

УДК 621.311

Л. Б. Терешкевич, канд. техн. наук, доц.; І. О. Бандура

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ НЕСИМЕТРІЄЮ РЕЖИМУ У РАЗІ ПРІОРИТЕТНОГО ВИКОРИСТАННЯ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Розроблені алгоритм та математичні моделі визначення вектора керування, які забезпечують максимальну ефективність використання потужностей симетруючих пристроїв (СП), можна рекомендувати для випадків, коли потужності СП пріоритетно використовуються для компенсації реактивних навантажень. При цьому забезпечується генерація реактивної потужності необхідної величини і максимально можливий (за даних умов) ефект від симетрування навантажень.

Постановка наукової задачі

Склад електроприймачів, під'єднаних до мереж електропостачальних компаній, такий, що режими, які там створюються, характеризуються як несиметрією, так і низьким коефіцієнтом потужності [1]. Якщо взяти до уваги, що в таких мережах встановлених засобів компенсації реактивної потужності недостатньо [2], то симетрування напруги має виконуватись одночасно із компенсацією реактивної потужності з використанням для цього симетруючих пристроїв (СП) на базі конденсаторних установок (КУ), які крім симетрування електричного режиму генерують реактивну потужність.

Відома низка наукових робіт, де розв'язується задача симетрування електричного режиму та компенсації реактивних навантажень [1, 3–6]. Такі наукові напрацювання стосуються розв'язків в неперервних [4] та в дискретних [5, 6] змінних. Відомі підходи, коли задачам симетрування та компенсації реактивної потужності надаються певні пріоритети [5, 6] та коли таких пріоритетів немає [1, 4]. Згадані роботи дозволяють прийняти обґрунтовані рішення, але не охоплюють усіх випадків, які можуть скластися в системі електропостачання.

Розробки, виконані у цій роботі, спрямовані на використання потужності, яка може залишатися за результатами прийняття рішення із симетрування режиму. Звернемо увагу, що секції СП, які залишилися не реалізованими, можуть дозволити здійснювати включення за симетричною схемою. Умовимося ту частину СП, яку можна включати за симетричною схемою, називати системою симетричних елементів.

В загальному випадку можливі ситуації:

а) секції СП, що залишилися не увімкнутими, утворюють систему керованих симетричних елементів, використання яких дозволить отримати додатковий ефект з компенсації реактивних навантажень;

б) секції СП, що залишилися не увімкнутими, не утворюють жодного симетричного елемента, але їх увімкнення дозволяє здійснити додаткову компенсацію реактивних навантажень зі зменшенням ефекту, досягнутого при симетруванні режиму;

в) ситуація, що поєднує одночасно випадки а і б.

Розроблено алгоритм визначення вектора керування, який забезпечує максимальну ефективність використання потужностей конденсаторних батарей. Алгоритм можна рекомендувати для випадків, коли потужності СП пріоритетно використовуються для компенсації реактивних навантажень. При цьому забезпечується генерація реактивної потужності необхідної величини і максимально можливий (за даних умов) ефект від симетрування навантажень. Основні ідеї алгоритму:

1) визначається вектор керування СП, виходячи із міркувань симетрування навантажень — $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$;

2) за наявності симетричних елементів СП, визначається вектор керування для них — $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$ (за умови реалізації $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$), інакше виконується перехід до кроку 3;

3) розглядаються можливі увімкнення окремих секцій, по яких не прийнято рішення за кроками 1 і 2, для забезпечення основної вимоги — отримання необхідної реактивної потужності СП. В результаті формується вектор $\mathbf{X}_3^{\text{СП}}$.

Остаточний вектор, що приймається до реалізації — $\mathbf{X}^{\text{СП}}$, визначається як

$$\mathbf{X}^{\text{СП}} = \mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}} + \mathbf{X}_3^{\text{СП}}.$$

Можливі ситуації, коли розрахунки вектора керування припиняються на проміжних кроках (першому або другому) в разі, якщо вимога з компенсації реактивної потужності забезпечена. Це вимагає наявності математичних моделей для знаходження рішення по симетруванню режиму, управлінню симетричним елементом СП та увімкненню окремих секцій, по яких не прийнято рішення за кроками 1 і 2, для забезпечення основної вимоги — отримання необхідної реактивної потужності СП. Різні схеми СП вимагають розробки відповідних математичних моделей з урахуванням особливостей їх схемної реалізації.

Моделі керування несиметрією навантажень

Якщо керування виконується за допомогою СП з мінімальною кількістю вимикачів, то розрахунок складової $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ може бути виконаним за математичною моделлю

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \dot{I}_2 + \sum_{i=1}^n c_i x_i + j \left(\operatorname{Im} \dot{I}_2 + \sum_{i=1}^n d_i x_i \right) \right| \rightarrow \min; \\ Q' - \sum_{i=1}^n \Delta Q_i x_i \geq Q_{\text{доп}}; \\ x_i + \bar{x}_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (1)$$

де \dot{I}_2 — вихідне значення струму зворотної послідовності в лінії живлення групового несиметричного навантаження (за умови вимкнених секцій СП); Q' — те саме, реактивної потужності по вузлу навантаження; $Q_{\text{доп}}$ — допустиме значення реактивної потужності живильної лінії; ΔQ_i — потужність i -ї секції СП; c_i ; d_i — дійсна та уявна частина вектора струму зворотної послідовності, який створюється при увімкненні i -ї секції СП, і є i -ю компонентою вектора керування $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$; x_i — керування змінна. Якщо x_i за результатами розрахунків дорівнює 1, то i -ту секцію СП необхідно увімкнути, а якщо дорівнює 0, то навпаки — не вмикати; \bar{x}_i — фіктивна змінна, яка фізичного змісту не має; n — загальна кількість секцій СП.

Математична модель (1) передбачає знаходження таких значень для компонент вектора $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$, реалізація якого забезпечить мінімум струму зворотної послідовності в лінії живлення. Обмеження на реактивну потужність позначається на кінцевому результаті лише тоді, коли можливе отримання недопустимого результату по реактивній потужності в лінії живлення.

Якщо за результатами розрахунку $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ залишились симетричні елементи СП, що не використовуються, і розрахований вектор $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ не забезпечує вимоги на значення реактивної потужності СП, то вектор $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$ можна визначити за наведеною математичною моделлю

$$\begin{cases} Q_H - 3 \sum_{i=1}^m \Delta Q_i y_i \rightarrow \min; \\ y_i + \bar{y}_i = 1; \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ Q_H - 3 \sum_{i=1}^m \Delta Q_i y_i \geq Q_{\text{доп}}; \\ y_i, \bar{y}_i \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (2)$$

де Q_H – споживання реактивної потужності груповим несиметричним навантаженням з урахуванням компенсального ефекту по реактивній потужності вектора $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$; ΔQ_i – потужність секції СП, що створює один із симетричних елементів; m – загальна кількість симетричних елементів, для яких треба прийняти керувальне рішення; y_i – елемент вектора керування по симетричних елементах СП, якщо $y_i = 1$, то відповідний симетричний елемент необхідно ввімкнути, а якщо $y_i = 0$, то навпаки; \bar{y}_i – змінна, пов'язана з y_i таким чином: $\bar{y}_i = 0$, якщо $y_i = 1$, і навпаки.

Вектор керування \mathbf{Y} вимірністю $(m \times 1)$, компонентами якого є змінні y_i , знаходиться у певній відповідності із $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$, вимірність якого $(n \times 1)$, що дає можливість сформулювати алгоритм визначення значень для елементів $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$.

Математична модель (2) забезпечує компенсацію реактивної потужності до значення $Q_{\text{доп}}$ (при достатній сумарній потужності симетричних елементів). Точність наближення до $Q_{\text{доп}}$ визначається зоною нечутливості системи симетричних елементів СП, що утворилися на момент прийняття керувального рішення.

Якщо використання системи симетричних елементів не забезпечує необхідне $Q_{\text{доп}}$, то потрібно приймати рішення про ввімкнення секцій, що залишилися.

Вперше розроблена математична модель забезпечить необхідний результат із компенсації реактивних навантажень з найменшим відхиленням від оптимуму по симетруванню напруги:

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \dot{I}_2(\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}}) + \sum_{i=1}^{\tau} c_i z_i + j \left(\operatorname{Im} \dot{I}_2(\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}}) + \sum_{i=1}^{\tau} d_i z_i \right) \right| \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^{\tau} \Delta Q_i z_i \geq Q_d - Q^{\text{СП}}(\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}}); \\ z_i + \bar{z}_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, \tau; \\ z_i, \bar{z}_i \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (3)$$

де $\dot{I}_2(\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}})$ – вектор струму зворотної послідовності в лінії живлення за умови реалізації вектора $\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}}$; τ – загальна кількість секцій СП, можливих до ввімкнення; z_i – елемент вектора \mathbf{Z} , що описує стан відповідної секції СП із числа тих, що залишилися не ввімкнутими за результатами розрахунку векторів $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ та $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$; \bar{z}_i – фіктивна змінна, зв'язана із z_i так, що якщо $z_i = 1$, то $\bar{z}_i = 0$ і навпаки; Q_d – реактивна потужність, яку повинен мати СП для забезпечення необхідного ефекту з компенсації реактивних навантажень – $Q_{\text{доп}}$; $Q^{\text{СП}}(\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}})$ – потужність СП, що відповідає вектору $\mathbf{X}_1^{\text{СП}} + \mathbf{X}_2^{\text{СП}}$.

Перше обмеження математичної моделі встановлює вимогу, щоб реактивна потужність СП була не меншою від тієї, що необхідна для забезпечення встановленої вимоги до реактивних навантажень по вузлу. Цільова функція забезпечує мінімум модуля струму зворотної послідовності в лінії живлення.

Приймаючи керувальне значення за математичною моделлю (3), завжди можна забезпечи-

ти необхідний ефект з компенсації реактивної потужності крім випадку, коли $Q_d > Q_{\text{вст}}^{\text{СП}}$.

Для реалізації моделі (3) необхідно провести правильне формування вектора \mathbf{Z} . Вектор \mathbf{Z} описує стан тих симетруючих елементів СП, які не визначені для ввімкнення векторами $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ та $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$. Формуються вектори \mathbf{Z} та $\bar{\mathbf{Z}}$ за результатами аналізу $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ та $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$ за розробленим алгоритмом.

Методи аналізу математичних моделей

Математична модель (1) відноситься до класу цілочислових. Це зумовлено дискретністю секцій СП. Критерій ефективності в математичній моделі (1) описаний не скалярною функцією дійсної змінної, і тому таку модель слід класифікувати як не скалярну і цілочислову. Класичних методів розв'язання таких задач не існує. Для розв'язання не скалярних оптимізаційних задач розроблено низку обчислювальних методів [4].

Математична модель (2) лінійна, оскільки цільова функція та обмеження лінійні залежності від змінних. Змінні моделі Булеві, що можуть набувати значень 1 або 0. Аналіз математичної моделі можна виконати класичним симплекс-методом або методом динамічного програмування. Знаходячи розв'язки за останнім методом, під етапом розв'язання задачі слід розуміти знаходження рішення про ввімкнення чергового симетруючого елемента СП.

Математична модель (3) відноситься до класу не скалярних, оскільки її обмеження лінійні, а цільова функція є лінійною не скалярною функцією дійсних змінних. На цій підставі підійдемо до розв'язання задачі з позицій методів не скалярної оптимізації.

Аналіз моделі (3) виконують, маючи результати розрахунків векторів $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ та $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$. Вихідним станом для такого аналізу є нульові значення компонент вектора $\mathbf{X}_3^{\text{СП}}$.

Якщо за перший пробний розв'язок прийняти нульові значення компонент вектора \mathbf{Z} , то обмеження-нерівність не буде забезпечено. В такому випадку наступні кроки в розв'язуванні задачі оптимізації мають бути спрямовані (в термінах лінійного програмування [7]) на пошук опорного розв'язку.

Відмітимо таку обставину, що пошук опорного розв'язку буде супроводжуватись відходом від оптимального розв'язання задачі симетрування напруги у відповідності до сформульованих вище позицій. Тому розрахунки необхідно припинити, визначивши опорний розв'язок.

Для пошуку опорного розв'язку можна скористатись відомим підходом, наприклад, таким, що реалізований в симплекс-методі розв'язання задачі лінійного програмування (оскільки всі функціональні залежності математичної моделі (3) лінійні). Цей підхід передбачає знаходження опорного розв'язку, виконавши мінімальну кількість ітерацій. Для цього на кожній ітерації приймається найефективніше (з точки зору наближення до опорного розв'язку) рішення. Стосовно задачі, яка розглядається, це буде означати, що на кожній ітерації має прийматися рішення про ввімкнення допустимих найпотужніших секцій. Звернемо увагу, що такий підхід не дозволяє контролювати несиметрію напруги в процесі знаходження опорного розв'язку.

Для пошуку опорного розв'язку можна запропонувати підхід, сутність якого полягає в такому. На кожній ітерації виконується перебір потужностей секцій СП, по яких не прийнято рішення про їх вмикання (разом з розрахунками $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ та $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$) і ввімкнення яких допустиме. Розраховується напруга зворотної послідовності, що буде мати місце в результаті вмикання кожної із цих секцій. До вмикання береться секція СП, якій відповідає найменше значення модуля напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП при її ввімкненні. Якщо обмеження на значення реактивної потужності не забезпечується вмиканням відібраної на цій ітерації секції СП, відбір секцій для вмикання має бути продовженим. Такий підхід до визначення опорного розв'язку реалізовано алгоритмічно.

Приклад, що ілюструє ефективність розрахунку вектора керування в умовах реальної схеми електричної мережі

На момент прийняття керувального рішення в лінії 0,4 кВ, яка живить групу несиметричних електроприймачів, склався режим

$$I_A = 127,8 \text{ A}; \quad \cos \varphi_A = 0,756;$$

$$I_B = 146,7 \text{ A}; \quad \cos \varphi_B = 0,578;$$

$$I_C = 189,3 \text{ A}; \quad \cos \varphi_C = 0,845.$$

До вузла навантаження приєднано КУ з параметрами секцій по напругах трифазної системи, показаними у табл. 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики КУ

Параметри секцій, які під'єднуються до напруги U_{AB}		Параметри секцій, які під'єднуються до напруги U_{BC}		Параметри секцій, які під'єднуються до напруги U_{CA}	
№ секції, k	ΔQ_i , квар	№ секції, k	ΔQ_i , квар	№ секції, k	ΔQ_i , квар
1	5	6	5	11	5
2	5	7	5	12	5
3	5	8	5	13	5
4	5	9	5	14	5
5	5	10	5	15	5

Цей режим характеризується споживанням реактивної потужності, $Q' = 66,89$ квар, і струмами в координатах симетричних складових:

- струм прямої послідовності, $\dot{I}_1 = 150 e^{-j45^\circ} \text{ A}$;
- струм зворотної послідовності, $\dot{I}_2 = 18 e^{-j75^\circ} \text{ A}$;
- струм нульової послідовності, $\dot{I}_0 = 42 e^{-j109,5^\circ} \text{ A}$.

Знайти вектор керування для СП, який забезпечує мінімальне значення струму зворотної послідовності в лінії живлення та компенсацію реактивних навантажень 65 квар. Як пріоритетною для цього стану є задача компенсації реактивних навантажень.

Для порівняння в табл. 2 наведені результати, отримані для умов розглянутого прикладу за розробленим та відомим [4] підходами до розв'язання цієї задачі.

Таблиця 2

Варіанти керування режимом, розглянутим в прикладі, за розробленим і відомим підходами та результати їх реалізації

Метод розрахунку	Вектор керування $\mathbf{X}^{\text{СП}}$	Струм I_2 в лінії живлення, А	Реактивна потужність, що компенсується, квар
Розроблений	(1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1)	4,96	65
Відомий	(1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0)	25,64	65

Результати, отримані за розробленим алгоритмом, свідчать, що ефективність використання КУ СП є вищою.

Висновки

1. Потужності КУ СП можуть пріоритетно використовуватись як для симетрування напруги (або струмів), так і для компенсації реактивних навантажень. Розв'язки таких задач є суперечливими: мінімальне значення для показників, які оцінюють несиметрію режиму, не забезпечують оптимальний ступінь компенсації реактивної потужності.

2. У випадку пріоритетного використання потужності КУ СП для компенсації реактивних навантажень вектор керування можна розрахувати як такий, що має три складові. Перша складова $\mathbf{X}_1^{\text{СП}}$ забезпечує оптимальне симетрування електричного режиму, друга – $\mathbf{X}_2^{\text{СП}}$ передбачає використання симетричних елементів СП для компенсації реактивної потужності,

третя — забезпечує вимогу з компенсації реактивних навантажень, але при цьому має місце відхід від оптимуму, досягнутого при визначенні $X_1^{сп}$. В часткових випадках розв'язання задачі може обмежуватись як розрахунком $X_1^{сп}$, так і $X_1^{сп}$ та $X_2^{сп}$.

3. Аналіз синтезованої математичної моделі (3) можна провести у відповідності з розробленим обчислювальним методом.

4. Розрахунок тестового прикладу підтвердив ефективність запропонованого підходу до розрахунку вектора керування та працездатність розробленого обчислювального методу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. — Київ : Наукова думка, 1992. — 240 с. — ISBN №5-12-002018-6.
2. Зубюк Ю. П. Современные аспекты применения конденсаторных установок среднего напряжения / Ю. П. Зубюк // Электрические сети и системы. — 2010. — № 1. — С. 28—32.
3. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками / В. Г. Кузнецов // Электричество. — 1983. — № 2. — С. 64—67.
4. Аввакумов В. Г. Методы нескалярной оптимизации и их приложения / В. Г. Аввакумов — К. : Вища школа, 1990. — 188 с. — ISBN №5-11-001321-7.
5. Аввакумов В. Г. Технично-економическая оценка качества электроэнергии в промышленности / В. Г. Аввакумов, Г. Л. Багиев, Д. М. Воскобойников. — Л. : изд-во Ленингр. ун-та, 1977. — 132 с.
6. Терешкевич Л. Б. Алгоритм управління конденсаторними батареями симетруючого пристрою / Л. Б. Терешкевич, Хінді Айман Тахер // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2000. — № 4. — С. 70—72.
7. Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. — М. : Советское радио, 1972. — 552 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 14.09.11

Рекомендована до друку 21.10.11

Терешкевич Леонід Борисович — завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергоменеджменту.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Бандура Ірина Олександрівна — асистент кафедри енергопостачання.

Луцький національний технічний університет, Луцьк