

izv.prof.dr.sc. Damir Jakus
FESB
damir.jakus@fesb.hr

dr.sc. Rade Čadenović
FESB
Rade.Cadjenovic.00@fesb.hr

doc.dr.sc. Josip Vasilj
FESB
jvasilj@fesb.hr

prof.dr.sc. Petar Sarajčev
FESB
psarajce@fesb.hr

MAKSIMIZACIJA PRIHVATA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKE MREŽE

SAŽETAK

Veliki broj potencijalnih elektrana planiranih za priključak na distribucijsku mrežu zahtjeva značajna pojačanja i nadogradnju distribucijske mreže u svrhu povećanja prihvatne sposobnosti mreže (eng. *network hosting capacity*). U situacijama kada investicije u razvoj distribucijske mreže ne prate trendove integracije distribuiranih izvora energije, dolazi do stagnacije razvoja sektora OIE te svaki daljnji priključak u pravilu zahtjeva značajne zahvate u mreži koji ponekad mogu predstavljati značajno financijsko opterećenje za investitore. Takve okolnosti trenutno su prisutne na razini prijenosne mreže HOPS-a gdje između ostalog postoje ograničenja vezana uz mogućnost priključka OIE (prvenstveno VE) zbog zagušenja u prijenosnoj mreži u određenim specifičnim pogonskim stanjima te izvanrednim pogonskim stanjima koja podrazumijevaju neraspodjivost određenih elemenata mreže. Eksplicitno zadovoljenje N-1 kriterija kao uvjeta priključka na mrežu tada dovodi do okolnosti i skupih rješenja koja zahtijevaju evakuaciju energije u mreže 220 i 400 kV čak i za manje nazivne snage elektrana.

Slični trendovi u srednjoročnom razdoblju mogu se očekivati i na razini distribucijskih mreža gdje se očekuje značajnija integracija FNE (na razini mreža SN i NN) i manjih VE, a u nešto daljem periodu i električnih vozila. Analize priključka na mrežu uobičajeno ne uvažavaju fleksibilnost distribucijske mreže koja se očituje kroz topološku fleksibilnost mreže, mogućnost kontrole napona na razini pojne trafostanice, regulaciju jalove snage pomoću KB ili drugih uređaja za regulaciju jalove snage, upravljanje potrošnjom i pohranom električne energije,.... Također u takvim analizama ne razmatra se ni mogućnost ograničenja plasmana radne energije iz proizvodnih jedinica koje se priključuju na mrežu u kritičnim pogonskim stanjima. Implementacija i aktivno korištenje svih navedenih faktora nužna je za brzu i efikasnu tranziciju distribucijskih mreža prema konceptu pametnih mreža. Uvažavanjem svih spomenutih faktora koji se u na raspolaganju ODS-u bitno se povećavaju prihvatne sposobnosti mreže te ubrzava dinamika izgradnje i priključenja elektrana. U ovom radu dati će matematički model za maksimizaciju priključnih sposobnosti mreže te utvrđivanja optimalnog rješenja priključka na mrežu uvažavanjem prethodno navedenih faktora koji definiraju fleksibilnost pogona distribucijske mreže. U tu svrhu predstaviti će se model baziran na cjelobrojnom matematičkom programiranju uz aproksimaciju stošcem drugog reda. Na konkretnom primjeru mreže ispitati će se granične mogućnosti prihvata OIE u postojeću distribucijsku mrežu razmatrajući pri tom implementaciju različitih izvora fleksibilnog upravljanja distribucijskom mrežom kao i različite varijante priključka na mrežu.

Ključne riječi: distribucijska mreža, optimalni priključak OIE, rekonfiguracija mreže, regulacijski transformator, matematičko programiranje

MAXIMIZATION OF DISTRIBUTION NETWORK HOSTING CAPACITY

SUMMARY

A large number of potential power plants scheduled for a connection to the distribution network requires significant reinforcements and upgrades to increase the network hosting capacity. In networks where investments in the grid extension do not follow the trends of RES integration, the development of the RES sector stagnates and any further connection usually requires significant interventions in the network which can sometimes represent a significant financial burden for the investors. Such circumstances are currently present in the Croatian transmission network where, among other things, there are limitations related to the possibility of connecting RES (primarily WPP) due to congestion in the transmission network in certain specific operating conditions and potential network faults involving the unavailability of certain network elements. Explicit satisfaction of the N-1 criteria as a condition for grid connection leads to the expensive solutions that require the evacuation of energy into the 220kV and 400 kV networks even for smaller RES power plants.

Similar trends in the medium term can be expected at the level of distribution networks, where more significant integration of PV (at the level of MV and LV networks) and smaller WPPs is expected, and electric vehicles in the somewhat longer period. Grid connection analysis usually does not take into account the flexibility of the distribution network, which is reflected in the topological flexibility of the network, the possibility of voltage control at the primary substation level, reactive power regulation using capacitors or other reactive power control devices, RES power management, storage flexibility,... Also, such analysis does not consider the possibility of RES active power curtailment in critical operating conditions in the amounts which can in certain cases be insignificant in terms of the project profitability. The implementation and active use of all these factors are necessary for the rapid and efficient transition of distribution networks towards the smart grid concept. By taking into account all the mentioned factors available to the DSO, grid hosting capacity can be significantly increased and the dynamics of construction and connection of RES power plants accelerated. In this paper, a mathematical model for maximization of distribution grid hosting capacity is presented taking into account some of the aforementioned flexibility factors available at the distribution network level. For this purpose, a model based on mixed-integer mathematical programming with a second-order cone approximation is presented and tested on a distribution network example.

Keywords: distribution network, optimal RES allocation, network reconfiguration, on-load tap changer control, mathematical programming

1. UVOD

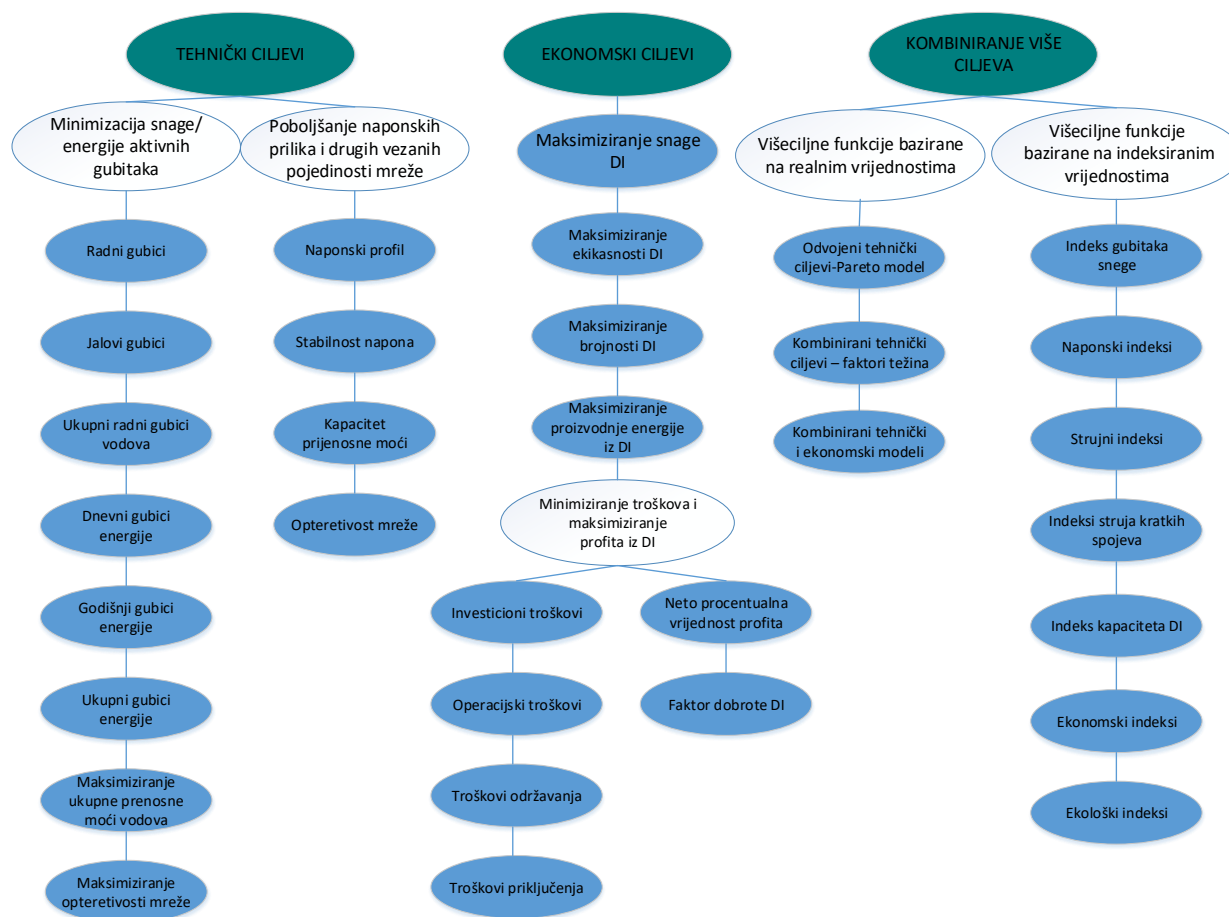
U prošlosti DM su isključivo građene i upravljane uz pretpostavku da su čisto pasivne mreže, međutim danas, većina alternativnih izvora energije zbog svoje veličine priključuje se upravo na DM (OIE sa snagom od nekoliko stotina kW do nekoliko MW). Priključenjem OIE na DM dolazi do decentralizacije proizvodnje i DM mreža postaje aktivna. Aktivna mreža ima bitno drugačija fizikalna/pogonska svojstva koja karakterizira dvosmjerni tok snage kroz mrežu i transformatore, utječući pritom na sve bitne parametre sigurnosti, zaštite i kvalitete električne energije. Značajnija integracija OIE u DM može rezultirati pogonskim problemima koji se mogu rješavati na klasičan ili inovativni način [1].

Klasičan način rješavanja ovih problema uključuje značajne investicije u nadogradnju ili rekonstrukciju postojeće mreže. Alternativa klasičnom pristup očituje se kroz aktivnu implementaciju naprednih sustava upravljanja mrežom. Klasični pristup rješavanja koji podrazumijeva nadogradnju ili rekonstrukciju mreže ima određene nedostatke vezane uz troškove koji potencijalno mogu biti izbjegnuti ali i uz vremensko trajanje takvih zahvata koji mogu usporiti dinamiku realizacije OIE.

U kontekstu toga, implementacijom naprednih metoda za optimiranje postojeće strukture DM moguće je bitno povećati prihvatne mogućnosti mreže bez značajnih dodatnih novčanih ulaganja [2].

Koordiniranim mijenjanjem položaja sklopne opreme unutar DM moguće je odrediti i pogonski implementirati radikalnu topologiju DM koja će osigurati sigurno i kvalitetno napajanje potrošača odnosno priključak distribuiranih izvora u mreži, što je jedan od bitnijih aspekata upravljanja DM.

Kada govorimo o problemu integracije (određivanja mjesta priključka i priključne snage) OIE u DM, najčešći funkcije cilja koje se razmatraju prikazani su na slici 1. [3].



Slika 1. Funkcije cilja pri određivanju optimalnog mjesta priključka i priključne snage DI [3]

Postoji mnoštvo metoda koje se koriste za alokaciju i dimenzioniranje distribuiranih izvora. U nastavku je opisan matematički model za određivanje optimalnog mjesta priključka i priključne snage DI baziran na matematičkom programiranju pri čemu je model formuliran kao mješoviti linearni problem uz aproksimaciju stošcem drugog reda.

2. MATEMATIČKI MODEL

Visok udio DI u DM uglavnom se povezuje s negativnim utjecajima na pokazatelje kvalitete električne energije, povećanjem struja kratkog spoja, povećanjem opterećenja vodova, povećanjem gubitaka, potrebom za redefiniranjem sustava zaštite DM-a itd. Stoga, priključak DI ponekad može zahtijevati veće fizičke promjene u mreži i rezultirati značajnim troškovima koji su izravno povezani s izgradnjom i nadogradnjom postojeće mreže. Sve to može dovesti do kašnjenja ulaganja i izgradnje DI na razini DM. Kako bi se izbjegao ovaj scenarij na način da se ublaže „simptomi“ integracije OIE u DM, pribjegava se implementaciji naprednih tehnika optimizacije postojeće DM kako bi se maksimizirala mogućnost prihvata DI.

U ovom potpoglavlju definiran je matematički model za maksimizaciju prihvata DI u postojeću DM. Glavni problemi koji limitiraju mogućnost prihvata DI poput zagušenja u mreži i previsokih napona koji se mogu pojaviti u određenim pogonskim stanjima nastoje se relaksirati optimalnim upravljanjem faktora snage DI, regulacijom napona pomoću regulacijskog transformatora ugrađenog u pojnoj točki mreže kao i rekonfiguracijom DM odnosno implementacijom optimalne radijalne strukture koja donekle ublažava problem zagušenja u mreži u nepovoljnim pogonskim stanjima.

Funkcija cilja maksimizira injekciju snage iz DI a u isto vrijeme minimizira ukupne aktivne gubitke u mreži. Ovakva formulacija funkcije cilja koja uključuje i gubitke snage nužna je zbog načina definiranja prilika u mreži kod kojih su određene kruta ograničenja relaksirana.

Matematički model omogućava definiranje više priključnih opcija za svaki DI ali podrazumijeva mogućnost realizacije najviše jedne od razmatranih opcija. S obzirom na to, moguće je definirati više sabirnica na koje je moguće priključiti jedan ili više DI, određujući njihovu maksimalnu moguću snagu priključka, uvažavajući pri tom pogonska ograničenja za razmatrane scenarije pogona.

Funkcija cilja koja definira model je dana jednadžbom (1):

$$\text{Minimiziraj } \sum_{i \in B^F, s \in S} P_{i,s} - \sum_{i \in DI, j \in DI_i^{lok}, s \in S} P_{ij,s}^{DIinst} + \sum_{(ij) \in W, s \in S} r_{ij} L_{ij,s} \quad (1)$$

Pritom vodeći računa o sljedećim ograničenjima:

Bilanca radne i jalove snage po čvorištima:

$$\begin{aligned} \sum_{i:(j,i) \in W} p_{ij,s} &= \sum_{(ij) \in W, s \in S} r_{ij} \frac{p_{ij,s}^2 + q_{ij,s}^2}{v_{i,s}^2} + P_{j,s}^{opt} - P_{j,s}^{gen} - P_{j,s}^{DIinst} + \sum_{k:(jk) \in W, s \in S} p_{jk}, \quad j \in B \setminus B^F \\ P_{j,s}^{gen} &= \sum_{k:(jk) \in W} p_{jk,s} + P_{j,s}^{opt} - P_{j,s}^{DIinst}, \quad j \in B^F \\ \sum_{i:(j,i) \in W} q_{ij,s} &= \sum_{(ij) \in W, s \in S} x_{ij} \frac{p_{ij,s}^2 + q_{ij,s}^2}{v_{i,s}^2} + Q_{j,s}^{opt} - Q_{j,s}^{gen} - Q_{j,s}^{DIinst} + \sum_{k:(jk) \in W, s \in S} q_{jk}, \quad j \in B \setminus B^F \\ Q_{j,s}^{gen} &= \sum_{k:(jk) \in W} q_{jk,s} + Q_{j,s}^{opt} - Q_{j,s}^{DIinst}, \quad j \in B^F \end{aligned} \quad (2)$$

Padovi napona po granama i naponska ograničenja:

$$\begin{aligned} v_{j,s}^2 - v_{i,s}^2 &\leq r_{ij}(p_{ji,s} - p_{ij,s}) + x_{ij}(q_{ji,s} - q_{ij,s}) + M(1 - y_{ij}), \quad i, j \in W \\ v_{j,s}^2 - v_{i,s}^2 &\geq r_{ij}(p_{ji,s} - p_{ij,s}) + x_{ij}(q_{ji,s} - q_{ij,s}) - M(1 - y_{ij}), \quad i, j \in W \\ v_{i,min}^2 &\leq v_{i,s}^2 \leq v_{i,max}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Uvjeti radijalnosti mreže koji su dani jednadžbama:

$$\begin{aligned} z_{ij} &\geq 0 \quad z_{ji} \geq 0 && (i, j) \in W \setminus W^S \\ z_{if} &= 0 && f \in B^F \\ z_{ij} + z_{ji} &= 1 && (i, j) \in W \setminus W^S \\ z_{ij} + z_{ji} &= y_{ij} && (i, j) \in W^S \\ \sum_{j:(i,j) \in W} z_{ji} + \sum_{j:(j,i) \in W} z_{ij} &= 1 && i \in B \setminus B^F \\ y_{ij} &\in \{0,1\} && (i, j) \in W^S \end{aligned} \quad (4)$$

Ograničenje broja mjesta priključaka DI i raspona faktora snage DI:

$$\sum_{j \in DI_i^{lok}} y_{i,j}^{DI} \leq 1, \quad \forall i \in DI \quad (5)$$

$$\sum_{j \in DI_i^{loc}} P_{i,j}^{DIinst} \leq P_i^{DImaks}, \quad \forall i \in DI$$

$$0 \leq P_{i,j}^{DIinst} \leq y_{i,j}^{DI} P_i^{DImaks}, \quad \forall (i \in DI, \quad j \in DI_i^{lok}) \quad (6)$$

$$Q_{i,j,s}^{DIinst} = tg(\varphi)_{i,j,s}^{DIinst} P_{i,j,s}^{DIinst}, \quad \forall (i \in DI, \quad j \in DI_i^{lok}) \quad (7)$$

$$\left| tg(\arccos(\varphi))_{i,j,s}^{DIinst} \right| \leq 0.326$$

Ograničenja regulacijskog transformatora (RT) u pojnoj točki mreže:

$$tr_s = tap_{min} + n_s * \Delta tap, \quad 0 \leq n_s \leq n_{s,maks}, \quad n_s \in integer \quad (8)$$

$$\Delta tap = (tap_{maks} - tap_{min}) / tap_{maks}$$

$$v_{1,s}^2 = tr_s^2 * v_{0,s}^2, \quad v_{0,s}^2 = const.$$

Gdje su:

- S – skup razmatranih scenarija,
- DI_i^{lok} – skup potencijalnih mjesta priključka za i –tog DI,
- s_{ij}^{maks} – maksimalno dozvoljeno opterećenje voda $i - j$,
- $P_{i,s}^{opt} / Q_{i,s}^{opt}$ – potrošnja radne/jalove snage u čvorištu i unutar scenarija s ,
- $P_{i,j}^{DIinst}$ – optimalna snaga i -tog DI priključenog u čvorištu j ,
- $Q_{i,j,s}^{DIinst}$ – optimalna jalova snaga i -tog DI u čvorištu j za scenarij s ,
- P_i^{DImaks} – maksimalna priključna snaga i -tog DI,
- $P_{i,s}^{gen} / Q_{i,s}^{gen}$ – injekcija radne/jalove snage u pojni čvor i u scenariju s ,
- $y_{i,j}^{DI}$ – binarna varijabla vezana uz priključak i -tog DI u čvorište j .
- $p_{ij,s} / q_{ij,s}$ – tok radne/jalove snage po grani $i - j$ za scenarij s ,
- $v_{0,s}$ – napon pojnog čvora i za scenarij s ,
- $L_{ij,s}$ – kvadrat struje u grani $i - j$ za scenarij s ,
- M – dovoljno veliki broj,
- $\cos(\varphi)_{i,j,s}^{DIinst}$ – dozvoljeni granični faktor snage DI,
- tap_{min} / tap_{maks} – minimalni/maksimalni prijenosni odnos RT,
- Δtap – prijenosni korak preklopke RT,
- n_s – pozicija preklopke RT,
- $n_{s,maks}$ – maksimalna pozicija preklopke RT,
- tr_s – prijenosni omjer RT za scenarij s .

Nelinearni izrazi definirani u (2) mogu se jednostavno supstituirati i aproksimirati stošcem drugog reda na sljedeći način:

$$L_{ij,s} = \frac{p_{ij,s}^2 + q_{ij,s}^2}{v_{i,s}^2} \quad (i, j) \in W \setminus W^S \quad (9)$$

$$L_{ij,s} = \frac{p_{ji,s}^2 + q_{ji,s}^2}{v_{j,s}^2} \quad (i, j) \in W \setminus W^S$$

$$v_{i,s}^2 = u_{i,s} \quad i \in B \quad (10)$$

$$\sum_{i:(j) \in W} p_{ij,s} = \sum_{\substack{(ij) \in W, s \in S \\ j \in B \setminus B^F}} r_{ij} L_{ij,s} + P_{j,s}^{opt} - P_{j,s}^{gen} - P_{j,s}^{DIinst} + \sum_{k:(jk) \in W, s \in S} p_{jk}, \quad (11)$$

$$\sum_{i:(j) \in W} q_{ij,s} = \sum_{\substack{(ij) \in W, s \in S \\ j \in B \setminus B^F}} x_{ij} L_{ij,s} + Q_{j,s}^{opt} - Q_{j,s}^{gen} - Q_{j,s}^{DIinst} + \sum_{k:(jk) \in W, s \in S} q_{jk},$$

$$\begin{aligned} u_{j,s} - u_{i,s} &\leq r_{ij}(p_{ji,s} - p_{ij,s}) + x_{ij}(q_{ji,s} - q_{ij,s}) + M(1 - y_{ij}), & i, j \in W \\ u_{j,s} - u_{i,s} &\geq r_{ij}(p_{ji,s} - p_{ij,s}) + x_{ij}(q_{ji,s} - q_{ij,s}) - M(1 - y_{ij}), & i, j \in W \end{aligned} \quad (12)$$

Definiraju se dodatna ograničenja koja definiraju dozvoljena opterećenja vodova:

$$\begin{aligned} p_{ij,s}^2 + q_{ij,s}^2 &\leq y_{ij} \cdot (s_{ij}^{maks})^2, & i, j \in W & \quad u_i = (v_i^{set})^2, & i \in B^F \\ L_{ij,s} &\leq y_{ij} \cdot s_{ij}^{maks}, & i, j \in W & \quad (v_i^{MIN})^2 \leq u_{i,s} \leq (v_i^{MAKS})^2, & i \in B \setminus B^F \end{aligned} \quad (13)$$

Nelinearni izrazi koji opisuju rad regulacijskog transformatora (8) linearnizirani su uvođenjem binarnog kodiranja statusa preklope regulacijskog transformatora.

3. TEST PRIMJER

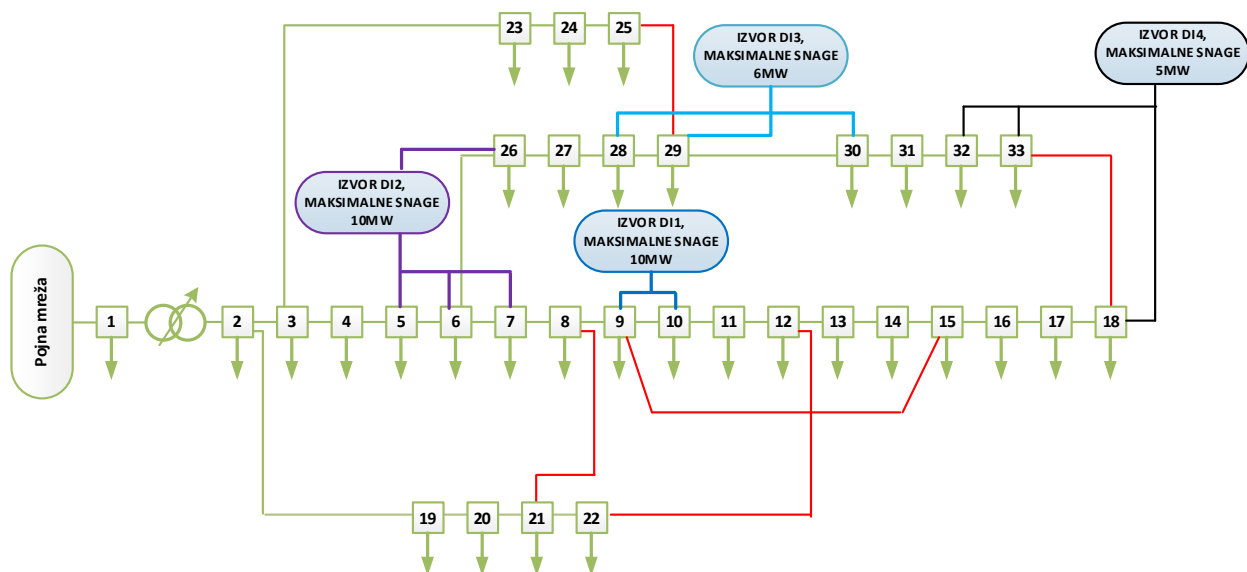
U analizi mogućnosti prihvata OIE u DM nužno je uvažiti što veći broj realno ostvarivih pogonskih stanja. U tu svrhu potrebno je razmotriti različite kombinacije odnosa proizvodnje i potrošnje OIE na osnovu stvarnih ili procijenjenih kronoloških podataka. Budući da veliki broj scenarija bitno utječe na vrijeme proračuna, nužno je reducirati broj scenarija na dovoljno mali broj koji reprezentativno prikazuje moguće pogonske prilike. Prethodno definirani model je općenit i prikladan za razmatranje više karakterističnih pogonskih stanja uz nešto dulje vrijeme proračuna u tom slučaju. Iako je moguće definirati proizvoljan broj pogonskih stanja, u test primjeru razmatraju se karakteristična dva ekstremna scenarija: visoka proizvodnja DI- niska potrošnja, visoka potrošnja – niska proizvodnja DI. Ovim skupom scenarija obuhvaćena su ekstremna pogonska stanja kako s aspekta opterećenja elemenata mreže tako i s aspekta naponskih prilika.

U sklopu analize provedene u ovom dijelu, ne razmatra se mogućnost dinamičke rekonfiguracije mreže odnosno algoritam utvrđuje samo jedno optimalno topološko rješenje mreže koje se primjenjuje u svim pogonskim stanjima. Implementacija dinamičke rekonfiguracije mreže u principu ne mijenja bitno definiciju optimizacijskog problema budući da je jedina razlika u tome što u tom slučaju varijable vezane uz status grane postaju vremenski(scenarijski) ovisna varijabla.

Razmatrani scenariji i dozvoljene granice kretanja određenih pogonskih veličina korištenih u simulacijama, prikazani su u tablici 1 dok je na slici 2 prikazan pojednostavljeni prikaz razmatrane testne mreže s mogućim mjestima i maksimalnim dozvoljenim snagama priključaka pojedinačnih DI.

Tablica 1. Parametri korišteni u simulacijama

Dozvoljeni raspon kretanja faktora snage DI	$\cos(\varphi) = 0.95(\text{induktivno/kapacitivno})$	
Maksimalna prijenosna moć vodova	Vodovi 1-17 = 10MVA	Vodovi 18-37 = 5MVA
Broj prijenosnih koraka RT/korak RT	20/1%	
Dozvoljeni napon po čvorištima	0.9 – 1.1 p. u.	
Pogonski scenariji:	max. proizvodnja DI / min. opterećenje (30%) isključeni DI / max. opterećenje (100%)	



Slika 2. Modificirana IEEE 33-bus testna mreža s naznačenim potencijalnim mjestima priključka i maksimalnim priključnim snagama DI

U sklopu test primjera razmatrani su sljedeći podmodeli koji se dobiju izostavljanjem određenih izraza odnosno fiksiranjem određenih varijabli u modelu definiranom s izrazima (1)-(13):

- **Osnovni model:** u ovom slučaju ne razmatra se fleksibilnost na razini DM. Model razmatra inicijalnu radijalnu topologiju mreže te ne razmatra mogućnost promjene iste. Također u sklopu ovog podmodela nisu dozvoljeni ni drugi aspekti upravljanja elementima mreže i DI (DI rade s faktorom snage $\cos\varphi=1$ dok je preklopka regulacijskog transformatora u srednjem položaju);
- **Model a)** - u sklopu ovog podmodela razmatra se dodatno mogućnost upravljanja faktorom snage DI u granicama $\cos(\varphi) = 0.95(ind./kap.)$;
- **Model b)** - u sklopu ovog podmodela razmatrana je kombinacija dvaju načina upravljanja koji uključuju doprinos regulacijskih transformatora s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem uz upravljanje faktorom snage DI;
- **Model c)** - u sklopu ovog slučaja razmatrana je kombinacija sva tri načina upravljanja DM koji uključuju: promjenu topologije DM, upravljanje faktorom snage i automatsku regulaciju napona u čvorištu s regulacijskim transformatorom.

U tablici 2 sažeto su prikazani rezultati za prethodno definirane podmodele.

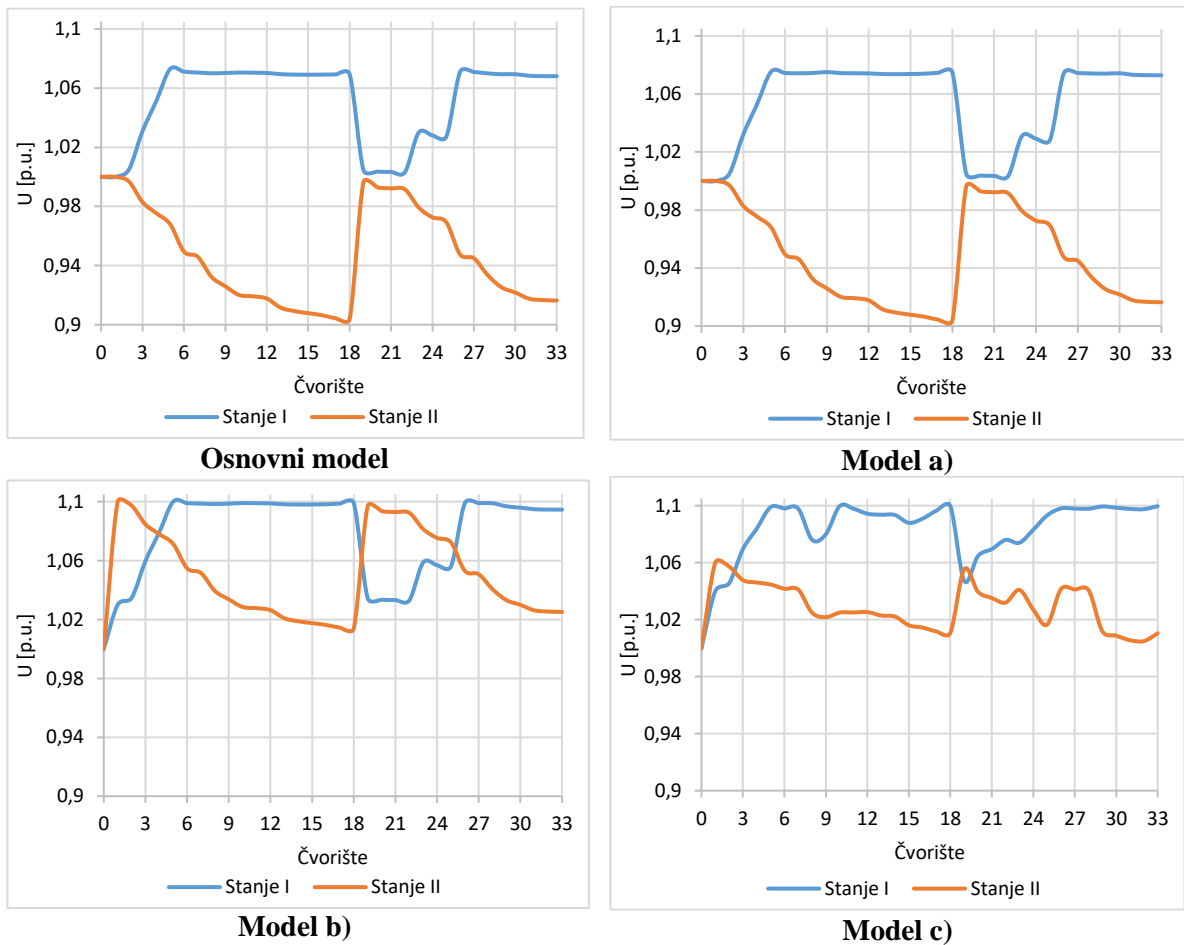
Tablica 2. Rezultati proračuna za razmatrane podmodele

	Osnovni model	Model a)	Model b)	Model c)
Priključna snaga DI1, DI2, DI3, DI4 [kW]	210, 10000, 328, 90	195, 10000, 334, 106	165, 9999, 355, 91	1640, 7001, 2235, 756
Jalova snaga DI1, DI2, DI3, DI4 [kVAr]	-	64, 373, 110, 35	55, -564, 117, 30	160, 336, 421, 90
Mjesto priključka DI1, DI2, DI3, DI4	10, 5, 30, 18	9, 5, 30, 18	10, 5, 28, 18	10, 5, 29, 18
Napon sek. RT [p.u.] – pogonski scenarij I/ II	1 p.u./1 p.u.	1p.u./1p.u.	1.03p.u./1.1p.u.	1.04 p.u./1.06 p.u.
Isključene grane	33, 34, 35, 36, 37	33, 34, 35, 36, 37	33, 34, 35, 36, 37	7, 9, 14, 28, 32
U_{min}/U_{max} [p.u.] pogonski scenarij I	1.073/1	1.0753/1	1.1/1.03	1.0997/1.04
U_{min}/U_{max} [p.u.] pogonski scenarij II	1/0.9038	1/0.9038	1.1/1.0139	1.06/1.005
Trajanje proračuna [s]	0.39	0.72	0.44	167.97

Kao referentni slučaj za ostale modele služi osnovni model u kojem se ne razmatraju dodatne mogućnosti upravljanja DM-om i DI-ma. U sklopu ove simulacije pretpostavlja se da je priključak DI-a moguće izvršiti na susjedna čvorišta: 'DI1' na '9' ili '10'; 'DI2' na '5', '6', '7' ili '26'; 'DI3' na '18', '29' ili '30'; 'DI4' na '18', '32' ili '33'. U sklopu osnovnog modela kao optimalno rješenje priključka za 'DI1' utvrđeno je čvorište '10' s priključnom snagom u iznosu od 210 kW, 'DI2' u čvorištu '5' s priključnom snagom u iznosu od 10 MW, 'DI3' u čvorištu '30' s priključnom snagom u iznosu od 328 kW i 'DI4' u čvorištu '18' s priključnom snagom u iznosu od 90 kW. Zbirna instalirana snaga svih razmatranih DI iznosi 10.628 MW. Ovaj se iznos koristi kao referenca za daljnje uspoređivanje rezultata dobivenih primjenom drugih matematičkih modela koji uključuju različite izvore fleksibilnog upravljanja DM i DI.

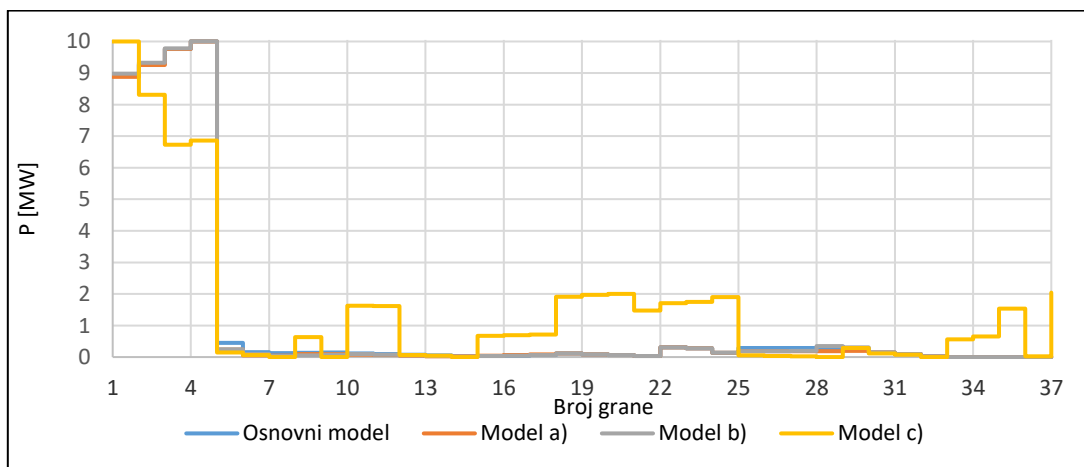
Iz rezultata prikazanih u tablici 2 vidljivo je da uvođenje regulacije jalove snage DI (model a)), odnosno optimiranje rada RT (model b)) značajno ne doprinosi povećanje prihvatnih mogućnosti DM. U modelu c), koji uključuje promjenu topologije, za optimalno rješenje dobivaju se priključci 'DI1' u čvorištu '10' s priključnom snagom u iznosu od 1640 kW, 'DI2' u čvorištu '5' s priključnom snagom u iznosu od 7 MW, 'DI3' u čvorištu '29' s priključnom snagom u iznosu od 2.235 MW i 'DI4' u čvorištu '18' s priključnom snagom u iznosu od 756 kW. Zbirna instalirana snaga svih razmatranih DI iznosi 11.632 MW, što predstavlja povećanje od približno 10% u odnosu na osnovni model. Navedeni rezultati ukazuju na bitnu ulogu topološke fleksibilnosti DM u kontekstu povećanja prihvatnih sposobnosti DM.

Na slici 3 prikazana je usporedba naponskih profila DM za različite razmatrane modele i pogonska stanja. Sa slike je vidljivo da naponske prilike u svim slučajevima ostaju unutar definiranih granica. Vidljivo je da za osnovni model i podmodel a) ograničavajući faktor vezan uz priključak DI nije vezan uz povećanje napona u mreži van dozvoljenih granica. S obzirom na to logični su i rezultati primjene podmodela a) i b) koji ukazuju da implementacija mjera upravljanja faktorom snage DI i preklopom regulacijskog transformatora ne doprinose bitno povećanju prihvatnih sposobnosti mreže. Ovi zaključci vrijede samo za razmatrani primjer mreže i u drugom slučajevima implementacija spomenutih mjera može bitno povećati mogućnosti prihvata DM. RT u modelima b) i c) podiže napon u pojnoj točki i tako poboljšava naponske prilike u uvjetima visoke potrošnje i niske proizvodnje DI.



Slika 3. Naponski profili za različite podmodele i pogonska stanja

Glavni razlog koji ograničava mogućnosti prihвата DI u DM u osnovnom modelu i modelima a) i b) (za razmatrani test primjer) vezan je uz prijenosnu moć vodova odnosno visoko opterećenje DM u dijelu blizu mjesta priključka DI na mrežu. S obzirom na to, implementacijom spomenutih mjera (regulacije faktora snage i upravljanja RT) nije moguće bitno povećati prihvatne mogućnosti mreže. U modelu c) promjenom topologije DM osigurava se preraspodjela opterećenja, prebacivanjem jednog dijela opterećenja na drugi kraj, čime se omogućava dodatni prihvat snage iz DI-a. Također, sa slike 4 (model c), vidljivo je da prijenosna moć grane '1' od 10 MVA predstavlja barijeru za daljnje povećanje prihvatne mogućnosti DM.



Slika 4. Tokovi snaga po granama za različite podmodele i pogonsko stanje minimalne potrošnje/ maksimalne proizvodnje DI

ZAKLJUČAK

U ovom radu definiran je matematički model za određivanje optimalne snage i mjesta priključka DI u svrhu povećanja prihvatne sposobnosti DI u DM. Matematički model razmatra više opcija priključka za pojedine DI, mogućnost upravljanja faktorom snage DI, mogućnost regulacije napona korištenjem regulacijskih transformatora u pojnoj točki mreže kao i mogućnost rekonfiguracije DM u svrhu povećanja prihvata DI u DM u okvirima aktualne izgrađenosti mreže.

U test primjeru razmatran je doprinos određenog načina upravljanja DI/DM na povećanja prihvata DI u DM. Za razmatranu mrežu najizraženije povećanje javlja se modelu koji uvažava topološku fleksibilnost DM odnosno mogućnost statičke rekonfiguracije mreže. U modelima koji ne uzimaju u obzir topološku fleksibilnost, glavni razlog koji limitira mogućnost prihvata DI, pored povećanja napona na sabirnicama, je dostizanje gornjih granica prijenosnih moći vodova u blizini mjesta priključka DI.

LITERATURA

- [1] Rade Čađenović: „*Hibridne metode za optimiranje topologije distirbucijskih mreža*“, Doktorska disertacija, FESB, 2019.
- [2] D. Jakus, R. Čađenović, J. Vasilj and P. Sarajčev, "Maximizing distribution network hosting capacity through optimal network reconfiguration," 2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM), Ljubljana, Slovenia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EEM.2019.8916230.
- [3] Mahmoud Pesaran H.A et al., „A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms“, ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 75, August 2017, Pages 293-312