

Подільський державний університет
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра енергозберігаючих технологій та енергетичного менеджменту

ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

Аналіз оптимального секціонування повітряних розподільчих мереж 6 - 20 кВ в умовах застосування сучасних технологій

Виконав:

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

_____ **Семен КАНЮК**

Керівник: кандидат технічних наук, доцент

_____ **Віктор ДУБІК**

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

Допускається до захисту:

« _____ » _____ 2023 р.

Керівник проектної групи
(гарант освітньої програми)

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

кандидат технічних наук, доцент _____ **Ігор ГАРАСИМЧУК**

м. Кам'янець-Подільський, 2023р.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 6-20 КВ.....	14
1.1. Аналіз світового досвіду вирішення завдання забезпечення надійності роботи РМ в сучасних умовах.....	14
1.1.1 Впровадження «інтелектуальних» мереж.	14
1.1.2 Досвід впровадження систем FACTS	15
1.1.3 Контроль регуляторних органів.	16
1.1.4 Впровадження універсальних міжнародних стандартів.	16
1.1.5 Використання самоутримних ізольованих проводів (СІП)	18
1.1.6 Політика реорганізації операторів розподільчих мереж.	19
1.2. Аналіз стану РМ України та вимоги регулятора до забезпечення їх надійності	21
1.2.1 Моніторинг виконання вимог, щодо якості електропостачання.	21
1.2.2 Вимоги до рівня показників надійності в Україні на 2020 рік.....	22
1.3 Розосереджена генерація та її вплив на якість електропостачання.....	27
1.3.1 Тенденції розвитку джерел розосередженої генерації.....	27
1.3.2 Переваги та проблеми при збільшенні частки джерел розосередженої генерації.....	28
Висновки	30
РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ	31
2.1 Аналіз надійності систем розподілу електричної енергії	31
2.1.1 Нормативні акти ЄС, щодо надійності функціонування розподільчих мереж.	31

2.1.2.1 Поняття острівного режиму «Islanding».....	34
2.1.2.2 Виявлення «острівного» режиму.....	36
2.1.2.3. Приклад роботи РМ в «острівному» режимі.....	38
2.2 Сучасні технічні засоби підвищення надійності роботи повітряних електричних мереж напругою 6 - 20 кВ.....	42
2.2.1 Реклоузери	42
2.2.2. Секціонолайзери.....	48
2.2.3 Soft Open Points (SOP).	55
2.3 Принципи побудови та організації функціонування Outage Management System.	59
2.3.1 Загальні принципи побудови «інтелектуальних» мереж.	59
2.3.2 Основні складові «інтелектуальних» мереж.	60
2.3.3 Принцип побудови OMS.	62
2.3.3 Організація роботи OMS на прикладі бельгійських РМ.....	63
2.3.4 Переваги та недоліки роботи OMS.	66
Висновки	67
РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО СЕКЦІОНУВАННЯ РМ 6 - 20 КВ.....	69
3.1 Дослідження попереднього досвіду вирішення завдання оптимального розміщення комутаційного обладнання в РМ.....	69
3.2 Аналіз основних показників алгоритму	73
3.2.1 Алгоритм обчислення EENS.....	73
3.2.2 Опис використаних методик розрахунку надійності РМ	74
3.2.3 Принцип розрахунку основних параметрів, на основі використання структурно логічної матриці.	75
3.2.4. Розрахунок фінансового прибутку.....	77
3.3 Методика вирішення задач оптимізації надійності систем електропостачання.....	78

3.3.1 Впровадження покращеного алгоритму вибору оптимального розміщення комутаційного обладнання.	78
3.3.2 Зміни, які мають бути внесені в раніше розглянутий алгоритм, для врахування наявності в РМ ДРГ.	81
3.3.3 Приклад впливу ДРГ на надійність роботи РМ.	82
3.3.4 Аналіз розрахунків на прикладі РМ з 14 вузлами навантаження.	89
3.3.5. Аналіз розрахунків на прикладі РМ (19 вузлів навантаження).	93
3.3.6. Загальний аналіз результатів роботи алгоритму.	97
3.4. Перспективи подальшого розвитку алгоритму	98
3.4.1 Можливість використання додаткових показників надійності.....	98
Висновок	101
ВИСНОВКИ	102
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	104
ДОДАТКИ	109

ВСТУП

Актуальність теми. У контексті стратегії розвитку електроенергетичного сектору України та його інтеграції до ENTSO-E виникає ряд суттєвих питань, на вирішення яких слід зосередитися до самого моменту інтеграції. Одним із найактуальніших завдань в цьому контексті є підвищення надійності електричних мереж. Виходячи з розгляду цієї проблеми, виявляється, що частково її можна вирішити завдяки оптимальному секціонуванню повітряних розподільчих мереж напругою 6 - 20 кВ, особливо в умовах застосування Smart Grid.

В магістерській дисертації представлено новаторський підхід до визначення оптимального секціонування розподільчих мереж у вказаному діапазоні напруги. Використовуючи удосконалену методику розрахунку, базовану на алгоритмі, проведено аналіз комерціалізації запропонованої методики. Також ретельно проаналізовано соціально-економічні вигоди, які можуть виникнути в результаті її успішного впровадження.

Отже, представлена дисертація є не лише вкладом у вирішення актуальних проблем енергетичного сектору, але й важливим кроком у напрямку практичного впровадження новаторських рішень для оптимізації електромережі в умовах сучасних технологій.

Метою дисертаційної роботи є: Метою дисертаційної роботи є проведення аналізу оптимального секціонування повітряних розподільчих мереж напругою 6 - 20 кВ в умовах впровадження Smart Grid технологій. Задля досягнення цієї мети були сформульовані та розв'язані наступні ключові завдання:

Аналіз надійності розподільчих мереж: В роботі проведено докладний аналіз особливостей та шляхів підвищення надійності функціонування розподільчих мереж напругою 6 - 20 кВ як в Україні, так і в світі. Це включає в себе огляд існуючих проблем та можливостей для оптимізації їх роботи.

Перспективи впровадження технологій Smart Grid: Розглянуті перспективи використання технологій Smart Grid з метою підвищення надійності розподільчих

мереж. Аналізовано можливості впровадження інноваційних рішень для підтримки ефективної роботи системи.

Вдосконалена методика оптимального секціонування: Розроблена та вдосконалена методика оптимального секціонування розподільчих мереж 6 - 20 кВ в умовах застосування Smart Grid. Це включає в себе впровадження нових підходів та методів для забезпечення оптимального функціонування мережі.

Пропозиції практичної реалізації та комерціалізації: Розроблені конкретні пропозиції щодо практичної реалізації розробленої методики, включаючи аспекти її комерціалізації. Досліджено перспективи подальшого розвитку цієї методики в контексті сучасних вимог електроенергетичної галузі.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування повітряних розподільчих мереж напругою 6 - 20 кВ в умовах застосування Smart Grid технологій.

Предметом дослідження є особливості впливу Smart Grid технологій на надійність електропостачання споживачів.

Метод дослідження. У роботі для вирішення поставлених завдань використано метод оптимального секціонування повітряних розподільчих мереж, враховуючи при цьому нормування показників надійності. Основним інструментом для розрахунків оптимального секціонування став "алгоритм". Цей підхід дозволяє ефективно вирішувати завдання оптимізації структури мережі з урахуванням встановлених критеріїв надійності та ефективності.

Застосування "алгоритму" в контексті розрахунку оптимального секціонування дозволяє систематично вибирати оптимальні рішення на кожному кроці процесу, максимізуючи чи мінімізуючи певні критерії відповідно до вимог досліджуваної проблеми. Це ефективний інструмент для досягнення мети дослідження, яка передбачає оптимальне секціонування розподільчих мереж з урахуванням особливостей Smart Grid технологій.

Такий підхід забезпечує науковий та методологічний обґрунтування вибору оптимальної конфігурації мережі та враховує важливість нормування показників надійності в контексті сучасних вимог до електроенергетичних систем.

Основні результати роботи включають в себе:

В даній роботі для вирішення визначених завдань був використаний метод оптимального секціонування повітряних розподільчих мереж, з обов'язковим врахуванням нормування показників надійності. В якості основного інструменту для проведення розрахунків оптимального секціонування був обраний " алгоритм". Цей підхід дозволяє ефективно вирішувати завдання оптимізації структури мережі, враховуючи встановлені критерії надійності та ефективності.

Використання " алгоритму" у контексті розрахунку оптимального секціонування дозволяє систематично вибирати оптимальні рішення на кожному етапі процесу. Цей підхід спрямований на максимізацію чи мінімізацію визначених критеріїв відповідно до вимог досліджуваної проблеми. Такий підхід є ефективним інструментом для досягнення поставленої мети дослідження, яка включає в себе оптимальне секціонування розподільчих мереж з урахуванням особливостей технологій Smart Grid

Цей метод не лише забезпечує наукове та методологічне обґрунтування вибору оптимальної конфігурації мережі, але й враховує важливість нормування показників надійності в контексті сучасних вимог до електроенергетичних систем.

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

Було проведено роботу з аналізу програмного забезпечення, спрямованого на вирішення задачі оптимального секціонування розподільчих мереж, які інтегрують в себе джерела розосередженої генерації. Це програмне забезпечення може забезпечити велику користь для інженерів та фахівців у галузі електроенергетики, дозволяючи їм ефективно оптимізувати структуру мережі в умовах розподіленої генерації та інтеграції Smart Grid технологій.

Використанні алгоритму: Застосування алгоритму не лише дозволило досягти ефективних результатів у вирішенні задачі оптимального секціонування розподільчих мереж, але й суттєво скоротило час, необхідний для виконання цієї задачі. Це зробило процес оптимізації більш доступним та швидким, що є

ключовим аспектом в умовах сучасного темпу розвитку технологій та зростання обсягів даних.

Отже, обидва аспекти практичного значення визначають успішність дослідження в контексті впровадження його результатів у реальний енергетичний сектор, сприяючи підвищенню ефективності та надійності розподільчих мереж.

Апробація результатів дисертації. Результати магістерської дисертації були оприлюднені на конференції:

Ефективне використання енергії стан і перспективи. Всеукраїнська студентська науково-практична конференція. 9 листопада 2023 р. (ЗВО «ПДУ», м. Кам'янець-Подільський).

Публікації. За результатами досліджень було опубліковано:

Семен КАНЮК. ВИКОРИСТАННЯ SOFT OPEN POINTS ТЕХНОЛОГІЙ В ЕНЕРГЕТИЦІ / Семен КАНЮК, Віктор ДУБІК, Олег ГОРБОВИЙ // Ефективне використання енергії стан і перспективи: збірник наукових праць III Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції. 9 листопада 2023 р. (ЗВО «ПДУ», м. Кам'янець-Подільський). – Кам'янець-Подільський, 2023. – С.

ВИСНОВКИ

Результати проведеного дослідження стосовно стану надійності функціонування розподільних мереж українських енергосистем свідчать про те, що навіть орган регулювання, такий як Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), встановлює для ліцензіатів вітчизняних мереж напругою 6, ... 20 кВ межу надійності, яка виявляється більш ніж в 2 рази нижчою порівняно з іншими провідними країнами світу.

Між основних причин низької надійності розподільних мереж в енергосистемах України виокремлюються:

Недосконалість законодавства, включаючи відсутність об'єктивного контролю за виконанням нормативів та м'які санкції за порушення встановлених норм якості електропостачання.

Суттєве старіння обладнання електричних мереж та повільне його оновлення.

Відсутність адекватної методики техніко-економічного обґрунтування доцільності заходів по підвищенню надійності, що практично унеможливорює впровадження сучасного обладнання.

В роботі була розроблена вдосконалена методика оптимального секціонування розподільчих мереж 6, ... 20 кВ, спрямована на врахування зростаючого використання розподілених джерел енергії. Застосування алгоритму дозволяє визначити оптимальні місця встановлення захисного та комутаційного обладнання, що ефективно підвищує надійність інтегрованих систем електропостачання.

Також в роботі вперше розглянуті особливості взаємодії та паралельної роботи реклоузерів та секціонолайзерів, розроблені рекомендації щодо їх ефективного одночасного використання, спрямовані на суттєве зменшення витрат

на комутаційно-автоматичне обладнання для досягнення нормативного рівня надійності електропостачання.

В роботі також запропонована структура систем управління розподільними мережами на основі OMS, що дозволяє, крім підвищення надійності електропостачання, знизити рівень втрат потужності та електричної енергії.

Були розроблені алгоритмічне та програмне забезпечення для вирішення завдань оптимального секціонування розподільних мереж із застосуванням алгоритму. Це дозволяє в декілька разів скоротити розрахунковий час.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДП «НЕК «Укренерго». Зарубіжний досвід підвищення ефективності передавання та розподілу електроенергії, оптимізації втрат електроенергії в електромережах всіх рівнів напруги. Київ, 2015.
URL: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/4.Efektivn_peredav_rozpod_elektroen.pdf.
2. Барг И. Г., Жулев А. Н. Самонесущий изолированный провод Торсада. *Энергетическое строительство*. 1995. № 2. С. 49–52.
3. НКРЕКП. Рейтинг компаній за показниками якості електропостачання. *Національна Комісія, Що Здійснює Державне Регулювання У Сферах Енергетики Та Комунальних Послуг (НКРЕКП, Регулятор) Офіційний Веб-Сайт*. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?news=10826>.
4. Про затвердження форм звітності щодо показників якості електропостачання та інструкцій щодо їх заповнення : постанова НКРЕКП від 12.06.2018 р. № 374. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=32506>.
5. Про затвердження Мінімальних вимог до якості обслуговування споживачів електричної енергії кол-центрами : постанова НКРЕКП від 12.06.2018 р. № 373. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=32493>.
6. Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості недотримання : постанова НКРЕКП від 12.06.2018 р. № 375.
URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=32498>.
7. Про затвердження показників надійності (безперервності) електропостачання на 2020 рік : постанова НКРЕКП від 03.03.2020 р. № 546.
8. US Energy Information Administration. Динаміка зміни фактичних значень середнього часу відключень за 2013 – 2019 роки в США. 2019. URL: <https://www.eia.gov/electricity/annual/pdf/epa.pdf>.
9. Deora T., Frantzis L., Mandel J. Distributed Energy Resources 101: Required Reading for a Modern Grid. *Advanced Energy Economy*.

URL: <https://blog.aee.net/distributed-energy-resources-101-required-reading-for-a-modern-grid>.

10. Зростання сонячної генерації в Європі і світі: Іспанія виходить в лідери. *Kosatka.Media*.

URL: <https://kosatka.media/uk/category/vozobnovlyаемaya-energia/analytics/rostsolnechnoy-generacii-v-evrope-i-mire-ispaniya-vyhodit-v-lidery>.

11. Виробництво електроенергії альтернативними джерелами в країнах Європи. *Kosatka.Media*.

URL: <https://kosatka.media/uk/category/vozobnovlyаемaya-energia/analytics/proizvodstvo-elektroenergii-alternativnymi-istochnikami-v-stranah-evropy>.

12. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 46–53.

13. Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж / В. О. Комар та ін. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2017. № 1. С. 104–107.

14. Третий энергетический пакет - пакет нормативных правовых актов, регулирующих газовую и электроэнергетическую отрасли ЕС. *Энергореформа*. URL: <http://reform.energy/energopack>.

15. Directive 2004/8/EC on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC : of 11.02.2004 no. 2004/8/EC. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0008&from=EN>.

16. Директива 2009/28/ЄС Європейського Парламенту та Ради про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел та якою вносяться зміни до, а в подальшому скасовуються Директиви 2001/77/ЄС та 2003/30/ЄС : від 09.04.2009 р. № 2009/28/ЄС.

URL: <https://ips.ligazakon.net/document/MU09267>.

17. Distributed Generation Islanding Effect on Distribution Networks and End User Loads Using the Load Sharing Islanding Method / M. Kreishan et al. *Energies*. 2016. No. 9. P. 956.

URL: https://www.researchgate.net/publication/310467575_Distributed_Generation_Islanding_Effect_on_Distribution_Networks_and_End_User_Loads_Using_the_Load_Sharing_Islanding_Method.

18. National Grid. Working Group Report: Small Embedded Generation Issue. Warwick, UK, 2010.

URL: <https://www.nationalgrideso.com/document/25191/download>.

19. Review of anti-islanding techniques in distributed generators / D. Velasco et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, no. 6. P. 1608–1614. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.02.011>.

20. Реклоузеры ACR на напряжение 10, 20, 35 кВ. *Sicame*. URL: <https://sicame.com.ua/95-hughes-power-system-acr-reclosers.html>.

21. Реклоузеры - применение, достоинства и недостатки, разновидности. ПУЭ8. URL: <https://pue8.ru/elektricheskie-seti/652-reklouzeryprimenenie-dostoinstva-i-nedostatki-raznovidnosti.html>.

22. Використання реклоузера та часострумова характеристика (ЧСХ) реклоузера до і після першого циклу АПВ. Пожежо- та вибухозахист від електричного струму. Попередження пожеж від електричного струму - презентація онлайн. URL: <https://ppt-online.org/167614> (дата звернення: 10.06.2019).

23. Пункт секционирования столбовой ПСС-10 (реклоузер). *Делис Групп*. URL: http://инициатива62.рф/index.php?option=com_quix&view=page&id=20.

24. Automatic Electronic Sectionalizing. INAEL. *Richardson Group of Companies*. URL: <https://www.richardsonsl.com/images/Richardson%20Projects%20Product%20Details/INAEL/Sectionalizer.pdf>.
25. Farmer D. M., Hoffman K. H. Application of Sectionalizers on Distribution Systems. *2007 IEEE Rural Electric Power Conference*. 2007. P. A2A2-7. URL: <https://doi.org/10.1109/REPCON.2007.369546>.
26. Csanyi E. 4 Factors To Consider When Selecting a Sectionalizer. *EEP - Electrical Engineering Portal*. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/4factors-to-consider-when-selecting-a-sectionalizer>.
27. Секционирующий выключатель с временной селективностью. *Hughes Power System*. URL: <https://hughespowersystem.com/ru/sectionalizers.html>.
28. RCU 220 Product Portfolio. *Power Solutions Brasil*. URL: http://psolutionsbrasil.com.br/wp-content/uploads/2017/07/tdsc_rcu220_en.pdf.
29. Qi Q. Benefit analysis of using soft DC links in medium voltage distribution networks: extended abstract of PhD Thesis. Cardiff, 2018. URL: <http://orca.cf.ac.uk/114978/>.
30. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation / C. Long et al. *Applied Energy*. 2016. Vol. 184. P. 427–437. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.031>.
31. Smart Grid: Technology and Applications / J. B. Ekanayake et al. Wiley, 2012. 306 p.
32. Impact of soft open point on feeder automation / A. Aithal et al. *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*. 2016. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2016.7514101>.
33. DTEK. Концепція побудови smart grid оператора систем розподілу. 77 с. URL: <https://www.dtek-dnem.com.ua/ua/file/fnQGgP27fLbk?inline=1>.

35. Optimum tie switches allocation and DG placement based on maximisation of system loadability using discrete artificial bee colony algorithm / M. M. Aman et al. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016. Vol. 10, no. 10. P. 2277–2284. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0303>.
36. Usage Optimization of Automatic Points of Sectionalizing to Increase Grid Reliability and Electricity Service / S. A. Andrikeeva et al. *Power Technology and Engineering*. 2017. Vol. 50, no. 5. P. 556–559. URL: <https://doi.org/10.1007/s10749-017-0750-y>.
37. Niaz Azari R. Optimal Recloser Setting, Considering Reliability and Power Quality in Distribution Networks. *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2017. Vol. 6, no. 1. P. 1. URL: <https://doi.org/10.11648/j.epes.20170601.11>.
38. Jafari M., Monsef H., Moghadam S. Z. Optimum number, placement and capacity of DGs and reclosers using analysis hierarchical process and genetic algorithm. *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. 2011. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2011.5874832>.
39. Гай О. В., Тугай Ю. І. Оптимальне секціонування схем розподільних електричних мереж. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.* 2011. № 28. С. 10–14. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/63997>.
40. Про затвердження Показників надійності (безперервності) електропостачання на 2020 рік: постанова НКРЕКП від 03.03.2020 р. № 546. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=50029>.
41. Distribution Systems Reliability Increase using a Cost-Benefit Decision-Making Process / T. I. Maris et al. *6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines*, Tenerife, 16 December 2006. P. 46–51.