponašanje mreže tijekom promatranog razdoblja. Takav pristup posebno je važan kod FNE, čija proizvodnja izravno ovisi o intenzitetu Sunčeva zračenja i drugim meteorološkim uvjetima [3].

Otvorena pitanja u ovom području odnose se prije svega na izbor metodologije procjene mogućnosti priključenja distribuiranih izvora, razinu detalja modela koji se koriste u analizi te na tumačenje rezultata u kontekstu stvarnih pogonskih ograničenja distribucijske mreže. U praksi se često postavlja pitanje je li za procjenu prihvatljivosti priključenja dovoljan statički pristup ili je, zbog izražene vremenske promjenjivosti proizvodnje i opterećenja, potrebno primijeniti kvazi-dinamičku analizu. Upravo navedena pitanja predstavljaju osnovni motiv za izradu ovog rada.

Predmet rada je kvazi-dinamička analiza priključenja FNE instalirane snage 1 MW na distribucijsku mrežu, pri čemu se razmatraju dvije varijante priključenja na srednjenaponsku mrežu. Cilj rada je procijeniti utjecaj predmetne elektrane na naponske prilike, opterećenje vodova i transformatora te na razine tropolnog kratkog spoja, kako bi se utvrdila tehnička prihvatljivost pojedinih varijanti priključenja i prepoznala eventualna ograničenja u radu mreže. Analiza je provedena u programskom alatu DIgSILENT PowerFactory, na temelju modela stvarne distribucijske mreže i raspoloživih tehničkih podataka o njezinim elementima.

Rad je organiziran na sljedeći način. Nakon uvodnog dijela prikazana je metodologija analize i osnovne karakteristike modelirane mreže. U središnjem dijelu rada opisane su razmatrane varijante priključenja te su prikazani i analizirani rezultati kvazi-dinamičkih simulacija s aspekta naponskih prilika, opterećenja elemenata mreže i kratkospojnih struja. Na kraju rada dan je sažet pregled najvažnijih zaključaka i zapažanja proizašlih iz provedene analize.

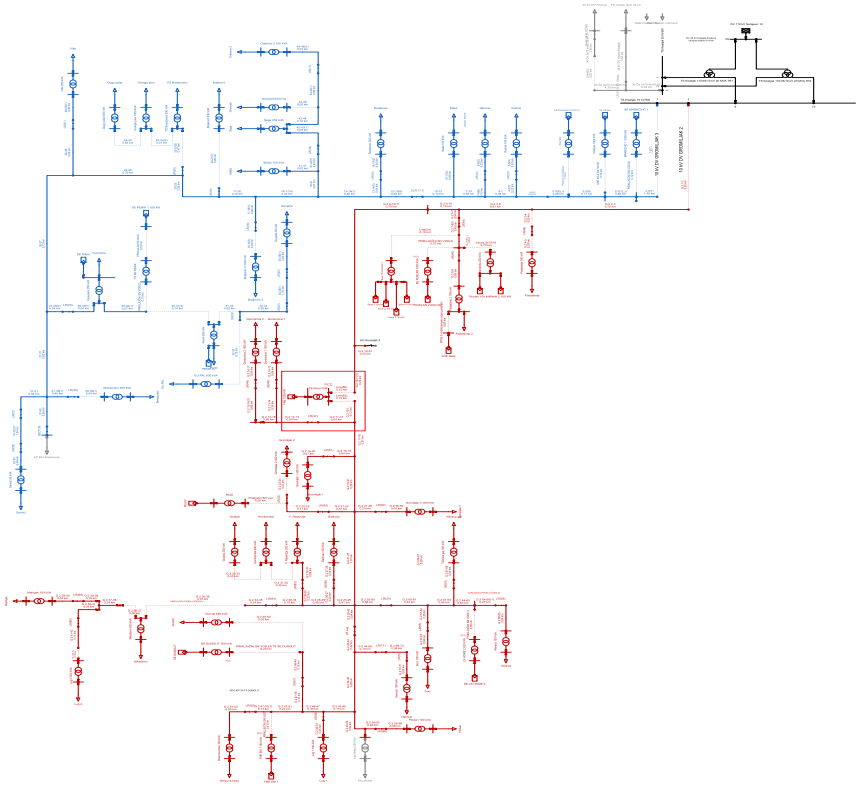
2. MODEL SREDNJENAPONSKE DISTRIBUCIJSKE MREŽE I METODOLOGIJA ANALIZE

Analizirani elektroenergetski model izrađen je u programskom alatu DIgSILENT PowerFactory, koji omogućava detaljno modeliranje distribucijske mreže i provođenje kvazi-dinamičkih simulacija u vremenski promjenjivim pogonskim uvjetima [4]. Predmet analize je dio srednjenaponske distribucijske mreže na području poslovnice Elektro-Kiseljak, pri čemu se planirano mjesto priključenja FNE nalazi na lokalitetu koje je udaljeno približno 2,67 km od pojne transformatorske stanice TS 110/35/10 kV. U radu su razmatrane dvije tipične

konfiguracije elektroenergetske mreže u normalnom pogonskom stanju. Prva varijanta predstavlja radijalno napajani dalekovod bez mogućnosti rezervnog ili alternativnog napajanja u slučaju ispada. Druga varijanta uključuje mogućnost rezervnog napajanja preko drugog dalekovoda, ali isključivo u izvanrednim pogonskim režimima. Analize su provedene za standardne uvjete pogona mreže.

Proračun je proveden kao jednogodišnja kvazi-dinamička simulacija za 2024. godinu, s ciljem obuhvata karakterističnih pogonskih stanja mreže tijekom cijelog promatranog razdoblja. U okviru analize promatrane su prosječne, minimalne i maksimalne vrijednosti napona na sabirnicama, maksimalna i prosječna opterećenja vodova i transformatora te razine tropolnih kratkih spojeva u relevantnim točkama mreže. Posebna vrijednost provedenog proračuna ogleda se u činjenici da su za modeliranje opterećenja korišteni stvarni podaci o potrošnji svake pojedine transformatorske stanice (TS), preuzeti iz vlastitog AMR/AMM sustava za daljinsko očitanje mjernih podataka. Tako su osigurani vremenski promjenjivi profili opterećenja u modelu koji vjerno odražavaju stvarno pogonsko stanje promatrane distribucijske mreže.

Za FNE koje su već u pogonu korišteni su stvarni podaci o proizvodnji električne energije, čime je dodatno povećana vjerodostojnost ulaznih podataka i same analize. S druge strane, za elektrane koje još nisu u pogonu, ali su ishodile prethodnu elektroenergetsku suglasnost ili se nalaze u fazi izgradnje, proizvodni profili određeni su primjenom funkcije *Solar Calculation* u programskom alatu DIgSILENT PowerFactory. Navedena funkcija, na temelju ugrađene baze meteoroloških i tehničkih podataka, omogućuje procjenu očekivane proizvodnje FNE te time osigurava realističan prikaz mogućeg utjecaja na distribucijsku mrežu. Takav pristup omogućuje znatno realniju procjenu utjecaja priključenja distribuiranih izvora u odnosu na klasične statičke proračune, budući da u obzir uzima promjene opterećenja i proizvodnje tijekom vremena [4].



Slika 1- Jednopolna shema dijela analizirane distribucijske mreže

2.1 Tehničke karakteristike promatranih dalekovoda

Za potrebe modeliranja korišteni su stvarni tehnički podaci o konfiguraciji mreže, vodovima i instaliranim snagama distribucijskih TS na dva razmatrana srednjenaponska izvoda, dalekovodi (DV) „Gromiljak 2“ i DV „Gromiljak 3“. Izvod DV „Gromiljak 2“ obuhvaća 22 priključene TS ukupne instalirane snage 5,47 MVA, pri čemu dužina magistralnog voda iznosi 12,05 km, a ukupna dužina odcjepa 9,42 km. Izvod DV „Gromiljak 3“ obuhvaća 19 priključenih TS ukupne instalirane snage 7,18 MVA, uz dužinu magistrale od 10,17 km i ukupnu dužinu odcjepa od 7,59 km. Navedeni podaci ukazuju na to da je riječ o razgranatoj distribucijskoj mreži kod koje mjesto i način priključenja FNE mogu imati značajan utjecaj na lokalne naponske prilike i opterećenost pojedinih elemenata [5].

FNE instalirane snage 1000 kW modelirana je preko novoformirane TS „Nova FNE“, minimalne preporučene snage 1000 kVA. U obje analizirane varijante priključenja predviđena je veza po principu ulaz-izlaz na postojeću srednjenaponsku mrežu putem 10(20) kV kabela tipa XHE 49-A 3x(1x150 mm²), približne dužine 150 m. Kao priključna, odnosno primopredajna točka (*Point of Common Coupling - PCC*) usvojena je srednjenaponska strana novoplanirane TS „Nova FNE“, budući da upravo ta točka predstavlja referentno mjesto za ocjenu usklađenosti pogonskih parametara s mrežnim kriterijima.

U okviru analize posebna pažnja posvećena je procjeni kratkotrajnih promjena napona, pri čemu je utjecaj priključenja FNE procjenjivan usporedbom stanja mreže prije i nakon priključenja. Za tu svrhu izdvojeni su najkritičniji satni trenuci tijekom godine, odnosno ona pogonska stanja u kojima se mogu očekivati najizraženije promjene naponskih prilika i opterećenja elemenata mreže. Tako je omogućena identifikacija graničnih stanja značajnih za ocjenu tehničke prihvatljivosti priključenja. Model je razvijen u programskom alatu DIgSILENT PowerFactory. Analizirana mreža pripada području poslovnice Elektro-Kiseljak, a mjesto planiranog priključenja FNE nalazi se na lokaciji Polje Višnjica, na približno 2,67 km od pojne TS 110/35/10 kV Kiseljak. Proračun je izveden kao jednogodišnja kvazi-dinamička simulacija za 2024. godinu, pri čemu su promatrani prosječni, maksimalni i minimalni naponi na sabirnicama, maksimalna i prosječna opterećenja vodova i transformatora te nivoi tropolnih kratkih spojeva.

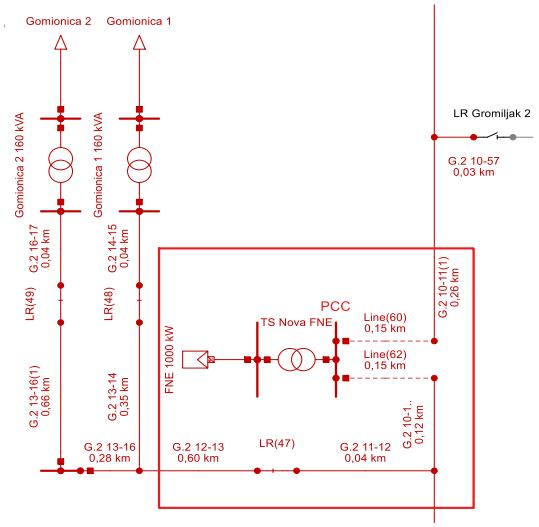
Tabela I - Osnovne karakteristike analiziranih izvoda

Karakteristika	**DV „Gromiljak 2“**	**DV „Gromiljak 3“**
Broj priključenih TS	22	19
Instalirana snaga TS [MVA]	5,47	7,18
Dužina magistrale [km]	12,05	10,17
Dužina odcjepa [km]	9,42	7,59
Planirana snaga FNE [kW]	1000	1000
Dužina priključnog kabla [m]	≈150	≈150

2.2 Rješenje priključenja FNE i potrebna dogradnja elektroenergetske mreže

DV „Gromiljak 2“ i „Gromiljak 3“ nalaze se na istim čelično-rešetkastim stupovima tako da će biti promatrane dvije varijante optimalnog tehničkog priključenja distribuiranog izvora električne energije. Prilikom analize mogućeg priključenja uzete su u obzir geografska lokacija,

rasprostranjenost srednjenaponske mreže u bližoj i široj okolici priključenja uz poštivanje mrežnih pravila operatora distribucijskog sustava. U prvoj varijanti FNE se priključuje na izvod DV „Gromiljak 2“, na približno 2520 m od pojne TS, odnosno približno 120 m prije odcjepa za TS „Gomionica 1“. Na tom mjestu formira se odcjep po principu ulaz-izlaz prema TS „Nova FNE“, duljine cca 150 m s kabelima tipa XHE 49-A 3x(1x150 mm^2). U drugoj varijanti priključenje se ostvaruje na DV „Gromiljak 3“, također na približno 2520 m od pojne TS, uz istu preporučenu snagu nove TS i istu dužinu priključnog kabela. Kao primopredajnu točku u obje varijante promatrat će se visokonaponska strana novoplanirane TS.



Slika 2 - Varijanta priključenja FNE na distribucijsku mrežu

Na Slici 2 prikazana je varijanta priključenja predmetne FNE na DV „Gromiljak 2“. Način priključenja je isti u obje varijante samo na različitim DV. Obje varijante su tehnički izvedive, ali njihov utjecaj na mrežu nije identičan. Razlika proizlazi iz različitog rasporeda potrošnje i impedancije dužinom izvoda, kao i različitim snagama TS pa se očekuju razlike u porastu napona, rasterećenju vodova, opterećenju pojedinih transformatora i porastu kratkospojnih struja.

3. REZULTATI KVAZI-DINAMIČKIH SIMULACIJA

3.1 Varijanta 1 – rezultati simulacija

Na izvodu DV „Gromiljak 2“ nakon priključenja FNE registriran je porast napona na svim promatranim 10 kV i 0,4 kV sabirnicama, pri čemu vrijednosti ostaju unutar dozvoljenih granica. Porast je najizraženiji u blizini PCC točke i na sabirnicama koje su bliže mjestu priključenja.

Tabela II - Usporedba naponskih prilika na sabirnicama prije i nakon priključenja FNE - varijanta 1

Sabirnica	Prije priključenja FNE			Nakon priključenja FNE		
	Ul, prosjek [kV]	Ul, max [kV]	Ul, min [kV]	Ul, prosjek [kV]	Ul, max [kV]	Ul, min [kV]
Brezova Kosa	10,105	10,306	9,780	10,166	10,440	9,830
Gomionica 1	10,175	10,312	9,984	10,227	10,428	10,031
Hacienda	10,236	10,317	10,096	10,275	10,405	10,129

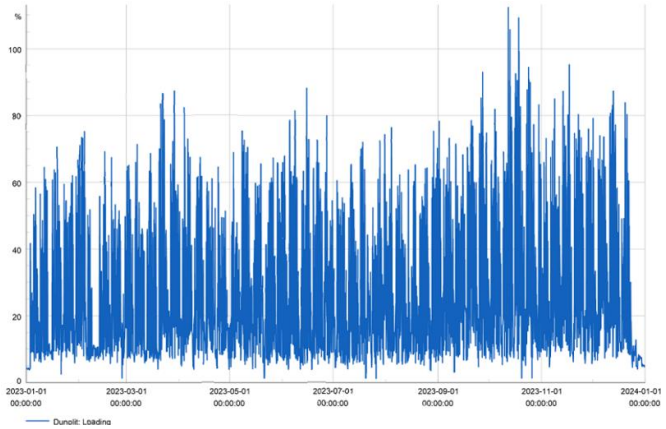
Sabirnica	Prije priključenja FNE			Nakon priključenja FNE		
	Ul, prosjek [kV]	Ul, max [kV]	Ul, min [kV]	Ul, prosjek [kV]	Ul, max [kV]	Ul, min [kV]
Nova FNE	10,195	10,313	10,016	10,246	10,430	10,060
Višnjica	10,114	10,306	9,857	10,184	10,463	9,913

U točki priključenja maksimalna kratkotrajna promjena napona na 10 kV nivou iznosila je 1,906 %, dok je na 0,4 kV nivou najveća evidentirana promjena iznosila 2,97 %. To potvrđuje da su promjene napona na srednjenaponskoj strani unutar tipično zahtijevane granice od 2 %, dok su promjene na niskonaponskoj strani i dalje unutar dozvoljenog raspona rada mreže (3 % dozvoljeno).

Tabela III - Usporedba opterećenja elemenata prije i nakon priključenja FNE – varijanta 1

Element	Tip	Prije priključenja FNE			Nakon priključenja FNE	
		Min opterećenje [%]	Max opterećenje [%]	Prosječno opterećenje [%]	Max opterećenje [%]	Prosječno opterećenje [%]
GROMILJAK 2/2-3	Vod	2,337	38,045	20,224	37,733	15,790
GROMILJAK 2/3-6	Vod	2,271	37,614	19,829	37,895	15,663
GROMILJAK 2/1-2	Vod	1,769	34,356	17,192	28,060	11,742
Odcjep za Nova FNE	Vod	0,204	0,210	0,208	13,937	3,711
Dunolit	TS	1,266	110,893	23,778	110,341	23,595
Hacienda	TS	1,845	1,885	1,870	61,042	16,777
TS za Nova FNE	TS	1,119	1,151	1,139	76,426	20,377

Rezultati iz Tabele III pokazuju da se većina dionica koje se nalaze bliže pojnoj TS nakon priključenja rasterećuje, posebno početne dionice 1-2, 2-3 i 3-6. Istovremeno se na odcjepu za novu elektranu pojavljuje očekivano povećanje opterećenja. Kod transformatora je vidljivo da su prosječna opterećenja uglavnom neznatno smanjena, dok se kod pojedinih TS javlja porast maksimalnog opterećenja uslijed obrnutog toka snage. TS „Dunolit“ ostaje preopterećena i prije i poslije priključenja, ali se iz godišnjeg profila vidi da preopterećenje traje samo ograničen broj sati.



Slika 3 - Opterećenje TS Dunolit

Tabela IV - Usporedni prikaz struja i snaga tropolnog kratkog spoja

Sabirnica	Ik″ prije [kA]	Ik″ poslije [kA]	Sk″ prije [MVA]	Sk″ poslije [MVA]
Brezova Kosa	1,344	1,444	23,281	25,004
Gomionica 1	1,885	2,014	32,649	34,884
Gromiljak 2	2,061	2,206	35,697	38,207
Sabirnica za Nova FNE	2,924	3,123	50,642	54,092
Podastinje	4,619	4,863	79,995	84,230

Kao što se očekuje, priključenje FNE dovodi do porasta struje tropolnog kratkog spoja na svim promatranim sabirnicama. Međutim, na razini 10 kV sve izračunate vrijednosti ostaju znatno ispod 16 kA, a na razini 0,4 kV ispod 25 kA pa iz ovog aspekta ne postoji tehnička prepreka za priključenje [6].

3.2 Varijanta 2 – rezultati simulacija

Kod priključenja na izvod DV „Gromiljak 3“ također se uočava porast napona i pad opterećenja većine vodova. U odnosu na prethodnu varijantu, porast napona u PCC točki je nešto manji, što ovu varijantu čini povoljnijom s aspekta naponskih prilika.

Tabela V - Usporedba ključnih tehničkih pokazatelja za priključenje FNE na distribucijsku mrežu

Sabirnica	Prije priključenja FNE			Nakon priključenja FNE		
	Ul, prosjek [kV]	Ul, max [kV]	Ul, min [kV]	Ul, prosjek [kV]	Ul, max [kV]	Ul, min [kV]
Brajković	9,749	10,290	9,083	9,789	10,387	9,189
Jehovac	9,894	10,298	9,394	9,930	10,385	9,489
Rudnik	9,921	10,299	9,451	9,957	10,385	9,544
Nova FNE	10,147	10,313	9,917	10,178	10,390	9,977
Demići	9,662	10,288	9,056	9,704	10,389	9,099

Najveća kratkotrajna promjena napona u PCC točki na razini 10 kV u ovoj varijanti iznosila je 1,249 %, a na razini 0,4 kV 2,267 %. Time je potvrđeno da je varijanta priključenja na DV „Gromiljak 3“ povoljnija od varijante na DV „Gromiljak 2“ kada se promatra isključivo promjena napona u točki priključenja.

Tabela VI - Usporedba opterećenja elemenata prije i nakon priključenja FNE – varijanta 2

Element	Tip	Prije priključenja FNE		Nakon priključenja FNE	
		Max opterećenje [%]	Prosječno opterećenje [%]	Max opterećenje [%]	Prosječno opterećenje [%]
Gromiljak 3/3-4	Vod	82,634	42,737	78,671	41,666
Gromiljak 3/1-2	Vod	43,971	22,756	37,581	18,623
Odcjep za Nova FNE	Vod	0,210	0,207	14,570	3,876
EU PAL	TS	136,621	32,638	136,590	32,432
Penik 1	TS	2,292	2,160	86,823	22,925
TS za Nova FNE	TS	1,151	1,133	79,888	21,279

Na izvodu DV „Gromiljak 3“ većina vodova bilježi smanjenje maksimalnog i prosječnog opterećenja. Istovremeno, transformator „EU PAL“ ostaje iznad preporučene razine opterećenja bez obzira na priključenje FNE, što ukazuje da je riječ o postojećem ograničenju mreže koje nije direktna posljedica priključenja nove elektrane. Kod TS „Penik 1“ (priključena FNE snage 100 kW) i TS „Nova FNE“ vidljiv je porast maksimalnog opterećenja, što se može objasniti pojavom lokalnih obrnutih tokova snage u trenucima intenzivne proizvodnje.

Tabela VII - Usporedni prikaz struja i snaga tropolnog kratkog spoja

Sabirnica	Ik″ prije [kA]	Ik″ poslije [kA]	Sk″ prije [MVA]	Sk″ poslije [MVA]
Brajković	1,115	1,207	19,304	20,914
Brestovsko	0,872	0,949	15,107	16,430
Jehovac	1,426	1,533	24,691	26,546
Rudnik	1,479	1,588	25,615	27,503
TS za Nova FNE	2,922	3,104	50,610	53,771

I kod ove varijante priključenja sve izračunate razine tropolnog kratkog spoja ostaju unutar dozvoljenih granica. Na razini 10 kV najveća vrijednost zabilježena je na sabirnici TS „Nova FNE“, a na razini 0,4 kV najveći porast također je zabilježen na niskonaponskoj strani iste TS.

3.3 Usporedba rezultata varijanti priključenja

Usporedna analiza pokazuje da su obje varijante priključenja tehnički prihvatljive, ali se međusobno razlikuju u pogledu dominantnog efekta na mrežu. Priključenje na DV „Gromiljak 2“ daje izraženije rasterećenje početnih dionica voda, što može biti povoljno s gledišta smanjenja tokova snage iz nadređene mreže. S druge strane, priključenje na DV „Gromiljak 3“ daje nešto blaži porast napona u PCC točki i povoljniji rezultat za kratkotrajnu promjenu napona.

Tablica VIII - Usporedba ključnih tehničkih pokazatelja za priključenje FNE na distribucijsku mrežu

Pokazatelj	DV „Gromiljak 2“	DV „Gromiljak 3“
Ul, prosjek na 10 kV PCC prije [kV]	10,195	10,147
Ul, prosjek na 10 kV PCC poslije [kV]	10,246	10,178
Maks. promjena napona na 10 kV PCC [%]	1,906	1,249
Maks. promjena napona na 0,4 kV PCC [%]	2,970	2,267
Ik″ na 10 kV PCC prije [kA]	2,924	2,922
Ik″ na 10 kV PCC poslije [kA]	3,123	3,104

Iz tabele VIII proizlazi da odluka o povoljnijoj varijanti priključenja zavisi od kriterija koji operator želi prioritetno zaštititi. Ako je naglasak na smanjenju opterećenja početnih dionica voda, prednost se može dati izvodu DV „Gromiljak 2“. Ako je prioritet ograničenje promjene napona u PCC točki, tehnički nešto povoljnije rješenje predstavlja priključenje na DV „Gromiljak 3“. U oba slučaja kvazi-dinamički proračun daje informaciju koja se ne može dovoljno pouzdano sagledati iz jedne statičke radne točke.

Važno je naglasiti i da dio uočenih ograničenja nije posljedica priključenja nove elektrane, već odražava postojeće stanje mreže. Primjeri za to su već ranije visoko opterećeni pojedini

transformatori, kao što su „Dunolit“ u varijanti DV „Gromiljak 2“ i „EU PAL“ u varijanti DV „Gromiljak 3“. To je bitna informacija za tumačenje rezultata, jer kvazi-dinamički proračun omogućava razdvajanje efekata koje uzrokuje nova FNE od ograničenja koja su u mreži postojala i prije njenog priključenja.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu odabranih rezultata iz detaljnog kvazi-dinamičkog proračuna može se zaključiti da priključenje FNE snage 1 MW na razmatranu 10 kV distribucijsku mrežu ne dovodi do prekoračenja dozvoljenih naponskih i kratkospojnih granica ni u jednoj razmatranoj varijanti. U obje varijante dolazi do blagog porasta napona na srednjenaponskim i niskonaponskim sabirnicama, smanjenja opterećenja većine početnih dionica DV i povećanja kratkospojnih struja, ali u tehnički prihvatljivim granicama.

Kvazi-dinamički pristup se pokazao naročito korisnim za identifikaciju satnih perioda s najvećim promjenama napona i za prepoznavanje elemenata kod kojih se može pojaviti kratkotrajno preopterećenje ili obrnuti tok snage. Takva razina detalja predstavlja važnu osnovu za donošenje odluke o izboru varijante priključenja i eventualnih dodatnih mjera u mreži.

Za predmetni slučaj obje varijante se mogu smatrati prihvatljivim, pri čemu DV „Gromiljak 2“ pokazuje izraženije rasterećenje vodova, a DV „Gromiljak 3“ nešto povoljnije naponske prilike u PCC točki. U idućim fazama projektiranja preporučljivo je rezultate kvazi-dinamičke analize koristiti sa standardnim provjerama zaštite, izborom opreme i ekonomskom procjenom potrebnih mrežnih intervencija.

U budućim istraživanjima planirana je analiza vanrednog uklopnog stanja u drugoj varijanti , uz sagledavanje utjecaja priključenja FNE pri izmijenjenoj topologiji distribucijske mreže s posebnim osvrtom na tokove snaga, naponske prilike i struje kratkog spoja.

LITERATURA

[1] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, “Distributed generation: a definition,” *Electric Power Systems Research*, 2001.
[2] M. H. J. Bollen, F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, 2011.
[3] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, *Embedded Generation*, Institution of Engineering and Technology, London, 2000.
[4] DIgSILENT GmbH, PowerFactory – *User Manual / Quasi-Dynamic Simulation Documentation*, Gomaringen, Germany, 2025
[5] JP „Elektroprivreda HZ HB“ d.d. Mostar, Interna tehnička dokumentacija distribucijske mreže poslovnice Elektro-Kiseljak
[6] Mrežna pravila distribucije JP „Elektroprivreda HZHB“ d.d. Mostar (Sl. novine F BiH broj 59/17 i 95/22),