

Голові спеціалізованої вченої ради
Д 26.223.03
Інституту електродинаміки
НАН України
академіку НАН України,
доктору технічних наук,
професору
Андрію ЖАРКІНУ

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук,
завідувача кафедри електроенергетики та систем управління
Сегеди Михайла Станковича

на дисертаційну роботу **Кучанського Владислава Володимировича**
«Аналіз та управління режимами роботи магістральних електричних
мереж за умов структурної несиметрії»,

яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

У роботі розглянуто актуальну проблему підвищення надійності та ефективності функціонування магістральних електричних мереж (МЕМ) України в умовах зростання кількості аварій, зумовлених як техногенними, так і військовими впливами. Особливу увагу приділено аналізу та керуванню режимами роботи мереж за умов структурної несиметрії, що виникає, зокрема, через пошкодження однофазних шунтових реакторів (ШР) і автотрансформаторів (АТ), а також через по фазні відмінності параметрів ліній електропередавання (ЛЕП).

Показано, що за неповнофазних режимів суттєво зростають втрати активної потужності, підвищується ризик виникнення резонансних перенапруг і аперіодичних струмів, що загрожує цілісності основного електротехнічного обладнання та може спричинити розвиток системних аварій. У роботі обґрунтовано необхідність теоретичних досліджень і розробки практичних методів аналізу, оптимізації та керування як усталеними, так і перехідними режимами роботи МЕМ з урахуванням наявної несиметрії.

Запропоновані рішення спрямовані на забезпечення стійкої та економічно ефективної експлуатації МЕМ в сучасних складних умовах, зокрема за допомогою застосування керованих шунтових реакторів та інтелектуальних систем комутації.

Проблемі підвищення надійності та ефективності функціонування МЕМ присвятили значну кількість праць такі вчені, як Берман А.П., Веприк Ю.М., Кузнецов В.Г., Кулик В.В., Лежнюк П.Д., Постолатій В.М., Солдатов В.А., Тугай Ю.І., Фраткин О.І. Maria Cristina Tavares, Božidar Filipović-Grčić, Igor Ivankovic, Tahir Midhat Lazimov, Sergio Kurokava та інші, однак

розроблені до цього часу моделі та методи аналізу режимів МЕМ стосуються, переважно, симетричних нормальних режимів. Тому вдосконалення існуючих та розроблення нових моделей і методів аналізу та керування режимами МЕМ за умов структурної несиметрії є актуальними для об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт (НДР) НАН України.

В дисертації наведено результати досліджень, які проводилися під час виконання таких НДР: «Розробка методів і моделей аналізу резонансних процесів та мінімізації втрат електроенергії в несиметричних режимах роботи електричних мереж» («Безпека-3», 2014-2018рр., № ДР 0114U001465); «Розробка методів і моделей для аналізу електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах з метою запобігання появі небезпечних перенапруг» («Безпека-4», 2019-2023рр., № ДР 0119U001280); «Розроблення моделей та методів аналізу аномальних режимів електричних мереж в умовах часткового пошкодження електрообладнання для відновлення їх безпечного функціонування і модернізації» («Безпека-5», 2024 р., № ДР 0124U000394); «Методи та засоби моделювання й обробки інформації при моніторингу електроенергетичних систем» («Інтелмер-2», 2017-2021 рр. № ДР 0117U002583); «Дослідити режими та створити засоби протиаварійного керування завантаженням перетинів енергосистем зі значною часткою відновлювальних джерел енергії» («Монітор-ПК» 2016-2018 рр., № ДР 0115U004417); «Розроблення моделей об'єднаної енергосистеми України та визначення заходів з її інтеграції до континентальної енергосистеми європейських країн – ENTSO-E» («Монітор-3», 2019-2021рр., № ДР 0119U001211); «Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів» («Монітор-4», 2022-2024рр., № ДР 0122U001266); «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» («Інтехен-2», 2020-2021рр., № ДР 0120U002125); «Підвищення надійності виконання комутацій в компенсованих магістральних лініях електропередачі надвисокої напруги» («Об'єднання-3», 2016-2018 рр. № ДР 0116U006587); «Підвищення надійності та ефективності роботи магістральних електричних мереж ОЕС України в умовах наявності джерел несинусоїдальних спотворень» («Нова енергетика», 2019-2021рр. № ДР 0119U001630); «Розвиток елементів теорії, розроблення нових методів розрахунку та створення засобів для підвищення надійності та енергоефективності режимів і технологічних процесів в електроенергетичних та електротехнічних системах» («Режим-1», 2022р., № ДР 0122U001494); «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E» («Режим-2», 2023-2024рр. № ДР 0123U1001769). Під час виконання зазначених НДР здобувач був відповідальним виконавцем

основних розділів, присвячених дослідженню аномальних режимів, викликаних як джерелами спотворень, так і зміною структури електричної мережі, а під час виконання НДР «Розробка заходів та технічних засобів компенсації неповнофазних режимів магістральних електричних мереж ОЕС України (шифр: 16/01-2020/1404-20)» 2020-2021, № ДР 0120U000148 був її науковим керівником.

Мета роботи і завдання дослідження полягає у подальшому розвитку теорії, розробленні нових моделей та методів аналізу і управління режимами роботи за умов структурної несиметрії для підвищення надійності та ефективності їхнього функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі **основні завдання**:

- урахувати в математичній моделі МЕМ коронування проводів повітряних ліній електропередавання та залежність їхніх опорів від температури;
- визначити можливість активного використання керованих шунтових реакторів (КШР) як засобів впливу на режими роботи електричних мереж під час їх оптимізації;
- розробити математичні моделі однофазних ШР, АТ та КШР для аналізу режимів роботи МЕМ за умов структурної несиметрії;
- розробити метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора в онлайн режимі для компенсації міжфазної ємності за критерієм мінімуму тривалості циклу автоматичного повторного вмикання (ОАПВ);
- розробити метод визначення часу вимкнення елегазового вимикача (ЕВ) для налаштувань пристроїв керованої комутації ЕВ для комутацій ШР та АТ, що мають різні схеми з'єднання обвиток та конструкції магнетопроводу;
- дослідити вплив керованої поперечної компенсації зарядної потужності на умови існування та значення параметрів аперіодичної складової струму, резонансних перенапруг та повторної дуги підживлення в циклі спрацювання ОАПВ;
- розробити математичну модель 3-фазної лінії електропередавання з КШР для аналізу аварійних режимів у фазних координатах у разі складних випадків несиметрії;
- розробити математичні моделі груп однофазних АТ та КШР для аналізу можливості використання їх в неповнофазних режимах роботи;
- дослідити та проаналізувати умови виникнення резонансних перенапруг в несиметричних режимах роботи магістральних електричних мереж;
- дослідити та проаналізувати залежність струму дуги підживлення від значень напруги в кінцевих вузлах лінії.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є режими роботи МЕМ.

Предметом досліджень є сукупність моделей, методів аналізу та засобів управління режимами функціонування МЕМ.

Методи дослідження. Теоретичну основу досліджень становлять теорія електромагнетних перехідних процесів в електричних колах, принципи та методи еквівалентування моделей МЕМ. Для математичної формалізації режимів роботи МЕМ, за умов структурної несиметрії, використано методи аналізу багатofазних електричних кіл; для формування математичних моделей використано аналітичні методи аналізу несиметричних режимів МЕМ. Для перевірки достовірності результатів досліджень використано результати натурних експериментів в МЕМ

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено математичну модель трифазної лінії електропередавання надвисокої напруги (ЛЕП НВН), яка враховує вплив коронного розряду на рівень перенапруг за несиметричного режиму роботи ЛЕП, що дає змогу визначати під час моделювання перехідного процесу струми та напруги у будь-якій точці ЛЕП, значно розширюючи можливості аналізу процесів в магістральних електромережах для прийняття обґрунтованих рішень із запобігання небезпечних перенапруг.

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано використання керованих шунтових реакторів для оптимізації режимів роботи магістральних електричних мереж в квазіреальному часі за критерієм мінімуму сумарних втрат активної потужності.

3. Вперше розроблено математичну модель керованого шунтового реактора у вигляді залежностей струмів і напруг основної обвитки реактора від струму обвитки керування, що дає змогу враховувати інерційність зміни потужності реактора під час моделювання перехідних процесів, що виникають внаслідок комутацій однофазних АТ та ШР магістральних електромереж.

4. Для мінімізації сили струму дуги короткого замикання та забезпечення точності визначення моменту увімкнення від'єднаної фази вперше з використанням визначених в реальному часі струмів керованих шунтових реакторів непошкоджених фаз ЛЕП НВН, розроблено метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора, що компенсує міжфазну ємність. Це дає змогу враховувати відмінність параметрів фаз ЛЕП НВН за наявної схеми транспозиції і визначати момент набуття напругою на контактах вимикача значень, що забезпечують задану тривалість безструмової паузи циклу однофазного автоматичного повторного увімкнення.

5. Для налаштування пристроїв керованої комутації з метою запобігання пошкодженню дугогасильних камер елегазового вимикача вперше розроблено метод визначення часу його вимкнення, що використовує досягнення аперіодичними складовими фазних струмів нормативних значень зі збереженням послідовності фаз в момент набуття миттєвих значень струму нульових значень. Зазначеним налаштуванням забезпечується обмеження аперіодичної складової струму в компенсованих ЛЕП надвисокої напруги та унеможливується пошкодження дугогасильних камер.

Практичне значення отриманих результатів.

1.1. Запропоновано метод визначення індуктивності статичного синхронного компенсатора, що забезпечує зниження тривалості циклу спрацьовування ОАПВ шляхом компенсації електростатичної складової струму повторної дуги.

2. Обґрунтовано схему транспозиції, в якій на одному циклі транспозиції використовується два одинарних чергування проводів у просторі, причому ЛЕП поділяється на три рівні частини, на межі яких два проводи із трьох, а саме один центральний та один з крайніх, перехрещені між собою. Виявлено, що кількість транспозиційних опор на ЛЕП зі спрощеною схемою зменшується вдвічі, залишаючи незмінними коефіцієнти несиметрії зворотної послідовності напруги та струму.

3. Реалізація методу аналізу несиметричних режимів МЕМ та вибору засобів їхнього симетрування на основі універсальних розрахункових виразів дозволила виконувати оперативне оцінювання ефективності симетрування неповнофазного режиму груп АТ 750/330/15,75 кВ, ШР 750 кВ та повітряних ліній 750 кВ.

4. Розроблені моделі та методи лягли в основу методичних рекомендацій із впровадження сучасних засобів управління режимами МЕМ, які впроваджено у підрозділах координації роботи АСУ ТП електростанцій та САРЧП Департаменту балансової надійності Дирекції управління ОЕС України НЕК «УКРЕНЕРГО». Використання зазначених рекомендацій в МЕМ ОЕС України сприятиме максимально ефективному використанню пропускної здатності електричних мереж та підвищенню надійності роботи, зокрема за форс-мажорних умов.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, виконаною і оформленою відповідно до вимог.

Робота містить анотацію на двох мовах, список публікацій автора, вступ, шість розділів, висновки, перелік використаних джерел та чотири додатки.

У першому розділі проаналізовано характерні особливості тривалих несиметричних режимів роботи магістральних електричних мереж (МЕМ), зумовлених структурною несиметрією, зокрема вимкненням однофазних шунтових реакторів (ШР) та автотрансформаторів (АТ). Визначено вплив підвищених напруг, що виникають через зменшення навантаження та недостатню компенсацію реактивної потужності, а також відзначено зростання кількості пошкоджень обладнання внаслідок природних чинників і воєнних дій, у тому числі неповнофазних режимів.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню застосування керованих шунтових реакторів (КШР) для оптимізації режимів МЕМ за критерієм мінімізації технологічних втрат електроенергії. Розроблено модель для багатокритеріальної оптимізації параметрів компенсації, що дозволяє визначити оптимальну напругу, реактивну потужність, кількість і тип

компенсувальних пристроїв. Показано економічну ефективність упровадження КШР (термін окупності — близько двох років).

Третій розділ містить обґрунтування схем транспозиції проводів ЛЕП МЕМ та методики оцінювання коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною послідовністю, а також спосіб визначення індуктивності СТАТКОМ для зменшення струму дуги підживлення. Розроблено нові методи інтелектуального однофазного та трифазного АПВ із підвищеною ефективністю за рахунок комутації під час переходу напруги через нульове значення.

Четвертий розділ присвячено симетруванню неповнофазних режимів шляхом регулювання КШР із контролем напруги, визначенню допустимих діапазонів напруг для АТ, а також методам зменшення струмів зворотної та нульової послідовностей з метою підвищення пропускної здатності ліній.

П'ятий розділ зосереджено на визначенні моментів вимкнення елегазових вимикачів для обмеження аперіодичної складової струму. Обґрунтовано принципи керованої комутації та проаналізовано електромагнетні перехідні процеси, що забезпечує необхідну точність визначення моменту комутації.

У шостому розділі розглянуто перехідні процеси під час вмикання фази реактора та ймовірність виникнення резонансних перенапруг залежно від довжини ЛЕП. Рекомендовано перехід до неповнореакторного режиму та застосування плавного регулювання індуктивності КШР. Наведено технічні заходи для обмеження аперіодичної складової струму, серед яких — використання вимикачів із переввмкненими резисторами та керованої комутації як найпростішого й ефективного рішення.

Повнота відображення результатів у публікаціях та апробація роботи.

Основні положення і результати дисертаційної роботи опубліковано у 46 друкованих працях, із них 20 статей – у наукових фахових виданнях України та 7 статей у закордонних періодичних виданнях, з яких 10 включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та WOS; 1 патент на корисну модель України; 3 монографії, 7 – у матеріалах та тезах доповідей на Міжнародних конференціях, які включені у Scopus, 5 розділів у колективних монографіях, які включено в міжнародні наукометричні бази Scopus та WOS.

Представлені в дисертації результати досліджень були апробовані на науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема на таких: IEEE Ukraine conference on electrical and computer engineering, UKRCON (Kyiv, 2017); International conference on modern electrical and energy system, MEES-17 (Kremenchuk, Ukraine, 2017); IEEE 39 th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO-37 (Kyiv, 2017); Міжнародний семінар «Power quality in distribution networks with distributed generation» (Kyiv, 2019); Міжнародні конференції «Контроль і управління в складних системах КУСС» (Вінниця, 2020, 2021, 2024); Міжнародні конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, Україна, 2020, 2024).

В публікаціях основні результати викладено в повній мірі, в працях, які опубліковано у співавторстві, відображено особистий внесок здобувача.

Зауваження до дисертації.

1. Не враховано наявність ТПР у автотрансформаторів 750/330 кВ. Це є принциповим, оскільки струм у регульовальній обвитці залежить від струму збуджуючої, що ускладнює розроблення адекватної математичної моделі та впливає на точність розрахунків режимів.
2. У реальних умовах фазні проводи мають різні марки та перерізи, що призводить до несиметрії. У моделі також не враховано фазування проводів, марки проводів та перерізи ЛЕП НВН, що знижує достовірність результатів у разі аналізу процесів в паузі ОАПВ.
3. Не обґрунтовано підхід до визначення втрат потужності на корону. У роботі запропоновано нову розрахункову модель, але необхідно зазначити, що в Україні відсутня лабораторна база для її експериментальної верифікації. Якщо ж використано існуючі методики, варто вказати, що вони мають значні похибки через спрощення й ігнорування ряду суттєвих факторів (метеоумови, ступінь забруднення ізоляторів, реальний профіль траси лінії тощо), що знижує точність обчислення втрат на корону у МЕМ.
4. У дисертації подано твердження, яке суперечить загальноновизнаним підходам, що конструкція елементів мережі формується не за умовами окремих (наприклад, аварійних) режимів, а з урахуванням забезпечення оптимальних параметрів у найбільш тривалих (номінальних чи близьких до них) режимах роботи. Викладений підхід потребує уточнення чи посилення на джерела, що підтверджують альтернативну точку зору.
5. У роботі використано параметр «опір» для опису СТАТКОМу, що викликає застереження. Зазвичай СТАТКОМи характеризуються максимальною чи номінальною реактивною потужністю (Мвар), динамікою її зміни та регулюванням реактивним опором як еквівалентним параметром.
6. Щодо загальної оцінки оформлення результатів роботи, то в цілому вона висока. Хоч в роботі зустрічаються в незначній кількості граматичні помилки, стилістичні неточності і описки; відсутній список скорочень; за стандартом назви таблиць необхідно друкувати жирним шрифтом; зустрічаються певні відхилення від стандарту і під час оформлення списку використаних джерел.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку отриманих автором результатів, несуть рекомендаційний зміст і є відкритими до обговорення.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота Кучанського В.В. на тему: «**Аналіз та управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії**», що подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.02- електричні станції, мережі та системи, містить самостійно одержані нові наукові результати.

Отримані в дисертаційній роботі результати в сукупності с вирішенням науково-практичної проблеми, що полягає у створенні теоретичних засад, розробленні та практичному застосуванні засобів та методів комплексного аналізу режимів роботи магістральних електричних мереж і електроенергетичних систем, що забезпечує підвищення надійності та функціональності.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. Реферат повністю відображає ключові положення дисертації та описує отримані результати.

Дисертація містить результати власних досліджень, у роботі відсутні академічний плагіат, фабрикації, фальсифікації.

За змістом, цілісністю, оформленням, науковим і практичним значенням вважаю, що дисертаційна робота Кучанського В.В. на тему «Аналіз та управління режимами роботи магістральних електричних мереж за умов структурної несиметрії» відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені «Порядком присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженою постановою Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197. Автор Кучанський Владислав Володимирович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри електроенергетики

та систем управління

Національного університету

«Львівська політехніка»,

доктор технічних наук, професор

Михайло СЕГЕДА

Підпис Михайла СЕГЕДИ підтверджую

Проректор



Микола ЛОГОЙДА

«___»