

Dinko Marić, dipl.ing.el.
JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar
dinko.marić@ephzhh.ba

Sonja Mandrapa, mag.ing.el.
JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar
sonja.mandrapa@ephzhh.ba

Igor Slišković, dipl.ing.el.
JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar
igor.sliskovic@ephzhh.ba

Ante Štironja, mag.ing.eit.
JP Elektroprivreda HZHB d.d. Mostar
ante.stironja@ephzhh.ba

REGULACIJA NAPONA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI IZMJENJIVAČIMA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

SAŽETAK

Distribuirani izvori imaju sve veći utjecaj na kvalitetu električne energije u distribucijskim mrežama. Kako bi se omogućila njihova veća integracija sa što manjim ulaganjima analizirana je regulacija napona izmjenjivačima fotonaponskih elektrana. U radu je prikazan utjecaj fotonaponskih elektrana u Gospodarskoj zoni Hodovo, Općina Stolac ako bi elektrane radile s promjenjivim faktorom snage. Korištenjem izmjenjivača sa smanjenim faktorom snage može se smanjiti povećanje napona uzrokovano priključenjem fotonaponskih elektrana. Prije priključenja distribuiranih izvora, osim promjene napona, potrebno je analizirati i tokove snage kako bi se našlo optimalno rješenje za priključenje.

Ključne riječi: distribuirani izvori, distribucijska mreža, obnovljivi izvori energije, regulacija napona, promjenjivi faktor snage

VOLTAGE REGULATION IN DISTRIBUTION NETWORK USING INVERTERS FOR SOLAR PLANTS

SUMMARY

Distributed sources have increasing impact on quality of electrical energy in distribution networks. To enable their greater integration with minimum investment costs, an analysis of voltage regulation by inverters for solar plants has been done. This work describes an impact on solar plants in economic zone Hodovo, Stolac municipality if the power plant worked with mutable power factor. Using inverters with lower power factor, voltage increasing caused by connection of solar plants can be reduced. Before connection of distributed sources, except voltage changes, it is necessary to analyze also the power flow to find an optimal solution for connection.

Key words: distributed sources, distribution network, renewable energy sources, voltage regulation

1. UVOD

Proizvodnja u tradicionalnim elektroenergetskim sustavima odvija se u velikim proizvodnim jedinicama na relativno malom broju lokacija. Napon se iz proizvodnih jedinica diže na visoki (prijenosni) napon zbog prijenosa na velike udaljenosti prijenosnom mrežom. Prijenosni napon se u distribucijskoj mreži spušta na srednji i niski napon i distribuira uobičajeno radijalnom mrežom do krajnjih kupaca. Kupci se spajaju na srednji i niski napon. Zadnjih 20-ak godina mijenja se koncept elektroenergetskog sustava (EES) pojavom distribuiranih izvora. Razvoj EES-a mora zadovoljiti brojne ciljeve. EES mora biti ekonomski učinkovit, treba osigurati pouzdano napajanje i ne smije škoditi okolišu. Rastući trend je sve veća zastupljenost elektrana na obnovljivim izvorima energije u elektroenergetskom sustavu. Obnovljivim izvorima energije (OIE) smatraju se vodna snaga, biomasa, solarna energija, energija vjetra, geotermalna energija i energija morskih valova. Poseban značaj OIE daje EU koja je odredila ciljeve u pogledu učešća primjene OIE u ukupnoj potrošnji energije zemalja članica EU. Male hidroelektrane, vjetroelektrane, fotonaponske elektrane, elektrane na biomasu i kogeneracijske elektrane su primjeri takvih novih proizvodnih jedinica. Pored neusporedivo manjeg utjecaja na okoliš, obnovljivi izvori energije imaju još jednu značajnu prednost, a to je primjena u izgradnji kako velikih energetske sustava tako i malih sustava. Posljednjih godina dolazi do decentralizacije u proizvodnji električne energije; pojavljuje se značajan broj izvora električne energije različitih snaga priključenih na distribucijsku mrežu slijedeći načelo „što bliže potrošnji“. Takvi izvori koji su priključeni direktno na distribucijsku mrežu ili se nalaze s potrošačeve mjerne strane nazivaju se distribuirani izvori. Takvi energetske resursi se često nalaze u ruralnim područjima. Prisutnost distribuiranih izvora postupno pretvara distribucijsku mrežu u aktivnu mrežu što znači da se u pojedinim granama mreže mijenja smjer tokova snaga, ovisno o trenutnoj potrošnji i proizvodnji distribuiranih izvora. Intermitentni izvori, kao što su solarne i vjetroelektrane, mogu stvoriti probleme operatoru distribucijskog sustava u vođenju mreže. Spajanjem distribuiranih izvora na distribucijsku mrežu dolazi do porasta napona, promjena tokova snaga i dr.

2. UTJECAJ DISTRIBUIRANIH IZVORA NA DISTRIBUCIJSKU MREŽU

Utjecaj distribuiranih izvora može se podijeliti u tri skupine: tehnički, ekonomski i regulatorni. Tehnički dio obuhvaća povećanje napona, kvalitetu napona, zaštitu i stabilnost. Povećanje napona je ključni faktor koji ograničava broj elektrana koje je moguće priključiti na ruralne distribucijske mreže zbog povećanja napona uslijed priključenja i pogona elektrana. Fizička ograničenja odnose se na prekoračenje kapaciteta vodova i transformatorskih stanica. Kvaliteta napona uobičajeno se vrednuje na tranzijentne (kratkotrajne) promjene napona i harmonijska izobličenja. Ovisno o slučaju, priključenje i pogon distribuirane proizvodnje može povećati ili smanjiti kvalitetu napona u predmetnoj distribucijskoj mreži. Prilikom priključenja distribuirane proizvodnje na distribucijsku mrežu potrebno je voditi računa o sljedećim aspektima: zaštiti proizvodnog postrojenja od kvarova u postrojenju, zaštiti distribucijske mreže od struje kvara koja dolazi iz proizvodnog postrojenja, zaštiti od nedozvoljenog otočnog pogona. U tradicionalnim distribucijskim sustavima ne javljaju se problemi koji su vezani uz regulaciju frekvencije i stabilnost. S uključivanjem distribuirane proizvodnje u distribucijske sustave navedeni će se aspekti, koji tradicionalno pripadaju prijenosnim sustavima, pojaviti i u distribucijskim sustavima. Područja koja je potrebno vrednovati su prijelazna stabilnost kao i dugoročna dinamička stabilnost te slom napona.

2.1 KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Kvaliteta električne energije obilježje je električne energije u određenoj točki elektroenergetskog sustava promatrano u usporedbi s referentnim tehničkim parametrima koji se određuju na temelju višegodišnjih iskustava stečenih analizama stanja u elektroenergetskim mrežama. Pod kvalitetom električne energije obično se misli na neprekinutost napajanja i kvalitetu napona. Idealni sinusni valni oblik napona, amplituda $\sqrt{2} \cdot U_n$ i frekvencije 50 Hz u cijeloj mreži nije ekonomski opravdano, a vrlo često ni tehnički moguće postići. Kvaliteta napona u nekoj točki distribucijske elektroenergetske mreže iskazuje zbirno međudjelovanje proizvodnih jedinica, prijenosnih i distribucijskih linija i transformacija te trošila spojenih na elektroenergetski sustav, izraženim kroz nekoliko parametara:

- frekvencija napona,
- iznos napona u stacionarnom stanju,
- harmoničko izobličenje valnog oblika napona,
- međuharmonici napona,
- brze dinamičke promjene napona (fikeri),

- nesimetričnost napona,
- propadi napona,
- prenaponi mrežne frekvencije,
- tranzijentni prenaponi,
- naponi signaliziranja.

Promjena iznosa napona u stacionarnom stanju posljedica je injektiranja struje u mrežu. Iznos napona na mjestu priključka elektrane kao funkcije proizvedene radne i jalove snage može se približno odrediti izrazom:

$$U = R \cdot \frac{P}{U_n} - X \cdot \frac{Q}{U_n} + U_n \quad (1)$$

gdje su :

U_n - nazivni napon mreže

U - napon na mjestu priključka elektrane

P - proizvedena radna snaga

Q - jalova snaga

R - radni otpor mreže

X - induktivni otpor mreže

3. NAČIN REGULACIJE NAPONA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

Osnovna zadaća Operatora distribucijskog sustava (ODS) je održavati naponske prilike na mjestu predaje električne energije unutar propisanih granica. Do pojave distribuiranih izvora najčešći problem je bio preнизak napon dugih i preopterećenih mreža. Distribuirani izvori (DI), da bi mogli injektirati snagu u mrežu, moraju podići napon u točki priključenja na mrežu. Ako je mreža preopterećena te je na njenom kraju napon preнизak, priključenjem elektrane napon će se podići i popraviti električne prilike na mreži. Ako je mreža slaba i podopterećena, njena ovisnost naponskih prilika o trenutnoj snazi distribuiranih izvora raste. U trenutcima malog opterećenja i velike proizvodnje distribuiranih izvora napon u pojedinim dijelovima mreže poraste. Ako je razlika između trenutne potrošnje u čvorištima i proizvodnje distribuiranih izvora dovoljno velika, napon će u pojedinim točkama mreže porasti iznad dozvoljene granice. Elementi EES-a dimenzionirani su na nazivni napon. Odstupanja utječu na naprezanje izolacije, gubitke djelatne snage, zagrijavanje i dr. Razlikuju se brže i polagane promjene napona.

Regulacija napona u distribucijskoj mreži prvenstveno se radi zbog održavanja napona u dozvoljenim granicama kako bi se zadovoljila kvaliteta napona kod krajnjih kupaca. Distribucijska mreža u pravilu se napaja iz jedne napojne točke (regulacijski transformator 110/x kV - održavanje napona na SN strani regulacija na VN strani). Elementi za regulaciju napona u distribucijskoj mreži su:

- regulacijski transformatori 110/x (na granici prijenosne i distribucijske mreže),
- regulacijski transformatori u distribucijskoj mreži,
- poprečne kondenzatorske baterije,
- sinkroni strojevi (sinkroni generatori distribuirane proizvodnje, sinkroni kompenzatori, sinkroni motori...),
- povećanje veličine vodiča, odnosno rekonfiguracija mreže,
- instaliranje dodatnog autotransformatora ili naponskog regulatora na dijelu mreže gdje je DI priključen,
- ograničavanje aktivne snage DI-a,
- upravljanje reaktivnom snagom DI-a,
- kombinacija navedenih metoda.

Regulacije napona koje se sada primjenjuju u našoj distribucijskoj mreži su regulacijski transformatori 110/x, povećanje veličine vodiča, rekonfiguracija mreže, ograničavanje aktivne snage DI-a, ručna regulacija napona na primaru distributivnih transformatora u beznaponskom stanju i međusobna kombinacija navedenih metoda.

3.1. METODE ZA RAČUNANJE PADA NAPONA

Razmotrit ćemo primjer kad su opterećenje i distribuirani izvor spojeni na kraju voda preko voda impedancije $R+jX$. Struja I na početku voda može se prikazati sljedećim izrazom:

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}_o^*}{\bar{U}_o} = \frac{P_o - jQ_o}{\bar{U}_o^*} \quad (2)$$

Na kraju voda struja I se može prikazati izrazom:

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1} = \frac{P_1 - jQ_1}{\bar{U}_1^*} \quad (3)$$

Pad napona na vodu može se prikazati izrazom:

$$\Delta U = |\bar{U}_o - \bar{U}_1| = |\bar{I}(R + jX)| = \left| \frac{(RP_1 + XQ_1) - j(XP_1 - RQ_1)}{\bar{U}_1^*} \right| \quad (4)$$

gdje su :

U_o - napon na početku voda

S_o - prividna snaga na početku voda

P_o - radna snaga na početku voda

Q_o - reaktivna snaga na početku voda

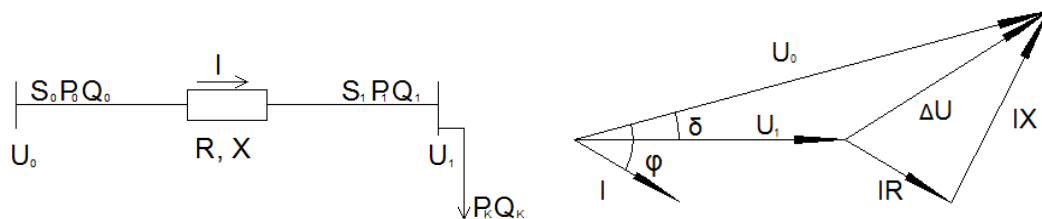
S_1 - prividna snaga na kraju voda

P_1 - radna snaga na kraju voda

Q_1 - reaktivna snaga na kraju voda

R - djelatni otpor voda

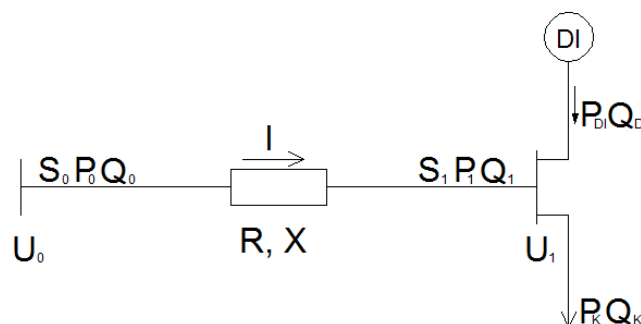
X - induktivni otpor



Slika 1. Jednopolna shema i vektorski dijagram izvoda s jednim potrošačem na kraju voda

Za mali tok snage, kut δ između U_1 i U_o je neznačajan pa se izraz 4 može pojednostavniti:

$$\Delta U \approx \frac{(RP_1 + XQ_1)}{U_1} \quad (5)$$



Slika 2. Jednopolna shema s jednim potrošačem i jednim proizvođačem na kraju voda

$$\Delta U \approx \frac{RP_1 + XQ_1}{U_1} = \frac{R(P_K - P_{DI}) + X(Q_K - Q_{DI})}{U_1} \quad (6)$$

gdje su:

P_K – radna snaga kupca

Q_K – reaktivna snaga kupca

P_{DI} – radna snaga distribuiranog izvora

Q_{DI} – reaktivna snaga distribuiranog izvora

Za izvod s n čvorišta prikazan pad napona na segmentu k , ΔU_k , može biti približno:

$$\Delta U \approx \frac{R_K P_K + X_K Q_K}{U_K} \quad (7)$$

gdje su:

P_K – radna snaga koja protječe kroz segment k

Q_K – reaktivna snaga koja protječe kroz segment k

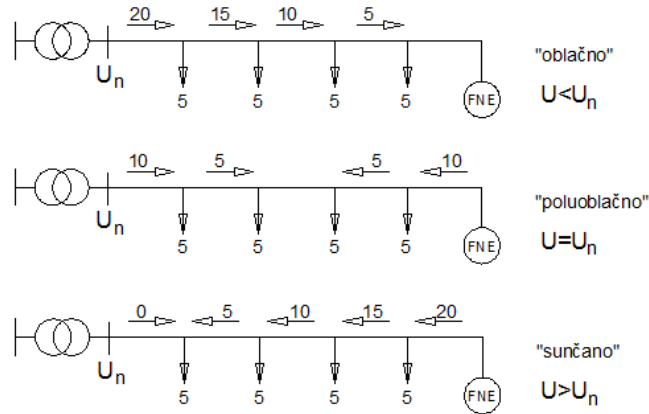
$$P_K = \sum_{i=k}^n P_{Ki} + \sum_{i=k+1}^n I_i^2 R_i \quad (8)$$

$$Q_K = \sum_{i=k}^n Q_{Ki} + \sum_{i=k+1}^n I_i^2 X_i \quad (9)$$

gdje je:

$$I_i = \sum_{j=1}^n \frac{\sqrt{P_j^2 + Q_j^2}}{U_j} \quad (10)$$

Distribuirani izvor povećat će napon u priključnoj točki. Porast napona može poboljšati naponske prilike duž izvoda npr. smanjujući pad napona uzrokovan opterećenjem. S druge strane, kad je proizvodnja DI visoka, porast napona može uzrokovati prenapon na izvodu, koji treba određeno smanjenje. Analiza naponskih prilika, pretpostavljajući da je induktivni otpor voda zanemariv, procjenjivat će rast napona, osobito kad je opterećenje prisutno na izvodu ili kada DI apsorbira reaktivnu snagu iz mreže. Reaktivna snaga povučena iz mreže (ili od tereta ili DI) smanjuje rast napona sukladno izrazu 6. Kakav će biti utjecaj na naponske prilike ovisi o omjeru proizvodnje i potrošnje na izvodu. Poteškoće reguliranja napona u mrežama s distribuiranim izvorima prikazane su na sl. 3.



Slika 3. Ovisnost napona na izvodu i proizvodnje elektrane

3.2. REGULACIJA NAPONA S RADOM DISTRIBUIRANIH IZVORA U KAPACITIVNOM PODRUČJU RADA

Distribuirani izvor će prilikom rada povećati napon na spojnoj točki, što je vidljivo iz izraza 6, što će u stvari povećati napon na cijelom izvodu. Rast napona može poboljšati naponske prilike duž izvoda npr. smanjujući pad napona uzrokovanih opterećenjem. S druge strane, kad je proizvodnja DI velika, rast napona može prouzrokovati prenapone na izvodima pa je potrebno poduzeti određene aktivnosti. Povećanje napona se može smanjiti ako DI apsorbira reaktivnu energiju iz mreže. Ovo je moguće ako DI ima sinkroni generator ili uređaj energetske elektronike (npr. izmjenjivač) koji omogućava upravljanje reaktivnom energijom.

Učinkovitost apsorpcije reaktivne energije u smanjenju prenapona i povećanju integracije DI ovisi o parametrima izvoda i opterećenju:

- veća integracija ako je opterećenje izvoda veće,
- veća integracija za izvode s manjom otpornošću (veća površina vodiča i veća reaktancija ili nadzemni umjesto podzemnog voda istog presjeka),
- veća integracija kada je DI smješten bliže početku izvoda.

Upravljanje napona s DI ima utjecaje na gubitke, a gubitci se mogu iskazati sljedećim izrazom:

$$L = I^2 R = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} R \quad (11)$$

Za izvode s n čvorova:

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}_1^*}{\bar{U}_1^*} L = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \dots + I_n^2 R_n = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \quad (12)$$

gdje su:

I_i – struja u segmentu i

R_i – otpor u segmentu i

Za izvode s opterećenjem i DI koji proizvodi aktivnu snagu i apsorbira reaktivnu energiju:

$$L = \frac{(P_K - P_{DI})^2 + (Q_K + Q_{DI})^2}{U_1^2} R \quad (13)$$

Smanjenje povećanja napona s DI treba koristiti samo kad nema druge mogućnosti kako ne bi došlo do povećanja gubitaka. Apsorpcija reaktivne snage također znači da treba negdje drugdje u mreži biti njezin izvor. Kako bi se što manje povećali gubici DI treba raditi s faktorom snage 1 dok napon na izlazu DI ne dosegne U_{\max} . Ako DI dosegne U_{\max} , a od DI se očekuje da poveća proizvodnju, DI treba raditi u kapacitivnom režimu rada s kontroliranim faktorom snage da se održi napon U_{\max} na izlazu DI. Neke od glavnih karakteristika niskonaponskih mreža su nesimetrija vodova i opterećenja, omski otpor veći od induktivnog otpora ($R > X$, za razliku od prijenosnog sustava gdje je $X \gg R$) te mala udaljenost između potrošača i elektrana, pa interakcija među njima nije zanemariva. Uz određena zanemarenja relativna promjena napona u priključnoj točki izazvana injeckiranjem aktivne snage P i reaktivne snage Q (pozitivna za induktivni režim, negativna za kapacitivni) može se izraziti na sljedeći način:

$$\Delta u = \frac{RP + XQ}{U_n^2} = \frac{S}{S_{sc}} \cos(\psi + \varphi) \quad (14)$$

gdje su:

R - aktivni otpor

X - induktivni otpor

S_{sc} - snaga trolnog kratkog spoja

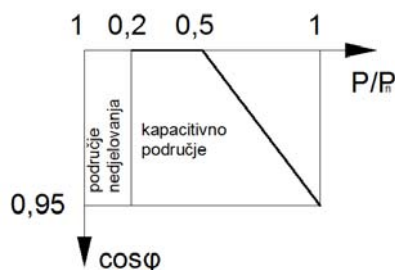
Ψ - kut trolnog kratkog spoja

U_n - nazivni napon mreže

S - prividna snaga generatora

Φ - kut generatora (negativan za induktivni, a pozitivan za kapacitivni režim)

Vidljivo je da se porast napona može smanjiti ukoliko se vrši redukcija aktivne snage ili apsorpcija reaktivne snage. Zbog visokog omjera R/X u distributivnim mrežama, prva tehnika je efikasnija, ali nije ekonomična. Porast napona bi se mogao u potpunosti eliminirati ako bi izmjenjivač radio s faktorom snage nižim od onog za kojeg je izmjenjivač dizajniran. Elektrane snage veće od 3 kW po CEI 0-21 odnosno snage veće od 3,68 kVA po VDE-AR-N 4105, moraju imati mogućnost rada s radnom karakteristikom $\cos\varphi(P)$, a koja podrazumijeva promjenu faktora snage u ovisnosti o proizvodnji aktivne snage (slika 4). Ideja ovog načina regulacije je da za maksimalnu snagu elektrane odabere faktor snage (u kapacitivnom režimu) za koji je porast napona minimalan. Sa smanjenjem proizvodnje, faktor snage se povećava s ciljem održavanja napona konstantnim i pri dostizanju jediničnog faktora snage prestaje se s regulacijom. Uobičajeno je da se $\cos\varphi(P)$ radna karakteristika linearizira i uglavnom se opisuje u tri točke. Za ovaj način regulacije dovoljna je trokutna pogonska karta izmjenjivača. Nepovoljno djelovanje izmjenjivača na naponske prilike može se izbjeći ako se postave naponska ograničenja na primjenu ove vrste regulacije kao npr. po standardu CEI 0-21. Po ovom standardu, izmjenjivač počinje rad po $\cos\varphi(P)$ karakteristici ako je napon na njegovim krajevima viši od kritičnog, tzv. lock-in napona, koji npr. iznosi $1,05 U_n$, dok u protivnom radi s $\cos\varphi=1$. Izmjenjivač prestaje s radom po $\cos\varphi(P)$ karakteristici ako napon na izlazu izmjenjivača padne ispod kritičnog lock-out napona, koji npr. iznosi $1,00 U_n$.



Slika 4. Standardna $\cos\varphi(P)$ radna karakteristika fotonaponske elektrane (izmjenjivača)

Reaktivnu snagu koju izmjenjivač proizvodi moguće je mijenjati s naponom na njegovim krajevima, a to je i osnovna ideja $Q(U)$ regulacije. Za ovu strategiju neophodna je pravokutna pogonska karta, a moguće je regulirati i visoke i niske napone. CEI 0-21 standard zahtijeva mogućnost ovog načina regulacije za elektrane snage veće od 6 kW.

$Q(U)$ regulator predstavlja proporcionalni P regulator, kojima se upravlja u zatvorenoj povratnoj sprezi. Ipak, za razliku od klasičnog P regulatora, za $Q(U)$ regulator definira se i područje neosjetljivost uvedeno s ciljem smanjenja gubitaka izazvanih apsorpcijom reaktivne snage pri naponima bliskim

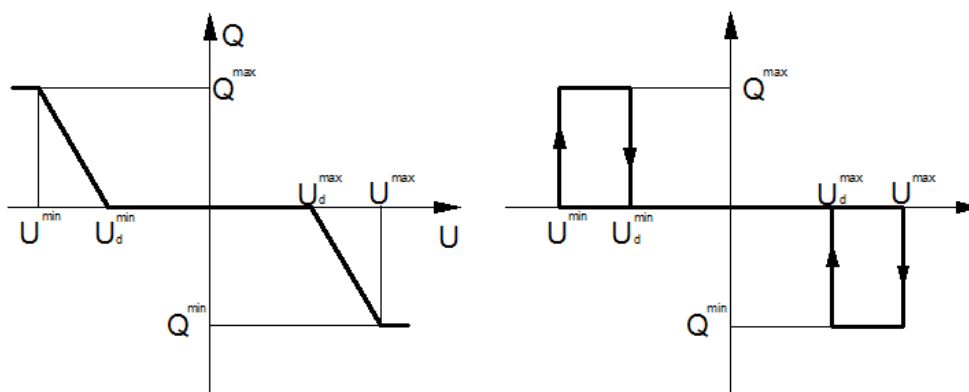
nazivnom naponu. Parametri $Q(U)$ regulatora su granice (naponi) područja neosjetljivosti U_d^{\min} i U_d^{\max} te naponi pri kojima se injektira (apsorbira) maksimalna reaktivna snaga (Q^{\max}), U^{\min} i U^{\max} . Prema tome, za simetričnu $Q(U)$ karakteristiku, osjetljivost $Q(U)$ regulatora je:

$$k_p = \frac{Q^{\max}}{U^{\max} - U_d^{\max}} \quad (15)$$

Primjenom ove strategije, referentna reaktivna snaga izmjenjivača dobije se na sljedeći način:

$$Q = k_p (U_d^{\max} - U), U > U_d^{\max} \quad (16)$$

$$Q = k_p (U_d^{\min} - U), U < U_d^{\min} \quad (17)$$



Slika 5. $Q(U)$ karakteristika prema standardu CEI 0-21

Na slici 5. prikazane su $Q(U)$ karakteristike prema standardu CEI 0-21, pri čemu je $U_d^{\min} = 0,92U_n$, $U_d^{\max} = 1,08U_n$, $U^{\min} = 0,9U_n$, $U^{\max} = 1,1U_n$.

Izmjenjivač počinje s radom po $Q(U)$ karakteristici ako je snaga veća od kritične lock-in snage (predefinirana vrijednost $0,2 P_n$), a prestaje s radom po ovoj karakteristici ako je snaga manja od kritične lock-out snage (maksimalno $0,05 P_n$). Snažna interakcija u distribucijskim mrežama jedan je od razloga zašto se regulacijom ne nastoje naponi držati na točno određenim vrijednostima, nego u opsegu dozvoljenih vrijednosti. Drugi razlog su ograničene mogućnosti izmjenjivača u pogledu proizvodnje reaktivne snage.

Na slici 5. na primjeru niskonaponske mreže prikazana je i regulacija napona uz upotrebu istih $Q(U)$ karakteristika za sve elektrane (izmjenjivače). Zbog viših napona na kraju voda, elektrana na kraju voda sudjeluje više u regulaciji napona. Moguć je i slučaj kada naponi na kraju voda prelaze dozvoljeno ograničenje, a da izmjenjivači na početku voda nisu dosegili svoje strujne limite ili čak da nisu ni počeli s regulacijom. Ovakve slučajeve moguće je izbjeći pravilnom koordinacijom regulatora. Cilj koordinacije je iskorištavanje mogućnosti svih fotonaponskih izmjenjivača u mreži odnosno uključivanje svih izmjenjivača u regulaciju svih napona u mreži, a da su pri tom i gubitci snage (energije) u mreži što manji.

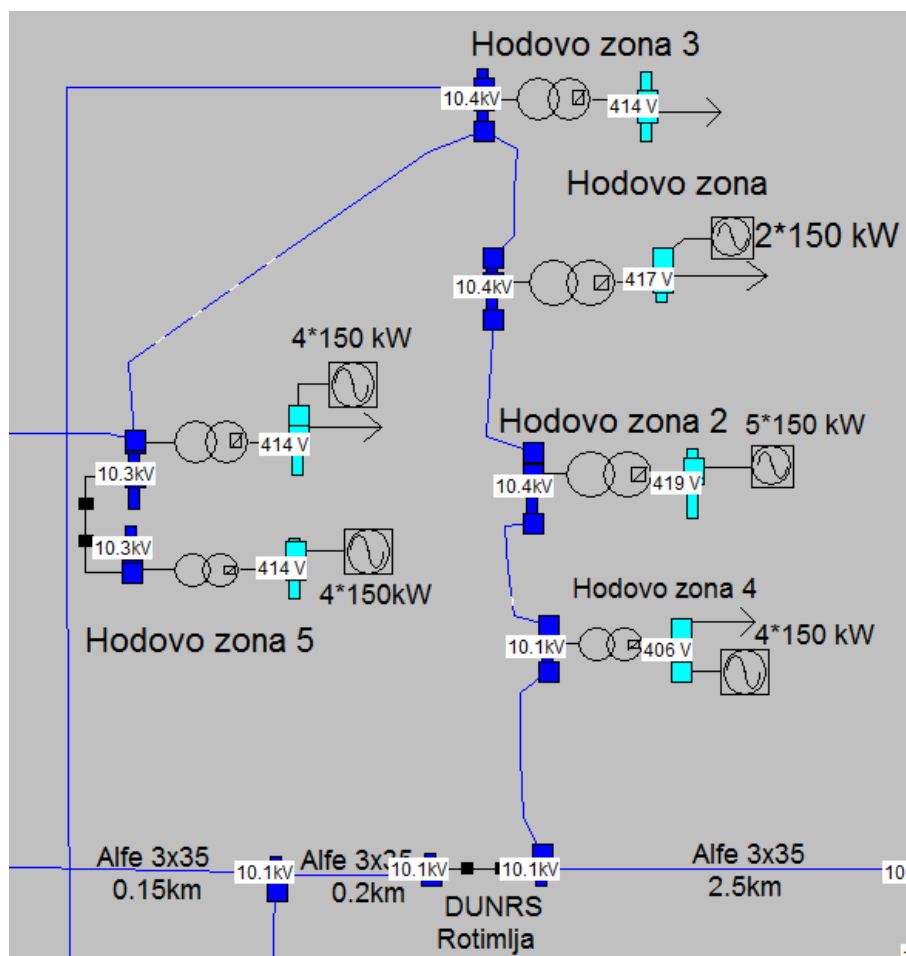
Postoje brojni pristupi koordinaciji regulatora, pa tako se parametri regulatora mijenjaju u ovisnosti o impedanciji mreže u priključnoj točki i trenutnoj proizvodnji ili se primjenjuju višesegmentne $Q(U)$ karakteristike, fuzzy regulatori i dr. Primjenom standardnih $\cos\phi(P)$ karakteristika osigurava se jednaki udio svih izmjenjivača u regulaciji napona, što nije slučaj sa standardnim $Q(U)$ karakteristikama. S druge strane, s $\cos\phi(P)$ regulacijom uglavnom su veći gubitci u mreži. Prednosti $Q(U)$ regulacije su mogućnosti regulacije i visokih i niskih napona te veće mogućnosti za koordinaciju regulatora. Pored toga, napone je moguće regulirati i redukcijom aktivne snage, što je osnovna ideja $\Delta P(U)$ strategije. $Q(U)$ i $\Delta P(U)$ regulaciju moguće je kombinirati, na način da se pri dostizanju ograničenja izmjenjivača po reaktivnoj snazi prelazi na regulaciju napona smanjenjem aktivne snage (proizvodnje).

4. UTJECAJ PRIKLJUČENJA FOTONAPONSKIH ELEKTRANA U GOSPODARSKOJ ZONI HODOVO NA PROMJENE NAPONA

Analizama utjecaja FNE na distribucijsku mrežu Poslovnice Elektro-Stolac obuhvaćeno je 19 elektrana instaliranih snaga 150 kW, tj. ukupno 2,85 MW. Na području Gospodarske zone Hodovo izgrađeno je 5 transformatorskih stanica. Transformatorska stanica Hodovo zona 3 nazivne snage 630 kVA služi za napajanje tvornice medicinske plastike, a ostale trafostanice (TS Hodovo, TS Hodovo zona 2 i TS Hodovo zona 4 nazivnih snaga 630 kVA te TS Hodovo zona 5 2x630 kVA) služe za priključenje fotonaponskih elektrana. Planirana površina Gospodarske zone Hodovo iznosi 127,55 ha; od toga je poduzetnicima namijenjeno 183 979 m², a za potrebe izgradnje fotonaponskih elektrana predviđeno je 900 318 m².

U nastavku je prikazan primjer izračuna i provjere kriterija relativne promjene iznosa napona u čvorištima distribucijske mreže. U blizini gospodarske zone prolaze dva 10 kV-na izvoda koja su iskorištena za prihvatanje energije iz fotonaponskih elektrana i napajanje gospodarske zone te je dodatno položen 10 kV-ni vod u duljini 8 km od TS 110/35/10 Stolac. U analizi su navedeni samo iznosi napona na trafostanicama u Gospodarskoj zoni Hodovo koji su napojeni s novog izvoda na koji je priključeno 7 fotonaponskih elektrana. Elektrane spojene na jednom izvodu ne utječu na naponske prilike na drugom izvodu pa elektrane spojene na drugim izvodima nisu uzete u razmatranje. Analiza je rađena u programskom paketu PowerCAD.

Analiza naponskih prilika i tokova snaga rađena je za četiri slučaja. Prvi analizira prilike prije priključenja fotonaponskih elektrana. Drugi slučaj analizira priključenje fotonaponskih elektrana s faktorom snage izmjenjivača jedan. Treći slučaj analizira priključenje fotonaponskih elektrana, ali sa smanjenim faktorom snage kako se ne bi promijenio napon na mjestu priključenja. Četvrti slučaj analizira priključenje fotonaponskih elektrana s faktorom snage jedan i maksimalnim mogućim priključenjem aktivne snage, a da promjena napona na mjestu priključenja ne bude veća od 3%. Navedena vrijednost faktora snage ovisi o konfiguraciji mreže. U slučaju 3 vidi se da se smanjila predana aktivna energija u sustav, ali da se povećala vrijednost struja i da je došlo do povećanja gubitaka u sustavu.



Slika 6. Naponske prilike u Gospodarskoj zoni Hodovo s uključenim elektranama

Tablica I. Vrijednost za fotonaponske elektrane na izvodu TS 110/35/10 kV - GZ Hodovo

	Fotonaponske elektrane na TS Hodovo zona				Fotonaponske elektrane na TS Hodovo zona 2			
	Prividna snaga elektrana (kVA)	Radna snaga elektrane (kW)	Reaktivna snaga elektrane (kVA _r)	Cos φ	Prividna snaga elektrana (kVA)	Radna snaga elektrane (kW)	Reaktivna snaga elektrane (kVA _r)	Cos φ
Slučaj 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Slučaj 2	260	260	0	1	650	650	0	1
Slučaj 3	260	100	85	0,76	650	585	300	0,89
Slučaj 4	630	0	0	1	630	630	0	1

Tablica II. Vrijednost na izvodu TS 110/35/10 kV - GZ Hodovo

	Vrijednost struje na vodu TS 110/35/10 kV - GZ Hodovo (A)	Vrijednost radne snage prema GZ Hodovo (kW)	Vrijednost reaktivne snage prema GZ Hodovo (kVA _r)
Slučaj 1	13.28	219	46,11
Slučaj 2	38.16	-679	77,18
Slučaj 3	44,56	-551	574
Slučaj 4	57.02	-1019	97,23

5. ZAKLJUČAK

Uvođenjem poticaja naglo se povećala zainteresiranost za izgradnju distribuiranih izvora. U budućnosti je potrebno posvetiti veću pažnju aktivnoj regulaciji napona u distribucijskim mrežama na koje su priključeni distribuirani izvori kako bi se omogućilo priključenje veće snage distribuiranih izvora uz smanjenje gubitaka.

Pravilnim planiranjem mreža na kojima postoje distribuirani izvori smanjit će se nadogradnja mreža i transformatorskih stanica. Glavni problem kod planiranja mreža predstavlja način odabira lokacija za izgradnju elektrana. Investitori odabiru za sebe najpovoljniju lokaciju, a takve lokacije često zahtijevaju velika ulaganja u distribucijsku mrežu te ne doprinose povećanju efikasnosti distribucijske mreže. Potrebno je izmijeniti postojeću zakonsku regulativu s ciljem približavanja distribuiranih izvora konzumu. Navedene izmjene trebaju omogućiti priključenje distribuiranih izvora tek s prijeko potrebnim i opravdanim ulaganjima u distribucijsku mrežu i povećanje efikasnosti mreže.

6. LITERATURA

- [1] V. Neimane: „On development planning of electricity distribution networks“, Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electric Power Systems, Stockholm, 2001.
- [2] A. Hagehaugen: „Voltage Control in Distribution Network with Local Generation“, Norwegian University of Science and Technology, Department of Electric Power Engineering, June 2014.
- [3] M. Tanasković, T. Bojković, D. Perić: „Distribucija električne energije“, Beograd, 2007.
- [4] F. A. Viawan: „Steady State Operation and Control of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation“, Chalmers University of technology, Goteborg, 2006.
- [5] http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE, 13. rujan 2015.g.
- [6] J. Saletović, T. Konjić: „Regulacija napona fotonaponskim invertorima“, BH K CIGRE 12. Savjetovanje, 2015.
- [7] A. Mehinović, M. Kušljagić: „Pregled metoda regulacije napona u aktivnim distributivnim mrežama“, BK K CIGRE 12. Savjetovanje, 2015.
- [8] Mrežna pravila distribucije JP-a EP HZHB d.d. Mostar, 2008.
- [9] „Voltage control in low voltage networks by Photovoltaic Inverters-PVET.dk“, Danfoss Solar Invertors A/S, ožujak 2013.