

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. О. Леонтєв

**СИМЕТРУВАННЯ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ
В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/476>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.311.1

Л 47

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 29.10.2009 р.)

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

В. В. Назаров, доктор технічних наук, професор

Леонтъев, В. О.

Л 47 Симетрування неповнофазних режимів в розподільних електричних мережах : монографія / В. О. Леонтъев. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 164 с.

ISBN 978-966-641-327-0

В монографії розглянуті актуальні проблеми підвищення надійності розподільних електричних мереж при виникненні неповнофазних режимів.

Запропоновані схеми симетрування неповнофазних режимів різного типу і розроблені методи, які дозволяють проводити розрахунки, аналіз і оптимізацію симетрувальних пристроїв в широкому діапазоні зміни навантажень, а також визначені області їх практичного використання.

Монографія розрахована на спеціалістів у галузі електротехніки і студентів, які вивчають відповідні дисципліни.

УДК 621.311.1

ISBN 978-966-641-327-0

© В. Леонтъев, 2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/476>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	5
Вступ.....	6
1. Аналітичний огляд і коротка характеристика схем симетрування неповнофазних режимів у РЕМ.....	8
1.1. Аналіз відключень у РЕМ при неповнофазних режимах....	8
1.2. Схеми симетрування неповнофазних режимів у РЕМ.....	11
2. ССЕМ з реактором і конденсатором у тракті нульової послідовності.....	19
2.1. Вплив неповнофазних режимів на роботу електродвигунів.....	19
2.2. ССЕМ з реактором у тракті нульової послідовності.....	26
2.3. Дослідження неповнофазних режимів у ССЕМ з реактором у тракті нульової послідовності.....	27
2.4. ССЕМ з реактором і конденсатором у тракті нульової послідовності.....	37
2.5. Дослідження аномальних режимів у ССЕМ.....	40
3. ССЕМ із СП трансформаторного типу.....	52
3.1. СП на основі однофазних трансформаторів.....	52
3.2. Дослідження неповнофазних режимів у ССЕМ із СП трансформаторного типу.....	55
3.3. СП на основі двофазного тристержневого трансформатора.....	76
3.3.1. Дослідження неповнофазних режимів у ССЕМ із СП на основі двофазного тристержневого трансформатора з однією регулювальною обмоткою.....	78
3.3.2. Методика практичного розрахунку і вибору оптимальної конструкції СП на основі двофазного тристержневого трансформатора.....	83
4. Области практичного використання ССЕМ.	95
4.1. Використання ССЕМ у післяаварійних неповнофазних режимах.....	95
4.1.1. Система електропостачання при неповнофазних режимах без замикання на землю.....	95

4.1.2. Система електропостачання при неповнофазних режимах із замиканням на землю.....	96
4.2. Система електропостачання з використанням неповнофазних режимів при планових ремонтах без відключення споживачів.....	98
4.3. Використання ССЕМ при пофазному плавленні ожеледі без відключення споживачів.....	101
4.4. Використання ССЕМ при електропостачанні локальних районів по двофазних лініях електропередачі.....	110
4.5 Використання СП трансформаторного типу для регулювання напруг в електричних мережах.....	116
5. Автоматизована система ССЕМ і інформаційна система контролю неповно фазних режимів.....	121
5.1. Загальні положення.....	121
5.2. Дослідження ССЕМ, як об'єктів автоматизації.....	121
5.2.1. Режим однофазного замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю.....	121
5.2.2. Аналіз напруги зсуву нейтралі при неповнофазному режимі в ССЕМ.....	124
5.3. Загальна структура побудови АС ССЕМ.....	131
5.4. Структурні схеми й алгоритми АС ССЕМ.....	135
5.5. Контроль неповнофазних режимів у РЕМ.....	143
Висновки.....	150
Література.....	152

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АПВ	– автоматичне повторне включення
ВЛ	– високовольтна лінія
ДГК	– дугогасильна котушка
ДГР	– дугогасильний реактор
ДПЗ	– два проводи–земля
ЛЕП	– лінії електропередачі
ПЛ	– повітряні лінії
ПУЕ	– правила улаштувань електроустановок
ПП	– планово-попереджувальний ремонт
РЕМ	– розподільні електричні мережі
СП	– симетрувальний пристрій
ССЕМ	– схема симетрування електричної мережі

ВСТУП

Розподільні електричні мережі (РЕМ) складаються з ліній електропередачі ЛЕП) 35–110 кВ, трансформаторних підстанцій 110–35/6–10 кВ, ЛЕП 6–10 кВ, трансформаторних підстанцій 6–10/0,4 кВ. З загальної довжини ліній приблизно 9,0 % складають лінії напругою 35–110 кВ, 45 % – лінії 10 кВ і 46 % лінії 0,38 кВ [1, 2], тобто, РЕМ складають понад 50 % від загальної довжини мереж.

В умовах широкої електрифікації сільськогосподарського виробництва і появи споживачів електроенергії, віднесених до 1-ї категорії надійності, важливого народногосподарського значення набуває проблема підвищення надійності електропостачання.

В даний час вжито ряд заходів щодо підвищення надійності електропостачання споживачів. Число підстанцій 35-110 кВ, що мають два трансформатори з двостороннім живленням, зросло в 1,5 рази і складає 45 % від загального числа, а фідерів 10 кВ із резервним живленням – на 30 % [3, 4]. Вжито заходів із секціонування мереж за допомогою вимикачів, обладнаних пристроями АПВ, автоматичних віддільників, роз'єднувачів та ін.

РЕМ через розгалуженість і досить малу щільність навантаження в сільськогосподарських районах доводиться споруджувати розгалуженими (із глухими відгалуженнями), тому не вдається забезпечити резервуванням усіх споживачів навіть при подвійному живленні [5, 6].

Основними причинами відключень РЕМ є аварійні і планові відключення. Аварійні відключення через неповнофазні режими можуть бути викликані обривами проводів ВЛ, перегоранням запобіжників в одній з фаз на підстанціях 35/10 і 10/0,4 кВ, недовключенням однієї з фаз комутаційними апаратами, перегоранням шлейфів та ін. При цьому з'являється небезпека масового пошкодження електродвигунів через перегрів у процесі роботи й особливо при їхньому пуску і самозпуску з загальмованого стану. Аналіз причин виходу з ладу електродвигунів показує, що 40–60 % від усього числа ушкоджень двигунів відбувається через втрату однієї з фаз у живильних мережах, а витрати на ремонт двигунів сягають 60–80 % їхньої вартості. Тому ослаблення впливу або ліквідація неповнофазних режимів у РЕМ з ізольованою або компенсованою нейтралляма є важливою народногосподарською задачею.

Найбільш ефективним шляхом підвищення надійності електропостачання споживачів і поліпшення якості електроенергії при неповнофазних режимах ЛЕП є розробка, дослідження і впровадження централізованих схем симетрування, що забезпечують тривалу роботу мережі в неповнофазному режимі.

Питанням симетрування неповнофазних режимів в електричних мережах із глухозаземленою нейтраллю напругою 0,38; 110 кВ і вище присвячено багато робіт, у результаті чого практично впроваджені і широко використовуються різного роду симетрувальні пристрої (СП). У РЕМ, незважаючи на всю актуальність задачі, дослідження СП неповнофазних режимів і їхнього практичного використання проводяться недостатньо [7, 8].

Найбільше число відключень у РЕМ пов'язано з проведенням планових ремонтних робіт. Зниження кількості і тривалості відключень ЛЕП для ремонтів може бути досягнуто за рахунок проведення ремонтів під напругою. У цьому випадку доцільно використовувати неповнофазні режими зі спеціальними схемами симетрування, що дозволить розширити обсяг ремонтних робіт і зменшити вартість технічних засобів.

Для максимального скорочення тривалості неповнофазних режимів у споживачів електричної енергії необхідне використання інформаційної системи про неповнофазні режими і керувальної системи для складання схем симетрування електричної мережі (ССЕМ).

Метою цієї роботи є розробка і дослідження ефективних схем симетрування неповнофазних режимів для підвищення надійності РЕМ, визначення областей практичного використання ССЕМ, а також розробка математичних моделей, алгоритмів функціонування і побудови основних блоків автоматизованої системи (АС) і інформаційної системи (ІС) контролю неповнофазних режимів в РЕМ.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД І КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА СХЕМ СИМЕТРУВАННЯ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ У РЕМ

1.1 Аналіз відключень у РЕМ при неповнофазних режимах

Проведений аналіз причин відключень повітряних ліній (ПЛ) показав, що одним з розповсюджених видів ушкодження РЕМ є неповнофазні режими. Аварійні відключення через неповнофазні режими можуть бути викликані обривами проводів ПЛ, перегоранням запобіжників в одній з фаз на підстанціях 35/10 і 10/6,38 кВ, недовключенням одного з ножів роз'єднувача або контакту вимикача, перегоранням шлейфів та ін. До планових відключень, що можуть бути виконані з використанням неповнофазних режимів, відносять заміну і перетяжку проводів, заміну ізоляторів, ревізію й встановлення розрядників, виявлення дефектних ізоляторів, перевірку контактних з'єднань та ін.

У таблиці 1.1 наведений аналіз відключень ПЛ 6–10–35 кВ на 100 км згідно з [9–18], які обумовлені неповнофазними режимами. Статистичні дані показують, що відключення споживачів коливаються в досить широкому діапазоні й бувають тривалими.

Значна кількість неповнофазних режимів обумовлюється перегоранням запобіжників 6–35 кВ на підстанціях 35/10 і 10/0,4 кВ в РЕМ. Слід зазначити, що згідно з [17] такі ушкодження, як перегорання запобіжників, недовключення одного з ножів комутаційних апаратів не є аварією і тому не реєструються при обліку відключень. В зв'язку з цим дані про неповнофазні режими, які наведені в таблиці 1.1, є заниженими. Досвід експлуатації показує, що на 100 комплектів запобіжників ПСН-35 щорічно припадає близько 25 випадків помилкової і не-селективної роботи і тільки 5 випадків – правильної.

Аналіз наведених у таблиці 1.1 статистичних даних показує, що аварійні відключення за часом усіх відключень у середньому складають 42 %, а ремонтні – 58 %. У зв'язку з цим постає задача розробки спеціальних схем електропостачання, при використанні яких можливе скорочення часу відключення споживачів РЕМ при неповнофазних режимах в аварійних ситуаціях, а також при проведенні планових ремонтних робіт.

В даний час в РЕМ встановлення спеціальних захистів від неповнофазних режимів не передбачається [19–22]. При цьому, як уже

Таблиця 1.1 – Аналіз відключень ПЛЛ 6–35 кВ пов’язаних з неповнофазними режимами на 100 км ліній у рік

Причини відключень ПЛЛ	Джерела інформації, у % від загальної кількості відключень										Тривалість відключень, год.		
	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14,15]	[16]	[17]	[18]	Макс.	Мін.	Середнє	
1. Обрив проводів і в’язань ПЛЛ–35 кВ	9	–	13,01	–	–	–	–	–	6	5,35	6,25	5,8	
	7,3	44,7	–	51	–	10,14	35,5	41,9	1,9	2,7	8,6	5,65	
2. Заміна, ремонт, перегрівка проводів ПЛЛ–35 кВ	6,1	–	10,81	–	–	–	–	–	–	5,1	9,12	7,11	
	2,8	9,5	–	–	–	–	–	–	–	4,2	–	4,2	
3. Заміна ізоляторів ПЛЛ–35 кВ	1,7	–	10,03	–	46,7	–	–	–	–	3,7	9,25	6,48	
	1,2	10,5	–	20	–	–	37,8	–	–	1,9	8,7	5,3	
4. Ревізія, встановлення розрядників ПЛЛ–35 кВ	13	–	16,2	–	–	–	–	–	17,5	6,3	7,37	6,84	
	2,9	–	–	–	–	–	–	–	–	3,5	–	3,5	
ПЛЛ–35 кВ	29,8	–	49,87	7	46,7	–	–	–	23,5	–	–	44,3	
	14,2	64,7	–	–	–	10,14	73,3	41,9	–	–	–	40,9	

відзначалося, з'являється небезпека масового пошкодження електродвигунів

Аналіз причин виходу з ладу електродвигунів, проведений різними авторами [23–37], показує, що 40–50 % від усього числа пошкоджень двигунів відбувається через втрату однієї фази. Так, наприклад, у роботі [26] узагальнений матеріал з аварійності двигунів на підприємствах Полтавської області, з якого випливає, що тільки за один рік вийшло з ладу 7776 електродвигунів загальною потужністю 38800 кВт. При цьому 35 % електродвигунів вийшло з ладу через утрату фази в живильних мережах, а витрати на ремонт двигунів досягають 60–80 % їхньої вартості [28], що приносить значний народногосподарський збиток від простою виробничих машин, порушення технологічного процесу і простою робочої сили.

Відомо, що для захисту в промислових і сільськогосподарських електроприводах застосовують головним чином теплові реле з біметалевими елементами. Результати досліджень [29] показують, що ефективність цих реле досить мала у випадку, коли перевантаження електродвигуна викликане відсутністю однієї з фаз живильної мережі. У роботі [30] відзначається, що тільки в 21 % випадків обриву фаз теплові реле відключають двигуни від мережі, а у випадку з'єднання обмоток двигуна в трикутник – ще менше [34].

Отже, виникнення неповнофазних режимів приводить не тільки до зниження надійності електропостачання, порушення технологічного процесу, але і до значного народногосподарського збитку, в основному, від виходу з ладу електродвигунів. Тому ліквідація або ослаблення наслідків неповнофазних режимів у живильних мережах є актуальною задачею.

У ряді організацій запропоновані пристрої, що дозволяють здійснювати контроль і сигналізацію неповнофазних режимів [32–39]. Однак ці пристрої дають можливість лише виявити неповнофазні режими і, в кращому випадку, відключити трифазні електродвигуни.

Ідеальним кінцевим результатом розробок було б не індивідуальне відключення електродвигунів, а забезпечення їхнього нормального функціонування без відключення при настанні неповнофазних режимів.

Як було показано, найбільше число відключень в РЕМ пов'язане з проведенням планових ремонтних робіт. Виконані дослідження показали, що для розширення об'єму ремонтних робіт в РЕМ під напру-

гою, спрощення і здешевлення технічних засобів виконання цих робіт доцільно використання неповнофазних режимів зі спеціальними схемами симетрування. Це дозволить виконувати такі роботи, як заміна і перетяжка проводів, перевірка контактних з'єднань, пофазне виявлення і заміна дефектних ізоляторів й інші.

Отже, неповнофазні режими зі спеціальними схемами симетрування можуть бути використані не тільки при аварійному відключенні фази лінії, але й при виконанні планових ремонтів і випробувань на проводах ПЛІ під напругою, що підвищить надійність РЕМ.

1.2 Схеми симетрування неповнофазних режимів у РЕМ

При експлуатації РЕМ неповнофазні режими реалізуються у вигляді двох основних систем. Це система «два проводи–земля» (ДПЗ), в якій заземлюється вивід трансформаторів обмотки однієї з фаз, а дві інші знаходяться відносно землі під лінійною напругою, що використовується в мережах з ізольованою нейтраллю, і система роботи двох фаз при відключенні третьої або роботи на одній фазі при відключенні двох інших, яка використовується у мережах із глухим заземленням нейтралі.

З роботи [40] випливає, що 28,8 % енергосистем країни не використовують неповнофазні режими для досить високої надійності електропостачання, 45,7 % мають потребу у використанні неповнофазних режимів, але фактично не можуть їх застосувати через різних ряд системних обмежень, а 25,5 % використовують неповнофазні режими на лініях 35–220 кВ. При цьому 70 % енергосистем вважають доцільним розробку способів підвищення пропускної здатності ПЛІ у неповнофазних режимах.

За останні роки накопичений досвід експлуатації мереж при неповнофазних режимах у мережах із глухозаземленою нейтраллю, який дозволяє підвищити надійність електропостачання споживачів. Особливого значення ці режими набувають для одноланцюгових тупикових підстанцій [41]. З введенням автоматичного повторного включення з наступним переведенням у неповнофазний режим, якщо є стійке ушкодження на одному з фазних проводів, у багатьох випадках виявляється найбільш вдалим вирішенням проблеми підвищення надійності таких ліній [42]. Неповнофазні режими необхідно передбачати не

тільки для радіальних ліній, але й в кільцевих мережах з відпаюваними трансформаторними підстанціями. У таких мережах споживачі мають двостороннє живлення, однак пошкодження лінії спричиняє відключення всіх відпаюваних підстанцій по обидва боки. Тому кільцеві мережі в даному випадку не відрізняються від поодиноких радіальних ліній [43]. У ряді енергосистем, наприклад «Коміенерго», більшість споживачів електроенергії значно віддалені від джерел електропостачання (до 230 км) і їхнє електропостачання здійснюється по радіальних лініях з напругою 110 кВ. Тому забезпечення високої надійності електропостачання пов'язано з великими додатковими витратами. Надійність знижується ще і тому, що всі лінії 110 кВ проходять по бездоріжжю, і їхня експлуатація здійснюється всюдиходами і вертольотами [44]. Для таких споживачів електричної енергії необхідно передбачати використання неповнофазних режимів, тому що в більшості випадків ушкоджується одна з фаз лінії. Авторами робіт [45–48] на підставі статистики й аналізу попиту показана доцільність використання неповнофазних режимів для підвищення надійності електропостачання, наводяться розрахунки очікуваної економічної ефективності. Питанням дослідження неповнофазних режимів роботи ліній і трансформаторів у мережах із глухозаземленою нейтраллю присвячені роботи [49–54], що підтверджують прийнятність отриманих параметрів режиму для практичного використання.

При розробці заходів підвищення надійності електропостачання споживачів в РЕМ необхідно передбачати створення комплексу пристроїв, що дозволяють здійснювати безперебійне живлення споживачів якісною електроенергією при неповнофазних і несиметричних режимах мережі в темпі часу виявлення пошкодження. Принципово це можливо при переведенні електропостачання споживачів на систему ДПЗ, особливістю функціонування якої є те, що в нормальному режимі живлення споживачів здійснюється по звичайній трифазній лінії, а у випадку пошкодження однієї з фаз відбувається замикання пошкодженої фази на землю на живильній і всіх споживчих підстанціях [55]. Як уже відзначалося, у цієї системи ізоляція лінії знаходиться під лінійною напругою, що при тривалій експлуатації може приводити до аварійних відключень лінії. Узагальненням досвіду експлуатації РЕМ, що працюють з використанням землі як третього проводу, встановлено, що вони мають низьку експлуатаційну надійність. У них число ві-

дключень лінії на 100 км довжини в рік у десятки разів перевищує питому кількість відключень ліній у звичайних мережах з ізольованою нейтраллю [56–58]. Крім цього, при значній кількості підстанцій, підключених до магістральної лінії, використовувати зазначені засоби автоматизації практично неможливо, тому що потрібно встановити по три однофазних вимикачі на кожній з них, а також пристрої визначення пошкодженої фази. Системі ДПЗ властиві й інші недоліки, наприклад, ця передача є несиметричною, тому в ній потрібне використання додаткових (СП).

До числа важливих факторів, що впливають на експлуатацію РЕМ, відносять прийнятий у них режим заземлення нейтралі.

Згідно з ПУЕ прийнято два режими нейтралі розподільчих мереж: ізольована нейтраль при струмах замикання на землю, які не перевищують значення, зазначені в роботі [59], і нейтраль, заземлена через дугогасильний реактор (ДГР), називана в цьому випадку компенсованою.

За рубежом широко застосовується заземлення нейтралі через активні й індуктивні опори різної величини. При цьому штучно створюваний додатковий струм замикання на землю нерідко досягає декількох десятків і сотень ампер [60, 61]. У компенсованих мережах зазвичай створюється також додатковий активний струм, головним чином для виконання захисту [62, 63]. Останнім часом з'явилися пропозиції відмовитися від компенсації ємнісного струму і повертатися до глухого заземлення або через резистор [64–67]. Багаторічний досвід експлуатації електричних мереж підтвердив ефективність використання ізольованої і компенсованої нейтралі, тому при розробці схеми для підвищення надійності електропостачання трифазних споживачів при неповнофазних режимах необхідно враховувати прийнятий режим нейтралі.

З метою створення можливості номінальних напруг мережі без заміни і посилення ізоляції, а також використання неповнофазних режимів у сільськогосподарських мережах розроблений спосіб розосередженого заземлення нейтралі [68]. Сутність цього способу заземлення нейтралі полягає в тому, що заземлюються нейтралі обмоток вищої напруги в споживчих підстанціях. Схема з'єднання обмоток живильного трансформатора залишається без змін. Однією із переваг цієї схеми є можливість підвищення надійності електропостачання

споживачів при неповнофазних режимах. При цьому виникають струми нульової послідовності розтікаються в усіх напрямках, де заземлені нейтралі трансформаторів. Це дає змогу одержати на вторинній стороні несиметричну, але трифазну систему напруг. Однак у цій мережі струми нульової послідовності, що практично протікають по всіх ділянках ліній, збільшують втрати потужності і несиметрію напруг. При цьому потужності трансформаторних підстанцій необхідно вибирати з врахуванням можливого додаткового струму, що протікає через контур нульової послідовності. Крім цього, несиметричні струми протікають через вторинну обмотку трансформатора живильної підстанції, що також збільшує несиметрію у всій мережі.

Отже, продовження досліджень неповнофазних режимів, особливо для мереж 6–35 кВ, надзвичайно актуальне. Доцільність цих режимів і в тому, що вони можуть бути використані для планових пофазних ремонтів ЛЕП, а також при плавленні ожеледі на проводах ПЛІ в РЕМ без відключення споживачів. Це дозволить значною мірою підвищити надійність електропостачання споживачів електричної енергії.

Відомо [50, 51], що неповнофазні режими пов'язані з обмеженням споживачів, тому що приводять до перевантаження окремих елементів передачі, особливо трансформаторів, через підвищений перегрів двох перевантажених фаз [69–71]. Але найбільш істотним недоліком неповнофазних режимів є зниження якості електричної енергії.

Зростаюча роль електричної енергії в народному господарстві висуває на перший план питання її якості, що впливає на техніко-економічні показники роботи як окремих елементів, так і систем електропостачання в цілому [72, 73].

Погіршення якості електричної енергії завдає економічної шкоди народному господарству, яка полягає в зменшенні кількості і зниженні якості продукції, що випускається, внаслідок порушення технологічних процесів, у збільшенні витрати енергії в споживачів і її втрат у мережах. Зниження якості електроенергії по-різному впливає на роботу різних електроспоживачів.

Оскільки якість електроенергії може погіршуватися, то необхідно вживати заходів, спрямованих на покращення показників якості. Ці заходи пов'язані з додатковими витратами, отже їх проведення повинно бути економічно обґрунтованим. Одним з досить важливих показників якості є несиметрія трифазної системи напруг.

Несиметрія трифазної системи напруг характеризується значенням напруги зворотної послідовності [72–74], що довготривало допустимо на затискачах будь-якого трифазного електроспоживача в межах до 2 % від номінальної напруги за винятком асинхронних електродвигунів, для яких допустима несиметрія більше 2 % що пов'язано з умовами допустимого нагрівання при даному коефіцієнті завантаження з урахуванням відхилення напруги прямої послідовності.

Несиметрія струмів і напруг не в однаковій мірі впливає на умови роботи електроспоживачів, наприклад:

- у синхронних генераторах електричних станцій вона приводить до виникнення струмів вищих гармонік, що викликають додаткове нагрівання ротора і статора [75], корисний обертовий момент пропорційний квадрату коефіцієнта несиметрії напруг, збільшуючи при цьому нагрівання двигунів струмами зворотної послідовності, що приводить до старіння ізоляції і зменшення їхнього терміну служби [76, 77];

- у пристроях релейного захисту автоматики і сигналізації несиметрія, порушуючи умови їхньої роботи, приводить до помилкових спрацьовувань [41];

- в електричних системах знижує їх стійкість [42].

Дослідження несиметричних режимів і методів симетрування проводяться в різних організаціях: ІЕД АН України, Національному університеті «Львівська політехніка», Московському енергетичному інституті (ТУ), Сиб НДІЕ та ін. Значний внесок з цього напрямку досліджень зробили Н. А. Мельников, А. К. Шидловський, А. Н. Мілях, В. Г. Кузнецов, Ю. Ф. Королюк, Л. А. Ніконец та ін.

Для компенсації складової напруги зворотної послідовності при неповнофазних режимах у мережах із глухозаземленою нейтраллю і збільшення при цьому пропускної можливості розроблено ряд способів і пристроїв.

У роботах [78, 79] запропоновано включати на стороні нижчої напруги підвищувального трансформатора електричної станції в одну з фаз додатковий опір, як такий якого пропонувалося використовувати індуктивний опір реактора. Однак включення додаткового опору приводить до зниження струму прямої послідовності. Тому замість включення в одну з фаз на стороні трикутника трансформатора «зірка з нулем–трикутник» індуктивного опору виявилось економічніше включити в дві інші фази ємнісні опори тієї ж величини [80, 81]. За рахунок

зниження складової напруги зворотної послідовності стає можливим збільшити пропускну здатність лінії. Аналогічного ефекту досягають включенням у нейтраль трансформатора батареї конденсаторів. Симетрувальний ефект у цьому випадку полягає в зниженні опору нульової послідовності, що носить в основному, індуктивний характер [82, 83].

Для симетрування неповнофазних режимів у мережах із глухозаземленою нейтраллю можуть використовуватися засоби, що використовуються в системах електропостачання: наприклад, конденсатори, призначені для підвищення коефіцієнта потужності, якщо їх підключити несиметрично між фазами мережі. Особливо перспективними схемами симетрування є конденсаторні установки з пофазним регулюванням їхньої потужності, що одночасно виконують роль регуляторів втрат у мережах [84]. Дослідження режимів симетрування за допомогою батарей статичних конденсаторів описані в роботах [85–88]. До недоліків такого способу симетрування відносять необхідність встановлення додаткових реакторів з метою досягнення високого симетрувального ефекту, а також складність виконання пофазного керування при зміні ємності конденсаторних установок і індуктивності симетрувальних елементів. СП такого типу, як правило, дуже дорогі, що знижує ефективність їхнього використання.

Складові напруги зворотної і нульової послідовностей при виникненні неповнофазних режимів на одній або декількох лініях у системі можна компенсувати за допомогою задавальних струмів. Задавальний струм нульової послідовності можна одержати за допомогою пофазно регульованого трансформатора. При цьому за рахунок небалансу е. р. с. у трикутнику трансформатора вторинної обмотки виникає струм, якому в первинній обмотці відповідає система струмів нульової послідовності. Задавальний струм зворотної послідовності одержують шляхом використання лінійного регулятора (вольтододаткового трансформатора, регульованого під навантаженням) і спеціального синхронного компенсатора. Вторинна обмотка регулятора включається перехрещеними фазами в електричне коло синхронного компенсатора, за допомогою якого змінюється е. р. с. зворотної послідовності в цьому колі, а отже і струм зворотної послідовності [86]. Для мереж напругою 330 кВ і вище запропоновано використовувати шунтувальні реактори в поєднанні з батареями конденсаторів [89–91], а також відключену фазу лінії з метою створення додаткового струму, що змен-

шує струми зворотної послідовності [92, 93]; при цьому в схемі зростають складові струмів нульової послідовності.

Розглянуті вище СП можуть бути використані в мережах із глухо-заземленою нейтраллю. У мережах з ізольованою нейтраллю при відсутності однієї фази виникає однофазний режим, тому застосування відомих засобів симетрування неможливе. У розглянутому випадку можуть бути використані перетворювачі однофазної напруги в трифазну. Розроблено велику кількість схем і конструкцій статичних перетворювачів числа фаз, наприклад, індуктивно-ємнісні перетворювачі зі стабілізацією симетрії напруг шляхом плавного регулювання параметрів фазоперетворювальних пристроїв [94, 95]. У цих пристроях зі зміною навантаження необхідно одночасно регулювати індуктивність і ємність перетворювальних пристроїв, що ускладнює конструкцію і збільшує їхню вартість. При цьому потужність конденсаторних батарей може перевищувати потужність навантаження електроспоживачів [96].

Статичні перетворювальні числа фаз дозволяють одержувати симетричну напругу в споживачів, а джерело живлення працює в несиметричному режимі, що приводить до зниження якості напруги в інших споживачів, підключених до цієї підстанції.

Проведений аналіз існуючих СП для неповнофазних режимів свідчить про необхідність проведення подальших досліджень з розробки нових схем симетрування, особливо ця задача має актуальне значення для мереж з ізольованою нейтраллю.

В даний час проблема перетворення параметрів електричної енергії і забезпечення її необхідної якості займає одне з провідних місць. Розвиток теорії і розробка на її основі нових принципів перетворення параметрів електромагнітної енергії дозволяють побудувати перетворювачі енергії з різними регульованими параметрами [97]. Це стосується й розробки нових пристроїв симетрування неповнофазних режимів у мережах з ізольованою нейтраллю.

При експлуатації електричних систем несиметричні і неповнофазні режими роботи розглядаються як допустимі, отже СП повинні розглядатися як обов'язкові елементи електричних систем, що вибираються при проектуванні і використовуються в процесі експлуатації. Параметри несиметричних режимів повинні визначатися і регулюватися подібно до того, як це здійснюється для звичайних симетричних робочих режимів, а саме – з техніко-економічних умов. Техніко-

економічними розрахунками повинні обґрунтовуватися і всі параметри СП – їхній тип, номінальна потужність, місця встановлення, система керування, режими роботи і т. д. – разом з вибором параметрів всіх окремих елементів системи електропостачання. При цьому необхідно прагнути, щоб СП, по можливості, могли бути використані в різних режимах роботи електричної системи.

При розробці СП необхідно враховувати такі вимоги, як підтримка заданого симетричного режиму у всьому діапазоні зміни величини і характеру навантаження, забезпечення високих енергетичних показників симетрування, мінімальна встановлена потужність силової частини, висока надійність роботи, мінімальна кількість регульованих елементів, простота системи керування, мала вага і розміри.

Виходячи з вищевикладеного, у даний час виникає обґрунтована необхідність продовження теоретичних і експериментальних досліджень пристроїв симетрування неповнофазних режимів для підвищення надійності електропостачання РЕМ.

2 ССЕМ З РЕАКТОРОМ І КОНДЕНСАТОРОМ У ТРАКТІ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ

2.1 Вплив неповнофазних режимів на роботу електродвигунів

Неповнофазні режими ЛЕП у мережах із глухозаземленою нейтраллю широко відомі і використовуються в практиці експлуатації електричних систем.

У мережі з ізольованою нейтраллю відключення одного з проводів ЛЕП приводить до того, що мережа з трифазного режиму переходить в однофазний. Струми в двох фазах, що залишилися, стають рівними за величиною і протилежними за напрямком. Вони містять складові прямої і зворотної послідовностей [98]. У цьому випадку підсумковий обертальний момент електродвигунів складається з моментів прямої M_1 і зворотної M_2 послідовностей. Отже,

$$M_{\text{рез}} = M_1 - M_2 = K_1(U_1^2 - U_2^2).$$

При загальмованих двигунах, коли ковзання дорівнює одиниці, у випадку відключення однієї фази, напруги прямої і зворотної послідовностей за абсолютним значенням рівні між собою, і тоді підсумковий момент $M_{\text{рез}} = M_1 - M_2 = 0$, у зв'язку з цим запуск електродвигунів стає неможливим. Крім цього, як вже відзначалось, велика ймовірність виходу зі строю електродвигунів через перегрів у процесі роботи, особливо при їхньому пуску або само запуску з загальмованого стану, нанесення значних збитків споживачам електроенергії.

У мережі з глухозаземленою нейтраллю при неповнофазних режимах електродвигуни можуть працювати деякий час, термін якого залежить від ступеня несиметрії напруги і струму в обмотці статора. Визначення гранично можливої тривалості роботи електродвигунів при неповнофазному режимі має важливе значення для експлуатаційного персоналу, оскільки за цей час можна вжити заходи, здійснити, наприклад, перехід на резервне обладнання для запобігання наслідків, пов'язаних з порушенням технологічного процесу підприємства.

Несиметрія напруги в значній мірі впливає на струм в обмотці статора.

Значення струму прямої послідовності в статорі I_1 , що визначає навантаження двигуна, у залежності від процентного значення напру-

ги зворотної послідовності U_2 стосовно номінальної напруги U_H ($\alpha = U_2 / U_H$) наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення струму прямої послідовності в залежності від напруги зворотної послідовності

$\alpha = U_2 / U_H$	0,05	0,1	0,15	0,2
$\frac{I_1}{I_H}$	0,75	0,5	0,25	0,2

З таблиці видно, якщо, наприклад, напруга зворотної послідовності складає 10 %, то двигун за струмом необхідно розвантажити до 50 %.

Дослідимо більш детально перевантажувальну здатність трифазного двигуна в однофазному режимі [99–101].

Струм однофазного режиму двигуна може бути визначений за формулою:

$$I = \frac{\sqrt{3}U_{ДВ}}{Z_1 + Z_2}, \quad (2.1)$$

де $U_{ДВ}$ – напруга на затискачах електродвигуна;

Z_1 – опір прямої послідовності двигуна;

Z_2 – опір зворотної послідовності двигуна.

Струм трифазного режиму електродвигуна визначається за формулою:

$$I_{(3)} = \frac{U_{ДВ}}{Z_1}, \quad (2.2)$$

Відношення $I / I_{(3)}$ визначає співвідношення струму однофазного режиму і струму трифазного режиму.

$$\frac{I}{I_{(3)}} = \frac{\frac{\sqrt{3}U_{ДВ}}{Z_1 + Z_2}}{\frac{U_{ДВ}}{Z_1}} = \frac{\sqrt{3}Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}}. \quad (2.3)$$

Як видно з формули (2.3), ця залежність визначається співвідношенням опорів прямої і зворотної послідовностей.

Нехтуючи активним опором обмотки статора і струмом намагнічування опори \mathbf{Z}_1 і \mathbf{Z}_2 можна визначити за такими формулами:

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{R}_{2(1)}^1}{\mathbf{S}} + \mathbf{j}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_{2(1)}^1), \quad (2.4)$$

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{\mathbf{R}_{2(2)}^1}{2 - \mathbf{S}} + \mathbf{j}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_{2(2)}^1), \quad (2.5)$$

де $\mathbf{R}_{2(1)}^1$, $\mathbf{R}_{2(2)}^1$, $\mathbf{x}_{2(1)}^1$, $\mathbf{x}_{2(2)}^1$ – приведені активні й індуктивні опори обмотки ротора прямої і зворотної послідовностей,

\mathbf{S} – ковзання.

З врахуванням (2.4) і (2.5) відношення $\mathbf{I}/\mathbf{I}_{(3)}$ визначається з виразу:

$$\frac{\mathbf{I}}{\mathbf{I}_{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{\mathbf{R}_{2(2)}^1/2 - \mathbf{S} + \mathbf{j}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_{2(2)}^1)}{\mathbf{R}_{2(1)}^1/\mathbf{S} + \mathbf{j}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_{2(1)}^1)}}. \quad (2.6)$$

При переході двигуна в однофазний режим ковзання в стійкій частині механічної характеристики змінюється незначно, особливо при великих кратностях максимального моменту, більших 2. Тому відношення струму однофазного режиму двигуна до струму трифазного режиму мало залежить від навантаження.

Для аналітичного визначення цього відношення можна скористатися виразом (2.6), спрямувавши ковзання \mathbf{S} до нуля:

$$\frac{\mathbf{I}}{\mathbf{I}_{(3)}} \Big|_{\mathbf{S} \rightarrow 0} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{\mathbf{R}_{2(2)}^1/2 - \mathbf{S} + \mathbf{j}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_{2(2)}^1)}{\mathbf{R}_{2(1)}^1/\mathbf{S} + \mathbf{j}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_{2(1)}^1)}} = \sqrt{3}. \quad (2.7)$$

Отже, можна вважати, що струм однофазного режиму більше струму трифазного режиму електродвигуна в 1,73 рази. Для різних

двигунів відношення струму однофазного режиму до струму трифазного режиму знаходиться в межах (1,65-2,0).

При загальмованому роторі в однофазному режимі $Z_1=Z_2$, тоді відношення

$$\frac{I_{к.з.}}{I_{(3)к.з.}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86. \quad (2.8)$$

Таким чином, при загальмованому роторі струм однофазного режиму менше струму трифазного режиму в 0,86 рази.

При середньому збільшенні струму в 1,73 рази втрати енергії статорної обмотки в однофазному режимі складуть

$$\Delta P = 2(1,73 \cdot I_{(3)})^2 \cdot R. \quad (2.9)$$

Втрати енергії в трифазному режимі:

$$\Delta P_{(3)} = 3I_{(3)}^2 \cdot R. \quad (2.10)$$

Тоді відношення втрат енергії в однофазному режимі до втрат енергії трифазному режимі складуть:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{(3)}} = \frac{2(1,73I_{(3)})^2 \cdot R}{3I_{(3)}^2 \cdot R} = 2. \quad (2.11)$$

Тобто, втрати енергії в однофазному режимі в два рази перевищують втрати енергії в трифазному режимі.

Розглянемо як змінюються струми і втрати енергії при переході в однофазний режим двигуна, обмотки якого з'єднані трикутником.

При з'єднанні обмотки двигуна трикутником і обриві, наприклад фази А, струми протікають по всіх трьох фазах двигуна, при цьому напруга двигуна U_{AB} не залежить від навантаження, а напруги фаз U_{CA} і U_{BC} в однофазному режимі змінюються в залежності від ступені завантаження двигуна.

Фазні струми двигуна легко одержати, розклавши лінійний струм на симетричні складові. У результаті дійсне значення струму фаз двигуна знаходиться як сума фазних струмів симетричних складових:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{I}_B}{3}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{2}{3}\dot{I}_B, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{I}_B}{3}. \quad (2.12)$$

З виразу (2.12) випливає, що струм у фазі **В – С**, що знаходиться під повною напругою, буде в два рази більше струму інших фаз двигуна й у 2/3 рази менше лінійного струму.

З наведеного аналізу роботи трифазних електродвигунів в однофазному режимі випливає, що якщо двигун у трифазному режимі працював в області нормальних навантажень, то обрив фази (перехід двигуна в однофазний режим роботи) приводить до зростання струму статора, як відзначалося вище, у середньому в 1,73 рази.

При таких перевантаженнях двигуни можуть продовжувати працювати протягом деякого часу.

При визначенні тривалості роботи двигуна в однофазному режимі необхідно враховувати трохи погіршені умови охолодження його обмоток. В однофазному режимі при великих навантаженнях збільшується ковзання, а отже, зменшуються обороти ротора двигуна, тобто погіршуються умови охолодження обмоток. Для вентильованих машин можна прийняти, що коефіцієнт тепловіддачі змінюється від швидкості обертання ротора в степені 0,8. Втрати можна прийняти як такі, що змінюються пропорційно квадратові струму. Тоді при зміні швидкості обертання двигуна струм його необхідно змінити пропорційно зміні швидкості обертання в степені 0,4, тобто

$$\frac{I}{I_H} \approx \left(\frac{n}{n_H} \right)^{0,4}. \quad (2.13)$$

Значне зменшення обертів двигуна в однофазному режимі має місце в тому випадку, коли його навантаження в нормальному режимі було близьке до номінального. Наприклад, для двигуна (АО 83–4,55 кВт, 1470 об/хв, 220/380 В, 178/103 А) попередньо навантаженого за струмом до 98 А, при обриві фази його оберти зменшилися до 1440

об/хв, тобто ковзання збільшилося вдвічі. Для отримання тієї ж ефективності охолодження, що і при номінальних обертах ротора, струм статора необхідно було зменшити, відповідно з (2.13), у $\left(\frac{1440}{1470}\right)^{0,4} = 0,92$, тобто приблизно на 10 %.

Якщо розвантажити двигун за струмом неможливо, то, час роботи зі зниженими обертами повинен бути зменшений.

Перевантажувальну здатність двигуна з урахуванням особливостей однофазного режиму можна визначати за допомогою такої формули:

$$t = T \ln \frac{k_0^2 - k_3^2}{k_0^2 - \frac{\tau}{\tau_H}}, \quad (2.14)$$

де k_0 – кратність струму в однофазному режимі двигуна;

k_3 – кратність струму в трифазному режимі двигуна;

τ – перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища;

τ_H – номінальне перевищення температури двигуна над температурою навколишнього середовища;

T – постійна часу нагрівання обмотки.

Формула (2.14) дозволяє враховувати тепловіддачу, тобто більш точно визначати тривалість роботи двигуна при перевантаженнях, якщо час перевантаження t наближається до величини постійного часу нагрівання обмотки.

Якщо прийняти T рівним 610 с, а додаткове перевищення температури $\Delta\tau = 30^\circ$, то

$$t = 610 \ln \frac{k_0^2 - k_3^2}{k_0^2 - \frac{\tau_H + \Delta\tau}{\tau_H}} = 610 \ln \frac{k_0^2 - k_3^2}{k_0^2 - 1,4}. \quad (2.15)$$

Прийнявши середнє збільшення струму однофазного режиму щодо струму трифазного режиму в 1,73 рази і з огляду на погіршення

Наукове видання

ЛЕОНТЬЄВ Василь Олександрович

**СИМЕТРУВАННЯ НЕПОВНОФАЗНИХ РЕЖИМІВ В
РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено В. Леонтьєвим

Підписано до друку 11.11.2009 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 9,47.
Наклад 100 прим. Зам № 2009-184

Вінницький національний технічний університет,
комп'ютерний інформаційно-видавничий центр.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/476>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>