УДК 621.316.13

І.О.Бандура
Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НЕСИМЕТРІЄЮ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Розроблено математичну модель керування, що забезпечує інтереси одного з суб'єктів господарювання(енергопостачальної компанії або споживача) в кінцевих результатах симетрування напруги.

Ключові слова: *несиметрія напруги, енергопостачальна компанія, споживач, керування несиметрією, додаткові втрати активної потужності.*

Рис1. Табл 2. Літ 4.

И.А.Бандура.

МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕСИММЕТРИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ.

В статье разработана математическая модель управления, которая обеспечивает интересы одного из субьектов хозяйствования(энергоснабжающей компании или потребителя) в конечных результатах симметрирования напряжения.

I.Bandura.

OPTIMAL CASE FRAME BY UNSYMMETRY OF TENSION IN ELECTRIC NETWORKS.

A mathematical case that provides interests of one of subjects of menage (energyprocurement company or consumer) in end-point of симетрування tension frame is worked out in the article.

Як свідчать експериментальні дослідження, електричні режими в розподільних мережах енергопостачальних компаній 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 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 і 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 вони знаходяться. Якщо СП знаходиться на балансі енергопостачальної компанії і симетрування напруги супроводжується зниженням додаткових втрат ΔP_2 в активній складовій опору 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 13109-97 значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності[4]. В першому випадку критерієм для прийняття рішень є додаткові втрати активної потужності ΔP_2, а в другому випадку напруга зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП-U_2, за наявності технічного обмеження на її допустиме значення. Досконалі системи керування мають працювати з врахуванням цієї особливості.

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 три провідній мережі та під задачею при симетруванні режиму в мережі чотири провідній.

©І.О.Бандура

Обґрунтування критерію ефективності

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

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

Для керування несиметрією на пруги 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 критерій 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 $U_2 \to \min$, не обмежуючи його мінімальне значення. Якщо взяти до уваги, що СП має дискретні секції і повного симетрування 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 клерувальні рішення для зменшення U_2. Процес симетрування слід припинити як тільки U_2 досягне значення, якому відповідає нормований коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю $U_{2доп}$. Тобто розв'язувати задачу за критерієм $U_2 \to \min$ із введенням в математичну модель обмеження $U_2 \succ U_{2доп} - \varepsilon$, де ε - зона нечутливості СП, яка визначається його секцією найменшої потужності ат яка гарантує забезпечення вимог ГОСТ 13109-97.

Математична модель керування несиметрією напруги у вузлах живильних мереж енергопостачальних компаній

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

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

де $\dot{U}_2^{/}$ – вихідне значення вектора напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП (при умові вимкнутих секцій СП);

Q' – вихідне значення реактивної потужності по вузлу навантаження;

a_i ; b_i – дійсна та уявна частини вектора напруги зворотної послідовності, яка створюється при ввімкненні *i*-ої секції СП;

$U_{2доп}$ – допустиме значення напруги зворотної послідовності у вузлі під'єднання СП;

ε – мінімальна зміна напруги U_2, на яку реагує СП;

$Q_{доп}$ – допустиме значення реактивної потужності живильної лінії;

ΔQ_i – потужність *i*-ої секції СП;

n – загальна кількість секцій СП;

x_i – керована змінна; якщо x_i за результатами розрахунків дорівнює 1, то *i*-ту секцію СП необхідно ввімкнути, а якщо дорівнює 0, то навпаки – не вмикати;

$\overline{x}_i$ – фіктивна змінна, яка фізичного змісту не має.

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 необхідно вважати, що $U_{2доп} - \varepsilon = 0$.

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 ввімкнутою або вимкненою. Саме тому за керовані змінні прийнято Булеві змінні.

Якщо більш жорстким обмеженням виявляється обмеження на реактивну потужність, то допустимих значень U_2 досягнути не можна. В таких випадках для забезпечення нормованих значень несиметрії напруг потрібно провести аналіз і обґрунтувати допустимість обмежених зворотних перетоків реактивної потужності або СП має бути на основі ємностей та індуктивностей, або тільки індуктивностей.

Розрахунок вектора керування за розробленою математичною моделлю

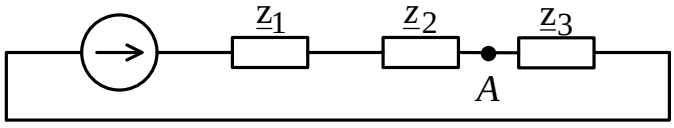
Розроблений обчислювальний метод визначення вектора керування передбачає обмежений перебір допустимих варіантів, як і в класичних методах оптимізації, та може бути застосований для аналізу як математичної моделі.

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

Таблиця 1

Технічні характеристики СП

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, *i*	ΔQ_i, квар	№ секції, *i*	ΔQ_i, квар	№ секції, *i*	ΔQ_i, 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 $\underline{z}_1 = 0,0084 + j0,048$ Ом – еквівалентний опір струмам зворотної послідовності мереж енергопостачальної компанії; $\underline{z}_2 = 0,0102 + j0,078$ Ом – те саме, трансформатора ТМ-250/10; $\underline{z}_3 = 0,035 + j0.12$ Ом – те саме, розподільних мереж споживача.

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

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

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	$\dot{U}_2$ у вузлі *A*, В	ΔP_2 в розподільчій мережі, Вт	Реактивна потужність, що споживається, квар
Вихідний режим	$\mathbf{X}_0^{\mathrm{T}} = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$5,28e^{j98^\circ}$	187,34	65
1	$\mathbf{X}_1^{\mathrm{T}} = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$4,22e^{j141,66^\circ}$	119,88	15
2	$\mathbf{X}_2^{\mathrm{T}} = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$	$3,57e^{j136,41^\circ}$	85,7	5

Розрахунки припиняються за результатами другої ітерації, оскільки множина M_3 виявилась порожньою. В рамках сформульованих умов та наявних технічних засобів поліпшити режим не можливо.

Висновок

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

1. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с. – ISBN-5-283-03200-0.
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. – 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. – 31с.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2014

©І.О.Бандура