

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцент Данильченко Дмитра Олексійовича

на дисертаційну роботу Шелеста Дмитра Андрійовича

на тему «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 Електрична інженерія, за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Детальний розгляд та аналіз роботи Шелеста Дмитра Андрійовича на тему «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити загальний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

1. Актуальність дисертаційної роботи

Тема підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями (СЕС) в режимі зниження генерованої потужності є дуже актуальною з кількох причин.

Збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальному енергетичному балансі веде до зниження стабільності мережі. Сонячні електростанції, як і інші ВДЕ, схильні до непередбачуваних змін у генерованій потужності через зміни погодних умов, що може негативно впливати на якість електричної енергії.

Коливання в потужності, що генерується СЕС, можуть викликати частотні та напругові відхилення в мережі, що призводить до зниження якості електричної енергії. Це вимагає впровадження технологій і методів, які допоможуть згладити ці коливання.

Сучасні системи управління енергетичними мережами та методи стабілізації роботи СЕС (наприклад, використання систем зберігання енергії, інверторних технологій, адаптивного управління) є важливою темою для дослідження та впровадження. Ці технології допомагають підтримувати стабільну роботу мережі навіть у режимі зниження генерованої потужності.

Підвищення якості електричної енергії дозволяє зменшити витрати на ремонт і обслуговування обладнання, а також мінімізує ризики перебоїв у постачанні електроенергії, що є важливим фактором для економіки країни.

Високоякісне управління електромережами з СЕС сприяє ефективнішому використанню відновлюваних джерел енергії, що зменшує залежність від викопних видів палива і знижує викиди парникових газів.

Таким чином, дослідження та впровадження рішень щодо підвищення якості електричної енергії в умовах зниження генерованої потужності СЕС є важливим для забезпечення надійної, стабільної та екологічно чистої роботи енергетичних систем.

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

Результати дослідження, що представлені в дисертаційній роботі отримані на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХП», відповідають науковим планам кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХП», закону України про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки від 11.07.2001 №2623-III (зі змінами, внесеними згідно із законом №1162-IX від 29.01.2021, №2031-IX від 01.02.2022, №2859-IX ві 12.01.2023) (Ст.3 п.3 енергетика ти енергоефективність).

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи за планом МОН України «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах». НДР №25/2-21Б, де здобувач був виконавцем окремих розділів.

3. Наукова новизна результатів

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження не викликає сумнівів та полягає в наступному:

- набув подальшого розвитку метод непрямого визначення точки максимальної потужності сонячних панелей, який відрізняється від відомих визначенням максимальної вихідної напруги узгоджувальних перетворювачів при фіксованому значенні вихідного струму, що дає можливість спростити системи керування фотоенергетичної системи, апаратну реалізацію системи керування узгоджувальними перетворювачами та знижує її вартість.;

- запропоновано метод компенсаційного керування узгоджувальними перетворювачами сонячних електростанцій, що реалізує взаємну синхронізацію каналів керування окремих узгоджувальних перетворювачів в системі відбору потужності та на відміну від відомих забезпечує взаємну компенсацію пульсацій напруги в ланці постійного струму сонячної електростанції від окремих узгоджувальних перетворювачів, що дозволяє досягти зниження пульсацій напруги в ланці постійного струму, чим досягається подальше покращення якості електроенергії генерованої до трифазної електричної мережі;

- запропоновано метод частотно-адаптивного керування мережевим інвертором напруги сонячної електростанції, який на відміну від відомих дозволяє забезпечити покращенні показники якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі в режимі зниження генерованої потужності;

- набув подальшого розвитку метод управління трифазним інвертором

струму з синусоїдальної ШІМ, який відрізняється від існуючих у корекції завдання фазних струмів мережі, що дозволяє знизити пульсації потужності у ланці постійного струму інвертора, при роботі ФЕС на потужності у ланці постійного струму інвертора, при роботі ФЕС на несиметричну трифазну мережу, на 50 % та коефіцієнт нелінійних спотворень мережних струмів на 60 % на відміну від систем управління, не враховують несиметрію мережних напруг;

- запропоновано метод визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги ФЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, який на відміну від існуючих дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струму ключів інвертора та вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Практичне значення отриманих результатів для електроенергетичної галузі полягає в наступному:

– розроблено методику розрахунку основних параметрів послідовної фотоенергетичної системи, що забезпечує передачу електричної енергії до трифазної електричної мережі;

– запропоновано методику компенсації пульсацій напруги у ланці постійного струму сонячної електростанції, що забезпечує покращення показників якості електричної енергії генерованої до трифазної електричної мережі;

– запропоновано методику керування мережним інвертором напруги ФЕС, що забезпечує підвищення показників якості електричної енергії в режимі зниженої генерованої потужності;

– розроблені імітаційні комп'ютерні моделі сонячних електростанцій, що дозволяють проводити дослідження показників якості електричної енергії,

проводити визначення втрат потужності в силових перетворювачах сонячних електростанціях, досліджувати та проводити аналіз роботи регуляторів та інші дослідження;

– розроблено методику визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги ФЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, яка дозволяє визначити параметри фільтра, з урахуванням частоти ШІМ модуляції інвертора, допустимого струму ключів інвертора та вимог параметрів якості вихідної напруги з коефіцієнтом гармонійних спотворень менше 5%.

Результати дисертаційної роботи використані на ТОВ «АКУТЕК» при розробці мережевих інверторів напруги та перетворювачів частоти з покращеними показниками якості вихідної напруги (акт про впровадження від 15.04.2024 р.) та в навчальному процесі на кафедрі «Передача електричної енергії» Національного технічного університету «ХПІ» (акт про впровадження 11.09.2023 р.).

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором

Наукові результати дисертації висвітлені у 16 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 6 у матеріалах апробаційного характеру, що входять до наукометричної бази даних Scopus, 1 патент України на корисну модель, 3 у матеріалах апробаційного характеру.

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

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

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 181 сторінка машинописного тексту. Дисертація містить 99 рисунка по тексту; 13 таблиць по тексту; список використаних джерел інформації з 107 найменувань на 13 сторінках; 3 додатки на 8 сторінках.

У *вступі* розкрито актуальність теми дисертаційної роботи, сформовано мету і задачі роботи. Наведено наукову новизну та практичні результати, що були представлені науковій спільноті на Українських і міжнародних конференціях та опубліковані у фахових виданнях з особистим внеском здобувача, про що свідчить наведений у Додатку А перелік публікацій.

У *першому розділі* проведено аналіз енергетичних характеристик сонячних електростанцій. Розглянуто залежність генерованої потужності сонячних панелей від рівня сонячної радіації та температури, а також досліджено процеси деградації сонячних панелей. Здійснено огляд різних конфігурацій сонячних панелей у складі електростанцій та напівпровідникових перетворювачів, які забезпечують максимальне використання потужності сонячних панелей та її передачу до трифазних електричних мереж. Проаналізовано вимоги до параметрів якості електроенергії згідно з національними та міжнародними стандартами, а також вимоги до емісії вищих гармонік струмів, що генеруються сонячними електростанціями. Описано проблему зниження якості електроенергії при зменшенні рівня генерованої потужності. Визначено завдання для подальших розділів роботи.

У *другому розділі* представлені структури сонячних електростанцій, що забезпечують передачу потужності від блоків сонячних панелей до трифазних електричних мереж на основі інвертора напруги та інвертора струму. Проведено дослідження роботи узгоджуючих DC/DC перетворювачів, які відповідають за відбір максимальної потужності. Було розроблено математичну модель ВАХ сонячних панелей та систему відбору максимальної потужності, реалізовану через DC/DC перетворювач. Запропоновано методи прямого та непрямого визначення точки максимальної потужності, яку можуть відбирати перетворювачі від сонячних панелей. Також запропоновано компенсаційний алгоритм керування узгоджуючими перетворювачами сонячної електростанції, який знижує пульсації напруги в ланках постійного струму, що живлять мережевий інвертор, що, в свою чергу, покращує якість електроенергії, що передається до трифазних електричних мереж.

У *третьому розділі* досліджено особливості роботи мережевих інверторів сонячної електростанції, які забезпечують передачу електроенергії до трифазних електричних мереж у режимі зниженої генерованої потужності. Запропоновано систему керування мережевим інвертором струму фотоелектричної електростанції, що дозволяє передавати електроенергію з коефіцієнтом потужності, наближеним до одиниці, та з формою струму, максимально близькою до синусоїдальної. Встановлено аналітичні залежності, які визначають якість генерованої електроенергії в залежності від рівня генерованої потужності. Розроблено методи покращення параметрів якості електроенергії в умовах зниження генерованої потужності.

У *четвертому розділі* розроблено комп'ютерну імітаційну модель, яка описує енергетичні процеси в сонячній електростанції з узгоджуючим перетворювачем та мережевим інвертором. Проведено дослідження якості електричної енергії, яку генерує сонячна електростанція і передає до трифазної електричної мережі. Встановлено аналітичні умови для досягнення коефіцієнта потужності, близького до одиниці, у режимі зниження рівня генерованої

потужності. Результати комп'ютерного моделювання процесу передачі електроенергії від сонячної електростанції на основі трифазного інвертора струму та інвертора напруги з ШІМ до трифазної мережі підтвердили досягнення високої якості електроенергії, навіть при зниженні генерованої потужності.

В *п'ятому розділі* досліджено мережевий інвертор фотоелектричної електростанції, що працює в режимі автономного живлення. Визначено вимоги до параметрів напруги, яку генерує сонячна електростанція, та проведено аналіз схемних рішень інверторів, які відповідають цим вимогам. Виявлено, що при використанні в фотоелектричних електростанціях дворівневого інвертора напруги та застосуванні LC-фільтра можливе виникнення пускового струму через заряд конденсатора фільтра, що може призвести до пошкодження силових транзисторів. Розроблено методику розрахунку LC-фільтра, яка дозволяє визначити параметри фільтра з урахуванням обмеження пускового струму та забезпечення необхідної якості вихідної напруги. Для підтвердження ефективності розробленої методики було проведено комп'ютерне моделювання та фізичні експерименти.

У *загальних висновках* здобувачем наведено основні теоретичні та практичні результати дослідження, які відповідають поставленим задачам дисертаційного дослідження.

Перелік з використаних джерел із 107 найменувань достатньо широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості іноземних та вітчизняних джерел.

Додаток містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

7 Достовірність отриманих результатів та висновків.

Для визначення параметрів якості напруги, генерованої мережевим інвертором, що працює в режимі автономного джерела живлення були проведені фізичні дослідження.

У ході досліджень було перевірено два варіанти навантаження стенда:

– трифазний асинхронний двигун 2А480В6ПАУ3 потужністю 1,5 кВт виробництва ТОВ «Дніпроресурс» (Україна), який у режимі низького моменту опору зумовлює струм навантаження 0,7...0,8 А (рис. 5.14, а);

– три реостати, з'єднані зіркою, з опором 40 Ом кожний (рис. 5.14, б).

Форма і гармонічний склад форми вихідної лінійної напруги трифазного інвертора було досліджено за допомогою осцилографа SIGLENT SDS1104X-E виробництва КНР. Осцилограф дає можливість проводити гармонічний аналіз форми вихідної напруги, проте інтегрального значення коефіцієнта гармонічних спотворень не визначає.

Результати досліджень підтверджують теоретичні положення.

8 Оформлення дисертації, дотримання вимог академічності та повного викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях.

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, а сама робота є закінченим дослідженням з суттєвими елементами наукової новизни, практичним значенням одержаних результатів і добре обґрунтованими висновками.

Наукові результати дисертації висвітлені у 16 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 у матеріалах апробаційного характеру, що входять до наукометричної бази даних Scopus, 1 патент України на корисну модель. Дисертант активно приймав участь в наукових конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.


1. Помилки у позначеннях, наприклад «ДП, ДН та ДП» на стор. 68, а також невідповідність позначень, наприклад «СОС – ступеневий зворотний зв'язок».
2. Алгоритм керування узгоджувальним перетворювачем описаний недостатньо детально, що ускладнює розуміння його роботи та можливу реалізацію на практиці.
3. Відсутнє порівняння розробленого алгоритму керування мережевим інвертором струму сонячної електростанції з вже існуючими алгоритмами.
4. У дисертації доцільно провести більш детальний аналіз похибок вимірювань значень індуктивностей та ємностей інвертору струму для підвищення точності отриманих результатів.
5. При проведенні фізичних досліджень (розділ 5.5) не вказано що було використано в якості джерела живлення (сонячна панель чи електрична мережа).
6. У тексті дисертації виявлені граматичні, орфографічні та стилістичні помилки, а також окремі формулювання є нечіткими та незавершеними, що може вплинути на зрозумілість викладеного матеріалу.

Слід зазначити, що зроблені зауваження не є принциповими і суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку роботи. Мета та задачі які поставив автор в дисертаційному дослідженні виконані у повній мірі.

10 Висновок

Вважаю, що дисертаційна робота Шелеста Дмитра Андрійовича на тему «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності» є завершеною науково-дослідною роботою. Виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність

теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в 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).

<p>Рецензент:</p>	
<p>доцент кафедри «Передача електричної енергії» НТУ «ХП» кандидат технічних наук, доцент</p> <p>М.П.</p>	<p> Дмитро ДАНИЛЬЧЕНКО</p> <p>« 16 » 08 2024 року</p>

Підпис Ю. І. Шевченко
 ЗАСВІДЧУЮ:
 ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
 НАЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
 «ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»



ШЕВ Ю. І.

02071180