

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

ПОЛЩУК ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.316.1

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИМЕТРУВАННЯ
НАПРУГ І СТРУМІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Житомирському державному технологічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Гніліцький Віталій Васильович,
Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління та автоматики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Винничук Степан Дмитрович,
Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ, завідувач відділу моделювання енергетичних процесів і систем.

кандидат технічних наук, доцент
Терешкевич Леонід Борисович,
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Захист відбудеться “6” жовтня 2017 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

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

Автореферат розісланий “5” вересня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Під електромагнітною сумісністю розуміють здатність електричного обладнання нормально функціонувати в його електромагнітному середовищі і при цьому не створювати недопустимих електромагнітних завад для роботи іншого обладнання, котре функціонує в цьому ж середовищі. При цьому під електромагнітними завадами розуміють не тільки взаємовплив власних електромагнітних полів обладнання, а й погіршення показників якості електроенергії. Забезпечення якості електроенергії на належному рівні – одна з головних задач електроенергетики України.

В останні роки підвищенню якості електроенергії приділяють більше і більше уваги, оскільки якість електроенергії може істотно впливати на її витрати, надійність систем електропостачання, технологічний процес виробництва, економічність роботи електроустановок.

Важливим показником якості електричної енергії є рівень несиметрії напруг і струмів електричних мереж. Несиметричні режими виникають внаслідок впливу несиметричних навантажень: потужних дугових печей, зварювальних установок, тягових навантажень та ін.

Серед заходів і засобів зниження несиметрії напруг і струмів важливе місце займає використання симетрувальних установок (СУ): симетрувальних конденсаторних установок, симетрувальних трансформаторів, статичних тиристорних компенсаторів. Важливим компонентом СУ є система керування. В сучасних системах керування СУ широко використовуються мікропроцесорні пристрої, алгоритми роботи котрих базуються на математичних моделях симетрування напруг і струмів.

Завдяки ряду вітчизняних та зарубіжних вчених Мельникову М. О., Міляху О. М., Шидловському А. К., Кузнецову В. Г., Аввакумову В. Г., Бурбело М. Й., Варецькому Ю. О., Грибу О. Г., Григор'єву О. С., Сіротіну Ю. О., Akagi H., Czarneski L., Ferrero A., Peng F. Z., Tolbert L. M. відбувся інтенсивний розвиток методів та систем симетрування напруг і струмів в електричних мережах. Однак, математичні моделі систем керування СУ напруг і струмів, можуть бути поліпшені завдяки введенню додаткових критеріїв і умов симетрування.

Таким чином, розробка та удосконалення моделей систем керування СУ є актуальним науковим завданням, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень які проводились на кафедрі комп'ютеризованих систем управління та автоматики Житомирського державного технологічного університету (ЖДТУ) відповідно до наукового напрямку «енергетика та енергоефективність» у законі України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Дисертаційна робота виконувалася у рамках науково-дослідної роботи №362 «Розробка методики

симетрування напруг і навантажень на основі теорії Фризе», № державної реєстрації 0112U005290. Згідно постанови кабінету міністрів України «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року» робота належить до напрямку «технології ефективного енергозабезпечення будівель і споруд».

Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення якості електроенергії шляхом зменшення несиметрії напруг і струмів за допомогою симетрувальних установок.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено такі задачі:

- провести порівняльний аналіз існуючих моделей систем керування симетрувальними установками, з'ясувати їх недоліки і переваги;
- розв'язати задачі симетрування напруг і струмів вузлів електричних мереж у фазних координатах;
- отримати поліпшені моделі систем управління симетрувальними установками;
- оцінити похибки обчислення параметрів симетрувальних установок мікропроцесорними пристроями на основі розроблених математичних моделей;
- дослідити чутливість розроблених математичних моделей;
- оцінити ефективність роботи симетрувальних установок, системи керування котрих побудовані на основі розроблених математичних моделей, при симетруванні напруг і струмів шляхом порівняння з відомими результатами експериментальних досліджень;
- розробити моделі систем керування конденсаторними симетрувальними установками на основі створених математичних моделей.

Об'єктом дослідження є процеси в електричних мережах з несиметричними навантаженнями.

Предметом дослідження є пристрої симетрування струмів і напруг вузлів електричних мереж з несиметричними режимами.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі задач використано методи досліджень, котрі базувались: на теорії математичного моделювання – для отримання математичних моделей систем керування СУ; на теорії лінійної алгебри та теоретичній електротехніці – для отримання аналітичних виразів законів симетрування; на можливостях імітаційного моделювання – при комп'ютерному моделюванні процесів симетрування струмів і напруг у середовищі Matlab; на теорії алгоритмів – для побудови алгоритмів роботи мікропроцесорних засобів керування СУ; на теорії похибок і математичної статистики – для аналізу похибок обчислення параметрів СУ.

Наукова новизна одержаних результатів. В даній роботі було вирішено актуальне наукове завдання поліпшення моделей систем керування СУ в

електричних мережах з напругою від 0,4 кВ до 10 кВ, зокрема:

1. Вперше сформульовано принцип симетрування напруг компенсаційно-симетрувальними пристроями, що полягає у використанні аргумента фазних напруг, очікуваних після симетрування, як критерію оптимальності, що збільшує ефективність керуючих рішень та оптимізує процес керування компенсаційно-симетрувальними пристроями.

2. Удосконалено умови керування компенсаційно-симетрувальними пристроями напруг несиметричних навантажень споживачів шляхом використання значень фазних напруг, очікуваних після симетрування, що дозволяє зменшити коефіцієнт зворотної послідовності напруги, у порівнянні із використанням існуючих алгоритмів.

3. Дістав подальшого розвитку метод аналізу чутливості математичних моделей систем керування компенсаційно-симетрувальними пристроями струмів та напруг, розроблених на основі поліпшених законів керування, що дало змогу оцінити точність датчиків, необхідних для практичної реалізації відповідних пристроїв.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що розроблені принципово нові моделі систем керування СУ та запрограмовані на їх основі контролери систем керування відповідних СУ забезпечують покращення показників якості електроенергії та підвищення надійності роботи електрообладнання.

На основі отриманих в роботі результатів – методів та алгоритмів, вдосконалено комплекс програм підтримки роботи пристроїв керування СУ, який передано для дослідної експлуатації у ТОВ «Феруміна» (акт впровадження від 06.03.2014 р.) в м. Житомир, у ТОВ «Квадротекс» (акт впровадження від 21.07.2014 р.) в м. Житомир. Результати роботи впроваджено також у навчальний процес Житомирського державного технологічного університету (акт впровадження від 1.03.2016 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. В роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить наступне: [1] – запропоновано підхід для обчислення параметрів, котрі характеризують якість компенсації реактивної потужності в автоматичних конденсаторних установках; [2, 9, 10] – проаналізовано способи і засоби керування установками компенсації реактивної потужності; [3] – запропоновано варіант моделі системи керування установками компенсації реактивної потужності за критерієм зменшення втрат потужності в радіальних мережах з ефектом симетрування навантаження; [4, 11] – запропоновано модель системи керування установками компенсації реактивної потужності та симетрування струмів у трипровідних мережах; [6] – запропоновано модель системи керування установками симетрування напруг у трифазних мережах; [5, 12] – запропонована методика розрахунку оптимальних значень аргументів очікуваних фазних напруг після їх симетрування; [7] – оцінено ефективність

роботи установки симетрування напруг, система керування котрою побудована на основі отриманої математичної моделі, у порівнянні з існуючими; [8] – оцінено чутливість математичної моделі системи симетрування напруг, розробленої на основі поліпшених законів керування; [13] – проаналізовано можливості використання середовища Matlab для розробки систем управління компенсаторними симетрувальними установками.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1 – 13], були отримані у Житомирському державному технологічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на XXXV і XXXVI науково-практичних міжвузівських конференціях у Житомирському державному технологічному університеті (м. Житомир, 2010-2011 рр.) [9, 10], на XLI регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 2012 р.), на щорічній науково-технічній конференції молодих вчених та спеціалістів в інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова (м. Київ, 2014 р.) [11], на інтернет-конференції «Розвиток технічних наук на сучасному етапі» (присвяченій Дню науки) у Житомирському державному технологічному університеті (м. Житомир, 14 травня 2014 р.) [12], на II Українській конференції молодих науковців «Інформаційні технології – 2015» в Київському університеті ім. Бориса Грінченка (м. Київ, 28 травня 2015 р.) [13].

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 8-ох статтях у наукових фахових виданнях, що входять до переліку ДАК України [1 – 8], у тому числі в 3-ох статтях у наукових журналах, які входять у міжнародні наукометричні бази даних [4, 7, 8], з яких 1 входить у реферативну базу даних Scopus [8] та в 5-ох тезах доповідей на конференціях [9 – 13].

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (109 найменувань), 11 додатків. Основний зміст викладений на 113 сторінках друкованого тексту, містить 21 рисунок, 4 таблиці. Загальний обсяг роботи – 161 сторінка.

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.

У **першому розділі** проаналізовано негативний вплив несиметрії та

несинусоїдності струмів і напруг на споживачів електроенергії, а також засоби зменшення цього впливу.

Проведено аналіз моделей систем симетрування напруг і струмів компенсаційними СУ. В результаті було виявлено, що математичні моделі систем керування пристроями симетрування напруг і струмів можуть бути поліпшені.

Як видно з рис. 1, систему керування (регулятор) СУ, зручно розглядати у формі «чорної скриньки». На вхід регулятора подаються величини напруг і струмів зі сторони навантаження (штрихові лінії зі стрілками на рис. 1), також стан СУ (стрілка від СУ до регулятора на рис. 1) та інформація про струми у виводах СУ (штрихпунктирні лінії зі стрілками на рис. 1). На виході моделі регулятора отримується інформація про керуючу дію, котра повинна бути здійснена СУ.

В такому випадку, розробка моделі системи керування СУ, зводиться до визначення вхідних і вихідних величин та синтезу функціональної залежності між вхідними і вихідними величинами «чорної скриньки» регулятора. Саме такий спосіб представлення моделі характерний для більшості розв'язань задач моделювання систем керування СУ.

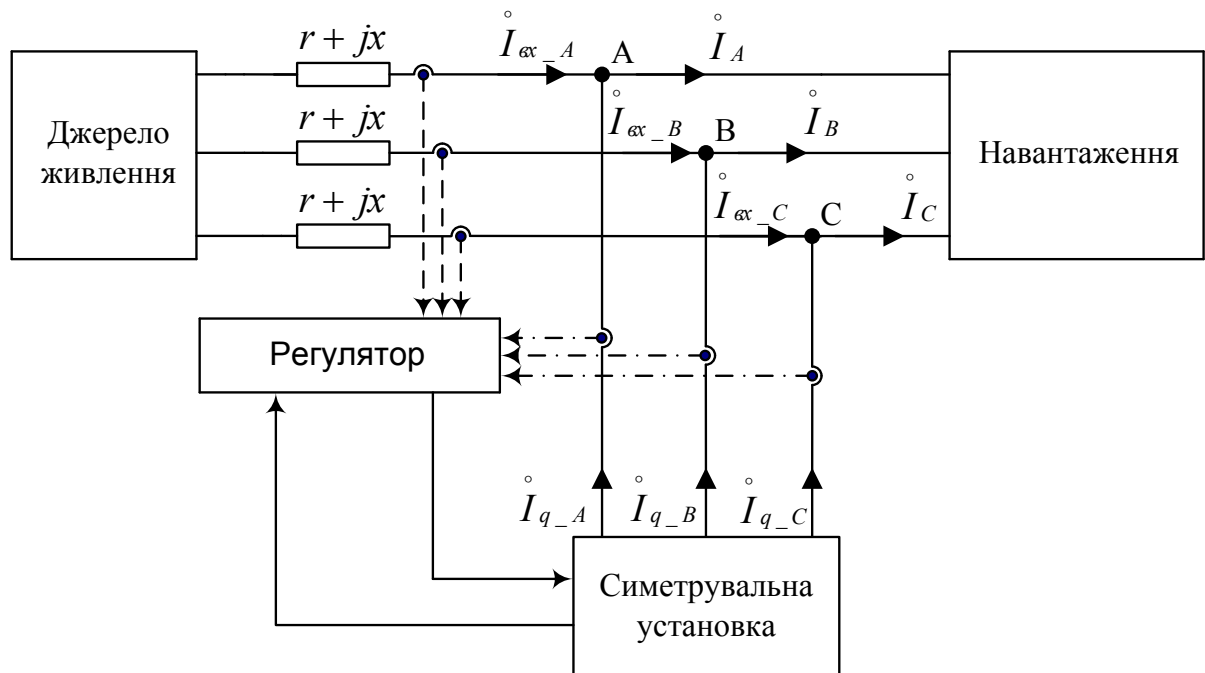


Рисунок 1 – Система керування компенсаційною СУ

Тому виникає необхідність розроблення нових математичних моделей систем керування СУ напруг і струмів. Для цього необхідно знайти інші способи розв'язання задач симетрування напруг і струмів. Також, необхідно розробити алгоритми керування компенсаційними СУ на основі отриманих математичних моделей.

У другому розділі розв'язано задачі симетрування напруг і струмів.

Нехай потрібно розрахувати параметри часткової компенсації реактивної потужності із симетруванням струмів. Тоді на вводі мережі (рис.2) струм, крім активної складової, матиме ще й реактивну (на практиці, як правило, – індуктивну), від реактивної потужності Q_{ex} . Очевидно, що, якщо сумарна повна потужність по трьох фазах дорівнює $P + j \cdot Q_{ex}$, тоді після симетрування на вводі мережі по кожній фазі встановиться потужність $\frac{1}{3}(P + j \cdot Q_{ex})$. Із врахуванням викладеного неважко знайти струми на вводі мережі, котрі встановлять після симетрування (рис. 2), а потім виразити струми компенсаційної СУ.

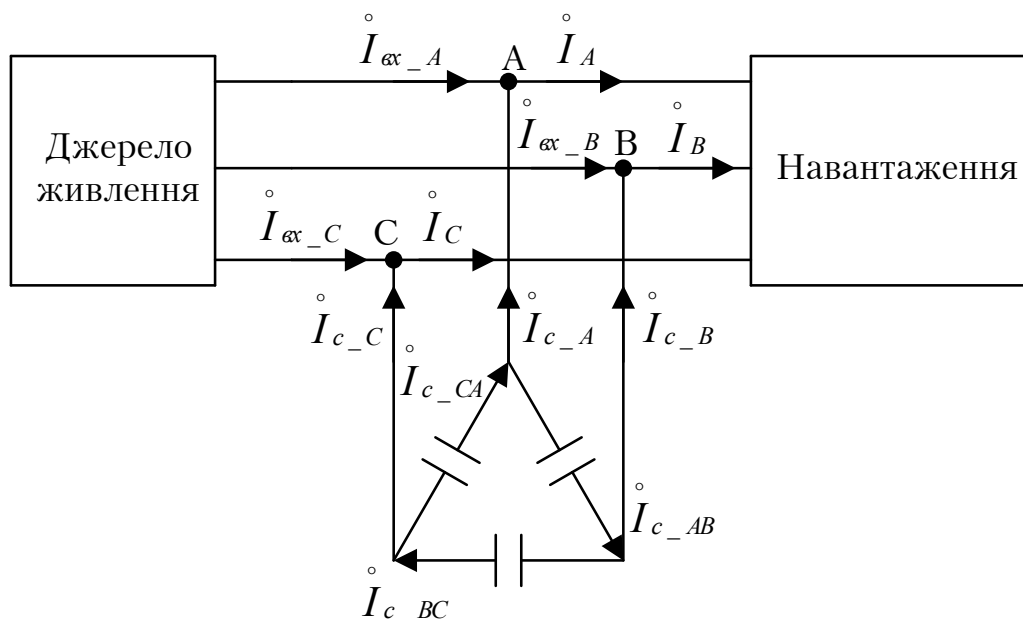


Рисунок 2 – Схема КРП з симетруванням струмів за допомогою конденсаторної компенсаційної установки (КУ)

Фазні струми СУ знайдуться таким чином:

$$\bar{I}_c = \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_{c_A} \\ \overset{\circ}{I}_{c_B} \\ \overset{\circ}{I}_{c_C} \end{bmatrix} = \bar{I} - \frac{P - j \cdot Q_{ex}}{3U^2} \cdot \bar{U}, \quad (1)$$

де $\bar{I} = \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_A, \overset{\circ}{I}_B, \overset{\circ}{I}_C \end{bmatrix}^T$ – вектор стовпець струмів фаз A, B і C у навантаженні;

$\bar{U} = \begin{bmatrix} \overset{\circ}{U}_A, \overset{\circ}{U}_B, \overset{\circ}{U}_C \end{bmatrix}^T$ – вектор стовпець фазних напруг;

$U_{\phi} = U_A = U_B = U_C$ – діюче значення фазної напруги, В.

Q_{ex} – вхідна реактивна потужність (ВРП), очікувана на ввіді електричної мережі після симетрування, вар.

На наступному кроці міжфазні потужності СУ для симетрування струмів з КРП запропоновано знаходити таким чином:

$$Q_{ab} = -2U_{\phi} I_{c_A} \cdot \cos\left(\arg(\overset{\circ}{I}_{c_A}) - \arg(\overset{\circ}{U}_C) - \frac{\pi}{6}\right), \quad (2)$$

$$Q_{bc} = -2U_{\phi} I_{c_B} \cdot \cos\left(\arg(\overset{\circ}{I}_{c_B}) - \arg(\overset{\circ}{U}_A) - \frac{\pi}{6}\right), \quad (3)$$

$$Q_{ca} = -2U_{\phi} I_{c_A} \cdot \cos\left(\arg(\overset{\circ}{I}_{c_A}) - \arg(\overset{\circ}{U}_A) - \frac{\pi}{6}\right). \quad (4)$$

При знаходженні міжфазних потужностей СУ, необхідних лише для симетрування струмів без КРП, зручно користуватись наступним співвідношенням:

$$Q_{c_S} = \begin{bmatrix} Q_{ab_S} \\ Q_{bc_S} \\ Q_{ca_S} \end{bmatrix} = Q_c - \min(Q_c) \cdot [1 \ 1 \ 1]^T, \quad (5)$$

де $Q_{c_S} = [Q_{ab_S} \ Q_{bc_S} \ Q_{ca_S}]^T$ – вектор-стовпець міжфазних потужностей СУ, необхідних для симетрування струмів без КРП;

$Q_c = [Q_{ab} \ Q_{bc} \ Q_{ca}]^T$ – вектор-стовпець міжфазних потужностей СУ, знайдених зі співвідношень (2) – (4) для КРП з симетруванням струмів.

При значній несиметрії мережевої напруги на практиці часто використовують часткове симетрування струмів з метою не отримати після виконання процесу симетрування струмів більш значного коефіцієнта зворотньої послідовності за напругою. Сутність наступного явища неважко зрозуміти, спираючись на той факт, що для часткового симетрування необхідно пропорційно зменшувати потужності СУ, знайдені для випадку повного симетрування. Зі співвідношень (1) – (4) неважко помітити, що при пропорційному зменшенні потужностей СУ аналогічно зменшуються її струми.

Для здійснення часткового симетрування у співвідношеннях (1) – (4) замість фазних мережевих напруг має фігурувати трійка прямої симетричної послідовності цих напруг, причому коефіцієнт симетрування можна ввести або у (1), або у (2) – (4). Тоді вирази для часткового симетрування струмів після введення коефіцієнта симетрування у (2) – (4) запишуться таким чином:

$$\bar{I}_c = \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_{c_A} \\ \overset{\circ}{I}_{c_B} \\ \overset{\circ}{I}_{c_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overset{\circ}{I}_A \\ \overset{\circ}{I}_B \\ \overset{\circ}{I}_C \end{bmatrix} - \frac{P - j \cdot Q_{\text{вх}}}{3U_{\phi+}^2} \cdot \begin{bmatrix} \overset{\circ}{U}_{A+} \\ \overset{\circ}{U}_{B+} \\ \overset{\circ}{U}_{C+} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$Q_{ab} = -2k_2 U_{\phi+} I_{c_A} \cdot \cos \left(\arg(\overset{\circ}{I}_{c_A}) - \arg(\overset{\circ}{U}_{C+}) - \frac{\pi}{6} \right), \quad (7)$$

$$Q_{bc} = -2k_2 U_{\phi+} I_{c_B} \cdot \cos \left(\arg(\overset{\circ}{I}_{c_B}) - \arg(\overset{\circ}{U}_{A+}) - \frac{\pi}{6} \right), \quad (8)$$

$$Q_{ca} = -2k_2 U_{\phi+} I_{c_A} \cdot \cos \left(\arg(\overset{\circ}{I}_{c_A}) - \arg(\overset{\circ}{U}_{A+}) - \frac{\pi}{6} \right), \quad (9)$$

де $\left[\overset{\circ}{U}_{A+}, \overset{\circ}{U}_{B+}, \overset{\circ}{U}_{C+} \right]^T$ – вектор стовпець прямої симетричної послідовності фазних напруг;

$U_{\phi+} = U_{A+} = U_{B+} = U_{C+}$ – діюче значення прямої симетричної послідовності фазної напруги, В;

k_2 – коефіцієнт симетрування, $k_2 \in (0;1)$.

Також встановлено зв'язок між умовами симетрування навантажень з використанням фазних параметричних джерел струму і міжфазних реактивних потужностей, за рахунок введення комплексного коефіцієнта зв'язку.

Нехай вектор стовпець еквівалентних міжфазних потужностей СУ параметричного джерела струмів для симетрування навантажень $(\underline{S}_{c_AB}, \underline{S}_{c_BC}, \underline{S}_{c_CA})^T$, а вектор-стовпець міжфазних реактивних потужностей БК для симетрування струмів при тих же початкових умовах дорівнює $(Q_{c_AB}, Q_{c_BC}, Q_{c_CA})^T$. Встановлено, що між цими двома векторами-стовпцями існує наступний взаємозв'язок:

$$\begin{bmatrix} Q_{c_AB} \\ Q_{c_BC} \\ Q_{c_CA} \end{bmatrix} = -\text{Im} \left(\begin{bmatrix} \underline{S}_{c_AB} \\ \underline{S}_{c_BC} \\ \underline{S}_{c_CA} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{S}_1 \\ \underline{S}_2 \\ \underline{S}_3 \end{bmatrix} \right), \quad (10)$$

де $(\underline{S}_1, \underline{S}_2, \underline{S}_3)^T$ – трійка потужностей, котрі визначаються таким чином:

$$\arg(\underline{S}_1) = \varphi; \quad |\underline{S}_1| = |\underline{S}_2| = |\underline{S}_3| = S;$$

$$\begin{bmatrix} \underline{S}_1 \\ \underline{S}_2 \\ \underline{S}_3 \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} e^{j \cdot \varphi} \\ e^{j \cdot \left(\varphi - \frac{2\pi}{3} \right)} \\ e^{j \cdot \left(\varphi + \frac{2\pi}{3} \right)} \end{bmatrix}.$$

Причому потужності вектора-стовпця $(\underline{S}_1, \underline{S}_2, \underline{S}_3)^T$ матимуть ті ж дійсні частини, що й потужності вектора-стовпця $(\underline{S}_{c_AB}, \underline{S}_{c_BC}, \underline{S}_{c_CA})^T$, тобто:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB}) &= \operatorname{Re}(\underline{S}_1); & \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_BC}) &= \operatorname{Re}(\underline{S}_2); \\ \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_CA}) &= \operatorname{Re}(\underline{S}_3). \end{aligned}$$

Аргумент потужності \underline{S}_1 знайдеться за допомогою наступного співвідношення:

$$\varphi = \begin{cases} \left\{ \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_BC}) + \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB})}{\sqrt{3} \cdot \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB})} \right); \right. \\ \left. \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB}) > 0; \right. \\ \left. \pi + \operatorname{arctg} \left(\frac{2 \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_BC}) + \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB})}{\sqrt{3} \cdot \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB})} \right); \right. \\ \left. \operatorname{Re}(\underline{S}_{c_AB}) < 0. \right. \end{cases} \quad (11)$$

Величина $|\underline{S}_1| = |\underline{S}_2| = |\underline{S}_3| = S$ знаходиться таким чином:

$$S = \frac{\operatorname{Re}(\underline{S}_1)}{\cos \varphi}. \quad (12)$$

Для розв'язання задачі симетрування напруг була розглянута ділянка електричної мережі разом із еквівалентними опорами в лініях між джерелом живлення і навантаженням (рис. 3).

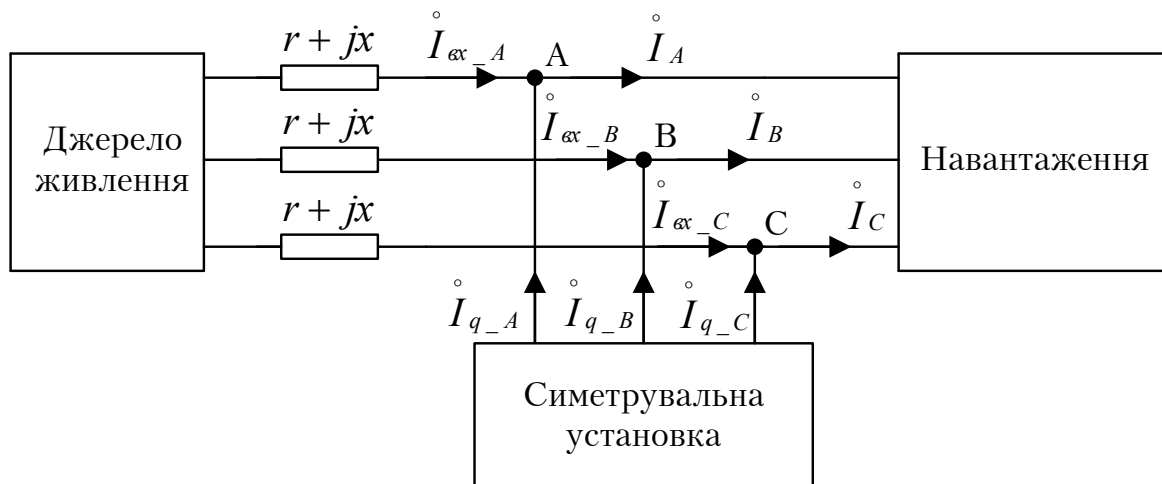


Рисунок 3 – Схема симетрування напруг компенсаційною СУ

Визначено, що для отримання потрібної фазної напруги $\overset{\circ}{U}_i$ ($i=A, B, C$) необхідно увімкнути СУ з наступною фазною провідністю:

$$\underline{Y}_{q_i} = \frac{\overset{\circ}{U}_{S_i} - \overset{\circ}{U}_i}{\overset{\circ}{U}_i} \cdot \underline{Y}_л - \underline{Y}_i, \quad (13)$$

або з наступною фазною потужністю:

$$\underline{S}_{q_i} = \overset{\circ}{U}_i \overset{*}{U}_{S_i} \overset{*}{\underline{Y}}_л - U_i^2 \left(\overset{*}{\underline{Y}}_i + \overset{*}{\underline{Y}}_л \right). \quad (14)$$

де \underline{Y}_i – еквівалентна провідність i -ої фази навантаження ($i=A, B, C$), См;

$\underline{Y}_л$ – еквівалентна провідність лінії живлення, См;

$\overset{\circ}{U}_{S_i}$ – напруга i -ої фази джерела живлення ($i=A, B, C$), В.

Нехай потрібно симетрувати напруги до величин $\overset{\circ}{U}_A = U_\phi \cdot e^{j \cdot \arg(\overset{\circ}{U}_A)}$,

$\overset{\circ}{U}_B = U_\phi \cdot e^{j \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) - \frac{2\pi}{3} \right)}$, $\overset{\circ}{U}_C = U_\phi \cdot e^{j \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) + \frac{2\pi}{3} \right)}$. При невірному виборі величини

$\arg(\overset{\circ}{U}_A)$ можна отримати від'ємні дійсні частини повних потужностей СУ, тобто від'ємні активні потужності. Це свідчить про те, що СУ повинна здійснювати ін'єкцію активної потужності в електромережу. При використанні, наприклад, конденсаторних установок такий результат є неприпустимим.

Сформульовано наступні критерії вибору $\arg(\overset{\circ}{U}_A)$:

1. Невід'ємність активних потужностей СУ:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\underline{S}_{q_A}) \geq 0; \\ \operatorname{Re}(\underline{S}_{q_B}) \geq 0; \\ \operatorname{Re}(\underline{S}_{q_C}) \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

2. Найменша абсолютна величина $\arg(\overset{\circ}{U}_A)$:

$$\left| \arg(\overset{\circ}{U}_A) \right| \rightarrow \min. \quad (16)$$

Для спрощення аналізу, умови (15) і (16) можна подати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_A}) \geq 0; \\ \operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_B}) \geq 0; \\ \operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_C}) \geq 0; \\ \left| \arg(\overset{\circ}{U}_A) \right| \rightarrow \min. \end{cases} \quad (17)$$

Виразивши дійсні частини провідностей СУ зі співвідношення (13), отримано наступні вирази:

$$\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_A}) \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) \right) = \frac{Y_n \cdot U_{S_A}}{U_A} \cos \left(\arg(\underline{Y}_n) + \arg(\overset{\circ}{U}_{S_A}) - \arg(\overset{\circ}{U}_A) \right) - \operatorname{Re}(\underline{Y}_n) - \operatorname{Re}(\underline{Y}_A), \quad (18)$$

$$\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_B}) \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) \right) = -\operatorname{Re}(\underline{Y}_n) - \operatorname{Re}(\underline{Y}_B) + \frac{Y_n \cdot U_{S_B}}{U_B} \times \cos \left(\arg(\underline{Y}_n) + \arg(\overset{\circ}{U}_{S_B}) - \arg(\overset{\circ}{U}_A) + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (19)$$

$$\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_C}) \left(\arg(\overset{\circ}{U}_A) \right) = -\operatorname{Re}(\underline{Y}_n) - \operatorname{Re}(\underline{Y}_C) + \frac{Y_n \cdot U_{S_C}}{U_C} \times \cos \left(\arg(\underline{Y}_n) + \arg(\overset{\circ}{U}_{S_C}) - \arg(\overset{\circ}{U}_A) - \frac{2\pi}{3} \right). \quad (20)$$

Розв'язки нерівностей $\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_A}) \geq 0$, $\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_B}) \geq 0$, $\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_C}) \geq 0$ знайдуться таким чином (рис. 4):

1) для $\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_A}) \geq 0$, $\arg(\overset{\circ}{U}_A) \in [\alpha_{1A}, \alpha_{2A}]$:

$$\alpha_{1,2A} = \arg(\underline{Y}_n) + \arg(\overset{\circ}{U}_{S_A}) \mp \arccos \left(\frac{U_A \cdot (\operatorname{Re}(\underline{Y}_A) + \operatorname{Re}(\underline{Y}_n))}{U_{S_A} \cdot Y_n} \right),$$

2) для $\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_B}) \geq 0$, $\arg(\overset{\circ}{U}_A) \in [\alpha_{1B}, \alpha_{2B}]$:

$$\alpha_{1,2B} = \arg(\underline{Y}_n) + \arg(\overset{\circ}{U}_{S_B}) \mp \arccos \left(\frac{U_B \cdot (\operatorname{Re}(\underline{Y}_B) + \operatorname{Re}(\underline{Y}_n))}{U_{S_B} \cdot Y_n} \right) + \frac{2\pi}{3},$$

3) для $\operatorname{Re}(\underline{Y}_{q_C}) \geq 0$, $\arg(\overset{\circ}{U}_A) \in [\alpha_{1C}, \alpha_{2C}]$:

$$\alpha_{1,2C} = \arg(\underline{Y}_n) + \arg(\overset{\circ}{U}_{S_C}) \mp \arccos \left(\frac{U_C \cdot (\operatorname{Re}(\underline{Y}_C) + \operatorname{Re}(\underline{Y}_n))}{U_{S_C} \cdot Y_n} \right) - \frac{2\pi}{3}.$$

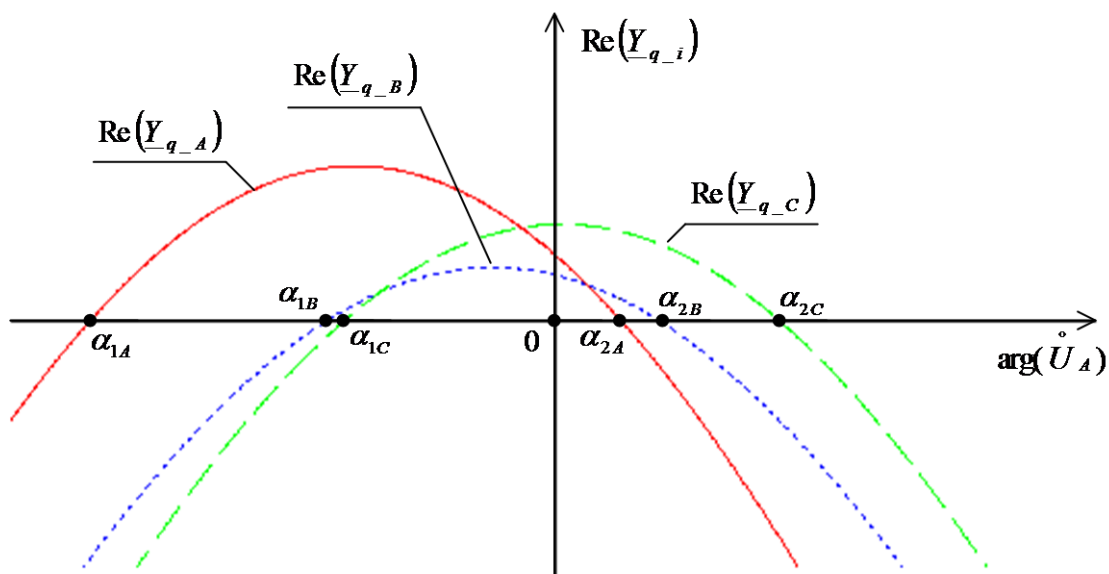


Рисунок 4 – Графіки функцій (18) – (20) в околі $\arg(U_A) = 0$

Враховуючи форму кривих (18) – (20) в околі початку координат, неважко зробити висновок про той факт, що розв’язок системи (17) потрібно шукати серед нульових точок розглянутих функцій. Поясненням даному факту є досягнення максимальної економічності роботи СУ вибором такого аргументу очікуваної фазної напруги, при котрому активна потужність, споживана СУ, буде найменшою. Тому розв’язок (17) запишеться таким чином:

$$\arg(U_A) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) \geq \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}); \\ \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}); \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}) < \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}); \\ \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}). \end{array} \right. \end{cases} \quad (21)$$

Пошук оптимального аргументу очікуваної фазної напруги можна здійснювати і за іншими критеріями, котрі виходять зі специфіки конкретної практичної задачі. Якщо, наприклад, вимоги до економічності роботи СУ будуть жорсткими, тоді у системі нерівностей (17) умова, котра визначена в (16), частково стане зайвою, проте додадуться дії, пов’язані з перерахунком і порівнянням суми активних потужностей чи дійсних частин провідностей СУ при різних значеннях аргументу очікуваної фазної напруги. У такому випадку розв’язок (17) знайдеться за допомогою наступного співвідношення:

$$\arg(U_A) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} P_q(\min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C})) \geq P_q(\max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C})); \\ \max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C}); \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} P_q(\min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C})) < P_q(\max(\alpha_{1A}, \alpha_{1B}, \alpha_{1C})); \\ \min(\alpha_{2A}, \alpha_{2B}, \alpha_{2C}). \end{array} \right. \end{cases} \quad (22)$$

Як вказано у першому розділі, для моделей систем керування СУ характерне їх представлення у формі «чорної скриньки» (рис. 1). Оскільки розв'язками задач симетрування напруг і струмів є неявно задані функції багатьох змінних (таких як, струми і напруги у лініях живлення та навантаженні, опір чи провідність лінії живлення), на виході котрих отримуються фазні чи міжфазні потужності СУ, тоді неважко отримати відповідні моделі систем керування СУ.

Модель системи керування СУ напруг представлена співвідношеннями (11), (18) – (21). Модель системи керування СУ струмів представлена співвідношеннями (1) – (4).

Такі моделі будуть нелінійні, оскільки при синтезі моделей розв'язуються нелінійні алгебраїчні рівняння, детерміновані, оскільки кожному набору вхідних параметрів функції «чорної скриньки» відповідає однозначно визначений набір вихідних параметрів. Також ці моделі будуть статичні, оскільки у кожен момент часу будуть давати лише «фотографію» системи, її зріз.

Оскільки при виведенні функціональних залежностей між параметрами електричної мережі і параметрами СУ використовувались лише закони Ома, Кірхгофа, аналітичні перетворення алгебраїчних виразів, співвідношення тригонометрії і дії над комплексними числами, тоді отримані моделі є адекватними. Дійсно, при застосуванні отриманих моделей на практиці, отримуємо розбіжність між отриманими і очікуваними показниками струмів і напруг менше 5 %, що пояснюється похибкою вимірювальних приладів.

Комп'ютерне моделювання процесів симетрування напруг і струмів у середовищі Matlab (Simulink) також підтвердило адекватність розроблених моделей.

У третьому розділі проаналізовано похибки вимірювання електричних величин існуючими вимірювальними приладами. Встановлено, що похибки вимірювання діючих значень напруг і струмів не перевищують 0,2 %, а кутів зсуву між фазними напругами і коефіцієнтів потужності – не більше 0,5 %.

Проаналізовано похибки обчислення елементарних функцій (ЕФ) мікропроцесорними пристроями. Визначено, що для реалізації алгоритмів обчислення параметрів СУ на основі математичних моделей, наведених у другому розділі, необхідний мікропроцесорний пристрій з розрядністю суматорів і регістрів $n = 32$. Встановлено, що у випадку використання тільки табличного методу достатньо розрядності суматорів і регістрів мікропроцесорного пристрою $n = 16$, проте метод “цифра за цифрою” більш поширений при обчисленні ЕФ в більшості мікропроцесорів по причині універсальності і, як правило, більшої швидкодії у порівнянні з табличним.

Визначено, що при використанні сучасних мікропроцесорних пристроїв, похибки обчислення параметрів СУ будуть залежати від похибок вимірювання величин напруг, струмів і їх аргументів.

Розроблено програми для імітаційного моделювання процесу здобуття і

обробки експериментальних даних обчислення міжфазної реактивної потужності (РП) СУ для симетрування струмів і фазної потужності СУ для симетрування напруг. На основі розроблених програм проведено статистичну обробку результатів обчислень міжфазних РП СУ для симетрування струмів і фазних потужностей для симетрування напруг. Встановлено, що закон розподілу випадкової величини узгоджується з нормальним законом розподілу. Середньоквадратичні відхилення обчислених міжфазних РП СУ для симетрування струмів, а також абсолютних величин і аргументів фазних потужності СУ для симетрування напруг дорівнюють $\approx 1,5\%$, $\approx 0,3\%$ та $\approx 0,04\%$ відповідно. Визначено, що максимальна похибка міжфазних РП СУ для симетрування струмів не більше 4% , а модулів і аргументів фазних потужностей СУ для симетрування напруг не більше відповідно $0,9\%$ і $0,03\%$. Зазначимо, що похибки аргументів приведені до шкали вимірювання кутів.

Досліджено чутливість отриманих у другому розділі математичних моделей. Доведено, що типові датчики напруг та струмів, розглянуті в даному розділі, є цілком придатними для реалізації систем управління СУ на основі математичних моделей, котрі розглядаються.

У четвертому розділі розроблені моделі систем управління конденсаторними СУ. Для наочності розглянуто лише конденсаторні компенсаційні СУ, проте розроблені у другому розділі математичні моделі можуть бути використані і для інших типів компенсаційних СУ.

Розроблено дві моделі, котрі можуть бути застосовані для побудови пристроїв управління конденсаторних СУ при різних компенсаційних і симетрувальних критеріях. У моделі, котру викладено у підрозділі 4.1, враховано підтримання ВРП на потрібному рівні з повним симетруванням струмів у радіальній електричній мережі. За наступною моделлю (підрозділ 4.2) виконується лише симетрування напруг у вузлі електричної мережі.

Було оцінено точність отриманої моделі системи керування СУ для симетрування напруг у електричній мережі (рис. 5), для котрої вже досліджувався процес симетрування напруг іншими методами.

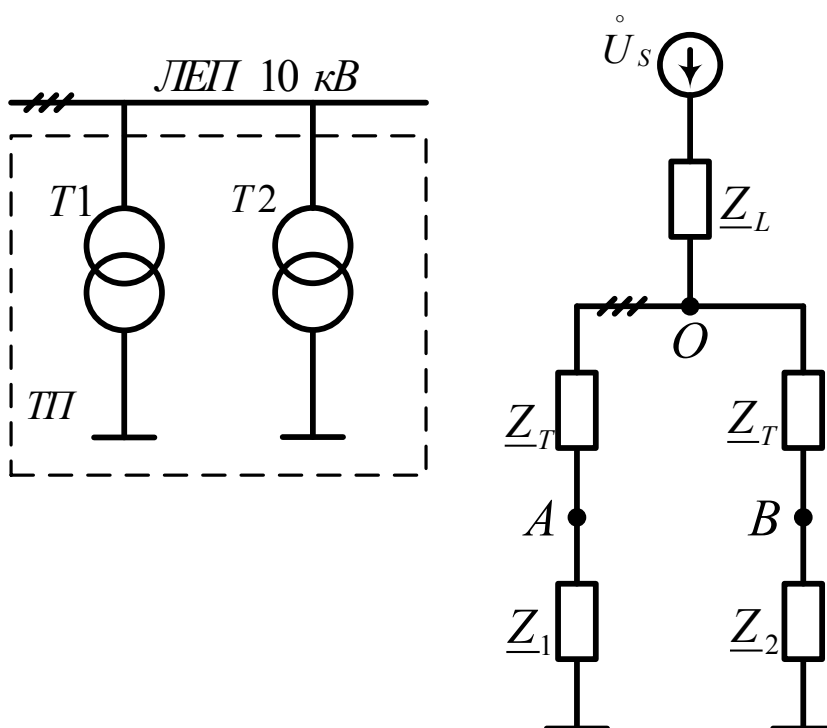


Рисунок 5 – Спрощена однолінійна схема під'єднання двотрансформаторної ТП до лінії 10 кВ (ліворуч) і заступна схема, перерахована на 0,4 кВ (праворуч)

Було встановлено, що отримана у другому розділі модель системи керування СУ напруг дає кращі результати, ніж існуючі моделі. Для мережі рис. 5 при симетруванні напруг у вузлі А отримано напругу зворотної послідовності на 30% меншу, ніж отримано існуючими методами. Також при симетруванні напруг у вузлах А і В (рис. 5) отримано напругу зворотної послідовності на 10 і 15% відповідно меншу, ніж отримано за допомогою існуючих моделей симетрування напруг.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання підвищення якості електроенергії шляхом зменшення несиметрії напруг і струмів за допомогою СУ, що реалізують отримані закони керування, зокрема:

1. Проведено аналітичний огляд існуючих моделей систем керування СУ напруг і струмів. Встановлено, що математичні моделі систем керування СУ напруг досліджені у повній мірі лише при використанні комбінованих поперечно-поздовжніх засобів симетрування, з використанням компенсаційних СУ і симетрувальних трансформаторів. Моделі систем керування компенсаційними СУ напруг досліджені не у повній мірі.

2. Запропоновано алгоритм визначення умов симетрування струмів конденсаторними установками, котрий базується на відомих співвідношеннях

визначення фазних струмів статичного синхронного компенсатора. Проте отриманий алгоритм дає результати, ідентичні результатам, отриманих за допомогою існуючих алгоритмів.

3. Дістали подальший розвиток математичні моделі систем керування компенсаційними СУ для симетрування напруг, котрі отримані за рахунок іншої постановки задачі.

4. Проведена оцінка похибок обчислення параметрів СУ мікропроцесорними пристроями на основі розроблених математичних моделей. За початкові дані взято максимально можливі похибки вимірювання для діючих значень напруг і струмів (0,2 %) і для кутів зсуву між фазними напругами та коефіцієнтів потужностей (0,5 %). Визначено, що максимальна похибка міжфазних РП СУ для симетрування струмів не більше 4 %, а модулів і аргументів фазних потужностей СУ для симетрування напруг не більше відповідно 0,9 % і 0,03 %. Зазначимо, що похибки аргументів приведені до шкали вимірювання кутів. Також визначено, що для алгоритмічної реалізації отриманих математичних моделей необхідний мікропроцесорний пристрій з розрядністю регістрів і суматорів не менше $n = 32$.

5. Проведена оцінка чутливості отриманих математичних моделей. В результаті встановлено, що типові датчики струмів і напруг є цілком придатними для реалізації систем управління СУ на основі розроблених моделей.

6. Проведена оцінка точності роботи СУ, системи керування котрими побудовані на основі розроблених математичних моделей. Було встановлено, що отримана у другому розділі модель системи керування установкою симетрування напруг дає кращі результати, ніж існуючі моделі. Проте кращий симетрувальний ефект спостерігається, якщо симетрування проводити для одного вузла електричної мережі. Це пов'язано з тим, що, після вмикання секцій СУ в одному вузлі, напруги і струми у інших вузлах цієї мережі також змінюються. Для розглянутої мережі при симетруванні напруг в одному вузлі отримано напругу зворотної послідовності на 30% меншу, ніж отримано за допомогою існуючих моделей систем керування СУ напруг. Також, при симетруванні напруг у двох вузлах, отримано напругу зворотної послідовності на 10 і 15% відповідно меншу, ніж отримано за допомогою існуючих моделей систем керування СУ напруг. Отримана модель системи керування СУ струмів дає результати, ідентичні результатам існуючих моделей систем керування СУ струмів.

7. На основі розроблених математичних моделей систем керування СУ розроблено дві моделі систем керування конденсаторними СУ. При використанні першої моделі досягається підтримання ВРП на потрібному рівні з повним симетруванням струмів у радіальних мережах. При використанні другої моделі досягається симетрування напруг з автоматичним вибором оптимального значення аргумента очікуваної напруги.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гніліцький, В.В. Компенсація реактивної потужності в мережах з періодичним несинусоїдним струмом [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2009. – №2(49). – С. 28–32.
2. Гніліцький, В.В. Автоматизація керування установками компенсації реактивної потужності [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2010. – №2(53). – С. 74–78.
3. Гніліцький, В.В. Керування установками компенсації реактивної потужності за критерієм зменшення втрат потужності в радіальних мережах [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2011. – №3(58). – С. 118–122.
4. Гніліцький, В.В. Розрахунок компенсації реактивної потужності та симетрування навантаження у трипровідних мережах на основі теорії Фризе [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №1/8(55). – С. 38–41.
5. Гніліцький, В.В. Розрахунок параметрів оптимального симетрування напруг компенсаційними установками у трифазних мережах [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – №3(62). – С. 32–36.
6. Гніліцький, В.В. Розрахунок симетрування напруг у трифазних мережах на основі теорії Фризе [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2012. – №2(61). – С. 71–74.
7. Гніліцький, В.В. Розробка моделі симетрування напруг у трифазних мережах [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №1/8(73). – С. 11–14.
8. Gnilitsky V. Exploring sensitivity of mathematical model for the system of voltage symmetrization [Text] / V. Gnilitsky, A. Polishchuk, R. Petrosyan // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2016. – №5/8(83). – р.р. 4–8.
9. Гніліцький, В.В. Способи і засоби керування установками компенсації реактивної потужності [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Тези XXXV науково-практичної міжвузівської конференції. – Житомир, 2010. – С. 45 – 46.
10. Гніліцький, В.В. Вирішення проблеми несинусоїдності напруги як одне із завдань компенсації реактивної потужності [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Тези XXXVI науково-практичної міжвузівської конференції. – Житомир, 2011. – С. 124 – 125.
11. Поліщук, О. А. Моделі симетрування струмів і напруг на основі теорії Фризе [Текст] / О.А. Поліщук // XXXIII науково-технічна конференція

- «Моделювання»: Тези доп. – Київ, 2014. – С. 4.
12. Гніліцький, В.В. Моделі симетрування струмів і напруг на основі теорії Фризе [Текст] / В.В. Гніліцький, О.А. Поліщук // Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів. – Житомир, 2014. – С. 242 – 243.
13. Поліщук, О. А. Використання середовища Matlab для розробки систем управління компенсаційними симетрувальними установками в електричних мережах [Текст] / О.А. Поліщук // Збірник тез II Української конференції молодих науковців «Інформаційні технології – 2015»: Тези доп. – Київ, 2015. – С. 126 – 128.

АНОТАЦІЇ

Поліщук О. А. Методи підвищення точності симетрування напруг і струмів в електричних 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 – 2017.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання підвищення якості електроенергії шляхом зменшення несиметрії напруг і струмів за допомогою симетрувальних установок, котрі реалізують отримані закони керування.

Розроблено математичні моделі систем керування компенсаційно-симетрувальними установками для симетрування струмів і напруг. Причому розроблена модель системи керування компенсаційно-симетрувальною установкою для симетрування напруг має перевагу перед існуючими завдяки іншій постановці задачі моделювання. Розроблені моделі можуть бути покладені в основу побудови пристроїв керування компенсаційними установками для симетруванні напруг і струмів.

Проведена оцінка чутливості отриманих математичних моделей систем керування симетрувальними установками.

Запропоновано дві моделі систем управління компенсаційними конденсаторними симетрувальними установками, в основу котрих покладені розроблені математичні моделі.

Проведена оцінка точності розробленої математичної моделі системи керування установкою симетрування напруг. Було встановлено, що отримана у другому розділі модель системи керування установкою симетрування напруг дає кращі результати, ніж існуючі моделі.

Ключові слова: симетрування струмів, симетрування напруг, компенсація реактивної потужності, несиметрія, система керування, якість електроенергії.

Полищук А. А. Методы повышения точности симметрирования напряжений и токов в электрических сетях . – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, г. Винница – 2017.

Диссертация посвящена решению научного задания повышения качества электроэнергии путем уменьшения несимметрии напряжений и токов при помощи симметрирующих установок, которые реализуют полученные законы управления.

Разработано математические модели систем управления компенсационно-симметрирующими установками для симметрирования токов и напряжений. Получили дальнейшее развитие математические модели систем управления компенсационно-симметрирующими установками для симметрирования напряжений за счет введения дополнительных критериев симметрирования. Причем разработанная модель системы управления компенсационно-симметрирующей установкой для симметрирования напряжений имеет превосходство перед существующими благодаря другой постановке задачи моделирования. Разработанные модели могут быть использованы при построении устройств управления компенсационными установками для симметрирования напряжений и токов.

Проведена оценка чувствительности полученных математических моделей систем управления симметрирующих установок. В результате установлено, что типичные датчики токов и напряжений вполне пригодны для реализации систем управления симметрирующими установками на основе разработанных моделей.

Предложено две модели систем управления компенсационными конденсаторными симметрирующими установками, в основу которых положены разработанные математические модели. При использовании первой модели достигается поддержание входной реактивной мощности на нужном уровне с полным симметрированием токов в радиальной сети. Причем, если уровень входной реактивной мощности не задан, то эта величина рассчитывается по критерию минимальных потерь активной мощности. При использовании второй модели достигается симметрирование напряжений с автоматическим выбором оптимального значения ожидаемого напряжения.

Проведена оценка точности разработанной математической модели системы управления установки симметрирования напряжений. Было установлено, что полученная модель системы управления установки симметрирования напряжений дает лучшие результаты, чем существующие модели.

Ключевые слова: симметрирование токов, симметрирование напряжений, компенсация реактивной мощности, несимметрия, система управления, качество электроэнергии.

Polishchuk A. A. Methods for improving the accuracy of the balancing the voltages and currents in electrical networks. – A manuscript.

The dissertation for the degree of the Candidate of Science (Engineering) on a speciality 05.14.02 – Electrical stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia – 2017.

The dissertation is devoted to decision of the scientific task of improving the quality of electric power by reducing the asymmetry of voltages and currents by means of balancing units that realize the obtained control laws.

Mathematical models of control systems for compensating-balancing installations for balancing currents and voltages are developed. Moreover, the developed model of the control system of a compensating-balancing installation for voltages balancing has superiority over existing ones due to another formulation of the modeling problem. The developed models can be used in the construction of control devices for compensation systems for balancing voltages and currents.

The sensitivity of the obtained mathematical models of the control systems of the balancing units is estimated.

Two models of control systems for compensating condenser symmetric installations are proposed, based on the developed mathematical models.

The accuracy of the developed mathematical model of the control system of the voltage balancing unit was estimated. It was found that the obtained model of the control system of the voltage balancing unit gives better results than existing models.

Keywords: balancing currents, balancing voltages, reactive power compensation, asymmetry, control system, quality of electric power.

Підписано до друку 5.09.2017 р. Формат 29.7×42¼
Наклад 100 прим. Зам. № 2017-328
Віддруковано в інформаційному редакційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:59-87-38
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.