

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцента Довгалюк Оксани Миколаївни
на дисертаційну роботу Шелеста Дмитра Андрійовича
«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 представленої на рецензію дисертаційної роботи Шелеста Дмитра Андрійовича на тему «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої потужності», що подана для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дозволяє 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

На сучасному етапі розвитку світова енергетика характеризується наявністю стійкої тенденції до збільшення використання відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергетика відіграє провідну роль, складаючи близько 4% в загальній структурі світової генерації і продовжуючи стрімко зростати. Ця тенденція обумовлена як екологічними питаннями, направленними на зниження викидів парникових газів та загального напрямку декарбонізації, так і суттєвими економічними перевагами, пов'язаними із суттєвим зниженням вартості будівництва сонячних електростанцій (СЕС) та собівартості отриманої від них електроенергії.

Україна закріпила шлях розвитку відновлюваної енергетики як пріоритетний напрямок для галузі на державному рівні і, завдяки значному потенціалу використання сонячної енергії та впровадженню привабливих інвестиційних програм, досягла значних успіхів у розвитку сонячної енергетики. Так до початку повномасштабного російського вторгнення на територію України у лютому 2022 року спостерігалось стійке зростання долі сонячної енергетики в структурі генеруючи потужностей, яка досягла 11% (понад 6120 МВт) і була представлена як побутовими установками, так і значною кількістю потужних промислових СЕС. Крім того в умовах війни розподілена генерація, яка забезпечується сонячною енергетикою, дозволяє забезпечити підвищення витривалості енергосистеми та надійності електропостачання споживачів завдяки створенню автономних і мобільних систем генерації електроенергії. Цей факт сприяє подальшому розвитку сонячної енергетики в Україні, який характеризується збільшенням як кількості СЕС, так і генерованої ними потужності.

За таких умов суттєво зростає вплив СЕС на режими роботи електричних мереж і енергосистеми України в цілому, що потребує впровадження відповідних заходів задля забезпечення необхідних режимних показників функціонування енергосистеми. Одним із важливих та істотних аспектів цього процесу є забезпечення відповідної якості електричної енергії, генерованої СЕС. Через значну залежність генерованої потужності СЕС від кліматичних умов, які характеризуються значною мінливістю та слабкою прогнозованістю, рівень генерації таких джерел може різко змінюватись. В умовах зниження генерованої потужності СЕС в електричній мережі суттєво погіршується якість електричної енергії, оскільки такий режим роботи СЕС супроводжується утворенням вищих гармонійних складових струмів та реактивної складової потужності, що, в свою чергу, зумовлює появу додаткових втрат потужності і призводить до зниження енергетичної ефективності роботи систем електропостачання. Для вирішення цієї проблеми доцільно запровадження заходів для зменшення спотворення синусоїдальності кривої струму в електричній мережі з СЕС.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, що направлена на розробку методів покращення якості електричної енергії, генерованої СЕС до електричних мереж є своєчасною та актуальною.

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

Результати представлених в дисертаційній роботі досліджень були виконані відповідно плану науково-дослідних робіт, які проводились на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках науково-дослідної роботи за темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (ДР №0121U109440), і відповідають закону України про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки від 11.07.2001 р. № 2623-III зі змінами, що внесені згідно із законів № 1162-IX від 29.01.2021 р., № 2031-IX від 01.02.2022 р. та № 2859-IX від 12.01.2023 р. (Ст.3 п.3 енергетика та енергоефективність).

3. Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна одержаних в дисертаційній роботі результатів обумовлена теоретичним узагальненням та новими запропонованими рішеннями важливого наукового завдання, яке полягає у розробці методів та засобів для підвищенні показників якості електричної енергії шляхом зниження долі емісії вищих гармонійних складових струмів та реактивної потужності до трифазних електричних мереж при зниженні генерованої потужності СЕС. До важливих наукових результатів досліджень відносяться наступні:

- подальший розвиток отримав метод непрямого визначення точки максимальної потужності сонячних панелей, що на відміну від існуючих дозволяє визначити величину максимальної вихідної напруги узгоджувальних перетворювачів при фіксованому значенні вихідного струму, надаючи можливість для спрощення системи керування фотоелектричної системи і

апаратної реалізації системи керування узгоджуючими перетворювачами, а також для зниження її вартості;

- вперше запропоновано метод компенсаційного керування узгоджуючими перетворювачами сонячних електростанцій, який дозволяє реалізувати взаємну синхронізацію каналів керування окремих узгоджуючих перетворювачів в системі відбору потужності, завдяки чому на відміну від існуючих методів забезпечує взаємну компенсацію пульсацій напруги в ланці постійного струму від окремих узгоджуючих перетворювачів СЕС, надаючи можливість зниження пульсацій напруги в ланці постійного струму;

- вперше запропоновано метод частотно-адаптивного керування мережевим інвертором напруги СЕС, відмінністю якого від існуючих є можливість покращення показників якості електричної енергії, що видається СЕС до трифазної електричної мережі в режимі зниження генерованої потужності;

- подальшого розвитку отримав метод управління трифазним інвертором струму з синусоїдальної ШІМ, який від існуючих відрізняється наявністю корекції завдання фазних струмів електричної мережі, що забезпечує зниження пульсації потужності у ланці постійного струму інвертора на 50 % та коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої струму на 60 % при роботі СЕС на несиметричну трифазну електричну мережу;

- вперше запропоновано метод визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги СЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, який дозволяє визначити параметри фільтра з урахуванням частоти ШІМ інвертора, допустимого струму ключів інвертора та вимог до параметрів якості вихідної напруги.

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

Практичне цінність отриманих в дисертаційній роботі результатів полягає в наступному: розроблена методика розрахунку основних параметрів послідовної фотоенергетичної системи дозволяє аналізувати режими роботи СЕС та трифазної

електричної мережі, до якої станція видає електричну енергію; запропонована методика компенсації пульсацій напруги у ланці постійного струму СЕС дозволяє забезпечити покращення показників якості генерованої станцією електричної енергії; використання розробленої методики керування мережевим інвертором напруги СЕС забезпечує підвищення показників якості електричної енергії в режимі зниження генерованої станцією потужності; використання розроблених імітаційних комп'ютерних моделей СЕС дозволяє досліджувати значення показників якості електричної енергії і режимних параметрів СЕС та електричної мережі, до якої вона видає потужність; використання розробленої методики визначення параметрів LC фільтра інвертора напруги СЕС, що працює в режимі автономного джерела живлення, дозволяє використовувати значення цих параметрів для забезпечення нормованих діапазонів показників якості електричної енергії в трифазних електричних мережах.

Результати дисертаційної роботи використані ТОВ «АКУТЕК» при розробці автономних інверторів напруги і перетворювачів частоти з покращеними показниками якості вихідної напруги, при роботі яких застосовується методика керування мережевим інвертором напруги, а при дослідженні параметрів - імітаційні комп'ютерні моделі СЕС, розроблені безпосередньо Шелестом Д.А. Крім того результати представленої дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «ХПІ» при навчанні здобувачів першого та другого рівня вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Відповідні акти про використання матеріалів дисертаційної роботи представлений у додатку Б дисертаційної роботи.

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

Наукові результати дисертаційної роботи висвітлені у 16 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 1 в науковому іноземному виданні, що

індексується у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection; 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 патент України на корисну модель; 8 публікацій у матеріалах апробаційного характеру, з яких 5 проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus. Таким чином, можна стверджувати, що наукові результати представленої дисертаційної роботи достатньою мірою висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

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

Дисертаційна робота Шелеста Д.А. є завершеною науковою роботою, яка складається з анотації (українською та англійською мовами), вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків.

Дослідження, представлені в дисертації, виконані за допомогою теорії електричних ланцюгів, методу гармонійного аналізу і рядів Фур'є. Отримані теоретичні результати перевірені імітаційним моделюванням з використанням комп'ютерних пакетів програм MATLAB і MathCad, а також шляхом експериментальних досліджень.

Об'єктом дослідження є електричні процеси у напівпровідникових перетворювачах, що використовуються для СЕС. Предметом дослідження є параметри якості електричної енергії, що виробляється СЕС в режимі зниженої генерації.

У вступі обґрунтована актуальність теми виконаного дослідження, визначені мета та задачі дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими темами, наведено дані про наукову новизну і практичне значення результатів виконаного дослідження, надано інформацію про опублікування, із зазначенням особистого внеску здобувача, та апробацію отриманих результатів, що були представлені науковій спільноті, що засвідчено наведеним у Додатку Б переліком публікацій.

У *першому розділі* проведено аналіз енергетичних параметрів СЕС при їх роботі в умовах змінних показників оточуючого середовища, комплектації та особливостей схемних рішень станцій, які впливають на процеси видачі потужності до трифазних електричних мереж. Проаналізовані вимоги вітчизняних та міжнародних стандартів, що регламентують параметри якості електричної енергії генерованої СЕС до електричних мереж. Обґрунтовано проблему погіршення якості електричної енергії виробленої СЕС в режимі зниження рівня генерованої потужності.

У *другому розділі* здобувачем виконаний аналіз структурних рішень СЕС для передачі потужності від блоків сонячних панелей до трифазних електричних мереж з використанням інверторів напруги та інверторів струму, а також проаналізовано специфіку сонячних панелей в якості об'єкта керування. Досліджено особливості роботи узгоджувачих DC/DC перетворювачів, що забезпечують процес відбору максимальної потужності від сонячних панелей. Розроблено математичну модель ВАХ сонячних панелей та систему відбору максимальної потужності, яка реалізується узгоджувачим DC/DC перетворювачем. Запропоновано метод непрямого визначення точки максимальної потужності, що може бути відібрана від сонячних панелей СЕС і визначається з особливостей роботи узгоджувачого DC/DC перетворювача. Розроблено компенсаційний алгоритм керування узгоджувачими DC/DC перетворювачами СЕС, який забезпечує зниження пульсацій напруги в ланках постійного струму СЕС, завдяки чому досягається можливість покращення якості електричної енергії генерованої до трифазних електричних мереж.

У *третьому розділі* досліджена специфіка роботи мережевих інверторів СЕС, що забезпечують видачу генерованої електричної енергії до трифазних електричних мереж, в режимі зниження генерації. Запропоновано метод керування мережевим інвертором струму СЕС, який дозволяє здійснювати передачу генерованої електроенергії з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та формою струмів близьких до синусоїдальних. З використанням цього

методу розроблено систему керування мережевим інвертором напруги СЕС, яка забезпечує можливість покращення показників якості електричної енергії та підвищення ефективності роботи СЕС в режимі зниження генерації.

У *четвертому розділі* здобувачем розроблені комп'ютерні імітаційні моделі СЕС, які враховують встановлені особливості енергетичних процесів досліджуваних СЕС з узгоджувачим DC/DC перетворювачем та мережевим інвертором. З використанням цих моделей проведено дослідження параметрів якості електричної енергії, генерованої СЕС до трифазної електричної мережі, та визначена умова реалізації близького до одиниці коефіцієнту потужності в режимі зниження рівня генерації СЕС. Результати проведеного моделювання процесу постачання електричної енергії від досліджуваної СЕС до трифазної електричної мережі в режимі зниження генерованої потужності довели ефективність запропонованого методу покращення показників якості електричної енергії.

У *п'ятому розділі* проведено дослідження мережевого інвертора СЕС за умови роботи в режимі автономного живлення. Визначено вимоги до параметрів напруги генерованої СЕС в досліджуваному режимі роботи та проведено аналіз схемних рішень інверторів, які забезпечують виконання зазначених вимог. Обґрунтовано, що для СЕС в режимі автономного живлення існують умови виникнення значного пускового струму, зумовленого зарядом конденсатора LC фільтра, який може спричинити вихід з ладу силових транзисторів мережі. Для забезпечення належних умов експлуатації СЕС розроблена методика розрахунку параметрів LC фільтра за критеріями обмеження пускового струму та забезпечення потрібних характеристик якості вихідної напруги. Проведені комп'ютерне моделювання та фізичні досліди довели доцільність та ефективність запропонованого рішення.

У *висновках* здобувачем представлено основні теоретичні та практичні результати проведеного наукового дослідження, які повністю відповідають поставленим задачам.

Список використаних джерел складається із 107 найменувань, які достатньою широко охоплюють досліджувану проблематику, а також певною мірою свідчать про опрацювання здобувачем значної кількості як вітчизняних, так і іноземних актуальних джерел інформації.

Додатки містить інформацію щодо повноти опублікування та практичного впровадження одержаних результатів виконаного дисертаційного дослідження.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

На підставі аналізу дисертаційної роботи можна стверджувати, що достовірність отриманих результатів забезпечується коректністю використання математичного моделювання, наукових положень та методів розрахунку параметрів режиму електричної мережі, енергетичних характеристик обладнання та показників якості електричної енергії, методів вирішення системи диференціальних і алгебраїчних рівнянь під час аналізу електромагнітних процесів. Достовірність наукових результатів підтверджується апробацією та їх схваленням на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях, а також впровадженням основних одержаних результатів та рекомендації.

Зроблені здобувачем висновки є логічними сформульованими за результатом ґрунтового аналізу досліджуваних процесів, здійсненого за допомогою сучасного наукового інструментарію.

8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності, отримані результати свідчать про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, використання ідей інших науковців без відповідних посилань на їх роботи не виявлено. Дисертаційна робота є закінченим дослідженням, яке

характеризується наявністю наукової новизни, практичного значення одержаних результатів і обґрунтованими висновками.

Наукові результати, отримані в дисертації, достатньою мірою висвітлені у 16 наукових працях здобувача, серед яких: 1 публікація в науковому іноземному виданні, що індексується у міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection; 6 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 8 публікацій у матеріалах апробаційного характеру; 1 патент України на корисну модель. Апробація ідей, запропонованих здобувачем у дисертаційному дослідженні, проводилась шляхом доповідей та обговорення основних положень та отриманих результатів дослідження на наукових конференціях, що підтверджено 8 тезами доповідей та матеріалами конференцій, з яких 5 проіндексовані у міжнародній наукометричній базі даних Scopus.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Слід відмітити наступні зауваження та дискусійні питання, що виникли до дисертаційної роботи:

1. При аналізі вимог українських і міжнародних стандартів щодо якості електричної енергії доцільно було розглянути стандарти ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2023, які діють в Україні і регламентують вимоги до якості електричної енергії у системах електропостачання загального призначення, до яких безпосередньо можуть видавати генеровану потужність досліджувані СЕС.

2. При дослідженні проблематики зниження параметрів якості електричної енергії, генерованої СЕС до електричних мереж в режимі неповної генерації, доцільно було надати більш детальний аналіз явищ, що мають місце в зазначених режимах роботи СЕС.

3. В дисертації проводиться дослідження роботи досить потужних СЕС, які потребують використання великих площ для встановлення сонячних панелей. В умовах складностей з виділенням земельних ділянок під забудову

СЕС можливі умови експлуатації панелей з частковим затемнення. З врахуванням цього факту доцільним було б виконати в роботі оцінку впливу часткового затемнення сонячних панелей на роботу алгоритму відбору їх максимальної потужності.

4. В якості узгоджуючих перетворювачів СЕС доцільно було б розглянути двоступеневі перетворювачі з м'якою комутацією, в зв'язку з тим, що вони мають менші динамічні втрати потужності та кращий ККД.

5. В роботі доцільно було б виконати розрахунок ККД перетворювальної частини СЕС при роботі з різними рівнями навантаження, оскільки це є важливим показником енергоефективності СЕС.

6. В роботі не представлені деякі важливі параметри моделювання в Matlab/Simulink, а саме припустимі значення відносної та абсолютної похибки моделювання, час дискретизації моделі та метод рішення диференціальних рівнянь, що описують процеси силової частини СЕС.

7. В розділі 4 роботи представлено результати моделювання, а саме результати гармонійного аналізу фазних струмів СЕС, генерованих до електричної мережі. При цьому не описано метод за яким проведено гармонійний аналіз.

8. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються пунктуаційні та орфографічні помилки, наявні деякі стилістичні неточності та незавершені формулювання, в деяких формулах відсутні позначення використаних змінних, що ускладнює їх сприйняття.

Зазначені зауваження не є принциповими і не впливають на загальне позитивне враження від роботи, не зменшують її якості, а також наукової цінності та практичної значущості одержаних в дисертації результатів.

10. Висновки

Дисертація Шелеста Дмитра Андрійовича «Підвищення якості електричної енергії в мережі з сонячними електростанціями в режимі зниження генерованої

потужності», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, є завершеною науково-дослідною роботою, яка не порушує принципів академічної доброчесності, містить науково обґрунтовані результати, має наукову новизну, практичну цінність та дає перспективи подальших досліджень. За своїм змістом дисертаційна робота відповідає галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Враховуючи актуальність теми, отримані наукові результати та практичну цінність вважаю, що дисертаційна робота 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).

Рецензент:

кандидат технічних наук,
доцент, професор кафедри
«Передача електричної енергії»

Оксана ДОВГАЛЮК

М.П. « 23 » серпня 2024 року



Підпис *доц Оксана Довгалюк*
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
" 23 " *серпня* 2024 р.

ЗЛАЦЕВ Ю. І.