

Заклад вищої освіти „Подільський державний університет”
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

«ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ»

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання освітнього ступеня «Магістр», освітньо-професійної програми «Енергетичний менеджмент» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ТУЖАНСЬКИЙ Максим Сергійович

Керівник професор

МИХАЙЛОВА Людмила Миколаївна

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« ____ » _____ 2023 р.

Допускається до захисту:

« ____ » _____ 2023 р.

Гарант освітньо-професійної програми
«Енергетичний менеджмент» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»

докт. с-г. наук, канд. техн. наук, доцент

Олег ТКАЧ

м. Кам'янець-Подільський, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ	9
1.1 Особливості побудови та функціонування локальних систем	9
1.2 Основні режими роботи локальних систем.....	25
1.3 Енергетичні процеси у локальних системах.....	28
1.4 Особливості оцінювання стабільності роботи локальних систем.....	30
1.5 Особливості оцінювання надійності у локальних системах	32
Висновки.....	37
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ	38
2.1 Особливості оцінювання енергетичних процесів у локальних системах з різнорідними джерелами генерації.....	38
2.2 Особливості оцінювання енергетичних процесів з урахуванням несиметрії в локальних системах з різнорідними джерелами генерації.....	43
2.3 Аналіз стабільності локальної системи з коригуючими пристроями.....	50
Висновки.....	58
РОЗДІЛ 3 ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ У ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	59
3.1 Особливості оцінювання стабільності локальної системи з коригуючими пристроями.....	59

3.2 Визначення вузлів порушення стабільності у локальних системах на основі оцінки обмінних процесів в їх перетинах	78
3.3 Система показників якості електропостачання локальних систем з джерелами розосередженої генерації.....	83
Висновки.....	85
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ	86
4.1 Методика оцінювання ефективності регулювання енергетичних процесів в локальних системах з джерелами розосередженої генерації	86
4.2 Методика проведення інструментального обстеження у локальних системах з джерелами розосередженої генерації	88
4.3 Дослідження процесів СЕС на основі системи показників якості електропостачання з урахуванням несиметрії трифазних систем з розосередженими джерелами генерації	92
4.4 Рекомендації щодо підвищення рівня якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації.....	101
Висновки.....	110
ВИСНОВКИ.....	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113

ВСТУП

Один із пріоритетних напрямків сталого розвитку енергетики в Україні полягає в побудові електроенергетичних систем на основі технологій Smart Grid. Ці системи використовують інтелектуальні системи вимірювання та керування енергетичними потоками з використанням пристроїв силової електроніки. На сьогоднішній день, часто стаціонарні об'єкти з власними ланками генерації, що базуються на джерелах розподіленої генерації, утворюють повністю автономні енергетичні системи. Це особливо актуально для будівництва електротехнічних систем, розташованих далеко від централізованих систем електрозабезпечення, де прокладання нових ліній або посилення існуючих є неефективним з економічної точки зору.

Однак, особливості роботи джерел розподіленої генерації на основі нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії викликають ряд питань, пов'язаних з ефективністю регулювання енергетичних процесів в таких системах. Для аналізу цих процесів необхідно провести якісну оцінку, яка включає в себе не лише оцінку якості електричної енергії, а й стабільність роботи джерел розподіленої генерації, здатність коригування спотворень за допомогою коригуючих пристроїв та системи керування, а також надійність системи в цілому. Тому для автономних енергетичних систем з джерелами розподіленої генерації є важливим розроблення методології та практичного інструментарію для оцінки ефективності регулювання енергетичних процесів з урахуванням особливостей функціонування під'єднаних джерел генерації, а також аналізу процесів у класичних електротехнічних системах та простих електричних мережах. Викладені вище аспекти та критичний аналіз міжнародного досвіду вирішення цих питань визначають напрямки наукових досліджень, результати яких представлені у даній кваліфікаційній роботі.

Метою дослідження, на основі якого проведено дану кваліфікаційну роботу, було удосконалення та розвиток методів оцінки енергетичних процесів в стабільних режимах локальних електротехнічних систем з використанням

джерел розподіленої генерації. У рамках проведених досліджень автором розв'язувались такі наукові **задачі**:

1. Провести аналіз структури та принципів роботи локальних електротехнічних систем з джерелами розподіленої генерації, зокрема дослідити їхню конфігурацію, взаємозв'язки між складовими елементами та принципи управління.

2. Розширити перелік показників, що використовуються для оцінки ефективності регулювання електроенергетичних процесів у локальних системах. Додати до існуючих показників нові критерії, які враховують специфіку джерел розподіленої генерації.

3. Удосконалити методи оцінювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах, зокрема здійснити адаптацію існуючих методів до умов змінної структури та режимів функціонування систем.

4. Розробити метод оцінювання надійності локальних електротехнічних систем з джерелами розподіленої генерації, який дозволить враховувати особливості цих систем та визначити оптимальні параметри для забезпечення їхньої надійної роботи.

Об'єктом дослідження є електроенергетичні процеси, що відбуваються в локальних електротехнічних системах з джерелами розподіленої генерації в стабільних режимах, з урахуванням контрольованої зміни розрахункових режимних електричних параметрів.

В якості **предмету дослідження** було обрано процес оцінювання якості електропостачання, зокрема стабільності, надійності та ефективності регулювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами розподіленої генерації в усталених режимах.

ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі вирішено важливу проблему оцінювання робочих режимів локальних електротехнічних систем з джерелами розподіленої генерації та визначення винуватця порушень стабільності та надійності їхньої роботи. Це передбачає розробку нових методів, рекомендацій та алгоритмів, які дозволяють знаходити оптимальні рішення в процесі реформування та розвитку енергетичної галузі. Основні результати роботи:

1. Проведено комплексний аналіз структури та режимів локальних електротехнічних систем з джерелами розподіленої генерації. Виявлено, що існуючі методи не дозволяють враховувати всі можливі робочі режими таких систем і структуру їхньої генерації. Тому була виявлена потреба у розробці додаткових показників та критеріїв для ефективного оцінювання робочих режимів в локальних електротехнічних системах з джерелами розподіленої генерації.

2. Запропонований метод оцінювання надійності локальних електротехнічних систем з джерелами РГ дає змогу визначити оптимальні значення розрахункових показників надійності для таких систем (при значенні $NPV > 0$ для більшості коефіцієнтів C_{opt} отримаємо значення $NRI_{LES} < 1$) та є універсальним по відношенню до всіх показників, наведених у стандарті IEEE 1366.

3. Покращений метод оцінювання енергетичних процесів дозволяє враховувати особливості структури локальних електротехнічних систем та параметрів різноманітних джерел розподіленої генерації, як при спільному, так і при роздільному їх функціонуванні з централізованою системою електропостачання. Цей метод дозволяє скоротити час розрахунків на 18% при оцінюванні енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами розподіленої генерації.

4. Покращена методика проведення енерготехнологічних обстежень локальних електротехнічних систем з джерелами розподіленої генерації дозволяє здійснювати якісну оцінку енергетичних процесів таких систем з урахуванням їхніх параметрів та режимів функціонування. Застосування цієї методики в міському

регулювально-енергетичному механізмі Мукачева виявило потенціал енергоефективності на рівні 20%.

5. Запропонований у дослідженні набір показників для оцінки якості електропостачання та ефективності регулювання енергетичних процесів, погоджений з характеристиками та режимами централізованих систем електропостачання та електронних систем, дозволяє враховувати різноманітні структури локальних електротехнічних систем та алгоритми функціонування в них різнорідних традиційних і відновлюваних джерел розподіленої генерації. Під час його випробування виявлено, що значення реактивної потужності перевищує класично розраховане в 1,38 рази за рахунок врахування несиметричних складових.

6. Представлений у роботі метод оцінювання обмінних процесів у локальних електротехнічних системах дозволяє виявити вузли генерації та/або навантаження, які мають найбільший вплив на характеристики енергетичних процесів у усталених режимах, а також визначити припустимі режими функціонування виділених систем на основі аналізу інтенсивності обмінних процесів, що в них відбуваються.

7. Запропоновані в роботі способи оцінювання якості електропостачання включають спосіб візуалізації енергетичних процесів в електротехнічних системах, що ґрунтується на сформованій в роботі системі критеріїв та показників, а також на особливостях побудови енергетичних профілів, які дають змогу виконувати задачу оцінювання енергетичних процесів у локальних електротехнічних системах з джерелами РГ у багатокритеріальній постановці. Так при значенні всіх нормалізованих коефіцієнтів $K_i < 1$ можна зробити висновок про відповідність параметрів енергетичних процесів та режимів нормативним вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Денисюк С.П. Аналіз надійності роботи компенсаторів в системах електроживлення з нелінійним нестационарним навантаженням [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2010. – Спец. вип. – С. 91–98.
2. Денисюк С.П. Аналіз якості енергетичних процесів в системах електроживлення з нелінійними нестационарними елементами [Текст] / С.П. Денисюк, Є.В. Сафроненко, Д.Г. Дерев'яно // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 7–11.
3. Забезпечення надійності функціонування та стійкої роботи інтелектуальних енергетичних систем [Текст] / С.П. Денисюк, П.Й. Тарасевич, О.В. Сподинський, Д.Г. Дерев'яно // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 27. – С. 27–33.
4. Денисюк С.П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно, П.С. Колесник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2011. – Спец. вип. – С. 30–37.
5. Денисюк С.П. Особливості застосування систем гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних мережах [Текст] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 1. – С. 29–37. – ISSN 1813-5420.
6. Дерев'яно Д.Г. Особливості оцінки стійкості та надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією [Текст] / Д.Г. Дерев'яно // Гірництво. – 2012. – № 21. – С. 28–32. – ISSN 2079-5688.
7. Денисюк С.П. Особливості аналізу впливу завад від різнорідних типів джерел розосередженої генерації на процеси в навантаженнях [Електронний ресурс] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно, К.Ю. Щербань // Журнал інженерних наук. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. В1–В7. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSU_tekh_2014_1_2_8

8. Денисюк С.П. Оцінка ефективності сумісної роботи розосереджених джерел генерації електроенергії, включаючи відновлювальні, в електроенергетичних системах [Текст] / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'яно // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2013. – № 3(80). – С. 54–59.

9. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards [Text] / O.V. Kyrylenko, R. Strzelecki, S.P. Denysiuk, D.G. Derevianko // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 46–50.

10. Денисюк С.П. Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень [Текст] / С.П. Денисюк, О.Б. Рибіна, Д.Г. Дерев'яно // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2010. – Спец. вип. – С. 30–37.

11. Реалізація концепції інтелектуальне місто (енергетична складова) [Текст] / Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'яно, О.В. Бориченко, І.П. Радиш // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2013. – Спец. вип. – С. 47–57.

12. Дерев'яно Д.Г. Особливості оцінки запасу стійкості локальних систем з різнорідними джерелами генерації [Текст] / Д.Г. Дерев'яно // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – Спец. вип. – С. 15–19.

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Концепція формування інтелектуального міста (енергетична складова)» / С.П. Денисюк, Т.М. Базюк, Д.Г. Дерев'яно. – № 49397; заявл. 28.03.2013; зареєстр. 30.05.2013.

14. Дерев'яно Д.Г. Аналіз впливу сонячних електростанцій на показники якості електричної енергії [Електронний ресурс] / Д.Г. Дерев'яно, В.В. Мирошниченко // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ / Зб. тез доповідей – 2013. – С. 439–445. – Режим доступу до журн. : <http://en.iee.kpi.ua/files/2013/konference2013.pdf>.

15. Мирошниченко В.В. Особливості оцінки стійкості та ЕМС роботи локальних систем з розосередженою генерацією [Електронний ресурс] / В.В. Мирошниченко, Д.Г. Дерев'яно // Енергетика. Екологія. Людина. Наукові

праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ / Зб. тез доповідей. – 2012. – С. 198–204. – Режим доступу до журн. : <http://en.iee.kpi.ua/files/2012/konference2012.pdf>.

16. Денисюк С.П. Особливості оцінки стійкості, надійності живлення та рівня ЕМС в системах живлення електрифікованого транспорту [Електронний ресурс] / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'яно, В.В. Мирошніченко // Електрифікація транспорту. - 2012. - № 3. - С. 53-56. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eltr_2012_3_12

17. Дерев'яно Д.Г. Багатокритеріальна оцінка якості електропостачання локальних електротехнічних систем з розосередженою генерацією [Текст] : Зб. тез допов. міжнар. наук.-практ. конф. [«Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2015»], (19–21 травня 2015 р., м. Київ) / Д.Г. Дерев'яно / НТУУ «КПІ». – 2015. – С.28–29.

18. Новый подход к измерению электрической мощности /М.В. Агунов, А.В. Агунов, Н.М. Вербова. // Пром. энергетика. – 2004. – № 2. – С. 30–33.

19. Баланс энергий в электрических цепях / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк, В.Я. Жуйков [и др.] //К.: Наук. Думка. – 1992. – 312 с.

20. Береговський В.З., Адаптивне енергоефективне керування перетворювачами електричної енергії з урахуванням режиму споживання / В.З. Береговський, Ю.С. Петергеря // Техн. електродинаміка. Темат. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. –2001. – Ч.3. – С.27–29.

21. Вагин Г.Я. О методах определения расчетных электрических нагрузок промышленных предприятий //Промэлектро. – 2007. – № 3. – С. 48–52.

22. Вагин Г.Я. Построение систем электроснабжения промышленных предприятий с учетом электромагнитной совместимости электроприемников // Пром. энергетика. – 2005. – № 2. – С. 38–43.

23. Відновлювальні джерела енергії у локальних об'єктах / Ю.І. Якименко, Є.І. Сокол, В.Я. Жуйков, Ю.С. Петергеря, О.Л. Іванін. – К.: ІВЦ „Політехніка”, 2001. – 114 с.

24. Денисюк С.П. Аналіз взаємного впливу елементів системи

електроживлення з перетворювачами / С.П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб.наук.праць. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 2 (17). – С. 13 – 17.

25. Денисюк С.П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями / С.П. Денисюк // Пробл. Энергосбережения – 1994. – № 2–3. – С. 81 – 88.

26. Загальні положення енерготехнологічного обстеження систем електроживлення з перетворювачами електричної енергії: методичні вказівки / [Денисюк С.П., Віхарєв Ю.О., Радиш І.П., Ковальов О.В.] – Реєстр. № М 00013184.4.004 –00, Київ, Держкоменергобереження України, 2000.

27. Денисюк С.П. Пріоритети в забезпеченні електромагнітної сумісності в електричних мережах України. / С.П. Денисюк, О.Б. Рибіна // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – Ч.1, 2007. – С. 84 – 87.

28. Закладний О.М. Сучасні методи регулювання якості електроенергії / О.М. Закладний, О.О. Закладний // Промелектро. – 2007. – № 2. – С. 25–30.

29. Зеленкова Л.И. Мониторинг качества электрической энергии в аспекте обеспечения энергетической безопасности / Л.И. Зеленкова // Электрика. – 2007. – № 4. – С. 24–28.

30. Кириленко О.В. Особливості забезпечення електромагнітної сумісності в електричних мережах України / Кириленко О.В., Денисюк С.П., Рибіна О.Б. // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб.наук.праць. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – № 1 (16), Частина 1. – С. 27 – 30.

31. Кириленко О.В. Режимне застосування систем гнучких передач змінним струмом в енергосистемах / О.В. Кириленко, В.В. Павловський // Техн. електродинаміка. Тем. випуск. «Силова електроніка та енергоефективність». - 2007. -Ч. 1.-С. 88-91.

32. Кириленко О.В., Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко // Техн. електродинаміка. – 2011. – №1. – С.46–

53.

33. Праховник А.В. Стан та перспективи інтеграції децентралізованої генерації в єдину систему енергопостачання / А.В. Праховник, О.В. Кулик – 2006. – с. 39 – 42.– (Праці ІЕД НАНУ спец. Випуск).

34. Савченко П.І. Економічна ефективність застосування технічних засобів підвищення якості електричної енергії / П.І. Савченко, І.М. Трунова // Енергетика та електрифікація. – 2002. – № 7. – С. 37–39.

35. Стогній Б.С. Підвищення пропускної здатності «слабких» перетинів енергосистем з використанням технології ГПЗС (FACTS) / [Б.С. Стогній , О.В. Кириленко, ВВ. Павловський, А.В. Левконюк] // Техн. електродинаміка. - 2009. -№2.-С. 63-68.

