



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У  
НОВОМ САДУ



Seyed Siavash Karimi Madahi

**Вишекритеријумска оптимална  
алокација дистрибуираних  
генераторских ресурса у  
дистрибутивној мрежи**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор:  
Проф. др Андрија Сарић

Нови Сад, 2021.





УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>			
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>			
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација		
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација		
Аутор, <b>АУ:</b>	Seyed Siavash Karimi Madahi		
Ментор, <b>МН:</b>	Ред. проф. др Андрија Сарић		
Наслов рада, <b>НР:</b>	Вишекритеријумска оптимална алокација дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи		
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски		
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски		
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија		
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	АП Војводина, Нови Сад		
Година, <b>ГО:</b>	2021.		
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт		
Место и адреса, <b>МА:</b>	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад		
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	Поглавља: 9/ страна: 67/ цитата: 74/ табела: 10/ слика: 12/ графика: 0/ прилога: 0		
Научна област, <b>НО:</b>	Електротехничко и рачунарско инжењерство		
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Електроенергетика		
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Алокација, дистрибуирани генератори, вишекритеријумски, оптимизација, одређивање величине		
<b>УДК</b>			
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду		
Важна напомена, <b>ВН:</b>			
Извод, <b>ИЗ:</b>	У овој докторској дисертацији предложен је нови вишекритеријумски алгоритам и функција циља за оптимално одређивање величине и истовремене алокације обновљивих и необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса. Предложени алгоритам примењен је на мрежи са 115 чвора и то на 63/20 kV трансформаторској станици са 20 kV стране. У предложеној функцији циља су сви важни технички и економски фактори узети у обзир, као и важна ограничења, као што су ниво пенетрације дистрибуираних генератора и буџетска ограничења. Свим факторима функције циља додељене су одговарајуће новчане вредности. Ради смањења времена оптимизације, предложена је нова математичка формулација за алокацију обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса. Генетски алгоритам је коришћен за минимизацију функције циља. За обновљиве дистрибуиране генераторске ресурсе узете су фотонапонски панели и ветротурбине, а за необновљиве генераторске ресурсе узете су гасне турбине.		
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	22.06.2017. год.		
Датум одбране, <b>ДО:</b>			
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник:	Ванр. проф. др Предраг Видовић	Потпис ментора
	Члан:	Ванр. проф. др Жељко Ђуришић	
	Члан:	Доц. др Саво Ђукић	
	Члан:	Доц. др Лука Стрезоски	
	Ментор:	Ред. проф. др Андрија Сарић	



## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed document
Contents code, <b>CC</b> :	PhD thesis
Author, <b>AU</b> :	Seyed Siavash Karimi Madahi
Mentor, <b>MN</b> :	Full Professor PhD Andrija Sarić
Title, <b>TI</b> :	Multicriteria optimal allocation of distributed generation resources in the distribution network
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	Autonomous Province of Vojvodina, Novi Sad
Publication year, <b>PY</b> :	2021.
Publisher, <b>PB</b> :	Author's reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	Chapters: 9/ pages: 67/ references: 74/ tables: 10/ pictures: 12/ graphs: 0/ appendixes: 0
Scientific field, <b>SF</b> :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Power Engineering
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Allocation, distributed generation, multicriteria, optimization, sizing
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	In this PhD thesis is proposed a new multi-criteria algorithm and objective function for simultaneously optimal sizing and allocation of renewable and non-renewable DG resources. The proposed algorithm is implemented on 115 buses network on 63/20 kV substations at 20 kV levels. In the proposed objective function all important technical and economic factors as well as important constraints, such as penetration level of DGs and budget constraint, are considered. All factors in the objective function are assigned to monetary values. To reduce the run-time optimization, a new mathematical formulation is introduced for the allocation of renewable DG resources. The genetic algorithm is employed to minimize the objective function. For renewable DG resources photovoltaic panels and wind turbines, and for non-renewable DG resources gas turbines are considered.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	22.06.2017.
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Assoc. Prof. PhD Predrag Vidović
Member:	Assoc. Prof. PhD Željko Đurišić
Member:	Assist. Prof. PhD Savo Đukić
Member:	Assist. Prof. PhD Luka Strezoski
Advisor:	Full Prof. PhD Andrija Sarić
	Mentor's sign

## **Захвалница**

Захваљујем се свим мојим професорима са Факултета техничких наука у Новом Саду који су несебичним дељењем својих широких знања допринели мом истраживању у области електроенергетике.

Посебну захвалност дугујем свом ментору проф. др. Андрији Сарићу, на стрпљењу, саветима и мотивацији без које представљени истраживачки рад и докторска дисертација не би били могући.

# Резиме

У овој докторској дисертацији предложен је нови вишекритеријумски алгоритам и функција циља за оптимално одређивање величине и истовремене алокације обновљивих и необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса. Предложени алгоритам је примењен на мрежи са 115 чворова и то на 63/20 kV трансформаторској станици са 20 kV стране. У предложеној функцији циља су сви важни технички и економски фактори узети у обзир, као и важна ограничења, као што су ниво пенетрације дистрибуираних генератора и буџетска ограничења. Свим факторима функције циља додељене су новчане вредности. Ради смањења времена оптимизације, предложена је нова математичка формулација за алокацију обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса. Генетски алгоритам је коришћен за минимизацију функције циља. За обновљиве дистрибуиране генераторске ресурсе узети су фотонапонски панели и ветротурбине, а за необновљиве дистрибуиране генераторске ресурсе узете су гасне турбине.

# Abstract

In this PhD thesis is proposed a new multi-criteria algorithm and objective function for simultaneously optimal sizing and allocation of renewable and non-renewable DG resources. The proposed algorithm is implemented on 115 buses network on 63/20 kV substations at 20 kV levels. In the proposed objective function all important technical and economic factors as well as important constraints, such as penetration level of DGs and budget constraint, are considered. All factors in the objective function are assigned to monetary values. To reduce the run-time optimization, a new mathematical formulation is introduced for the allocation of renewable DG resources. The genetic algorithm is employed to minimize the objective function. For renewable DG resources photovoltaic panels and wind turbines, and for non-renewable DG resources gas turbines are considered.

# Садржај

Списак слика .....	6
Списак табела .....	7
Списак скраћеница .....	8
1. Увод .....	9
1.1. Предмет истраживања .....	9
1.2. Преглед стања у области .....	11
1.3. Потреба за истраживањем и циљеви истраживања .....	13
1.4. Преглед докторске дисертације .....	15
2. Утицај алокације дистрибуираних генераторских ресурса на техничке параметре у дистрибутивној мрежи .....	16
2.1. Увод .....	16
2.2. Утицај алокације дистрибуираног генератора на губитак снаге .....	18
2.3. Утицај алокације дистрибуираног генератора на профил напона .....	20
2.4. Утицај алокације дистрибуираног генератора на ниво струја кратког споја .....	20
3. Одређивање функције циља са тежинским коефицијентима .....	22
3.1. Увод .....	22
3.2. Параметри .....	22
3.2.1. Параметар “укупан губитак снаге у мрежи“ .....	22
3.2.2. Параметар “профила напона“ .....	23
3.2.3. Параметар “нивоа струја кратког споја“ .....	24
3.2.4. Параметар “капацитет дистрибуираних генераторских јединица“ .....	25
3.2.5. Сумирање .....	26
3.3. Одређивање тежинских фактора .....	26
3.3.1. Тежински коефицијент “губитка снаге“ .....	26
3.3.2. Тежински коефицијент “профила напона“ .....	27
3.3.3. Тежински коефицијент “нивоа кратког споја“ .....	27
3.3.4. Тежински коефицијент “капацитета дистрибуираних генераторских јединица“ .....	27
3.4. Индекси .....	28
3.4.1. Индекс “губитка снаге“ .....	28
3.4.2. Индекс “побољшања профила напона“ .....	28
3.4.3. Индекс “нивоа струја кратког споја“ .....	29
4. Одређивање функције циља .....	31
4.1. Моделовање трошкова инсталирања дистрибуираних генератора .....	31
4.1.1. Трошкови инвестиције ( $C_1$ ) .....	31



4.1.2. Трошкови одржавања ( $C_2$ ) .....	32
4.1.3. Оперативни трошкови ( $C_3$ ) .....	32
4.1.4. Трошкови замене прекидача ( $C_4$ ) .....	33
4.2. Моделовање користи добијених уградњом дистрибуираних генераторских ресурса .....	34
4.2.1. Уштеда добијена због мање куповине активне снаге од преносне мреже ( $B_1$ ) .....	34
4.2.2. Уштеда добијена због мање куповине реактивне снаге од преносне мреже ( $B_2$ ) .....	34
4.2.3. Уштеда добијена од смањења губитака енергије ( $B_3$ ) .....	34
4.2.4. Уштеда добијена од побољшања профила напона ( $B_4$ ) .....	35
4.2.5. Уштеда добијена одлагањем развоја капацитета трафостанице ( $B_5$ ) .....	35
4.2.6. Уштеда добијена побољшањем поузданости ( $B_6$ ) .....	36
5. Математичка анализа алокације обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса .....	37
5.1. Алокација фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса .....	37
5.2. Алокација ветро генераторских дистрибуираних генераторских ресурса .....	38
6. Предложени алгоритам .....	40
6.1. Студија случаја .....	40
6.2. Ограничења и претпоставке проблема .....	43
6.2.1. Максимална пенетрација дистрибуираних генераторских ресурса у фидеру .....	44
6.2.2. Капацитет дистрибуираних генераторских јединица .....	44
6.2.3. Фактор снаге дистрибуираних генераторских ресурса .....	44
6.2.4. Буџетско ограничење .....	44
6.2.5. Ефикасност гасних дистрибуираних генераторских ресурса ( $R$ ) .....	44
6.2.6. Цена природног гаса ( $F_o$ ) .....	45
6.2.7. Трошкови замене прекидача .....	45
6.2.8. Максималан дозвољени број промена односа трансформације ( $Tap_{Max}$ ) .....	45
6.2.9. Распон промене напона у свакој промени односа трансформације .....	45
6.2.10. Дозвољени распон за напон .....	45
6.2.11. Цена трансформатора ( $C_T$ ) .....	45
6.2.12. Годишња стопа раста оптерећења ( $\alpha_{Load}$ ) .....	45
6.2.13. Цена потрошње енергије у електричној мрежи ( $E_{demand}$ ) .....	45
6.2.14. Време прекида напајања ( $U$ ) .....	45
6.3. Техника оптимизације и софтвер .....	46
6.3.1. Техника оптимизације .....	46
6.3.2. Избор алгоритма за оптимизацију .....	48

6.3.3. Софтвер .....	48
6.4. Предложени алгоритам за одређивање оптималног броја и величине дистрибуираних генераторских ресурса .....	50
7. Резултати симулације .....	52
8. Закључци .....	59
9. Литература .....	61

## Списак слика

Слика 2.1: Модел дистрибутивног система без присуства дистрибуираног генераторског ресурса .....	18
Слика 2.2: Модел дистрибутивног система са присуством дистрибуираног генераторског ресурса .....	18
Слика 2.3: Повећан ниво струја кратког споја у присуству дистрибуираног генератора ...	20
Слика 6.1: Дијаграм ВREC мреже .....	41
Слика 6.2: Генетски оператор укрштање са једном тачком .....	46
Слика 6.3: Генетски оператор укрштање са две тачке .....	46
Слика 6.4: Генетски оператор са униформним укрштањем .....	46
Слика 6.5: Генетски оператор мутације .....	47
Слика 6.6: Низ сваке популације .....	47
Слика 6.7: Дијаграм тока одређивања оптималног броја, величине и локације дистрибуираног генераторског ресурса .....	51
Слика 7.1: Профил напона сабирница за: (а) Маркази провинцију; (б) Хамедан провинцију; (в) Лорестан провинцију .....	58
Слика 7.2: Губитак снаге пре и после инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса .....	58

## Списак табела

Табела 6.1: Техничке и економске информације ВРЕС мреже .....	40
Табела 6.2: Максимално оптерећење сваке 63/20 kV трафостанице у ВРЕС мрежи .....	42
Табела 6.3: Ниво прекидача сваке сабирнице у ВРЕС мрежи .....	43
Табела 7.1: Годишња производња електричне енергије по MW фотонапонског дистрибуираног генераторског ресурса .....	52
Табела 7.2: Годишња производња електричне енергије за 660 kW ветро генератора дистрибуираних генераторских ресурса .....	52
Табела 7.3: Оптималне величине и локације дистрибуираних генераторских ресурса .....	53
Табела 7.4: Укупна величина сваке врсте дистрибуираних генераторских ресурса по провинцијама .....	54
Табела 7.5: Годишња вредност функција трошкова и добити .....	55
Табела 7.6: Ниво струја кратког споја сваке сабирнице у ВРЕС мрежи након инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса .....	55
Табела 7.7: Ефекат функција добити на функцију циља .....	56

## Списак скраћеница

BCR	Benefit to Cost Ratio
BREC	Bakhtar Regional Electric Company
CB	Circuit Breaker
CHP	Combined heat and power
DER	Distributed Energy Resource
DG	Distributed Generation
GA	Genetic Algorithm
OF	Objective Function
PV	Photovoltaic
SCADA	Supervisory control and data acquisition

# 1. Увод

У овој глави укратко је представљен значај коришћења дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи, да би потом били описани критеријуми за оптималну алокацију дистрибутивних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи, који представља предмет истраживања ове докторске дисертације. Изложен је преглед стања у области истраживања, мотив за истраживање у овој области, као и његови основни циљеви. На крају, описана је организација ове докторске дисертације.

## 1.1. Предмет истраживања

Бројни истраживачи су до сада на основу различитих критеријума (као што су напонски профил, ниво струја кратког споја, квалитет електричне енергије и различити економски фактори), као и уважавајући различита ограничења у овој области, одредили оптималне локације и капацитете дистрибуираних генераторских ресурса. За то су углавном најчешће коришћене класичне, хеуристичке и аналитичке методе. Треба напоменути да је већина студија у овој области имала за циљ побољшање само једног критеријума (најчешће губитака активне снаге).

Главни недостатак претходних истраживања на овом пољу јесте да је оптимално одређивање локација и капацитета дистрибуираних генераторских ресурса разматрано само са техничке или економске тачке гледишта, тј. разматрани су само технички параметри или економски фактори. Међутим, електродистрибутивне компаније захтевају узајамно побољшање техничких параметара и економских фактора. Такође, до сада није развијена интегрисана стратегија дефинисања оптималног броја дистрибуираних генераторских ресурса у електродистрибутивној мрежи.

Дистрибуирани генератор, у општем смислу, односи се на било коју врсту производње која се одвија близу места потрошње. У различитим државама и организацијама постоје различите дефиниције за дистрибуиране генераторске ресурсе. Генерално, дистрибуирани генераторски ресурси дефинишу се као мале произвођачке јединице од неколико kW до неколико MW које производе електричну енергију у близини потрошачког места и директно су повезани на електричну мрежу [1]. Дистрибуирани генераторски ресурси су све распрострањенији широм света [2]. Главни разлог за ово ширење је потражња за

новим ресурсима електричне енергије, као и укупни пораст потрошње електричне енергије, а са друге стране и ограничења за изградњу нових преносних и дистрибутивних водова. Питање заштите животне средине такође игра врло важну улогу у развоју ових нових ресурса [3]. Са њиховим инсталирањем у дистрибутивној мрежи долази и до других промена у планирању и експлоатацији дистрибутивних мрежа [4-5]. Разлог ових промена у дистрибутивним мрежама је то што су ове мреже по својој природи претежно пасивне [6, 7].

Коришћење дистрибуираних генераторских ресурса је у великом интересу за дистрибутивне компаније. У зависност од врсте технологије коришћене за дистрибуиране генераторске ресурсе, различите су и њихове предности. Оне се могу сумирати као:

1. Повећање поузданости дистрибуције електричне енергије.
2. Повећање квалитета дистрибуције електричне енергије.
3. Могућност смањења трошкова електричне енергије употребом адекватних јединица.
4. Могућност коришћења електричне енергије за удаљене области, где је немогуће, или је скупо, прикључити се на електродистрибутивну мрежу.
5. Избегавање скупих трошкова изградње и развоја преносне и дистрибутивне мреже.
6. Избегавање ангажовања скупих резервних капацитета.
7. Смањење губитака електричне енергије у мрежи.
8. Смањења ефекта стаклене баште услед употребе дистрибуираних генераторских ресурса на основу обновљивих извора енергије.

Са друге стране, најбитнији проблеми услед коришћења дистрибуираних генераторских ресурса су:

1. Треперење напона (напонски фликери).
2. Повећање нивоа хармоника.
3. Повећање нивоа струја кратког споја, што узрокује компликације у заштити електромреже.
4. Стварање електричних острва.
5. Могућност смањења квалитета електричне енергије.

Међутим, упркос поменутих изазовима, због многих предности ипак се све више користе дистрибуирани генераторски ресурси. Последњих година урађено је више истраживања у циљу одређивања оптималних локација и капацитета дистрибуираних генераторских ресурса [8]. У циљу њихове оптималне експлоатације, као потребан предуслов неопходно је одредити њихову оптималну локацију и капацитет у дистрибутивној мрежи. Уколико процес инсталације дистрибуираних генераторских ресурса није адекватан, не само да неће бити позитивних ефеката у експлоатацији, већ ће

се имати и негативни ефекти на дистрибутивну мрежу, у односу на конфигурацију без инсталираних дистрибуираних генераторских ресурса. Спроведена истраживања показују да ако се ови задаци спроведу на одговарајући начин, они могу да доведу до напред поменутих предности у експлоатацији дистрибутивне мреже [9-15], као што су:

1. Побољшање напонског профила.
2. Смањење губитака снаге у дистрибутивној мрежи.

Поред техничких карактеристика, постојање тржишта електричне енергије и значај унапређења економских перформанси дистрибутивне мреже указали су и на значај и неопходност коришћења ових ресурса [16-19].

Иновације у технологији и економски фактори повећали су пажњу на дистрибуиране генераторске ресурсе. Инсталирање дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивним мрежама има бројне техничке и економске предности и одлаже потребу за изградњом нових трансформаторских станица. Неке техничке предности су смањење губитака енергије, побољшање напонског профила, поузданост и квалитет испоручене енергије [20-22]. Неке од економских предности су смањење трошкова преноса и дистрибуције [23]. Обновљиви дистрибуирани генераторски ресурси најбитнији су део модерног електроенергетског система и имају многе економске користи [24]. Најчешћи обновљиви извори енергије су ветро турбине, соларни панели и биомаса [25]. С друге стране, необновљиви извори енергије, који се широко користе у дистрибутивној мрежи, су микротурбине, гасне турбине и горивне ћелије [26]. Промене у инфраструктури и владине политике повећале су тенденцију коришћења обновљивих извора у дистрибутивним мрежама.

## **1.2. Преглед стања у области**

Одређивање капацитета и локације дистрибуираних генераторских ресурса је предмет многих истраживања. У референцама [1] и [27] утврђене су оптималне локације и капацитети дистрибуираних генераторских ресурса у средње-напонским мрежама, са циљем остварања максималне производње електричне енергије, а узимајући у обзир и техничка ограничења на електроенергетској мрежи. Такође, одређивање локације и капацитета дистрибуираних генераторских ресурса урађено је и у [2], у циљу минимизирања трошкова губитака електричне енергије у дистрибутивној мрежи. Референце [3, 28-32] приказале су анализе са циљем смањења губитака снаге. У референци [3] дистрибуирани генераторски ресурси сврстани су у четири опште групе, при чему се одређују њихове оптималне локације и капацитети са циљем максимализације



фактора снаге. Аутори у референцама [33-34] проналазе оптималне локације и капацитете дистрибуираних генераторских ресурса, са циљем побољшања следећих перформанси:

1. Профил напона.
2. Губици снаге.
3. Ниво струје кратког споја.

У референцама [35-39] смањење губитака електричне енергије на дистрибутивној мрежи, побољшање профила напона и побољшање квалитета снаге урађено је уз помоћ методе оптимизације генетским алгоритмом (GA). Истраживања публикована у референцама [40-41] одређује оптималну локацију и капацитет дистрибуираних генераторских ресурса у неуравнотеженој дистрибутивној мрежи, са циљем смањења губитака електричне енергије и побољшања профила напона.

Сва истраживања публикована до сада само разматрају техничке параметре, а не разматрају економске факторе. У неколико часописа разматрани су и економски фактори. Референца [7] анализира оптималну локацију и капацитет дистрибуираних генераторских ресурса помоћу чворне цене, услед смањења губитака снаге на мрежи и пласмана у оквиру дозвољеног профила напона. Референце [42, 43] користе двостепену методу: у првом степену се минимизира функција циља, а у другом степену се максимизира добит од употребе дистрибуираних генераторских ресурса. У референци [44] одређује се оптимална локација и капацитет дистрибуираних генераторских ресурса са циљем максимизирања односа добити и трошкова (BCR). У овој анализи обезбеђена је могућност алокације и одређивање капацитета дистрибуираних генераторских ресурса за садашње и будуће мреже, узимајући у обзир њихове трошкове замене. Референце [45, 46] представљају неке индексе ради прорачуна ефикасности инсталације дистрибуираних генераторских ресурса.

Студије показују да ако се при одређивању величине и алокацији дистрибуираних генераторских ресурса не одлучи на одговарајући начин, користи неће бити постигнуте, а параметри мреже ће се погоршати [47,48]. Њен утицај зависи од врсте, капацитета и локације дистрибуираних генераторских ресурса [49]. Најважнија ствар при инсталирању дистрибуираних генераторских ресурса је њихова оптимална расподела и одређивање величине. Сходно томе, дистрибуирани генератори су одговарајуће решење проблема производње и снабдевања електричном енергијом са становишта дизајнера [50].

Спроведене су многе студије о одређивању величине и расподели дистрибуираних генераторских ресурса које су наведене у [22,49]. Анализом различитих радова, смањење губитка снаге и побољшања напонског профила често су сматрани као циљ у већини студија [20, 51-53]. Студија [54] предлаже другу врсту циља за одређивање величине и алокације, са узимањем у обзир нивоа пенетрације дистрибуираних генераторских ресурса

у дистрибутивним мрежама. У студији [55] у мрежи је одређен ниво уградње фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса. Алгоритам које је у студији [21] предложен за постављање и димензионисање дистрибуираних генераторских ресурса разматрали су смањење губитака, профил напона и побољшања поузданости у преносним системима. У раду [56] приказано је како алгоритми за оптималну алокацију дистрибуираних генераторских ресурса играју важну улогу у побољшању ефикасности резултата. Референца [57] представила је најбоље решење за оптималну алокацију дистрибуираних ресурса у дистрибутивним мрежама са хибридном генетским алгоритмом. По први пут у [58] представљен је алгоритам оптимизације Манта Раи, како би се оптимизовао вишекритеријумски проблем. Коришћењем овог алгоритма оптимизована је функција циља за доделу дистрибуираних генераторских јединица у радијалном дистрибутивном електроенергетском систему. У [54,59] представљени су неки индекси, као што су индекси губитака снаге и профила напона, како би се проценила ефикасност инсталираних дистрибуираних генераторских јединица. У раду [23] додељивањем новчаних вредности смањен је однос трошкова и користи, узимајући у обзир губитак снаге и профила напона. Студија [60] с обзиром на оперативне трошкове представила је оптимално постављање и одређивање величине обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса, као што су ветро турбине и фотонапонски панели у дистрибутивној мрежи. Референца [61] представила је пробабилистички модел за оптимално постављање и одређивање величине ветро турбина. У раду [62] представљен је двостепени приступ за оптималну интеграцију ветро турбина великих размера. Оптимална стратегија обновљивих извора енергије за Иран представљена је у рефернци [63].

### **1.3. Потреба за истарживањем и циљеви истраживања**

Мотивација за ову докторску дисертацију је предлагање алгоритма за економску алокацију обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса, као и оптимално одређивање величине дистрибуираних генераторских ресурса на трансформаторским станицама 63/20 kV, као и смањење времена оптимизације. Недостаци у претходним студијама мотивисали су да се предложи нови алгоритам. У референцама [22,64] су тежински фактори узети у обзир, док је начин избора тежинских фактора увек под знаком питања. Да би се решило ово питање, у овом раду су свим техничким и економским факторима додељене новчане вредности. У студијама [51,52] неки од техничких и економских параметара нису узети у обзир, попут поузданости снаге. У студији [23], за дистрибуиране генераторске ресурсе разматрани су само необновљиви дистрибуирани генераторски ресурси, а обновљиви дистрибуирани генераторски ресурси нису узети у

обзир. Такође, у [23,65] су занемарена нека ограничења попут пенетрације дистрибуираних генераторских ресурса у фидере и буџетска ограничења.

Генерално, проблеми у претходним студијама о одређивању величине и алокацији дистрибуираних генераторских ресурса могу се класификовати у четири главна недостатка:

(1) Игнорисање неких техничких и економских критеријума.

(2) Непостојање ниједне методе за истовремено идентификовање оптималног броја обновљивих и необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса.

(3) Произвољно одређивање тежинских коефицијената за параметре алокације без навођења довољних разлога.

(4) Занемаривање неких од најважнијих ограничења, као што је пенетрација дистрибуираних генераторских ресурса у фидере и буџетска ограничења.

Ова докторска дисертација решава дискутоване проблеме претходних студија за одређивање оптималне величине и алокације дистрибуираних генераторских ресурса.

Циљ истраживања у овој докторској дисертацији је верификован у склопу студије случаја на Бахтар регионалној електричној компанији (BREC) са 115 сабирница у Ирану на нисконапонској страни 63 kV/20 kV трансформаторске станице. Пошто су претходно развијани алгоритми углавном били засновани само на техничким или економским факторима, ова докторска дисертација има за циљ да предложи иновативан метод за одређивање локација и капацитета дистрибуираних генераторских ресурса, истовремено узимајући у обзир техничке и економске показатеље. Техничке показатеље чине:

1. Губици електричне снаге и енергије у дистрибутивној мрежи.
2. Напонски профил.
3. Ниво струја кратког споја.
4. Промене у броју и подешењу регулационих трансформатора.
5. Трошкови замене прекидача.

Пошто се функција циља састоји од више компоненти, за њену минимизацију користиће се генетски алгоритам (Genetic Algorithm - GA), у циљу добијања најбољег решења помоћу Matlab софтвера. Алгоритам предложен у овој докторској дисертацији је флексибилан и може се применити на било коју другу дистрибутивну мрежу.

Циљ је био да у овој докторској дисертацији буду решени до сада уочени проблеми у области одређивања оптималне локације и капацитета дистрибуираних генераторских ресурса са студијом случаја на стварној дистрибутивној мрежи. Иновативна метода је примењена на део електроенергетске мреже Ирана.

## **1.4. Преглед докторске дисертације**

У 2. глави докторске дисертације представљени су утицај дистрибуираних генераторских ресурса на техничке параметре дистрибутивне мреже. Затим у 3. и 4. глави су респективно представљене функције циља са и без тежинским коефицијената. У 5. глави представљена је математичка анализа алокације обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса. Предложени алгоритам и електроурежа ради верификације предложеног алгоритма су представљени у 6. глави. Резултати симулације дати су у 7. глави. Закључци докторске дисертације представљени су у 8. глави, док је коришћена литература дата у 9. глави.

## **2. Утицај алокације дистрибуираних генераторских ресурса на техничке параметре у дистрибутивној мрежи**

### **2.1. Увод**

Традиционална структура електропривреде увек се заснивала на недостатку активних извора производње електричне енергије у дистрибутивним мрежама. Дистрибуирани генератори продиру у електричне мреже у већини делова света. Због тога би пројектанти и инжењери електроенергетских мрежа требали да настоје да у потпуности разумеју карактеристике и ефекте ових генератора и укључе их у електроенергетске системе и њихове моделе.

За употребу дистрибуираних генераторских ресурса највише пажње усмерено је на одређивање места и величине дистрибуираних генератора. Будући да инсталирање дистрибуираних генератора на неодговарајућем месту може довести до угрожавања техничких карактеристика мреже. Стога се у овом поглављу испитују разлози за присуство дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивним мрежама. Затим се анализирају модели дистрибуираних производних извора. У наставку ће се приказати потреба за алокацијом и одређивањем оптималног капацитета дистрибуираних генераторских ресурса. На крају, истражиће се ограничења алокације и одређивање капацитета дистрибуираних генераторских ресурса који су коришћени у студијама у овој области.

Како се потражња за електричном енергијом повећава, постојећа дистрибутивна мрежа мора бити у стању да поуздано напаја дистрибутивне трансформаторске станице, у супротном мрежа ће изгубити свој капацитет за снабдевање и мораће се проширити. Сврха планирања развоја дистрибутивне мреже јесте да се ојача додавањем нове опреме, која ће дати одговор на раст потрошње, уз најмање могуће трошкове и са одговарајућом поузданошћу. Као што је поменуто, употреба дистрибуираних генераторских ресурса један је од најбољих начина да се одговори на растући тренд потражње за електричном енергијом у свету. Дистрибуирани генераторски извори углавном су прикључени на дистрибутивне мреже и близу центара оптерећења. Међутим, дистрибутивне трансформаторске станице такође могу бити погодно место за изградњу ових ресурса. Ове трансформаторске станице, као тачке повезивања дистрибутивних мрежа на преносну мрежу и преноса снаге у уређаје средњег напона, имају значајне потенцијале за присуство

дистрибуираних генераторских ресурса. Изградња и рад дистрибуираних генераторских ресурса у трансформаторској станици могу утицати на оптерећење трансформатора у трансформаторској станици и снагу добијену из преносног система и донети значајне економске користи електропривреди. Поред тога, присуство оператора и постојање SCADA система за контролу и надзор информација у горе наведеним дистрибутивним трансформаторским станицама могу бити корисни у правилном раду дистрибуираних генераторских јединица. То може имати значајан утицај на економску употребу дистрибуираних генераторских јединица. На основу горе наведеног, у овој докторској дисертацији се разматра и анализира изградња дистрибуираних генераторских јединица у дистрибутивним трансформаторским станицама.

Као што је наведено, у овој докторској дисертацији дистрибуирани генераторски ресурси се инсталирају и раде на дистрибутивној страни (20 kV) горње дистрибутивне трансформаторске станице.

Наиме, дистрибуирани генераторски ресурси у дистрибутивној мрежи су подељени у четири важне категорије на основу њихових активних и реактивних производних капацитета, а то су:

1) Дистрибуирани генератори који мрежи дају само активну снагу. То су дистрибуирани генераторски ресурси производње, као што су фотонапонски панели, микротурбине и горивне хелије који користе претвараче.

2) Дистрибуирани генератори који мрежи дају само реактивну снагу, попут синхроних компензатора или оточних кондензатора.

3) Дистрибуирани генератори који су способни да истовремено дају и активну и реактивну снагу. Најбољи примери за ову категорију ресурса су синхроне машине (СНР и гасне турбине).

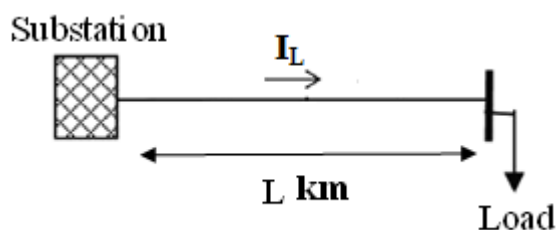
4) Дистрибуирани генератори способни да дају активну снагу и врше регулацију реактивне снаге, попут индукционих генератора.

Потреба за алокацију и одређивање оптималног капацитета дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи је од изузетног значаја. Као што је поменуто, инсталирањем дистрибуираних генераторских ресурса добијају се многе користи. Ове користи се постижу када су јединице дистрибуираних генератора на правом месту и са оптималном величином (у смислу локације и капацитета). У супротном, неће се постићи користи, већ је могуће и ослабити техничке карактеристике мреже. Ово питање је разматрано за 3 фактора, што су губитак снаге, профил напона и ниво струја кратког споја, док је такође истражена неопходност алокације и одређивања оптималног капацитета дистрибуираних генераторских ресурса у циљу стварања економских користи.

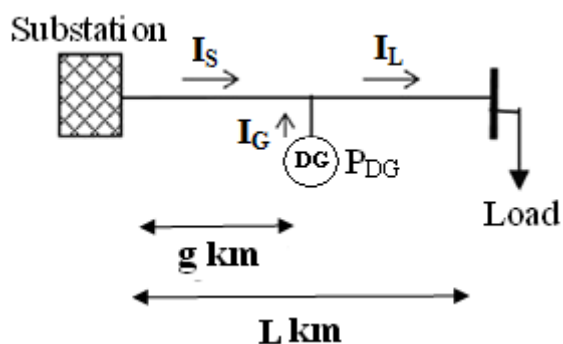
Један од главних недостатака претходних студија постављања и димензионисања је разматрање само једног параметра као функција циља проблема. У овој студији се не узима у обзир утицај инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса на остале карактеристике мреже. Да би се разјаснио проблем, разматрају се две ситуације: са и без дистрибуираног генератора. Сматра се да је оптерећење мреже уравнотежено трофазно оптерећење са константном снагом које се налази на крају фидера.

## 2.2. Утицај алокације дистрибуираног генератора на губитак снаге

Да би се приказао ефекат дистрибуираног генератора на губитке мреже, разматрају се следеће две једноставне радијалне дистрибутивне мреже, једном без присуства дистрибуираног генератора и у присуству дистрибуираног генератора. Претпостављено оптерећење је уравнотежено трофазно оптерећење које је концентрисано повезивањем звезде ( $Y$ ) на крају фидера дужине  $L$  километара. У мрежи која има дистрибуирани генераторски извор, локација генераторског извора се сматра на удаљености од  $g$  километара од трансформаторске станице.



Слика 2.1: Модел дистрибутивног система без присуства дистрибуираног генераторског ресурса



Слика 2.2: Модел дистрибутивног система са присуством дистрибуираног генераторског ресурса

Будући да инсталирањем дистрибуираног генераторског ресурса доводи до смањења преносне струје водова, они могу смањити губитке снаге. Износ губитака снаге у одсуству дистрибуираног генератора може се израчунати следећим једначинама

$$I_S = I_L \quad (2.1)$$

$$P_{loss}^{WithoutDG} = 3 \cdot r \cdot I \cdot |I_L|^2 \quad (2.2)$$

где су:

$P_{Loss}^{WithoutDG}$  - губитак снаге у одсуству дистрибутивног генератора

$r$  – отпор по километру

$I_L$  - струја оптерећења.

Губици снаге у присуству дистрибуираног генератора могу се израчунати следећом једначином

$$P_{loss}^{WithDG} = P_{loss1} + P_{loss2} \quad (2.3)$$

где су:

$P_{Loss}^{WithDG}$  - губитак снаге у присуству дистрибуираног генератора

$P_{Loss1}$  - губитак снаге од трансформаторске станице до локације дистрибуираног генератора

$P_{Loss2}$  - губитак снаге од локације дистрибуираног генератора до места потрошње

$$P_{loss}^{WithDG} = 3rg|I_S|^2 + 3(l-g)r|I_L|^2 \quad (2.4)$$

Стога се губитак снаге након инсталирања дистрибуираног генератора добија помоћу релације

$$\Delta P_{loss} = 3rg|I_S|^2 - 3rg|I_L|^2 \quad (2.5)$$

У трофазним системима имамо релацију (2.6)

$$I = \left(\frac{S}{3 \cdot V}\right)^* \quad (2.6)$$

Након инсталирања дистрибуираног генератора, имамо следећу једначину

$$|I_S| = |I_L - I_{DG}| \quad (2.7)$$

Заменом релације (2.6) и (2.7) у релацији (2.5) добија се следећа једначина

$$\Delta P_{loss} = \frac{rg \cdot (|S_L^* \cdot V_{DG}^* - S_{DG}^* \cdot V_L^*|^2 - |S_L^* \cdot V_{DG}^*|^2)}{3(|V_L^*| \cdot |V_{DG}^*|)^2} \quad (2.8)$$

Из релације (2.8) може се закључити да идентификовање одговарајућег капацитета за дистрибуирани генератор игра кључну улогу у смањењу губитака снаге и енергије. С



друге стране, ако је разматрани капацитет неприкладан, то може проузроковати повећање губитака снаге и енергије.

### 2.3. Утицај алокације дистрибуираног генератора на профил напона

Инсталирање дистрибуираног генератора у дистрибутивној мрежи може довести до побољшања или погоршања напонског профила на местима потрошње. Профил напона у одсуству дистрибуираног генератора израчунава се помоћу релације

$$V_L^{WithoutDG} = V_S - (r + jx) \cdot l \cdot I_L \quad (2.9)$$

где је:

$V_S$  - напон трансформаторске станице, и по претпоставци је 1 р.у.

Профил напона у присуству дистрибуираног генератора рачуна се помоћу релације

$$V_L^{WithDG} = V_S - (r + jx) \cdot g \cdot I_S - (r + jx) \cdot (l - g) \cdot I_L \quad (2.10)$$

Упоредјујући релације (2.9) и (2.10) добија се варијација профила напона, која је представљена као

$$\Delta V_L = (r + jx) \cdot g \cdot (I_L - I_S) = (r + jx) \cdot g \cdot I_{DG} \quad (2.11)$$

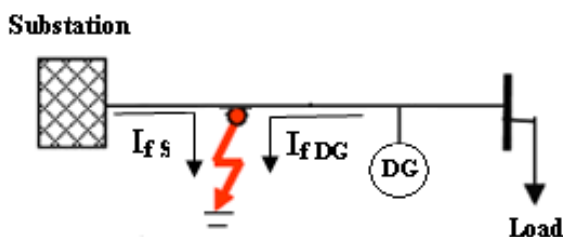
Уз помоћ релација (2.6) и (2.7) добија се величина варијације профила напона, након инсталирања дистрибуираног генератора

$$|\Delta V_L| = \frac{\sqrt{r^2 + x^2} \cdot g \cdot |S_{DG}|}{3|V_{DG}|} \quad (2.12)$$

Из релације (2.12) очигледно је да игнорисање произведене снаге дистрибуираног генератора може резултирати превеликим повећањем напонског профила и самим тим може довести до прекорачења дозвољене границе профила напона.

### 2.4. Утицај алокације дистрибуираног генератора на ниво струја кратког споја

Дистрибуирани генератори се готово увек постављеју паралелно са мрежом.



Слика 2.3: Повећан ниво струја кратког споја у присуству дистрибуираног генератора

Повећањем капацитета дистрибуираног генератора, еквивалентна импеданса дистрибуираног генератора се смањује и ниво струје кратког споја мреже се мења, као што је приказано на слици 2.3. Ниво струје кратког споја у одсуству дистрибуираног генератора једнак је:

$$|I_{Foult}| = |I_{fs}| \quad (2.13)$$

Према томе, пре инсталирања дистрибуираног генератора струја квара једнака је струји трансформаторске станице, а након инсталирања дистрибуираног генератора њена вредност мења се према релацији

$$|I_{Foult}| = |I_{fs} + I_{fDG}| \quad (2.14)$$

Ако након инсталирања дистрибуираног генераторског ресурса, пораст нивоа струје кратког споја премаши прихватљиви домен прекидача (СВ), они морају бити замењени одговарајућим прекидачима. Ово намеће велике трошкове електричним компанијама. Због тога треба размотрити ниво струја кратког споја приликом постављања и одређивања капацитета дистрибуираног генераторског ресурса.

### 3. Одређивање функције циља са тежинским коефицијентима

Један од недостатака претходних студија везана је за одређивање тежинских коефицијената. Тежински коефицијенти су од велике важности за постизање максималне ефикасности дистрибуираних генераторских. Стога је неопходна што тачнија метода за идентификовање тежинских коефицијената.

#### 3.1. Увод

Циљ ове главе је предлагање алгорита за проналажење оптималних места, капацитета и броја дистрибуираних генераторских ресурса на основу техничких карактеристика у дистрибутивној мрежи. Стога се предлаже функција циља која садржи најважније карактеристике дистрибутивне мреже. Разматране карактеристике су укупни губитак снаге у мрежи, профил напона дистрибутивне мреже, ниво струја кратког споја и одговарајући број дистрибуираних генераторских јединица. Стога се може структура функције циља представити на следећи начин.

Да би се функција која се састоји од неколико параметара свела на јединствен оптимум (минимум), општа функција може се написати као збир тих чланова

$$f = f_1 + f_2 + \dots + f_N = \sum_{i=1}^N f_i \quad (3.1)$$

где је  $N$  број фактора који утичу на функцију циља.

У наставку, сваки од фактора је детаљније обрађен.

#### 3.2. Параметри

##### 3.2.1. Параметар “укупан губитак снаге у мрежи”

Губитак снаге у мрежи рачуна се као

$$f_1 = f(P_{loss}) = P_{loss} \quad (3.2)$$

где је  $P_{loss}$  укупан губитак снаге у мрежи.

Нормализацијом  $P_{loss}$  и разматрањем  $a$  као тежинског коефицијента, коначна функција  $f_1$  добија се као

$$f_1 = a \frac{P_{loss}^{withDG}}{P_{loss}^{withoutDG}} \quad (3.3)$$

### 3.2.2. Параметар “профила напона“

Параметар напонског профила зависи од напона сабирница. Овај параметар је дефинисан као варијација напона од идеалне вредности (која износи 1 р.у.)

$$v = V_{bus}^{withDG} - 1(Pu) \quad (3.4)$$

С обзиром да је функција  $v$  у р.у., није потребно да се нормализује. Да би се идентификовала варијација напона свих сабирница од 1 р.у., вектор  $V$  је дефинисан као

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

где је  $n$  број сабирница у дистрибутивној мрежи

$$v_k = V_{bus,k}^{withDG} - 1, \quad k=1,2,\dots,n \quad (3.6)$$

где је  $v_k$  одступање напона у  $k$ -тој сабирници од 1 р.у.

Функција  $f_2$  добија се израчунавањем варијације напона сваке сабирнице од 1 р.у.

$$f_2(V_{bus}) = V^T B V \quad (3.7)$$

где је  $B$  матрица тежинских коефицијената и дефинисана је као

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3.8)$$

Према томе,  $f_2$  је једнака:

$$f_2(V_{bus}) = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Поједностављивањем једначине (3.9), добија се једначина

$$f_2(V_{bus}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} v_i v_j \quad (3.10)$$

Заменом (3.6) у (3.10) добија се релација

$$f_2(V_{bus}) = \sum_{k=1}^n b_{kk} (V_{bus,k}^{withDG} - 1)^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n b_{ij} (V_{bus,i}^{withDG} - 1)(V_{bus,j}^{withDG} - 1) \quad (3.11)$$

Пошто напони две различите сабирнице немају међусобног утицаја, па самим тим и вредност  $b_{ij}$  за  $i \neq j$  се сматра да је нула. Према томе, профил напона једнак је следећој једначини

$$f_2(V_{bus}) = \sum_{k=1}^n b_k (V_{bus,k}^{withDG} - 1)^2 \quad (3.12)$$

### 3.2.3. Параметар “нивоа струје кратког споја“

Функција  $w$  дефинисана је као релација (3.13). Ова функција приказује разлику струја кратког споја у присуству и одсуству дистрибуираног генератора

$$w = i_{sc}^{withDG} - i_{sc}^{withoutDG} \quad (3.13)$$

После нормализације добија се једначина

$$w = \frac{i_{sc}^{withDG} - i_{sc}^{withoutDG}}{i_{sc}^{withDG}} \quad (3.14)$$

$W$  вектор је дефинисан у (3.15), а који показује варијацију нивоа струја кратког споја свих сабирница у одсуству и присуству дистрибуираног генератора

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Сваки елемент  $W$  рачуна се на основу

$$w_k = \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

На основу претходних једначина, функција нивоа струја кратког споја рачуна се на следећи начин

$$f_3(i_{sc}) = W^T C W \quad (3.17)$$

где је  $C$  је матрица тежинских коефицијената и дефинисана је на следећи начин.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3.18)$$

На основу (3.18)  $f_3$  је представљен као

$$f_3(i_{sc}) = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Поједностављујући претходну једначину, параметар нивоа струја кратког споја добија се као

$$f_3(i_{sc}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} w_i w_j \quad (3.20)$$

Заменом (3.16) у (3.20) добија се следећа једначина

$$f_3(i_{sc}) = \sum_{k=1}^n c_{kk} \left( \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}} \right)^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n c_{ij} \left( \frac{i_{sc,i}^{withDG} - i_{sc,i}^{withoutDG}}{i_{sc,i}^{withDG}} \right) \left( \frac{i_{sc,j}^{withDG} - i_{sc,j}^{withoutDG}}{i_{sc,j}^{withDG}} \right) \quad (3.21)$$

На разлику нивоа струја кратког споја две различите сабирнице не утичу једна на другу, самим тим и вредност  $c_{ij}$  за  $i \neq j$  се претпоставља да је нула. Стога је параметар нивоа струја кратког споја једнак следећој једначини

$$f_3(i_{sc}) = \sum_{k=1}^n c_k \left( \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}} \right)^2 \quad (3.22)$$

### 3.2.4. Параметар “капацитет дистрибуираних генераторских јединица“

Инсталирање и коришћење дистрибуираних генераторских ресурса са малим капацитетом показало се ефикаснијим од дистрибуираних генераторских јединица великих капацитета. Стога је један од циљева ове главе одређивање величине и алокација одређеног броја дистрибуираних генераторских јединица малог капацитета. Да би се постигла ова сврха,  $f_4$  се дефинише на следећи начин

$$f_4(CG) = \sum_{k=1}^n d_k CG_k \quad (3.23)$$

где су:

$CG_k$  - капацитет инсталираног дистрибуираног генератора на  $k$ -тој сабирници у MVA

$d_k$  - тежински коефицијент.

Дељењем релације (3.23) са  $S_{base}$  добија се нормализована функција  $f_4$ , где је  $S_{base}$  основна вредност снаге мреже

$$f_4(CG) = \sum_{k=1}^n d_k \frac{CG_k}{S_{base}} \quad (3.24)$$

### 3.2.5. Сумирање

Према претходно представљеним једначинама, коначна функција циља за минимизацију добија се на следећи начин

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (3.25)$$

Заменом  $f_1, f_2, f_3$  и  $f_4$  са претходно изведеним релацијама добија се следећа једначина

$$f = a \frac{P_{loss}^{withDG}}{P_{loss}^{withoutDG}} + \sum_{k=1}^n b_k (V_{bus,k}^{withDG} - 1)^2 + \sum_{k=1}^n c_k \left( \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}} \right)^2 + \sum_{k=1}^n d_k \frac{CG_k}{S_{base}} \quad (3.26)$$

Поједностављивањем релације (3.26), добија се релација

$$f = \sum_{k=1}^n \left( a_k \frac{P_{loss}^{withDG}}{P_{loss}^{withoutDG}} + b_k (V_{bus,k}^{withDG} - 1)^2 + c_k \left( \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}} \right)^2 + d_k \frac{CG_k}{S_{base}} \right) \quad (3.27)$$

Будући да су све сабирнице (чворови) једнако важне, претпоставља се да су тежински коефицијенти свих сабирница једнаки. Стога се има

$$a_1 = a_2 = \dots = a_n = a, \quad b_1 = b_2 = \dots = b_n = b, \quad c_1 = c_2 = \dots = c_n = c, \quad d_1 = d_2 = \dots = d_n = d \quad (3.28)$$

Сходно томе, функција циља је

$$f = \sum_{k=1}^n \left( a \frac{P_{loss}^{withDG}}{P_{loss}^{withoutDG}} + b (V_{bus,k}^{withDG} - 1)^2 + c \left( \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}} \right)^2 + d \frac{CG_k}{S_{base}} \right) \quad (3.29)$$

## 3.3. Одређивање тежинских фактора

Овде се представља метода за одређивање коефицијената са великом тачношћу у две фазе. У првој фази одабране су вредности за тежинске коефицијенте. У другој фази се симулира електроенергетска мрежа и одређује се оптимална места и капацитети, на основу којих се одређују тежински коефицијенти.

Као што је констатовано да су значаји свих фактора једнаки, стога варијација сваког фактора може се сместити у исти опсег, користећи тежинске коефицијенте.

### 3.3.1. Тежински коефицијент “губитка снаге“

Губици електричне енергије могу се смањити одговарајућим постављањем и одређивањем величине дистрибуираних генераторских ресурса. Ова вредност може се

свести на нулу, али није економична због трошкова инсталирања великог броја дистрибуираних генераторских јединица. Претпостављајући  $\frac{P_{loss}^{withDG}}{P_{loss}^{withoutDG}} = 0.5$ , тежински коефицијент губитака снаге може имати најекономичнију вредност. Стога тежински коефицијент  $a$  рачуна се на основу

$$a = \frac{1}{0.5} = 2 \quad (3.30)$$

### 3.3.2. Тежински коефицијент “профила напона“

$b$  представља тежински коефицијент профила напона и може се добити из следеће једначине

$$b = \frac{1}{0.0025} = 400 \quad (3.31)$$

### 3.3.3. Тежински коефицијент “нивоа струја кратког споја“

Резултати различитих симулација на анализираним електроенергетским мрежама показују да са инсталирањем дистрибуираних генератора ниво струја кратког споја може повећати и до 150% у односу на случај у одсуству дистрибуираних генераторских ресурса. Наиме, ниво струја кратког споја се мора помножити са 2,5. Према томе има се

$$i_{sc,k}^{withDG} = 2.5i_{sc,k}^{withoutDG} \rightarrow \frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}} = 0.6 \rightarrow \left(\frac{i_{sc,k}^{withDG} - i_{sc,k}^{withoutDG}}{i_{sc,k}^{withDG}}\right)^2 = 0.36 \quad (3.32)$$

Из тога следи да тежински коефицијент  $c$  износи

$$c = \frac{1}{0.36} = 2.78 \quad (3.33)$$

### 3.3.4. Тежински коефицијент “капацитета дистрибуираних генераторских јединица“

Претпостављени капацитет дистрибуираних генераторских јединица износи 10 MW и претпоставља се да је фактор снаге једнак 1, а  $S_{base}$  да је 100 MVA. Стога се има следећа једначина

$$CG_k = \frac{P_{DG,k}}{\cos \varphi} = \frac{10}{1} = 10MVA \rightarrow \frac{CG_k}{S_{base}} = \frac{10}{100} = 0.1 \quad (3.34)$$

Стога је тежински коефицијент  $d$  једнак

$$d = \frac{1}{0.1} = 10 \quad (3.35)$$



Како би имали најбоље резултате, добијене тежинске факторе треба нормализовати на следећи начин

$$a = \frac{a}{a+b+c+d}, \quad b = \frac{b}{a+b+c+d}, \quad c = \frac{c}{a+b+c+d}, \quad d = \frac{d}{a+b+c+d} \quad (3.36)$$

Нормализацијом тежинских коефицијената, њихов збир треба да је

$$a+b+c+d=1 \quad (3.37)$$

Као резултат, добијају се почетне вредности тежинских коефицијената, који су представљени као

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.82 \\ 964.37 \\ 6.70 \\ 24.11 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \quad (3.38)$$

### 3.4. Индекси

Постојање индекса игра пресудну улогу у процени ефикасности одређивања капацитета и алокације техничких параметара мреже. Стога су представљени неки индекси, који могу да идентификују да ли су параметри у свом дозвољеном опсегу или нису.

#### 3.4.1. Индекс “губитка снаге“

Коришћењем овог индекса може се израчунати варијација губитака активне и реактивне снаге која је резултат инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса. Овај индекс је дефинисан за губитак активне и реактивне снаге респективно као

$$IL_p = \left(1 - \frac{\operatorname{Re}\{Losses_{WithDG}\}}{\operatorname{Re}\{Losses_{WithoutDG}\}}\right) \times 100\% \quad (3.39)$$

$$IL_q = \left(1 - \frac{\operatorname{Im}\{Losses_{WithDG}\}}{\operatorname{Im}\{Losses_{WithoutDG}\}}\right) \times 100\% \quad (3.40)$$

где су  $IL_p$  и  $IL_q$  проценат варијације губитака активне и реактивне снаге, респективно.

#### 3.4.2. Индекс “побољшања профила напона“

Овај индекс дефинисан је на следећи начин:

$$VP_{II} = \delta \cdot \left( \frac{VP_{WithDG}}{VP_{WithoutDG}} - 1 \right) \times 100\% \quad (3.41)$$

где је  $VP_{II}$  индекс побољшања профила напона. Овај индекс показује варијацију профила напона након инсталирања дистрибутивног генераторског ресурса.  $VP$  је профил напона пре и после инсталирања ових ресурса, и рачуна се на следећи начин

$$VP = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.42)$$

где су:

$V_i$  - вредност напона сваке дистрибутивне сабирнице (чвора), у р.и.

$\delta$  - индекс који идентификује да ли је профил напона у дозвољеном опсегу или није

$$\delta = \begin{cases} 1 & (0.95 < V_i < 1.05) \\ 0 & (V_i < 0.95 \text{ or } V_i > 1.05) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.43)$$

Као што је приказано у релацији (3.43), ако профил напона чак у само једној сабирници (чвору) нарушава дозвољени опсег, вредност  $\delta$  сходно томе, као и вредност  $VP_{II}$ , износи нула. Што је већа вредност  $VP_{II}$ , то показује веће побољшање профила напона.

### 3.4.3. Индекс “нивоа струја кратког споја“

Овај индекс рачуна се на следећи начин

$$ISC = \beta \cdot \left( \frac{I_{WithDG}^{SC}}{I_{WithoutDG}^{SC}} - 1 \right) \times 100\% \quad (3.44)$$

где су:

$I^{SC}$  - индекс нивоа струја кратког споја

$I_{WithoutDG}^{SC}$  - ниво струје кратког споја мреже пре инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса.

$I_{WithDG}^{SC}$  - ниво струје кратког споја мреже после инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса.

$$I^{SC} = \sum_{i=1}^n I_i^{SC} \quad (3.45)$$

где је  $I_i^{SC}$  струја кратког споја сваке дистрибутивне сабирнице, пре и после инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса.

Да би се утврдило да ли повећање нивоа струја кратког споја премашује прихватљиву вредност прекидача или не,  $\beta$  коефицијент је дефинисан на следећи начин

$$\beta = \begin{cases} 1 & (I_i < I_{Switch,i}) \\ 0 & (I_i > I_{Switch,i}) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.46)$$

Ако је ниво струја кратког споја свих сабирница у прихватљивом опсегу прекидача,  $\beta$  је једнак 1. А уколико је  $\beta$  једнако нули, то показује да је ниво струја кратког споја најмање једне сабирнице премашио дозвољену вредност прекидача. Индекс кратког споја би у овој ситуацији био једнак нули.

## 4. Одређивање функције циља

У овој глави представља се функција циља која представља однос трошкова и уштеда услед инсталираних обновљивих и необновљивих дистрибуираних генералних ресурса, као што је приказано у следећој једначини

$$OF = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{j=1}^m B_j}, \quad n = 4, m = 6 \quad (4.1)$$

где су:

$C_1$  - трошкови инвестиције

$C_2$  - трошкови одржавања

$C_3$  - оперативни трошкови

$C_4$  - трошкови замене прекидача

$B_1$  - уштеда добијена од мање куповине активне снаге од преносне мреже

$B_2$  - уштеда добијена од мање куповине реактивне снаге од преносне мреже

$B_3$  - уштеда добијена од смањења губитака енергије

$B_4$  - уштеда добијена од побољшања профила напона

$B_5$  - уштеда добијена одлагањем развоја капацитета трафостанице

$B_6$  - уштеда добијена побољшањем поузданости

### 4.1. Моделовања трошкова инсталирања дистрибуираних генератора

#### 4.1.1. Трошкови инвестиције ( $C_1$ )

Годишњи трошак почетног улагања у обновљиве и необновљиве дистрибуиране генераторске ресурсе израчунава се као

$$C_1 = F_{C,gas} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{DG\_gas,i} \times A_{gas} + F_{C,pv} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{DG\_pv,i} \times A_{pv} + F_{C,wind} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{DG\_wind,i} \times A_{wind} \quad (4.2)$$

где су:

$F_{C,gas}, F_{C,pv}, F_{C,wind}$  - почетни трошкови куповине и уградње гасно-турбинских, фотонапонских и ветро генератора, у ( $\frac{\$}{MW}$ )

$P_{DG\_gas,i}, P_{DG\_pv,i}, P_{DG\_wind,i}$  - максимална активна снага коју производе гасно-турбински, фотонапонски и ветро генератори инсталирани на  $i$ -тој сабирници, у (MW)

$n_{bus}$  - број 20 kV сабирница у електроенергетској мрежи

Будући да су трошкови улагања распоређени за све године у којима дистрибуирани генератори раде, у једначини (4.2) узима се у обзир годишњи фактор актуализације ( $A$ ).

$A$  се користи за израчунавање удела инвестиционих трошкова за сваку годину, а добија се из једначине

$$A = \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (4.3)$$

где су:

$r$  – каматна стопа

$T$  - је време поврата инвестиције, у годинама

где се претпоставља да је једнако годинама у којима су дистрибуирани генераторски ресурси у функцији.

#### 4.1.2. Трошкови одржавања ( $C_2$ )

Трошкови одржавања су трошкови поправке, резервних делова, праћења и одржавања дистрибуираних генераторских ресурса, трошкови израде и обуке и корист која се не стиче када су дистрибуирани генераторски ресурси на поправци. Трошкови одржавања састоје се од фиксних и променљивих делова у односу на произведену активну снагу дистрибуираних генераторских јединица. Стога су фиксни трошкови одржавања подељени са произведеном активном снагом дистрибуираних генераторских јединица ( $\$/MW$ ), а резултат се сабира са променљивим делом. Као резултат, трошкови одржавања зависе од капацитета дистрибуираних генераторских јединица и израчунавају се као

$$C_2 = C_{M,gas} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{DG\_gas,i} + C_{M,PV} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{DG\_PV,i} + C_{M,wind} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{DG\_wind,i} \quad (4.4)$$

где су  $C_{M,gas}, C_{M,PV}, C_{M,wind}$  годишњи трошкови одржавања гасно-турбинских, фотонапонских и ветро генераторских јединица ( $\frac{\$}{MW}$ ).

#### 4.1.3. Оперативни трошкови ( $C_3$ )

Иако су оперативни трошкови обновљивих извора дистрибуираних генератора занемарљиви, они се разматрају у овом делу. Годишњи оперативни трошкови рачунају се као

$$C_3 = \sum_{i=1}^{n_{bus}} (C_o \times EP_{gas,i} \times 10^3 + C_{o\_PV} \times EP_{PV,i} + C_{o\_wind} \times EP_{wind,i}) \quad (4.5)$$

где су:

$C_o$  - трошкови горива за гасно-турбинске агрегате дистрибуираних генераторских ресурса ( $\frac{\$}{kWh}$ ), а који се рачунају на основу једначине (4.6) [67]

$C_{o\_PV}$  и  $C_{o\_wind}$  - оперативни трошкови за фотонапонске и ветро генераторске ресурсе ( $\frac{\$}{kWh}$ )

$EP_{gas,i}$ ,  $EP_{PV,i}$  и  $EP_{wind,i}$  - годишња производња електричне енергије у јединици MWh помоћу гасно-турбинских, фотонапонских и ветро генератора у  $i$ -тој сабирници, а који се израчунавају као

$$C_o = \frac{B \times F_o}{HV \times R} \quad (4.6)$$

где су:

$B$  - коефицијент који претвара kcal у kWh и једнак је 860

$HV$  - топлотна вредност природног гаса ( $\frac{kCal}{m^3}$ ) и једнак је 8600

$R$  - ефикасност дистрибуираних генераторских јединица (%)

$F_o$  - трошак природног гаса ( $\frac{\$}{m^3}$ )

$$\begin{cases} EP_{gas,i} = \alpha_i \times P_{DG\_gas,i} \times (8760 - h_{main,i}) \\ EP_{PV,i} = \beta_i \times P_{DG\_PV,i} \\ EP_{wind,i} = \gamma_i \times P_{DG\_wind,i} \end{cases} \quad (4.7)$$

где су:

$h_{main,i}$  - укупан број сати у години у којој дистрибуирани генераторски ресурси нису у функцији због радова и одржавања

$\alpha_i$  - коефицијент учешћа гасно-турбинских генератора који зависи од криве оптерећења  $i$ -те сабирнице, а добија се из једначине (4.8).

$\beta_i$  и  $\gamma_i$  - годишња производња електричне енергије фотонапонских и ветро генераторских ресурса у  $i$ -тој сабирници, у MW.

$\beta_i$  и  $\gamma_i$  се добијају на основу географског положаја [68,69]

$$\alpha_i = \frac{\int_0^{P_{DG\_gas,i}} \int_{j=1}^{8760} E_i(t, p) dt dp}{P_{DG\_gas,i} \times 8760} \quad (4.8)$$

где је  $E_i(t,p)$  функција криве оптерећења  $i$ -те сабирнице.

#### 4.1.4. Трошкови замене прекидача ( $C_4$ )

У присуству дистрибуираних генераторских јединица, ниво струја кратког споја мреже се повећава. Ово повећање ће проузроковати неке проблеме за заштиту мреже ако ниво струја кратког споја мреже премаши ниво прекидача. Због тога се неки прекидачи морају заменити након инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса. Годишњи трошкови замене прекидача рачунају се помоћу једначине [67]

$$C_4 = A \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} C_{Switch,i} \quad (4.9)$$

где је  $C_{Switch,i}$  цена замене  $i$ -тог прекидача у \$.

## 4.2. Моделовање уштеда добијених уградњом дистрибуираних генераторских ресурса

### 4.2.1. Уштеда добијена због мање куповине активне снаге од преносне мреже (B<sub>1</sub>)

Уштеда добијена од мање куповине активне снаге од преносне мреже (B<sub>1</sub>) добија се помоћу једначине

$$B_1 = \sum_{i=1}^{n_{bus}} (EP_{gas,i} \times E_{P\_gas} + EP_{PV,i} \times E_{P\_PV} + EP_{wind,i} \times E_{P\_wind}) \quad (4.10)$$

где је  $E_P$  цена електричне енергије за гасно-турбинске, фотонапонске и ветро генераторске ресурсе, у (\$/MWh).

### 4.2.2. Уштеда добијена због мање куповине реактивне снаге од преносне мреже (B<sub>2</sub>)

Иако је главна сврха инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса снабдевање активном снагом, јер је инсталациона цена тих ресурса скупља од осталих ресурса који се користе за производњу реактивне снаге. Гасно-турбински дистрибуирани генераторски ресурси могу деловати на начин тако да њихов фактор снаге не буде јединствен. Стога, гасно-турбински дистрибуирани генераторски ресурси могу надокнадити реактивну снагу. Уштеда због мање куповине реактивне снаге од преносне мреже (B<sub>2</sub>) добија се помоћу једначине

$$B_2 = \sum_{i=1}^{n_{bus}} EP_{gas,i} \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} \times E_Q \quad (4.11)$$

где су:

$E_Q$  - цена реактивне снаге по сату, у (\$/MVarh)

$\cos \varphi$  - фактор снаге гасно-турбинских дистрибуираних генераторских јединица

### 4.2.3. Уштеда добијена због смањења губитака енергије (B<sub>3</sub>)

Годишња уштеда добијена због смањења губитака енергије (B<sub>3</sub>) добија се помоћу једначине

$$B_3 = \sum_{i=1}^{8760} (P_{Loss,i}^{WithoutDG} - P_{Loss,i}^{WithDG}) \times E_P \quad (4.12)$$

где су:

$P_{Loss,i}^{WithoutDG}$  - губитак енергије у  $i$ -том сату у одсуству дистрибуираних генераторских ресурса

$P_{Loss,i}^{WithDG}$  - губитак енергије у  $i$ -том сату у присуству дистрибуираних генераторских ресурса, а који нису у сервису за годишње одржавање

#### 4.2.4. Уштеда добијена због побољшања профила напона ( $B_4$ )

Једна од предности коришћења дистрибуираних генераторских ресурса јесте побољшање профила напона, што смањује употребу промене неноминалних односа трансформације у трансформаторима. Стога, смањењем броја промене неноминалних односа трансформације у трансформаторима, повећава се животни век трансформатора [70].

Уштеда добијена због побољшања профила напона ( $B_4$ ) добија се коришћењем једначине

$$B_4 = 2 \times \sum_{k=1}^{365} \sum_{j=1}^{n_{bus}} \sum_{i=1}^{N_{Tr,i}} \frac{N_{ijk}^{WithoutDG} - N_{ijk}^{WithDG}}{Tap_{Max,ij}} \times C_{T,ij} \quad (4.13)$$

где су:

$N_{Tr}$  - број трансформатора у  $i$ -тој трансформаторској станици

$N_{ijk}^{WithoutDG}$  и  $N_{ijk}^{WithDG}$  - број промена неноминалних односа трансформације на  $j$ -том трансформатору на  $i$ -тој трафостаници, у  $k$ -том сату у години пре и после инсталације дистрибуираних генераторских ресурса

$Tap_{Max}$  - максималан број промена неноминалних односа трансформације који произвођач трансформатора дозвољава

$C_{T,ij}$  - цена сваког трансформатора 63/20 kV у  $i$ -тој трансформаторској станици, у (\$)

Према кривој дневног оптерећења за побољшање профила напона, број промена неноминалних односа трансформације потребних за обезбеђивање максималног дневног оптерећења једнак је броју промена неноминалних односа трансформације потребних за повратак на основно оптерећење. Из тог разлога, у једначини (4.13) има се коефицијент два.

#### 4.2.5. Уштеда добијена одлагањем развоја капацитета трафостанице ( $B_5$ )

Годишња уштеда остварена одлагањем развоја капацитета трансформаторске станице приказана је једначином [67]

$$B_5 = A \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} \sum_{j=1}^{N_{Tr,i}} C_{T,ij} \times \left[ 1 - \left( \frac{1+IF}{1+r} \right)^{\Delta T_i} \right] \quad (4.14)$$

где су:

$IF$  - годишња стопа инфлације



$\Delta T$  - временски период у којем се развој капацитета трансформаторске станице може одложити и одређује се помоћу једначине

$$\Delta T = \frac{\text{Log}\left(\frac{1}{1-\gamma}\right)}{\text{Log}(1+\alpha_{Load})} \quad (4.15)$$

где су:

$\gamma$  - однос капацитета дистрибуираних генераторских јединица и вршног оптерећења трансформаторске станице

$\alpha_{Load}$  - годишња стопа раста оптерећења

#### 4.2.6. Уштеда добијена побољшањем поузданости ( $B_6$ )

Коришћењем дистрибуираних генераторских ресурса побољшава се поузданост електроенергетске мреже. До нестанка напајања у електроенергетским системима обично долази због кварова и дисконтинуитета у испоруци електричне енергије. Годишња уштеда због побољшања поузданости добија се помоћу једначине

$$B_6 = E_{demand} \times \sum_{i=1}^{n_{bus}} (S_{DG\_gas,i} + S_{DG\_PV,i} + S_{DG\_wind,i}) \times U_i \quad (4.16)$$

где су:

$E_{demand}$  - цена преузете енергије у електричној мрежи, у (\$/MVAh)

$S_{DG\_gas,i}$ ,  $S_{DG\_PV,i}$  и  $S_{DG\_wind,i}$  - вршна снага гасно-турбинских, фотонапонских и ветро генераторских јединица инсталираних на  $i$ -тој сабирници, у (MVA)

$U_i$  - годишње време нестанка електричне енергије на  $i$ -тој сабирници, у (h)

## 5. Математичка анализа алокације обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса

Један од главних проблема код алокације дистрибуираних генераторских ресурса јесте оптимизација времена рада. У ту сврху, у овој глави су представљени нови критеријуми за алокацију обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса. Предложени критеријуми заснивају се на упоређивању ефекта алокације обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса са ефектом алокације необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса на  $i$ -ој сабирници у електроенергетској мрежи.

Хипотеза 1: На основу природних фактора географског места  $i$ -те сабирнице, вредности  $\beta_i$  и  $\gamma_i$  су константне.

$$\beta_i = \text{конст.}, \gamma_i = \text{конст.} \text{ за } i=1,2,\dots,n_{bus}$$

### 5.1. Алокација фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса

Да би се пронашло оптимално место фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса, разлика између фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса и необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса (у овој докторској дисертацији, гасно-турбинских генератора) у сваком члану у функцији циља из главе 4 добија се помоћу једначина (5.1) и (5.2), респективно

$$\begin{aligned} \Delta C_1^i &= C_{1,PV}^i(P) - C_{1,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_1^i = (F_{C,PV} \times A_{PV} - F_{C,gas} \times A_{gas}) \times P \\ \Delta C_2^i &= C_{2,PV}^i(P) - C_{2,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_2^i = (C_{M,PV} - C_{M,gas}) \times P \\ \Delta C_3^i &= C_{3,PV}^i(P) - C_{3,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_3^i = (C_{o,PV} \times \beta_i - C_o \times \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times 10^3) \times P \\ \Delta C_4^i &= C_{4,PV}^i(P) - C_{4,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_4^i = 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta B_1^i &= B_{1,PV}^i(P) - B_{1,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_1^i = (\beta_i \times E_{P,PV} - \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times E_{P,gas}) \times P \\ \Delta B_2^i &= B_{2,PV}^i(P) - B_{2,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_2^i = (-\alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} \times E_Q) \times P \\ \Delta B_3^i &= B_{3,PV}^i(P) - B_{3,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_3^i = 0 \\ \Delta B_4^i &= B_{4,PV}^i(P) - B_{4,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_4^i = 0 \\ \Delta B_5^i &= B_{5,PV}^i(P) - B_{5,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_5^i = 0 \\ \Delta B_6^i &= B_{6,PV}^i(P) - B_{6,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_6^i = 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Хипотеза 2: Да би се оправдала економска корист, профит мора бити већи од вредности инвестиционих трошкова.

Према хипотези 2, може се написати неједначина

$$\sum_{j=1}^6 \Delta B_j^i > (1+r) \times \sum_{k=1}^4 \Delta C_k^i \quad (5.3)$$

Заменом једначина (5.1) и (5.2) у неједначину (5.3), добија се следећа релација

$$\beta_i > \frac{(1+r) \times [(F_{C,pv} \times A_{pv} - F_{C,gas} \times A_{gas}) + (C_{M,pv} - C_{M,gas}) + (-C_o \times \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times 10^3)] + \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times \left( \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} \times E_Q + E_{P\_gas} \right)}{E_{P\_pv} - (1+r) \times C_{o\_pv}} \quad (5.4)$$

$\beta_i$  је годишња производња електричне енергије фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса на  $i$ -тој сабирници, у (MW). Фотонапонски дистрибуирани генераторски ресурси могу се налазити на сабирницама у којима је задовољена релација (5.4).

## 5.2. Алокација ветро генераторских дистрибуираних генераторских ресурса

Да би се пронашло оптимално место ветро генераторских дистрибуираних генераторских ресурса, разлика између ветро генераторских дистрибуираних генераторских ресурса и необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса (у овој докторској дисертацији гасно-турбински дистрибуирани генераторски ресурси) у свакој функцији функције циља добијају се респективно једначинама (5.5) и (5.6)

$$\begin{aligned} \Delta C_1^i &= C_{1,wind}^i(P) - C_{1,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_1^i = (F_{C,wind} \times A_{wind} - F_{C,gas} \times A_{gas}) \times P \\ \Delta C_2^i &= C_{2,wind}^i(P) - C_{2,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_2^i = (C_{M,wind} - C_{M,gas}) \times P \\ \Delta C_3^i &= C_{3,wind}^i(P) - C_{3,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_3^i = (C_{o\_wind} \times \gamma_i - C_o \times \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times 10^3) \times P \\ \Delta C_4^i &= C_{4,wind}^i(P) - C_{4,gas}^i(P) \rightarrow \Delta C_4^i = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta B_1^i &= B_{1,wind}^i(P) - B_{1,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_1^i = (\gamma_i \times E_{P\_wind} - \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times E_{P\_gas}) \times P \\ \Delta B_2^i &= B_{2,wind}^i(P) - B_{2,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_2^i = (-\alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} \times E_Q) \times P \\ \Delta B_3^i &= B_{3,wind}^i(P) - B_{3,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_3^i = 0 \\ \Delta B_4^i &= B_{4,wind}^i(P) - B_{4,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_4^i = 0 \\ \Delta B_5^i &= B_{5,wind}^i(P) - B_{5,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_5^i = 0 \\ \Delta B_6^i &= B_{6,wind}^i(P) - B_{6,gas}^i(P) \rightarrow \Delta B_6^i = 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Заменом једначина (5.5) и (5.6) у неједначину (5.3), добија се следећа релација

$$\gamma_i > \frac{(1+r) \times \left[ (F_{C,wind} \times A_{wind} - F_{C,gas} \times A_{gas}) + (C_{M,wind} - C_{M,gas}) + (-C_o \times \alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times 10^3) \right]}{E_{P\_wind} - (1+r) \times C_{o\_wind}} + \frac{\alpha_i \times (8760 - h_{main,i}) \times \left( \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} \times E_Q + E_{P\_gas} \right)}{E_{P\_wind} - (1+r) \times C_{o\_wind}} \quad (5.7)$$

$\gamma_i$  је годишња производња електричне енергије из ветро генераторских дистрибуираних генераторских ресурса на  $i$ -тој сабирници, у (MW). Ветро генераторски дистрибуирани генераторски ресурси могу се налазити на сабирницама у којима је задовољена релација (5.7).

## 6. Предложени алгоритам

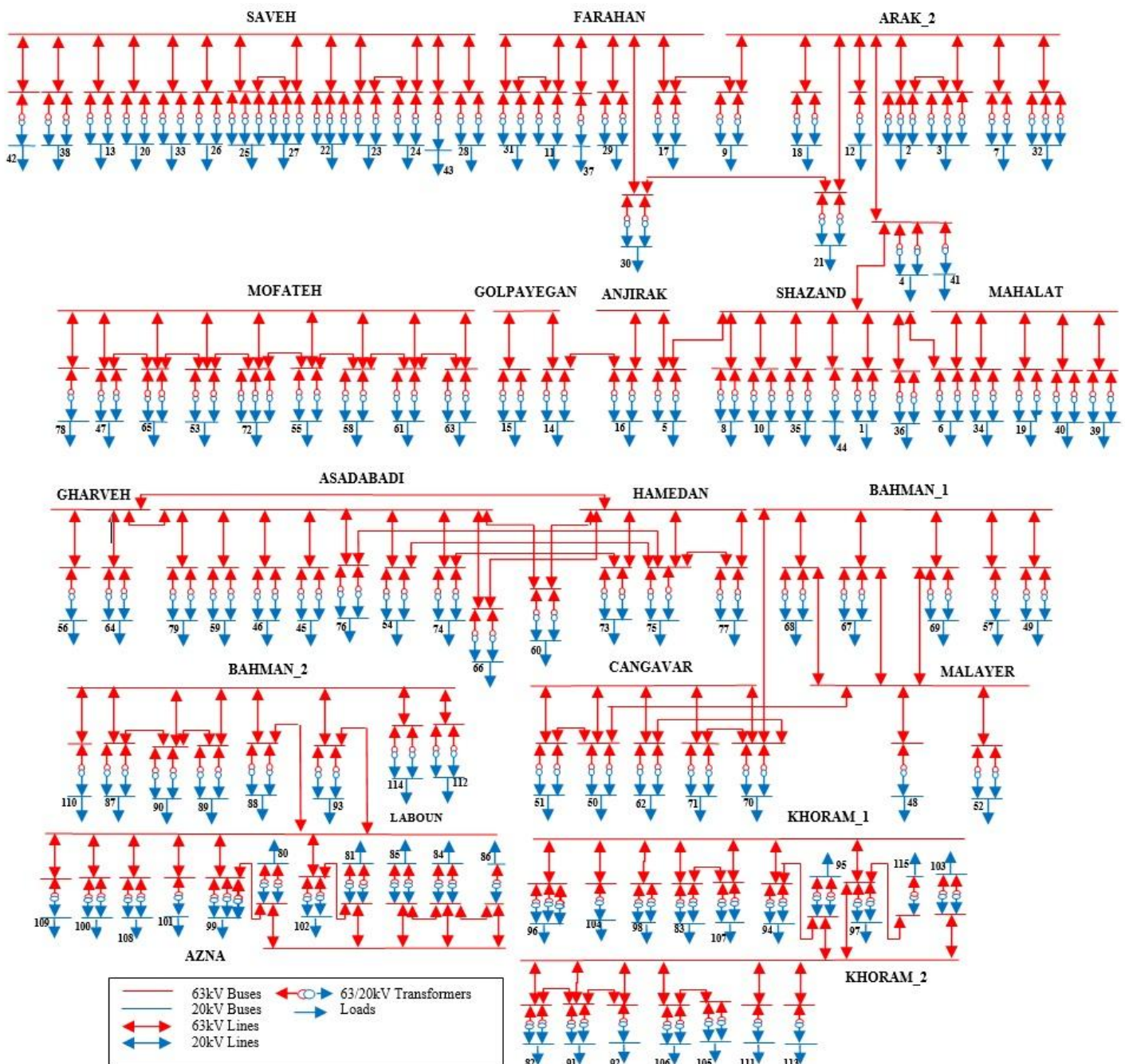
### 6.1. Студија случаја

Предложени алгоритам у овој докторској дисертацији ради верификације предложеног алгоритма примењен је на мрежи Бахтар регионалне електричне компаније (BREC) у Ирану. Ову електроенергетску мрежу чини електричне мреже три провинције, а то су Маркази, Хамедан и Лорестан. Број трансформаторских станица 63/20 kV у овој електроенергетској мрежи је 115 (слика 6.1).

Техничке и економске информације о овој електроенергетској мрежи представљене су у табели 6.1 [71-73]. У табели 6.2 приказано је оптерећење сваке 63/20 kV подстанце BREC, а у табели 6.3 представљени су нивои прекидача сваке сабирнице у електроенергетској мрежи BREC.

Табела 6.1: Техничке и економске информације BREC електроенергетске мреже

Параметри	Гасне турбине DG	Фотонапонски DG	Ветро генератори DG
$F_C$ (\$/MW)	458.000	1.210.000	1.000.000
$C_M$ (\$/MW)	16.000	30.000	34.000
$C_o$ (\$/MWh)	13,158	0,062	0,074
$T$ (year)	15	20	20
$r$ (%)	18	18	18
$IF$ (%)	15	15	15
$E_p$ (\$/MWh)	30	171	129
$E_Q$ (\$/MVarh)	17,70		
$h_{main}$ (hour)	336		



Слика 6.1: Дијаграм BREZ електроенергетске мреже

Табела 6.2: Максимално оптерећење сваке 63/20 kV трафостанице у ВРЕС електроенергетској мрежи

Локација сабирнице	Макс. оптерећење (MW)	Локација сабирнице	Макс. оптерећење (MW)	Локација сабирнице	Макс. оптерећење (MW)	Локација сабирнице	Макс. оптерећење (MW)	Локација сабирнице	Макс. оптерећење (MW)
1	15,7	24	19,5	47	7	70	35,6	93	18
2	24	25	36	48	5	71	13	94	40
3	32,3	26	21,5	49	14,9	72	20	95	14,4
4	42	27	47	50	21	73	23	96	51,5
5	17	28	19	51	13	74	26	97	26
6	27	29	18	52	24	75	10	98	20,6
7	10,8	30	16,8	53	9	76	39	99	13,9
8	5,2	31	4,3	54	29	77	30	100	22
9	19	32	2	55	19,5	78	8,9	101	10
10	17	33	16	56	7	79	13	102	3,9
11	9,4	34	19,3	57	6,3	80	18	103	12,5
12	6,8	35	17,4	58	26,4	81	17	104	0,1
13	10,2	36	6,4	59	16	82	10	105	21
14	16,7	37	4	60	14	83	12,4	106	29,5
15	26,3	38	13,5	61	22	84	23	107	28,1
16	15,5	39	16	62	21	85	16,6	108	13,2
17	35,2	40	12	63	16	86	16,6	109	8,3
18	19	41	13	64	5	87	28	110	7
19	26	42	16	65	21,4	88	22	111	6,5
20	14	43	10,5	66	25	89	28	112	6
21	8,2	44	6,5	67	16	90	8	113	14,1
22	50,5	45	15,5	68	32	91	18	114	9
23	42,5	46	23,5	69	21	92	6,3	115	6,4

Табела 6.3: Ниво прекидача сваке сабирнице у ВРЕС електроенергетској мрежи

Локација сабирнице	Ниво СВ (kA)	Локација сабирнице	Ниво СВ (kA)	Локација сабирнице	Ниво СВ (kA)	Локација сабирнице	Ниво СВ (kA)	Локација сабирнице	Ниво СВ (kA)
1	26	24	20	47	25	70	20	93	25
2	14	25	20	48	12	71	20	94	20
3	20	26	20	49	25	72	20	95	25
4	20	27	20	50	20	73	26	96	20
5	20	28	25	51	20	74	20	97	20
6	20	29	20	52	20	75	20	98	20
7	20	30	14	53	20	76	20	99	20
8	20	31	20	54	20	77	20	100	20
9	20	32	20	55	25	78	20	101	20
10	25	33	20	56	14	79	20	102	22
11	12	34	20	57	26	80	25	103	20
12	20	35	20	58	20	81	14	104	25
13	20	36	20	59	20	82	20	105	12
14	20	37	20	60	20	83	20	106	12
15	20	38	20	61	20	84	20	107	20
16	20	39	20	62	20	85	25	108	20
17	20	40	20	63	20	86	20	109	20
18	25	41	20	64	25	87	25	110	20
19	20	42	20	65	20	88	20	111	20
20	20	43	20	66	26	89	16	112	20
21	25	44	20	67	20	90	20	113	20
22	20	45	20	68	25	91	25	114	20
23	20	46	20	69	20	92	20	115	20

## 6.2. Ограничења и усвојене претпоставке

За предложени алгоритам узета су у обзир техничка и економска ограничења. Техничка ограничења су максимална пенетрација дистрибуираних генераторских ресурса у фидеру, капацитет дистрибуираних генераторских јединица, фактор снаге дистрибуираних генераторских ресурса, ефикасност гасних турбина, највећи број дозвољених промена ненормалног односа трансформације трансформатора, величина



промене напона у свакој сабирници, ограничења напона, годишња стопа раста оптерећења и очекивано време нестанка напајања електричне енергије. Економско ограничење је буџетско ограничење. Претпоставке предложеног алгоритма, који садржи трошкове природног гаса, замену прекидача и трансформатора, као и цену преузете електричне енергије, одређују се према локацији у ВРЕС електроенергетској мрежи. У наставку су детаљно објашњена ограничења.

### **6.2.1. Максимална пенетрација дистрибуираних генераторских ресурса у фидеру**

На основу прописа о инсталирању дистрибуираних генераторских ресурса у ВРЕС електроенергетској мрежи, максимална пенетрација дистрибуираних генераторских јединица у фидеру износи 60%

$$P_i^{DG} < 60\% \times P_{load,i}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n_{bus} \quad (6.1)$$

### **6.2.2. Капацитет дистрибуираних генераторских јединица**

Будући да у ВРЕС електроенергетској мрежи треба да се инсталирају дистрибуиране генераторске јединице са капацитетима у распону од 10 MW до 25 MW са кораком од 5 MW, ове вредности се користе као претпостављени капацитети.

### **6.2.3. Фактор снаге дистрибуираних генераторских ресурса**

Фактори снаге сваке гасне турбине су константни и једнаки 0,986, а за фотонапонске и ветро генераторске дистрибутивне генераторске јединице износе 1.

### **6.2.4. Буџетско ограничење**

Једно од основних економских ограничења јесте буџетско ограничење, које се не узима у обзир у многим истраживањима. Годишњи буџет ВРЕС електроенергетске мреже за развој дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи износи 80 милиона \$

$$Budget \geq C_1 + C_2 + C_4 \quad (6.2)$$

### **6.2.5. Ефикасност гасно-турбинских дистрибуираних генераторских ресурса (R)**

Ефикасност гасно-турбинских дистрибуираних генераторских ресурса зависи од надморске висине, временских услова и влажности ваздуха. У овој докторској дисертацији, пошто су то стохастични показатељи, ефикасности гасно-турбинских дистрибуираних генераторских ресурса су константне и једнаке су 38 % у свим сабирницама ВРЕС електроенергетске мреже.

### **6.2.6. Цена природног гаса ( $F_0$ )**

Цена природног гаса у Ирану износи  $0,05 \text{ \$/m}^3$ . Јефтина цена природног гаса у Ирану не умањује важност ове докторске дисертације, јер у другим земљама где имају већу цену природног гаса, у истој мери имају већу цену електричне енергије у односу на Иран.

### **6.2.7. Трошкови замене прекидача**

У овој докторској дисертацији је претпостављено да уколико је потребно да се замени прекидач, он се замењује са прекидачем од 25 кА. Цена прекидача од 25 кА износи 430.022 \$.

### **6.2.8. Максималан дозвољени број промена неноминалног односа трансформације ( $T_{ap_{Max}}$ )**

Ова вредност се добија уз помоћ техничког листа трансформатора. Према подацима из инсталираних трансформатора у BREC електроенергетској мрежи, ова вредност износи 250.000.

### **6.2.9. Опсег промене напона у сваком неноминалном односу трансформације**

Према подацима BREC електроенергетске мреже, сваки трансформатор има 16 регулационих отцепа и сваки отцеп може да промени напон за 2,5%.

### **6.2.10. Дозвољени опсег напона**

Минимално и максимално ограничење напона је изабрано да буде 0,95 (р.и.) и 1,05 (р.и.), респективно [65].

### **6.2.11. Цена трансформатора ( $C_T$ )**

Цена 63/20 kV трансформатора у BREC електроенергетској мрежи износи 13.500 \$/MVA.

### **6.2.12. Годишња стопа пораста оптерећења ( $\alpha_{Load}$ )**

Годишња стопа пораста оптерећења у BREC електроенергетској мрежи износи 4,20 %.

### **6.2.13. Цена потрошње енергије у електричној мрежи ( $E_{demand}$ )**

Цена потрошње енергије у BREC електроенергетској мрежи износи 56,60 (\$/MVAh) [72].

### **6.2.14. Време нестанка струје ( $U$ )**

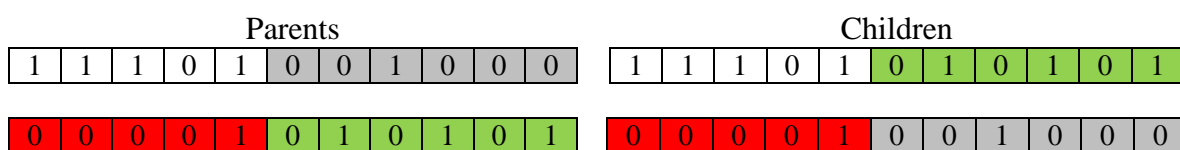
Укупно време нестанка струје у BREC електроенергетској мрежи износи 15,8 сати. Од тога 11,5 сати је време нестанка електричне енергије у дистрибутивној мрежи. Према томе, време прекида у под-преносној мрежи износи 4,3 сати [72].

## 6.3. Техника оптимизације и софтвер

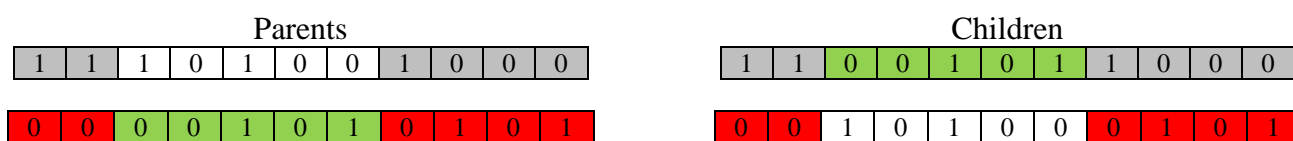
### 6.3.1. Техника оптимизације

Ради минимизације функције циља потребан је алгоритам за оптимизацију. У овој докторској дисертацији користи се генетски алгоритам (GA) за оптимизацију функције циља. Да би се оптимизирао проблем помоћу генетског алгоритма, у првом кораку потребно је дефинисати популацију за оптимизацију. Ова популација настаје бинарном случајном квантизацијом хромозома. У следећем кораку, произведена популација примењује се на функцију циља. Бирају се неки од најбољих одговора и производи се нова генерација. То раде генетски оператори са укрштањем и мутацијом.

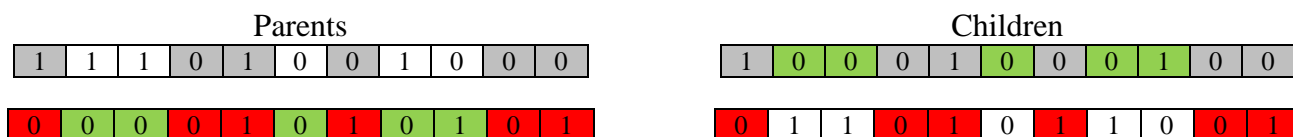
У оператору укрштања, два гена, која би требало комбиновати, смештена су један поред другог и подељени су са одређене тачке. Затим се странице које се налазе једна испред друге комбинују заједно. Генетски оператор имплементиран је на три начина који су 1) укрштање са једном тачком, 2) укрштање са две тачке и 3) униформно укрштање. Сваки од ових начина приказани су на сликама 6.2, 6.3 и 6.4, респективно. Као што је јасно са ових слика, настали хромозоми носе све своје родитељске информације без икаквих промена.



Слика 6.2: Генетски оператор укрштања са једном тачком



Слика 6.3: Генетски оператор укрштања са две тачке



Слика 6.4: Генетски оператор са униформним укрштањем

Насупрот укрштању, свако дете се рађа од једног родитеља само у мутацијском генетском оператору. Дете је заиста створено случајним мењањем једног од његових хромозома родитеља. Отуда се ствара нова генерација са новим хромозомима који нису

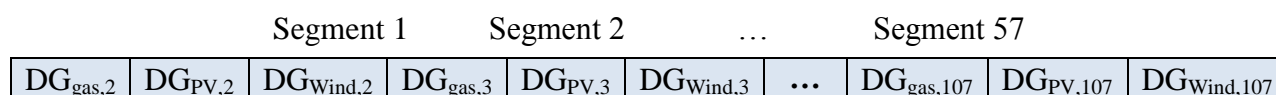
постојали код родитеља. Ови нови хромозоми називају се мутациони хромозоми. Генетски оператор мутације приказан је на слици 6.5.



Слика 6.5: Генетски оператор мутације

Да би се добио глобални и најбржи одговор, у овој докторској дисертацији користе се оба генетска оператора. Ово је имплементирано помоћу `mfile` секције програмског софтвера Matlab.

У докторској овој дисертацији број хромозома и други параметри одабрани су према тренутном проблему. Минимална величина дистрибуираног генераторског ресурса је 10 MW, а максимална пенетрација дистрибуираног генераторског ресурса у фидеру износи 60 %. Због тога на сабирнице чија је максимално оптерећење мање од 16,67 MW не могу се инсталирати дистрибуирани генераторски ресурси. На 58 сабирница максимално оптерећење је испод 16,67 MW. Као резултат, гасно-турбинске, фотонапонске и ветро генераторске дистрибуиране генераторске јединице могу се инсталирати на 57 сабирница. Низ са 171 хромозома (57x3) потребан је за сваку популацију. На слици 6.6 приказан је низ сваке популације. Сваки низ подељен је на 57 сегмената на начин тако да је сваки сегмент представник једне од мрежне сабирнице.



Слика 6.6: Низ сваке популације

На основу релација (5.4) и (5.7), за инсталирање фотонапонских и ветро генераторских обновљивих извора енергије, посматра се ограничење за одређивање локације ових обновљивих ресурса. Ако ове релације нису испуњене, део сегмента (хромозома), који је везан за обновљиве ресурсе, износи нула. Другим речима, када релација (5.4) на  $i$ -тој сабирници није испуњена, хромозом везан за активну снагу фотонапонског дистрибуираног генераторског ресурса везаном за тај сегмент износи нула. Исто тако, хромозом везан за активну снагу дистрибуираног генераторског ресурса ветро генератора везаном за тај сегмент постаје нула када релација (5.7) на  $i$ -тој сабирници није испуњена. Тиме се смањује дужина низа и као резултат тога оптимизација времена извођења. Будући да ВРЕС електроенергетска мрежа има 115 сабирница, оптимизација времена извођења је велика када низ има 171 хромозома. Међутим, коришћењем

предложене математичке формулације, оптимизација времена извођења се значајно смањује смањењем броја хромозома у низу.

Смањивањем времена извођења оптимизације није једини утицај смањења броја хромозома. Тиме се може смањити вероватноћа да се оптимизација заврши у локалним минимумима. Смањивање броја хромозома доводи до конвергенције оптимизације на глобални минимум. Поред тога, релације (5.4) и (5.7) истражују економску могућност инсталирања обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса на сабирницама.

### **6.3.2. Избор алгорита за оптимизацију**

Генерално, у свим оптимизацијама тражи се најбољи могући одговор. Будући да се резултат добија према врсти избора методе, циљ је добити најбољи одговор у простору могућих одговора. У већини случајева циљ је минимизација или максимизација функције циља.

У овој докторској дисертацији, детаљним испитивањем алгорита за оптимизацију и предностима и недостацима сваког од њих и према ранијим студијама у области алокације и одређивања капацитета дистрибуираних генераторских ресурса, у већини студија из области изабран је класичан генетски алгоритам. Тако да је и у овој докторској дисертацији коришћен генетски алгоритам за оптимизацију функције циља и проналажење најбољег места и величине за инсталирање дистрибуираних генераторских ресурса. Неке од предности овог алгорита су следеће:

- Лако разумљив
- Његова препознатљивост и модуларност
- Подршка за вишекритеријумску оптимизацију
- Увек постоји одговор који се временом побољшава
- Постоје разне методе за повећање брзине и напретка алгорита
- Лако коришћење претходних одговора
- Постојање меморије или историје

### **6.3.3. Софтвер**

Предложени алгоритам и BREC електроенергетска мрежа симулирају се у софтверу DIgSILENT Power Factory. Софтвер DIgSILENT је познат као погодан софтвер за примену формулација везаних за алокацију и извођење прорачуна мрежне анализе, расподеле оптерећења, струја кратког споја итд. Међутим, овај софтвер није погодан за примену генетских алгорита, због слабости у неким математичким прорачунима. Због тога је одлучено да се генетски алгоритам примени у софтверу Matlab, а с обзиром на то да два

наведена софтвера имају моћ међусобног повезивања, на овај начин може се користити програмирања и анализе мреже DIgSILENT заједно са Matlab-ом.

Веза између ова два софтвера, тј. веза између два програма за оптимизацију у DIgSILENT-у и Matlab-у, успостављена је путем Text датотеке која се зове LINK.txt. Детаљи ове везе су дати у наставку:

1) Програм Optimization.dz прво уноси нулти код у датотеку LINK.txt, што значи да је програм Optimization.dz још увек покренут и није време за покретање GA.exe.

2) Затим програм Optimization.dz вектор 
$$\begin{bmatrix} 1 \\ n_{Vars} \\ Population\_size \end{bmatrix}$$
 у датотеци LINK.txt,  $n_{Vars}$

представља број хромозома који се користе у GA. Број један такође значи почетак GA.

3) GA.exe убацује код 2 и вектор колоне хромозома, који има исти број редова, у датотеку LINK.txt на следећи начин. Шифра 2 значи да је GA обавио свој посао и чека излаз Optimization.dz.

$$\begin{bmatrix} 2 \\ x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ n_{Vars} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

где су  $x_1$ ,  $x_2$ , ... локација и величина дистрибуираног генератора који се одређују генетским алгоритмом.

4) Програм Optimization.dz покреће се чим на почетку датотеке LINK.txt види код 2 и израчунава вредности дате у овој датотеци, односно вредност функције циља. Затим код 3 и вредност функције циља као стубни вектор 
$$\begin{bmatrix} 3 \\ OF \end{bmatrix}$$
 у датотеци LINK.txt, где 3 значи привремени прекид рада Optimization.dz и поновно покретање GA.exe.

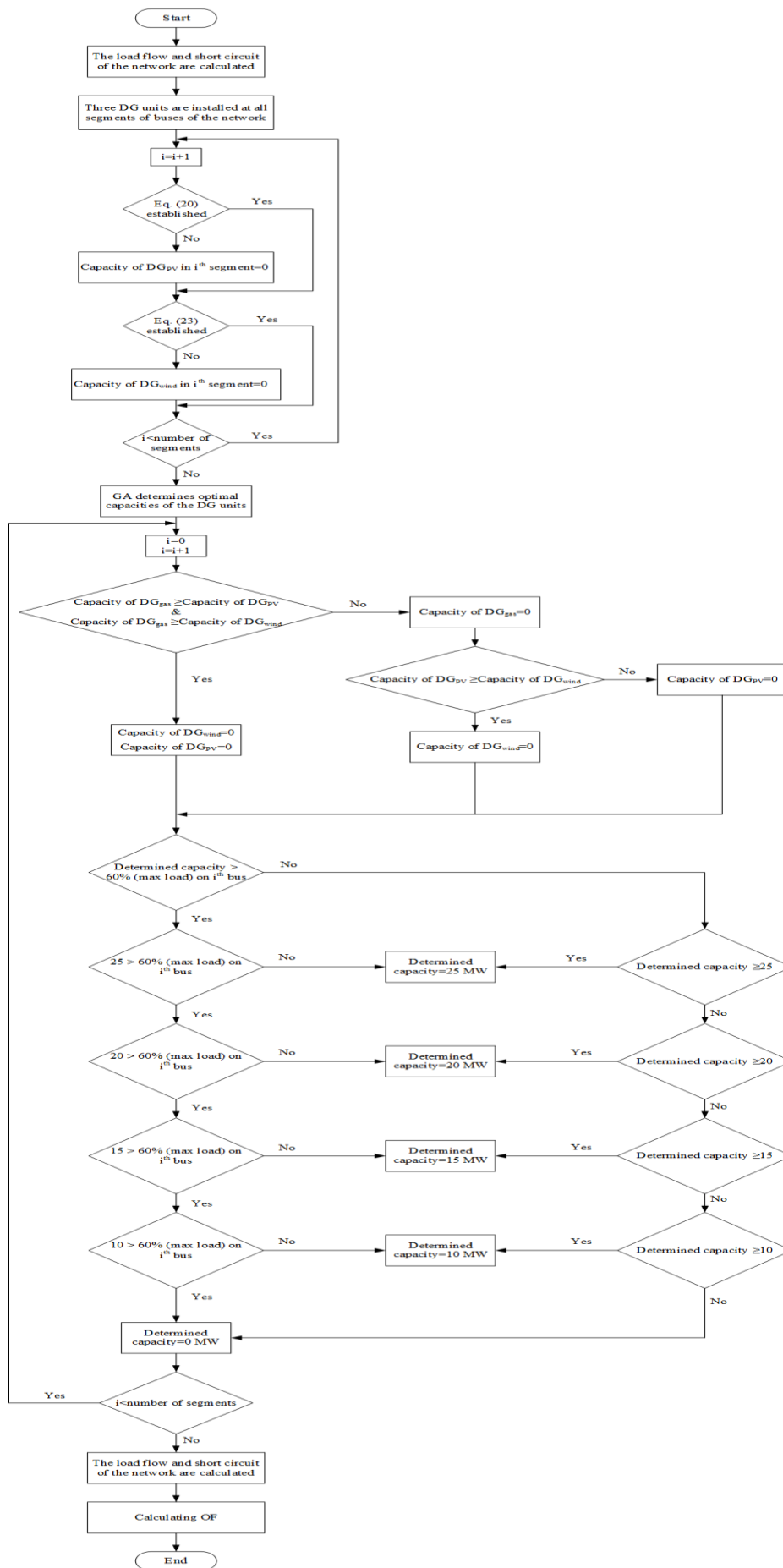
5) Ако није достигао максималан број, враћа се на корак 3, у супротном прелази на следећи корак.

6) Задатак GA.exe је завршен и убацује код 4 у датотеку LINK.txt, што значи да су задаци завршени.

7) Optimization.dz примећује завршетак оптимизације гледајући код 4 у датотеци LINK.txt.

#### **6.4. Предложени алгоритам за одређивање оптималног броја и величине дистрибуираних генераторских ресурса**

Дијаграм тока предложеног алгоритма за одређивање оптималног броја, величине и локације дистрибуираних генераторских јединица приказан је на слици 6.7. У првој фази одређује се број могућих сабирница (у овој докторској дисертацији назван сегментом) за лоцирање дистрибуираних генераторских јединица. Ограничења која су коришћена описана су у одељцима 6.2.1. и 6.2.2. Затим се могућност алокације обновљивих извора дистрибуираних генератора, који су фотонапонски и ветро генератори, на сваком сегменту истражује предложеним критеријумима који су детаљно објашњени у глави 5. У следећем кораку, предложена функција циља, представљена у глави 4, минимизирана је коришћењем генетског алгоритма. Функције трошкова и уштеде, представљене у глави 4, линеарне су функције у односу на активну снагу. Стога је на сваком сегменту постављена само једна врста дистрибуираних генераторских ресурса. Ако према резултатима оптимизације, капацитет дистрибуираних генераторских јединица на сегменту нарушава ограничење пенетрације, почетни капацитет дистрибуираног генератора се сматра једнаким 60% максималног оптерећења на сегменту. Будући да према ограничењу у одељку 6.2.2., капацитет дистрибуираног генераторског ресурса не може прихватити било који износ, највећи дозвољени капацитет дистрибуираног генераторског ресурса који је мањи од оптималног капацитета дистрибуираног генераторског ресурса, сматра се коначним капацитетом дистрибуираног генераторског ресурса. Коначно, капацитет дистрибуираног генераторског ресурса на сваком сегменту добија се према резултатима оптимизације генетског алгоритма и ограничења.



Слика 6.7: Дијаграм тока одређивања оптималног броја, величине и локације дистрибуираног генераторског ресурса



## 7. Резултати симулације

Локације сабирница на којима је релација (5.4) задовољена у ВРЕС електроенергетској мрежи представљене су у табели 7.1. У овој табели приказане су годишње производње електричне енергије фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса на свакој локацији.

Табела 7.1: Годишње производње електричне енергије фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса

Локација сабирнице	Годишња производња електричне енергије (MWh)	Локација сабирнице	Годишња производња електричне енергије (MWh)
4	1690	50	1710
12	1690	51	1690
14	1700	82	1700
15	1700	88	1690
16	1710	89	1700
19	1700	90	1700
20	1700	96	1700
25	1710	97	1700
27	1710	98	1690
34	1780	103	1690
39	1700	105	1720
40	1770	106	1720

Локације сабирница на којима је релација (5.7) задовољена у ВРЕС електроенергетској мрежи представљене су у табели 7.2. У овој табели приказане су годишње производње електричне енергије за 660 kW ветро генераторе дистрибуираних генераторских ресурса на свакој локацији.

Табела 7.2: Годишња производња електричне енергије за 660 kW ветро генераторе дистрибуираних генераторских ресурса















































Локација сабирнице	Годишња производња електричне енергије за 660 kW (MWh)
5	1394
7	1394
10	1403
21	1398
37	1414
75	1480
89	1279
90	1279
107	1274
114	1295

На основу предложеног алгоритма у глави 5, у приказаним резултати у табелама 7.1 и 7.2 назначене су локације где се могу налазити фотонапонски и ветро генераторски дистрибуирани генераторски ресурси.

Нова математичка формулација представљена у глави 5 доводи до тога да генетски алгоритам настоји да добије оптималну локацију и величину обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса само међу сабирницама кандидатима, уместо свих сабирница. Једна од предности употребе нове формулације јесте смањење количине прорачуна. Као резултат, оптимизација времена извођења алгоритма је смањена.

Оптимизација времена извршаваља без разматрања релација (5.4) и (5.7) износи 26 сати и 38 минута, док се са разматрањем ових релација оптимизација времена рада смањује на 5 сати и 25 минута. То значи да помоћу предложеног алгоритма време за постизање оптималних резултата постаје пет пута мање.

Табела 7.3: Оптималне величине и локације дистрибуираних генераторских ресурса

Локација сабирнице	Димензија DG (MW)	Локација сабирнице	Димензија DG (MW)	Локација сабирнице	Димензија DG (MW)	Локација сабирнице	Димензија DG (MW)	Локација сабирнице	Димензија DG (MW)					
1	0	24	0	47	0	70		15	93		10			
2		10	25	0	48	0	71		0	94		0		
3		15	26		10	49	0	72	0	95	0			
4		25	27		25	50		10	73		10	96		25
5	0	28		10	51	0	74		15	97		0		
6		15	29	0	52	0	75	0	76		20	98	0	
7	0	30		10	53	0	77		15	100		10		
8	0	31	0	54		15	78	0	101	0				
9		10	32	0	55		10	79	0	102	0			
10		10	33	0	56	0	80		10	103	0			
11	0	34		10	57	0	81		10	104	0			
12	0	35		10	58		10	82	0	105	0			
13	0	36	0	59	0	83	0	106	0					
14		10	37	0	60	0	84		10	107		15		
15	0	38	0	61		10	85	0	108		0			
16	0	39	0	62		10	86	0	109	0				
17		20	40	0	63	0	87	0	110	0				
18	0	41	0	64	0	88		10	111	0				
19		15	42	0	65	0	89		15	112	0			
20	0	43	0	66		10	90		0	113	0			
21	0	44	0	67	0	91		10	114	0				
22		20	45	0	68		15	92	0	115	0			
23		15	46		10	69	0	92	0	115	0			

Оптималне величине и локације дистрибуираних генераторских ресурса, који су добијени предложеним алгоритмом, представљени су у табели 7.3. Оптималан број

дистрибуираних генераторских ресурса износи 41, а укупна величина износи 540 MW. Од тог броја, 7 је фотонапонских дистрибуираних генераторских ресурса (који се налазе на сабирницама број 4, 19, 27, 34, 50, 88 и 96), а њихов збир величина износи 120 MW. Три дистрибуирана генераторска ресурса су ветро генератори (који се налазе на сабирницама број 10, 89 и 107) и њихова укупна величина износи 40 MW. Преосталих 31 су гасно-турбински дистрибуирани генераторски ресурси и њихова укупна величина износи 380 MW.

Према резултатима симулације, пенетрација дистрибуираних генераторских ресурса у овој докторској дисертацији за BREC електроенергетску мрежу износи 25,96%.

У табели 7.4 приказана је укупна величина сваке врсте дистрибуираног генераторског ресурса по провинцији и удео сваке врсте дистрибуираног генераторског ресурса у BREC електроенергетској мрежи. Процент инсталације обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса помоћу предложеног оптималног алгоритма за димензионисање износи 29,63%, а остали дистрибуирани генераторски ресурси су необновљиви дистрибуирани генераторски ресурси (гасно-турбински агрегати).

Табела 7.4: Укупна величина сваке врсте дистрибуираних генераторских ресурса по провинцијама

Провинција	Фотонапонски DG (MW)	Ветро DG (MW)	Гасни DG (MW)	Укупно (MW)
Маркази	75	10	155	240
Хамедан	10	0	165	175
Лорестан	35	30	60	125
Укупно(MW)	120	40	380	540
Укупно (%)	22,22%	7,41%	70,37%	100%

Тренутни капацитет инсталираних обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса у иранској електроенергетској мрежи износи 831 MW [71], док је максимално оптерећење 58254 MW [74]. То значи да је садашњи удео обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса у иранској мрежи око 1,43 %. Међутим, користећи предложени алгоритам, удео обновљивих дистрибуираних генераторских ресурса у студији случаја ове докторске дисертације износи 7,69 %. Сходно томе, предложени алгоритам може ефикасно одредити повећано учешће обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса у производњи електричне енергије.

У табели 7.5 приказана је годишња вредност разматраних функција трошкова и добити. Вредност функције циља износи 0,8185, а однос добити и трошкова износи 1,2217, што је више од инвестиционих трошкова. Дакле, резултати показују ефикасност предложеног алгоритма.

Табела 7.5: Годишња вредност функција трошкова и добити

Функције годишњих трошкова (\$)		Функције годишње добити (\$)	
$C_1$	68.781.042,12	$B_1$	126.712.251,10
$C_2$	11.040.000,00	$B_2$	8.128.230,75
$C_3$	35.748.802,80	$B_3$	3.754.794,45
$C_4$	168.915,22	$B_4$	328.959,90
		$B_5$	2.342.278,30
		$B_6$	132.738,37
Укупно	115.738.760,14	Укупно	141.399.252,87

Табела 7.6: Ниво струја кратког споја сваке сабирнице у ВРЕС електроенергетској мрежи након инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса

Локација сабирнице	Ниво SC (kA)	Локација сабирнице	Ниво SC (kA)	Локација сабирнице	Ниво SC (kA)	Локација сабирнице	Ниво SC (kA)	Локација сабирнице	Ниво SC (kA)
1	13,3	24	17,6	47	16,8	70	15,2	93	16,1
2	21,7	25	11,4	48	2,4	71	15	94	9
3	18,6	26	16,3	49	10,5	72	7	95	10,2
4	16,1	27	24	50	14	73	14,5	96	17,5
5	12,9	28	23,5	51	12,1	74	13,1	97	18
6	4,8	29	18	52	2,2	75	15,8	98	7,4
7	8,5	30	5,9	53	13,9	76	8	99	8,3
8	4,2	31	13,7	54	14	77	13,8	100	14,2
9	16	32	12	55	13,8	78	7,6	101	9,5
10	18,1	33	10,1	56	1,9	79	2,1	102	7,4
11	4,1	34	11,5	57	14	80	9,9	103	3,9
12	3,9	35	15,4	58	16	81	10,2	104	2,5
13	3	36	4,7	59	8,3	82	14	105	1,8
14	7,9	37	3,8	60	13,7	83	8	106	2,8
15	12,5	38	6,6	61	13,8	84	6,7	107	5
16	9,8	39	4	62	12,1	85	12	108	1,8
17	15,8	40	6,2	63	16	86	6,5	109	3
18	14,2	41	5	64	8,8	87	8	110	2,2
19	12,3	42	9,4	65	8,9	88	14,1	111	4,3
20	8,4	43	7,2	66	13,5	89	14,2	112	1,8
21	7,9	44	3,1	67	14	90	10	113	1,7
22	19,9	45	12	68	16,4	91	15	114	2,2
23	15,1	46	14,7	69	14,9	92	10,9	115	2

У табели 7.6 приказан је ниво струја кратког споја сваке сабирнице у ВРЕС електроенергетској мрежи након оптималне алокације дистрибуираних генераторских ресурса. Према овим резултатима, нивои струја кратког споја у две сабирнице, и то у сабирницама број 2 и 27, су премашиле дозвољени опсег прекидача. Стога се ови прекидачи морају заменити.

Да би се уштедело на трошковима, може се променити место постављања прекидача у ВРЕС електроенергетској мрежу на начин тако да су нивои струја кратког споја свих сабирница у дозвољеном опсегу. Из тог разлога није неопходно купити нове прекидаче. Према резултатима симулација, промењена су места прекидача, тако да се места прекидача на сабирницама бр. 1 и 2, као и 21 и 27 мењају. Другим речима, овим изменама цена замене прекидача ( $C_4$ ) може бити нула. Као резултат тога, вредност функције циља износи 0,8173, а однос добити и трошкова износи 1,2235. То значи да се коришћењем предложеног алгоритма за алокацију и димензионисање дистрибуираних генераторских јединица, остварује уштеда у износу од 22,35 %.

Као што је и раније поменуто, вредности појединих функција у функцији циља претворене су у новчане вредности, што је предност предложеног алгоритма. Ефекти сваке функције уштеда на функцију циља приказане су у процентима у табели 7.7.

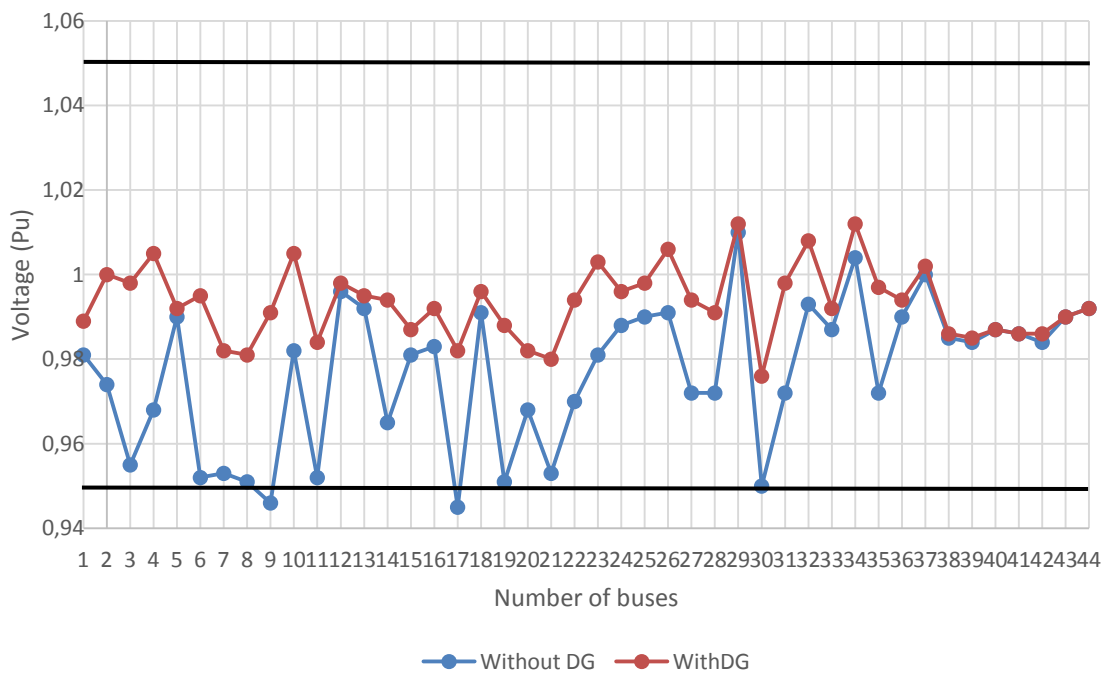
Табела 7.7: Ефекат функција уштеда на укупну функцију циља

$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$
89,61%	5,75%	2,66%	0,23%	1,66%	0,09%

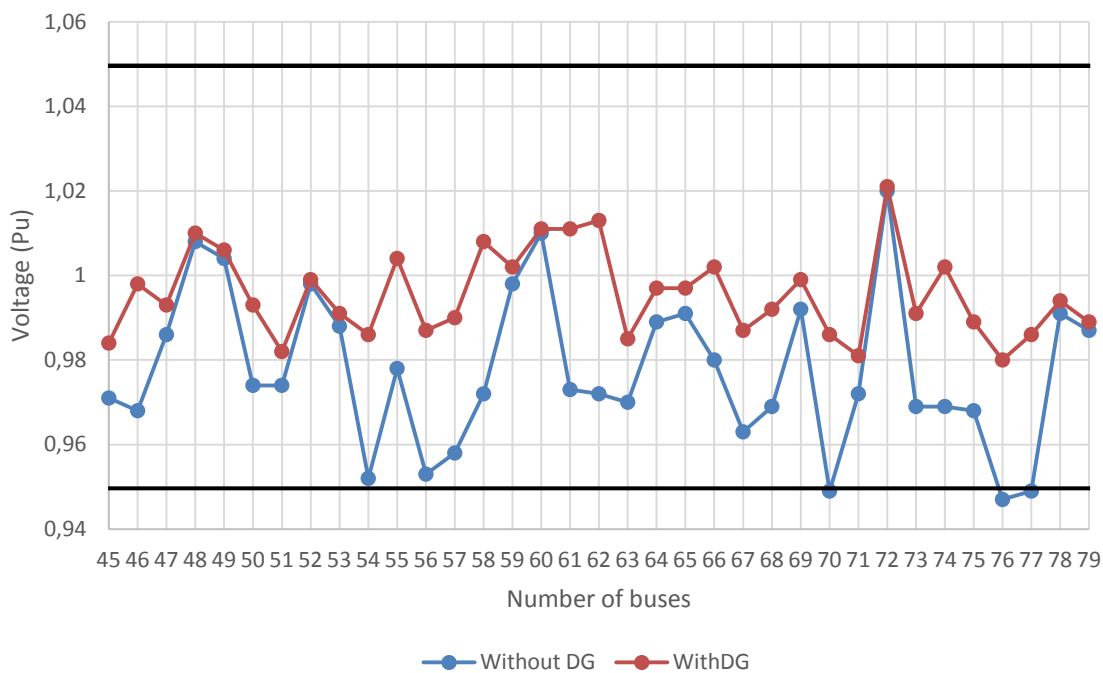
Резултати у табели 7.7 показују да се највећи део уштеда односи на мању куповину активне и реактивне енергије из преносне мреже. Ако се жели да се повећа или смањи ефекат или важност сваке од функција уштеда на укупну функцију циља у ВРЕС електроенергетској мрежи, у функцији циља могу се поставити тежински коефицијенти. Још једна предност предложеног алгоритма је та што је без икаквих тежинских коефицијената наведен ефекат сваке користи на функцију циља. У табели 7.7 се може извршити упоређивање ефекта сваке функције на функцију циља, јер су сви у истим (новчаним) јединицама. Може се видети да је уштеда због смањења губитака електричне енергије већа од користи због одлагања развоја капацитета трансформаторске станице. Надаље, ефекат уштеда због побољшања напонског профила је већи од ефекта уштеда од побољшања у поузданости.

Слика 7.1 приказује профил напона сабирница за сваку провинцију. Према слици 7.1, након инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса, профил напона у свакој

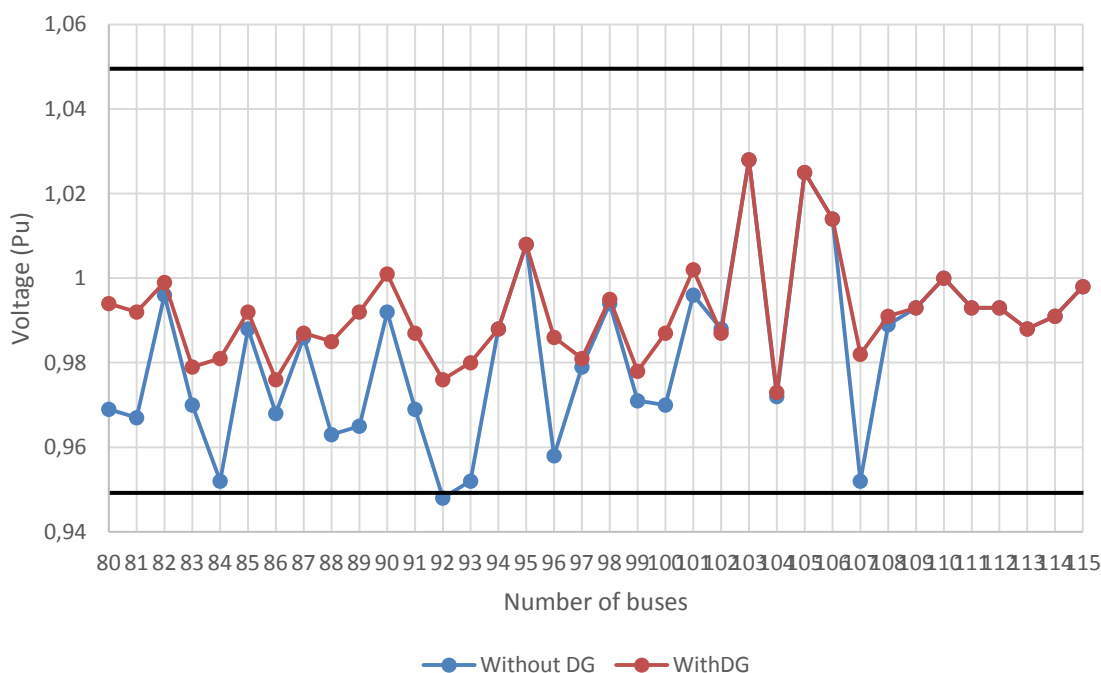
провинцији се налази у дозвољеном опсегу и око 1 р.и., што узрокује мање коришћење ненормалних односа трансформације трансформатора за регулацију профила напона.



(a) Маркази провинција



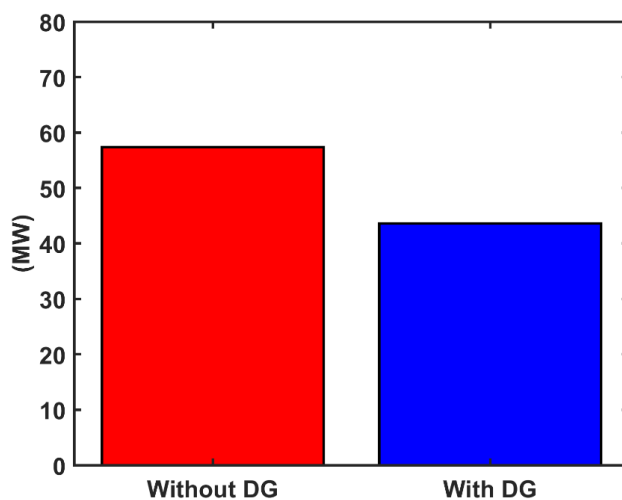
(b) Хамедан провинција



(в) Лорестан провинција

Слика 7.1: Профил напона сабирница за: (а) Маркази провинцију;  
(б) Хамедан провинцију; (в) Лорестан провинцију

Слика 7.2 приказује губитак снаге BREC електроенергетске мреже пре и после инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса. Губитак снаге BREC електроенергетске мреже пре инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса износи 57,34 MW. Губитак снаге након инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса помоћу предложеног алгоритма износи 43,58 MW. Другим речима, губитак енергије након инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса у BREC електроенергетску мрежу се смањује за 24 %.



Слика 7.2: Губитак снаге пре и после инсталирања дистрибуираних генераторских ресурса

## 8. Закључци

У овој докторској дисертацији предложен је нови вишекритеријумски алгоритам за оптимално димензионисање и алокацију обновљивих и необновљивих дистрибуираних генераторских ресурса истовремено у трафостаницама 63/20 kV са 20 kV стране. Поред тога, уведена је нова математичка формулација за алокацију обновљивих извора дистрибуираних генераторских ресурса. Предложени алгоритам користи генетски алгоритам за минимализацију предложене функције циља. Да би се потврдио учинак предложеног алгоритма, примењен је на мрежу са 115 сабирница Бахтар регионалне електричне компаније (BREC) у Ирану. Коришћењем предложеног алгоритма, оптимизација времена извођења смањена је 5 пута, што је један од значајних резултата ове докторске дисертације. У предложеној функцији циља новчано се узимају у обзир сви важни технички и економски фактори, као и важна ограничења мреже. Ово је важан корак јер функција циља нема тежинске коефицијенте. Користећи предложену функцију циља у BREC електроенергетској мрежи, однос добити и трошкова износи 1,2235. То значи да се са предложеним алгоритмом за оптималну алокацију дистрибуираних генераторских ресурса остварује добит у износу од 22,35 %, што је исплативо, јер је већа од инвестиционих трошкова. Оптималан број дистрибуираних генераторских ресурса износи 41, а њихова укупна величина је 540 MW. Поред тога, пенетрација дистрибуираних генераторских ресурса за BREC електроенергетску мрежу износи 25,96 %. Процент инсталирања обновљивих дистрибуираних генераторских извора је за 6,26 % већи од процента у иранској националној мрежи. Дакле, према тренутном тренду ширења употребе обновљивих дистрибуираних генераторских извора, предложени алгоритам је успешан у покривању овог тренда. У овој докторској дисертацији представљен је ефекат сваке функције уштеда на функцију циља. Највећи удео уштеда односи се на мању куповину активних и реактивних снага са 89,61 % и 5,75 %, респективно. Резултати су показали да уколико се обновљиви и необновљиви дистрибуирани генераторски ресурси инсталирају према предложеном алгоритму, губици снаге се смањују за 24 %, а профил напона у свакој провинцији биће око 1 p.u.



Неки предлози за будуће истраживање су следећи:

1. Оптимална алокација дистрибуираних генераторских ресурса према предложеној функцији циља у присуству других дистрибуираних енергетских ресурса (DER).

2. Поређење перформанси осталих хеуристичких, метахеуристичких и нехеуристичких алгоритама за оптимизацију са перформансама генетског алгорита за оптималну алокацију дистрибуираних генераторских ресурса користећи предложену функцију циља.

## 9. Литература

- [1] G. N. Koutroumpezis and A. S. Safigianni, "Optimum Allocation of the Maximum Possible Distributed Generation Penetration in a Distribution Network", *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, Issue 12, pp. 1421-1427, (2010).
- [2] S. Ghosh and S. P. Ghoshal, "Optimal Sizing and Placement of Distributed Generation in a Network System", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, Issue 8, pp. 820-849, (2010).
- [3] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, and R. C. Bansal, "Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 25, Issue 3, pp. 814-820, (2010).
- [4] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, and F. Pilo, "A Multi Objective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Siting of Distributed Generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, Issue 2, pp. 750-757, May (2005).
- [5] S. S.n Dorkhosh and H. Samet, "Procedure for Optimal Sizing and Locating Distributed Generator According Network Losses and Protection Constraints", *CIREN Workshop*, pp. 1-4, Lisbon, 29-30 May, (2012).
- [6] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Modeling of a Centralized Microgrid Protection System and Distributed Energy Resources According to Iec 61850-7-420", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, Issue 99, pp. 1-8, (2012).
- [7] R. K. Singh and S. K. Goswami, "Optimum Allocation of Distributed Generations Based on Nodal Pricing for Profit, Loss Reduction, and Voltage Improvement Including Voltage Rise Issue", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 32, No. 6, pp. 637-644, July (2010).
- [8] C. Yammani, S. Maheswarapu, and S. Matam, "Optimal Placement of Multi DGs in Distribution System with Considering the DG Bus Available Limits", *Energy and Power*, Vol. 2, Issue 1, pp. 18-23, (2012).
- [9] T. Gozel and M. H. Hocaoglu, "An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, pp. 912-918, (2009).
- [10] R. Singh, G. S. Brar, and N. Kaur, "Optimal Placement of DG in Radial Distribution Network for Minimization of Losses", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 1, Issue 2, pp. 84-90, Aug. (2012).

- [11] B. Srinivasa Rao and G. V. Siva Krishna Rao, "Sizing of DG Unit to Reduce Losses in Radial Distribution - A Case Study", *International Journal of Reviews in Computing-IJRIC*, pp. 56-62, (2011).
- [12] A. Lakshmi Devi and B. Subramanyam, "Optimal DG Unit Placement for Loss Reduction in Radial Distribution System - A Case Study", *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, No. 6, pp. 57-61, Dec. (2007).
- [13] D. Singh, D. Singh, and K. S. Verma, "Distributed Generation Planning Strategy with Load Models in Radial Distribution System", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 362-375, Aug. (2009).
- [14] S. K. Bodapatla and H. P. Inamdar, "Loss Reduction by Optimal Placement of Distributed Generation on a Radial feeder", *ACEEE Int. J. on Electrical and Power Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 24-29, Feb. (2011).
- [15] Md. Anisa Shereen, "Optimal Allocation of DG Units for Radial Distribution Systems using Genetic Algorithm", *International Journal of Engineering and Advanced Technology-IJEAT*, Vol. 1, Issue 6, pp. 175-179, Aug. (2012).
- [16] V. H. M. Quezada, J. R. Abbad, and T. G. S. Roman, "Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, Issue 2, pp. 533-540, (2006).
- [17] W. Zhiqun, Z. Shouzhen, and Z. Shuangxi, "Impact of Distributed Generation on Distribution System Voltage Profile", *Automation of Electrical Power System*, Vol. 28, Issue 16, pp. 56-60, (2004).
- [18] P. Sobha Rani and A. Lakshmi Devi, "Optimal Sizing of DG Units Using Exact Loss Formula at Optimal Power Factor", *International Journal of Engineering Science and Technology - IJEST*, Vol. 4, No. 9, pp. 4043-4050, Sep. (2012).
- [19] A. Rabii, Y. Mirzaie, B. Gheshlaghi, and A. Suroody, "A Hybrid Heuristic Method For Multi Objective DG Placement in Distribution Networks", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 5, Issue 12, pp. 3059-3068, (2011).
- [20] M. Shahzad, I. Ahmad, W. Gawlik, and P. Palensky, "Load Concentration Factor Based Analytical Method for Optimal Placement of Multiple Distribution Generators for Loss Minimization and Voltage Profile Improvement", *Energies*, Vol. 9, 287, pp. 1-21, (2016).
- [21] H. C. Nejad, S. Tavakoli, N. Ghadimi, S. Korjani, S. Nojavan, and H. Pashaei-Didani, "Reliability based Optimal Allocation of Distributed Generations in Transmission Systems Under Demand Response Program", *Electric Power Systems Research*, Vol. 176, pp. 105952, (2019).

- [22] P. Prakash and D. K. Khatod, "Optimal Sizing and Siting Techniques for Distributed Generation in Distribution Systems: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 111-130, (2016).
- [23] S. A. Hosseini, R. Eslami, B. Vahidi, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and K. Mohseni, "Installing Distributed Generation Units and Capacitors Simultaneously in a Distribution System Considering Economic Issues", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 6, 023122-16, (2014).
- [24] A. Naeem, N. Ul Hassan, C. Yuen, and S. M. Mueen, "Maximizing the Economic Benefits of a Grid-Tied Microgrid Using Solar-Wind Complementarity", *Energies*, Vol. 12,395, pp. 1-22, (2019).
- [25] M. Bahrami and P. Abbaszadeh, "An Overview of Renewable Energies in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 24, pp. 198-208, (2013).
- [26] A. H. Ghorashi and A. Rahimi, "Renewable and Non-Renewable Energy Status in Iran: Art of Know-How and Technology-Gaps", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 729-736, (2011).
- [27] A. Keane and M. O'Malley, "Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 1640-1646, Aug. (2005).
- [28] M. Mashhour, M. A. Golkar, and S. M. M. Tafreshi, "Optimal Sizing and Siting of Distributed Generation in Radial Distribution Network: Comparison of Unidirectional and Bidirectional Power Flow Scenario", *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, June 28<sup>th</sup> – July 2<sup>nd</sup>, Bucharest, Romania (2009).
- [29] C. Wang and H. Nehrir, "Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, Issue 4, pp. 2068-2076, Nov. (2004).
- [30] K. Varesi, "Optimal Allocation of DG Units for Power Loss Reduction and Voltage Profile Improvement of Distribution Networks using PSO Algorithm", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 60, pp. 1938-1942, (2011).
- [31] D. Hung and N. Mithulananthan, "Analytical Expressions for DG Allocation in Primary Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 3, Sep. (2010).
- [32] M. M. Elnashar, R. E. Shatshat, and M. M. A. Salama, "Optimum Siting and Sizing of a Large Distributed Generator in a Mesh Connected System", *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, Issue 6, pp. 690-697, (2010).
- [33] F. Razavi, S. A. Hosseini, M. Karami, A. A. Ghadimi, and S. S. K. Madahi, "Determining the Optimal Capacity and Place of DGs Using GA Algorithm: Voltage Profile Improvement

- and Loss Reduction”, *ECTI-CON 2011, IEEE Conf.*, Thailand, Khon Kaen, May 17-19, pp. 848-851, (2011).
- [34] S. A. Hosseini, M. Karami, S. S. K. Madahi, F. Razavi, and A. A. Ghadimi, “Determining the optimal capacity and place of DGs in distribution systems”, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 116, pp 5195-5199, (2011).
- [35] C. L. T. Borges and D. M. Falcao, “Optimal Distributed Generation Allocation for Reliability, Losses, and Voltage Improvement”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 28, Issue 6, pp. 413–420, (2006).
- [36] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, and G. Platt, “A New Method for Improving Reliability and Line Loss in Distribution Networks”, *20<sup>th</sup> Australasian Universities Power Engineering Conference - AUPEC*, University of Canterbury, Christchurch, 5-8 Dec., (2010).
- [37] M. Karami, S. A. Hosseini, R. Karam Beigi, S. S. K. Madahi, F. Razavi, and A. A. Ghadimi, “Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Reliability Index of SAIDI”, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, Vol. 2, Issue 2, pp. 1147-1151, Feb. (2012).
- [38] C. L. T. Borges and D. M. Falcao, “Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and Voltage Profile”, *IEEE Bologna, Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, Italy, June 23-26, (2003).
- [39] V. Rashtchi and M. Darabian, “A New BFA-Based Approach for Optimal Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution System”, *International Journal of Automation and Control Engineering, IJACE*, (2011).
- [40] J. B. V. Subrahmanyam and C. Radhakrishna., “Distributed Generator Placement and Sizing in Unbalanced Radial Distribution System”, *Electrical Power and Energy Systems Engineering*, Vol. 2, Issue 4, pp. 232-239, (2004).
- [41] J. B. V. Subrahmanyam and C. Radhakrishna, “Distributed Generator Placement and Sizing in Unbalanced Radial Distribution System”, *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 3, No. 12, pp. 746-753, (2009).
- [42] S. Porkar, P. Poure, A. Abbaspour Tehrani fard, and S. Saadate, “Optimal Allocation of Distributed Generation Using a Two-Stage Multi-Objective Mixed-Integer-Nonlinear Programming”, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 21, Issue 1, pp. 1072–1087, Jan. (2011).
- [43] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, “Optimal Siting and Sizing of Distributed Generators in Distribution Systems Considering Uncertainties”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 4, pp. 2541-2551, Oct. (2011).

- [44] M. Ahmadigorji, A. Abbaspour, A. R. Ghahnavieh, and M. F. Firuzabad, "Optimal DG Placement in Distribution Systems Using Cost/Worth Analysis", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 49, pp. 746-753, (2009).
- [45] L. F. Ochoa, A. Padilha, and G. P. Harrison, "Evaluating Distributed Generation Impacts with a Multi Objective Index", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, Issue 3, pp. 1452-1458, (2006).
- [46] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, Issue 4, pp. 764-773, (2004).
- [47] A. A. Sadiq, S. S. Adamu, and M. Buhari, "Optimal Distributed Generation Planning in Distribution Networks: A Comparison of Transmission Network Models with FACTS", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 22, Issue 1, pp. 33-46, (2019).
- [48] P. Kayal, S. Chanda, and C. K. Chanda, "An Analytical Approach for Allocation and Sizing of Distributed Generations in Radial Distribution Network", *Int. Trans Electr Energ Syst.*, Vol. 27, pp. 1-9, (2017).
- [49] K. S. Sambaiah, "A Review on Optimal Allocation and Sizing Techniques for DG in Distribution Systems", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 8, No. 3, (2018).
- [50] M. Siahi, S. Porkar, A. Abbaspour-Tehrani-Fard, P. Poure, and S. Saadate, "Competitive distribution system planning model integration of DG, interruptible load and voltage regulator devices", *IJST, Transaction B: Engineering*, Vol. 34, No. B6, pp. 619-635, (2010).
- [51] K. Mahesh, P. Nallagownden, and I. Elamvazuthi, "Advanced Pareto Front Non-Dominated Sorting Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation", *Energies*, Vol. 9, 982, pp. 1-23, (2016).
- [52] M. C. V. Suresh and J. B. Edward, "A Hybrid Algorithm based Optimal Placement of DG Units for Loss Reduction in the Distribution System", *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 91, pp. 106191, (2020).
- [53] S. Kumar, K. K. Mandal, and N. Chakraborty, "Optimal DG Placement by Multi-Objective Opposition based Chaotic Differential Evolution for Techno-Economic Analysis", *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 78, pp. 70-83, (2019).
- [54] Z. Moravej, P. E. Ardejani, and A. Imani, "Optimum Placement and Sizing of DG Units based on Improving Voltage Stability Using Multi-Objective Evolutionary Algorithm", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 10, pp. 055304-12, (2018).

- [55] R. M. Dayapera and R. A. Aguirre, "Determination of Penetration Limit of Solar Distributed Generation (DG) Considering Multiple Bus Integration", *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 7-10 Oct. 2018., IEEE, pp. 508-513, (2018).
- [56] H. A. M. Pesaran, P. D. Huy, and V. K. Ramachandaramurthy, "A Review of the Optimal Allocation of Distributed Generation: Objectives, Constraints, Methods, and Algorithms", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75, pp. 293-312, (2017).
- [57] A. Ali, S. Padmanaban, B. Twala, and T. Marwala, "Electric Power Grids Distribution Generation System for Optimal Location and Sizing-A Case Study Investigation by Various Optimization Algorithms", *Energies*, Vol. 10,960, pp. 1-13, (2017).
- [58] M. G. Hemeida, S. Alkhalaf, A. A. Mohamed, A. A. Ibrahim, and T. Senjyu, "Distributed Generators Optimization Based on Multi-Objective Functions Using Manta Rays Foraging Optimization Algorithm (MRFO)", *Energies*, Vol. 13,3847, pp. 1-34, (2020).
- [59] S. A. Hosseini, M. Karami, S. S. K. Madahi, F. Razavi, and A. A. Ghadimi, "Finding the Optimal Capacity and Location of Distributed Generation Resources and Analyzing the Impact of Different Coefficient Factors", *J. Basic Appl. Sci. Res.*, Vol. 1, No. 12, pp. 2578–2589, (2011).
- [60] Q. Gong, J. Lei, and J. Ye, "Optimal Siting and Sizing of Distributed Generators in Distribution Systems Considering Cost of Operation Risk", *Energies*, Vol. 9,61, pp. 1-18, (2016).
- [61] A. Ahmed, M. F. Nadeem, I. A. Sajjad, R. Bo, I. A. Khan, and A. Raza, "Probabilistic Generation Model for Optimal Allocation of Wind DG in Distribution Systems with Time Varying Load Models", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 22, pp. 100358, (2020).
- [62] T. M. Masaud and E. F. El-Saadany, "Optimal Wind DG Integration for Security Risk-Based Line Overload Enhancement: A Two Stage Approach", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 11939-11947, (2020).
- [63] P. Ifaei, A. Farid, and C. Yoo, "An Optimal Renewable Energy Management Strategy with and without Hydropower Using a Factor Weighted Multi-Criteria Decision Making Analysis and Nation-Wide Big Data – Case Study in Iran", *Energy*, Vol. 158, pp. 357-372, (2018).
- [64] S. A. Hosseini, M. Karami, S. S. K. Madahi, F. Razavi, and A. A. Ghadimi, "Optimal Capacity, Location and Number of Distributed Generation at 20 kV Substations", *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, Vol. 5, No. 10, pp. 1051–1068, (2011).

- [65] S. A. Hosseini, S. S. K. Madahi, F. Razavi, M. Karami, and A. A. Ghadimi, "Optimal Sizing and Siting Distributed Generation Resources Using a Multiobjective Algorithm", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 21, pp. 825-850, (2013).
- [66] R. Geoffrey and G. Tomas, "*Electricity Economics: Regulation and Deregulation*", Publisher: John Wiley and Sons Publication, (2003).
- [67] S. A. Hosseini, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, and M. Karami, "Optimal Sizing and Siting of DG Resources at 63kV/20kV Substations Considering the Effect of Earthquake on Technical and Economic Parameters", *IJST, Transactions of Electrical Engineering*, Vol. 39, No. E2, pp. 133-153, (2015).
- [68] <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>
- [69] <https://www.gaisma.com/en/dir/ir-country.html>
- [70] D. Doohnal, "On-Load Tap-Changers for Power Transformers", Maschinenfabrik Reinhausen GmbH Falkensteinstrasse 8 93059 Regensburg, Germany, (2013).
- [71] [www.satba.gov.ir/fa/satba/information](http://www.satba.gov.ir/fa/satba/information)
- [72] [www.brec.ir](http://www.brec.ir)
- [73] <https://tradingeconomics.com>
- [74] [www.igmc.ir/Power-grid-status-report](http://www.igmc.ir/Power-grid-status-report)



*Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.*

## План третмана података

<b>Назив пројекта/истраживања</b>
Вишекритеријумска оптимална алокација дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи
<b>Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање</b>
а) Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука
<b>Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање</b>
Истраживање се реализује у оквиру израде докторске дисертације на студијском програму Енергетика, електроника и телекомуникације.
<b>1. Опис података</b>
<b>1.1 Врста студије</b> <i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i> Докторска дисертација
<b>1.2 Врсте података</b> <input checked="" type="radio"/> а) квантитативни <input checked="" type="radio"/> б) квалитативни
<b>1.3. Начин прикупљања података</b> а) анкете, упитници, тестови б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи в) генотипови: навести врсту _____ г) административни подаци: навести врсту _____ д) узорци ткива: навести врсту _____ ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____ е) текст, навести врсту _____ <input checked="" type="radio"/> ж) мапа, навести врсту <u>мапа тест мреже</u> <input checked="" type="radio"/> з) остало: описати <u>подаци наведени у научним радовима и литературни извори</u>

### 1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

#### 1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- a) Excel фајл, датотека .xlsx
- b) SPSS фајл, датотека \_\_\_\_\_
- c) PDF фајл, датотека .pdf
- d) Текст фајл, датотека .txt, .doc
- e) JPG фајл, датотека .jpg
- f) Остало, датотека \_\_\_\_\_

#### 1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- a) број варијабли велики број
- b) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) велики број

#### 1.3.3. Поновљена мерења

- a) да
- б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- a) временски размак између поновљених мера је \_\_\_\_\_
- b) варијабле које се више пута мере односе се на \_\_\_\_\_
- v) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као \_\_\_\_\_

Напомене: \_\_\_\_\_

*Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?*

- a) Да
- b) Не

*Ако је одговор не, образложити* \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## 2. Прикупљање података

### 2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

#### 2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

- a) експеримент, навести тип \_\_\_\_\_
- b) корелационо истраживање, навести тип \_\_\_\_\_
- ц) анализа текста, навести тип прикупљање података анализом доступне литературе
- d) остало, навести шта \_\_\_\_\_

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

## 2.2 Квалитет података и стандарди

### 2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да  Не

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) Колики је број недостајућих података? \_\_\_\_\_
- б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не
- в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података

### 2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

Квалитет података је контролисан са међусобним поређењем резултата добијених новоразвијеном методом и постојећим поступцима за одређивање оптималне алокације и одређивање величине дистрибуираних генераторских ресурса у дистрибутивној мрежи.

### 2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података у матрицу је извршена поређењем добијених података са литературним подацима.

## 3. Третман података и пратећа документација

### 3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у \_\_\_\_\_ репозиторијум.

3.1.2. URL адреса \_\_\_\_\_

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а)  Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до \_\_\_\_\_
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог \_\_\_\_\_

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

Подаци се чувају у електронској форми на рачунару аутора.

---

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен?

Не примењује се стандард за метаподатке.

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Не примењује се стандард за метаподатке.

---

*Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.*

---

---

---

---

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? \_\_\_\_\_

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? Да  Не

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? Да  Не

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?  
Да  Не

Образложити

---

---

#### 4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности

([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да Не  
Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да  Не  
Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

## 5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

- а) јавно доступни
- б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области
- ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

**Ауторство** – Дозвољавам умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе.

## 6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

Seyed Siavash Karimi Madahi, sija.karimi@uns.ac.rs

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

Seyed Siavash Karimi Madahi, sija.karimi@uns.ac.rs

*6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима*

Seyed Siavash Karimi Madahi, [sija.karimi@uns.ac.rs](mailto:sija.karimi@uns.ac.rs)

---