

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Буратинського Ігоря Михайловича на тему:

«Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляційної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі», що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дослідження, її зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

В останні роки стрімко зростає світовий інтерес до збільшення використання відновлюваних джерел енергії, особливо це стосується сонячних електростанцій. Величезний ріст виробництва фотоелектричних модулів та зниження їх вартості, в поєднанні з підтримкою державних програм, зумовлює відповідне зростання кількості встановлених сонячних електростанцій у багатьох країнах світу, зокрема і в Україні.

Нерівномірність виробництва електричної енергії на сонячних електростанціях, що пов'язана зі зміною інтенсивності сонячного випромінювання протягом світлового дня, безпосередньо впливає на процес балансування енергетичної системи і вимагає забезпечення достатніх резервів маневреної генерації, чи введення обмежень на споживання-виробку електроенергії.

Для вирішення проблеми стабілізації електричної генерації та збільшення ефективності використання сонячної енергії, все більшої популярності набувають накопичувачі електричної енергії на базі акумуляторних батарей. За допомогою таких систем можливо зберігати надлишкову енергію, отриману в періоди максимальної інтенсивності сонячного випромінювання, і використовувати її в періоди зниженої генерації, що дозволяє знизити вартість електроенергії та забезпечити стабільну роботу енергосистеми.

При проектуванні сонячних електростанцій та систем акумулювання електроенергії, важливо враховувати сучасні ринкові умови, що передбачають конкуренцію між виробниками. Оцінка конкурентоспроможності електростанцій розподіленої генерації повинна проводитись на основі загальноприйнятих показників, до яких варто віднести середньозважену собівартість виробництва електричної енергії.

Використання загальноприйнятих підходів має недолік, який полягає у застосуванні коефіцієнта використання встановленої потужності для визначення прогнозних обсягів виробництва електроенергії, що не дає можливості провести точну оцінку конкурентоспроможності електростанцій в залежності від їх географічного розташування. Саме тому постає необхідність розробки принципово нового підходу для визначення оптимальних параметрів сонячної електростанції, який би враховував інтенсивність сонячного випромінювання.

Наявні моделі, що описують спільну роботу сонячних електростанцій з системами накопичення електричної енергії не дозволяють визначати потрібну ємність та потужність акумуляторних батарей, що забезпечували б їх економічно ефективну роботу з можливістю підтримки стабільної потужності генерації на заданому рівні. Таким чином обрана тема дисертації Буратинського І.М. є важливою та актуальною у сучасних ринкових умовах для забезпечення стабільного та ефективного функціонування сонячних електростанцій та систем зберігання енергії.

Підтвердженням актуальності обраної теми дисертаційної роботи Буратинського І.М. є те, що основні результати отримані при проведенні дослідження увійшли до звітів про наукові роботи, які виконувались в Інституті загальної енергетики НАН України, а саме «Удосконалення математичних моделей та програмно-інформаційних засобів для прогнозування розвитку об'єднаних енергосистем з використанням відновлюваних джерел енергії в сукупності з акумуляючими засобами» (2021 р. № ДР 0119U100109); «Визначення напрямів розвитку структури генеруючих потужностей Об'єднаної енергосистеми України за умов спільної роботи традиційних та відновлюваних джерел енергії і посилення екологічних вимог» (2021 р. № ДР 0119U101745).

Оцінка наукового рівня дисертації.

Дисертаційна робота Буратинського І.М. викладена на 171 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 149 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 19 таблицями та 24 рисунками. Список використаних джерел містить 120 найменувань, з них 75 кирилицею та 45 латиницею.

В *першому* розділі дисертації І.М. Буратинського розглянуто особливості будови сонячних фотоелектричних електростанцій, загальні тренди збільшення обсягів їх встановленої потужності та проблеми, що виникають в енергосистемах у зв'язку з цим. Показано актуальність використання систем акумуляування електроенергії для підвищення стабільності роботи сонячних електростанцій та описано можливі шляхи їх приєднання до сонячних електростанцій для досягнення максимальної економічної ефективності. Також проведено огляд моделей спільної роботи сонячних електростанцій та систем накопичення.

В *другому* розділі дисертації описано новий метод визначення параметрів обладнання сонячних електростанцій щодо встановленої потужності інверторів та фотоелектричних модулів. Цей метод розроблено з метою зниження вартості виробництва електроенергії в умовах добових та сезонних змін інтенсивності сонячного випромінювання. Також у розділі наведено нелінійну модель оптимізації співвідношення встановленої потужності інверторів та фотоелектричних модулів сонячної електростанції за критерієм мінімізації добової середньозваженої собівартості виробництва електроенергії з урахуванням зміни інтенсивності сонячного випромінювання.

В *третьому* розділі описано метод визначення необхідних технічних параметрів та режимів роботи системи акумуляування електроенергії, яка є частиною гібридної сонячної електростанції. Також наведено удосконалену нелінійну модель оптимізації параметрів обладнання сонячної фотоелектричної електростанції, яка включає в себе систему акумуляування електроенергії для зберігання надлишкової електричної енергії та мінімізації собівартості виробництва електричної енергії. У розділі представлено нову математичну модель для визначення необхідних технічних параметрів системи акумуляування електроенергії, яка входить у склад сонячної фотоелектричної електростанції, для забезпечення підтримки потужності відпуску електричної енергії в енергосистему в період пікової інтенсивності сонячного випромінювання та з урахуванням потреб споживачів.

У *четвертому* розділі описано розроблений метод оцінки техніко-економічних показників інвестиційних проєктів гібридних сонячних електростанцій. Також наведено розроблені режими спільної роботи сонячної електростанції та системи акумуляування електроенергії, які дозволяють переносити надлишкову електричну енергію у часі та використовувати ємності акумуляторних батарей для енергетичного арбітражу на конкурентному ринку електроенергії. У розділі приведено результати оцінки рентабельності впровадження проєктів сонячних фотоелектричних електростанцій із стандартними та оптимізованими параметрами з врахуванням розроблених режимів спільної роботи сонячної електростанції та системи акумуляування електроенергії.

У висновках дисертаційної роботи представлені найбільш суттєві наукові та практичні результати дослідження. Описано результати оптимізації обладнання сонячних фотоелектричних електростанцій для території України, моделювання номінальної ємності та номінальної потужності системи акумуляування електроенергії в гібридній сонячній електростанції, необхідної для підтримки відпуску електроенергії в енергосистему. Також наведено результати оцінки рентабельності інвестиційних проєктів гібридних сонячних електростанцій, які враховують розроблені режими спільної роботи сонячної електростанції та системи акумуляування електроенергії.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в розробці нових методів та моделей для визначення оптимальної структури сонячної електростанції з метою забезпечення найнижчої собівартості виробництва електричної енергії протягом року, підвищення конкурентоздатності її функціонування в умовах ринку електричної енергії, а також визначення номінальної ємності та потужності системи акумуляування електроенергії, необхідної для підтримки потужності відпуску електричної енергії в енергосистему на заданому рівні та зменшення обсягів потрібних маневрових потужностей для компенсації зміни сонячної генерації, викликаної добовою зміною сонячного випромінювання.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача.

Розроблений метод визначення технічних параметрів сонячної електростанції доцільно використовувати для оцінки її конкурентоспроможності на сучасному ринку електричної енергії, де впроваджуються нові генеруючі потужності. Метод визначення номінальної ємності та потужності системи акумулювання електроенергії, що входить до складу сонячної електростанції, може використовуватися для оцінки скорочення маневрених резервів, які застосовуються в енергосистемі для компенсації змін потужності сонячних електростанцій при зміні інтенсивності сонячного випромінювання. Метод техніко-економічної оцінки впровадження гібридних сонячних електростанцій, що включають систему акумулювання електроенергії, може використовуватися для оцінки їх конкурентоспроможності відповідно до поточних та перспективних умов на ринку електричної енергії.

Відомості про дотримання академічної доброчесності.

У дисертації Буратинського І.М. фактів академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації отриманих результатів, не виявлено. Дисертація Буратинського І.М. повністю відповідає вимогам «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.

Недоліки та зауваження до роботи.

1. У таблиці 2.7 наведено значення ефективності роботи сонячних електростанцій на рівні 80, 85, 90%. Було б доцільно зазначити у тексті дисертації, що наведений діапазон значень ефективності роботи покриває більшість існуючих сонячних електростанцій, що працюють в Об'єднаній енергосистемі України.

2. Потребує додаткового пояснення чому результати моделювання спільної роботи сонячної електростанції та системи акумулювання електричної енергії наведено лише для декількох днів протягом року.

3. В описі рівняння 3.7 варто було б надати детальні пояснення для всіх використаних змінних та параметрів, а в формулі 3.8 обґрунтувати підхід до вибору потужності системи накопичення.

4. У тексті дисертаційної роботи було б доцільно зазначити, що у досліджуваному режимі роботи система акумулювання електричної енергії, яка входить у структуру сонячної електростанції не приймає участь у автоматичному регулюванні частоти та активної потужності в енергосистемі.

Попри наявність невеликої кількості друкарських помилок, робота з точки зору стилю і мови виконана на досить високому рівні.

Наведені недоліки до дисертаційної роботи Буратинського І.М. є незначними та не зменшують її наукової цінності та важливості отриманих результатів.

Висновки щодо дисертаційної роботи.

Дисертація Буратинського І.М. «Моделювання спільної роботи сонячної електростанції та акумуляційної системи зберігання енергії в умовах підвищення стабільності та економічної ефективності їх функціонування в енергосистемі» є завершеною науковою працею, у якій в повній мірі виконане поставлене наукове завдання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректною постановкою задач дослідження, використанням перевірених на практиці методів дослідження та комплексного аналізу отриманих результатів.

Дисертаційна робота Буратинського І.М. є самостійно виконаним науковим дослідженням. Висновки та положення, викладені в тексті роботи, отримані автором самостійно.

Основні наукові результати, отримані автором дисертації, повністю відображені у наукових працях, поданих у списку публікацій, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України та 3 статті у наукових виданнях, що проіндексовані у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection. Апробацію матеріалів дисертації засвідчено у 5 публікаціях матеріалів конференцій, серед яких одна з індексацією у Scopus.

Вважаю, що Буратинський Ігор Михайлович в повній мірі оволодів методологією наукових досліджень та заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензент

кандидат технічних наук,
старший дослідник,
провідний науковий співробітник
відділу прогнозування розвитку
електроенергетичного комплексу
Інституту загальної енергетики
НАН України



Олександр ЗГУРОВЕЦЬ

Підпис Згуровця О.В. засвідчую,
Учений секретар
Інституту загальної енергетики
НАН України



Ірина ЛЕЩЕНКО