

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕТІКАНЬ
РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

За загальною редакцією В. В. Кулика

Вінниця
ВНТУ
2024

УДК 621.311.24+621.311.1

О-60

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 29.08.2024 р.)

Автори:

В. В. Кулик, А. Л. Поліщук, В. М. Пірняк, В. В. Тептя

Рецензенти:

П. П. Говоров, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

Оптимізація перетікань реактивної енергії в розподільних О-60 електричних мережах : монографія / за заг. ред. В. В. Кулика. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 218 с.

ISBN 978-966-641-968-5

В монографії розглядається та вирішується проблема підвищення енергоефективності розподільних електромереж шляхом оптимізації перетікань реактивної енергії. Зменшення втрат та підвищення якості напруги досягається шляхом оптимізації схем приєднання джерел реактивної потужності, а також завдяки автоматизації локального керування їх ємностями для досягнення загальносистемного ефекту. Реалізація запропонованих методів та алгоритмів сприяє підвищенню ефективності використання електромереж операторами систем розподілу.

Монографія розрахована на фахівців в галузі математичного моделювання та оптимізації функціонування розподільних електромереж, а також може бути корисною студентам й аспірантам відповідного спрямування.

УДК 621.311.24+621.311.1

ISBN 978-966-641-968-5

© В. Кулик, А. Поліщук, В. Пірняк, В. Тептя, 2024

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
1 ПРОБЛЕМА ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	11
1.1 Основні заходи зменшення втрат електроенергії в розподільних електричних мережах	12
1.2 Особливості електричних мереж з огляду на проблему керування перетіканнями реактивної потужності	17
1.3 Критерії ефективності заходів зі зменшення втрат у розподільних мережах	22
1.4 Методи оптимізації перетікань реактивної енергії в електричних мережах.....	26
1.5 Оптимізація режимів електричних мереж на основі принципу найменшої дії	31
1.6 Автоматизація керування компенсацією реактивної потужності в електромережах з застосуванням Smart Grid.....	35
1.7 Проблема оптимізації потоків реактивної потужності у розподільних електричних мережах. Задачі дослідження.....	42
1.8 Висновки по розділу 1	44
2 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТУ ВІД ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ	46
2.1 Особливості розподільних електромереж України з огляду на оптимізацію перетікань реактивної потужності	47
2.2 Математичне моделювання якості функціонування розподільних мереж	49
2.2.1 Надійність як основний показник якості функціонування розподільних мереж.....	50
2.2.2 Математичне моделювання показника якості функціонування.....	52

2.3	Комплексне оцінювання ефективності функціонування ДРП у розподільних електромережах.....	57
2.3.1	Моделювання узагальненої характеристики якості функціонування електричних мереж.....	58
2.3.2	Проблема якості інформаційного забезпечення для оптимізації перетікань реактивної енергії	61
2.3.3	Оцінювання обґрунтованого ефекту від впровадження КРП з урахуванням недосконалості вихідної інформації	63
2.4	Висновки по розділу 2.....	69
3	ПРОЕКТНІ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ	70
3.1	Оптимізація перетікань реактивної потужності у розподільних мережах за критерієм мінімуму втрат електроенергії.....	71
3.1.1	Визначення місць встановлення ДРП в розподільних мережах.....	71
3.1.2	Визначення оптимальних потужностей конденсаторних установок в розподільних ЕМ на підставі аналізу чутливості.....	76
3.1.3	Оцінювання ефективності заходів з компенсації реактивної потужності на основі аналізу чутливості втрат.....	78
3.2	Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі на основі моделювання її ідеальних режимів	81
3.2.1	Формування заступної схеми для моделювання «ідеального» режиму електромережі за реактивною потужністю	81
3.2.2	Визначення економічних опорів ДРП для розв'язання експлуатаційних задач.....	83
3.2.3	Визначення економічних опорів ДРП для розв'язання проектних задач	85
3.3	Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі з урахуванням активних обмежень.....	90
3.3.1	Врахування обмежень на параметри задачі оптимізації розміщення ДРП в електричних мережах	91
3.3.2	Результати оптимізації розміщення ДРП з урахуванням обмежень на параметри.....	96
3.4	Висновки по розділу 3.....	98

4	АЛГОРИТМИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОЕКТНИХ ЗАДАЧ З ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	100
4.1	Визначення оптимального рівня компенсації реактивних навантажень для електромереж на основі принципу найменшої дії.....	100
4.1.1	Оптимізація рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ за результатами імітації ідеальних режимів	101
4.1.2	Оптимізація розміщення ДРП в електричних мережах за критерієм максимальної рентабельності.....	104
4.1.3	Багатокритеріальна оптимізація розміщення та потужностей ДРП в електричних мережах.....	109
4.2	Формування заходів з компенсації реактивної потужності на основі нечіткого багатокритеріального аналізу.....	113
4.2.1	Вибір та обґрунтування критеріїв ефективності багатокритеріального аналізу фідерів 10(6) кВ.....	113
4.2.2	Визначення оптимальної послідовності впровадження ДРП з використанням багатокритеріального аналізу.....	115
4.2.3	Приклад задачі оптимізації послідовності впровадження засобів компенсації реактивної потужності.....	120
4.3	Висновки до розділу 4.....	121
5	АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПЕРАТИВНОГО КЕРУВАННЯ ДЖЕРЕЛАМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ	123
5.1	Проблеми, пов'язані з автоматизацією керування перетіканнями реактивної потужності у електричних мережах	124
5.2	Автоматизоване керування компенсацією реактивної потужності на принципах Smart Grid.....	127
5.3	Задачі оперативної оптимізації перетікань реактивної потужності у електричних мережах	130
5.4	Умови оптимальності режимів ДРП для групового керування перетіканнями реактивної потужності.....	132
5.5	Адаптивне керування джерелами реактивної потужності з децентралізацією базових функцій	135

5.6 Структурна схема узгодженого керування розосередженими джерелами реактивної потужності	138
5.7 Забезпечення ефективності автоматизованої системи керування потоками реактивної потужності	142
5.8 Висновки по розділу 5	150
6 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ ТА НАПРУГОЮ	152
6.1 Оцінювання обґрунтованої ефективності встановлення ДРП на прикладі електричних мереж 110-35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго»	153
6.1.1 Постановка оптимізаційної задачі, формування обмежень .	153
6.1.2 Порівняння оптимальних рішень за різними критеріями	155
6.1.3 Визначення оптимальної послідовності розміщення ДРП ..	161
6.2 Вплив надійності електромереж та якості інформаційного забезпечення та результати оптимізації розміщення ДРП	169
6.3 Висновки по розділу 6	174
ВИСНОВКИ.....	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	180
Додаток А Техніко-економічні параметри електричних мереж 110-35 кВ АТ «Вінницяобленерго» необхідні для оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності	201
Додаток Б Результати розрахунку технічних втрат електроенергії для фрагменту Вінницьких міських електричних мереж 10 кВ	208
Додаток В Оцінювання ефективності визначення місць приєднання додаткових джерел реактивної потужності в Вінницьких міських електричних мережах з використанням ПК «ВТРАТИ–ПФА»	212

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗПС	–	автоматика запобігання порушенню стійкості;
ВДЕ	–	відновлювані джерела електроенергії;
ГЕС	–	гідроелектрична станція;
ДРП	–	джерело реактивної потужності;
ЕК	–	енергопостачальна компанія;
ЕС	–	електрична станція;
ЕМ	–	електрична мережа;
КРП	–	компенсація реактивної потужності;
ЛЕП	–	лінія електропередачі;
ЛЕС	–	локальна електрична система;
КУ	–	компенсувальна установка;
ПНД	–	принцип найменшої дії;
РДЕ	–	розосереджені джерела електроенергії;
РПН	–	пристрій регулювання під навантаженням;
САК	–	система автоматичного керування;
ТП	–	трансформаторна підстанція;
ФЕС	–	фотоелектрична станція;
<i>NSGA II</i>	–	генетичний алгоритм недомінантного сортування II;
<i>NSPSO</i>	–	алгоритм оптимізації рою часток з недомінантним сортуванням;
<i>PV-DGS</i>	–	розподілена фотоелектрична система генерування;
<i>SDP</i>	–	напіввизначене програмування;
<i>SPMGSO</i>	–	алгоритм багатофакторної пошукової Парето-оптимізації;
<i>VSI</i>	–	коефіцієнт чутливості напруги.

ВСТУП

Функціонування сучасних розподільних електричних мереж (РЕМ) характеризується локальним зростанням споживання електроенергії, появою двосторонніх перетікань енергії, підвищеними вимогами до забезпечення надійності та керованості. Крім того, стають більш жорсткими екологічні обмеження для енергетичної галузі в цілому [1]. В таких умовах загострюються проблеми раціонального використання енергетичних і матеріальних ресурсів, вирішення яких покликане підвищити економічність та екологічність роботи енергосистеми шляхом впровадження енергозберігаючих заходів.

В останні роки світові тенденції спрямовані на підвищення енергозбереження і раціонального використання природних ресурсів призвели до інтеграції відновлювальних джерел енергії в наявні розподільні електричні мережі у вигляді розосереджених джерел енергії (РДЕ) [2], [3]. Причому частка останніх в енергобалансі енергосистем зростає і в деяких електричних мережах вже сьогодні досягає 20–30% і більше. Таким чином, розподільна електрична мережа поступово перетворюється в мережу з характерними особливостями локальної електричної системи (ЛЕС), яка отримує живлення як від власних розосереджених джерел електроенергії, так і від централізованого джерела – електроенергетичної системи [4] – [6].

Разом з тим, розподільні електромережі енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, виходячи з чого розбудова в них розосереджених джерел електроенергії породжує нові проблеми та задачі [3]. Основними з технічної точки зору тут є задачі підтримання балансу активної і реактивної потужностей та оптимізації розосередженого генерування активної та реактивної енергії [3], [7] – [9].

Основними негативними факторами, що пов'язані з передачею реактивної потужності електричними мережами є збільшення струмових навантажень, зростання спадів напруги, збільшення втрат електроенергії та витрат енергоресурсів на її виробництво.

Серед об'єктів енергетики з надмірними втратами енергії, розподільні електричні мережі привертають особливу увагу. Ці мережі конструктивно не пристосовані ні для моніторингу, ні для керування їх режимами, оскільки до останнього часу не мали засобів телевимірювання та телекерування.

Впровадження стимулюючого тарифоутворення на основі регуляторної бази активів (RAB), як способу підвищення ефективності експлуатації РЕМ, технічного переоснащення та впровадження електроощадних заходів, призвело до того, що зусилля персоналу енергопостачальних компаній були скеровані на підвищення якості електропостачання та зменшення втрат електроенергії. В першу чергу було задіяно заходи з підвищення ефективності енергозбутової діяльності. А Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) разом з державним підприємством «Енергоринок» зобов'язали ОСР впроваджувати автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Ці системи були інтегровані в єдину систему збору, оброблення та збереження інформації про відпущену електроенергію.

Крім того, посилилася зацікавленість операторів систем розподілу (ОСР) у розв'язанні задач оптимізації заходів щодо зменшення технічних втрат електроенергії в РЕМ. Аналіз значень втрат сприяв виявленню проблем в області розвитку, реконструкції і технічного переоснащення електричних мереж, вдосконалення їх експлуатації та засобів керування, підвищення якості обліку електроенергії і т.п.

Особливе місце втрат електроенергії, як критерію оптимальності компенсації реактивної потужності (КРП) зумовлене відносною простотою його оцінювання в грошовому вигляді, на відміну від інших. Тому на основі виділення додаткових втрат електроенергії від потоків реактивної потужності й мінімізації останніх побудовано чинну методику КРП [10].

Вона має низку недоліків, які потребують доопрацювання. Це відсутність взаємопов'язаних рішень для енергопостачальних компаній, споживачів та власників РДЕ, приєднаних до їх електромереж; не врахування низки важливих економічних аспектів, що стосуються функціонування розосереджених джерел у мережах енергопостачальних компаній; низька ефективність врахування реверсивних перетікань реактивної потужності в розподільних електричних мережах (ЕМ) тощо.

Вказані недоліки ускладнюють використання методики [10] для оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ, до яких приєднані РДЕ. Так, особливістю компенсації реактивної потужності в локальній електричній системі є те, що РДЕ можуть генерувати або споживати реактивну енергію [6], [8], [9], призводячи до появи реверсивних її перетікань. Окремі РДЕ, маючи засоби регулювання реактивної потужності, дають додаткові можливості підвищення ефективності її транспортування, що не враховано у [10].

Вдосконалення нормативної бази, зокрема [10], вимагає розроблення методів та засобів оцінювання ефективності перетікань реактивної потужності в ЕМ, які б дозволяли повною мірою враховувати особливості сучасних електромереж, зокрема, зношеність обладнання, неоптимальність схем, наявність РДЕ, а також вплив вказаних факторів на якість та економічність функціонування ЕМ.

З розвитком інформаційно-обчислювальних засобів стає можливим перехід від сукупності техніко-економічних задач оптимізації окремих етапів впровадження та експлуатації джерел реактивної потужності (ДРП), які часто мають суперечні критерії, до комплексної задачі оптимізації за інтегральним критерієм, який пов'язує проблеми втрат, якості електроенергії, надійності мереж та окупності засобів КРП. Це зробить можливим отримувати технічні рішення, максимально адаптовані до практичної реалізації.

З приєднанням до електромереж РДЕ, генерування яких істотно залежить від впливу випадкових факторів, особливо гостро постає проблема автоматизації керування режимами ЕМ, зокрема ДРП [4], [11]. Вдосконалення підходів до автоматизованого та автоматичного керування потоками реактивної потужності в ЕМ дозволить підвищити ефективність компенсації завдяки регулюванню напруги та підвищенню пропускної здатності електромереж. Для визначення та впровадження керувальних впливів щодо КРП доцільно застосовувати інформаційні можливості та комунікаційні технології *SMART Grid* [12].

Традиційно для реалізації підходів до керування потоками реактивної потужності в ЕМ та вибору оптимальних технічних рішень, використовуються чисельні методи лінійного і нелінійного програмування. Загальним їх недоліком є те, що вони дають часткові розв'язки. У даній роботі досліджується можливість визначення оптимальних параметрів ЕМ та побудови систем керування реактивними перетіканнями на основі принципу найменшої дії (ПНД) у трактуванні Гамільтона-Остроградського [13], а також принципу максимуму інтегральних функцій Понтрягіна [14].

Отже наша робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі дослідження методів та засобів оптимізації перетікань реактивної енергії в розподільних електромережах з розосередженими джерелами електроенергії на основі принципу найменшої дії.

Наукове видання

**Кулик Володимир Володимирович,
Поліщук Андрій Леонідович,
Пірняк Віктор Михайлович,
Тептя Віра Володимирівна**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПЕРЕТІКАНЬ
РЕАКТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Рукопис оформлено *В. Куликом*

Оригінал-макет підготовлено у *PBB ВНТУ*

Підписано до друку 07.11.2024 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 13,08.
Наклад 51 прим. Зам. 2024-040.

Видавець та виготовлювач –
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua
E-mail: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.