

**ОПТИМИЗАЦИЈА РАДА МИКРОМРЕЖЕ КОРИСТЕЊИ ФЛЕКСИБИЛНОСТ
ДИСТРИБУИРАНИХ ЕНЕРГЕТСКИХ РЕСУРСА****OPTIMIZATION OF MICROGRID OPERATION USING FLEXIBILITY OF
DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES**Алексеј Товиловић, Лука Стрезоски, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО**

Кратак садржај – У овом раду обрађене су теоријске основе о микромрежама, Дистрибуираним енергетским ресурсима (ДЕР-овима), оптимизацији у електроенергетским системима и ДЕР-ова који ће бити коришћени у овом раду. Основни циљ овог рада је да се изврши процес оптимизације с циљем минимизације губитака активне снаге уз поштовање свих напонских и техничких ограничења. Оптимизација је вршена тако што се мијењала снага ДЕР-ова за $\pm 10\%$ и пронађен је локални оптимум за сваки ресурс узимајући у обзир њихове специфичне карактеристике и ограничења. На овај начин је постигнут бољи баланс између производње и потрошње енергије у микромрежи, чиме је унапређена ефикасност система и осигурана његова стабилност.

Кључне ријечи: Микромрежа, Дистрибуирани енергетски ресурси, Оптимизација

Abstract – This paper addresses the theoretical foundations of microgrids, Distributed Energy Resources (DERs), optimization in power systems, and the DERs that will be used in this study. The primary goal of this work is to perform an optimization process aimed at minimizing active power losses while adhering to all voltage and technical constraints. Optimization was carried out by varying the power of the DERs by $\pm 10\%$ and finding the local optimum for each resource, taking into account their specific characteristics and limitations. This approach achieved a better balance between energy production and consumption in the microgrid, thereby improving system efficiency and ensuring its stability.

Keywords: Microgrid, Distributed Energy resources, Optimization

1. УВОД

Већина данашњих електроенергетских система (ЕЕС) се ослања на конвенционалне изворе енергије као што су: угаљ, гас, уље, итд. и сви од наведених имају мање или више негативан утицај на животну средину. Данас смо у прилици да доста слушамо и читамо о кориштењу обновљивих извора и начину преласка са традиционалних ЕЕС-а на мреже у којима фигуришу разни типови обновљивих извора енергије. Енергетска транзиција подразумева прелазак са традиционалних

начина производње на нове начине производње електричне енергије. Кључна карактеристика ове транзиције јесте избацивање тренутних извора енергије (угаљ, нафта, плин) и прелазак на нове, обновљиве, изворе енергије (сунце, вјетар, вода). Новитет који носи ова енергетска транзиција јесу микромреже, које могу да задовоље широке потребе различитих заједница, од потреба великих метропола до потреба руралних средина, чије се потребе значајно разликују. То је могуће да се задовољи због велике флексибилности дистрибуираних извора енергије (енг. Distributed energy resources). Новитет који носи ова енергетска транзиција јесу микромреже, које могу да задовоље широке потребе различитих заједница, од потреба великих метропола до потреба руралних средина, чије се потребе значајно разликују. То је могуће да се задовољи због велике флексибилности дистрибуираних извора енергије (енг. Distributed energy resources). Појам микромреже се везује за стабилну електричну мрежу која омогућава да корисник сам произведе електричну енергију на лицу мјеста и користи ју када му је најпотребнија. Задатак овог рада јесте да се детаљно анализира оптимизација микромреже користећи управо флексибилност различитих типова ДЕР-ова. То је урађено на примјеру модификоване тестне мреже IEEE 13 користећи програмски пакет ЕТАП.

2. МИКРОМРЕЖЕ

Електродистрибутивни системи (ЕДС) су дијелови ЕЕС-а којима се електрична енергија преузима с преносних мрежа и дистрибуира потрошачима. Све чешће се наилази на ЕДС које садрже и електране, лоциране у близини потрошачког подручја и прикључене на неку од мрежа ЕДС-а. Те електране су заправо дистрибуирани извори енергије (ДЕР-ови) који доминантно припадају групи обновљивих извора и категорији малих електрана (снаге испод 10 MW). Управо присуство ДЕР-ова претвара пасивне дистрибутивне мреже у активне дистрибутивне мреже, које више не учествују само у дистрибуцији већ и у производњи електричне енергије. У литератури се могу пронаћи разне дефиниције микромреже као и функционалне шеме. За потребе овог рада микромрежа ће бити дефинисана на исти начин као код Министарства енергетике Сједињених Америчких Држава (енг. U.S. Department of Energy), а то је: „Микромрежа је група међусобно повезаних потрошача и ДЕР-ова унутар јасно дефинисаних

НАПОМЕНА:

Овај рад произтекао је из мастер рада чији ментор је био др Лука Стрезоски, ванр. проф.

електричних граница који се понашају као једна контролабилна област која уважава правила и захтјеве мреже“ [2].

Микромрежа се може посматрати као самостална електрична мрежа која има способност да сама производи електричну енергију, али и способност да ту енергију користи онда када је најпотребнија у циљу побољшања перформанси, одрживости и отпорности. Микромреже имају и могућност рада док су повезане на јавну мрежу или у самосталном режиму формирајући „острво“, тада се за микромрежу каже да је у острвском режиму рада (енг. Islanded mode). Микромрежа функционише тако што прати производњу и потрошњу електричне енергије. Многи критични објекти као што су војне базе и медицински објекти користе микромреже као осигурање за непрестано напајање, с обзиром да ни једна „главна“ мрежа није отпорна на настанак кvara. Потребно је нагласити да поменута транзиција није ни мало једноставна и да и даље постоје многе техничке потешкоће које је потребно превазићи да би концепт микромреже добио свој пуни сјај. Једна од највећих потешкоћа је свакако координација релејне заштите тако да успјешно и ефикасно одреагује на сваку појаву кvara у мрежама. Тренутно се сматра да је адаптивна релејна заштита кључ за овај проблем, али је потребно још много истраживања и рада у овом пољу да би се достигао задовољавајући ниво [3].

3. DISTRIBUIRANI ENERGETSKI RESURSI

Дистрибуирани извори енергије претежно се односе на мање генераторске јединице које су лоциране непосредно уз потрошаче. Типична снага ДЕР-ова је до 10 мегавата (MW). Они могу бити прикључени на постојећу електро-мрежу или да самостално чине мрежу. Неки од ДЕР-ова који се користе у пракси су: соларни панели, вјетро-генератори, батеријска складишта, батерије у електричним возилима, генератори на биомасу, горивне ћелије (мини)хидро електране, дизел генератори, итд. ДЕР-ови побољшавају напонске прилике у мрежи, смањују губитке и доприносе већој поузданости у снабдијевању како градских тако и руралних подручја. С обзиром на снагу производње, ДЕР-ови се могу подијелити у следеће категорије:

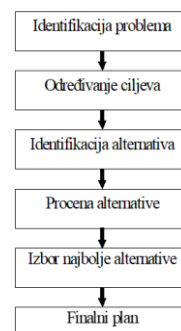
- МИКРО ДЕР – снага мања од 2 kW и повезан на нисконапонску мрежу
- МИНИ ДЕР – снага између 2 kW и 10 kW за једнофазне ДЕР-ове или 30 kW за трофазне
- ДЕР – снага између 10 (30) kW и 1 MW
- СРЕДЊИ ДЕР – снага између 1 MW и 5 MW
- ВЕЛИКИ ДЕР – снага већа од 5 MW

За потребе овог рада кориштени су следећи ДЕР уређаји: два солара, један дизел генератор, један вјетро-генератор и једна батерија.

4. ОПТИМИЗАЦИЈА

Под појмом оптимизације подразумева се добијање најбољег могућег резултату у складу с претходно постављеним условима. У току процеса пројектовања, изградње или одржавања било ког система потребно је донијети низ одлука уз задовољавање одређених услова тако да се као крајњи

исход добије минимална или максимална вриједност у зависности од постављених критеријума. У свим практичним ситуацијама могуће је ангажовање или жељену добит изразити као функцију одређених управљачких промјених па се оптимизација може дефинисати и као процес проналажења одређених услова тако да се добија минимална или максимална вриједност функције [5]. У општем случају, оптимизацију чине следећи кораци:



Слика 1. Основни кораци процеса оптимизације [4]

С обзиром да што је оптимизациони проблем тежи то су мање шансе да се дође до глобалног оптимума врло често се као довољно прихватљиво ријешење узима локални оптимум. Уколико резултати нису прихватљиви, односно тежи се глобалном оптимуму, тада се најчешће приступа покретању алгоритма из више почетних тачака, које се најчешће одређују на основу инжењерског искуства и очекиваних резултата, и тада се добије већи број резултата из више различитих почетних тачака и као крајње ријешење се прихвата оно које највише задовољава оптимизациони критеријум. Некада ни овај приступ не даје довољно добре резултате па је у том случају потребно користити неки од глобалних оптимизационих метода.

4.1. ОПТИМИЗАЦИЈА МИКРОМРЕЖЕ

Оптимизација микромреже односи се на процес побољшања перформанси, ефикасности и поузданости микромрежних система. Микромреже су аутономни енергетски системи који могу радити самостално или паралелно с централизованим мрежама, обично користећи обновљиве изворе енергије и складиштење енергије. Оптимизација микромреже тежи интеграцији технологија, управљању и економским факторима како би се осигурало да микромреже пружају стабилно, економично и одрживо снабдијевање енергијом у локалним заједницама или индустријским постројењима. Један од најважнијих критеријума оптимизације како у дистрибутивним мрежама тако и у микромрежама јесте критеријум минималних губитака активне снаге. Активна снага јесте она снага која се користи за обављање корисног рада у системима или се претвара у топлотну енергију, док се реактивна снага не може користити за обављање корисног рада, већ најчешће служи за одржавање електромагнетског поља. Значај смањивања губитака активне снаге најбоље се огледа у томе да се сва та снага која се претворила у губитке могла искористити за користан рад. Оптимизација напона представља регулацију напона у различитим чворовима мреже и то је једна од главних функција коју обавља свака

дистрибутивна мрежа. Оптимизација напона се врши да би се одржавао жељени напонски ниво у систему [9]. Поред одржавања напона на жељеној вриједности, овај оптимизациони критеријум је битан и због осигуравања жељене ефикасности у снабдјевању електричном енергијом и поузданости система.

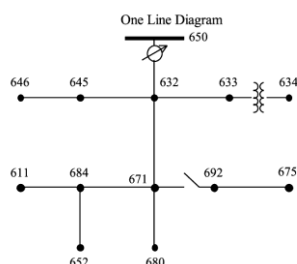
Оптимизација снага у мрежи за циљ има да одржи равнотежу између производње и потрошње електричне енергије у микромрежи. Потребно је максимално искористити ресурсе мреже, уз задовољавање критеријума поузданости и ефикасности, тако да је производња електричне енергије једнака или већа од потрошње електричне енергије у мрежи. Уколико постоји вишак електричне енергије у мрежи она се складишти тако да је доступна у моментима када производња енергије у односу на потрошњу буде у дефициту. На баланс снаге у мрежи може да утиче више фактора, а то су: количина обновљиве енергије која се генерише, губици у гранама, количина варијабилности оптерећења.

5. СОФТВЕРСКИ АЛАТ ЕТАП

За потребе овог рада коришћен је софтверски алат ЕТАП. ЕТАП је данас на тржишту најкомплетнији и најмоћнији алат који служи за моделовање и симулацију система електричне енергије, оптимизује системе напајања електричном енергијом на основу дигиталних еквивалената.

5.1. ТЕСТ МРЕЖА

У овом раду је као модел тестне мреже кориштена IEEE 13 тест мрежа, која је модификована да би се на њу могли прикључити ДЕР-ови. IEEE тест мреже представљају скуп стандардизованих електричних мрежа које су дефинисане од стране IEEE.



Слика 2. IEEE 13 тест мрежа [6]

IEEE 13 мрежа је кључни алат у истраживању и развоју електроенергетских система, омогућујући симулацију различитих сценарија и евалуацију перформанси различитих технологија и алгоритама у сигурном и контролисаним амбијенту. У софтверском алату ЕТАП кориштена је модификована уравнотежена мрежа, која се састоји од водова једнаке дужине од 500 метара. Сви водови имају идентичне електричне параметре: отпорност $R = 0,17325 \Omega$, реактанса $X = 0,50895 \Omega$ и сусцептибилност $B = 3,1499 \mu S$. Микромрежа је прикључена на дистрибутивну мрежу напонског нивоа 115 kV преко прекидача који омогућава острвски рад микромреже. На сабирници 1 повезан је дизел генератор снаге 800 kW. У чворовима 5 и 7, преко инвертора су повезане соларне електране снаге 800 kW, док је у чвору 14 повезана вјетроелектрана снаге 600kW. У чвору 12 се налази батерија снаге 35 kW, која је повезана преко инвертора

како би се омогућила акумулација енергије. У циљу побољшања фактора снаге у чворовима 10 и 13 су прикључени кондензатори. Прије поступка оптимизације губици активне снаге у мрежи износе 17.8kW, док губици реактивне снаге износе 59.2 kVAr.

5.2. ОПТИМИЗАЦИЈА СОЛАРНИХ ЕЛЕКТРАНА

У овом дијелу рада врши се оптимизација соларних електрана ПВ_1 и ПВ_4 тако што ће се постепено мијењати снага соларне електране за +/- 10%. Обе соларне електране у иницијалном стању раде са 486 kW од укупних 800kW. При смањењу снаге производње у случају ПВ_4 за 10%, повећавају се губици активне снаге, када се снага ПВ_4 повећа за 10% долази до смањења губитака од 0.1 kW. Повећањем снаге за још 10% губици се додатно смањују за 0.2 kW. У случају соларне електране ПВ_1 и при повећању и смањењу губитака долази до повећања губитака, тако да је локални оптимум у овом случају достигнут за снагу 486 kW. У Табели 1 приказани су укупни губици активне снаге у мрежи прије и након оптимизације соларних електрана.

Табела 1. Укупни губици у мрежи након оптимизације ПВ_1 и ПВ_4

УКУПНИ ГУБИЦИ ПРИЈЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ	17.8 kW
УКУПНИ ГУБИЦИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ СОЛАРНИХ ЕЛЕКТРАНА ПВ_1 и ПВ_4	17.6 kW

5.3. ОПТИМИЗАЦИЈА БАТЕРИЈЕ

Следећи ДЕР чијом оптимизацијом ће се покушати смањити укупни губици активне снаге је батерија која је на мрежу повезана преко инвертора. У почетном тренутку снага батерије је 23.1 kW. Снага ће се постепено мијењати за 10% у циљу достизању што бољих перформанси мреже, односно у циљу смањења укупних губитака активне снаге. Повећање снаге батерије од 20% резултира смањењем губитака у мрежи. У Табели 2 приказани су губици у мрежи након оптимизације батерије.

Табела 2. Укупни губици у мрежи након оптимизације батерије

УКУПНИ ГУБИЦИ ПРИЈЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ БАТЕРИЈЕ	17.6 kW
УКУПНИ ГУБИЦИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ БАТЕРИЈЕ	17.5 kW

Битно је напоменути да се повећавањем снаге батерије не утиче само на губитке у мрежи, већ се утиче и на напоне, реактивну снагу, фактор снаге и оптимизацију оптерећења. На напоне утиче тако што брзо реагује на флукуације у производњи и потрошњи енергије, ослобађајући енергију када је потражња висока, односно апсорбујући вишак енергије када је потражња ниска. Затим, уколико се батерије користе за компензацију реактивне снаге то даље побољшава фактор снаге и стабилност напона у мрежи. Оптимизација оптерећења се огледа у томе што повећањем снаге има могућност да доприноси равнотежи током различитих временских услова и потреба.

5.4. ОПТИМИЗАЦИЈА ВЈЕТРОГЕНЕРАТОРА

У наставку овог рада, у циљу додатног смањења активних губитака у мрежи, извршиће се

оптимизација производње вјетрогенератора. Смањењем снаге са иницијалних 528 kW на 475.2 kW добијају се укупни активни губици у мрежи који су за 0.1 kW мањи у односу на почетно стање и овим смањењем снаге су и даље задовољена сва техничка ограничења. Смањењем снаге за још 10%, односно уколико је снага вјетрогенератора 444.4 kW, долази до повећања укупних губитака активне снаге у мрежи за 0.2 kW у односу на почетни тренутак и поред повећања губитака долази и до нарушавања техничких ограничења тако да је то вриједност одбачена као могућност. Уколико се снага вјетрогенератора повећа за 10%, тако да је нова снага вјетрогенератора 580.8 kW тада се повећавају и укупни губици активне снаге у мрежи за 0.3 kW. С обзиром на све наведено долази се до закључка да је најмања вриједност губитака у мрежи када вјетрогенератор ради снагом од 475.2 kW. У табели 3 дат је приказ губитака активне снаге у мрежи након оптимизације вјетрогенератора.

Табела 3. Укупни губици у мрежи након оптимизације вјетрогенератора

УКУПНИ ГУБИЦИ ПРИЈЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ВЈЕТРОГЕНЕРАТОРА	17.5 kW
УКУПНИ ГУБИЦИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ ВЈЕТРОГЕНЕРАТОРА	17.4 kW

5.5. ОПТИМИЗАЦИЈА ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОРА

Дизел генератори играју кључну улогу у микромрежама, пружајући поуздан извор енергије у ситуацијама када други извори, попут обновљивих извора или главне мреже, нису доступни. Они обезбјеђују стабилност напона и фреквенције, што је од виталног значаја за одржавање непрекидног и стабилног напајања. Осим тога, дизел генератори подржавају микромрежу током периода вршних оптерећења, допуњајући енергију из обновљивих извора и батерија како би се задовољиле повећане потребе за енергијом. Оптимизација дизел генератора у микромрежи може значајно побољшати ефикасност и економичност система. Кроз анализу и прилагођавање радних параметара дизел генератора, као што су учесталост рада, капацитет и вријеме рада, могуће је смањити трошкове горива и одржавања, а истовремено повећати дуговјечност опреме. У овом раду вршена је анализа дизел генератора у почетном случају, када је снага производње 650 kW. Затим је смањена снага производње за 10%, односно на 585 kW а након тога је повећана снага производње такође за 10% и тада је она износила 715 kW. У случају додатног смањења снаге дизел генератора за додатних 10%, долази до погоршања енергетских перформанси у микромрежи. То доводи до повећања укупних губитака активне снаге, што је непожељно за стабилност система. У наставку рада дата је табела гдје се пореде губици прије и послје оптимизације дизел генератора.

Табела 4. Укупни губици у мрежи након оптимизације дизел генератора

УКУПНИ ГУБИЦИ ПРИЈЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОРА	17.4 kW
УКУПНИ ГУБИЦИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОРА	17.1 kW

6. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

У табели 5 дат је приказ укупних губитака активне снаге за почетно стање мреже, након оптимизације соларних електрана ПВ_1 и ПВ_4, затим након извршене оптимизације батерије и оптимизације вјетрогенератора и на крају након оптимизације дизел генератора. Након тога је извршена анализа резултата и дат је закључак рада.

Табела 5. – Укупни губици у мрежи након оптимизације ДЕР-ова прикључених у мрежи

УКУПНИ ГУБИЦИ АКТИВНЕ СНАГЕ У МРЕЖИ У ПОЧЕТНОМ ТРЕНУТКУ [kW]	17.8
УКУПНИ ГУБИЦИ АКТИВНЕ СНАГЕ У МРЕЖИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПВ 1 И ПВ 4 [kW]	17.6
УКУПНИ ГУБИЦИ АКТИВНЕ СНАГЕ У МРЕЖИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ БАТЕРИЈА [kW]	17.5
УКУПНИ ГУБИЦИ АКТИВНЕ СНАГЕ У МРЕЖИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ ВЈЕТРОГЕНЕРАТОРА [kW]	17.4
УКУПНИ ГУБИЦИ АКТИВНЕ СНАГЕ У МРЕЖИ НАКОН ОПТИМИЗАЦИЈЕ ДИЗЕЛ ГЕНЕРАТОРА [kW]	17.1

Из табеле 5 се види да су се губици након извршене оптимизације сваког ДЕР-а који је прикључен у мрежи смањили за одређену вриједност. Када се сумирају сви резултати из табеле 6.1. види се да су укупни губици активне снаге у мрежи мањи за 0.7 kW у односу на почетни тренутак, односно укупни губици активне снаге су мањи за око 4%. Ако се узме у обзир да је укупна генерисана снага у микромрежи ок 2.3 MW долази се до закључка да губици износе нешто испод 1% укупне производње микромреже. Јако је битно напоменути да ово није глобални оптимум, већ је у раду систематичним и прецизним радом пронађен локални оптимум за кориштене ДЕР-ове.

7. ЗАКЉУЧАК

Овај рад се фокусирао на оптимизацију микромреже користећи флексибилност дистрибуираних енергетских ресурса (ДЕР-ова) са циљем смањења губитака активне снаге и побољшања напонских прилика у мрежи. Истраживање је показало да промијене у снази ДЕР-ова могу значајно утицати на ефикасност мреже и смањење губитака. Прије оптимизације, губици у мрежи су износили 17.8 kW. Након имплементације оптимизације, која је укључивала подешавање снаге двије соларне електране, једне батерије, једног вјетро и једног дизел генератора, губици су смањени на 17.1 kW. Ово смањење показује значајан допринос флексибилности ДЕР-ова у побољшању енергетске ефикасности мреже. Уз смањење губитака, оптимизација је резултирала и побољшањем напонских прилика у чворовима мреже. Напонска ограничења постављена на $\pm 10\%$ номиналног напона на свим дионицама мреже су након оптимизације задовољена, што указује на побољшање стабилности и поузданости напона у мрежи.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Luka V. Strezoski: Modelovanje I fundamentalni proračuni aktivnih distributivnih mreža, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2021.
- [2] Arundhati Mukherjee: Sustainable microgrid: decentralize, digitalize, decarbonize.

[3] Luka V. Strezoski: Distributed energy resource management systems – DERMS: State of the art and how to move forward, 2022.

[4] Željko Popović: Analiza i upravljanje distributivnim mrežama, Predavanja – Novi Sad, 2022.

[5] U.S. Department of Energy: Federal energy management program.

[6] Link: https://www.researchgate.net/figure/IEEE-13-node-test-feeder_fig2_339887346

Кратка биографија:



Алексеј Товиловић рођен је у Котор Варошу 1999. год. Основне студије на Факултету техничких наука на одсијеку електроенергетски системи завршио је 2022. Контакт: tovilovic.aleksej618@gmail.com



др Лука Стрезоски рођен је у Новом Саду 1990. Докторирао је на Факултету техничких наука 2017. год., а од 2020 је изабран за шефа катедре. Област интересовања су електроенергетски системи.