

## УЗАГАЛЬНЕНІ МЕТОДИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ В ТРИФАЗНИХ СИСТЕМАХ З НЕСИМЕТРИЧНИМИ ТА НЕЛІНІЙНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

Ягуп К. В.

*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова*

*Запропоновано застосування пошукової оптимізації для оптимізації режимів трифазних систем з несиметричними та нелінійними навантаженнями.*

**Постановка проблеми.** Істотними явищами при дослідженнях електромагнітної сумісності в електричних системах є несиметрія і несинусоїдальність струмів і напруг в системі, а також рівні реактивної потужності, присутні в ній. Граничні величини, що пов'язані із несинусоїдальністю, задаються нормативними документами. Однак контроль реальних значень на практиці здійснюється недостатньо.

Бурхливий розвиток силової напівпровідникової техніки відкрив нові можливості у вирішенні завдань поліпшення параметрів електричної енергії, що характеризують її якість. Апаратні та програмні засоби обчислювальної техніки надають широкі можливості для вдосконалення методів аналізу та синтезу пристроїв симетрування, компенсації реактивної потужності і боротьби з вищими гармоніками в системах електропостачання. Величезна номенклатура мікроконтролерів, що з'явилися в останнє десятиліття, забезпечує широкі можливості реалізації найскладніших систем управління пристроями для підвищення якості електроенергії в системах електропостачання та електроспоживання.

Таким чином, представляється актуальною розробка нових методів аналізу електромагнітних процесів і синтезу пристроїв симетрування і компенсації реактивної потужності в системах електропостачання. Перспективними представляються методи, які можна заснувати на застосуванні комп'ютерних методів і моделей з використанням оптимізаційних методів, що дозволяє здійснювати постановку завдань в узагальненому вигляді і вирішувати їх з високою точністю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При несиметричному навантаженні в системі електропостачання виникає несиметрія, яка негативно впливає як на споживачів мережі, так і на саму систему [1]. Традиційно для симетрування струмів застосовуються симетро-компенсуючі пристрої, що представляють собою реактивні елементи, найчастіше косинусні конденсатори, які підключені між фазами [2]. Однак такі пристрої не можуть виконати симетрію у повній мірі, так як його елементи мають дискретні значення. Точне значення реактивних елементів симетро-компенсуючого пристрою можна розрахувати із використанням пошукової оптимізації, а потім із використанням підключених зустрічно-паралельних тиристорів настроїти значення реактивних елементів до необхідних величин.

**Мета статті.** Пропонується дослідити застосування оптимізаційних методів для оптимізації режимів трифазних систем з несиметричними та нелінійними навантаженнями.

**Основні матеріали дослідження.** При реалізації пошукової оптимізації необхідно визначити параметри оптимізації і сформулювати критерії оптимізації. Параметрами оптимізації можуть виступати параметри реактивних елементів симетро-компенсуючого пристрою, або при застосуванні силових активних фільтрів амплітуди еталонних сигналів і початкову напругу на накопичувальному конденсаторі. Критеріями оптимізації можуть бути баланс активних потужностей на навантаженні та на джерелах живлення, відсутність реактивної потужності, рівність амплітуд живильних струмів, або зменшення амплітуд живильних струмів до найменшого значення, зведення до нуля зворотної симетричної складової струму в трифазних трипровідних системах та подавлення нульової І0 і зворотної І2 симетричної складової, у випадку чотирипровідних систем.

Виходячи з цих положень, має сенс цільову функцію сформулювати у вигляді кульової метрики. Наприклад, кульова метрика, складена з реактивних потужностей джерел:

$$M = \sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}. \quad (1)$$

Реалізація пошукової оптимізації може бути здійснена у програмі MATLAB за допомогою вбудованих функцій `fminsearch()` або `fminunc()` та візуальної моделі системи електропостачання із симетро-компенсуючим пристроєм або силовим активним фільтром. Також можна вирішити задачу за допомогою складеної математичної моделі у пакеті MathCAD.

Проведено дослідження несиметричного режиму роботи системи електропостачання з використанням математичного пакета MathCAD для вирішення сформульованої математичної моделі, що складається з топологічних і компонентних рівнянь системи. Розрахунки показали, що в результаті несиметрії струми через джерела живлення можуть протікати в як в прямому так і в зворотному напрямку, а реактивна потужність в три рази перевищує активну потужність, споживану навантаженням.

Також в MathCAD був здійснений розрахунок параметрів симетро-компенсуючого пристрою з використанням пошукової оптимізації. Для цієї мети, змінні повної системи були доповнені комплексними опорними компенсуючих елементів. Умови компенсації реактивної потужності були сформульовані у вигляді критерію рівності нулю реактивної потужності, що віддається кожним джерелом е.р.с. Для реалізації симетро-компенсуючого пристрою виключно реактив-

ними елементами, введені відповідні обмеження на відсутність дійсних частин у опорів цих елементів. Додатково введено також обмеження на знак уявної частини опорів симетро-компенсуючих елементів, який відповідає саме ємнісному характеру цих елементів. Після виконання пошукової оптимізації амплітуди струмів в окремих фазах зменшилися в чотири рази, амплітуди напруг на вузлах навантаження стали однаковими, струми в кожній з фаз повністю збіглися з фазовими кутами з їх напругами.

Проведений аналітичний метод розрахунку параметрів симетро-компенсуючого пристрою, суть якого в розрахунку струму зворотної послідовності по амплітудам несиметричних струмів мережі і подальшому обчисленні струмів симетруючого пристрою, не виконав повного симетрування струмів. Крім того, аналітична методика не враховувала індуктивний характер мережі, і тому реактивна потужність не була повністю скомпенсована. Пошукова оптимізація параметрів симетро-компенсуючого пристрою була так само здійснена на візуальній моделі, створеній в системі SimPowerSystem (SPS) в програмі MATLAB, без складання математичної моделі. В якості критерію оптимізації був використаний середньоквардатичний функціонал, складений з реактивних потужностей.

Знайдені значення ємностей компенсуючих конденсаторів практично співпали з тими значеннями, які були обчислені в MathCAD. Був розроблений метод оптимізації режиму несиметричною системи, коли цільова функція формується шляхом вимірювань на стороні навантаження за допомогою фільтра симетричної складової зворотної послідовності, що представляє собою резистивно-ємнісний фільтр (рис. 1).

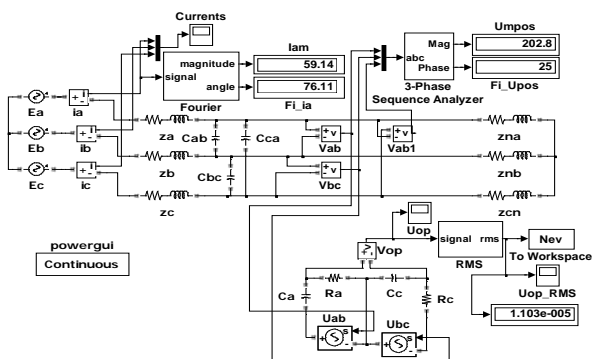


Рисунок 1 – Візуальна модель узагальненої трифазної системи електропостачання

При цьому в якості цільової функції використовується діюче значення вихідної напруги фільтра.

Слід зазначити, що в залежності від початкових заданих значень в результаті оптимізації виходять різні варіанти значень ємностей симетруючих конденсаторів. При цьому для деяких варіантів може виникати перекомпенсація реактивної потужності. Для приведення системи до оптимального режиму запропонований метод обертання векторів струмів в лініях електропередачі шляхом зміни величин ємностей батарей конденсаторів на одну і ту ж величину. Найбільш прийнятною ознакою входу в оптимальний режим є зниження амплітуди лінійного струму до міні-

муму. Розглянуто варіант розрахунку двоконденсаторного симетруючого пристрою, який здійснюється вирахуванням з величин ємностей триконденсаторного симетруючого пристрою ємності конденсатора з мінімальною ємністю. При оптимізації режиму чотиріпровідних трифазних систем із нульовим проводом для формування цільової функції використовуються три вихідні величини аналізаторів: амплітуди I2 зворотної і I0 нульової послідовностей струмів, а також фаза  $\phi_1$  прямої послідовності. Симетро-компенсуючий пристрій представлено п'ятьма елементами, три елементи підключаються між фазами, а решта два – між фазами і нульовим проводом. Для вирішення задачі синтезу, спочатку всі типи елементів були задані, як конденсатори, а потім в процесі оптимізації виявлялося, які з елементів були призначені невірно. Сигналом на витіснення елемента було прагнення процесу оптимізації дати параметру оптимізації граничне значення. При цьому величина цільової функції перестає змінюватися, не досягаючи свого оптимального значення. В цьому випадку необхідно або виключити елемент шляхом його розірвання (закорочування), або змінити тип реактивного елемента на дуальний. Недоліком цього методу є те, що процес визначення типу елемента не є автоматичним.

Автоматизація процесу оптимізації була здійснена за рахунок надлишкового числа параметрів оптимізації. Для автоматичного визначення типу елемента, використовується штучний прийом включення в кожній гілці симетро-компенсуючого пристрою пари шунтуючих один одного конденсатора і котушки індуктивності, що утворюють узагальнений реактивний елемент з можливістю одночасної зміни параметрів обох елементів в процесі оптимізації (рис. 2).

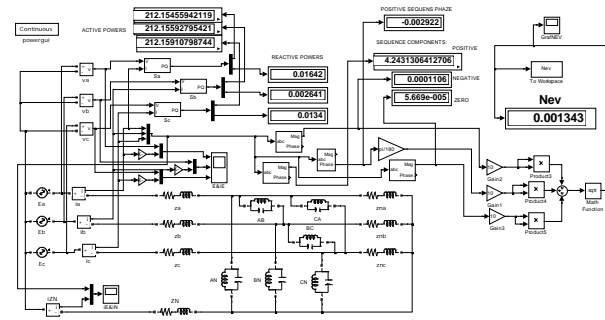


Рисунок 2 – Візуальна модель чотиріпровідної системи електропостачання після і оптимізації СКП

По завершенні процесу оптимізації виконувалася заміна пари кожного узагальненого реактивного елемента одним реактивним елементом, тип якого визначається перевагуванням реактивності в узагальненому елементі, який слід замінити. Крім того, передбачена можливість переходу на п'ятиелементну схему пристрою, шляхом виключення такого надлишкового елемента, опір якого перевищує опір інших елементів на кілька порядків. Розроблено метод визначення оптимального режиму, що базується на декомпозиції системи електропостачання, який дозволяє визначити режимні параметри системи електропостачання без підключення симетро-компенсуючого пристрою. Та-

кий підхід дозволяє поліпшити збіжність процесів рішення і прискорити отримання параметрів оптимального режиму і синтезу симетро-компенсуючого пристрою. За допомогою запропонованого методу були отримані всі шість варіантів п'ятиелементного симетро-компенсуючого пристрою для чотириповідної трифазної несиметричної системи. Був розглянутий випадок, в якому до несиметрії навантаження до-

далась ще і нелінійність (рис. 3), що призвело до того, що до реактивних потужностей зсуву і несиметрії додалась і потужність спотворень, обумовлена наявністю вищих гармонік. Компенсація складової реактивної потужності, обумовлену нелінійністю навантаження, здійснюють за допомогою силового активного фільтра [3].

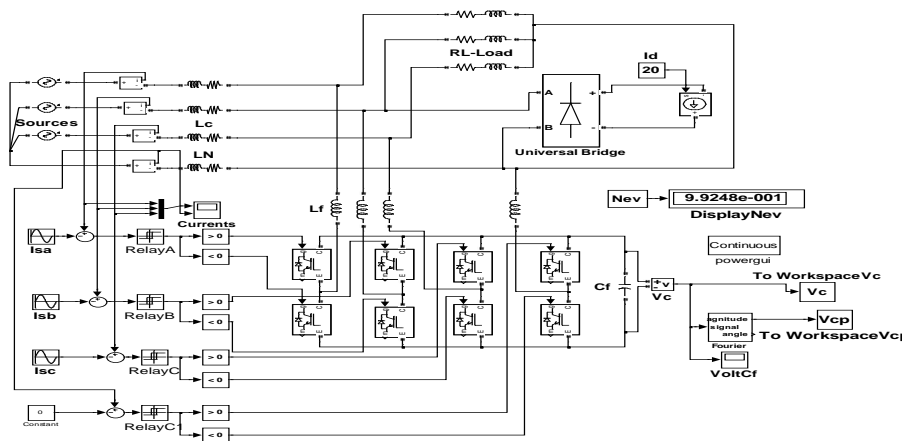


Рисунок 3 – Візуальна модель досліджуваної системи з несиметричною і нелінійною навантаженнями

В даному випадку нелінійне навантаження представлено однофазним випрямлячем. Силловий блок активного фільтра представлений у вигляді інвертора чотирма плечима IGBT транзисторів. Система управління активним фільтром побудована по релейному принципу з широтно-імпульсною модуляцією, завдяки якій і формуються коригувальні струми активного фільтра.

Оптимізація заснована на вимозі завдання такого єдиного значення амплітуд еталонних сигналів для фаз, при якому в системі має місце квазіусталений режим.

Цільова функція була сформована з дискретних значень напруги на накопичувальному конденсаторі та амплітуди еталонного сигналу. В результаті виконання оптимізації режиму струм в нейтральному проводі став рівним практично нулю, а струми в інших проводах стали симетричними і їх значення значно знизилися.

#### Висновки:

- застосування пошукової оптимізації виконує з високою точністю симетрування трифазних трипроводних і чотирипроводних систем;
- пошукова оптимізація вирішує задачу не тільки аналізу, але і задачу синтезу симетро-компенсуючих пристроїв;
- пошукова оптимізація продемонструвала високу точність для розрахунку імпульсів управління силовим активним фільтром для оптимізації роботи системи електропостачання із нелінійним навантаженням.

#### Список використаних джерел

1. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежелен-

ко, Саенко Ю. Л.–4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005.–261 с.

2. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.

3. Murat Kale. An adaptive band current controller for shunt active power filter / Murat Kale, Engin Ozdemir// Electric Power Systems Research. – 2005 – N. 73. – P. 113 – 119.

#### Аннотация

### ОБОБЩЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКАМИ

Ягуп Е. В.

*Предложено применение поисковой оптимизации для оптимизации режимов трехфазных систем с несимметричными и нелинейными нагрузками.*

#### Abstract

### GENERALIZED METHODS FOR OPTIMIZATION OF REGIMES IN A THREE-PHASE SYSTEM WITH NONSYMMETRIC AND NON-LINEAR LOADS

E. Yagup

*We propose to use search optimization for optimization of three-phase systems with asymmetric and nonlinear loads.*