

ВІДГУК

офіційного опонента

д.т.н. професора Гнатова Андрія Вікторовича

на дисертаційну роботу Шелеста Дмитра Андрійовича

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

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми дисертації.

На сьогоднішній день розвиток енергетичних систем світу має загальну направленість в сторону збільшення долі відновлювальної енергетики. Відновлювальні джерела енергії зменшують залежність економіки від коливань цін на паливо та його постачання та мають пріоритетну направленість. Серед альтернативних, відновлювальних джерел електричної енергії найбільш поширеними є сонячна та вітрова енергетика. Енергія сонця являється практично невичерпною, що створює обумовленості до розвитку фотоенергетичних систем (ФЕС). В Україні сонячна енергетика є відносно новою галуззю, яка стрімко розвивається. Слід відмітити, що практично вся територія країни придатна для розташування сонячних електростанцій. Найбільш сприятливими регіонами для розташування станцій є південні регіони.

Одним з важливих питань, що розглядається науковцями та спеціалістами в даній сфері, є покращення якості та кількості електроенергії, що генерується ФЕС. Обмеження вищих гармонік у фотоелектричних системах є важливим загальним аспектом якості електричної енергії. Згідно досліджень визначено, що при зниженні рівня генерації електричної енергії коефіцієнт гармонійних спотворень струму генерованого сонячним інвертором погіршується до 43%. Тобто, якість електроенергії, яка генерується сонячними електростанціями до трифазних електричних мереж, в режимі зниження сонячної радіації суттєво знижується та не відповідає вимогам вітчизняних та міжнародних стандартів. Актуальним є питання дослідження та розробки методів покращення якості

електричної енергії виробленої фотоенергетичними системами в режимі зниженої генерованої потужності.

З розвитком фотоенергетичних систем було розроблено велику кількість топологій перетворювальних систем, які відрізняються по ступеням перетворення енергії, втратами потужності, ККД та показниками якості електричної енергії. Напівпровідникові перетворювачі, які входять до даних структур діляться на типи за функціями, що виконуються, і розташуванню. Це потребує розвитку та систематизації методів проектування даних систем.

Тому тема дисертації, що спрямована на дослідження методів та алгоритмів покращення якості електричної енергії сонячними електростанціями до трифазних електричних мереж в режимі зниження генерованої потужності є безсумнівно актуальною.

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

Дослідження, результати яких викладені в дисертаційній роботі, виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт 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.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження 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 узгоджуючими перетворювачами та знижує її вартість;

- запропоновано метод компенсаційного керування узгоджуючими

перетворювачами сонячних електростанцій, що реалізує взаємну синхронізацію каналів керування окремих узгоджуючих перетворювачів в системі відбору потужності та на відміну від відомих забезпечує взаємну компенсацію пульсацій напруги в ланці постійного струму сонячної електростанції від окремих узгоджуючих 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 мережевих 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%.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг дисертації становить 158 сторінок основного тексту, з них: 99 рисунків по тексту; 1 рисунок

на 1 окремій сторінці; 13 таблиць по тексту; 1 таблиця на одній окремій сторінці; списку використаних джерел із 123 найменувань на 13 сторінках, 3 додатки на 8 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 180 сторінок.

Академічна доброчесність.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, що складає 13,5%, 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 181 сторінка машинописного тексту. Дисертація містить 99 рисунків 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 виконано аналіз енергетичних параметрів сонячних електростанцій: залежностей генерованої потужності сонячних панелей від сонячної радіації та температури, аналіз характеристик деградації сонячних панелей, проведено огляд конфігурацій сонячних панелей в складі сонячних електростанцій та напівпровідникових перетворювачів силових схем напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують процеси відбору

максимальної потужності сонячних панелей та передачу потужності до трифазних електричних мереж. Проведено аналіз вимог вітчизняних та міжнародних стандартів щодо вимог параметрів якості електричної енергії та вимоги до емісії вищих гармонік струмів, генерованих сонячними електростанціями до трифазних електричних мереж. Представлено проблему зниження якості електроенергії, генерованою сонячними електростанціями при зниженні рівня генерованої потужності. Поставлено завдання до наступних розділів.

У *другому розділі* запропоновано структури сонячних електростанцій, що забезпечують передачу потужності від блоків сонячних панелей до трифазних електричних мереж на базі інвертора напруги та інвертора струму. Досліджено роботу узгоджуючих DC/DC перетворювачів, що забезпечують режим відбору максимальної потужності. Синтезовано математичну модель ВАХ сонячних панелей та систему відбору максимальної потужності, що реалізується DC/DC перетворювачем. Запропоновано системи прямого та непрямого визначення точки максимальної потужності, що може бути відібрана перетворювачами від сонячних панелей. Запропоновано компенсаційний алгоритм керування узгоджуючими перетворювачами сонячної електростанції, що забезпечує зниження пульсацій напруги ланок постійного струму сонячної електростанції, яка є живлячою напругою мережевого інвертора, чим досягається покращення якості електроенергії генерованої до трифазних електричних мереж.

У *третьому розділі* виконано дослідження особливостей роботи мережевих інверторів сонячної електростанції, що забезпечують передачу електричної енергії в трифазні електричні мережі в режимі зниження генерованої потужності. Запропоновано систему керування мережевим інвертором струму фотоелектричної електростанції (ФЕС), що забезпечує передачу електроенергії з коефіцієнтом потужності близьким до одиниці та формою струмів близьких до синусоїдальних. Визначені аналітичні залежності, що визначають залежності параметрів якості генерованої електричної енергії від генерованої потужності. Запропоновано методи підвищення параметрів якості електроенергії в режимі зниження генерованої потужності.

У четвертому розділі виконано розробку комп'ютерної імітаційної моделі, що описує енергетичні процеси в сонячній електростанції з узгоджуючим перетворювачем та мережевим інвертором. Проведено дослідження параметрів якості електричної енергії, що генерується сонячними електростанціями до трифазної електричної мережі. Визначена аналітична умова реалізації коефіцієнту потужності близького до одиниці в режимі зниження рівня генерованої потужності. Отримані результати комп'ютерного моделювання процесу передачі електроенергії від сонячної електростанції на базі трифазного інвертора струму та інвертора напруги з ШІМ до трифазної електричної мережі підтвердили реалізацію високих показників якості електроенергії, генерованої до трифазної електричної мережі, в режимі зниження генерованої потужності.

В п'ятому розділі виконано дослідження мережевого інвертора ФЕС, що працює в режимі автономного живлення. Визначено вимоги, що пред'являються до параметрів напруги генерованої сонячної електростанції та проведено аналіз схемних рішень інверторів, що задовольняють вказані вимоги. Визначено, що при реалізації в ФЕС автономного живлення дворівневого інвертора напруги та застосування LC фільтра можливим є виникнення значення пускового струму, зумовленого зарядом конденсатора фільтра, що може спричинити вихід з ладу силових транзисторів мережі. Розроблена методики розрахунку LC фільтра, яка дозволяє визначити параметрів фільтра за критеріями обмеження пускового струму та забезпечення потрібної якості вихідної напруги. Для підтвердження розробленої методики виконано комп'ютерне моделювання та проведені фізичні досліді.

У загальних висновках здобувачем наведено основні теоретичні та практичні результати дослідження, які 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 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.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Неповній мірі проведено аналіз середньорічної сонячної радіації, інформація, що надана в розділі 1 має більш узагальнений вид.
2. Поліноміальна апроксимація ВАХ сонячних панелей виконується методом найменших квадратів. Не описано за яким критерієм обрано ступінь поліномів при апроксимації.
3. При розрахунках передавальних функції силовій частини мережевих інверторів ФЕС було б доцільно врахувати похибки і відхилення значень індуктивностей та ємностей в силовій схемі перетворювальної частини.
4. В роботі було б доцільно провести аналіз втрат потужності в силовій перетворювальній частині ФЕС та провести аналіз її ККД.
5. В роботі було б доцільно провести аналіз впливу запропонованої частотно-адаптивної ШІМ на динамічні втрати потужності в перетворювачі ФЕС.
6. В тексті дисертації присутні граматичні, орфографічні та стилістичні помилки, деякі формулювання є нечіткими та не завершеними. Крім того відсутні пояснення до деяких змінних в рівняннях, наприклад рівняння (4.3).

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Шелеста Дмитра Андрійовича «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 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).

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:

Завідувач кафедри Автомобільної
електроніки Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету,
доктор технічних наук, професор

 Андрій ГНАТОВ

М.П.

« 19 » 08 2024 року

ПІД ПИС *Гнатова А.*
ЗАСВІДЧУЮЧЕННЯ
СЕКРЕТАР НАУКИ

