

ВІДГУК

офіційного опонента

завідувача кафедри електроенергетики та систем управління

Національного університету «Львівська політехніка»,

доктора технічних наук, професора

Сегеди Михайла Станковича

**на дисертаційну роботу Цигана Павла Сергійовича на тему «Енергетична ефективність режимів розподільних мереж фотоелектричних станцій»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Світові тенденції та стратегії розвитку систем генерації електричної енергії спрямовані на досягнення принципів енергетичного переходу, низьковуглецевої чи кліматично нейтральної структури електрозабезпечення споживачів. Одними з найбільш розповсюджених джерел відновлюваної генерації є мережеві фотоелектричні станції (ФЕС). За встановленою потужністю фотоелектрична генерація в Україні складає майже 80% у загальній структурі відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕ), а сценарії розвитку систем генерації свідчать про перспективи подальшого зростання ФЕС.

Сонячні станції є відносно новими об'єктами енергетики для умов України, оскільки термін їх фактичної експлуатації в нашій країні переважно складає 5-10 років за регламентованого – 25 років. ФЕС є системами негарантованої потужності, а основними проблемами їх роботи вважається суттєва залежність від метеорологічних умов, систематична різко змінність процесу генерації протягом добового проміжку та за сезонами року, викликаних зміною інсоляції. У теперішній час відсутній необхідний досвід щодо особливостей та основних проблем роботи електротехнічного комплексу ФЕС у порівнянні з класичними розподільними мережами систем електропостачання. У роботі, на підставі узагальненого досвіду та проведених

досліджень проблематики роботи традиційних мереж, автором встановлено закономірності та принципи підвищення енергетичної ефективності режимів розподільних мереж для специфічного об'єкту, яким є ФЕС. Зокрема, з урахуванням особливостей реальних режимів генерації ФЕС, вичерпного переліку значущих факторів, специфічної електромагнетної обстановки, яка формується режимом роботи інверторних перетворювачів, автором розроблено методологічні підходи щодо вибору раціональних параметрів потужності силових підвищувальних трансформаторів та типорозмірів кабельних ліній електропересилання. Це дозволить більш обґрунтовано виконувати вибір основного обладнання розподільної мережі ФЕС вже на етапі проектування та сприятиме зниженню капіталовкладень у відповідні комплекси.

Наведена аргументація свідчить про актуальність теми дисертаційної роботи Цигана П.С., яка є важливою для забезпечення сталого та ефективного розвитку енергетики України.

2. Структура та зміст основних положень дисертаційної роботи

За структурою та змістом представлена дисертаційна робота є добре структурованою. Матеріал викладено лаконічно, чітко, формулювання відповідають загальноприйнятій термінології в галузі електричної інженерії.

Отримані положення, наукові та практичні результати, узагальнення і висновки повністю відповідають темі роботи та її меті, розкривають суть вирішеної наукової задачі та завдань дослідження.

У **вступі** автором докладно обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено основну проблематику експлуатації ФЕС. Наведено значний перелік науково-дослідних робіт, виконаних за участі автора за напрямком кваліфікаційної роботи, сформульовано наукову задачу дослідження. Здобувачем визначено мету, об'єкт, предмет дисертаційної роботи, описано методи дослідження та основні допущення, прийняті у роботі, наведено вичерпний логічний перелік локальних задач кваліфікаційної роботи. Автором сформульовано наукові положення, що винесені на захист, наукові та практичні результати та їх новизну. Аналіз матеріалів апробації результатів

дисертації дозволяє зробити висновок, що вони достатньо висвітлені у публікаціях автора та науково-технічних конференціях.

Особистий внесок здобувача свідчить про високий ступінь самостійності під час виконання дослідження та отримання основних результатів.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 142 сторінках машинописного тексту, ілюстрованого 37 рисунками. Робота містить 12 таблиць, перелік посилань із 42 найменувань на 5 сторінках. Також наявні два додатки у вигляді актів впровадження результатів дисертаційної роботи.

Перший розділ «Проблеми та особливості режимів розподільних мереж ФЕС» присвячений аналізу проблематики та тенденцій розвитку систем електрозабезпечення в Україні з акцентами на зростання обсягів встановленої потужності та обсягів генерації ФЕС. Автором виконано дослідження та аналіз режимів генерації електричної енергії на прикладі реальних ФЕС, а також особливості завантаження обладнання їх розподільних мереж. Запропоновано основні шляхи підвищення енергоефективності режимів розподільних мереж ФЕС з урахуванням принципів їх структурної побудови, поставлено відповідні задачі дослідження. Визначено гіпотезу щодо основних причин завищення номінальних параметрів обладнання під час проектування ФЕС з урахуванням досвіду отриманих результатів для обладнання традиційних розподільних мереж, що висвітлено у публікаціях автора.

Другий розділ «Електромагнітна сумісність режимів роботи ФЕС» присвячений дослідженню параметрів режиму інверторних перетворювачів ФЕС з урахуванням нестаціонарності генерації електричної енергії. Встановлено закономірності зміни спектрального складу та рівнів вищих гармонік струму (ВГС), що створюються мережевими інверторами, їх вплив на електромагнетну обстановку в системах електропостачання ФЕС. Обґрунтовано математичну модель інтегрального коефіцієнта електромагнетної обстановки з метою його врахування під час вибору обладнання розподільної мережі ФЕС та оцінки додаткових втрат електричної енергії в її елементах. Запропоновано спосіб довантаження інвертора з метою покращення електромагнетної

обстановки, наведено апаратну частину, схемотехнічне рішення та алгоритм роботи такої системи.

Третій розділ «Підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу ФЕС» присвячено вирішенню задачі вибору раціональних параметрів основного обладнання розподільних мереж ФЕС – трансформаторного парку та кабельних ліній електропересилання змінного струму. З урахуванням фактичних параметрів режимів роботи ФЕС автором запропоновано універсальні методологічні підходи щодо вибору раціональної потужності підвищувальних трансформаторів та типорозмірів ліній електропересилання з урахуванням обґрунтованого переліку значущих факторів та унікальної електромагнетної обстановки, що створюється інверторними перетворювачами. Проведено розрахунки та оцінку відпрацювання ресурсу трансформаторами в умовах реальної експлуатації з визначенням коефіцієнта запасу за активною потужністю, що дозволить ефективно використовувати їх за навантажувальною здатністю та уникати надмірного перевищення строків експлуатації.

Четвертий розділ «Техніко-економічне обґрунтування рішень підвищення енергоефективності режимів розподільних мереж ФЕС» містить необхідні розрахунки щодо оцінки додаткових втрат електричної енергії для досліджуваної мережевої ФЕС з урахуванням електромагнетної обстановки. Також наведено приклад застосування методологічного підходу щодо вибору раціональної трансформаторної потужності для сонячної станції.

Висновки демонструють узагальнення, систематизацію та конкретизацію отриманих результатів у дисертаційній роботі, а також їх впровадження в реальному секторі – проєктній організації та освітньому процесі.

Список використаних джерел та посилань на них у тексті дисертації свідчить, що під час роботи було проаналізовано достатню кількість результатів наукових досліджень за темою дисертації.

Таким чином, можна зробити висновок, що за змістом, структурою, оформленням дисертаційна робота Цигана П.С. повністю відповідає вимогам МОН України та предметній області спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

3. Наукова новизна положень, висновків та результатів дисертаційної роботи

Опрацювання матеріалів дисертаційної роботи Цигана П.С. дозволило проаналізувати наукові положення та результати, практичні результати, висновки та їх новизну.

У роботі обґрунтовано такі наукові положення:

1. Раціональне значення розрахункової потужності силових трансформаторів електротехнічного комплексу фотоелектричної станції з урахуванням особливостей генерації електричної енергії протягом року під час зміни інсоляції знаходиться на інтервалі, обмеженому коефіцієнтами теплової інерції та електромагнетної обстановки в діапазоні 0,6...0,9 від нормативного значення.

2. Амплітуди вищих гармонік струму мережевих інверторів ФЕС у динамічному режимі роботи із завантаженням до 50% від номінального змінюються гіперболічно, обернено рівню завантаження перетворювача.

Новизна отриманих положень полягає у комплексному врахуванні вичерпного переліку значущих факторів, що впливають на режим завантаження основного електрообладнання розподільних мереж ФЕС в специфічних умовах генерації електричної енергії та електромагнетної обстановки, що дозволяє підвищити ефективність експлуатації устаткування шляхом раціонального вибору відповідних номінальних параметрів.

Встановлення характеру та математичний опис залежності зміни амплітуд вищих гармонік струму (ВГС) у діапазоні завантаження інвертора до 50% від номінального, яке тривалий час спостерігається для специфічного режиму ФЕС дозволяє оцінити додатковий електромагнетний збиток та вплив ВГС на завантаження обладнання в стаціонарному та динамічному режимах.

Відповідні положення та їх новизна підтверджуються отриманими науковими результатами, які чітко виписані у роботі (стор. 17-18).

Практичні результати також достатньо обґрунтовані (стор. 19-20), а одним із найважливіших з них є впровадження удосконаленої методики вибору

раціональної потужності трансформаторів та типорозмірів ліній електропередавання в одній з провідних організацій в контексті розробки проєктних рішень для ФЕС – ТОВ «ЕДС Проєкт».

Висновки до дисертаційної роботи є добре сформульованими, підтверджують отримані наукові і практичні результати, кількісно та якісно їх характеризують (стор. 132-135).

4. Методи дослідження, використані в дисертаційній роботі

Під час виконання досліджень використовувались теоретичні та експериментальні методи, а також математичне моделювання об'єктів фотоелектричних станцій з використанням програмних продуктів, методи математичної статистики та обробки експериментальних даних, математичний апарат перетворення Фур'є; стандартні методики розрахунку режимів роботи електричних мереж; існуючі методики оцінки електромагнетної сумісності в системах електропостачання.

5. Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами

Дослідження за темою дисертації виконано відповідно до планів науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка». Автор приймав участь у якості виконавця у 9-ти НДР, основними з яких доцільно виділити такі: «Оцінка електромагнетної сумісності систем електропостачання шахт в умовах потужних нелінійних навантажень та діагностика технічного стану і підвищення ефективності шахтних вентиляторних та підйомних установок» (науковий керівник - академік НАН України, д.т.н, проф., Півняк Г.Г., госпдоговір № 984-ПУ-ШУГК/030101- 19 від 02.05.2019р.); ГП-508 «Методи та засоби енергоефективного розподілу та споживання електроенергії на основі концепції «Smart grid» (2021-2022 рр.) (№ держреєстрації 0115U002296), «Дослідження поточних та аналіз очікуваних параметрів режиму роботи системи електропостачання водовідливної установки за умови її живлення від дизельного генератора: оцінка необхідної структури, параметрів, вимог, умов

для ВСП «Шахтоуправління ім. Героїв Космосу» ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ»» (2023 р., №072266-23) – три роботи; «Визначення електромагнетної сумісності елементів приводу головної вентиляційної установки ВРПД - 4.5 СМ шахти ім. героїв космосу ВСП "Шахтоуправління імені Героїв Космосу" ПрАТ "ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ"» (2023 р., №0722272); «Дослідження поточних та аналіз очікуваних параметрів режиму роботи системи електропостачання підйомної установки ЦРбч3,2/0,5_за умови її живлення від дизельного генератора через підвищувальний трансформатор: оцінка необхідної структури, параметрів, вимог, умов та обмежень і технічних рішень в системі електропостачання щодо забезпечення стабільної роботи установки для ВСП ШУ «Тернівське» шахта Західно-Донбаська» (2023 р., №0722281); «Дослідницькі послуги щодо вимірювання показників якості електричної енергії для об'єкта системи електропостачання» (2023 р., №0722283).

6. Повнота викладу положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи в опублікованих наукових працях

В опублікованих наукових працях автора відображена наукова новизна роботи, висвітлено основні положення та результати. Наукова новизна є достатньою для дисертації доктора філософії.

Основні положення і результати роботи опубліковані у 19 друкованих працях, з них 9 – статті у фахових виданнях (у тому числі 1 – у виданнях, які включено до наукометричної бази Scopus, 2 – до наукометричної бази Index Copernicus), 9 – матеріали наукових конференцій. Аналіз публікацій дозволив встановити їх відповідність темі кваліфікаційної роботи та основним результатам, що наведені в дисертації.

Таким чином, можна зробити висновок, що в опублікованих здобувачем наукових працях висвітлено основні положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи у повному обсязі.

Основні матеріали і результати, отримані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на науково-технічних конференціях.

Кількість та обсяг друкованих робіт за темою дисертаційної роботи відповідають вимогам щодо публікації основного змісту дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

7. Зауваження до дисертаційної роботи та дискусійні положення

В цілому, дисертаційна робота Цигана П.С. за рівнем вирішення наукової задачі, змістом та отриманими науковими і практичним результатами формує позитивне враження.

Проте, на підставі детального вивчення матеріалів роботи, доцільно зазначити певні недоліки:

1. У першому розділі доцільно було б більшу увагу приділити аналізу досліджень і публікацій вітчизняних науковців, які займаються питаннями та проблематикою режимів фотоелектричних станцій та їх інверторних перетворювачів.

2. У роботі отримано закономірності зміни електромагнетної обстановки, що створюється мережевими інверторами ФЕС, запропоновані методологічні підходи щодо прийняття раціональних параметрів обладнання розподільних мереж ФЕС, визначені як універсальні. З тексту роботи незрозуміло, які коригування необхідно виконати і чи працюватимуть відповідні методики та підходи для гібридних чи автономних фотоелектричних станцій.

3. Автором запропоновано спосіб довантаження інверторних перетворювачів, схемотехнічне рішення та апаратну частину реалізації відповідної системи (розділ 3). Проте, у техніко-економічному обґрунтуванні (розділ 4) виконано лише розрахунок додаткових втрат електричної енергії та потенціал їх зниження за умови застосування відповідного способу, і відсутня оцінка капіталовкладень у систему довантаження інверторів.

4. На рисунку 1.10 (стор. 48) наведено однолінійну ієрархічну схему електротехнічного комплексу ФЕС та розподільної мережі системи видачі потужності. Переважно, результати, отримані в роботі, стосуються ФЕС, які не мають у своєму складі 3-го ієрархічного рівня (головна підвищувальна підстанція 35-220 кВ з повітряними/кабельними лініями видачі потужності в

мережу ОСР/ОСП). Тому виникає питання чи справедливі наведені у роботі результати для обладнання розподільних мереж ФЕС на 3-му рівні і які особливості мають додатково бути враховані під час вибору раціональних параметрів відповідного устаткування.

5. У розділі 4 автором надано порівняльну оцінку втрат електричної енергії, розрахованих за методом графічного інтегрування для трьох варіантів режиму роботи ФЕС «Межеріч» потужністю 7 МВт. Доцільно було б окремо, більш детально надати однолінійну схему, технічні характеристики обладнання, втрати у якому аналізуються, зокрема – параметри ліній електропересилання, оскільки у роботі зазначено тільки типи трансформаторного устаткування відповідної ФЕС.

6. Зауваження щодо оформлення: у роботі, представленій для ознайомлення, містяться деякі технічні та стилістичні огріхи. Перелік посилань оформлений з певними неточностями, деякі джерела є застарілими.

Зазначені зауваження та рекомендації не впливають на обґрунтовані здобувачем Циганом П.С. результати, їх наукову та практичну цінність, а можуть бути використані під час подальшого розвитку напряму досліджень.

8. Загальна оцінка дисертаційної роботи, її відповідність існуючим вимогам та висновки

Дисертаційна робота здобувача Цигана Павла Сергійовича на тему «Енергетична ефективність режимів розподільних мереж фотоелектричних станцій» є завершеною науковою роботою.

За змістом робота відповідає темі, поставленій меті завданням дослідження, результати вирішення яких представлено у необхідному обсязі. Наукові положення та результати роботи, які виносяться на захист, містять наукову новизну та володіють реальною практичною значимістю.

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу, яка полягає у підвищенні енергоефективності режимів фотоелектричних станцій шляхом встановлення закономірностей впливу вищих гармонік струму, викликаних нестационарними режимами роботи мережевих інверторів з урахуванням

специфічного характеру графіків генерації, на режими роботи та ефективність вибору обладнання розподільної мережі, що дозволяє забезпечити раціональні параметри електротехнічного комплексу, зниження втрат електроенергії та електромагнетного збитку.

Дисертація відповідає предметній області спеціальності 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та вимогам «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у вищих навчальних закладах (наукових установах)», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року №261 (зі змінами), «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44 (зі змінами), а її автор – Циган Павло Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри
електроенергетики та систем управління
Національного університету
"Львівська політехніка", д.т.н., професор



Михайло СЕГЕДА

Підпис Михайла СЕГЕДИ, затверджено
Вчений секретар
Національного університету
"Львівська політехніка", д.т.н., доцент




Роман БРИЛИНСЬКИЙ