

ВІДГУК

офіційного опонента

ПАПАЇКИ Юрія Анатолійовича

на дисертаційну роботу КУЗНЕЦОВА Дмитра Сергійовича

«Підвищення енергоефективності електричних мереж

з відновлюваними джерелами живлення

за рахунок використання організаційних та технічних заходів»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми

У контексті трансформації енергетичної системи, обумовленої масштабним впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та децентралізованих джерел генерації, особливого значення набувають дослідження, спрямовані на підвищення адаптивності та функціональної стійкості електричних мереж. В умовах змінної структури навантаження і генерації, обумовленої нестабільною природою ВДЕ, ключовими завданнями стають мінімізація втрат електричної енергії, забезпечення допустимих рівнів напруги, а також збереження параметрів якості електроенергії у динамічних режимах роботи системи.

У дисертаційній роботі акцент зроблено на розробці та обґрунтуванні методів оптимізації конфігурації електричних мереж з урахуванням показників енергетичної ефективності. Основну увагу приділено визначенню оптимальних точок розмикання мереж для підвищення енергоефективності, а також застосуванню засобів компенсації реактивної потужності, зокрема, конденсаторних установок з метою зменшення технологічних втрат в умовах змінних режимів роботи, характерних для систем з наявністю ВДЕ.

У дослідженні застосовано математичні моделі, які відображають топологічну структуру електричних мереж, а також реалізовано алгоритми оптимізації їх конфігурації із залученням засобів комп'ютерного моделювання. Розроблені підходи протестовано на характерних схемах розподільчих мереж, до

складу яких входять джерела на основі відновлюваної енергії. За результатами моделювання підтверджено їхню ефективність як у зниженні технологічних втрат електроенергії, так і в покращенні режимних характеристик мережі.

Комплексність підходу, поєднання теоретичного обґрунтування з практичною реалізацією та адаптивність запропонованих методик до сучасних умов функціонування електроенергетичних систем свідчать про наукову та прикладну цінність дисертаційної роботи Кузнецова Д. С.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Відповідно до поданих дисертаційних матеріалів, результати досліджень є складовою частиною науково-дослідних робіт, виконаних на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» відповідно до наукових досліджень в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи за планом МОН України «Дослідження інтелектуальної системи електропостачання на основі залучення активних споживачів» (ДР № 0122U001313, 2022–2023 рр.), «Система сталого електропостачання громад з можливістю забезпечення автономного режиму роботи на основі віртуальних електричних станцій» (ДР № 0124U000669, 2023–2025 рр.) Участь здобувача – виконавцем окремих розділів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Рівень обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі, є високим. Він базується на ґрунтовному аналізі інформаційних джерел за темою дослідження, чіткій постановці мети та завдань, застосуванні сучасних методів дослідження, а також на порівнянні й детальному критичному аналізі отриманих результатів із даними інших науковців, що забезпечує якісне формулювання висновків.

Положення, висновки та рекомендації, наведені в дисертації Кузнецова Д. С. достатньо обґрунтовані як з наукової, так і з технічної точки зору.

Достовірність результатів досліджень

У роботі застосовано системний підхід до проведення теоретичних та

експериментальних досліджень, який базується на фундаментальних засадах теорії електричних кіл, загальної теорії оптимізації та техніки високих напруг. Математична обробка отриманих результатів здійснювалась із використанням сучасного прикладного програмного забезпечення DIgSILENT PowerFactory. Надійність розроблених рішень забезпечується правильним застосуванням методів дослідження, підтверджена експериментальними даними та впровадженням рекомендацій щодо системної стратегії модернізації електричних мереж з метою підвищення їх енергоефективності в умовах зростаючої інтеграції відновлюваних джерел енергії.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– отримав подальший розвиток метод систематичного аналізу топологічних конфігурацій електричних мереж на основі комп'ютерного моделювання в PowerFactory, що відрізняється від існуючих використанням зваженої функції цілі для інтегральної оцінки альтернативних конфігурацій мережі. Запропонований метод дозволяє одночасно враховувати декілька критеріїв оптимізації, для вибору енергоефективної топології мережі;

– вдосконалено метод послідовного перебору варіантів для вибору місць встановлення ВДЕ в розподільчих ЕМ, що відрізняється від існуючих застосуванням індексу чутливості, який ґрунтується на аналізі активних втрат в лініях електропередач (ЛЕП) та враховує технічні обмеження ЕМ, що дозволяє забезпечити стійкості та стабільності роботи електричних мереж;

– отримав подальший розвиток метод динамічного програмування для визначення оптимальних місць встановлення КУ в ЕМ, який відрізняється від існуючих підходів використанням комбінаторних задач на основі комп'ютерного моделювання ЕМ в PowerFactory, що дозволяє більш детально оцінити можливі варіанти розміщення КУ в мережі;

– науково обґрунтована необхідність використання поетапної та систематизованої стратегії модернізації електричних мереж з метою підвищення їх енергоефективності в умовах зростаючої інтеграції ВДЕ, що відрізняється від

існуючих використанням узагальненої багатокритеріальної цільової функції, яка дозволяє врахувати одночасно організаційно-технічні заходи та параметри режимів електричних мереж.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Практична цінність результатів дисертаційної роботи Кузнецова Д. С. полягає у вдосконаленні методів оптимізації функціонування електричних мереж. Зокрема, розроблено методику аналізу топологічних конфігурацій з використанням зваженої функції цілі для обґрунтованого вибору структури мережі в умовах багатокритеріального підходу; методику визначення оптимальних точок підключення відновлюваних джерел енергії з урахуванням індексу чутливості та технічних обмежень; методику розміщення конденсаторних установок, яка базується на динамічному програмуванні та комп'ютерному моделюванні для детального аналізу режимів роботи; а також алгоритм реалізації поетапної стратегії модернізації мереж, що враховує організаційно-технічні заходи для підвищення енергоефективності та стабільності розподільчих систем.

Отримані результати впроваджено в навчальний процес кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» в рамках освітніх та освітньо-наукових програм за спеціальностями «Електроенергетика» та «Комп'ютерні інформаційні технології цифрової трансформації енергетики».

Оцінка змісту дисертації та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота Кузнецова Д.С. є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел із 110 найменувань та 3 додатка.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначені задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, наведено дані про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

У першому розділі проаналізовано структуру технологічних втрат електроенергії в електричних мережах. Встановлено, що їх основними складовими є навантажувальні втрати, які залежні від режимів роботи, та

умовно-постійні втрати, пов'язані з характеристиками обладнання. Розглянуто основні методи оцінки втрат, показано залежність точності розрахунків від обраного підходу та ступеня деталізації даних. Проаналізовано організаційні й технічні заходи для зменшення технологічних втрат. Підтверджено актуальність проблеми зниження втрат, зокрема в умовах зростаючої інтеграції відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ). Визначено перспективні напрями досліджень - оптимізацію топології мереж та впровадження засобів компенсації реактивної потужності в умовах роботи з ВДЕ.

У *другому* розділі на основі аналітичного дослідження проаналізовано існуючі методи пошуку оптимального місця розмикання електричних мереж, визначено їх переваги та обмеження. Обґрунтовано вибір найбільш доцільного підходу, здатного оцінювати різні топологічні конфігурації мережі враховуючи кілька критеріїв одночасно, і швидко адаптуватися до змін умов і вимог. Зформовано цільову функцію для пошуку оптимальної топології електричних мереж (ЕМ) за допомогою комп'ютерного моделювання в PowerFactory та удосконалено метод систематичного аналізу топологічних конфігурацій електричних мереж на основі використання зваженої функції цілі для інтегральної оцінки альтернативних конфігурацій мережі. Моделювання мережі 35/10 кВ на базі реальної схеми Обленерго України підтвердило ефективність запропонованого методу щодо мінімізації активних втрат та покращення показників якості електроенергії в різних режимах, що свідчить про універсальність і практичну значущість удосконаленої методики.

У *третьому* розділі проаналізовано розвиток ВДЕ в Україні та їх вплив на втрати електроенергії, рівень напруги й якість електропостачання. Визначено, що ВДЕ має 3 сценарії впливу на втрати електроенергії в ЕМ. Також проведено аналіз можливих варіантів підключення ВДЕ до ЕМ та особливостей їх режимів роботи. Визначено, що існує 4 режими роботи ВДЕ в ЕМ. Обґрунтовано доцільність використання методу послідовного перебору варіантів для визначення оптимальних місць підключення ВДЕ. Вдосконалено метод послідовного перебору варіантів для вибору місць встановлення ВДЕ в розподільчих ЕМ, що відрізняється від існуючих застосуванням індексу

чутливості. Практичне моделювання підтвердило ефективність підходу: зменшення активних та реактивних втрат навіть за умов зниженої генерації ВДЕ. Дослідження режимів роботи ВДЕ з різними значеннями коефіцієнта потужності засвідчило, що оптимальним з точки зору мінімізації втрат є $\cos\varphi = 0,9$. Результати підтверджують, що застосування вдосконаленої методики сприяє підвищенню енергоефективності, стійкості та надійності роботи електричних мереж з ВДЕ.

У *четвертому* розділі розроблено методику визначення оптимальних місць встановлення конденсаторних установок (КУ) в ЕМ з метою зниження втрат електроенергії та підвищення енергоефективності. Проаналізовано існуючі методи пошуку місць встановлення КУ, виділено їхні переваги, недоліки та обмеження. Обґрунтовано вибір методу динамічного програмування як найбільш доцільного для вирішення поставленої задачі. Вдосконалено метод динамічного програмування (ДП) із використанням комп'ютерного моделювання для підвищення рівня деталізації режимних характеристик та системної взаємодії елементів розподільчих ЕМ при оцінюванні різних місць встановлення КУ. Реалізація методу на прикладі реальної ЕМ засвідчила його ефективність, щодо зниження втрат електроенергії та підвищення показників якості електроенергії. Отримані результати підтверджують практичну значущість та ефективність розробленої методики, що може бути використана при модернізації розподільчих електричних мереж для забезпечення їх стабільної та енергоефективної роботи.

У *п'ятому розділі* було сформовано поетапну та систематизовану стратегію модернізації електричних мереж на основі результатів, отриманих у попередніх розділах дослідження. Стратегія об'єднує ключові аспекти - оптимізацію топології, врахування впливу ВДЕ та раціональне розміщення КУ – у цілісну концепцію технічного розвитку ЕМ. Результати моделювання в середовищі PowerFactory підтверджують ефективність розробленого підходу на прикладі реальної ЕМ.

У *висновках* наведено основні результати роботи щодо вирішення поставлених задач дослідження.

Список використаних джерел із 110 найменувань достатньо охоплює предметне поле дослідження і певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості іноземних та вітчизняних інформаційних джерел.

У додатках наведені основні результати дисертаційного дослідження та інформація щодо практичного впровадження результатів дисертації.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення і результати дисертаційних досліджень, відображено у 11 наукових публікаціях: 5 статей у наукових періодичних фахових виданнях України категорії «Б»; 6 у матеріалах апробаційного характеру, з яких 1 проіндексована у Міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science.

Зазначене вище дозволяє стверджувати, що дослідження, представлені у дисертаційній роботі Кузнецова Д.С. є достатньо висвітленими, виконаними самостійно. У працях написаних в співавторстві зазначено особистий внесок здобувача, який відповідає його дисертаційним дослідженням.

Академічна доброчесність

Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків здобувача. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

По дисертаційній роботі Кузнецова Д.С. є зауваження:

1. З тексту дисертації не зрозуміло, в яких саме одиницях приведені величини в зваженій функції цілі ?
2. З тексту дисертації не зрозуміло, в яких саме режимах роботи розглядаються ВДЕ в дисертаційній роботі ?
3. Чому саме метод послідовного перебору варіантів, був обраний для оптимізації пошуку місць для інтеграції ВДЕ?

4. У розділі 2, Ви описуєте процес оптимізації розімкнення ліній, чи розглядалися ситуації, коли точка оптимального поточкорозподілу активної та реактивної потужності може не збігатися?

5. Як саме у Ваших моделях враховувався режим роботи ВДЕ при змінних погодних умовах, наприклад, раптове падіння потужності?

6. У розділі 3, Ви зазначаєте зміну реактивних навантажень при підключенні ВДЕ. Як у Вашій моделі враховується тип інвертора ВДЕ, з можливістю регулювання $\cos\phi$ чи без нього?

7. У розділі 4.2, представлено результати для варіантів встановлення КУ. Як здійснювався вибір конкретних потужностей КУ у кожному варіанті ?

8. З тексту дисертації не зрозуміло, як для ф. 2.10, на стор. 64 знаходиться завантаженість ліній?

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Кузнецова Дмитра Сергійовича «Підвищення енергоефективності електричних мереж з відновлюваними джерелами живлення за рахунок використання організаційних та технічних заходів» є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу та полягає в підвищенні енергоефективності електричних мереж з ВДЕ шляхом застосування комплексного підходу, який включає організаційні та технічні заходи. Для досягнення цієї мети були успішно вирішені ключові задачі, зокрема: проведено ґрунтовний аналіз втрат електроенергії в мережах, досліджено вплив ВДЕ на параметри електропостачання, удосконалено методи оптимізації топології мереж та вибору оптимальних місць підключення ВДЕ і конденсаторних установок, а також розроблено поетапну стратегію модернізації мереж із застосуванням багатокритеріальної цільової функції. Запропоновані підходи підтверджені комп'ютерним моделюванням та експериментальними дослідженнями, що свідчить про їх наукову новизну та практичну значимість для підвищення ефективності та стабільності роботи розподільчих електричних мереж в умовах зростаючої інтеграції ВДЕ.

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та наявну практичну значимість вважаю, що дисертаційна робота Кузнецова Дмитра Сергійовича «Підвищення енергоефективності електричних мереж з відновлюваними джерелами живлення за рахунок використання організаційних та технічних заходів» відповідає спеціальності 141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка, відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам 6, 7, 8, 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44, а здобувач Кузнецов Дмитро Сергійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 – Електротехніка, електроенергетика та електромеханіка.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри електроенергетики

Національного технічного університету

«Дніпровська політехніка»

д.т.н., проф.



Юрій ПАПАЙКА

