

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

ДЕВЯТКО МАРИНА ВАСИЛІВНА

УДК 621.316.1

**КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЙНО-СИМЕТРУВАЛЬНИМИ
ПРИСТРОЯМИ ЗА БАГАТОКРАТНОЇ НЕСИМЕТРІЇ НАВАНТАЖЕНЬ
В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті
Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Бурбело Михайло Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри електротехнічних систем
електроспоживання та енергетичного
менеджменту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
Національний технічний університет „ХПІ”,
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту
України, завідувач кафедри автоматизації
енергосистем

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Танкевич Євгеній Миколайович,
Інститут електродинаміки НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
автоматизації електричних систем

Захист відбудеться “ **30** ” **березня** 2012 р. о **9:30** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ **14** ” **лютого** 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В районних мережах енергопостачальних компаній мають місце несиметричні режими, які зумовлені однофазними електроприймачами. Проведені експериментальні дослідження свідчать, що показники, якими нормується у відповідності до ГОСТ 13109-97 несиметрія напруги, в ряді випадків виходять за нормовано та гранично допустимі межі.

Дана обставина та те, що параметри несиметрії напруги змінюються в часі, ставить задачу керування несиметрією режиму в реальному часі. Для такого керування доцільно використовувати керовані симетрувальні пристрої (СП) на базі батарей статичних конденсаторів, які одночасно дозволяють здійснювати компенсацію реактивних навантажень.

Симетрування напруги в будь-якому вузлі розподільної мережі змінює несиметрію напруги в інших вузлах. Тому, керуючі впливи СП, які використовуються в мережі, повинні погоджуватись. Крім того, ввімкнення конденсаторів змінює оптимальні рішення внаслідок зміни напруги і впливу статичних характеристик вузлів навантажень.

В наукових роботах, присвячених питанням керування несиметрією режиму, така задача недостатньо досліджена і залишається не вирішеною.

Тому науково-прикладна задача дослідження, яка полягає у вдосконаленні процесу керування симетрувальними пристроями за багатократною несиметрії навантажень, є актуальною.

Дисертаційне дослідження спрямоване на підвищення ефективності використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв щодо покращення рівня компенсації реактивної потужності та зменшення несиметрії напруг в районних електричних мережах енергопостачальних компаній.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились відповідно до наукового напрямку кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” Вінницького національного технічного університету (ВНТУ). Дисертаційна робота виконувалася відповідно до „Програми наукових досліджень і розробок Міністерства освіти і науки України за пріоритетними напрямками розвитку науки та техніки” у рамках фінансування держбюджетної науково-дослідної роботи № 22 Д 320 „Розробка методів та пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності”, № державної реєстрації 0110U002166, господарсько-договірної теми №2205 „Розробка рекомендацій по підвищенню ефективності використання симетрувально-компенсуючих пристроїв в електричних мережах ВАТ „АК „Вінницяобленерго” з метою зниження втрат електричної енергії та збільшення їх пропускної здатності”, № державної реєстрації 0109U004177, господарсько-договірної теми №2206 „Розробка рекомендацій з установки симетрувально-компенсуючих пристроїв в електричних мережах ВАТ „АК „Вінницяобленерго” з метою зниження втрат електроенергії та поліпшення якості електроенергії”. Автор брала участь у виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи як виконавець, а господарсько-договірних робіт як

відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв в розподільних електричних мережах шляхом покращення функціонування систем керування.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

1. Проаналізувати існуючі методи та критерії керування компенсаційно-симетрувальними пристроями;
2. Обґрунтувати математичні моделі, критерій та метод керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень та різних статичних характеристик вузлів навантажень розподільних мереж;
3. Проаналізувати чутливості напруг зворотної послідовності і втрат потужності, зумовлених струмами зворотної послідовності, до збільшення потужності СП та розробити математичні моделі керування несиметрією режиму напруги за багатократної несиметрії навантажень;
4. Провести експериментальні дослідження несиметричних режимів в розподільних мережах та оцінити точність симетрування навантажень і ефективність використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв.

Об'єкт дослідження. Процес симетрування навантажень вузлів розподільних електричних мереж.

Предмет дослідження. Математичні моделі та критерії керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень.

Методи дослідження. Під час роботи над дисертацією використовувались методи досліджень, які базувалися: на теорії електротехніки – при побудові математичних моделей керування симетрувальними пристроями; на теорії лінійної алгебри – при отриманні аналітичних виразів критеріїв симетрування; на методах математичного моделювання – при аналізі помилок симетрування навантажень з використанням отриманих математичних моделей керування симетрувальними пристроями; на теорії математичної статистики – при проведенні статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів і положень, що виносяться на захист, полягає в удосконаленні систем керування компенсаційно-симетрувальними пристроями, що забезпечує підвищення точності симетрування напруги за багатократної несиметрії навантажень в розподільних електричних мережах.

В роботі отримано такі наукові результати:

1. Вперше обґрунтовано метод симетрування напруги, який, на відміну від відомих методів, враховує вплив багатократної несиметрії навантажень та статичних характеристик вузлів розподільної мережі на точність симетрування, що забезпечує підвищення ефективності використання в розподільних мережах компенсаційно-симетрувальних пристроїв.
2. Удосконалено умови керування компенсаційно-симетрувальними пристроями струмів та напруг несиметричних навантажень споживачів

шляхом використання представлених одночасно в системі трьох фазних координат активних складових їх провідності, що дозволяє підвищити точність симетрування за рахунок зменшення похибок вимірювання величин зворотної послідовності.

3. Дістав подальший розвиток принцип симетрування напруги компенсаційно-симетрувальними пристроями, під'єднаними до розміщених на невеликій електричній віддаленості вузлів мережі, що полягає у використанні зумовлених несиметрією режиму додаткових втрат активної потужності в мережі, як критерію оптимальності, що збільшує ефективність керуючих рішень та оптимізує процес керування компенсаційно-симетрувальними пристроями.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у створенні на основі отриманих теоретичних результатів автоматичного пристрою для симетрування струмів та напруг і розробці методу керування несиметрією режиму розподільної мережі. Їх впровадження сприятиме покращенню рівня компенсації реактивної потужності та зменшенню несиметрії напруг в районних електричних мережах.

Результати роботи впроваджено в ПАТ «АК «Вінницяобленерго» у вигляді компенсаційно-симетрувального пристрою, який призначений для компенсації реактивної потужності та симетрування напруги, в основу роботи системи керування якого покладено адаптивне регулювання коефіцієнта симетрування з урахування впливу багатократної несиметрії навантажень, що підтверджено відповідним актом від 20.06.2011 р.

Результати роботи також використовуються у ВНТУ на кафедрі «Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент» для підготовки фахівців за спеціальністю 7.05070103 «Електротехнічні системи електроспоживання», акт впровадження від 14.09.2011 р.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем одноособово. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих в співавторстві такий: [1, 2] – обґрунтовано умови керування двофазними симетрувальними установками з використанням комплексних умовної потужності і пульсуючої потужностей зворотної послідовності; [3] – проаналізовано вплив статичних характеристик вузлів навантажень на точність симетрування та оцінено необхідні коректувальні дії; [4] – вдосконалено алгоритм вимірювального перетворювача несиметричних навантажень; [5] – проаналізовано критерії симетрування навантажень за значеннями напруг та втрат потужності в електричних мережах, що зумовлені струмами зворотної послідовності навантажень споживачів; [6] – проаналізовано залежності чутливості втрат потужності та напруги зворотної послідовності; [7] – проаналізовано ефективність алгоритмів керування несиметрією режиму; [8] – запропоновано принцип симетрування, який полягає в тому, щоб знайти комбінацію секцій СП для ввімкнення, забезпечивши мінімум сумарних додаткових втрат активної потужності від несиметрії режиму в розподільчих мережах; [9] – запропоновано математичну

модель оптимального використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв в розподільних мережах; [10] – представлені результати проведених експериментальних досліджень несиметрії напруг та навантажень; [11] – проаналізовано втрати потужності в електричних мережах, що зумовлені струмами зворотної послідовності навантажень споживачів; [12] – розроблено пристрій для автоматичного симетрування напруг та навантажень, в основу якого покладено інформацію про активні провідності зворотної послідовності в системах координат відносно трьох фаз. Результати досліджень, що викладені у [1–9, 11, 12], були отримані у ВНТУ, а наведені у [10] – в ПАТ «АК «Вінницяобленерго».

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати досліджень були апробовані на таких наукових конференціях: 11-й міжнародній науково-технічній конференції “Контроль і управління в складних системах КУСС-2010 (м. Вінниця, 2010 р.), 3-й міжнародній науково-технічній конференції „Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах” (м. Луцьк, 2010 р.), науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ, м. Вінниця, 2009–2011 рр.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 12 наукових працях, з них 8 статей в наукових фахових виданнях, 3 статті в науково-технічних журналах і збірниках праць науково-технічних конференцій, отримано патент України на винахід.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації 161 сторінка, з яких основний зміст викладений на 117 сторінках друкованого тексту, містить 53 рисунки, 7 таблиць. Список використаних джерел складається з 102 найменувань. Додатки містять результати експериментальних досліджень, програми розрахунків, акти впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі дослідження. Сформульовано наукову новизну та положення, що виносяться на захист. Розглянуто практичне значення та впровадження одержаних результатів. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу та огляду особливостей роботи розподільних електричних мереж за наявності несиметричних споживачів. Обґрунтовано необхідність пошуку нових рішень в області критеріїв та інформативних параметрів керування СП. Проведено аналіз існуючих систем керування СП. Огляд методів та засобів симетрування і систем керування ними дозволяє зробити такі висновки:

1. Несиметрія режиму, яка має місце в районних розподільчих мережах енергопостачальних компаній та яка в ряді випадків виходить за

нормовані ГОСТ 13109 – 97 межі, змінюється в часі і її ефективно усунення потребує керування несиметрією напруги, що може здійснюватись за допомогою СП.

2. Для розподільчих мереж 10 та 0,38 кВ енергопостачальних компаній характерним є несиметрія електричного режиму, яка створюється однофазними електроприймачами. Такі електроприймачі становлять суттєву долю навантаження 0,38 кВ, розсосереджені в мережі та змінюються в часі, що вимагає використання керованих СП.

3. Найбільш ефективними для розподільних мереж є компенсаційні СП. Їх порівняно легко реалізувати керованими;

4. Аналіз відомих систем керування СП вказує на необхідність їх адаптації для застосування в розподільних мережах з багатократною несиметрією навантажень.

Проведений огляд літературних джерел вказує на необхідність розроблення критеріїв симетрування навантажень за багатократною несиметрією, оцінювання впливу статичних характеристик вузлів навантажень, аналізу чутливості оптимальних рішень.

У другому розділі на основі аналізу критеріїв локального симетрування, які полягають в мінімізації модулів напруги зворотної послідовності \dot{U}_2 або струму зворотної послідовності навантаження \dot{I}_2 . показана неможливість їх прямого застосування за багатократною несиметрією навантажень.

Проаналізовано загальні критерії симетрування навантажень за багатократною несиметрією навантажень в розподільних електричних мережах. В якості критерію запропоновано мінімум втрат активної потужності, що зумовлені струмами зворотної послідовності навантажень

$$\Delta P_2 = 3(\hat{\mathbf{J}}_2^t \mathbf{R}_2 \mathbf{J}_2) \rightarrow \min \text{ або } \Delta P_2 = 3\hat{\mathbf{U}}_2^t \mathbf{G}_2 \mathbf{U}_2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $\mathbf{J}_2, \mathbf{U}_2$ – вектори комплексних струмів зворотної послідовності навантажень споживачів та вузлових напруг зворотної послідовності електричної мережі; $\hat{\mathbf{J}}_2^t, \hat{\mathbf{U}}_2^t$ – транспоновані вектори спряжених комплексних струмів зворотної послідовності навантажень споживачів та вузлових напруг зворотної послідовності електричної мережі; $\mathbf{R}_2, \mathbf{G}_2$ – матриці вузлових активних опорів та провідностей зворотної послідовності мережі.

З використанням розподілення втрат потужності, зумовлених струмами зворотної послідовності, критерій симетрування навантажень можна подати у такому вигляді:

$$\Delta P_2 = 3(\hat{\mathbf{J}}_2^D \mathbf{R}_2 \mathbf{J}_2) \rightarrow \min \text{ або } \Delta P_2 = 3\hat{\mathbf{U}}_2^D \mathbf{G}_2 \mathbf{U}_2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де ΔP_2 – вектор-стовпець втрат активних потужностей, зумовлених струмами зворотної послідовності несиметричних навантажень споживачів, які відносяться на баланс окремих споживачів; $\hat{\mathbf{J}}_2^D, \hat{\mathbf{U}}_2^D$ – діагональні матриці комплексних спряжених струмів зворотної послідовності навантажень споживачів та вузлових напруг зворотної послідовності електричної мережі.

Для порівняння використано відомий загальний критерій симетрування, який полягає в багатоцільовій мінімізації напруг зворотної послідовності в усіх вузлах навантажень розподільної мережі

$$U_{2(k)} \rightarrow \min, \quad k=1, \dots, n, \quad (3)$$

де $U_{2(k)}$ – напруга зворотної послідовності у вузлі k , а також критерій у вигляді мінімуму геометричної суми діючих значень напруг зворотної послідовності в усіх вузлах електричної мережі відносно вузла живлення

$$U_{2\Delta} = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_{2\Delta(k)}^2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $U_{2\Delta(k)}$ – напруга зворотної послідовності у вузлі k відносно балансувального вузла.

На основі порівняння оптимальних рішень, зроблено висновок, що рішення, які приймаються за втратами потужності в мережі, близькі до рішень, які приймаються за значенням напруги зворотної послідовності в усіх вузлах та у вузлі регулювання СП. Проте на значення напруги зворотної послідовності в усіх вузлах та у вузлі регулювання СП, істотно впливає несиметрія напруги у вузлі живлення, що практично виключає можливість застосування цього критерію.

Показано, що для симетрування напруги за багатократною несиметрії в розподільних мережах як критерій оптимальності доцільно використовувати мінімум втрат активної потужності, зумовлених струмами зворотної послідовності, що забезпечує оптимальне рішення як за відсутності, так і за наявності несиметрії напруги джерела.

Пропонується метод керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократною несиметрії навантажень з використанням потужності, струму або провідності зворотної послідовності одного з навантажень з можливістю адаптивного задавання ступеня симетрування навантажень k_2 в залежності від характеру несиметрії в суміжних вузлах розподільної мережі:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{1}{3}[(b_1 - b_{ex}) - 2k_2 b_2]; \\ b_{CA} &= \frac{1}{3}[(b_1 - b_{ex}) + k_2 b_2 - \sqrt{3}k_2 g_2]; \\ b_{AB} &= \frac{1}{3}[(b_1 - b_{ex}) + k_2 b_2 + \sqrt{3}k_2 g_2], \end{aligned} \quad (5)$$

де b_{ex} – задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування, $b_1 = -\text{Im}(\underline{Y}_1)$ – реактивна провідність прямої послідовності навантаження; $g_2 = \text{Re}(\underline{Y}_2)$; $b_2 = -\text{Im}(\underline{Y}_2)$ – активна та реактивна умовні провідності зворотної послідовності навантаження; k_2 – коефіцієнт, що характеризує задану ступінь симетрування навантажень.

Характерною особливістю багатократною несиметрії є неодноразність

досягнення мінімумів залежностей напруги і струму зворотної послідовності (рис. 1). Під час регулювання k_2 з використанням умов (5) мінімум залежності напруги (криві 1) у вузлі регулювання СП за однакового характеру несиметрії в суміжних вузлах зміщується вправо, а за протилежного – вліво відносно мінімуму залежності струму зворотної послідовності (криві 2).

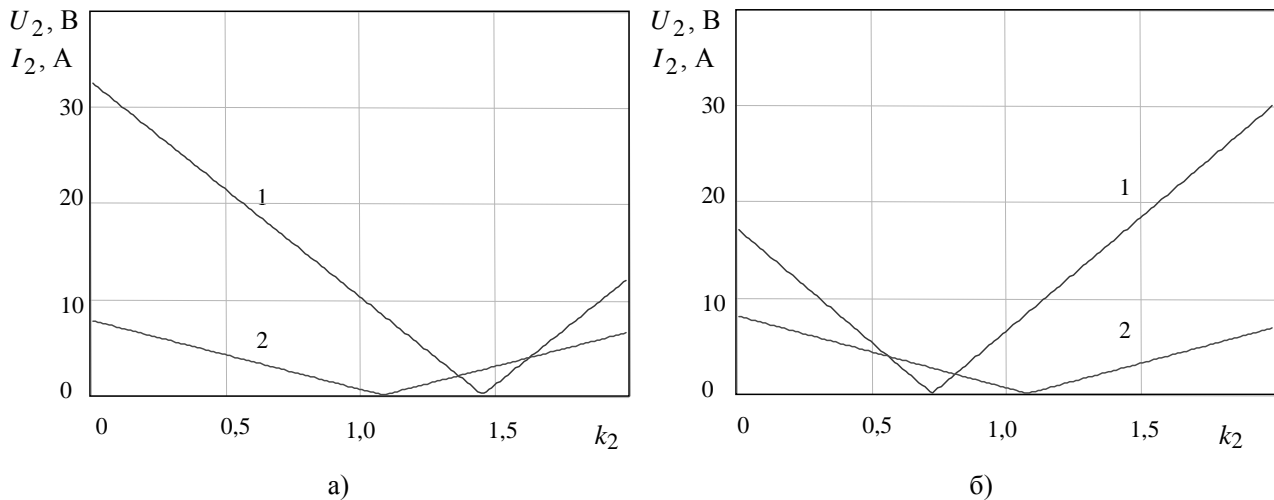


Рисунок 1 – Залежності напруги і струму зворотної послідовності у вузлі регулювання СП:

- а) за однакового характеру несиметрії навантажень;
- б) за протилежного характеру несиметрії навантажень

Необхідно відмітити, що за істотної несиметрії напруги джерела мінімум напруги зворотної послідовності у вузлі регулювання СП зміщується за межі діапазону регулювання, що не дозволяє здійснювати керування СП за цим параметром.

На основі моделювання двократної несиметрії досліджено, що за однакового характеру несиметрії навантаження доцільним є збільшення коефіцієнта k_2 до значення $k_2=1,2$, за різного характеру несиметрії – приймати $k_2=1$, а за протилежного характеру несиметрії – знижувати до значення $k_2=0,8$. Для оцінювання доцільності збільшення або зменшення k_2 в процесі регулювання рекомендується використовувати приріст напруги зворотної послідовності у вузлі регулювання СП. Показано, що СП краще встановлювати в обох вузлах, тоді рівень несиметрії напруги істотно знижується, а коефіцієнт k_2 знаходиться в межах $k_2=0,9...1...1,1$.

Обґрунтовано умови симетрування навантажень з використанням двофазних СП. Оскільки у випадку використання СП з двома реактивними елементами заданого значення вхідної реактивної потужності досягти не можна, то умови (5) не можуть бути використані для керування двофазними СП. Водночас за відсутності повної компенсації реактивної потужності умови (5) спрощуються

$$b_{BC} = k_2 \frac{-2b_2}{3}; \quad b_{CA} = k_2 \frac{b_2 - \sqrt{3}g_2}{3}; \quad b_{AB} = k_2 \frac{b_2 + \sqrt{3}g_2}{3}, \quad (6)$$

де $g_2 = \operatorname{Re}\left(\frac{i_2}{U_1}\right)$, $b_2 = -\operatorname{Im}\left(\frac{i_2}{U_1}\right)$ – умовні провідності зворотної послідовності несиметричного навантаження.

Прирівнявши до нуля провідність однієї з фаз СП, умови (6) можна записати в одному із виглядів

$$b_{BC} = 0; \quad b_{CA} = k_2 \left(b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right); \quad b_{AB} = k_2 \left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right), \quad (7)$$

$$b_{BC} = -k_2 \left(b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right); \quad b_{CA} = 0; \quad b_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_2, \quad (8)$$

$$b_{BC} = -k_2 \left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2 \right); \quad b_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} k_2 g_2; \quad b_{AB} = 0, \quad (9)$$

вибір яких залежить від того, в яку фазу ємнісний елемент не вмикається.

Оскільки для визначення трьох провідностей фаз СП у формулах (7)–(9) необхідна інформація про три величини g_2 , $b_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} g_2$ та $-\left(b_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} g_2\right)$, то

прийняття рішення в які фази необхідно увімкнути ємнісні елементи СП є однозначним. За знаком цих величин або за аргументом комплексної умовної провідності зворотної послідовності $\underline{Y}_2 = g_2 - jb_2$ можна чітко визначити в які фази потрібно увімкнути ємнісні елементи. Комплексну площину \underline{Y}_2 ці величини поділяють на три сектори з кутом 120 ел. градусів. Умови (7) використовують якщо аргумент комплексної умовної провідності зворотної послідовності \underline{Y}_2 знаходиться в межах $-150\dots-30$ ел. градусів, (8) – якщо аргумент \underline{Y}_2 знаходиться в межах $-30\dots+90$ ел. градусів, (9) – якщо аргумент \underline{Y}_2 знаходиться в межах $+90\dots-150$ ел. градусів.

Проаналізовано вплив статичних характеристик вузлів навантажень на точність симетрування у разі, якщо вони характеризуються степеневими залежностями, наприклад, для фази BC:

$$S_{BC}(k_P, k_Q) = P_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{ном}} \right)^{k_P} + jQ_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{ном}} \right)^{k_Q}, \quad (10)$$

де P_{BC} , Q_{BC} – відповідно активна та реактивна потужності навантаження для фази BC; U_{BC} – фактичне значення міжфазної напруги BC у вузлі навантаження; $U_{ном}$ – номінальне значення напруги мережі; k_P , k_Q – характеристичні коефіцієнти, що визначають залежності потужностей навантаження від напруги ($k_P=0\dots2$, $k_Q=0\dots4$).

Обґрунтовано можливість зменшення помилок симетрування за різних статичних характеристик вузлів навантажень шляхом регулювання

коефіцієнта k_2 . У разі використання як інформативного параметра комплексної провідності зворотної послідовності \underline{Y}_{21} діапазон регулювання k_2 становить 1,05...1,1 (рис. 2). Залежності K_{2U} побудовано як функції характеристичних коефіцієнтів k_P, k_Q (цифрою 0 на графіках позначено залежності для $k_P=0$; 1 – для $k_P=1$; 2 – для $k_P=2$). У разі використання як інформативного параметра умовної комплексної провідності зворотної послідовності \underline{Y}_2 діапазон регулювання $k_2=1,1 \dots 1,2$.

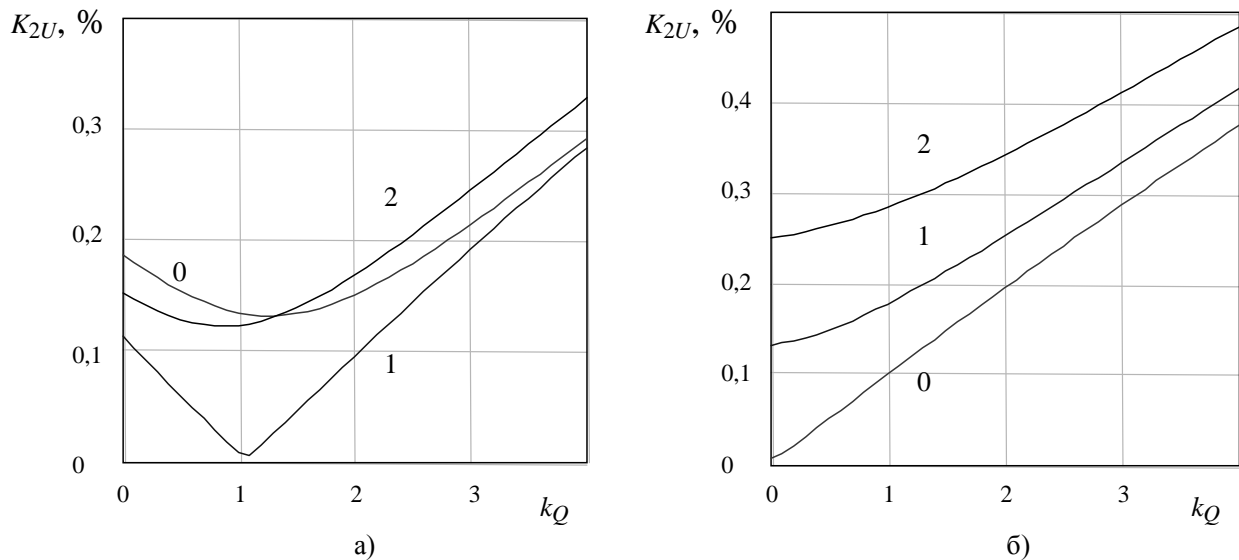


Рисунок 2 – Залежності K_{2U} у разі використання як інформативного параметра провідності \underline{Y}_{21} при $k_2=1,05$ і $k_2=1,1$

Сформульовано умови керування двофазними симетрувальними установками, які представлені через активні провідності зворотної послідовності в системах координат відносно фаз A, B та C . Умови (7)–(9) для двофазної СП можна записати в одному із виглядів

$$b_{BC} = 0; \quad b_{CA} = \frac{2\sqrt{3}}{3}k_2g_2(B); \quad b_{AB} = -\frac{2\sqrt{3}}{3}k_2g_2(C), \quad (11)$$

$$b_{BC} = -\frac{2\sqrt{3}}{3}k_2g_2(B); \quad b_{CA} = 0; \quad b_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3}k_2g_2(A), \quad (12)$$

$$b_{BC} = \frac{2\sqrt{3}}{3}k_2g_2(C); \quad b_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3}k_2g_2(A); \quad b_{AB} = 0, \quad (13)$$

де $g_2(A), g_2(B), g_2(C)$ – активні провідності навантаження зворотної послідовності в системах координат, визначених відносно фаз A, B та C .

Умови (11)–(13) істотно спрощують реалізацію вимірювальних каналів для СП забезпечують можливість зменшення похибок за умов несинусоїдності завдяки ідентичності побудови вимірювальних каналів. Ще однією перевагою їх застосування є незалежність контурів регулювання провідності фаз СП.

Запропоновано пристрій для автоматичного симетрування струмів та напруг трифазної системи (рис. 3). На схемі позначено: ЕМ – електрична

мережа, ПС – масштабний перетворювач струмів фаз в напруги, Н – трифазне навантаження, ПН1...ПН3 – масштабні перетворювачі фазної напруги, К1, К2 – комутатори, ПВ1, ПВ2 – пристрої віднімання, КВП1, КВП2 – квазізрівноважені вимірювальні перетворювачі провідності, МК – однокристальний мікроконтролер, БС – блок симетрування, до складу якого входять три керовані реактивні елементи.

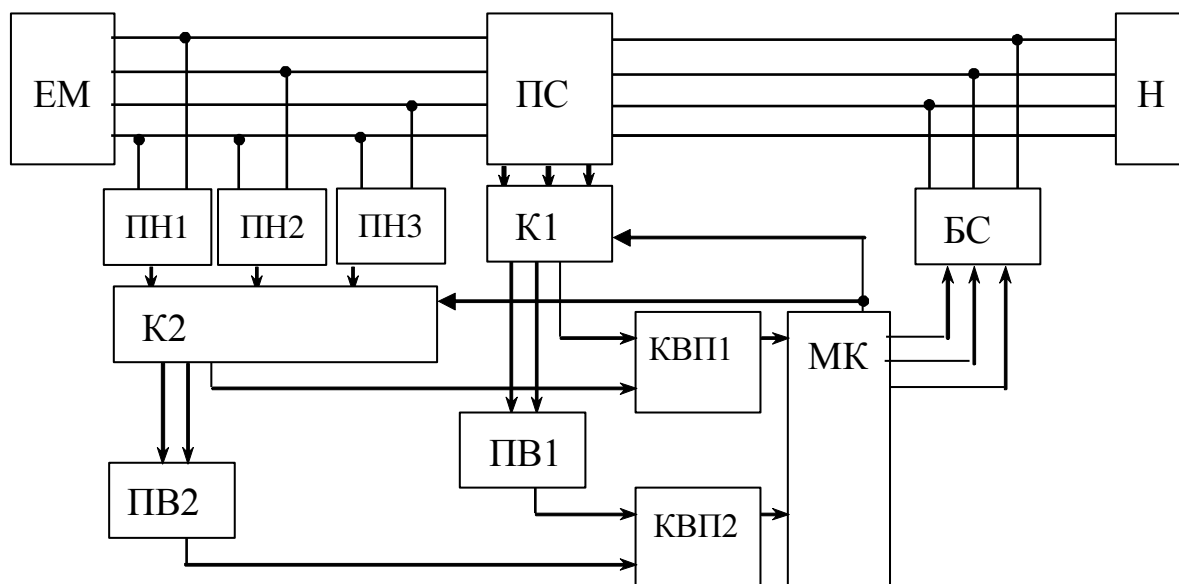


Рисунок 3 – Пристрій для автоматичного симетрування струмів та напруг

Визначення активної провідності зворотної послідовності полягає в отриманні інформації про провідності g_α , g_β , що представлені в ортогональній системі координат (α, β) , та активної провідності зворотної послідовностей g_2 навантаження:

$$g_\alpha = \operatorname{Re}\left(\frac{i_\alpha}{U_\alpha}\right); \quad g_\beta = \operatorname{Re}\left(\frac{i_\beta}{U_\beta}\right); \quad g_2 = 0,5(g_\alpha - g_\beta).$$

В першому такті на виході КВП1 формується величина $g_{\alpha(A)}$ (як відношення синфазної складової струму до модуля напруги фази A), одночасно на виході КВП2 формується величина $g_{\beta(A)}$ (як відношення синфазної складової різниці струмів до модуля різниці напруг фаз B, C). В другому такті на виході КВП1 формується величина $g_{\alpha(B)}$, одночасно на виході КВП2 формується величина $g_{\beta(B)}$. В третьому такті на виході КВП1 формується величина $g_{\alpha(C)}$, одночасно на виході КВП2 формується величина $g_{\beta(C)}$.

Усі ці величини заносяться в комірки пам'яті МК, після чого відбувається розрахунок активних провідностей зворотної послідовності $g_2(A)$, $g_2(B)$, $g_2(C)$ і здійснюється вибір однієї із реалізацій (11), (12) або (13).

У третьому розділі проведені дослідження: впливу технічних рішень із симетрування напруги за допомогою СП на параметри несиметрії в інших

вузлах мережі; чутливості додаткових втрат активної потужності та чутливості напруги зворотної послідовності до ввімкнення симетрувального елементу СП.

Під чутливістю втрат активної потужності при симетруванні напруг розуміється відносне зниження ΔP_2 при ввімкненні симетрувального

елементу одиничної потужності (потужністю 1 квар) $-\frac{\Delta P_2^{\text{до}}}{\Delta P_2^{\text{після}}}$, де

$\Delta P_2^{\text{до}}$, $\Delta P_2^{\text{після}}$ – додаткові втрати активної потужності в розподільній мережі відповідно до та після ввімкнення симетрувального елементу СП.

Аналогічно під чутливістю напруги зворотної послідовності при керуванні несиметрією напруг розуміється відносне зниження напруги U_2 у вузлі під'єднання СП при ввімкненні симетрувального елементу одиничної

потужності $-\frac{\Delta U_2^{\text{до}}}{\Delta U_2^{\text{після}}}$, де $\Delta U_2^{\text{до}}$, $\Delta U_2^{\text{після}}$ – напруга зворотної послідовності у

вузлі під'єднання СП до та після ввімкнення симетрувального елементу одиничної потужності.

Результати розрахунків чутливості (рис. 4) свідчать, що чутливості ΔP_2 (крива 1) та U_2 (крива 2) до збільшення потужності СП мають однаковий характер.

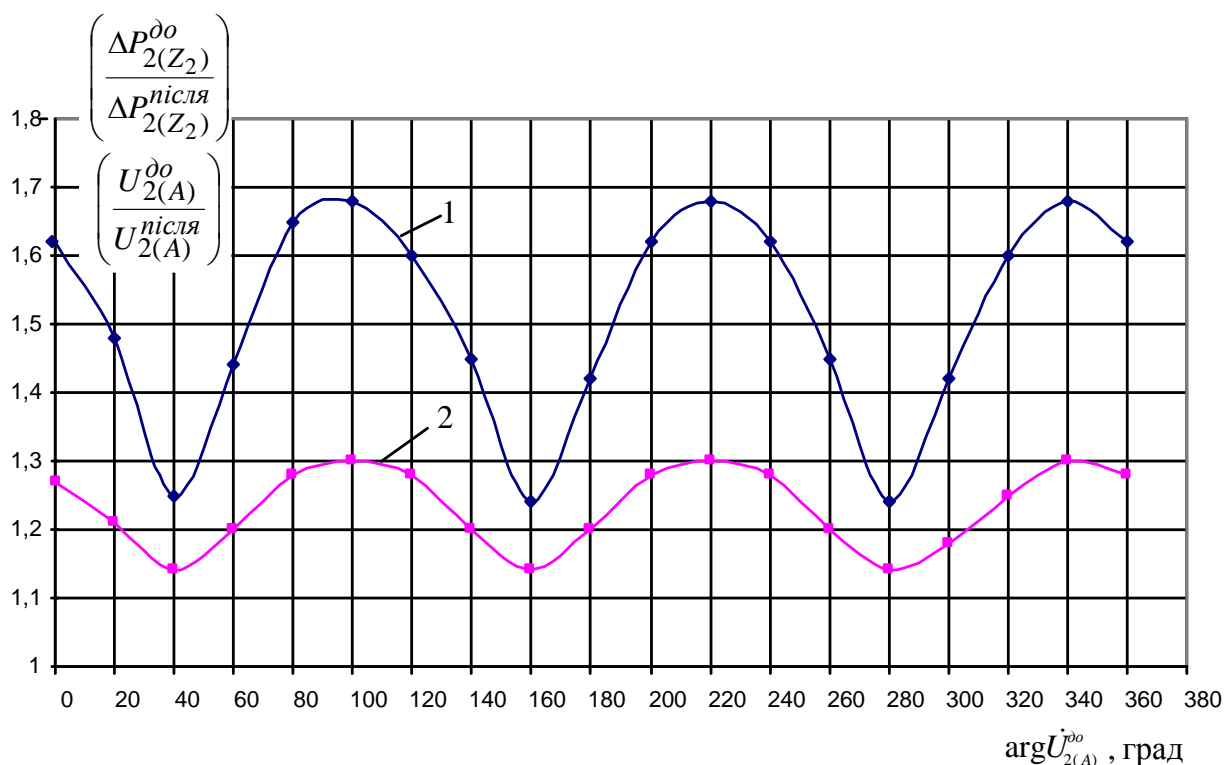


Рисунок 4 – Залежності відносної зміни $\left(\frac{\Delta P_{2(Z_2)}^{\text{до}}}{\Delta P_{2(Z_2)}^{\text{після}}} \right)$, $\left(\frac{U_{2(A)}^{\text{до}}}{U_{2(A)}^{\text{після}}} \right)$

На основі дослідження чутливості втрат потужності та напруги зворотної послідовності, обґрунтовано доцільність застосування принципу симетрування, який полягає в мінімізації сумарних втрат потужності ΔP_2 в розподільній мережі під час керування СП, під'єднаними до взаємозалежних вузлів. Доведено, що кінцевий ефект із симетрування напруги буде підвищений, якщо керуючі впливи СП, встановлених в суміжних взаємозалежних вузлах мережі, погоджуються.

Процес пошуку вектора керування полягає у визначенні його числових значень компонент, кожна з яких описує стан (ввімкнено або вимкнено) відповідної секції СП, і здійснюється як послідовність поетапних розрахунків. На кожному етапі розрахунків приймається рішення про ввімкнення чергової секції СП в одному з двох вузлів на підставі оцінювання чутливості ΔP_2 до симетрування напруги. Рішення про ввімкнення секції приймається для того вузла, який є найбільш чутливим до зменшення додаткових втрат активної потужності ΔP_2 в мережі. Визначення більш чутливого вузла до зменшення додаткових втрат активної потужності ΔP_2 здійснюється шляхом порівняння чутливості напруг зворотної послідовності U_2 у взаємозалежних вузлах. Це забезпечує найбільший ефект (зниження ΔP_2), що приходить на 1 квар конденсаторної потужності, яка вмикається.

Оцінювання чутливості ΔP_2 можна робити оперуючи пробною секцією СП одиничної потужності, а після цього приймати керуюче рішення, виходячи із потужностей секцій СП, що залишились нереалізованими на попередніх етапах вирішення задачі. Побудова алгоритму розрахунку вектора керування несиметрією напруг за таким підходом ускладнює його, оскільки потрібно передбачити варіанти коли:

- пробне оцінювання чутливості свідчить, що необхідно вмикати секцію СП у вузлі v на міжфазну напругу k , а в схемі СП такої секції немає, або для всіх наявних секцій вже прийняті рішення про їх ввімкнення;

- те саме, але є декілька секцій і всі вони різної потужності;

- те саме, але вмикання будь-якої секції забезпечує $|\dot{U}_2 + \dot{U}_2^{\text{СП}}| \geq |\dot{U}_2|$

(випадок, коли невимкнутими залишились секції СП великих потужностей), де $\dot{U}_2^{\text{СП}}$ – вектор напруги зворотної послідовності, що створюється у вузлі v при ввімкненні секції СП на міжфазну напругу k .

Алгоритм передбачає приймання рішення про вмикання чергової секції на будь-якому етапі вирішення задачі, виходячи із оцінювання чутливості ΔP_2 до вмикання всіх секцій СП, встановлених в одному та другому вузлах, та рішення про вмикання яких не прийнято на попередніх етапах.

Задача керування несиметрією напруг у взаємозалежних вузлах (А та Б) електричної мережі полягає в тому, що необхідно визначити, в якому стані повинні знаходитись вимикачі всіх секцій СП, під'єднаних до вузлів А та Б.

Вирішити таку задачу, забезпечивши погодження розв'язків по вузлах А та Б, можна за допомогою математичної моделі

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 \quad N_2 \\ \sum_{n=1} \Delta p_n x_n + \sum_{m=1} \Delta p_m x_m \rightarrow \max \\ x_n + \bar{x}_n = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N_1, \\ x_m + \bar{x}_m = 1, \quad m = 1, 2, \dots, N_2, \\ Q_A - \sum_{n=1}^{N_1} \Delta Q_n x_n \geq 0, \\ Q_B - \sum_{m=1}^{N_2} \Delta Q_m x_m \geq 0, \\ x_n; \bar{x}_n; x_m; \bar{x}_m = \{0; 1\}, \end{array} \right. \quad (14)$$

де $\Delta p_n; \Delta p_m$ – від'ємний приріст додаткових втрат активної потужності, пов'язаних із несиметрією режиму в розподільних мережах при ввімкненні відповідно секції n СП, який встановлений у вузлі А, та секції m СП, встановленого у вузлі Б; x_n, x_m – керовані логічні змінні, якщо $x_n = 1, x_m = 1$, то отриманий розв'язок реалізується ввімкненням секції n СП, встановленого у вузлі А (вимикача n), та секції m СП, встановленого у вузлі Б (вимикача m), а якщо змінні дорівнюють нулю, то відповідні секції СП вмикати не треба; \bar{x}_n, \bar{x}_m – фіктивні логічні змінні заперечення; $Q_A; Q_B$ – природне споживання реактивної потужності у вузлах А та Б (в припущенні, що всі секції СП, які встановлені у вузлах А та Б, вимкнені); $N_1; N_2$ – загальна кількість секцій СП, які встановлені відповідно у вузлах А та Б; $\Delta Q_n; \Delta Q_m$ – потужність секції n та m СП, встановлених відповідно у вузлах А та Б.

Цільова функція математичної моделі (14) передбачає максимальне зменшення сумарних додаткових втрат активної потужності в розподільній мережі шляхом симетрування напруги у вузлах А та Б за допомогою СП.

Серед обмежень такі, що описують можливі стани кожної секції СП, під'єднаних до вузлів А та Б, а також, які виключають можливість отримання таких розв'язків, коли реактивна потужність спрямована в живильні мережі.

Всі обмеження математичної моделі (14) – лінійні функції від керованих змінних. Цільова функція формально також лінійна, але її коефіцієнти, які відображають зменшення додаткових втрат активної потужності від несиметрії режиму, змінюються в процесі розв'язання задачі. Фізично ця зміна пов'язана з тим, що реалізація рішення, прийнятого на μ -му етапі розв'язування задачі змінить несиметрію напруги як у вузлі А, так і вузлі Б. Тому для $(\mu+1)$ етапу зниження додаткових втрат активної потужності при ввімкненні будь-якої секції з числа тих, по яких ще не прийнято рішення, буде іншим в порівнянні із значенням для етапу μ .

Як і у випадку класичних методів оптимізаційних розрахунків, розроблений метод вирішення задачі реалізує такі ідеї:

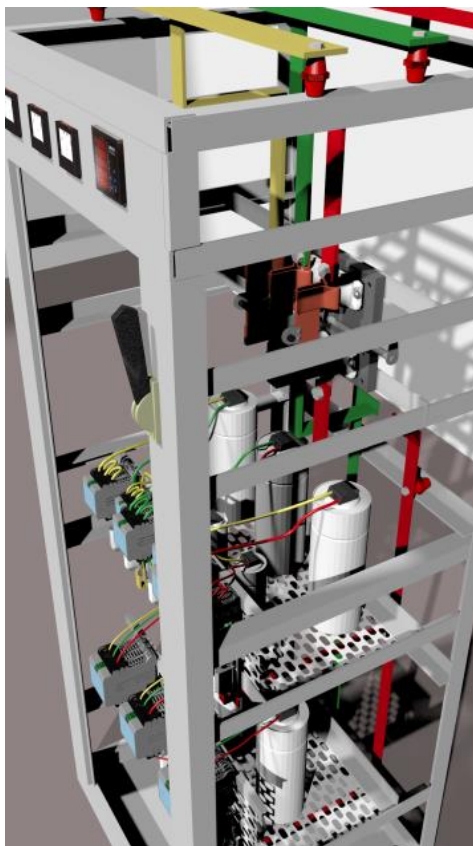
- процес вирішення задачі – ітераційний;
- на кожній ітерації приймається найбільш ефективне рішення із множини допустимих.

Відмінність алгоритму полягає у визначенні на кожному етапі коефіцієнтів цільової функції Δp_n ; Δp_m .

Проведені дослідження можна поширити і на випадок, коли взаємозалежних вузлів, де встановлені СП, декілька. Для цього, при незмінній загальній ідеї алгоритму, кожен його етап має стосуватися всіх взаємозалежних вузлів.

У четвертому розділі на основі проведених експериментальних досліджень несиметрії напруг і струмів Бершадських РЕМ даються практичні рекомендації щодо встановлення компенсаційно-симетрувальних пристроїв на підстанціях РЕМ, наводиться технічне обґрунтування доцільності застосування розроблених критеріїв та алгоритмів керування СП.

Проаналізовано алгоритми керування несиметрією режиму для розподільних мережах в реальному часі за випадкового характеру навантажень. Показано, що доцільним є усереднення поточних значень складових струму зворотної послідовності на кожному інтервалі часу 30 с. У якості дискретно-регульованих СП можна використовувати установки із співвідношенням провідностей 1:2.



Зовнішній вигляд розробленого компенсаційно-симетрувального пристрою потужністю $3 \times 40 + 3(1 \times 40) + 3(1 \times 20)$ квар зображено на рис. 5. В нижній частині встановлені три трифазних конденсатори МКРГ 40 квар, які комутуються магнітними пускачами CNKN-4010. В середній частині розміщені три однофазних конденсатори KNK-9101 40 квар кожний, які комутуються магнітними пускачами типу CNKN-4010, та три однофазних конденсатори KNK-9101 20 квар кожний, які комутуються магнітними пускачами типу CNKN-2010. У верхній частині пристрою розміщено рубильник, амперметри, цифровий індикатор НСД 292Z-9Т5 для вимірювання фазних напруг, струмів і потужностей з інтерфейсом RS-485 та програмований логічний контролер ПЛК-100 компанії «Овен», який розташований на дверях.

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд компенсаційно-симетрувального пристрою

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу вдосконалення процесу керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень, що полягає в обґрунтуванні методу симетрування навантажень, який на відміну від відомих, враховує багатократність несиметричних навантажень і забезпечує підвищення ефективності використання компенсаційно-симетрувальних пристроїв в розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1. На основі аналізу методів та критеріїв керування компенсаційно-симетрувальними пристроями в розподільних мережах 10 та 0,38 кВ обґрунтовано доцільність пошуку нових критеріїв та методів керування за багатократної несиметрії навантажень.

2. Розроблено критерії симетрування струмів і напруг, які враховують вплив суміжних несиметричних споживачів електроенергії, що дає можливість підвищити точність симетрування навантажень.

3. Обґрунтовано метод симетрування напруги, який, враховує вплив багатократної несиметрії навантажень та статичних характеристик вузлів розподільної мережі на точність симетрування, що оснований на адаптивному регулюванні коефіцієнта симетрування навантажень при використанні локального регулювання несиметрії навантажень.

4. Удосконалено умови керування компенсаційно-симетрувальними пристроями струмів та напруг несиметричних навантажень споживачів шляхом використання представлених одночасно в системі трьох фазних координат активних складових їх провідності, що дозволяє підвищити точність симетрування за рахунок зменшення похибок вимірювання величин зворотної послідовності.

5. Запропоновано пристрій, що забезпечує автоматичне симетрування струмів та напруг трифазної системи, в основу роботи якого покладені умови симетрування навантажень, які подані через активні провідності зворотної послідовності в системах координат відносно трьох фаз *A*, *B* та *C*.

6. Проаналізовано чутливість додаткових втрат активної потужності до збільшення потужності СП під час симетрування напруги в розподільній мережі. Показано, що чутливість визначається параметрами схеми та параметрами режиму, а симетрування напруги в одних вузлах розподільної мережі впливає на несиметрію напруги в інших вузлах. Тому ефективність того ж самого симетрувального впливу в різних вузлах схеми буде різною, а рішення, що приймаються із симетрування напруг у взаємозалежних вузлах мають бути погодженими.

7. Обґрунтовано принцип керування несиметрією напруги, який полягає у використанні додаткових втрат активної потужності в мережі, зумовлених несиметрією режиму, як критерію оптимальності, що забезпечує підвищення ефективності використання симетрувальних пристроїв.

8. Дослідження ТП 10/0,4 кВ ВАТ „Птахокомбінат Бершадський” за двократної несиметрії навантажень показали, що в результаті встановлення компенсаційно-симетрувального пристрою з автоматичним керуванням забезпечується істотне зменшення несиметрії напруг і струмів за зворотною послідовністю в суміжних вузлах з несиметричним навантаженнями.

9. На основі теоретичних і експериментальних досліджень практично реалізовано та впроваджено компенсаційно-симетрувальний пристрій, який призначений для компенсації реактивної потужності та симетрування напруги за багатократною несиметрії навантажень.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко*, О. О. Бірюков, О. М. Кінзерська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5. – С. 35–38.

2. Бурбело М. Й. Умови керування двофазними симетрувальними установками / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. - техн. зб. Дніпропетровськ НГУ. – 2009. – Вип. 82. – С. 3–7.

3. Бурбело М. Й. Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 5. – С. 3–6.

4. Бурбело М. Й. Спосіб вимірювання параметрів несиметрії навантажень вузлів електричних мереж / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, М. В. Никитенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 3. – С. 30–33.

5. Бурбело М. Й. Аналіз цільових функцій симетрування навантажень за багатократною несиметрії / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 43–47.

6. Терешкевич Л. Б. Математичні моделі керування реактивною потужністю та несиметрією напруги в електричній мережі / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, М. В. Кузьменко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2010. – Выпуск 32. – С. 406–415.

7. Бурбело М. Й. Керування компенсаційними симетрувальними пристроями в розподільних мережах енергопостачальних компаній / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко, Ю. В. Ільчук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2010. – № 2. – С. 75–78.

8. Принцип симетрування електричного режиму для вузлів мережі, розділених невеликим опором / М. Й. Бурбело, Л. Б. Терешкевич, М. В. Кузьменко, М. І. Цибульський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 84–88.

9. Бурбело М. Й. Вибір джерел реактивної потужності за зменшенням втрат потужності, що відносяться на баланс споживачів / М. Й. Бурбело,

* Кузьменко М. В. вважати Девятко М. В. у зв'язку з одруженням.

А. Ж. Войнаровський, М. В. Кузьменко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2009. – Вип. 4, (7). – С. 14–16.

10. Кузьменко М. В. Підвищення ефективності використання компенсуючих пристроїв в районних електричних мережах / М. В. Кузьменко, С. О. Ханицький // Матеріали III-ї міжнародної науково-технічної конференції „Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”. – Луцьк: Луцький національний технічний університет. – 2010. – С. 115–116.

11. Бурбело М. Й. Визначення та розподілення втрат електричної енергії, зумовлених струмами прямої та зворотної послідовностей навантажень / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Тези міжнародної науково-технічної конференції „КУСС–2010”. – Вінниця: ВНТУ. – 2010. – 1 с. Режим доступу: <http://www.vstu.vinnica.ua>

12. Пат. 90801. Україна. МКИ Н02J 3/26. Пристрій для автоматичного симетрування струмів та напруг трифазної системи / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко (Україна). – Заявлено 03.11.08. № а200812833; Опубл. 26.05.10. Бюл. №10.

АНОТАЦІЯ

Девятко М. В. Керування компенсаційно-симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільних мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, 2011.

Дисертацію присвячено вирішенню наукової задачі дослідження, яка полягає в оптимізації процесу керування симетрувальними пристроями за багатократної несиметрії навантажень в розподільних електричних мережах.

Обґрунтовано доцільність використання локальних критеріїв симетрування за потужностями, струмами або провідностями зворотної послідовності навантажень з можливістю регулювання ступеня симетрування навантажень. Обґрунтовано умови керування три- та двофазними СП за багатократної несиметрії навантажень. Проаналізовано вплив статичних характеристик вузлів навантажень на точність симетрування. Запропоновано пристрій, що забезпечує автоматичне симетрування струмів та напруг трифазної системи, в основу роботи якого покладені отримані умови симетрування навантажень.

Проведені дослідження: чутливості додаткових втрат активної потужності, зумовлених несиметрією напруги; чутливості напруги зворотної послідовності при ввімкненні симетрувального елемента СП. За їх результатами дістав подальший розвиток принцип симетрування та розроблена математична модель керування несиметрією режиму напруги із врахуванням взаємного впливу СП.

На основі проведених експериментальних досліджень несиметрії напруг і струмів даються практичні рекомендації щодо встановлення компенсаційно-

симетрувальних пристроїв, наводиться техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування розроблених критеріїв та алгоритмів керування СП.

Ключові слова: багатократна несиметрія навантажень, розподільні електричні мережі, симетрувальні пристрої, критерії симетрування.

THE SUMMARY

Devyatko M. V. Control of compensatory-balancing devices at repeated load asymmetry in the distributive networks. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the Candidate of Science (Engineering) on a speciality 05.14.02 – Electrical stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnitsia, 2011.

The dissertation is devoted the decision of a scientific problem which consists in optimization of control process of balancing devices at repeated load asymmetry in the distributive networks.

The expediency of use of local criteria of balancing on powers, currents or return sequence conductivities of loadings with possibility of regulation of degree of balancing of loadings is proved. Conditions of control of three- and diphasic balancing devices at repeated load asymmetry are proved. Influence of static characteristics of knots of loadings on accuracy of balancing is analysed. The device providing automatic balancing of currents and voltages of three-phase system in which basis of work the received conditions of balancing of loadings are put is offered.

The conducted researches: the sensitivity of additional active power losses caused by the voltage asymmetry, sensitivity of the reverse sequence voltage when turning the balancing element of balancing device. By their results a principle of balancing and the mathematical model of control by asymmetry of a voltage mode taking into account mutual influence of balancing devices has had the further development.

On the basis of the spent experimental researches of voltage and currents asymmetry practical recommendations about an establishment of compensatory-balancing devices are made, the feasibility report on expediency of application of the developed criteria and algorithms of control of balancing devices is resulted.

Keywords: repeated load asymmetry, distributive networks, balancing devices, balancing criteria.

АННОТАЦИЯ

Девятко М. В. Управление компенсационно-симметрирующими устройствами при многократной несимметрии нагрузок в распределительных сетях. – Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, г. Винница, 2011.

Диссертация посвящена решению научной задачи, которая состоит в оптимизации процесса управления симметрирующими устройствами при

многократной несимметрии нагрузок в распределительных электрических сетях.

На основе анализа и обзора особенностей работы распределительных электрических сетей при наличии несимметричных потребителей, а также существующих способов построения систем управления симметрирующими устройствами (СУ), обоснована необходимость поиска новых решений в области информативных параметров систем управления СУ.

Проанализированы критерии симметрирования нагрузок по значениям напряжений и потерь мощности в электрических сетях, обусловленных токами обратной последовательности нагрузок потребителей. Обоснована целесообразность использования локальных критериев симметрирования по мощностям, токам или проводимостям обратной последовательности нагрузок с возможностью регулировки степени симметрирования нагрузок.

Обоснован метод симметрирования напряжения, который позволяет учесть влияние характера несимметрии нагрузок узлов распределительной сети на точность симметрирования, основанный на адаптивном регулировании коэффициента симметрирования нагрузок при использовании локального регулирования несимметрии нагрузок.

Обоснованы условия управления трех- и двухфазными СУ при многократной несимметрии нагрузок с использованием коэффициента симметрирования нагрузок. На основании моделирования двухкратной несимметрии показано, что в случае симметрирования в одном из узлов распределительной сети при одинаковом характере несимметрии нагрузок целесообразным является увеличение коэффициента симметрирования нагрузок до значения 1,2, а при противоположном характере несимметрии – уменьшение до значения 0,8. Показано, что при многократной несимметрии нагрузок с целью увеличения или уменьшения коэффициента симметрирования нагрузки можно использовать знак приращения напряжения обратной последовательности в узле регулирования СУ.

Проанализировано влияние статических характеристик узлов нагрузок на точность симметрирования и оценены необходимые корректирующие действия с изменением коэффициента k_2 .

Обоснованы условия управления симметрирующими установками, которые представлены через активные проводимости обратной последовательности в системах координат относительно фаз A , B и C , которые обеспечивают возможность существенного уменьшения погрешностей благодаря идентичности построения измерительных каналов двухфазных симметрирующих установок.

Предложено устройство, обеспечивающее автоматическое симметрирование токов и напряжений трехфазной системы, в основу работы которого положены полученные условия симметрирования нагрузок.

Проведены исследования: влияния технических решений по симметрированию напряжений с помощью СУ на параметры несимметрии в других узлах сети; чувствительности дополнительных потерь активной

мощности, обусловленных несимметрией напряжения; чувствительности напряжения обратной последовательности при включении симметрирующего элемента СУ. По их результатам получил дальнейшее развитие принцип симметрирования, в основу которого положено использование в качестве критерия симметрирования напряжения с помощью компенсационных СУ дополнительных потерь активной мощности, обусловленных протеканием токов обратной последовательности, и разработана математическая модель управления несимметрией режима с учетом взаимного влияния СУ.

На основании проведенных экспериментальных исследований несимметрии напряжений и токов в распределительной сети Бершадской РЭС даны практические рекомендации по установке компенсационно-симметрирующих устройств, приводится технико-экономическое обоснование целесообразности применения разработанных критериев и алгоритмов управления СУ.

Проанализированы алгоритмы управления несимметрией режима в распределительных сетях энергоснабжающих компаний в реальном времени при случайном характере нагрузок. Показано, что для управления дискретно-управляемыми СУ целесообразным является усреднение текущих значений составляющих тока обратной последовательности на скользящем интервале времени 30 с.

На основании теоретических и экспериментальных исследований практически реализовано и внедрено компенсационно-симметрирующее устройство, предназначенное для компенсации реактивной мощности и симметрирования напряжения в случае многократной несимметрии нагрузок в распределительной сети.

Ключевые слова: многократная несимметрия нагрузок, распределительные электрические сети, симметрирующие устройства, критерии симметрирования.

Підписано до друку 09.02.2012 р. Формат 29,7 x 421/4.

Наклад 100 прим. Зам. № 2012-013

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-39