

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

СІКОРСЬКА ОЛЕНА ВІКТОРІВНА

УДК 621.311.161

**РОЗОСЕРЕДЖЕНЕ ГЕНЕРУВАННЯ В ЗАДАЧАХ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.
Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті,
Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Комар Вячеслав Олександрович,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри електричних станцій і систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Черкашина Вероніка Вікторівна,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут»,
доцент кафедри передачі електричної енергії;

кандидат технічних наук, доцент
Кацадзе Теймураз Луарсабович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри електричних мереж і систем.

Захист відбудеться «14» травня 2021 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГУК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «13» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. В останні роки в Україні зростає частка місцевих джерел електроенергії в енергобалансі енергосистем. Розподільні електричні мережі (ЕМ) 110(35)-10(6) кВ проектувались в умовах централізованого електропостачання з використанням схемних рішень, які забезпечували вимоги надійності та якості електропостачання споживачів. Приєднання до них розосереджених джерел електроенергії (РДЕ) співрозмірної встановленої потужності призвело до невідповідності експлуатаційних умов ЕМ, а отже, до необхідності розв'язання нових задач, пов'язаних з забезпеченням комбінованого електропостачання – від електроенергетичної системи і розосередженого генерування.

Вплив РДЕ на режими мереж суттєво залежить від графіка роботи та встановлених потужностей РДЕ, а також місця приєднання до електричної мережі. Перевищення потужності генерованої РДЕ над сукупним навантаження ЕМ призводить до зниження енергоефективності функціонування розподільних електричних мереж. Енергоефективність визначається рівнем надійності (безперервності) електропостачання, економічністю надання послуг з передачі, розподілу та постачання електричної енергії, а також якістю електричної енергії.

В розподільних електричних мережах раніше не приверталось достатньої уваги до їх енергоефективності. Важливішим вважалось забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів. До того ж ці мережі конструктивно не пристосовані до оптимального керування, оскільки до останнього часу не мали засобів телеінформації про параметри поточного режиму та засобів оперативного керування останніми. Однак, застосування автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) дозволило покращити рівень інформаційного забезпечення в розподільних електричних мережах, що зумовило посилення інтересу до задачі розробки нових та планування існуючих заходів з підвищення їх енергоефективності особливо в умовах інтенсивної розбудови відновлюваних джерел енергії.

Отже, вдосконалення методів вибору складу заходів з підвищення енергоефективності в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в плані наукових досліджень, які проводилися кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами: «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161), «Методи та засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ держреєстрації 0113U003138) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№

держреєстрації 015U001120), «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 0118U000206). Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз і оцінювання впливу відновлюваних джерел енергії на рівень енергоефективності розподільних електричних мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідити вплив відновлюваних джерел енергії на складові енергоефективності розподільних електричних мереж в межах одного класу напруги;

- виконати аналіз взаємовпливу розподільних електричних мереж різних класів напруги з відновлюваними джерелами енергії;

- виконати аналіз засобів підвищення енергоефективності, які ґрунтуються на застосуванні технічних особливостей відновлюваних джерел енергії;

- розробити метод, що дозволить врахувати взаємовплив електричних мереж різних класів напруги з відновлюваними джерелами енергії під час розрахунку нормальних режимів;

- розробити метод оцінювання рівня енергоефективності електричних мереж в умовах поетапного впровадження заходів з її підвищення;

- розробити метод оптимізації генерованої реактивної потужності фотоелектричними станціями в електричних мережах на підставі аналізу чутливості втрат електроенергії.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії.

Предметом дослідження є методи і засоби підвищення енергоефективності розподільних мереж з розосередженими джерелами енергії.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач дослідження було використано математичний апарат теорії подібності та аналізу чутливості, нелінійного програмування. Усталені режими моделюються на базі методу вузлових напруг та аналізуються із застосуванням методів Гаусса та Ньютона. Оцінювання якості функціонування ЕМ здійснюється з використанням марковських процесів і критеріального моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше з використанням математичного моделювання та результатів натурального експерименту показано вплив різних типів відновлюваних джерел енергії на рівень енергоефективності розподільних електричних мереж, що дозволило сформулювати умови комплексного розв'язання задачі, яка включає в себе зменшення втрат електроенергії та покращення її якості, а також підвищення надійності, і дозволяє розробити етапність впровадження заходів з підвищення ефективності функціонування електричних з ВДЕ.

2. Набув подальшого розвитку метод визначення взаємовпливу електричних мереж різних класів напруги шляхом врахування режиму роботи відновлюваних джерел енергії в мережах нижчих класів напруги через уточнення напрямків перетікання потужності та її значення в точці примикання до мереж вищих класів напруги.

3. Вдосконалено, використовуючи апарат аналізу чутливості, метод формування заходів зі зменшення втрат в електричних мережах з врахуванням їх впливу на якість напруги в них, зокрема шляхом використання фотоелектричних станцій в режимі компенсації реактивної потужності.

Практичне значення отриманих результатів.

Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну задачу забезпечення енергетичної ефективності та якості електропостачання в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Результати досліджень створюють достатню наукову базу для визначення впливу ВДЕ на якість електропостачання різного рівня локальності, а саме, як окремих споживачів та населених пунктів, так і енергопостачальних компаній в цілому.

Розроблені алгоритми оцінювання ефективності функціонування розподільних електричних мереж 10(6) кВ дозволяють комплексно оцінювати заходи з підвищення енергоефективності ЕМ з ВДЕ.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджено обчислювальними експериментами для реальних електричних мереж та порівнянням їх із фактичними даними.

Отримані наукові результати були використані під час розроблення рекомендацій щодо техніко-економічних обґрунтувань розвитку відновлюваної енергетики, які прийнято до впровадження у АТ "Вінницяобленерго". Результати дисертаційної роботи також використовуються у навчальному процесі кафедри електричних станцій і систем ВНТУ.

Особистий внесок здобувача Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем особисто. У роботах, що опубліковано у співавторстві, внесок автора такий: [1] – виконано аналіз зміни якості функціонування розподільної електричної мережі з ВДЕ; [2] – запропоновано алгоритм оцінювання місць розмикання розподільної електричної мережі з врахуванням оптимальної встановленої потужності ВДЕ; [3] – побудова критеріальної моделі для алгоритму оцінки якості функціонування системи компенсації впливу збурень на втрати потужності в мережах; [4] – досліджено зміну перетоків потужності на головній ділянці від потужності і місця розташування РДЕ і вдосконалено метод взаємовпливу мереж ЛЕС; [5] – побудова блок-схеми алгоритму створення узагальнюючих залежностей режиму ЛЕС; [6] – виконання комп'ютерного натурно-імітаційного моделювання режимів ЛЕС та створення бази можливих режимів; [7] – запропоновано здійснювати оптимальний контроль стану системи шляхом введення параметрів управління в область оптимальності для функціонування автоматичних

систем контролю стану електроенергетичної системи з урахуванням чутливості; [8] – показано особливості різних методів виділення ЛЕС з ЕЕС; [9] – побудова блок схеми алгоритму для визначення оптимального режиму трансформаторів з РПН; [10] – запропонована адаптивна система керування з врахуванням узагальнюючих залежностей для режимів ЛЕС; [11] – побудова алгоритму адаптивної системи керування з використанням ретроспективних даних; [12] – визначено переваги і недоліки основних методів еквівалентування режимів ЛЕС; [13] – розроблено метод оцінки чутливості параметрів режиму до зміни навантаження у вузлах і реактивної потужності ФЕС; [14] – виконання розрахунків для визначення економічно і технічно доцільного значення потужності ВДЕ в локальній електричній мережі; [15] – розробка процесу організації натурно-імітаційного моделювання нормальних режимів ЕМ в реальному часі в умовах неповноти вихідної інформації; [16] – використання критеріального методу та марковських процесів для оцінки якості функціонування відновлюваних джерел енергії у вигляді інтегрованої характеристики ефективності локальної електричної системи; [17] – запропоновано спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням, який в умовах неповноти початкових даних про режими розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1]–[17], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідалися й обговорювалися на XL, XLI, XLII, XLIII, XLIV, XLIX регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2020); на I, II, III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011, 2013, 2015); на IV та V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк – Шацькі озера, 2012, 2014); на XII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки (ПСЕ–2012)» (м. Вінниця, 2012); на XI Міжнародній науковій конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 2012); на 3-х науково-технічних семінарах НАН України «Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлювальними джерелами енергії», (м. Вінниця, 2013, 2014, 2015); на VI міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2013» (м. Донецьк, 2013); на VI міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2014) ; на II науково-технічній конференції «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК» (м. Вінниця, 2014); на I всеукраїнській науково-технічній конференції

«Електротехнічні системи, електрифікація й автоматизація в агропромисловому комплексі» (м. Вінниця, 2014); на I всеукраїнському науковому семінару «Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах» (м. Луцьк, 2015); на V Всеукраїнському науковому семінару «Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах», (м. Луцьк, 2015); на Міжнародної науково-практичної конференції: Моделювання, управління та інформаційні технології (м. Рівне, 2019); на Міжнародній науковій конференції з енергетики, електроніки та сучасних технологій «IEEE KhPI Week on Advanced Technology», (м. Харків, 2020).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 17 наукових робіт з них: 1 стаття в журналах, що входять до науково-метричної бази Scopus, 6 опубліковані у фахових виданнях з переліку ДАК України, 1 публікація у періодичних виданнях ЄС, 1 патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел (83 найменувань). Основний зміст викладений на 175 сторінках друкованого тексту, містить 114 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 198 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та наукова новизна, вказана практична цінність отриманих результатів. Наведені відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зафіксовано зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У **першому** розділі розглядається проблема визначення та зниження негативного впливу ВДЕ на енергоефективність розподільних електричних мереж, а також проаналізовані найбільш ефективні електроощадні заходи для електричних мереж 10(6) кВ.

В останні роки зростання частки відновлюваних джерел в енергетичному балансі зумовила завантаження великої кількості розподільних ліній і трансформаторів. В результаті відбувається не тільки збільшення втрат електроенергії, а й зниження надійності електропостачання й якості електроенергії. Розв'язання цих задач вимагає комплексного підходу, який включає проведення організаційних і технічних електроощадних заходів, а також розвиток і реконструкцію електричних мереж. Враховуючи взаємовплив всіх заходів і змін в ЕМ, корисно мати загальну оцінку впливу їх на ефективність функціонування електричної мережі в цілому. Доцільність такої оцінки пояснюється тим, що капіталовкладення, які, як правило, обмежені, необхідно розподіляти і вкладати найбільш ефективно. Тобто так, щоб зменшувалися втрати електроенергії, збільшувалася надійність електропостачання і покращувалася якість електроенергії.

Розрахунки проведені на основі натурних експериментів, проведених в Ямпільських електричних мережах (результати див. рис. 1) показують залежність їх ефективності функціонування від точки під'єднання

відновлюваних джерел енергії та їх встановленої потужності.

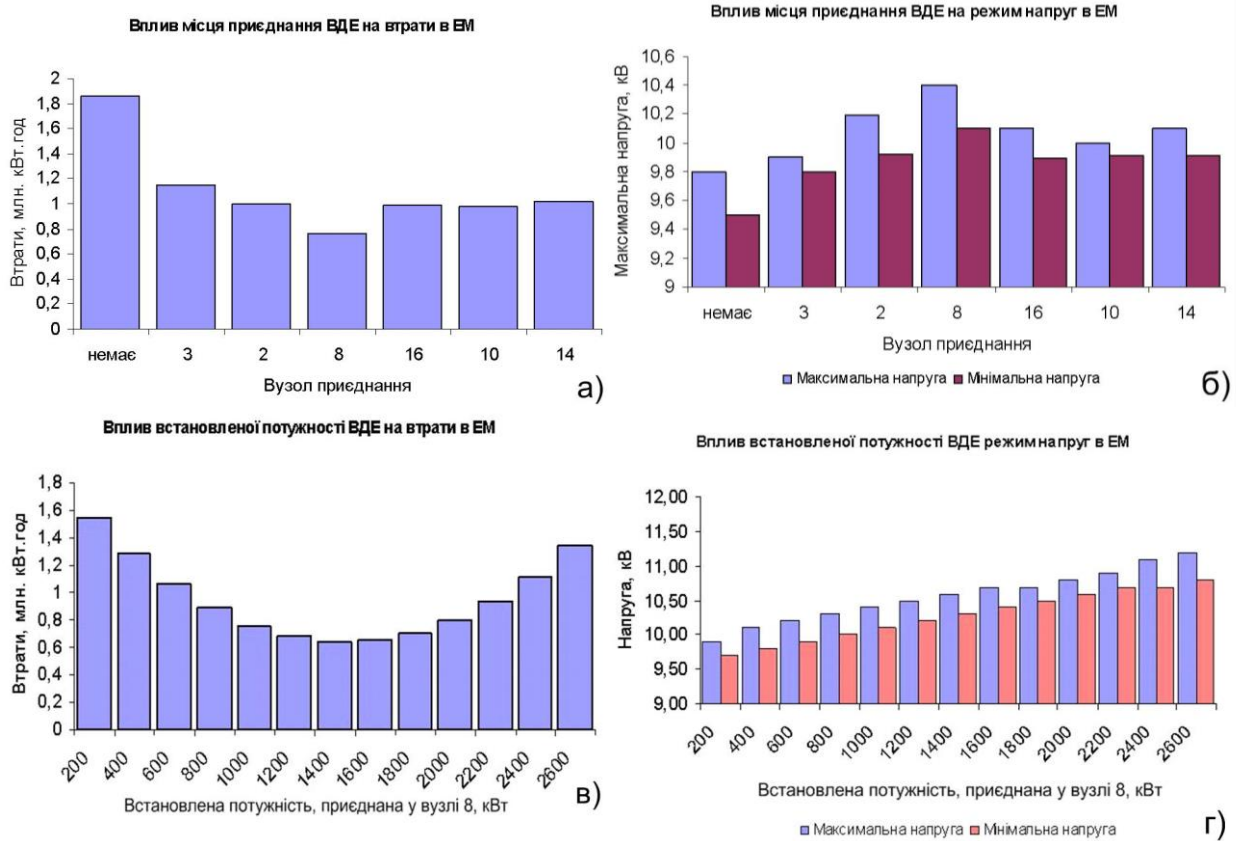


Рисунок 1 – Залежності втрат електроенергії і значень напруги від потужності та вузлів приєднання джерела енергії

Наявність в схемі відновлюваних джерел енергії нелінійних елементів, наприклад, на фотоелектричних станціях інверторів, сприяють спотворенню кривої напруги і струму в електричних мережах. На рис. 2 показано результати натурного експерименту проведеного в Калинівських електричних мережах під час вимикання і вмикання ФЕС потужністю 2 МВт.

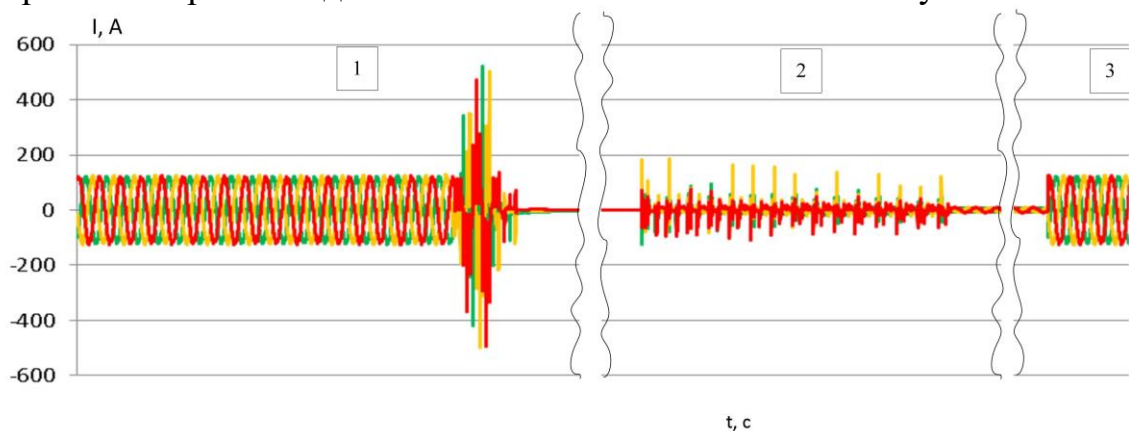


Рисунок 2 – Зміна струму під час виконання комутації

Результати, наведені на рис. 2, можна поділити на три області, які мають свій вплив як на режим роботи мережі, так і на режим роботи самої станції. Область 1 (див. рис. 2) – "вимкнення") супроводжується значними коливаннями струму та напруги, які можуть спричинити перенапруги. Область 2 – "увімкнення та синхронізація з мережею" (супроводжується

помірними коливаннями струму, що може негативно впливати на роботу обладнання станції). Область 3 – "нормальна робота".

Перенапруги зумовлені комутацією можуть призводити до виходу з ладу силового обладнання електричних мереж.

За результатами проведених натурних і розрахункових експериментів в першому розділі були визначені основні задачі для дослідження і методи їх розв'язання.

У другому розділі розглянуто метод формування оптимального значення активної і реактивної потужностей ВДЕ та проведено моделювання технічних можливостей фотоелектричної станції у компенсуванні реактивної потужності в електричній мережі. Показано використання методів еквівалентування в задачах оцінювання впливу ВДЕ в електричних мережах нижчої напруги на параметри ЕЕС.

Удосконалено метод визначення оптимального значення встановленої активної потужності ВДЕ, які під'єднані в вузлах схеми. Оптимальна потужність ВДЕ, коли критерієм оптимальності є втрати потужності в мережі, визначається наступним чином. За допущення про відсутність перетоків реактивної потужності та реактивних складових заступної схеми визначаються перетоки активної потужності у вітках схеми \mathbf{P}_v :

$$\mathbf{P}_v = \mathbf{R}_v^{-1} \mathbf{M}_t (\mathbf{M} \mathbf{R}_v^{-1} \mathbf{M}_t)^{-1} \mathbf{P}, \quad (1)$$

де \mathbf{P} – вектор активних потужностей у вузлах схеми; \mathbf{R}_v – вектор активних опорів віток; \mathbf{M} – матриця зе'днань віток у вузлах схеми.

Далі визначаються втрати потужності у вітках схеми, знаходиться їх мінімальне значення і відповідні потужності ВДЕ у вузлах. На рис. 3 проілюстровано приклад залежності втрат потужності в мережі від потужності ВДЕ, під'єднаних у вузлах схеми. Для цієї схеми запропонованим методом визначено вузол з найбільшим розвантажувальним ефектом за втратами активної потужності (крива 3) та з найменшим (крива 1).

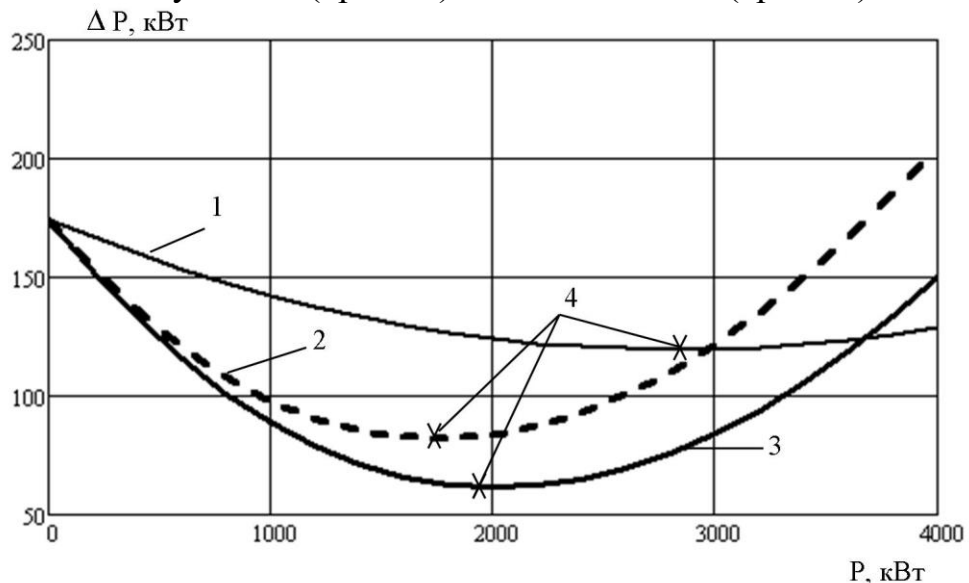


Рисунок 3 – Результати розрахунків оптимальних значень потужності ВДЕ

Вдосконалено метод врахування взаємовпливу мереж різних класів напруги енергопостачальної компанії з ВДЕ за реактивною потужністю. Він може використовуватись не лише на стадії проектування, але й під час розв'язання експлуатаційних задач.

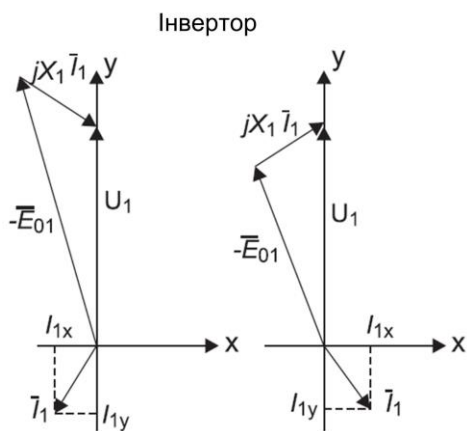


Рисунок 4 – Векторні діаграми інвертора за різного кута

Одним з основних елементів фотоелектричної станції є інвертор. На рис. 4 показано його векторні діаграми. З їх аналізу можна встановити те, що за рахунок зміни кута відкриття тиристорів інвертора досягаються різні кути між струмом і напругою, що в електричній мережі буде спричиняти зміну перетоків реактивної потужності.

Для підтвердження цих висновків виконано математичне моделювання в середовищі Simulink Matlab R2018a. За основу взято модель

представлену в базі прикладів Matlab – 'power_PVarray_grid_det'. Оскільки ця модель відпрацьовувала лише один з можливих режимів, які реалізують сучасні інвертори, то проведено вдосконалення моделі системи керування інвертором для можливості реалізації не лише режиму видачі активної потужності при коефіцієнті потужності рівному одиниці, а також підтримання заданого його значення, відмінного від одиниці і підтримання заданого рівня реактивної потужності в точці приєднання ФЕС. Крім цього параметри моделі були змінені у відповідності з параметрами реальної ФЕС для перевірки адекватності моделі. Дані по сонячній інсоляції і температурі сонячних панелей взяті для середньостатистичного дня без опадів, значної хмарності та вітру.

В роботі виконано вдосконалення методу визначення реактивної потужності, генерування якої фотоелектричною станцією призведе до зменшення втрат активної потужності, що ґрунтується на використанні апарату аналізу чутливості.

Вираз зменшення втрат потужності в ЕМ за рахунок генерування реактивної потужності ФЕС, яка встановлена у вузлі k :

$$\delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\text{ФЕС}k}) = 3I''_{\text{ФЕС}k} \left[\sum_{i=1}^n (2I''_{pi} - I''_{\text{ФЕС}i}) \sum_{j \in \mathbf{M}_{ki}} Z_j \right], \quad (2)$$

де \mathbf{M}_{ki} – множина спільних віток заступної схеми електричної мережі на шляху між центром живлення i -им вузлом та вузлом k встановлення ФЕС: $\mathbf{M}_{ki} = \mathbf{M}_k \cup \mathbf{M}_i$.

Чутливість втрат потужності $\Delta \dot{S}$ до зміни струму (потужності) окремої ФЕС $I''_{\text{ФЕС}k}$ характеризує відповідна похідна. Для розімкненої мережі

довільної конфігурації:

$$\frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\Phi EC k})}{\partial I''_{\Phi EC k}} = -6 \sum_{i=1}^n \left[(I''_{pi} - I''_{\Phi EC i}) \sum_{j \in M_{ki}} Z_j \right]. \quad (3)$$

Використовуючи вирази (3) для всіх m перспективних місць встановлення джерел реактивної потужності, визначених згідно наведеного вище, може бути сформовано систему лінійних рівнянь,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\Phi EC 1})}{\partial I''_{\Phi EC 1}} = 0; \\ \frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\Phi EC 2})}{\partial I''_{\Phi EC 2}} = 0; \\ \dots \\ \frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\Phi EC m})}{\partial I''_{\Phi EC m}} = 0, \end{array} \right. \quad (4)$$

розв'язання якої дозволяє визначити оптимальні потужності ФЕС, встановлених у відповідних вузлах. При цьому розмірність системи рівнянь визначається лише кількістю місць встановлення ФЕС.

Отже, розроблений метод, що базується на аналізі чутливості втрат потужності в ЕМ дозволяє однозначно характеризувати можливість і доцільність використання ФЕС для компенсації реактивної потужності, як найбільш впливового заходу зі зменшення втрат для цього фрагменту електричних мереж за енергетичним критерієм.

Відсутність достатнього об'єму вихідної інформації для розрахунку режимів електричних мереж різних класів напруги енергопостачальної компанії не дозволяє в повній мірі врахувати відновлювані джерела енергії. Тому в роботі виконано вдосконалення методу визначення взаємовпливу електричних мереж різних класів напруги, шляхом врахування режиму роботи відновлюваних джерел енергії в мережах нижчих класів напруги, через уточнення напрямків перетікання потужності та її значення в точці примикання до мереж вищих класів напруги.

Аналіз методів еквівалентування, проведений в роботі, показав необхідність їх вдосконалення для розв'язання поставленої задачі. Тому в роботі запропоновано використовувати натурно-імітаційне моделювання. Цей підхід дозволяє об'єднати як натурні, так і обчислювальні експерименти і отримати базу можливих режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, на основі яких отримати узагальнюючі залежності величини і напрямку потужності в точці примикання до мережі вищих класів напруги в залежності від потужності, яка генерується ВДЕ в різних точках мережі нижчих класів напруги (див. рис. 5).

Такі залежності можуть бути використані під час оптимального

керування (в темпі процесу) режимами ЛЕС, в умовах неповноти початкових даних про параметри ЕМ ВДЕ.

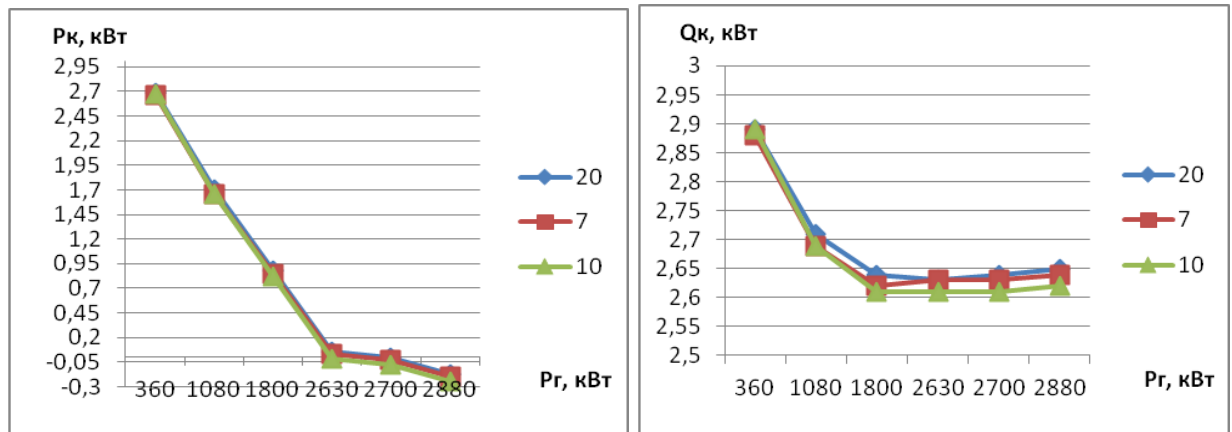


Рисунок 5 – Залежність перетоків потужності на головній ділянці від місця розташування РДЕ

Під час імітаційного моделювання відтворюється процес функціонування ЕМ ВДЕ в часі – поведінка ЕМ ВДЕ, причому імітуються режими, складові параметри процесу добових змін вузлових струмів та напруг, зі збереженням їх логічної структури і послідовності протікання цих процесів, що дозволяє за початковими даними отримати відомості про режим ЕМ ВДЕ в певні моменти часу, що дає можливість оцінити характеристики ЕМ ВДЕ.

У **третьому** розділі адаптовано інтегральний показник якості функціонування для задач оцінювання рівня енергоефективності електричних мереж з ВДЕ, зокрема СЕС і малих ГЕС. Це дозволило сформулювати умови комплексного розв'язання поставленої задачі, яка включає в себе зменшення втрат електроенергії та покращення її якості, а також підвищення надійності, і розробити етапність впровадження заходів з підвищення ефективності функціонування електричних з ВДЕ.

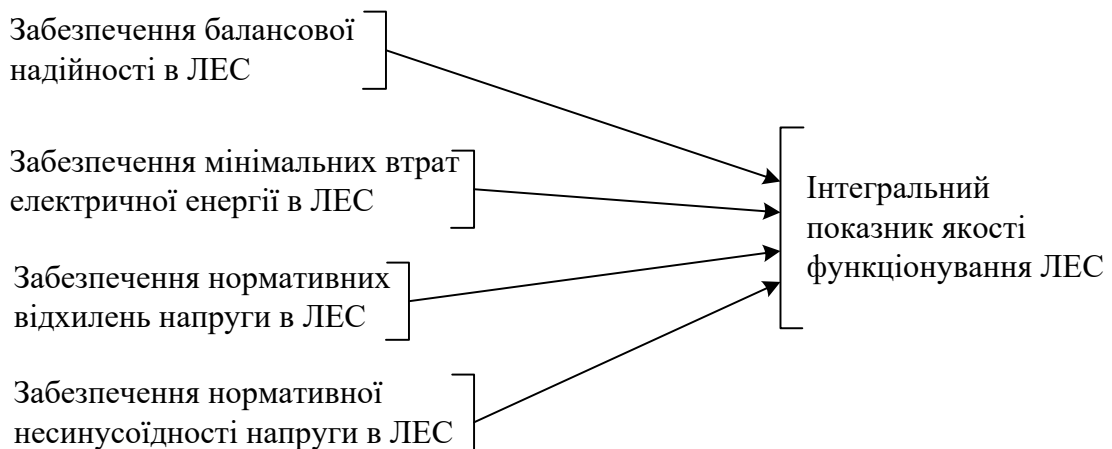


Рисунок 6 – Склад інтегрального показника якості функціонування електричних мереж з ВДЕ

Завдяки інтегруванню в одному показнику характеристик різних сторін функціонування електричних мереж (див. рис. б) спрощується оптимізація розвитку електричних мереж з врахуванням відновлюваних джерел енергії в них та реалізацію заходів з підвищення їх енергоефективності.

Інтегральний показник оцінюється у відносних одиницях і приймає значення від 0 до 1 (чим вище значення тим краще). За базис приймається «ідеальна» розподільна електрична мережа з теоретично можливим мінімумом втрат активної потужності, з абсолютною надійністю і якістю електроенергії. Отриманий показник дозволяє оцінювати зміну якості функціонування не лише певної розподільної мережі але й, завдяки використанню в якості базису «ідеальної» мережі, дозволяє порівнювати якість функціонування різних за схемою і складом генерувальних і споживчих потужностей розподільних електричних мереж без виконання техніко-економічних розрахунків.

Показник якості електропостачання в загальному вигляді може бути представлений так:

$$E = \sum_{i=m} p_i \prod_{j=n} P_{ij}, \quad (5)$$

де p_i – імовірність робочого стану; P_{ij} – імовірність забезпечення нормативного значення параметром j в стані i .

На основі інтегрального показника можна розробити математичну модель процесу розбудови ВДЕ в електричній мережі з урахуванням її параметрів і характеристик. Алгоритм оптимізації установленної потужності ВДЕ і розподілення їх в електричній мережі в якості критерію оптимальності застосовує інтегральний показник якості функціонування електричної мережі з ВДЕ. Результатом оптимізації є економічно і технічно доцільні значення потужності ВДЕ з урахуванням природних умов та інвестиційної привабливості регіону, які розосереджені так в електричній мережі, що в ній досягається зменшення втрат електроенергії, покращання якості електроенергії та підвищення надійності електропостачання.

Під час розв'язання експлуатаційних задач необхідно не тільки дотримуватися режимних критеріїв, а й прагнути до максимізації економічної ефективності функціонування системи, то цільова функція повинна мати економічну складову прибутків і компенсації в процесі передачі і розподілу електричної енергії. В процесі розбудови і експлуатації електричних мереж і відновлюваних джерел в них прагнуть до максимізації економічної ефективності функціонування локальної електричної системи:

$$F = \sum_{j \in M} \left\{ \begin{array}{l} c_j \cdot (W_j^H - W_{j_{нд}} - W_{j_{нк}}) - \sum_{i \in N_0} c'_i \cdot W'_{ji} - f_j \cdot W_{j_{нд}} - d_j \cdot W_{j_{нк}} - \\ - g_j \cdot \Delta W_j \end{array} \right\} \Rightarrow \max, \quad (6)$$

де M – кількість вузлів; N_0 – кількість зв'язків з іншими ЛЕМ; W_j^H –

електрична енергія, яку повинен отримати вузол j ; W'_{ji} – електрична енергія, яку отримує вузол j від ЛЕС i ; $W_{j\text{нд}}$ – недовідпущена електроенергія; $W_{j\text{нк}}$ – неякісна електроенергія; ΔW_j – втрати пов'язані з передаванням електроенергії до вузла j ; c_j – питома вартість (тариф) переданої електроенергії споживачам у вузлі j ; c_i – вартість електроенергії отриманої від системи i , ($c'_i = c_i - c_j$); f_j – питомий збиток або компенсація втрат від недовідпуску електроенергії; d_j – питомий збиток або компенсація втрат від неякісної електроенергії; g_j – питома вартість втрат електроенергії.

Якщо в (6) відповідні потужності виразити через інтегральний показник якості функціонування локальної електричної системи, то функція F буде мати вид:

$$F = \sum_{j \in M} \left\{ \begin{array}{l} c_j \cdot W_j^H \cdot E_{*j} - W_j^H (1 - E_{*j}) \sum_{i \in N_0} c'_i k_i - f_j \cdot b_j \cdot W_j^H (1 - E'_{*j}) - \\ - d_j \cdot b_j \cdot W_j^H (E'_{*j} - E_{*j}) - g_j \cdot W_j^H \cdot (1 - b_j) \sum_{s=1}^N T_s \end{array} \right\},$$

де N – кількість віток; $b_j = (1 - E_{*j}) \left(1 - \sum_{i \in N_0} k_i \right)$ – коефіцієнт, який залежить від якості функціонування системи; T_s – коефіцієнт розподілу втрат потужності у вітці s схеми в залежності від потужності у вузлі j ; $k_i = \sum_{v=1}^l \frac{W_v}{W_{ji}} \cdot P[W_v]$ – коефіцієнт, який характеризує пропускну здатність зв'язку між ЛЕС; $P[W_v]$ – імовірність знаходження зв'язку у стані v , який характеризується пропускнуою здатністю W_v ; $W_{j\text{нд}} = b_j \cdot W_j^H (1 - E'_{*j})$; $W_{j\text{нк}} = b_j \cdot W_j^H (E'_{*j} - E_{*j})$;
 $\Delta W_m = \sum_{s=1}^N T_s \cdot (W_j^H - W_{j\text{нд}})$.

В роботі запропоновано використовувати показник (6) у безрозмірному вигляді. Для цього винесемо за дужки $c_m \cdot W_m^H$ і розділимо на $\sum_{m=1}^M c_m \cdot W_m^H$.

$$F_* = \sum_{m=1}^M \pi_m \cdot \left\{ \begin{array}{l} E_{*m}(D) - \sum_{i \in N_0} c'_i k_i(D) - f_{m*} \cdot b_m(D) (1 - E'_{*m}(D)) - \\ - d_{m*} \cdot b_m(D) (E'_{*m}(D) - E_{*m}(D)) - g_{m*} \sum_{n=1}^N T_n(D) \cdot (1 - b_m(D)) \end{array} \right\}, \quad (7)$$

де $\pi_m = \frac{c_m \cdot W_m^H}{\sum_{m=1}^M c_m \cdot W_m^H}$ – вагові коефіцієнти; D – множина заходів з підвищення енергоефективності.

Отриманий показник характеризує ефективність локальної

електричної системи, зумовлену впровадженнями заходами з підвищення енергоефективності, по відношенню до "ідеальної" системи. За запропонованим показником розроблено алгоритм, за яким визначається етапність впровадження заходів з підвищення енергоефективності.

Формулюється задача так: необхідно забезпечити заданий рівень ефективності функціонування локальної електричної системи за мінімальних приведених затратах на реалізацію відповідних заходів.

Математично задача може бути подана так:

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i(F'_i) \Rightarrow \min \quad (8)$$

за обмеження

$$1 - F'_{зд} = \prod_{i=1}^n (1 - F'_i), \text{ або } \ln(1 - F'_{зд}) = \sum_{i=1}^n \ln(1 - F'_i), \quad (9)$$

де $Z_i(F'_i)$ – затрати на реалізацію заходів з підвищення енергоефективності i -тої схеми розподільної мережі; F'_i – показник ефективності розподільної мережі по відношенню до конкретного споживача; i – варіант схеми електропостачання конкретного споживача.

Використавши для розв'язання цієї задачі метод невизначених множників Лагранжа, отримаємо систему з n рівнянь з невідомими F'_i :

$$\ln(1 - F'_i) = \frac{1 - y_i}{\sum_{i=1}^n (1 - y_i)} \ln \frac{(1 - F'_{зд})}{\prod_{i=1}^n (1 - F'_{i0})} + \ln(1 - F'_{i0}), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Розв'язавши систему рівнянь (10), отримуємо значення F'_i , які дозволяють обрати перелік заходів з підвищення енергоефективності розподільної електричної мережі з мінімальними приведеними затратами.

Ефективність запропонованих методів показана на прикладі розрахунків максимальних та мінімальних режимів підстанції 110/35/10кВ за різних умов генерування СЕС і установки когенерації. При цьому запропонований підхід забезпечує контроль обмежень на параметри режиму електричної мережі в широкому діапазоні зміни генерування ВДЕ в ЛЕС. Враховується також перспектива розвитку навантаження в ЛЕС і закладається відповідно поетапне нарощування генерування.

У **четвертому** розділі подано результати практичних досліджень метою яких є підтвердження ефективності розроблених методів та алгоритмів. Ефективність окремих заходів підтверджено на практиці.

В розділі наводяться результати визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС для схеми електричних мереж ТОВ «Вінницька птахофабрика» з врахуванням подальшого їх розвитку. Для цього за статистичними даними були визначенні найімовірніші графіки навантаження

та генерування (використанні статистичні дані по ФЕС Тростянецького району).

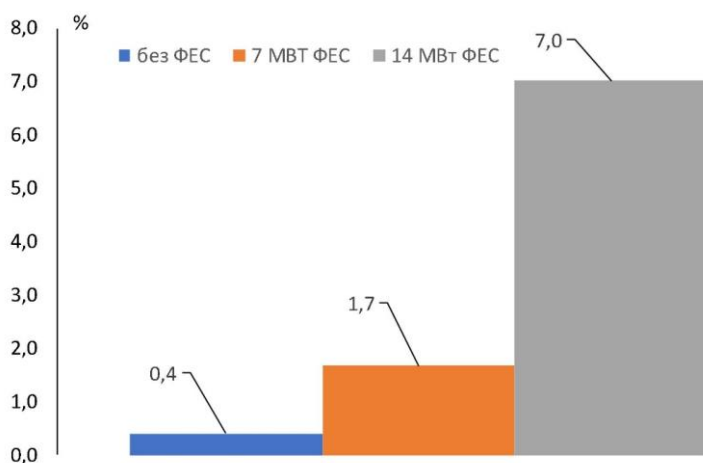


Рисунок 7 – Рівні втрати електричної енергії за різної потужності ФЕС

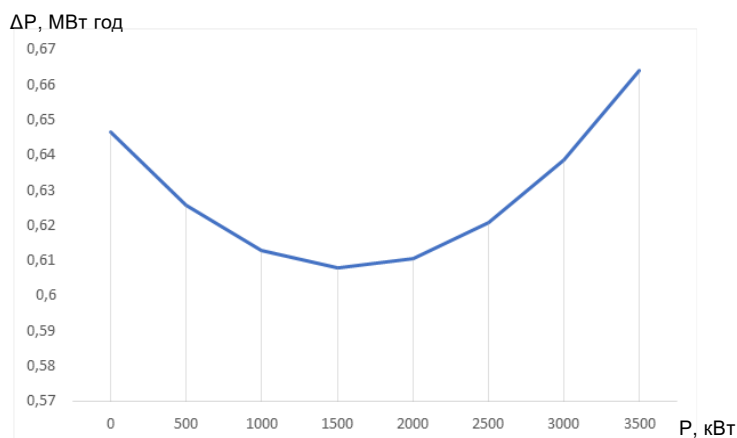


Рисунок 8 – Зміна втрат в електричній мережі 35 кВ від встановленої потужності ФЕС

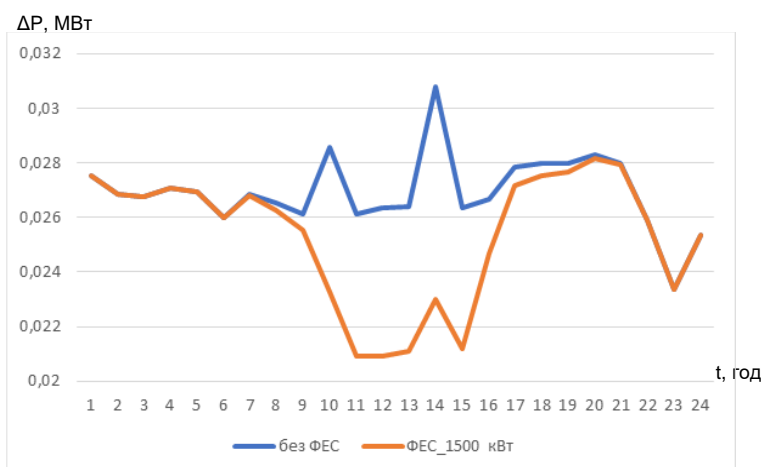


Рисунок 9 – Втрати активної потужності в електричній мережі 35 кВ до та після встановлення ФЕС 1,5МВт

Відповідно до планів розбудови ФЕС в електричній мережі ТОВ «Вінницька птахофабрика» планувалось побудувати дів черги по 7 МВт. Результати розрахунку рівнів втрат електричної енергії по відношенню до сумарного навантаження показані на рис. 7.

Використовуючи вдосконалений метод визначення оптимальної встановленої потужності, показано, що оптимальною для ФЕС в цій точці мережі є 1,5 МВт. Такий же результат отримано шляхом перебору можливих потужностей (див. рис. 8).

Також було проведено перевірку ефективності використання фотоелектричних станцій в режимі компенсатора. Для цього розглядались такі режими:

1. Без генерування ФЕС Гальжбіївська;
2. Генерування ФЕС Гальжбіївська 300кВт з дотриманням $\text{tg}(\varphi)=0$, $\text{cos}(\varphi)=1$;
3. Генерування ФЕС Гальжбіївська 300кВт з дотриманням $\text{tg}(\varphi)=0,1$, $\text{cos}(\varphi)=0,995$;
4. Генерування ФЕС Гальжбіївська 300кВт з дотриманням $\text{tg}(\varphi)=0,33$, $\text{cos}(\varphi)=0,95$;
5. Генерування ФЕС Гальжбіївська 300кВт з

дотриманням $\text{tg}(\varphi)=0,48$, $\cos(\varphi)=0,9$;

б. Генерування ФЕС Гальжбіївська 300кВт з дотриманням $\text{tg}(\varphi)=0,75$, $\cos(\varphi)=0,8$.

Зміна втрат активної потужності в лініях електропередачі 35 кВ

показана на рис. 9.

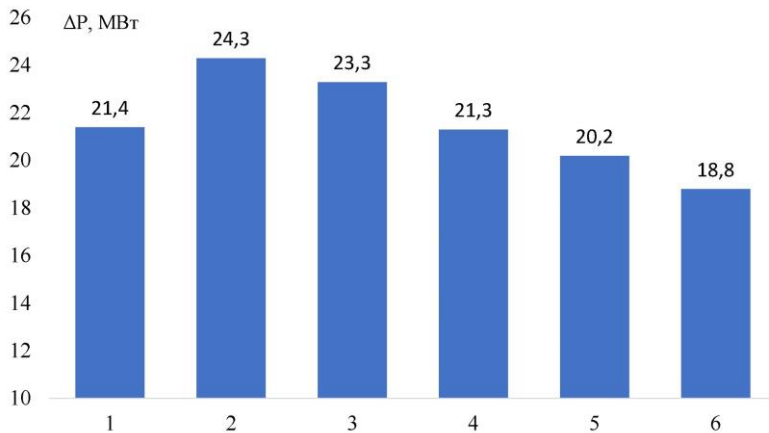


Рисунок 10 – Втрати активної потужності в електричній мережі 35 кВ до та після встановлення ФЕС 1,5МВт

Для перевірки можливого зростання спотворення кривої напруги в наслідок такого режиму інвертора виконано моделювання такого режиму засобами Matlab R2018a.

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що спотворення не перевищують допустимі величини. Однак

спостерігається зростання непарних гармонік, особливо 5-ої. Крім цього необхідно пам'ятати про допущення прийняте під час моделювання про відсутність спотворень в електричній мережі без ФЕС, що не відповідає реальній ситуації в мережах 10 кВ України.

В роботі проаналізовані ряд заходів, які можна реалізувати шляхом оптимального розташування точок підключення ВДЕ, виведенням ФЕС в режим компенсатора реактивної потужності, тощо. Для цих заходів визначено значення показника ефективності F_* (див. рис. 10).

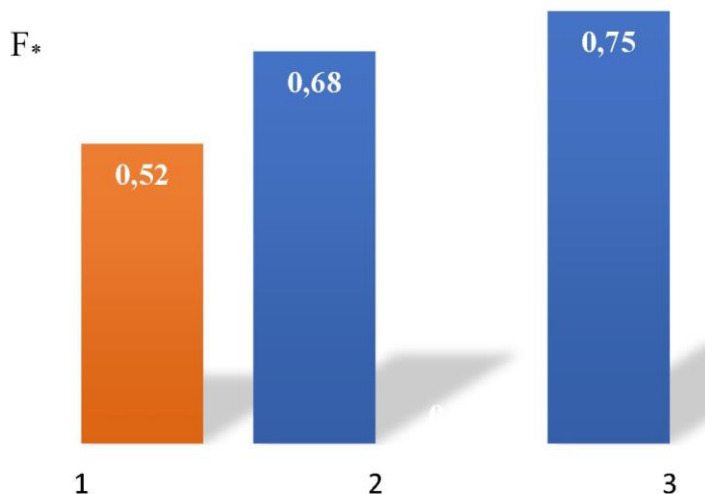


Рисунок 11 – Значення показника ефективності для різних заходів, які розглядались в роботі

умови використання ФЕС приєднаних до мережі і як компенсатор реактивної потужності.

На рис. 11 показано під номером 1 значення показника F_* для поточного стану електричної мережі з ВДЕ. Під номером 2 значення показника за умови генерування ВДЕ потужності, що відповідає оптимальному значенню встановленої потужності, яка визначена за запропонованим в роботі методом. Під номером 3 значення показника відповідає випадку 2 за

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення енергоефективності електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, що відрізняється від відомих застосуванням засобів аналізу чутливості та критеріального моделювання, що у комплексі дозволило підвищити ефективність локальних електричних систем, застосовуючи технічні можливості відновлюваних джерел енергії.

1. Енергоефективність електричної мережі залежить, в тому числі, від потужності ВДЕ. Важливим є визначити її значення в контексті забезпечення параметрів мережі в межах, встановлених нормативними документами, а також участі ВДЕ в плануванні і підтримці балансу потужності та електроенергії в ЕЕС. Запропоновано метод формування оптимального значення потужності ВДЕ, який пристосований до визначення значень їх потужності і характеру їх зміни, коли критерієм оптимальності є втрати електроенергії в мережі. Отримані залежності втрат потужності та електроенергії дозволяють прогнозувати їх значення в балансі ЕЕС.

2. У відповідності до кодексу електричних мереж передбачено керування реактивною потужністю в ЛЕС і напругою. Розроблено модель компенсації реактивної потужності в електричній мережі і запропоновано вдосконалену систему керування інвертором ФЕС. Результати моделювання режиму дозволяють встановити залежності для підтримання сталого значення генерованої реактивної потужності з заданим коефіцієнтом потужності.

3. В існуючій електричній мережі, яка проектувалася і експлуатувалася від централізованого живлення, розбудова в ній розосередженого генерування призводить до суттєвих змін параметрів режиму. Вплив РДЕ на параметри режиму мережі можливо оцінювати натурно-імітаційним моделюванням. Для цього в програмний комплекс з ОІК вводяться поточні дані параметрів режиму мережі, а режими роботи РДЕ, наприклад ВДЕ, імітуються в допустимих межах. Техніко-економічні параметри (напруга, втрати потужності, бажані коефіцієнти трансформації трансформаторів та ін.) фіксуються і наносяться на робочу схему.

4. Інтегральний показник якості функціонування як засіб оцінювання рівня енергоефективності електричних мереж адаптовано до оцінювання впливу ВДЕ, зокрема ФЕС і малих ГЕС, на показник енергоефективності мережі в нових умовах. В першу чергу враховується вплив ВДЕ на відповідність рівнів напруги нормативним значенням та на втрати електроенергії в мережі. В результаті створюються умови для оцінювання можливості і доцільності передачі згенерованої електроенергії з ЛЕС в ЕЕС або навпаки.

5. Ефективність запропонованих методів показана на прикладі розрахунків максимальних та мінімальних режимів підстанції 110/35/10кВ за різних умов генерування ФЕС і установки когенерації. При цьому запропонований підхід забезпечує контроль обмежень на параметри режиму електричної мережі в широкому діапазоні зміни генерування ВДЕ в ЛЕС.

Враховується також перспектива розвитку навантаження в ЛЕС і закладається відповідно поетапне нарощування генерування.

6. Для підвищення енергоефективності електричної мережі обов'язковим є узгодження графіків навантаження і генерування ЛЕС з режимами роботи ЕЕС. Необхідно планувати таким чином, що в режимі максимальних навантажень локальна електрична система має бути збалансована і з ЕЕС споживатиметься мінімальна кількість електроенергії, а в режимі мінімальних навантажень в ЛЕС надлишок електроенергії може передаватися в ЕЕС. Такі можливості мають бути забезпечені без відхилення параметрів режиму від їх нормативних значень

7. Виконано перед проектні розрахунки з введенням до існуючої електричної схеми «Вінницька птахофабрика» сонячних електростанцій. Показано, що понаднормове зростання напруги на шинах 10 кВ, до яких планується підключення СЕС, повинно враховуватись під час розроблення проектів, оскільки можуть стати причиною недовідпуску електричної енергії в наслідок відключення інверторного обладнання. Введення потужностей СЕС визначені за площадками для їх побудови (14 МВт ПС "Холодівка" та 7 МВт ПС "Олениця") будуть призводити до понаднормових відхилень напруги в години максимального генерування. Зростання втрат потужності, які зумовлені зустрічними потоками в години максимального генерування, є неприпустими.

8. Вплив реактивної потужності СЕС на якість напруги виконано на прикладі Гільжбіївської СЕС і малої ГЕС. Аналіз результатів розрахунку дозволяє зробити висновок про підвищення енергоефективності внаслідок компенсації перетоків реактивної потужності за рахунок зниження втрат активної потужності. Встановлено, що може мати місце спотворення синусоїди напруги і струму. Тому проведено аналіз можливих рівнів спотворення в розглянутих режимах засобами Matlab Simulink 2018. Показано, що склад гармонік, в основному, визначається гармонічним складом напруги мережі, яка подається на інвертор.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] О. Кузьмик, В. Комар, О. Ковальчук, "Вплив розосередженого генерування на якість функціонування розподільних електричних мереж", *Технічна електродинаміка*, №2. с. 34-35, 2012.

[2] О. Кузьмик, В. Комар, С. Вишневський, "Використання показника якості функціонування при оцінюванні місць розмикання розподільної електричної мережі", *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №186, В.11,с. 182-186, 2011.

[3] О. Кузьмик, П. Лежнюк, В. Комар, В. Лесько, "Оптимізація режимів розподільних електричних мереж в умовах зростання частки розосередженого генерування", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*, №129, с. 29-31, 2012.

[4] О. Кузьмик, В. Комар, Н. Остра, С. Гуцол, "Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж", *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №1(14), с. 104-108, 2013.

[5] О. Кузьмик, В. Комар, "Аналіз впливу розосередженого генерування на режим роботи розподільних електричних мереж", *Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво», №25, с. 108-113, 2014.

[6] О. Сікорська, О. Рубаненко, В. Комар, "Комп'ютерне моделювання режимів лес з використанням їх еквівалентів". *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича*. Серія: *Комп'ютерні системи та компоненти*, Том 6, В.1, с.101-110, 2015.

[7] P. Lezhniuk, O. Rubanenko, V. Komar, O. Sikorska.(2020) "The Sensitivity of the Model of the Process Making the Optimal Decision for Electric Power Systems in Relative Units", *IEEE KhPI Week on Advanced Technology(KhPIWeek)*, Kharkiv, 2020, pp. 247-252.

[8] О. Сікорська, О. Рубаненко, В. Комар, "Дослідження методів побудови еквівалентів локальних електричних систем", *Вісник Хмельницького національного університету*, №4, с. 165-173, 2015.

[9] O. Sikorska, A. Kylymchuk, O. Rubanenko, V. Teptia, Mergul Kozhamberdiyeva, Konrad Gromaszek, Nursanat Askarova, "Control of power flow and voltage in parallel working electrical GRIDS" *PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY*, R. 93 NR 3, pp 88-92, 2017.

[10] В. Комар, Н. Остра, О. Кузьмик, "Врахування динамічних еквівалентів локальних електричних систем при оптимізації режимів ЕЕС", у *матеріалах IV міжнародної науково-технічної конференції Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*, Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012, pp. 57-58.

[10] В. Комар, О. Кузьмик, "Оптимізація режимів ЕЕС з урахуванням розосередженого генерування", у *матеріалах міжнародної конференції Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)*, Вінниця: ВНТУ, 2012, pp. 156.

[11] О. Рубаненко, О. Сікорська "Еквівалентування локальних електричних систем та оцінювання їх впливу на режими електричних мереж живлення підприємств АПК", у *матеріалах II науково-технічної конференції Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК*, Вінниця, 2014, pp. 28.

[12] Jean-Pierre Ngoma, Adolphe Imano Moukengue, O. Burykin, O. Sikorska, "Power losses sensitivity to electrical power systems transits changes", *матеріали 11-а міжнародна научна практична конференція Бъдещите изследвания*, Республіка Бълґарія, гр. Софія, 2015, pp. 6-11.

[14] П. Лежнюк, В. Комар, О. Сікорська, "Покращення техніко-економічних показників розподільних електричних мереж засобами розосередженого генерування на основі моніторингу їх режимів", у *матеріалах I всеукраїнського наукового семінару Моніторинг енерго- та*

ресурсовикористання в складних виробничих системах, Луцьк, 2015, pp. 91-93.

[15] О. Рубаненко, В. Комар, О. Сікорська, "Аналіз нормальних режимів розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії засобами натурно-імітаційного моделювання", у матеріалах V Всеукраїнського наукового семінару *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*, Луцьк, 2015, pp. 133-135.

[16] P. Lezhniuk, V. Komar, N. Sobchuk, O. Sikorska, "Evaluation of Functioning Quality of Local Electrical Systems by the Criterion Method Based on Markov Processes", *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*, Rivne, 2019, pp. 169-172, doi: 10.31713/MCIT.2019.37.

[17] П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. В. Сікорська, та В. О. Комар, «Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням», *МПК(2006.01) G01R 31/00. №u201604575*, Лист.10, 2016.

АНОТАЦІЯ

Сікорська О.В. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Дисертаційна робота присвячена комплексному розробленню методів і засобів підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами енергії. В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі. За допомогою математичного моделювання та результатів натурних експериментів показано вплив різнотипних відновлюваних джерел енергії на режими роботи мереж різних класів напруги, зменшення втрат електроенергії та покращення її якості, а також підвищення надійності електропостачання. Такий підхід дозволяє розробити етапність впровадження заходів з підвищення ефективності функціонування електричних мереж з ВДЕ. Подальшого розвитку в роботі набув метод визначення взаємовпливу електричних мереж різних класів напруги, шляхом врахування режиму роботи відновлюваних джерел енергії в мережах нижчих класів напруги, а саме через уточнення напрямків перетікання потужності та її значення в точці приєднання до мереж вищих класів напруги. Використання математичного апарату аналізу чутливості дозволило вдосконалити метод формування енергоощадних заходів зі зменшення втрат в електричних мережах з врахуванням їх впливу на якість напруги в них, шляхом використання фотоелектричних станцій в режимі компенсації реактивної потужності. Розроблені в роботі методи і засоби оцінювання ефективності функціонування розподільних електричних мереж

дозволяють комплексно оцінювати заходи з підвищення енергоефективності електричних мереж з розосередженим генеруванням.

Ключові слова: електричні мережі, розосереджені джерела енергії, втрати електроенергії, електроощадні заходи, показник якості функціонування, аналіз чутливості, енергоефективність.

ABSTRACT

Sikorska O.V. Dispersed generation in the problems of increasing the energy efficiency of distribution electrical networks. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the Candidate of Science (Engineering) Degree on the Speciality 05.14.02 "Electric Stations, Grids and Systems". – Vinnytsia National technical University. – Vinnytsia, 2021.

Reducing electricity losses in electricity networks as part of the overall task of improving the efficiency and quality of energy production is a complex complex problem that requires a systematic approach. One of the components of this problem is the calculation and analysis of the impact of renewable energy sources (RES) on the energy efficiency of distribution electricity networks (DEN). Especially during the intensive development of RES in conditions of underfunding of distribution electricity networks. The effectiveness of calculations and analysis, as well as further planning of energy saving measures depends on information, methodological, mathematical, logistical and organizational support.

To date, there are no regulatory documents that would minimize the unreasonable volume of RES implementation. This is due to the lack of generally accepted methods for determining the location and allowable capacity of connected RES.

In recent years, the growing share of renewable sources in the energy balance has led to the loading of a large number of distribution lines and transformers. As a result, there is not only an increase in electricity losses, but also a decrease in the reliability of electricity supply and quality of electricity. Solving these problems requires a comprehensive approach, which includes organizational and technical energy-saving measures, as well as the development and reconstruction of electrical networks. Given the interaction of all measures and changes in electrical networks, it is useful to have an overall assessment of their impact on the quality of the electrical network as a whole.

That is why the dissertation work is devoted to the complex development of methods and means of improving the energy efficiency of electrical distribution networks with dispersed energy sources. A new solution of the actual scientific-applied problem is obtained in the work. Using mathematical modeling and the results of field experiments, the influence of different types of renewable energy sources on the modes of operation of networks of different voltage classes, reducing electricity losses and improving its quality, as well as increasing the reliability of power supply is shown. This approach allows to develop a phased implementation of measures to improve the efficiency of electrical networks with DEN. The method of determining the interaction of electrical networks of different voltage classes was further developed by taking into account the mode of operation

of renewable energy sources in networks of lower voltage classes, namely by specifying the directions of power flow and its value at the point of connection to higher voltage classes. The use of a mathematical apparatus for sensitivity analysis has improved the method of forming energy-saving measures to reduce losses in electrical networks, taking into account their impact on the quality of voltage in them, by using photovoltaic stations in reactive power compensation mode. The methods and means of evaluation of efficiency of functioning of distributive electric networks developed in work allow to estimate comprehensively measures for increase of energy efficiency of electric networks with dispersed generation.

Key words: electric networks, dispersed energy sources, electricity losses, electricity saving measures, performance quality indicator, sensitivity analysis, energy efficiency.

АННОТАЦИЯ

Сикорская Е.В. Рассредоточенное генерирование в задачах повышения энергоэффективности распределительных электрических сетей. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 «Электрические станции, сети и системы». - Винницкий национальный технический университет, Винница, 2021.

Диссертация посвящена комплексной разработке методов и средств повышения энергоэффективности распределительных электрических сетей с рассредоточенными источниками энергии. В работе получено новое решение актуальной научно-прикладной задачи. С помощью математического моделирования и результатов натурных экспериментов показано влияние разнотипных возобновляемых источников энергии на режимы работы сетей различных классов напряжения, уменьшения потерь электроэнергии и улучшения ее качества, а также повышение надежности электроснабжения. Такой подход позволяет разработать этапность внедрения мероприятий по повышению эффективности функционирования электрических сетей с ВИЭ. Дальнейшее развитие в работе получил метод определения взаимовлияния электрических сетей различных классов напряжения, путем учета режима работы возобновляемых источников энергии в сетях низших классов напряжения, а именно из-за уточнения направлений перетекания мощности и ее значение в точке присоединения к сетям высших классов напряжения. Использование математического аппарата анализа чувствительности позволило усовершенствовать метод формирования энергосберегающих мероприятий по уменьшению потерь в электрических сетях с учетом их влияния на качество напряжения в них, путем использования фотоэлектрических станций в режиме компенсации реактивной мощности. Разработанные в работе методы и средства оценки эффективности функционирования распределительных электрических сетей позволяют комплексно оценивать меры по повышению энергоэффективности электрических сетей с рассредоточенным генерированием.

Ключевые слова: электрические сети, рассредоточенные источники энергии, потери электроэнергии, электроощадные мероприятия, показатель

качества функционирования,
энергоэффективность.

анализ

чувствительности,

Підписано до друку __.__.____ р. Формат 29.7 × 42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № _____

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59