

І. О. Бандура

**МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НЕСИМЕТРІЄЮ
НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Розроблено математичну модель керування, що забезпечує інтереси одного із суб'єктів господарювання (енергопостачальну компанію або споживача) в кінцевих результатах симетрування напруги.

Вступ

Як свідчать експериментальні дослідження, електричні режими в розподільних мережах енергопостачальних організацій характеризуються суттєвим рівнем несиметрії, який в ряді випадків виходить за нормовані значення, з чим пов'язані додаткові втрати активної потужності та енергії. Зменшити несиметрію електричних режимів можна за допомогою симетрувальних пристроїв (СП).

Відомі наукові дослідження [1, 2] дають змогу виконувати симетрування як струмів, так і напруг електричної мережі, але розглядається при цьому локальна задача — вузол електричної мережі. Вплив технічних рішень із симетрування як на мережі живлення, так і на розподільні мережі (а саме на додаткові втрати активної потужності, зумовлені несиметрією режиму, ΔP_2) в таких випадках до уваги не береться. В [3] доведено, що в результаті зміни струморозподілу при симетруванні напруги за допомогою СП, який під'єднаний в точці розподілу балансової належності мереж, має місце така зміна ΔP_2 , що інтереси енергопостачальної організації та споживача в кінцевих результатах симетрування напруги стають суперечливими. В умовах ринкових виробничих відносин керування СП природно має виконуватись в інтересах тієї юридичної особи, на балансі якої він знаходиться. Якщо СП знаходиться на балансі енергопостачальної компанії і симетрування напруги супроводжується зниженням додаткових втрат ΔP_2 в активній складовій опорі лінії живлення, то доцільно наявними засобами забезпечити зниження напруги зворотної послідовності до якомога менших значень. В протилежному випадку симетрування потрібно здійснювати до рівня, якому відповідає нормоване ГОСТ 13107-97 значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності [4]. В першому випадку критерієм для прийняття рішення є додаткові втрати активної потужності ΔP_2 , а в другому — напруга зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП — U_2 за наявності технічного обмеження на її допустиме значення. Досконалі системи керування мають працювати з урахуванням цієї обставини.

Метою роботи є розробка математичної моделі, яка має забезпечити керування несиметрією напруги в інтересах тієї юридичної особи, на балансі якої знаходиться СП.

Проведені дослідження обмежуються лише компенсацією складових зворотної послідовності, що є окремою задачею при симетруванні електричного режиму в трипровідній мережі та підзадачею при симетруванні режиму в мережі чотирипровідній.

Обґрунтування критерію ефективності

У разі, коли система керування має мікропроцесорну реалізацію, важливим стають такі вимоги:

- загальна кількість математичних моделей, що використовуються для керування, має бути якомога меншою;
- математичні моделі мають бути такі, щоб їх аналіз можна було здійснити за єдиним алгоритмом, обчислювальна процедура якого має мінімальну трудомісткість.

Для керування несиметрією напруги в інтересах того або іншого суб'єкта господарювання за допомогою однієї математичної моделі необхідно обґрунтувати єдиний критерій ефективності як для випадку зменшення, так і збільшення ΔP_2 у відповідних мережах. Єдиний кри-

терій можна запропонувати, якщо звернути увагу на таке явище. В одному із можливих випадків, коли симетрування напруги супроводжується зменшенням ΔP_2 (тобто, при зниженні U_2 одночасно має місце зниження ΔP_2) в елементах відповідних мереж, знаходити вектор керування можна також за критерієм $U_2 \rightarrow \min$, не обмежуючи його мінімальне значення. Якщо взяти до уваги, що СП має дискретні секції і повного симетрування напруги за таких умов досягнути складно, то можна вважати, що знайдений мінімум для U_2 буде одночасно мінімумом і для ΔP_2 .

Для забезпечення вимог ГОСТ 13109-97, не зважаючи на зростання ΔP_2 при симетруванні напруги, необхідно приймати керувальні рішення для зменшення U_2 . Процес симетрування слід припинити як тільки U_2 досягне значення, якому відповідає нормований коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю, $U_{2\text{доп}}$. Тобто розв'язувати задачу за критерієм $U_2 \rightarrow \min$ із введенням в математичну модель обмеження $U_2 > U_{2\text{доп}} - \varepsilon$, де ε — зона нечутливості СП, яка визначається його секцією найменшої потужності та яка гарантує забезпечення вимог ГОСТ 13109-97.

Математична модель керування несиметрією напруги у вузлах живильних мереж енергопостачальних компаній

Математична модель розроблена з урахуванням технічних особливостей схеми СП дискретного керування із мінімальною кількістю вимикачів [2] і забезпечує інтереси одного із суб'єктів господарювання

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \dot{U}_2 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + j \left(\operatorname{Im} \dot{U}_2 + \sum_{i=1}^n b_i x_i \right) \right| \rightarrow \min; \\ \left| \operatorname{Re} \dot{U}_2 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + j \left(\operatorname{Im} \dot{U}_2 + \sum_{i=1}^n b_i x_i \right) \right| \geq U_{2\text{доп}} - \varepsilon; \\ Q - \sum_{i=1}^n \Delta Q_i x_i \geq Q_{\text{доп}}; \\ x_i + \bar{x}_i = 1; \\ x_i; \bar{x}_i = 1 \forall 0, \end{cases}$$

де \dot{U}_2 — вихідне значення вектора напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП (за умови вимкнених секцій СП); Q — те саме, реактивної потужності по вузлу навантаження; a_i ; b_i — дійсна та уявна частини вектора напруги зворотної послідовності, яка створюється при ввімкненні i -ї секції СП; $Q_{\text{доп}}$ — допустиме значення реактивної потужності живильної лінії; ΔQ_i — потужність i -ї секції СП; x_i — керування змінна; якщо x_i за результатами розрахунків дорівнює 1, то i -у секцію СП необхідно ввімкнути, а якщо дорівнює 0, то навпаки — не вмикає; \bar{x}_i — фіктивна змінна, яка фізичного змісту не має; n — загальна кількість секцій СП.

Цільова функція математичної моделі потребує мінімуму модуля напруги зворотної послідовності. Допустимий рівень напруги зворотної послідовності забезпечується відповідним технічним обмеженням. Якщо необхідно забезпечити повне симетрування напруги, то при розрахунках слід вважати, що $U_{2\text{доп}} - \varepsilon = 0$.

СП, секції керування якого мають ємнісний характер, генерують реактивну потужність [1, 2], що потребує контролю значення реактивних навантажень в лінії живлення. Технічне обмеження на реактивну потужність виключає можливість появи зворотних її перетоків із мереж споживача в мережі енергопостачальної організації

Серед технічних обмежень — обмеження, яке вказує на те, що кожна секція СП в результаті прийняття технічного рішення може бути увімкненою або вимкненою. Саме тому за керувані змінні прийнято Булеві змінні.

Якщо жорсткішим обмеженням виявляється обмеження на реактивну потужність, то допустимих значень U_2 досягнути не можна. В таких випадках для забезпечення нормованих значень несиметрії напруги СП має бути на основі ємностей та індуктивностей, або тільки індуктивностей.

Розрахунок вектора керування за розробленою математичною моделлю

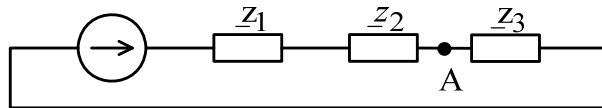
Розроблений обчислювальний метод визначення вектора керування передбачає обмежений перебір допустимих варіантів, як і в класичних методах оптимізації, та може бути застосований для аналізу математичної моделі.

Приклад. В електричній мережі, яка показана на рисунку заступною схемою для струмів зворотної послідовності, до вузла А під'єднано СП з мінімальною кількістю вимикачів, що має такі технічні характеристики (табл. 1).

Таблиця 1

Технічні характеристики симетрувальних пристроїв

Параметри секцій СП, які під'єднуються до напруги U_{AB}		Параметри секцій СП, які під'єднуються до напруги U_{BC}		Параметри секцій СП, які під'єднуються до напруги U_{CA}	
№ секції, k	ΔQ_k , квар	№ секції, k	ΔQ_k , квар	№ секції, k	ΔQ_k , квар
1	50	5	50	9	50
2	30	6	30	10	30
3	20	7	20	11	20
4	10	8	10	12	10



Заступна схема для струмів зворотної послідовності

В схемі $z_1 = 0,0084 + j0,048$ Ом – еквівалентний опір струмам зворотної послідовності мереж енергопостачальної компанії; $z_2 = 0,0102 + j0,078$ Ом – те саме, трансформатора ТМ-250/10; $z_3 = 0,035 + j0,12$ Ом – те саме, розподільних мереж споживача.

Вимірювання параметрів природного режиму (коли всі секції СП вимкнені) проведені у вузлі А і отримані значення

$$\dot{U}_2 = 5,28e^{j98^\circ} \text{ В}; \dot{I}_2 = 42,24e^{j24,24^\circ} \text{ А}; Q = 65 \text{ квар.}$$

Знайти вектор керування для СП, який забезпечує мінімальне значення напруги зворотної послідовності у вузлі А за умови $Q_{доп} = 0$.

Результати розрахунків із визначення вектора керування за ітераціями наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати, отримані за окремими ітераціями

Ітерація	Вектор керування	U_2 у вузлі А, В	ΔP_2 в розподільчій мережі, Вт	Реактивна потужність, що споживається, квар
Вихідний режим	$\mathbf{X}_0^T = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$5,28e^{j98^\circ}$	187,0	65
1	$\mathbf{X}_1^T = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$4,22e^{j141,66^\circ}$	119,0	15
2	$\mathbf{X}_2^T = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$3,57e^{j136,41^\circ}$	85,7	5

Розрахунки припиняються за результатами другої ітерації. В рамках сформульованих умов та наявних технічних засобів поліпшити режим неможливо.

Висновок

Розроблена математична модель керування несиметрією напруги за критерієм мінімуму додаткових втрат активної потужності при нормованих значеннях несиметрії напруги. Її використання в мікропроцесорній системі прийняття рішення забезпечить урахування інтересів енергопостачальної компанії (або споживача) в кінцевих результатах симетрування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. — К. : Техніка, 1981. — 160 с.
2. 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.
3. Терешкевич Л. Б. Дослідження впливу компенсувальних установок на додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, І. О. Бандура // Технічна електродинаміка. — 2011. — № 4. — С. 50—54.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.00. — К. : Госстандарт Украины, 1999. — 31 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 14.10.11
Рекомендована до друку 25.11.11

Бандура Ірина Олександрівна — асистент кафедри енергопостачання
Луцький національний технічний університет, Луцьк