Broj rada: R5-14
DOI:10.46793/CIRED2026.R5-14_180

ТРЕТМАН РЕГУЛАЦИЈЕ НАПОНА У ДИСТРИБУТИВНОМ СИСТЕМУ РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ

VOLTAGE REGULATION TREATMENT IN THE DISTRIBUTION SYSTEM OF THE REPUBLIC OF SERBIA

Марина МАРИНКОВИЋ, Електродистрибуција Србије д.о.о. Београд, Република Србија*
Обренко ЧОЛИЋ, Електродистрибуција Србије д.о.о. Београд, Република Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

Правилима о раду дистрибутивног система Републике Србије (ДС РС) предвиђено је да електране, које се на ДС прикључују преко уређаја енергетске електронике, као што су и соларне електране, морају имати могућност аутоматске регулације фактора снаге. Ближе одреднице о томе на који начин би се регулација фактора снаге спроводила за сада не постоје. Изменама Закона о енергетици које су ступиле на снагу у децембру 2024. године у регулативу РС су уведене нефреквентне помоћне услуге, у које спада и регулација напона у стационарном стању. Према одредбама тог закона, свим учесницима на тржишту електричне енергије који су у могућности да пруже нефреквентне помоћне услуге треба омогућити да их пружају оператору дистрибутивног система. У овом раду је приказан критеријум за прикључење електрана који је дефинисан Правилима о раду ДС у погледу дозвољених напона у стационарном режиму и приказани су резултати прорачуна промене напона у карактеристичним тачкама ДС, уз примену стандардне стратегије регулације напона у присуству дистрибуираних електрана. На основу описаних одредби важеће регулативе у РС и приказаних резулатата симулације изабраних резима рада ДС дати су закључци о могућностима и предусловима за коришћење нефреквентне помоћне услуге регулације напона у стационарном стању у ДС РС.

Кључне речи: Регулација напона, дистрибуиране електране

ABSTRACT

The Rules on the Operation of the Distribution System of the Republic of Serbia (DS RS) stipulate that power plants connected to the DS via power electronics devices, such as solar power plants, must have the ability to automatically regulate the power factor. There are currently no detailed specifications on how power factor regulation would be implemented. Amendments to the Energy Law that entered into force in December 2024 introduced non-frequency ancillary services into the RS regulations, which include steady-state voltage regulation. According to the provisions of that law, all participants in the electricity market who are able to provide non-frequency ancillary services should be allowed to provide them to the distribution system operator. This paper presents the criteria for connecting power plants, which are defined by the Rules on the Operation of the DS in terms of permitted voltages in the

* Marina Marinković, marina.marinkovic@es.rs; Obrenko Čolić, obrenko.colic@es.rs

stationary mode, and presents the results of calculating the voltage change at characteristic points of the DS, with the application of a standard voltage regulation strategy in the presence of distributed power plants. Based on the described provisions of the applicable regulation in the RS and the presented simulation results of selected DS operation schedules, conclusions are drawn about the possibilities and prerequisites for using the non-frequency auxiliary service of voltage regulation in the stationary mode in the DS of the RS.

Key words: Voltage regulation, distributed power plants

1. УВОД

Надлежност над електроенергетским системом (ЕЕС) Републике Србије (РС) је подељена између оператора преносног система (ОПС) и оператора дистрибутивног система (ОДС), са врло прецизним границама и надлежностима, које су дефинисане Законом о енергетици [1]. У надлежности ОПС су електроенергетски објекти (ЕЕО) високог напона (ВН), у које спадају 110 kV, 220 kV и 400 kV напони. У надлежности ОДС су ЕЕО средњег напона (СН), у које спадају 35 kV, 20 kV и 10 kV напони, као и ЕЕО ниског 0,4 kV напона (НН). Таква напонска структура дистрибутивне мреже (ДМ) је одређена Правилима о раду ДС [2], тако да се наведени напони на СН мрежи могу сматрати „типизираним“ називним напонима ДМ у РС. У ДМ постоје други СН (3 kV, 6 kV, 6,3 kV), који би у перспективи требали да се уподобе са типизираним називним напонима. Уредбом о условима испоруке и снабдевања електричном енеријом [3] дефинисана су дозвољена одступања од називног напона, док су у [2] дефинисане граничне вредности напона за планирање ДМ, по типизираним називним напонима ДМ.

Напони у ДМ се одржавају у одређеним границама, чиме се обезбеђује да опрема корисника и опрема у ДМ функционишу на задовољавајући начин. То се постиже одговарајућим димензионисањем ДМ (избором одговарајућег типа проводника), подешавањем преносног односа у трансформаторским станицама (ТС) преносних односа СН/СН и СН/НН, као и аутоматском регулацијом напона (АРН) у ТС преносног односа ВН/СН. АРН који се користи у ТС ВН/СН је у надложности ОДС. Због важности и значаја, као и због потребе да се карактеристике уређаја за АРН унифицирају, постојала је посебна препорука некадашње Здружене електропривреде, ЗЕП ТП-19, [4], у којој су дефинисане основне техничке карактеристике АРН.

Регулација напона у конвенционалним дистрибутивним системима (ДС) је пројектована и изведена на претпоставкама централизоване производње електричне енергије и смера струје од преносне мреже, преко трансформатора ВН/СН ка СН и НН мрежи. У таквим мрежама енергетски трансформатори (ЕТ) у ТС ВН/СН су „регулациони“ ЕТ, са могућношћу промене односа трансформације под оптерећењем, док ЕТ у ДМ на нижим напонским нивоима имају отцепе за промену односа трансформације, али се промена преносног односа ЕТ мора вршити у безнапонском стању, што захтева искључење ЕТ.

Прикључењем дистрибуираних електрана (ДЕ) те претпоставке више не важе [5, 6]. Од некада пасивне ДМ, интеграцијом ДЕ су постале активне, са двосмерним токовима активне снаге. Светски стандарди су пратили ту промену, што се може видети на примеру генезе америчког стандарда, којим су дефинисани услови интерконекције ДЕ и осталих дистрибуираних ресурса (ДР) са ДМ [7, 8]. У верзији стандарда из 2003. год. експлицитно је било наведено да ДЕ не учествују у регулацији напона на месту прикључења на ДМ. Амандманом на стандард из 2014. године [7] дефинисано је да ДЕ

могу бити оспособљене да активно учествују у регулацији напона у ДМ, док је изменом стандарда у верзији из 2018. год. уведена обавеза за ДЕ да морају бити оспособљене да активно учествују у регулацији напона у ДМ [8]. Слична је ситуација била и у другим развијеним земљама, па је тако у литератури [9], која је први пут објављена 2000. год, наведено да је у Уједињеном Краљевству систем тарифа такав да произвођачи електричне енергије немају мотивацију за ангажовањем реактивне снаге, којом би утицали на напонски профил, чак и у ситуацији када због тога морају прихватити веће трошкове прикључења ДЕ на ДСЕЕ. У Уједињеном Краљевству, као и у већини европских земаља експанзија прикључења ДЕ на ДС је почетком овог века била адекватно пропраћена прописима, стандардима и осталом неопходном стручном литературом, која је омогућила суштинску трансформацију ДС ради прилагођавања новим условима рада, у присуству ДЕ.

Стицајем околности, интеграција ДЕ у РС је у приличном заостатку у односу на остале земље у Европи, па чак и у односу на земље у региону, што је приказано у раду [10], поређењем стања у РС у 2024. години са стањем пенетрације ДЕ у изабраним државама. Без намере упуштања у анализу узрока таквог стања, може се констатовати да ДС РС у овом моменту има низак ниво пенетрације ДЕ [11], што пружа шансу за добру припрему ДС РС за предстојећи период, уз уважавање искуства из других ДС, што би смањило ризик да ДС РС задеси неко неочекивано стање са штетним утицајем по нормалан рад ДС.

Циљ овог рада је да се укаже на актуелно стање регулативе у РС у области регулације напона у ДМ, да се прикажу резултати примене критеријума дозвољеног одступања напона у стационарном режиму на ДМ и да се уоче могућности за ангажовање ДЕ за пружње помоћне услуге регулације напона. У поглављу 2 приказани су кључни моменти поставке регулације напона у ДМ, приказана је генеза измене неких стандарда на ангажовању ДЕ за регулацију напона у ДМ и усмерена је тема овог рада на регулацију напона у СН ДМ. У поглављу 3 приказан је критеријум дозвољеног одступања напона из Правилима о раду ДС који се користи за прикључење ДЕ у РС. У поглављу 4 приказан је начин моделовања ДМ и ДЕ у сврху провере критеријума дозвољеног одступања напона.У поглављима 5 и 6 приказани су резултати провере критеријума дозвољеног одступања напона у карактеристичним тачкама ДМ на изабраним моделима и у поглављу 7 је дат закључак.

2. ДЕКОМПОЗИЦИЈА РЕГУЛАЦИЈЕ НАПОНА

Кључни моменат поставке регулације напона, како у конвенционалном приступу са пасивном ДМ, тако и у савременом приступу са активном ДМ, се базира на две најважније чињенице:

- ОДС је одговоран за сигуран, поуздан и безбедан рад ДС и квалитет испоруке електричне енергије [1], што значи да је за регулацију напона у ДС одговоран ОДС;
- у циљу одржавања напона у галвански повезаној ДМ, ОДС спроводи АРН, која се налази на граници ПС и ДС, тј. на извору ДМ и помоћу које се врше промене преносног односа ЕТ ВН/СН под оптерећењем.

То значи да је у погледу регулације напона, ЕЕС декуплован на ПС и ДС, па уколико су задовољене све претпоставке за сигуран рад ПС, утицај ПС на напоне у ДС се може изоставити из разматрања. То заправо значи да контролом напона на СН сабирницама

ТС ВН/СН, ОДС утиче на напонски профил у читавом трафо реону ТС, на свим напонским нивоима ДМ, тј. врши контролу напона до крајњих тачака ДМ, до места прикључења свих објеката корисника унутар једне галвански повезане мреже.

Опште позната ствар је да су ДЕ постојале на ДС од самих почетака електрификације и успостављања јединственог ЕЕС, али су снаге тих ДЕ дуги низ година била знатно мање од снаге кратког споја мреже, тако да се, са изузетком неких специјалних случајева, сматрало да ДЕ немају значајан утицај на ДС, па тако и на систем регулације напона у ДМ. Међутим, експанзија изградње ДЕ и њихово прикључење на ДСЕЕ се десила крајем прошлог века, што се поклапа са увођењем дерегулисаног тржишта и што је, сасвим логично, било пропраћено велим бројем стручне литературе, која је третирала утицај ДЕ на регулацију напона у ДС. Неки радови су третирали концепт регулације напона у глобалу [9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19], док су неки радови обрађивали парцијални проблем, нпр регулацију напона у НН ДС [20, 21, 22, 23].

У новије време акценат се ставља на третман регулације напона у активним ДМ уз примену уређаја базираних на енергетској електроници [17, 18, 19, 21, 24, 25, 26], као и уз примену батеријских складишта [6]. Систематизован приказ стратегије регулације напона у ДМ уз примену синхроних генератора дат је у [5]. Постоје и примери да се као мера за одржавање напона у дозвољеним границама и/или повећање капацитета ДС за прихват дистрибуиране производње користи ограничење производње активне снаге ДЕ у време пикова производње СЕ [26],

Већ са појавом првих већих ДЕ (снаге 10 MW) на ДМ РС, уочено је да АРН не може да се примењује на конвенционалан начин, тако да је уведен унапређени модел, са уважавањем утицаја ДЕ великих снага [27]. Треба напоменути да електране снаге 10 MW не представаљју очекиван пример ДЕ, с обзиром да је смисао дистрибуираних извора заправо тај да се електрична енергија производи на месту потрошње, тако да се такве ДЕ готово искључиво прикључују на СН сабирнице ТС ВН/СН. Практична последица градње тако великих електрана је да се капацитети ДС за прикључење ДЕ брзо попуне, што онемогућава прикључење реалних ДЕ мањих снага, које су примерене потрошачком конзуму и концепцији ДМ РС. Ипак, може се уочити да се, прикључењем ДЕ тако великих снага, на известан начин поједностављује примена глобалног концепта регулације напона, која се може ослонити на АРН на начин како је описано у [27, 28].

У овом раду ће регулација напона у НН бити остављена по страни, иако је већ напоменуто да се систем регулације напона у ДС мора посматрати глобално, над целом галвански повезаном мрежом. Подршка да се НН мрежа изостави из разматања се може пронаћи у две чињенце. Прво, за коректно планиране ДМ, може се сматрати да ће напони бити унутар допуштених граница, одређених прописама РС [3], уколико се напон у ДМ одржава унутар дозвољених граница на сваком напонском нивоу понаособ. Друго, прописима или стандардима којима се дефинишу критеријуми за прикључење на ДС предвиђена је могућност коришћења независних критеријума за НН мрежу и СН мрежу ([7, 15, 29, 30, 31, 32], тако да је такав приступ прихватљив, са становишта општих и принципијелних разматрања.

3. ПРАВИЛА О РАДУ ДС

Правилима о раду ДС [2] дефинисани су критеријуми за прикључење електрана на ДС. За сваки критеријум у [2] су дати описи начина примене критеријума, што подразумева

и приказ моделовања ДМ и ДЕ, које се примењује за проверу конкретног критеријума. Тако је за критеријум дозвољених вредности напона у стационарном режиму наведено да је потребно извршити прорачуне токова снага за минималну и максималну потрошњу у ДМ. Проверавају се најкритичнији режими, односно, поступак провере овог критеријума се спроводи провером 4 режима, који представљају комбиновање максималне и минималне потрошње у трафо реону ТС са максималном и минималном производњом свих ДЕ. Уважавају се све ДЕ, независно од начина рада (са и без предаје електричне енергије у ДМ) и фазе реализације (поднети захтеви за издавање аката, издата акта, прикључене ДЕ).

Повећањем удела СЕ у миксу ДЕ појавила се потреба да се уместо режима са минималном потрошњом и максималном производњом, посматра режим у ком постоји највећа разлика између произведене електричне енергије ДЕ и потрошње посматраног конзума, тзв. „дневни минимум“. Такво стање се има у нерадним данима летње сезоне (пролеће или лето), око поднева.

Правилима о раду ДС [2] предвиђено је да ДЕ, које се на ДС прикључују преко уређаја енергетске електронике, као што су и СЕ, морају имати могућност аутоматске регулације фактора снаге. Ближе одреднице о томе на који начин би се регулација фактора снаге спроводила за сада не постоје. Изменама Закона о енергетици [1] које су ступиле на снагу у децембру 2024. године у регулативу РС су уведене нефреквентне помоћне услуге, у које спада и регулација напона у стационарном стању. Према одредбама тог закона, свим учесницима на тржишту електричне енергије који су у могућности да пруже нефреквентне помоћне услуге треба омогућити да их пружају ОДС.

4. МОДЕЛОВАЊЕ ДМ И ДЕ У СВРХУ ПРОВЕРЕ КРИТЕРИЈУМА ДОЗВОЉЕНОГ ОДСТУПАЊА НАПОНА У СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМУ

Уважавајући наведене одредбе Правила о раду ДС [2], у ОДС су формирани модели ДЕ који се користе приликом провере критеријума прикључења ДЕ на ДС. Уважава се чињеница да ДЕ у ДС раде у режиму регулације фактора снаге, а не у режиму регулације напона. Такав приступ је у складу са праксом, која се примењује у другим ДМ [5, 29, 30, 31, 32], али, оно што је још важније је, да је такав приступ у складу са реалним стањем у погледу законске регулативе и тарифних система у РС, као и интересима произвођача електричне енергије у РС, тј. власника ДЕ. Стога се све ДЕ, које се моделују приликом провере критеријума прикључења, изузев саме ДЕ за коју се врши провера критеријума, моделују са константним фактором снаге (cos fi = 1), што значи да ДЕ не троше нити производе реактивну снагу у свим моделованим режимима. То заправо представља оптималан режим рада ДЕ у погледу реактивне снаге, са становишта утицаја на губитке у ДМ и оптималног ангажовања ресурса ДЕ за производњу активне снаге [5].

Тако се долази до 4 основна режима, за које се у ОДС врше провере критеријума:

1. Максимални режим потрошње, без ангажовања ДЕ – електране су ван погона.
2. Максимални режим потрошње са максималном производњом активне снаге свих ДЕ – електране се моделују са пуном активном снагом, с тим да се предметна електрана моделује са фактором снаге 0,95 надпобуђено, а све остале са фактором снаге 1.
3. Минимални дневни режим потрошње без ангажовања ДЕ – електране су ван погона.

4. Минимални дневни режим са максималном производњом активне снаге свих ДЕ – све ДЕ се моделују са фактором снаге 1.

Очигледно је да се користи типичан детерминистички метод и да се у том смислу провера критеријума врши на страну сигурности по рад ДС.

Приликом моделовања мреже уважава се реалан рад АРН за конкретан ЕТ ВН/СН. Тако, у случају да се примењује компаундни, струјно зависни закон регулације [12], у режимима минималне потрошње напон на СН сабирницама ТС ВН/СН се одржава на приближно 102,0 % називног напона СН мреже, док се у режимима максималне потрошње напон одржава на приближно 104,0 %.

Претходно описани модел регулације напона у ДМ је применљив за проверу критеријума прикључења ДЕ на СН изводе, али се не може примењивати на електране, које би требале да се прикључе на СН сабирнице ТС ВН/СН. Разлог за то је крајње једноставан. Као што је већ напоменуто, у оквиру стратегије регулације напона у ДМ, ОДС одржава напон на СН сабирницама ТС ВН/СН уз примену регулационог намотаја и АРН [5, 12, 27]. Независно од тога да ли се користи конвенционални приступ без уважавања присуства ДЕ или се примењује модел АРН са уважавањем (великих) електрана, аутоматика ОДС делује на регулациону склопку, да би се напон СН сабирницама одржавао на жељеној вредности. Пошто се критеријум дозвољеног одступања напона проверава за стационарна стања, логично је да се у моделу мреже уважи деловање АРН ОДС. Међутим, према тако постављеном концепту, према критеријуму дозвољеног одступања напона на СН сабирнице ТС ВН/СН је могуће прикључити било коју снагу електране и онда се може поставити питање шта се дешава у временском периоду када АРН не делује на преклопку регулационог намота. Тај период може да траје од неколико секунди, па све до 180 секунди [4], што зависи од типа АРН и износа одступања контролисане вредности напона. АРН делује на склопку регулационог намотаја, са кораком регулације (најчешће) 1,5 % или 1,6 % у односу на назначени напон.

Да би се сагледао утицај ДЕ на напоне у ДМ, у наредном поглављу овог рада су приказани резултати моделовања рада електране велике снаге, која је прикључена на СН сабирнице ТС ВН/СН, при чему се занемарује утицај АРН ОДС. На тај начин се добија реална слика утицаја електране велике снаге на напоне у ДМ.

5. ПРОМЕНА НАПОНА НА СН САБИРНИЦАМА ТС ВН/СН У ПРИСУСТВУ ЕЛЕКТРАНЕ ВЕЛИКЕ СНАГЕ ПРИКЉУЧЕНЕ НА ТЕ САБИРНИЦЕ

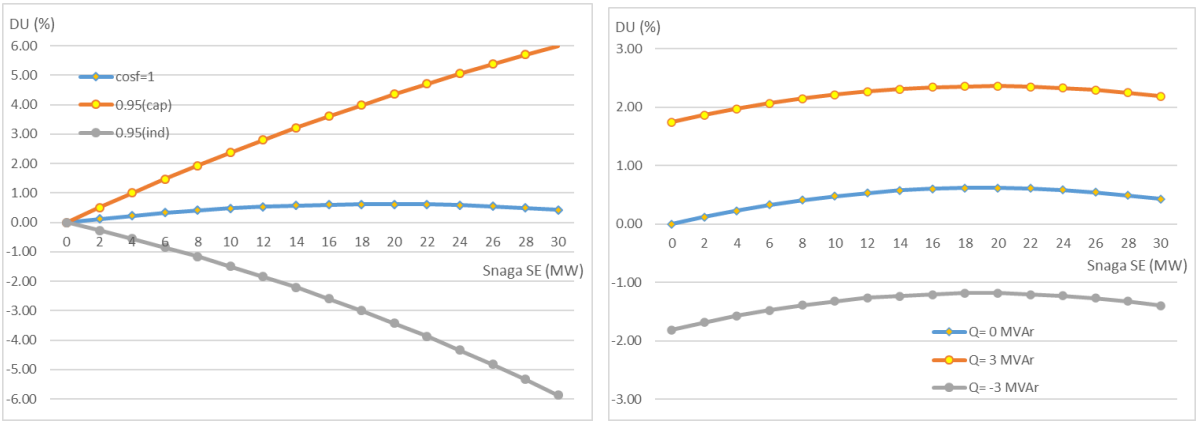
У овом поглављу дат је приказ резултата провере утицаја ДЕ, које су прикључене у конзуму ТС ВН/СН, на промену напона на СН сабирницама ТС ВН/СН, у случају да се не уважава дејство АРН. Посматра се разлика између напона на СН сабирницама ТС ВН/СН када све ДЕ раде пуним капацитетом (активна снага је једака суми назначених, тј. одобрених активних снага свих ДЕ које су прикључене у трафо рену ТС ВН/СН) и напона када нема производње у ДЕ. На тај начин је, практично, симулиран испад свих ДЕ и одређена је разлика напона на СН сабирницама пре и после испада ДЕ, пре него што АРН делује. Са становишта провере утицаја ДЕ на промену напона на СН сабирницама ТС ВН/СН ирелевантно је да ли су неке ДЕ прикључене у дубину СН мреже, а неке директно на СН сабирницама ТС ВН/СН, тако да се може сматрати да су све ДЕ прикључене директно на СН сабирницама ТС ВН/СН, што се за потребе овог приказа може моделовати једном еквивалентом (виртуелном) електраном прикљученом управо на СН сабирнице ТС ВН/СН.

Приликом моделовања утицаја ДЕ на промену напона на СН сабирницама ТС ВН/СН, уважено је да нема утицаја осталих фактора на промену напона у тој тачки. Наравно да то није тачно и треба истаћи да велики утицај има промена напона на примарној старни ТС ВН/СН услед погонских догађаја у преносној мрежи. Такође, значајан утицај има и потрошња дистрибутивног конзума, активна и реактивна компонента. Утицај параметара ЕТ ВН/СН је елиминисан избором једног типичног ЕТ у свим симулацијама. Дакле, за све остале утицајне факторе изабране су константне вредности, тако да се са таквим приступом може уочити управо утицај само ДЕ на промену напона на СН сабирницама ТС ВН/СН. Једна посматрана величина је варирана у изабраном опсегу, са циљем да се сагледа утицај те величине на ДС, док су остали параметри одржавани на константној вредности. У пракси, наравно, деловање АРН и промена положаја регулационе склопке је последица сумарног утицаја свих наведених фактора.

Због ограниченог простора није могуће дати детаљан приказ свих улазних података и параметара примењног модела. За потребе прорачуна товова снага моделовање ДМ и ДЕ је извршено уз примену програма који се ослања на добро познату „Backward Forward Sweep“ методу, која се користи приликом прорачуна токова снага радијалних структура ДМ [19, 33, 34]. Конкретно, за симулације је коришћен програм описан у студији [11].

Резултати симулације су приказани на дијаграмима у наставку овог рада. На свим дијаграмима се на апсциси налази активна снага еквивалентне електране, која је прикључена на 35 kV сабирнице типичне дистрибутивне ТС 110/35 kV. На ординати је дата релативна вредност промене напона на 35 kV сабирницама ТС 110/35 kV, изражена у процентима, у односу на вредност напона, која се има без присуства еквивалентне електране (а не у односу на називни напон мреже Un).

На слици 1(а) приказани су резултати симулације рада електране у режиму константног фактора снаге, за цео опсег вредности производње активне снаге. Симулација је рађена за опсег фактора снаге од 0,95 капацитивно до 0,95 индуктивно.



(а) (б)

Слика 1 – Промена напона на СН сабирницама
(а) фактора снаге електране је константан; (б) реактивна снага електране је константна

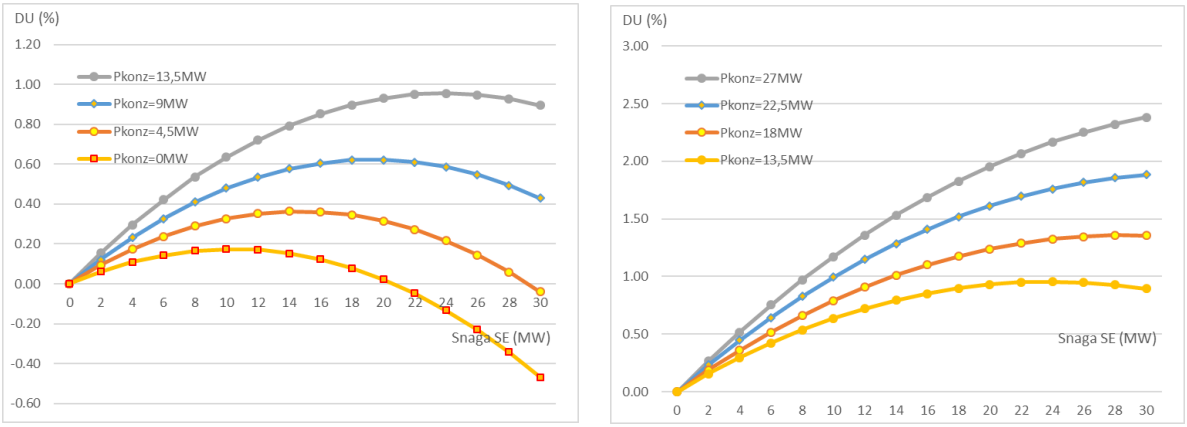
Очигледно је да је промена напона на 35 kV сабирницама дистрибутивне ТС 110/35 kV веома зависна од фактора снаге са којим ради СЕ. Тако нпр, већ за 4 MW активне снаге СЕ и са фактором снаге 0.95 капацитивно, промена напона је 1 %, што је веће од осетљивости АРН, која, узрокује промену положаја регулационе преклопке.

Примера ради, приликом испада СЕ снаге 10MW, која ради са фактором снаге 0.95 капацитивно, промена напона је 2,38 %, што може да узрокује деловање регулационе склопке за два положаја.

Ипак, најзначајнији закључак је да СЕ која ради са фактором снаге 1, заправо нема утицаја на ТС 110/35 kV и рад регулационе склопке, пошто је максимална промена напона 0,62%, за дате почетне услове. Треба уочити да је та вредност далеко мања од прага осетљивости АРН у дистрибутивним ТС 110/35 kV.

На слици 1(б) је приказана промена напона при раду електране са константним ангажовањем реакитвне снаге. Може се уочити да капацитивни режим рада електране има значајан утицај на вредност напона, за цео опсег активне снаге електране.

Очигледно је да ни у једној ТС ВН/СН у РС АРН неће реаговати и положај регулационе склопке и неће бити промењен само и искључиво због промене снаге еквивалентне електране, под условом да еквивалентна електрана ради са фактором снаге 1. Наравно да ову констатацију треба узети са резервом, зато што почетна вредност напона у моменту нпр. испада или престанка рада електране (било које, па и неке мале снаге) може бити таква да додатна промена напона због испада ДЕ, у односу на задату вредност напона са којом ради АРН, узрокује промену регулационе преклопке за један положај. У том случају се ради о кумулативном утицају више фактора, што није тема овог приказа.



(а) (б)

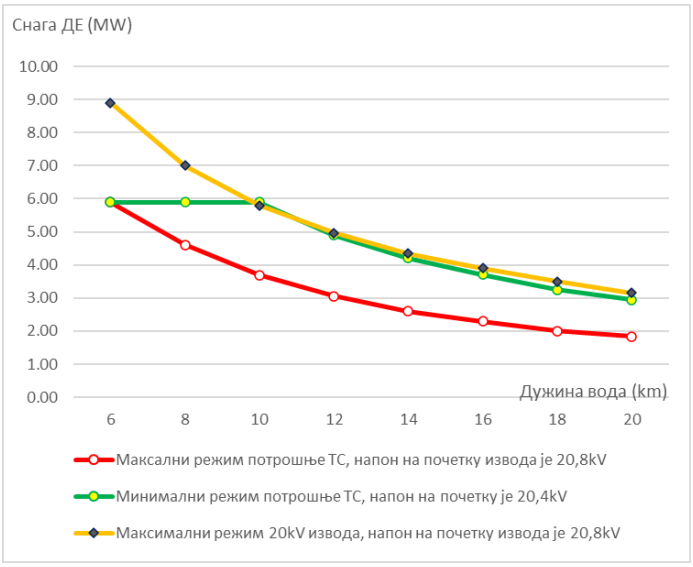
Слика 2 – Промена напона у зависности од промене активне снаге потрошње:
(а) летњи период; (б) зимски период

На слици 2(а) приказана је промена напона, за потрошњу конзума у реону посматране ТС, која се може сматрати типичном за летњи период. Такође је додата и крива која репрезентује потпуно неоптерећен ЕТ. Електрана је моделована са фактором снаге 1. На слици 2(б) приказана је промена напона, за типичне зимске вреднсоти потрошње.

На основу приказаних резултата се може видети да СЕ снаге 10 MW нема утицаја на деловање регулационе склопке, док СЕ снаге 20 MW приликом испада узрокује промену напона од 0,93 %, што може да узрокује промену положаја регулационе склопке.

6. ПРОМЕНА НАПОНА НА 20 kV ИЗВОДУ

На основу усвојених претпоставки о типичним параметрима 20 kV извода ДМ РС одрађена је симулација за потребе провере критеријума дозвољених вредности напона у стационарном режиму, за различите вредности напона на 20 kV сабирницама ТС 110/20 kV, у складу са описом из поглавља 4. Моделован је вод са проводницима АlČ 50 mm^2. На апсциси дијаграма на слици 3 дата је дужина вода, тј. удаљеност од 20 kV сабирницама ТС 110/20kV. На ординати је приказана максимална активна снага ДЕ, која се може прикључити у тачки на посматраној (електричној) удаљености од 20 kV сабирница. Зеленом линијом приказана је максимална активна снага ДЕ која се добије на основу примене режима са минималном потрошњом извода. Жутим линијом приказана је максимална активна снага ДЕ која се добије на основу примене режима са максималном потрошњом извода. Уочава се да постоји доста добро поклапање између ове две линије, што је случајност узрокована избором типичних параметара потрошње. За минимални режим (зелена линија) је истакнуто (хоризонтални одсечак) да је према [2] снага електране која се може прикључити на 20 kV извод 6000 kW, што заправо важи у општем случају, независно од посматраног режима потрошње.



Слика 3 – Максимална снага ДЕ која се може прикључити на типичан 20kV извод

Уколико се моделује максимални режим потрошње у ТС 110/20kV, при чему је неки постојећи извод на који треба прикључити ДЕ потпуно неоптерећен, што се може десити на руралним подручјима са одливом становништва, као екстремни пример ограничења максималне активне снаге се добију вредности које су означене црвеном бојом.

Битно је уочити да се у режиму максималне потрошње ДЕ моделује са фактором снаге 0,95 надпобуђено и да се у режиму минималне потрошње ДЕ моделује са фактором снаге 1. Дакле, уколико постоји захтев за прикључење ДЕ чија је активна снага изнад вредности, које су приказане на слици 3, ДЕ не може бити прикључена на постојећу ДМ, што имплицира дефинисање таквог појачања ДМ, којим ће критеријум бити задовољен. С друге стране, уколико је активна снага ДЕ мања од вредности, које су приказане линијама на слици 3, ДЕ може бити прикључена на постојећу ДМ. То значи да, у нормалним погонским условима рада ДМ и оптималном уклопном стању у складу са [2], ДЕ може радити са било којим фактором снаге, који је предвиђен у [2]. У тим случајевима фактор снаге ДЕ може имати вредност из опсега од 0,95 у капацитивном до 0,95 у индуктивном режиму рада, а да ће напони у свим тачкама 20 kV DM и свим режимима при нормалним погонским условима рада ДМ остати у дозвољеним границама [3].

7. ЗАКЉУЧАК

На основу приказаних резултата симулације рада ДЕ на ДМ РС и уз уважавање критеријума за прикључење електрана из [2], може се закључити следеће:

1. У случају да је електрана велике снаге (типа Ц) прикључена на СН сабирнице ТС ВН/СН, њен утицај на напоне у ДМ и на регулацију напона се може занемарити, уколико електрана ради у режиму фиксног фактора снаге једнаке 1.
2. Постоје реалне могућности да електрана велике снаге (типа Ц) прикључена на СН сабирнице ТС ВН/СН, пружа нефрквентне помоћне услуге регулације напона у смислу Закона о енергетици [1], али за сада није сагледан позитиван ефекат за прибављање такве услуге од стране ОДС РС. Није прихватљиво да таква електрана ради у режиму регулације реактивне снаге или регулације факотра снаге, без претходне детаљније анализе, којом би се обухватио утицај таквог начина рада на број прорада регулационе склопке и њен животни век, као и сагледавања (квантификације) ефеката пружања нефрквентне помоћне услуге регулације напона од стране таквих електрана.
3. Да би ДЕ моле бити прикључене на СН изводе ДМ РС морају задовољити критеријуме прикључења дефинисане у [2]. Симулациони модели који се користе за проверу критеријума дозвољених вредности напона у стационарном режиму су тако постављени да ДЕ која је прикључена на ДМ може радити у било ком режиму у погледу ангажовања реактивне снаге, у складу са [2] и да при томе напони у свим тачкама СН ДМ остану у дозвољеним границама.
4. Не постоји реална потреба да ОДС РС прибавља нефрквентне помоћне услуге регулације напона од ДЕ које су прикључене на СН изводе ДМ РС, уколико критеријуми за прикључење електрана на ДМ, који су дефинисани у [2], остану непромењени.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Закон о енергетици („Сл. гласник РС“ бр. 145/14, 95/18-др.Закон 40/21, 35/23 - др. закон, 62/23, 94/24)
[2] Правила о раду дистрибутивног система ("Службени гласник РС" бр. 71/2017) са изменама и допунама (06.02.2019)
[3] Уредба о условима испоруке и снабдевања електричном енергијом ("Сл. гласник РС", бр. 84/2023)
[4] Аутоматски регулатори напона за ЕТ са променом односа трансформације под оптерећењем, Служба за студије и истраживања, ЗЕП Београд, 1983.
[5] С.Ђукић, О.Чолић: Стратегије регулације напона и фактора снаге за синхроне генераторе у дистрибутивним мрежама, IX Саветовање CIRED Srbija, 2014,
[6] Q.Dong, Xingyuan Song, Chunyang Gong,...: Voltage Regulation Strategies in Photovoltaic-Energy Storage System Distribution Network: A Review, Energies, 18(11), 2740, 2025
[7] 1547-2018 - IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces
[8] David Narang, Principal Engineer, NREL Power Systems Engineering Center, Webinar Presented: „Highlights of IEEE Standard 1547-2018“, October 28, 2019

[9] Nick Jenkins, Ron Allan, Peter Crossley, Daniel Kirschen, Goran Strbac: Embedded Generation, The Institution of Engineering and Technology, Stevenage, United Kingdom, 2000, Reprinted 2008
[10] О.Чолић: Примена ограничења пласмана снаге из ДСЕЕ у ПСЕЕ, 37. саветовања CIGRE Србија, C6.07, 2025
[11] Г. Добрић, и други: Студија интеграције купаца-произвођача у дистрибутивни систем РС, Електротехнички факултете Универзитета у Београду, Београд, 2025
[12] В.Стрезоски, Д.Јањић: Систем регулације напона радијалних дистрибутивних мрежа, Монографија, УНС ФТН, Нови Сад, 1997.
[13] Н.Рајаковић, Д.Тасић: Дистрибутивне и индустријске мреже, Академска мисао, Београд, 2008.
[14] Frans Provoost: Intelligent distribution network design, Докторска дисертација, Technische Universiteit Eindhoven, 2009 (Страна 74 од 334 pdf-закључак u vezi regulacije napona)
[15] WG C6.24: Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER, CIGRE Technical Brochures nr. 586, 2014
[16] WG C6.19: Planning and Optimization Methods for Active Distribution Systems, CIGRE Technical Brochures nr. 591, 2014
[17] Sherif M. Ismael a, Shady H.E. Abdel Aleem: State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation, Renewable Energy 130, 1002-1020, 2019 (pregled različitih mera za više država)
[18] X.Xu, Z.Xu, X.Lyu: Optimal SVC placement for Maximizing Photovoltaic Hosting Capacity in Distribution Network, IFAC PapersOnLine 51-28, 2018 (odnosi se na primenu uređaja energetske elektronike – static VAR compensator)
[19] S.Rakočević: „Predlozi za poboljšanje integracije fotonaponskih sistema u distributivnu mrežu bazirani na primjeni harmonijskih filtera i FACTS uređaja“, Докторска дисертација, УЦГ ЕФП, Подгорица, 2025 (за backward forward)
[20] И.Димитријевић, С.Спремић, „Регулација напона у нисконапонским мрежама са дистрибуираном производњом“,---,
[21] S.Vieira, D.Frey, Y.Besanger,..,“ Comparative study of voltage regulation in distribution grid based on power electronic devices connected on the LV side of the MV/LV transformer“, HAL Open Science, Aalborg, Denmark, 2023 (odnosi se na primenu uređaja energetske elektronike – static VAR compensator)
[22] Irena Šagovac, Vide Marković „DNEVNA REGULACIJA NAPONA“, CIRED, Hrvatska, Šibenik, 2025 (ovo je na NN),
[23] Deni Ćetković, Siniša Vučinić, David Vozila, Optimizacijski algoritam za tehnoekonomski odabir između sanacije NN mreže regulatorom napona ili kabliranjem, CIRED, Hrvatska, Šibenik, 2025
[24] Valentin Ilea 1, Cristian Bovo, Davide Falabretti, and co: „Voltage Control Methodologies in Active Distribution Networks“, Energies, 13(12), 3293, 2020
[25] Ruonan Hu, WeiWang, and co: „Coordinated Voltage Regulation Methods in Active Distribution Networks with Soft Open Points“, Sustainability, 12(22), 9453, 2020
[26] The International Energy Agency: „Active Power Management of Photovoltaic Systems – State of the Art and Technical Solutions“, Report IEA-PVPS T14-15:2024
[27] З.Симендић, Г.Швенда, Ј.Чинчурак, Д.Јоковић, „Модели регулације напона у класичним дистрибутивним мрежама са генераторима“, 12. саветовање CIRED Srbija, 2021

[28] Jonathan HISCOCK, Nick HISCOCK, Alan KENNEDY: ADVANCED VOLTAGE CONTROL FOR NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION, 19th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Vienna, 2007
[29] VDE-AR-N 4105 Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz –Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz
[30] VDE-AR-N 4110 Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)
[31] SRPS EN 50549-1 Захтеви за паралелно повезивање генераторских постројења са јавним нисконапонским дистрибутивним мрежама — Део 1: Повезивање на нисконапонску дистрибутивну мрежу — Генераторска постројења типа B и нижих
[32] SRPS EN 50549-2 Захтеви за паралелно повезивање генераторских постројења са јавним нисконапонским дистрибутивним мрежама — Део 2: Повезивање на средњенапонску дистрибутивну мрежу — Генераторска постројења типа B и нижих
[33] S.Rifai, A.Achmad, I.S.Areni: LOAD FLOW ANALYSIS IN RADIAL DISTRIBUTION NETWORK USING BACKWARD FORWARD SWEEP METHOD, ICIC International, Part B, Volume 14, 2023 (за backward forward)
[34] J. Radosavljević, M. Jevtić, D. Klimenta, N. Arsić: Optimal Power Flow for Distribution Networks with Distributed Generation, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 12, No. 2, 2015