

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Шелеста Дмитра Андрійовича

на тему «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 – Електрична інженерія,

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми дисертації.

Порівняно з традиційною енергетикою, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) мають низку переваг, зокрема, зниження екологічного навантаження енергетичної галузі, широке розповсюдження та практично невичерпні запаси первинної енергії, і, як наслідок, можливість реалізації розосередженої інфраструктури енергогенерування. Остання перевага особливо актуальна для України, оскільки по-перше, дає змогу створити енергосистему, менш вразливу до ворожих атак, а по-друге, наблизити джерела енергії до її споживачів збільшивши надійність та енергоефективність системи в цілому. Тому розвиток енергосистем з високою часткою ВДЕ є ключовим моментом забезпечення їх сталого розвитку.

Однак через нестабільність та складну прогнозованість відновлюваних джерел енергії, зокрема інсоляції на поверхні фотоелектричних панелей, вітрового потенціалу на висоті роторів вітрових електростанцій, генерування таких електростанцій характеризується суттєвою невизначеністю. Таким чином, енергосистеми зі значною часткою ВДЕ можуть бути вразливими до впливу коливань енергогенерування. Останні можуть спричиняти масштабні відключення від мережі, тобто загрози для надійності й економічної роботи енергосистеми, і, як наслідок, до значних економічних і соціальних втрат, що ми вже спостерігали в Австралії та у Великій Британії. Крім того, збільшення

кількості ВДЕ, які містять інверторне обладнання, може спричиняти погіршення якості електричної енергії у електричних мережах енергосистем.

Вирішенню проблеми надійності енергосистем з ВДЕ приділено значну увагу. Запропоновано низку методів та засобів зменшення негативного впливу невизначеності первинних енергетичних потоків, зокрема вдосконалення методів їх прогнозування, застосування різноманітних накопичувачів електроенергії. Проблема якості електроенергії таких систем досліджена менше. Відомі результати дозволяють стверджувати, що рівень негативного впливу фотоелектричних станцій (ФЕС) визначається не лише параметрами інверторів та потужностями енергетичних установок, але й якістю електроенергії у розподільних мережах, яка часто не відповідає вимогам до профілю напруги, до симетрії струмових навантажень, а також до гармонічного складу напруги. Крім того, прослідковується чітка залежність між рівнем навантаженості електроустановки та погіршенням параметрів якості електроенергії на її вводах. Так у режимах низької інсоляції (осінньо-зимових період) інвертори фотоелектричних станцій можуть спричиняти погіршення профілю напруги у електричних мережах та підвищення коефіцієнта гармонік у вихідній напрузі.

Вирішити цю проблему шляхом зміни компонування ФЕС складно з економічних міркувань, оскільки необхідно ускладнювати головну схему станції для усунування наслідків недосконалості обладнання, зокрема мережевих інверторів. Усунування причин такої недосконалості потребують проведення ґрунтовних досліджень на рівні фізичних процесів та законів керування основного обладнання мережевих фотоелектричних станцій.

Таким чином, тематика дисертаційного дослідження Шелеста Дмитра Андрійовича, що присвячене підвищенню якості електроенергії в місці приєднання фотоелектричної станції до розподільних мереж шляхом удосконалення систем керування напівпровідниковими перетворювачами станції, є актуальною.

Актуальність роботи підтверджується включенням її до програми наукових досліджень кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «ХПІ» в

рамках науково-дослідної роботи за темою: «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (ДР №0121U109440), де здобувач був виконавцем окремих розділів дослідження.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Дисертаційна робота Шелеста Д. А. виконана на достатньо високому науковому рівні. Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень і висновків є достатньою та підтверджується проведенням комплексних досліджень із застосуванням відомих теоретичних та експериментальних методів, збігом результатів теоретичних досліджень з результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень. За основу дослідження автором обрано досягнення та здобутки вітчизняних і зарубіжних вчених в теорії автоматичного керування, теорії моделювання, теорії сигналів. Висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані завдяки коректному використанню математичного апарату та моделюванню з використанням результатів натурних експериментів.

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується проходженням апробації основних положень дисертаційного дослідження Шелеста Д. А. на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях, а також наукових семінарах НТУ «ХП».

Аналіз дисертаційної роботи дає змогу зробити висновок, що її автор провів ґрунтовне вивчення та узагальнення літературних джерел, дослідив проблему якості напруги у розподільних мережах з фотоелектричними станціями (ФЕС), вивчив особливості функціонування ФЕС на рівні їх апаратного забезпечення, а також достатньо глибоко дослідив методи керування DC/DC-перетворювачами та інверторним обладнанням.

Дисертаційна робота Шелеста Д. А. є особистим здобутком автора та містить переконливі наукові положення й висновки.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Набув подальшого розвитку метод неперервного контролю точки максимальної потужності сонячних панелей за напругою (Percentage of open circuit voltage), що проявляється у визначенні максимальної вихідної напруги узгоджувальних перетворювачів за фіксованого значення вихідного струму, та дає змогу спростити систему керування узгоджувальними перетворювачами фотоелектричної станції та її апаратну реалізацію.

2. Запропоновано новий метод компенсаційного керування групою узгоджувальних перетворювачів фотоелектричної станції, який полягає у взаємній синхронізації каналів керування окремих узгоджувальних перетворювачів в системі відбору потужності та, на відміну від відомих методів, забезпечує взаємну компенсацію пульсацій напруги від перетворювачів в ланці постійного струму фотоелектричної станції. Цим досягається підвищення якості електроенергії, що віддається до електричних мереж енергосистеми.

3. Набув подальшого розвитку метод частотно-адаптивного керування мережевим інвертором напруги фотоелектричної станції, що проявляється у коригуванні частоти комутацій силових транзисторів зворотно-пропорційно зниженню вхідного струму, та дає змогу покращити гармонічний склад струму, що віддається станцією до електричних мереж енергосистеми в режимі зниження інсоляції.

4. Набув подальшого розвитку метод керування трифазним інвертором струму з синусоїдальною ШІМ, що проявляється у врахуванні значень фазних струмів електричної мережі, та дає змогу зменшити пульсації потужності у ланці постійного струму інвертора на 50 % під час роботи фотоелектричної станції на трифазну мережу зі значною несиметрією напруги. Як наслідок, на 60 % зменшується коефіцієнт нелінійних спотворень струмів у електромережах порівняно з системами керування інвертором, які не враховують несиметрію напруг у мережах.

5. Набув подальшого розвитку метод визначення параметрів LC фільтра

інвертора напруги автономної фотоелектричної станції, що проявляється у врахуванні частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струм силових ключів, а також вимог щодо коефіцієнта гармонічних спотворень вихідної напруги, та дає змогу обмежити пускові струми інвертора та забезпечити заданий рівень несинусоїдності напруги у локальних мережах.

Отже, наукове завдання дисертаційної роботи виконане у повному обсязі. Здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота Шелеста Дмитра Андрійовича повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та напрямкам досліджень відповідної освітньої програми НТУ «ХПІ».

У звіті щодо перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння зазначено, що вони складають 13,5%. Детальний аналіз аналогів показав, що основна маса з них, це текстові фрагменти з наукових та навчально-методичних публікацій здобувача, на які є посилання у тексті дисертації. Тож можна зробити висновок, що дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Зміст дисертації викладений грамотною інженерною мовою, послідовно та логічно. Усі сформульовані висновки і наукові положення базуються на результатах власних досліджень.

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 180 сторінок машинописного тексту. Дисертація містить 99 рисунків по тексту, 1 рисунок на 1 окремій сторінці, 13 таблиць по

тексту, 1 таблицю на одній окремій сторінці, списку використаних джерел з 123 найменувань на 13 сторінках, 3 додатки на 8 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складається із 158 сторінок.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено основні задачі наукового дослідження, наведено відомості щодо зв'язку роботи з науковими темами, щодо наукової новизни, практичної цінності, апробації та опублікування результатів наукових досліджень.

У *першому розділі* використовуючи літературні джерела та натурні експерименти досліджено залежності енергетичних параметрів сонячних електростанцій від інсоляції та температури, проаналізовано структурні схеми фотоелектричних станцій, а також структурні схеми їх основного обладнання, зокрема DC/DC-перетворювачів, MPP-трекерів та інверторів струму і напруги. Проаналізовано вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів щодо параметрів якості електричної енергії, зокрема щодо вмісту гармонічного складу струмів на шинах ФЕС у місці приєднання до розподільних мереж змінного струму. Сформульовано проблему та обґрунтовано задачі наукового дослідження.

У *другому розділі* проаналізовано типові структурні схеми внутрішніх мереж ФЕС, що забезпечують відбір, перетворення та передавання електроенергії від сонячних панелей до розподільних мереж енергопостачальних компаній. Досліджено схеми та особливості функціонування узгоджувальних DC/DC-перетворювачів, які забезпечують відбір максимальної потужності від сонячних панелей. Запропоновано математичну модель ВАХ сонячних панелей для різних рівнів інсоляції. Проаналізовано системи прямого визначення точки максимальної потужності (ТММ) та запропоновано вдосконалення методу непрямого визначення ТММ. Запропоновано новий метод компенсаційного керування DC/DC-перетворювачами ФЕС, що забезпечує зниження пульсацій напруги у мережах постійного струму та, як наслідок, покращує гармонічний склад струму на шинах приєднання ФЕС до розподільних мереж енергопостачальних компаній.

У *третьому розділі* наведено особливості роботи мережевих інверторів ФЕС в режимі зниження генерованої потужності внаслідок зменшення інсоляції. Сформульовано аналітичні умови для забезпечення нормативного значення коефіцієнта потужності на межі балансової належності ФЕС. Запропоновано вдосконалення методу керування мережевим інвертором струму, що дає змогу забезпечити відпуск електроенергії з шин ФЕС з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та нормативним вмістом вищих гармонік у струмах в місці приєднання ФЕС.

У *четвертому розділі* розроблено комп'ютерну імітаційну модель енергетичних процесів ФЕС з МРРТ та мережевим інвертором струму. Досліджено параметри якості електричної енергії, що віддається з шин ФЕС до розподільних електромереж. Встановлено, що для забезпечення нормативного рівня синусоїдності форми кривої струму на виході інвертора ФЕС у разі зниження інсоляції, необхідно знижувати амплітуду пульсацій в мережах постійного струму. Це забезпечується регулюванням величини вхідної індуктивності, або шляхом збільшення частоти комутації силових транзисторів. На підставі цих досліджень було запропоновано вдосконалення методу керування ШІМ інвертора. Результати комп'ютерного моделювання процесу передачі електроенергії від мереж постійного струму ФЕС інвертором напруги з ШІМ підтвердили покращення показників якості електроенергії в режимах значного зниження генерованої потужності в наслідок зміни погодних умов.

В *п'ятому розділі* досліджено режими роботи інвертора ФЕС, що працює в автономному режимі на виділене навантаження. Проаналізовано вимоги до якості напруги в локальних мережах та досліджено схемні рішення інверторів для їх забезпечення. Теоретично і на практичних дослідах показано, що для дворівневих інверторів напруги ФЕС з LC фільтром можливе виникнення значень пускових струмів, що можуть спричинити вихід з ладу силових транзисторів. Запропоновано вдосконалення методу визначення параметрів LC фільтра, що дає змогу завдяки врахуванню додаткових параметрів, обмежити пускові струми та забезпечити нормативні показники якості напруги.

Ефективність вдосконалення підтверджено комп'ютерним моделюванням та натурними експериментами.

У загальних висновках підведено підсумки щодо основних теоретичних та практичних результатів. Отримані результати відповідають поставленим задачам дисертаційного дослідження.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019).

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені в 7 фахових статтях, одна з яких індексується у наукометричній базі SCOPUS. Результати роботи апробовані на багатьох міжнародних конференціях, про що свідчать 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій. Новизна практичних результатів роботи щодо забезпечення якості електроенергії підтверджена патентом на корисну модель.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Невдалі вислови: «Визначені аналітичні залежності, що визначають залежності...», «параметри якості генерованої електричної енергії», «виконано розробку», «фотоенергетична система», «розкладання ряду Фур'є», «двоквадратних ключів», «статистичні втрати провідності», «джерело проти-ЕДС». Характеристики фотоелектричної панелі, приведені на рис. 1.5 не відповідають приведеним на попередніх рисунках. Останній пункт формулювання практичної цінності роботи майже повністю повторює останній пункт формулювання наукової новизни. Є помилки у позначеннях, наприклад «ДП, ДН та ДП» на стор. 68, а також невідповідність позначень, наприклад «СОС – ступеневий зворотний зв'язок».

2. У анотації та по тексту деякі вислови дуже загальні. Так автор стверджує, що визначив залежності, які описують вплив генерованої потужності ФЕС на показники якості електричної енергії. Але йдеться лише про вміст вищих гармонік, а не про всі показники якості. Те саме стосується методів покращання цих показників.

3. Під час опису методу непрямого вимірювання потужності панелі (стор. 70-72) автор обґрунтовано вказує на недолік, пов'язаний з необхідністю точних значень індуктивностей та ємностей, які під час промислового виготовлення зразка не можуть бути отримані. Далі автор вказує, що для застосування в контурі керування допускаються певні похибки цих параметрів: «Тому для застосування даного метода в розрахунках допускається невелике відхилення реальних значень параметрів L і C_d від фактичних». Однак не досліджено які саме значення похибки є допустимими.

4. У описі вибору ступеню зворотного зв'язку n автор після певних розмірковувань зазначає (стор. 76), що «Доцільним компромісом між цими факторами є значення n порядку 5». Однак ніде в тексті не наведено результатів обчислень чи експериментів, які б підтвердили це значення.

5. Формулювання об'єкту дослідження у анотації та основному тексті дисертації відрізняються. Формулювання в анотації більшою мірою відповідає спеціальності за якою захищається дисертація.

6. У пункті 1.3.3, що присвячений опису МРР-трекерів наведено лише один алгоритм пошуку точки максимальної потужності, який є найпоширенішим, але має суттєвий недолік (періодично відключає панель для уточнення характеристики потужності). Існує ще, принаймні 2 поширених алгоритми, які не мають такої необхідності, але автор про них не згадав.

7. У розділі 1.8 наведено опис результатів експериментів щодо впливу потужності, яка генерується сонячними панелями на гармонічний склад вихідної напруги мережевого інвертора Enphase IQ-60-2-INT та коефіцієнту потужності на його виводах змінного струму. У описі не вказано, які саме вимірювальні пристрої було застосовано для реєстрації параметрів та оброблення результатів.

8. В алгоритмі керування узгоджувальним перетворювачем (рис. 2.11) не вказано умови його завершення. На рис. 3.10 не вказано назви та одиниці вимірювання відображених величин.

9. Описані не всі змінні у формулах, наприклад у (2.23) не описано R_s , R_{sh} та ін. Відсутні посилання на деякі першоджерела, наприклад: «Вихідна потужність сонячної панелі (рис. 2.13) за відсутності пульсацій визначається рівнянням (2.23)». Це рівняння не було отримане у роботі, тому слід було вказати звідки його було взято. Автор використовує різні позначення однакових величин на рисунках і у формулах. Наприклад на рис. 2.14 напруга позначається U та V . А у формулах – U . У виразі (2.24) можливо помилка. У аргументі експоненційної функції пропущено заміну $U_{cell}=U_{mpp}\pm\Delta U$.

11. На стор. 88 наведено результати апроксимації ВАХ сонячних панелей за допомогою поліномів 5-го, 6-го ступеня. Зазначено, що «Ступінь поліномів в рівняннях (2.26) – (2.29) була обрана за критерієм максимальної відносної похибки апроксимації $<3\%$ ». Однак практика показує, що застосування поліномів вище 4-го ступеня погіршує стійкість отриманих моделей та підвищує вимоги до точності вимірювання вихідних параметрів (в даному випадку - напруги).

12. Не до кінця зрозуміло для яких саме ФЕС (за кількістю панелей та DC/DC-перетворювачів) призначено запропонований автором метод компенсації пульсацій напруги в ланці постійного струму шляхом синхронізації опорних ШІМ сигналів. Згідно (2.33) якщо кількість DC/DC-перетворювачів буде в межах 100, то їх системи контролю необхідно буде синхронізувати з точністю до мікросекунд, що може бути складно використовуючи незалежні таймери та враховуючи умови роботи обладнання. Якщо для панелей промислових ФЕС використовуються індивідуальні MPPT, то їх синхронізація додатково ускладнюється.

Вважаю, що висловлені зауваження не є критичними, не применшують загальну наукову та практичну цінність результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок щодо дисертаційної роботи

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Шелеста Дмитра Андрійовича на тему «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 – Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю цілком відповідає вимогам нормативних документів, зокрема п. 6 - 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 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 341 від 21.03.2022 та № 502 від 19.05.2023).

Здобувач Шелест Дмитро Андрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри електричних станцій
і систем Вінницького національного
технічного університету



Володимир КУЛИК

15 серпня 2024 року

Підпис *Володимир Кулик*
ПОСВІДЧУЮ
М.П. ЗВ. Кулик