

STRATEGIJE REGULACIJE NAPONA I FAKTORA SNAGE ZA SINHRONE GENERATORE U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

S. ĐUKIĆ, „Elektrovojvodina“ d.o.o. Novi Sad, Srbija
O. ČOLIĆ, „Elektrovojvodina“ d.o.o. Novi Sad, Srbija

UVOD

U proteklih nekoliko godina svedoci smo ekspanzije zahteva za priključenje elektrana na distributivni sistem električne energije (DSEE), kao rezultat podsticajnih mera Vlade Republike Srbije (RS) i pojave efikasnijih tehnologija za proizvodnju električne energije. Elektrane utiču na rad DSEE (na tokove snaga, vrednosti struja kratkih spojeva, kvalitet električne energije, rad i koordinaciju relejne zaštite, itd.), te na postojeće koncepte poslovanja distributivne kompanije (na održavanje, restauraciju napajanja nakon kvara, planiranje DSEE, itd.) [1]. Uticaj zavisi od snage elektrane, korišćene tehnologije i parametara mreže na mestu priključenja.

Naponi u DSEE moraju se održavati u određenim granicama, čime se obezbeđuje da oprema korisnika i oprema u distributivnoj mreži (DM) funkcionišu na zadovoljavajući način. To se postiže odgovarajućim dimenzionisanjem DM (izborom odgovarajućeg tipa provodnika), podešavanjem prenosnog odnosa u transformatorskim stanicama prenosnih odnosa 35/10 kV/kV i 20(10)/0,4 kV/kV, kao i automatskom regulacijom napona (ARN) u transformatorskim stanicama prenosnog odnosa 110/x kV/kV.

Regulacija napona u konvencionalnim DSEE projektovana je na pretpostavkama centralizovane proizvodnje električne energije i smera struje od prenosne mreže, preko transformatora prenosnog odnosa 110/x kV/kV ka sredjenaponskoj i niskonaponskoj mreži. Priključenjem elektrana te pretpostavke više ne važe [2]. Elektrane menjaju tokove snaga i naponske prilike u DM i utiču na rad postojećih sistema regulacije napona. Uticaj je veći u ruralnim mrežama koje su slabije (manjih snaga trolnog kratkog spoja) i sa većim odnosom ekvivalentne otpornosti i reaktanse [3].

Važan aspekt uticaja na DSEE je sposobnost elektrane da proizvodi reaktivnu energiju i vrši regulaciju napona. Pojedine tehnologije, poput asinhronih generatora, ne mogu obezbediti tu funkciju. Druge tehnologije, poput sinhronih generatora (SG), su u stanju da vrše kontrolu reaktivne snage i mogu, u koordinaciji sa tradicionalnim sistemima, učestvovati u regulaciji napona u DM [1, 4]. Sinhrono mašine se tipično koriste u elektranama sa generatorima snaga reda nekoliko stotina kW ili nekoliko MW, koje kao pogonsko gorivo koriste biomasu, gas, itd. [5].

Takođe bitan aspekt uticaja elektrane je uticaj na gubitke u DSEE. Do izvesnog nivoa injektiranja snage, elektrana smanjuje struju i gubitke u vodu na koji je priključena. Iznad tog nivoa gubici se povećavaju. Ukoliko snaga proizvodnje elektrane približno odgovara snazi potrošnje i ukoliko je elektrana locirana u blizini opterećenja može se postići značajno smanjenje gubitaka [6].

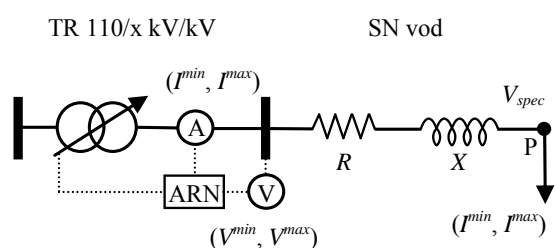
Rad je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju opisan je sistem ARN u DM RS; u trećem poglavlju razmatraju se odredbe Pravila o radu distributivnog sistema koje se odnose na predmetnu tematiku; u četvrtom poglavlju dat je pregled strategija regulacije za SG u DM; u petom poglavlju razmatran je uticaj elektrane na sistem ARN u DM RS; na primeru priključenja SG na mrežu naponskog nivoa 20 kV, šestim poglavljem analizira se uticaj zadatog faktora snage SG na naponske prilike i gubitke snage u DM; u sedmom poglavlju dati su osnovni zaključci rada.

SISTEM ARN U DM RS

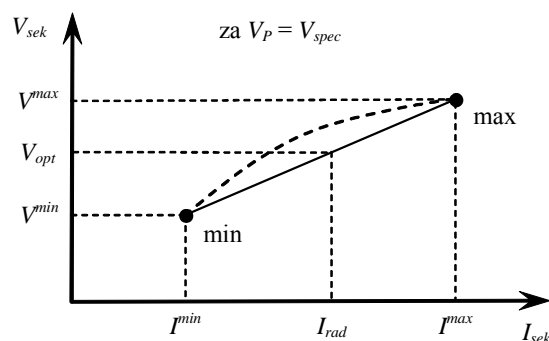
U DM RS transformatori prenosnog odnosa 110/x kV/kV opremljeni su sistemom ARN, čija je svrha da delovanjem na regulacionu preklonku na primaru transformatora održava vrednosti napona u svim čvorovima sredjenaponske mreže pripadajućeg konzuma u određenim granicama. Delovanje ARN tretira se kao problem kompenzacije pada napona na jedinstvenomvodu. Odgovarajući model zasniva se na [7]:

1. predstavi DM sa transformatorom prenosnog odnosa 110/x kV/kV sa ARN i jedinstvenim (ekvivalentnim) vodom, sa rednim parametrima R i X , na čijem je kraju priključen jedinstven (ekvivalentan) potrošač P , Slika 1,
2. proceni (proračunu) minimalnog (I^{min}) i maksimalnog (I^{max}) opterećenja na sekundaru transformatora, i
3. proračunu optimalnih vrednosti napona na njegovim sredjenaponskim sabirnicama (V^{min} , V^{max}).

Rezultat proračuna za dva pomenuta režima su tačke „min“ i „max“, prikazane na Slici 2. Te tačke određuju zakon regulacije ARN, Slika 2, koji predstavlja funkcionalnu zavisnost napona sekundara transformatora V_{sek} od njegovog opterećenja, struje I_{sek} . Uobičajeni oblik zakona regulacije jeste prava ili parabolična linija [7].



SLIKA 1 – JEDNOSTAVNA DM



SLIKA 2 – ZAKON REGULACIJE ARN

Ideja kompenzacije pada napona, ustanovljena za jednostavnu DM prikazanu na Slici 1, sastoji se od kontrole napona na sekundaru transformatora, tako da se na kraju ekvivalentnog voda, kod ekvivalentnog potrošača, realizuje unapred specificirana (konstantna) vrednost napona V_{spec} . Ta vrednost je nezavisna kako od struje potrošača, tako i od promene napona na visokonaponskoj strani transformatora. Time je za poznate parametre voda definisan zakon regulacije ARN u vidu prave prikazane na Slici 2 [7].

PRAVILA O RADU DISTRIBUTIVNOG SISTEMA

Pravilima o radu distributivnog sistema [8] propisano je da faktor snage elektrane koja se priključuje na DM treba da bude veći od ili jednak 0,95. Za SG predviđena je primena konstantne pobude ili automatskog regulatora faktora snage, a implementacija regulacije napona se ne tretira.

Novom verzijom Pravila o radu distributivnog sistema (u pripremi za usvajanje) propisuje se implementacija regulacije napona na krajevima SG. Nominalni faktor snage SG mora biti 0,8, a regulacija napona se mora obavljati u čitavom opsegu koji je definisan faktorom snage pod uslovom da se ne ugrozi normalan i stabilan rad generatora. Izuzetno, operator distributivnog sistema (ODS) može zahtevati faktor snage veći od 0,8 ili implementaciju regulacije faktora snage, ukoliko analize pokažu da je to bolje rešenje za DSEE.

Navedene odredbe nove verzije Pravila o radu distributivnog sistema definišu načela problematike koja se razmatra ovim radom. Sledećim korakom potrebno je istražiti koje se strategije regulacije napona i faktora snage SG primenjuju u DM drugih zemalja, te identifikovati njihove prednosti i nedostatke. Analiziranjem karakterističnih slučajeva moguće je definisati optimalne zakone regulacije. Ono što je važno napomenuti je da ODS u RS nemaju dovoljno iskustva sa efektima koje odgovarajući sistemi i zakoni regulacije mogu imati na rad DSEE.

POSTOJEĆE STRATEGIJE REGULACIJE ZA SG U DM

SG proizvode aktivnu i mogu da proizvode ili troše reaktivnu energiju. Tradicionalno, ODS nevoljno dopušta SG da vrši regulaciju napona, iz dva razloga. Prvo, strategiju regulacije napona SG potrebno je iskoordinisati sa drugim sistemima regulacije u DM [9, 10, 11]. Drugo, generatori koji se priključuju na DM su malih snaga. Da bi mogao da poveća vrednost napona, SG mora injektirati veliku reaktivnu snagu, što može dovesti do prorade

relejne zaštite i ispada generatora [9]. Stoga, SG obično radi sa konstantnim faktorom snage [12] ili u određenom opsegu faktora snage [13].

U nastavku, razmatrani su sledeći načini rada SG priključenog na DM:

1. sa regulacijom faktora snage,
2. sa regulacijom napona,
3. sa kombinacijom regulacije faktora snage i regulacije napona, i
4. sa regulacijom reaktivne snage.

Rad SG sa regulacijom faktora snage

Ovaj način rada SG omogućava ODS priključenje na tradicionalan „podesi i zaboravi“ način. Izbegavaju se potencijalne poteškoće koordinacije kontrole napona između više generatorskih jedinica, kao i sa postojećim sistemom regulacije u DM. SG mogu da rade sa konstantnim faktorom snage (na primer $\cos\varphi = 1$) ili u određenom opsegu faktora snage (na primer između $\cos\varphi = 0,95$ induktivno i $\cos\varphi = 0,95$ kapacitivno). Pri definisanju vrednosti faktora snage mora se uvažiti pogonska karta SG. Proizvođači sinhronih mašina obično ograničavaju rad SG od $\cos\varphi = 0,95$ induktivno do $\cos\varphi = 0,8$ kapacitivno [14].

S obzirom da se proizvodnjom reaktivne energije ograničava proizvodnja aktivne, proizvođačima električne energije najviše odgovara faktor snage $\cos\varphi = 1$ [15]. U DM u kojima povećanje vrednosti napona predstavlja prepreku priključenju elektrane, usvaja se induktivni faktor snage, sa tipičnom vrednošću $\cos\varphi = 0,95$ [13]. Ono što treba imati na umu je da se smanjenjem faktora snage u induktivnom režimu povećava ugao rotora, što može dovesti do gubitka stabilnosti generatora [13]. Pored toga, induktivni režim rada dovodi do povećanja gubitaka u DM [16].

Strategija koja se takođe koristi je postavljanje različitih referentnih vrednosti faktora snage u različitim vremenskim periodima [1]. U načelu, taj koncept podrazumeva kapacitivni režim rada tokom perioda vršnih opterećenja i induktivni režim rada tokom perioda malih opterećenja. Takva strategija ima pozitivan efekat na naponske prilike i gubitke u DM [1].

Rad SG sa regulacijom napona

Pri regulaciji napona, promenom pobudne struje SG menja se smer i vrednost reaktivne snage (u dozvoljenim granicama) radi održavanja napona u referentnoj tački. Referentna tačka može biti ili krajevi generatora ili određena tačka u DM (na primer višenaponske sabirnice transformatora preko kojeg se generator priključuje na DM), kada se primenjuje princip kompenzacije pada napona. Napon referentne tačke se dovodi na ulaz regulatora koji ocenjuje grešku (razliku u odnosu na referentnu vrednost napona) i prepodešava vrednost pobudne struje [14]. Pri povećanju vrednosti napona referentne tačke, generator troši, a pri smanjenju proizvodi reaktivnu energiju. Osetljivost regulatora treba da, sa jedne strane, bude dovoljno velika da obezbedi odgovarajuću kontrolu napona, a sa druge strane, dovoljno mala da se izbegne konflikt sa drugim sistemima za automatsku kontrolu napona [10].

Efikasnost regulacije napona zavisi od odnosa veličine (snage) generatora i snage kratkog spoja DM u referentnoj tački [3, 17]. Za manji odnos, uticaj generatora na napon u referentnoj tački može biti mali, tako da je za male promene napona potrebno proizvoditi/trošiti reaktivnu energiju sa velikom snagom, što ograničava snagu sa kojom se proizvodi aktivna energija. Povećanje napona u referentnoj tački može da izazove da SG izgubi sinhronizacioni momenat, a smanjenje napona prekomerno zagrevanje SG ili prekomernu struju pobude [18]. U praksi, kada se reaktivna snaga približi svojim granicama, SG prelazi iz moda regulacije napona u mod regulacije konstantnog faktora snage ili konstantne reaktivne snage [3, 12].

Mana moda regulacije napona je to što je zakon regulacije potrebno iskoordinisati sa zakonima regulacije drugih sistema koji regulišu napon u obližnjim tačkama DM [17]. Sa druge strane, za priključenje većeg broja elektrana bez implementacije sistema kontrole napona, vrednosti napona u DM mogu porasti iznad dozvoljenih vrednosti [3].

Rad SG sa kombinacijom regulacije faktora snage i regulacije napona

Oba gore razmatrana pristupa regulaciji imaju svoje prednosti i nedostatke sa aspekta uticaja na DSEE. Nijedan od pristupa ne može biti optimalan za sva stanja DM. Iz tog razloga nastale su strategije koje kombinuju dva razmatrana pristupa.

U [19] predložen je pristup prema kojem SG radi sa konstantnim faktorom snage $\cos\varphi = 1$, ukoliko vrednost napona na krajevima generatora leži u granicama između unapred definisane minimalne i maksimalne vrednosti.

Ukoliko to nije slučaj, napon se održava na odgovarajućoj vrednosti. Tako, predloženim pristupom se obezbeđuje da se regulacija napona vrši samo kada je to neophodno, tj. u slučajevima kada napon u referentnoj tački izađe van dozvoljenih granica.

U [20] predložen je sličan pristup, prema kojem SG održava napon u referentnoj tački u određenom opsegu. SG normalno radi sa konstantnim faktorom snage. Ukoliko napon u referentnoj tački počne da se približava minimalnoj vrednosti, odnos reaktivne i aktivne snage se povećava i obrnuto, ukoliko napon počne da se približava maksimalnoj vrednosti, odnos reaktivne i aktivne snage se smanjuje.

Rad SG sa regulacijom reaktivne snage

U [11] predložen je pristup regulaciji reaktivne snage. Cilj predloženog pristupa nije kontrola napona, već da se obezbedi da priključenje i rad generatora ne izaziva značajno povećanje vrednosti napona: rešenje za koje ODS zadržava svoju tradicionalnu ulogu regulacije napona zbog potrošnje električne energije. Naponski profil DM za ovu strategiju regulacije vrlo je sličan naponskom profilu bez generatora. Pristup se sastoji u pronalaženju vrednosti reaktivne snage za koju je povećanje vrednosti napona usled injektiranja aktivne snage minimalno. Da bi se ta vrednost reaktivne snage mogla odrediti, potrebni su podaci o otpornosti i reaktansi dela sredjenaponskog voda prema napojnoj transformatorskoj stanici.

Poređenje strategija regulacije faktora snage, napona i reaktivne snage

U nastavku se razmatraju uticaji opisanih strategija regulacije na rad DM.

Za minimalni režim opterećenja, strategija regulacije konstantnog kapacitivnog faktora snage može rezultovati vrednostima napona iznad maksimalno dozvoljene vrednosti, i obrnuto, za maksimalni režim opterećenja, strategija regulacije konstantnog induktivnog faktora snage može rezultovati vrednostima napona ispod minimalno dozvoljene vrednosti. Za izabran koncept regulacije napona, verovatno je da će za oba režima opterećenja vrednosti napona biti u dozvoljenim granicama [15].

Strategije regulacije konstantnog faktora snage (za tri vrednosti faktora snage: $\cos\varphi = 1$, $\cos\varphi = 0,95$ induktivno i $\cos\varphi = 0,95$ kapacitivno) i strategija regulacije napona međusobno su poređene u [21] sa različitim aspektima uticaja na DM. Dobijeni su sledeći rezultati:

1. Sa aspekta promene napona usled ispada generatora, za oba režima opterećenja (minimalni i maksimalni), najmanji uticaj se ima za strategiju regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 1$, a najveći za strategiju regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 0,95$ kapacitivno.
2. Sa aspekta dnevnih kolebanja napona u DM, strategija regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 0,95$ induktivno rezultuje maksimalnim rasponom oscilacija vrednosti napona, dok strategija regulacije napona rezultuje najmanjim kolebanjima.
3. Sa aspekta vrednosti struja kratkih spojeva, najveća vršna vrednost struje kratkog spoja dobija se za strategiju regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 0,95$ kapacitivno, a najmanja za strategiju regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 0,95$ induktivno. Najveća efektivna vrednost struje kratkog spoja dobija se za strategiju regulacije napona. Za strategiju regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 0,95$ induktivno, generator nije u stanju da održava vrednost struje kratkog spoja, što može biti problem sa aspekta detekcije kvara.
4. Sa aspekta povećanja margine naponske stabilnosti, najmanji uticaj se ima za strategiju regulacije konstantnog faktora snage $\cos\varphi = 0,95$ induktivno, a najveći za strategiju regulacije napona.
5. Sa aspekta ugaone tranzijentne stabilnosti, strategija regulacije napona daje najbolje rezultate.

U [15] pokazano je da za maksimalni režim opterećenja strategija regulacije napona rezultuje većim smanjenjem gubitaka u odnosu na strategiju regulacije faktora snage, dok je za minimalni režim opterećenja situacija obrnuta: strategija regulacije napona rezultuje većim gubicima u DM.

Strategija regulacije reaktivne snage i strategija regulacije faktora snage poređene su u [11]. Zaključak je da su kolebanja napona u DM mnogo veća za strategiju regulacije faktora snage, dok se za strategiju regulacije reaktivne snage mogu očekivati veći gubici.

Sistemi centralne regulacije

Svi gore razmatrani pristupi regulacije pripadaju grupi distribuirane kontrole. Prednost distribuirane kontrole je to što ne zahteva poznavanje DM kao celine, oslanjajući se samo na signale dobijene merenjem u jednoj tački. Kao takve, strategije iz ove grupe ne zahtevaju obimnu primenu senzora i komunikacione opreme, kao ni inteligentnog algoritma upravljanja sistemima regulacije. Međutim, regulatori SG moraju se podesiti tako da nisu u konfliktu sa drugim sistemima regulacije [9].

Centralizovani pristupi regulaciji zahtevaju značajne investicije u mernu, komunikacionu i upravljačku opremu, što ih čini teškim za primenu za situaciju sa velikim brojem elektrana priključenim na DM [11]. Slično pristupu koji se koristi u prenosnim mrežama, kontroler distribuiranog sistema upravljanja se koristi za sistemsku kontrolu napona i upravljanje reaktivnim snagama u mreži. Isti kontroler prima izmerene signale napona, tokova snaga i statusa opreme sa izabranih lokacija, vrši estimaciju stanja kako bi odredio naponski profil mreže, te izvršio odgovarajući dispečing generatora i drugih resursa za regulaciju napona [9].

UTICAJ ELEKTRANA NA SISTEM ARN U DM RS

Sistem ARN u DM RS koncipiran je za centralizovanu proizvodnju električne energije i pasivne DM sa striktno jednosmernim tokovima snaga (od napojnog transformatora ka srednjenaponskoj i niskonaponskoj mreži). U aktivnim DM, postojeći koncept ARN, koji podrazumeva slične naponske profile svih izvoda napojnog transformatora, može postati neadekvatan [16]. Pri redefinisavanju zakona regulacije potrebno je uvažiti i vrednosti napona ili drugih veličina izmerenih ili estimiranih u određenim tačkama DM.

Elektrane nameću niz izazova u vezi sa regulacijom napona. Na primer, neka se razmatra veliki SG priključen na DM i vršno opterećenje konzuma. Injektiranjem aktivne i eventualno reaktivne snage, generator smanjuje struju kroz napojni transformator. Regulator ARN menja poziciju regulacione preklopke i smanjuje vrednost napona na srednjenaponskim sabirnicama napojnog transformatora. Tako, vrednosti napona u pojedinim čvorovima mogu biti ispod minimalno dozvoljene vrednosti. Za priključenje SG u blizini srednjenaponskih sabirnica napojnog transformatora, strategija regulacije napona generatora mora biti pažljivo iskoordinisana sa zakonom regulacije regulatora napojnog transformatora. Takođe, potrebno je obezbediti da sistem ARN ispravno radi i pri plasmanu energije iz distributivne u prenosnu mrežu.

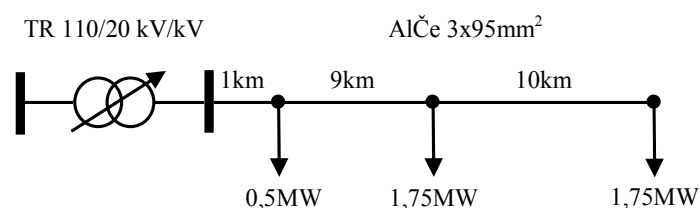
UTICAJ ZADATOG FAKTORA SNAGE SG NA NAPONSKE PRILIKE I GUBITKE U 20 kV DM

U ovom poglavlju analizira se uticaj zadatog faktora snage SG na naponske prilike i gubitke snage u DM naponskog nivoa 20 kV. Razmatra se priključenje jednog SG u različitim tačkama priključenja (na početku, sredini i kraju izvoda) i sa različitim vrednostima aktivne snage sa kojom predaje energiju u DSEE (10 MW, 5 MW i 1 MW), za dva režima opterećenja: maksimalni i minimalni. Razmatrani test izvodi prikazani su na Slikama 3 i 4. Prikazane vrednosti aktivnih opterećenja su za maksimalni režim. Pri proračunima usvojene su sledeće vrednosti:

- za faktor snage opterećenja vrednost 0,95,
- za odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja vrednost 0,25,
- za vrednost napona na 20 kV sabirnicama napojnog transformatora: 20,8 kV (za maksimalni režim opterećenja) i 20,4 kV (za minimalni režim opterećenja).

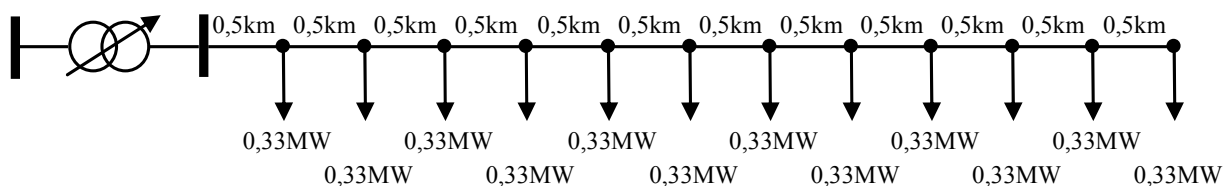
Rezultati su dati u Tabelama 1-6. Maksimalne vrednosti napona duž izvoda prikazane su u Tabelama 1 (nadzemni test izvod) i 4 (kablovski test izvod). Minimalne vrednosti napona duž izvoda date su u Tabelama 2 (nadzemni test izvod) i 5 (kablovski test izvod), a vrednosti gubitaka snage na izvodu u Tabelama 3 (nadzemni test izvod) i 6 (kablovski test izvod). Ukošenim fontom su označene vrednosti napona izvan opsega 19 kV-21,4 kV (dozvoljeno odstupanje napona u normalnom pogonu pri planiranju mreže, definisano u [8]), a dodatno podebljanim fontom vrednosti napona izvan opsega 18 kV-22 kV (granice u kojima je operator distributivnog sistema dužan da održava napon, u skladu sa Uredbom o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom [22]).

Ono što je važno primetiti je da su za priključenje generatora na početku izvoda vrednosti napona i gubitaka na izvodu iste kao u slučaju bez generatora. Takođe, treba napomenuti da efekat smanjenja gubitaka na napojnom transformatoru zbog priključenja generatora nije razmatran.



SLIKA 3 – TEST NADZEMNI IZVOD 20 kV DM

TR 110/20 kV/kV

XHE-A 3x1x150mm²

SLIKA 4 – TEST KABLOVSKI IZVOD 20 kV DM

TABELA 1 – MAKSIMALNE VREDNOSTI NAPONA NA TEST NADZEMNOM 20 kV IZVODU (kV)

Lokacija generatora	Nivo opterećenja	SG snage 1MW sa faktorom snage			SG snage 5MW sa faktorom snage			SG snage 10MW sa faktorom snage		
		0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap
početak izvoda	minimalni	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	maksimalni	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80
sredina izvoda	minimalni	20,40	20,40	20,42	20,66	20,94	21,21	21,03	21,59	22,11
	maksimalni	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	21,08	20,92	21,48	22,01
kraj izvoda	minimalni	20,40	20,43	20,54	20,94	21,51	22,03	21,50	22,63	23,62
	maksimalni	20,80	20,80	20,80	20,80	21,15	21,69	21,20	22,35	23,36

TABELA 2 – MINIMALNE VREDNOSTI NAPONA NA TEST NADZEMNOM 20 kV IZVODU (kV)

Lokacija generatora	Nivo opterećenja	SG snage 1MW sa faktorom snage			SG snage 5MW sa faktorom snage			SG snage 10MW sa faktorom snage		
		0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap
početak izvoda	minimalni	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12	20,12
	maksimalni	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66
sredina izvoda	minimalni	20,22	20,28	20,33	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	maksimalni	19,77	19,83	19,89	20,15	20,44	20,72	20,56	20,80	20,80
kraj izvoda	minimalni	20,31	20,37	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	maksimalni	19,87	19,99	20,11	20,49	20,79	20,80	20,73	20,80	20,80

TABELA 3 – GUBICI SNAGE NA TEST NADZEMNOM 20 kV IZVODU (kW)

Lokacija generatora	Nivo opterećenja	SG snage 1MW sa faktorom snage			SG snage 5MW sa faktorom snage			SG snage 10MW sa faktorom snage		
		0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap
početak izvoda	minimalni	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18	8,18
	maksimalni	135,34	135,34	135,34	135,34	135,34	135,34	135,34	135,34	135,34
sredina izvoda	minimalni	4,56	2,32	1,68	149,66	120,06	128,80	664,75	547,04	577,02
	maksimalni	94,31	87,05	81,49	99,18	49,50	39,73	454,30	306,68	310,67
kraj izvoda	minimalni	7,00	3,21	2,65	312,37	250,03	262,54	1320,00	1041,45	1056,16
	maksimalni	77,36	66,28	58,77	188,19	99,19	90,35	997,29	681,26	671,96

TABELA 4 – MAKSIMALNE VREDNOSTI NAPONA NA TEST KABLOVSKOM 20 kV IZVODU (kV)

Lokacija generatora	Nivo opterećenja	SG snage 1MW sa faktorom snage			SG snage 5MW sa faktorom snage			SG snage 10MW sa faktorom snage		
		0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap
početak izvoda	minimalni	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	maksimalni	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80
sredina izvoda	minimalni	20,40	20,40	20,41	20,49	20,52	20,55	20,61	20,67	20,73
	maksimalni	20,80	20,80	20,80	20,81	20,84	20,86	20,93	20,98	21,04
kraj izvoda	minimalni	20,41	20,42	20,43	20,60	20,66	20,72	20,84	20,95	21,06
	maksimalni	20,80	20,80	20,80	20,89	20,94	21,00	21,12	21,23	21,34

TABELA 5 – MINIMALNE VREDNOSTI NAPONA NA TEST KABLOVSKOM 20 kV IZVODU (kV)

Lokacija generatora	Nivo opterećenja	SG snage 1MW sa faktorom snage			SG snage 5MW sa faktorom snage			SG snage 10MW sa faktorom snage		
		0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap
početak izvoda	minimalni	20,36	20,36	20,36	20,36	20,36	20,36	20,36	20,36	20,36
	maksimalni	20,65	20,65	20,65	20,65	20,65	20,65	20,65	20,65	20,65
sredina izvoda	minimalni	20,39	20,39	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	maksimalni	20,67	20,68	20,68	20,77	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80
kraj izvoda	minimalni	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40	20,40
	maksimalni	20,69	20,70	20,71	20,79	20,80	20,80	20,80	20,80	20,80

TABELA 6 – GUBICI SNAGE NA TEST KABLOVSKOM 20 kV IZVODU (kW)

Lokacija generatora	Nivo opterećenja	SG snage 1MW sa faktorom snage			SG snage 5MW sa faktorom snage			SG snage 10MW sa faktorom snage		
		0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap	0,95 ind	1	0,95 cap
početak izvoda	minimalni	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
	maksimalni	19,28	19,28	19,28	19,28	19,28	19,28	19,28	19,28	19,28
sredina izvoda	minimalni	0,79	0,37	0,28	31,60	26,28	28,91	141,82	122,92	135,33
	maksimalni	12,69	11,55	10,71	18,28	9,50	8,43	95,47	70,12	75,22
kraj izvoda	minimalni	1,66	0,99	0,96	67,80	57,88	63,63	289,09	252,12	276,24
	maksimalni	11,27	9,60	8,56	42,74	28,17	28,95	218,66	173,32	187,79

Sa aspekta naponskih prilika, a na osnovu razmatranih primera, može se zaključiti sledeće:

- priključenjem SG podiže se naponski profil 20 kV izvoda, i
- u 20 kV kablovskim mrežama priključenje SG nije kritično sa aspekta povećanja vrednosti napona u stacionarnom režimu; naponi iznad maksimalno dozvoljene vrednosti mogu se očekivati u slučajevima priključenja na nadzemnu 20 kV mrežu, kada su kumulativno ispunjeni sledeći uslovi:
 - tačka priključenja je na velikoj električnoj udaljenosti od napojnog transformatora,
 - SG predaje aktivnu energiju u DSEE sa velikom snagom, i
 - SG radi u kapacitivnom režimu rada.

Sa aspekta gubitaka, može se zaključiti sledeće:

- najveći gubici se imaju za induktivni režim rada; za razmatrane primere, kapacitivni režim i režim rada sa faktorom snage $\cos\varphi = 1$ rezultovali su sličnim vrednostima gubitaka, i
- ukoliko snaga injektiranja SG znatno premašuje opterećenje izvoda na koji je priključen, gubici na izvodu mogu se drastično povećati.

ZAKLJUČAK

Proizvodnjom aktivne i proizvodnjom/potrošnjom reaktivne energije SG menjaju tokove snaga i naponske prilike u DM i utiču na rad postojećih sistema regulacije napona. Novom verzijom Pravila o radu distributivnog sistema propisuje se implementacija regulacije napona ili regulacije faktora snage za SG koji se priključuju na DSEE. Međutim, ODS nemaju dovoljno iskustva sa efektima koje strategije regulacije napona i faktora snage imaju na rad DSEE. Stoga, određivanje optimalne strategije i zakona regulacije, za konkretan slučaj priključenja, predstavlja težak zadatak.

Radom je dat kratak pregled četiri postojeće strategije regulacije SG priključenog na DM, sa posebnim osvrtom na uticaj koji strategije imaju na rad DM. Takođe, radom se razmatraju i izazovi priključenja elektrana sa aspekta uticaja na postojeći sistem regulacije napona u DM RS.

Uticaj zadatog faktora snage SG na naponske prilike i gubitke snage analiziran je na primerima priključenja SG na dva 20 kV test izvoda. Uticaj zavisi od mesta priključenja SG i snage sa kojom predaje energiju u DSEE, kao i od opterećenja izvoda. Najveći gubici se imaju za induktivni režim rada, dok su kapacitivni režim i režim rada sa faktorom snage $\cos\varphi = 1$, za razmatrane primere, rezultovali sličnim vrednostima gubitaka. Priključenje na 20 kV kablovsku mrežu nije kritično sa aspekta povećanja vrednosti napona u stacionarnom režimu, te se kao optimalna rešenja nameću kapacitivni režim i režim rada sa faktorom snage $\cos\varphi = 1$. Za priključenje generatora velike snage duboko u 20 kV nadzemnoj mreži, efekat povećanja vrednosti napona može nametnuti induktivni režim rada. Razmatrani primeri su pokazali da implementacija sistema regulacije napona ili faktora snage omogućuje, sa aspekta vrednosti napona u stacionarnom režimu, priključenje SG velikih snaga u 20 kV DM, na velikoj električnoj udaljenosti od napojnog transformatora, uz neželjeni efekat značajnog povećanja gubitaka.

ODS predstoji zadatak da u narednom periodu utvrde optimalne zakone regulacije SG koji se priključuju na DM i osmisle novi koncept regulacije napona u DSEE, kojim će uvažiti prisustvo SG i drugih elektrana.

LITERATURA

- [1] Quezada V.H.M., Abbad J.R. and Román T.G.S., 2006, "Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 21, No.2", pp. 533-540.
- [2] Viawan F.A. and Karlsson D., 2008, "Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol. 23, No.2", pp. 1079-1087.

- [3] Carpaneto E., Chicco G., De Donno M. and Napoli R., 2004, "Voltage controllability of distribution systems with local generation sources", "Bulk Power System Dynamics and Control", Cortina d'Ampezzo, Italy, pp. 261-273.
- [4] Caldon R., Rossetto F. and Scala, A., 2003, "Reactive power control in distribution networks with dispersed generators: a cost based method", "Electric Power Systems Research", "Vol. 64, No. 3", pp. 209-217.
- [5] Ackermann T. and Knyazkin V., 2002, "Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects", "IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific", "Vol. 2", 1357-1362.
- [6] Kojovic Lj., 2002, "Impact DG on voltage regulation", "IEEE Power Engineering Society Summer Meeting", "Vol. 1", Chicago, Illinois, USA, pp. 97-102.
- [7] Švenda G., Strezoski V. i Bibić R., 2008, "Regulacija napona u eksploataciji distributivnih mreža", "Elektroprivreda", "Br. 3", str. 28-42.
- [8] "Pravila o radu distributivnog sistema", "Službeni glasnik RS", Br. 8/2010.
- [9] Vovos P.N., Kiprakis A.E., Wallace A.R. and Harrison G.P., 2007, "Centralized and distributed voltage control: impact on distributed generation penetration", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 22, No. 1" pp. 476-483.
- [10] Bollen M.H.J. and Sannino A., 2005, "Voltage control with inverter-based distributed generation", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol. 20, No.1", pp. 519-520.
- [11] Carvalho P.M.S., Correia P.F. and Ferreira L.A.F., 2008, "Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 23, No. 2", pp. 766-772.
- [12] Kojovic Lj., 2003, "Impact of DG and voltage regulator interaction on distribution system voltage regulation", "17th International Conference on Electricity Distribution", "Ses. 4, No. 31", Barcelona, Spain, pp. 1-4.
- [13] Keane A., Ochoa L.F., Vittal E., Dent C.J. and Harrison G.P., 2011, "Enhanced utilisation of voltage control resources with distributed generation", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 26, No. 1", pp. 252-260.
- [14] Pandiaraj K. and Fox B., 2000, "Novel voltage control for embedded generators in rural distribution networks", "International Conference on Power System Technology", "Vol. 1", Perth, WA, pp. 457-462.
- [15] Freitas W., Vieira J.C.M., Morelato A., da Silva L.C.P., da Costa V.F. and Lemos F.A.B., 2006, "Comparative analysis between synchronous and induction machines for distributed generation applications", "IEEE Transactions on Power Systems", "Vol. 21, No. 1", pp. 301-311.
- [16] Liew S.N. and Strbac G., 2002, "Maximising penetration of wind generation in existing distribution networks", "IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution", "Vol. 149, No. 3", pp. 256-262.
- [17] Walling R.A., Saint R., Dugan R.C., Burke J. and Kojovic Lj., 2008, "Summary of distributed resources impact on power delivery systems", "IEEE Transactions on Power Delivery", "Vol. 23, No. 3", pp. 1636-1644.
- [18] Eberly T.W. and Schaefer R.C., 2002, "Voltage versus var/power-factor regulation on synchronous generators", "IEEE Transactions on Industry Applications", "Vol. 38, No. 6", pp. 1682-1687.
- [19] Bompard E., Carpaneto E., Chicco G. and Napoli R., 1999, "Voltage control in radial systems with dispersed generation", "International Conference on Electric Power Engineering", Budapest, Hungary.
- [20] Kiprakis A.E and Wallace A.R., 2004, "Maximising energy capture from distributed generators in weak networks", "IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution", "Vol. 151, No. 5", pp. 611-618.
- [21] Freitas W., Vieira J.C.M., Morelato A. and Xu W., 2005, "Influence of excitation system control modes on the allowable penetration level of distributed synchronous generators", "IEEE Transactions on Energy Conversion", "Vol. 20, No. 2", pp. 474-480.
- [22] "Uredba o uslovima isporuke i snadbevanja električnom energijom", "Službeni glasnik RS", Br. 63/2013.