

УДК 621.311

В. Г. Ягуп¹
К. В. Ягуп²

УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОМПЕНСАЦІЙНО-СИМЕТРУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ ПОПЕРЕДНЬОГО АНАЛІЗУ КОМПЕНСОВАНОГО РЕЖИМУ

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;²Український державний університет залізничного транспорту

Запропоновано метод розрахунку параметрів компенсійно-симетрувального пристрою, оснований на попередньому аналізі режиму повної компенсації реактивної потужності. Цей режим визначається на візуальній моделі без підключення компенсувального пристрою за допомогою оптимізаційних методів. З цією метою проводиться штучне розділення схеми з використанням керованих джерел напруги та струму.

Ключові слова: реактивна потужність, симетрування режиму, компенсація реактивної потужності.

Вступ

Проблеми компенсації реактивної потужності в електричних системах з трифазними мережами останнім часом стають актуальнішими. Це викликано в першу чергу такими факторами, як зношеність електричних мереж, обмеженість енергетичних ресурсів в Україні. Компенсація реактивної потужності і симетрування навантажень трифазних систем дозволяє суттєво підвищити енергетичні показники електричних систем в цілому.

У зв'язку з цим питання проектування компенсаційно-симетрувальних пристроїв (КСП) набувають також першорядного значення. Зокрема, проблеми розрахунку параметрів КСП розглядалися в роботах [1–3], причому використані в них методи ґрунтовані на аналітичних рішеннях, з використанням теорії симетричних складових під час аналізу несиметричного режиму в трифазній системі. В [4, 5] запропоновані чисельні методи вирішення цього завдання на основі оптимізаційних алгоритмів. В [5] показані недоліки аналітичних методів, які призводять до похибки компенсації і симетрування через нехтування низки факторів під час аналізу несиметричних режимів. У статті запропоновано використання оптимізаційних алгоритмів спільно з SPS-моделлю системи електропостачання для попереднього точного визначення скомпенсованого режиму системи. Для цього схема піддається попередньо розділенню на частини, і в процесі оптимізації зв'язок між частинами підтримується за допомогою залежних джерел. Точне визначення повністю скомпенсованого і абсолютно симетризованого режиму системи дозволяє точно визначити параметри КСП за допомогою методики, викладеної в [3].

Результати досліджень

Будемо розглядати узагальнену трифазну систему електропостачання з несиметричним навантаженням, візуальна модель якої показана на рис. 1. Трифазна симетрична система складається з джерел напруги $E_a(t)$, $E_b(t)$, $E_c(t)$. Електрична енергія через лінії електропередачі $LEPa$, $LEPb$, $LEPc$ потрапляє до навантаження, яке увімкнено за схемою зірки. Лінії електропередачі представлені індуктивностями (0,001 Гн), шунтованими резисторами (10000 Ом). Параметри навантаження: $R_{HA} = 0,7$ Ом; $L_{HA} = 0,005$ Гн; $R_{HB} = 1,0$ Ом; $L_{HB} = 0,01$ Гн; $R_{HC} = 2,0$ Ом; $L_{HA} = 0,04$ Гн. На рис. 1 показано результати використання методу ODE23s (stiff/Mod. Rosenbrock) під час функціонування

моделі протягом 0,4 с (20 періодів живлячої напруги) з кроком інтегрування 10^{-6} с. З показників віртуальних приладів можна побачити, що амплітуди струмів в фазах А, В, С становлять 31,97, 31,4, 10,42 А, відповідно. Такі ж амплітуди мають і струми в лініях електропередачі, що зумовлює значні втрати в них. Повні потужності джерел та навантаження вимірюються віртуальними вимірювачами, які ввімкнені за схемами двох амперметрів та двох вольтметрів. Сумарні повні потужності джерел і навантаження становлять $S_i = 953,086 + j3345$ та $S_n = 953,075 + j3014$ ВА, відповідно. Це відповідає суттєво несиметричному режиму в системі електропостачання зі значним споживанням реактивної потужності від живильної мережі, що зумовлено як індуктивним характером, так і несиметрією навантаження.

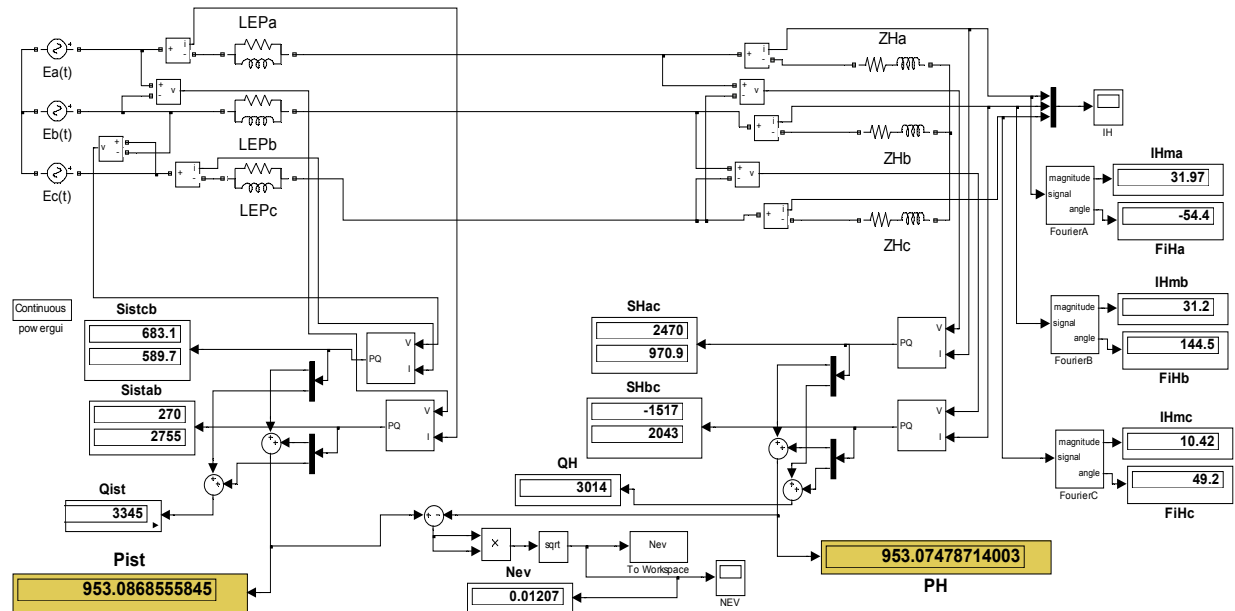


Рис. 1. Модель узагальненої трифазної несиметричної системи електропостачання у несиметричному режимі

Для знаходження параметрів КСП можна застосувати запропонований в [3] аналітичний метод на основі використання метода симетричних складових. Однак, він може давати похибки, тому що в ньому вважається, що напруга на затискачах навантаження збігається з напругою самих джерел напруги. Точнішими є методи на основі пошукової оптимізації, запропоновані в [4, 5]. В них задача обчислення параметрів поставлена як задача параметричної оптимізації за допомогою числових методів визначення оптимального рішення. Слід зауважити, що при реалізації цих методів нагальною є задача завдання початкових значень параметрів оптимізації. Крім того кількість параметрів може бути великою, що може потребувати значних витрат комп'ютерного часу. Виникає також потреба обмежити область визначення параметрів, які з фізичних міркувань повинні мати лише позитивні позначки, але протягом оптимізації, як показали комп'ютерні експерименти, точка траєкторії оптимізації може намагатися вийти з цієї області обмежень.

Застосуємо пошукову оптимізацію для визначення режиму повної компенсації реактивної потужності і абсолютної симетризації режиму, яку будемо здійснювати без вмикання будь-якого КСП в схему електропостачання.

Для цього застосуємо штучний спосіб розподілу системи електропостачання, окремо виділивши частину живлення і частину споживання електричної енергії. Цей розподіл на візуальній моделі показаний на рис. 2, звідки видно, що система живлення і лінії електропередачі відокремлені від навантаження відповідним розтином, по лінії якого повинен вмикатися КСП.

Метою цього є приведення обох частин до стану, за якого джерела живильної напруги не мають реактивної складової потужності і водночас дають мінімальну активну потужність, необхідну для покриття витрат активної потужності в несиметричному навантаженні. Такий режим треба знайти, виключивши безпосередній вплив несиметричного навантаження на симетричний режим трифазного джерела напруги. Одночасно потрібно досліджувати вплив симетризованої системи живлення на навантаження з метою оцінки енергетичних показників електроспоживання. Задовольнити означені вимоги вдалося за допомогою керованих джерел струму

і напруги. Як видно зі структури візуальної моделі (див. рис. 2), струми джерел напруги E_a і E_b задаються керованими джерелами струму $ZITia$ та $ZITib$. Фази цих керованих джерел задані таким чином, щоб вони збігалися з фазами відповідних джерел напруги, що живлять систему. Цим забезпечується відсутність реактивної складової потужностей живлячих джерел.

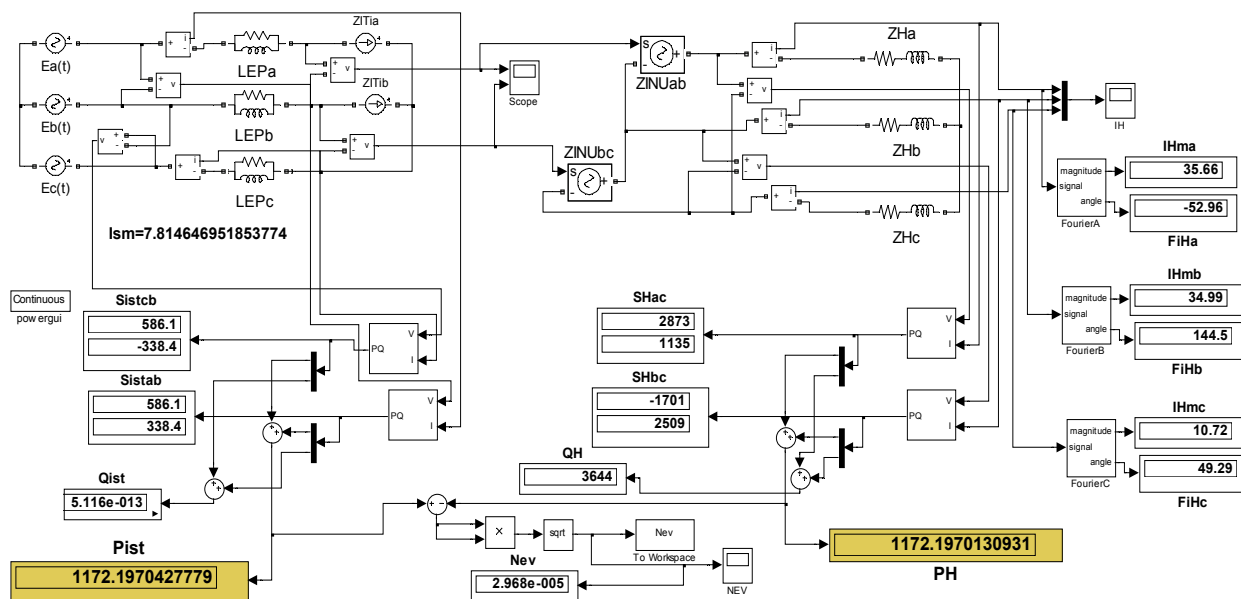


Рис. 2. Модель узагальненої трифазної несиметричної системи електропостачання у компенсованому режимі

Амплітуди струмів керованих джерел струму всі однакові, чим забезпечується симетричне навантаження живлячих джерел. Для знаходження потрібної величини амплітуди струмів керованих джерел струму ця величина вважається змінною I_{sm} і підлягає визначенню в процесі пошукової оптимізації. Струм в фазі С не задається, щоб уникнути топологічного виродження у вигляді зірки джерел струму. Він формується потрібним чином згідно з законом Кірхгофа для струмів. З метою уникнення топологічного виродження у вигляді зірки котушок індуктивностей активно-індуктивний опір ліній електропередачі представлені саме паралельним з'єднанням індуктивності і резистора.

Для передачі миттєвих значень напруги на затискачах навантаження в моделі використовуються керовані джерела напруги $ZINUab$ та $ZINUbc$, які формують напругу, що повторює форму двох відповідних лінійних напруг живлячої частини моделі. Оскільки апріорі забезпечено потрібний режим живильної системи, залишається знайти лише амплітуду струмів джерел напруги живильної системи, за якої забезпечується збіг сумарних активних потужностей навантаження і джерел живлення. Ця задача розв'язується оптимізаційним методом із застосуванням візуальної моделі і алгоритму нелінійної оптимізації за методом деформованого багатогранника. В цьому разі, на відміну від раніше згаданих методів [4, 5], зменшена кількість параметрів, що суттєво скорочує потрібний комп'ютерний час на розв'язання задачі. Можна побачити зі структури моделі на рис. 2, у якості цільової функції до робочої області за допомогою елемента Nev типу «To Workspace» передається позитивне значення різниці між сумарними активними потужностями джерел живлення та навантаження. З показників віртуальних приладів можна побачити, що амплітуди струмів в фазах А, В, С тепер збільшилися і становлять 35,66, 34,99, 10,72 А, відповідно. Амплітуди струмів в лініях електропередачі суттєво зменшилися порівняно зі струмами в навантаженні, і становлять 7,81464695 А, що отримано після завершення оптимізації. Це, в свою чергу, зумовлює значне зменшення втрат в лініях електропередачі і рівномірне навантаження на джерела напруги в кожній фазі. Сумарні повні потужності джерел і навантаження складають $S_i = 1172,197042 + j0$ та $S_n = 1172,197013 + j3014$ ВА, відповідно. Таким чином, спостерігаємо абсолютно симетричний режим в системі електропостачання без споживання реактивної потужності від живильної мережі.

Для подальшого розрахунку параметрів КСП можна скористатися методикою, викладеною в [3], яка полягає в розрахунках комплексів струмів КСП в точках приєднання його до системи електропостачання. Цей розрахунок здійснюється згідно з першим законом Кірхгофа за відо-

ними значеннями струмів кожного джерела живлення та струму навантаження відповідної фази. Комплексні струми навантаження можуть бути безпосередньо виміряні віртуальними Фур'є-аналізаторами (див. рис. 2), або розраховані за відомими вже напругами на затискачах навантаження і його параметрами. Розрахунок параметрів конденсаторів, увімкнених за схемою трикутника, як показано в [5], доцільно проводити також методом визначення рішення за допомогою оптимізаційного алгоритму, реалізованого в системі Mathcad із залученням комплексного обчислення. Застосування такої методики позбавляє необхідності вибору розрахункових формул в залежності від розташування вектора струму зворотної послідовності в будь-якій зоні, означених в відомій методиці [3]. Більш того, застосування оптимізаційного алгоритму дозволяє обчислити параметри КСП навіть без розкладання струмів КСП на симетричні складові. В результаті таких обчислень отримано ємності конденсаторів $C_{ab} = 562,13$ мкФ, $C_{bc} = 182,318$ мкФ, $C_{ca} = 34,465$ мкФ. Ввімкнення цих елементів КСП дозволяє повністю симетризувати систему і забезпечити повну компенсацію в ній реактивної потужності, та як наслідок — суттєво знизити втрати електричної енергії.

Висновки

1. Застосування керованих джерел струму і напруги дозволяє розділити систему електропостачання на затискачах, до яких вмикається компенсаційно-симетрувальний пристрій.
2. Після розділення схеми електропостачання за допомогою пошукової оптимізації з використанням візуальної моделі можна обчислити параметри скомпенсованого режиму в системі електропостачання навіть за відсутності КСП.
3. Параметри скомпенсованого режиму трифазної системи електропостачання дозволяють обчислити споживані струми КСП та його параметри.
4. Тестування запропонованої методики підтвердило швидку збіжність оптимізаційних алгоритмів та високу точність отриманих результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский А. К. Анализ и синтез фазопреобразовательных цепей [Текст] / А. К. Шидловский, И. В. Мостовьяк, В. Г. Кузнецов. — Киев : Наукова думка, 1979. — 299 с.
2. Miller J. E. Reactive power controlled in electric systems [Текст] / J. E. Miller. — John Willey & sons. — 1982. — 416 p.
3. Электрические сети / [В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др.] — М. : Высшая школа, 1971. — 438 с.
4. Ягуп В. Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации [Текст] / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2011. — Вип. 11 (186). — С. 449—454. — (Електротехніка і енергетика).
5. Ягуп В. Г. К аналитическому определению емкостей симметрирующих конденсаторов [Текст] / В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — 2013. — № 2 (15). — С. 293—296. — (Електротехніка і енергетика).

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015

Ягуп Валерій Григорович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання міст, e-mail: yagup_valery@mail.ru;

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

Ягуп Катерина Валеріївна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, e-mail: yag.kate@rambler.ru.

Український державний університет залізничного транспорту, Харків

V. G. Yagup¹
K. V. Yagup²

Refined Calculation of Symmetries-Compensating Device Based On a Preliminary Analysis of Compensated Mode

¹O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv;

²Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv

This paper proposes a method for calculating the parameters of the device for reactive power compensation, based on a preliminary analysis of the full compensation mode. This mode is determined by means of optimization techniques with the visual model without having to connect the compensating device. This is done by artificial separation scheme using controlled voltage and current sources.

Keywords: reactive power, balancing mode, reactive power compensation.

Yagup Valery G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Cities Electricity, e-mail: yagup_valery@rambler.ru;

Yagup Kateryna V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Automated Systems of Electrical Transport, e-mail: yag.kate@rambler.ru

В. Г. Ягуп¹
Е. В. Ягуп²

Уточненный расчет параметров симметро-компенсирующего устройства на основе предварительного анализа скомпенсированного режима

¹Харьковский национальный университет городского хозяйства имени О.М. Бекетова;

²Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, Харьков

Предложен метод расчета параметров компенсирующего устройства, основанный на предварительном анализе режима полной компенсации реактивной мощности. Этот режим определяется на визуальной модели без подключения компенсирующего устройства при помощи оптимизационных методов. С этой целью производится искусственное разделение схемы с использованием управляемых источников напряжения и тока.

Ключевые слова: реактивная мощность, симметрирование режима, компенсация реактивной мощности.

Ягуп Валерий Григорьевич — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения городов, e-mail: Yagup_Valery@mail.ru;

Ягуп Екатерина Валериевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем электрического транспорта, e-mail: yag.kate@rambler.ru