

УДК 621.316.13

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З НЕСИМЕТРИЧНОЮ НАПРУГОЮ

Терешкевич Л. Б., к.т.н, доцент, Червінська Т. М., аспірант

Вінницький національний технічний університет

21021, м. Вінниця, вул. В. Інтернаціоналістів, 3, кв. 415

E-mail: chervinskam@rambler.ru

Розроблено математичну модель керування реактивною потужністю за допомогою секцій батарей статичних конденсаторів, що мають схему зірки з нулем та які під'єднуються до вузла з несиметричною напругою, та числовий метод її аналізу. Ефективність виконаних наукових розробок продемонстровано на числовому прикладі.

Ключові слова: батареї статичних конденсаторів, несиметрія напруги.

Вступ. На промислових підприємствах для зниження активних втрат в електричних мережах використовуються батареї статичних конденсаторів (БСК) симетричного виконання (потужності плеч кожної секції, що відповідають номінальним напругам, однакові).

Для забезпечення високого кінцевого ефекту БСК виконують керованими, а кожна секція такої БСК повинна мати можливість ввімкнення емоностей за схемою трикутника або зірки з нулем [1]. В процесі експлуатації кінцевий ефект від встановленої БСК визначається законом керування. Найкращі результати досягаються, коли при розрахунку вектора керування беруться до уваги всі суттєві для даного моменту часу фактори та забезпечуються необхідні умови.

Аналіз попередніх досліджень. Відомі наукові роботи та їх практична реалізація, де прийняття керуючого рішення здійснюється із врахування таких факторів: втрати активної потужності як в мережах енергопостачальної організації, так і в мережах споживачів; вимоги енергосистеми до споживання реактивної потужності з її мереж в періоди максимуму і мінімуму навантажень; рівень напруги як на моменти прийняття рішення, так і за результатами його реалізації [2-3].

Мікропроцесорна (або комп'ютерна) реалізація систем прийняття рішення прискорює процес розрахунку та надає можливість проводити його за складними алгоритмами, що в свою чергу дозволяє врахувати додаткові фактори, якими раніше нехтували. Одним із таких факторів є вплив несиметрії напруги на роботу БСК симетричного виконання і на керуючі впливи, що ними здійснюються. Під'єднання БСК, яка з'єднана трикутником, до електричної мережі збільшує напругу зворотної послідовностей, а БСК, що з'єднана в зірку з нулем, збільшує одночасно напруги зворотної і нульової послідовностей. Показники якості електроенергії, що нормують несиметрію режиму, можуть набути недопустимих значень [4].

Один із можливих підходів до прийняття керуючого рішення полягає в тому, що задача поділяється на дві підзадачі, які вирішуються послідовно. Одна полягає в прийнятті рішення по секціях, що вмикаються за схемою трикутника. По секціях, які залишилися, приймається рішення другого етапу, виходячи з того, що вони будуть ввімкнені за схе-

мою зірки з нулем, та в припущенні реалізації рішення першого етапу. При такому підході негативний вплив, що чиниться на параметри несиметрії режиму, буде мінімальним (перш за все максимально використовуються секції БСК, які мають вплив лише на режим зворотної послідовності).

Мета роботи. Розробка математичної моделі керування реактивною потужністю за допомогою секцій БСК, що мають схему зірки з нулем та які під'єднуються до вузла з несиметричною напругою.

Матеріал і результати дослідження. Ввімкнення БСК за схемою зірки з нулем приводить до збільшення рівня напруг прямої, зворотної і нульової послідовностей. Для запобігання перевищення допустимих за ДСТУ 13109-97 значень коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній - $k_{2U_{\text{дон}}}$ та нульовій - $k_{0U_{\text{дон}}}$ послідовностям в математичній моделі мають бути обмеження на відповідні величини.

Потужності БСК в залежності від прикладеної напруги набувають різних значень по фазах і відповідно добавки напруги будуть неоднаковими. Причому найбільшою буде добавка напруги в тій фазі, де вихідне значення напруги було найбільшим. Саме напруга в цій фазі повинна контролюватися для забезпечення допустимих відхилень напруг трифазної системи.

Математична модель повинна містити обмеження, що контролює величину реактивної потужності, яка буде в результаті реалізації вектора керування - Q . Така необхідність викликана недопустимістю зворотних потоків реактивної потужності від електричних навантажень в живлячі мережі, чи вимогами енергопостачальної організації до споживаної потужності.

Окреме обмеження повинно указувати на можливі стани кожної секції БСК (ввімкнено або вимкнено).

За критерій ефективності математичної моделі приймається мінімум реактивної потужності на ввіді підприємства або по вузлу, до якого під'єднана БСК. Досягнутому мінімуму реактивної потужності відповідає мінімум активних втрат в живильній мережі.

Розрахунок вектора керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги проводиться за розробленою математичною моделлю:

$$\begin{cases} Q_n - X^T \cdot DQ(U) \rightarrow \min \\ Q_n - X^T \cdot DQ(U) \geq Q_{don} \\ |\dot{U}_2 + X^T \cdot D\dot{U}_2| \leq U_{2don} \\ |\dot{U}_0 + X^T \cdot D\dot{U}_0| \leq U_{0don} \\ |\dot{U}_s + X^T \cdot D\dot{U}_s(\dot{U}_s)| \leq U_{max.don} \\ X + \bar{X} = n \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0, \end{cases} \quad (1)$$

де Q_n – природне (в припущенні, що всі секції БСК вимкнені) споживання реактивної потужності; $DQ(U)$ – матриця потужностей керованих секцій БСК, що відповідають реальним фазним напругам, вимірністю $(m \times 1)$, де m – кількість секцій БСК; X – вектор керування вимірністю $(m \times 1)$, кожна компонента якого описує стан комутаційного апарату, яким здійснюється комутація відповідної секції; якщо $x_i = 1$, то секція i має бути ввімкнена, а якщо $x_i = 0$, то навпаки; T – індекс транспонування; Q_{don} – допустиме значення реактивної потужності; $\dot{U}_2, \dot{U}_0$ – вектори напруги зворотної і нульової послідовностей у вузлі під'єднання БСК (до реалізації керуючого рішення) відповідно; $D\dot{U}_2, D\dot{U}_0$ – матриці добавок напруги зворотної та нульової послідовностей, що мають місце внаслідок ввімкнення відповідних секцій БСК, вимірністю $(m \times 1)$; U_{2don}, U_{0don} – рівні напруг зворотної і нульової послідовностей, що відповідають k_{2Udon} і k_{0Udon} відповідно; $\dot{U}_s$ – напруга у вузлі під'єднання БСК у фазі з найбільшим її значенням в припущенні, що всі секції вимкнені; s – індекс, що визначає фазу з найбільшим значенням напруги; $D\dot{U}_s(\dot{U}_s)$ – матриця добавок напруги, що мають місце внаслідок ввімкнення відповідних секцій БСК, вимірністю $(m \times 1)$; $U_{max.don}$ – рівень напруги, що відповідає максимально допустимому відхиленню напруги; $\bar{X}$ – фіктивний вектор вимірністю $(m \times 1)$, кожна компонента якого $\bar{x}_i$ пов'язана із змінною x_i вектора X так, що коли $\bar{x}_i = 1$, то $x_i = 0$ і навпаки; n – одинична стовпцева матриця вимірністю $(m \times 1)$; $\forall$ – індекс логічної операції «АБО».

Матриці добавок напруги зворотної та нульової послідовностей, що мають місце внаслідок ввімкнення відповідних секцій БСК, визначаються за формулами:

$$D\dot{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\dot{U}_2}{U_{нф}^2} \cdot z_2 \cdot DQ_n, \quad (2)$$

$$D\dot{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\dot{U}_0}{U_{нф}^2} \cdot z_0 \cdot DQ_n, \quad (3)$$

де z_2, z_0 – опори живильної мережі струмам зворотної і нульової послідовності відповідно; $U_{нф}$ – номінальна фазна напруга мережі у вузлі під'єднання БСК; DQ_n – матриця номінальних потужностей секцій БСК, вимірністю $(m \times 1)$.

Можливі спрощення математичної моделі пов'язані з тим, що деякі із обмежень можуть виявитися не актуальними для моменту прийняття керуючого рішення. Такий висновок можна зробити за попередніми оцінками параметрів стану системи. Наприклад, реактивна потужність, яка споживається, перевищує потужність БСК. В такому випадку зворотних перетоків реактивної потужності в мережі енергопостачальної організації в результаті реалізації керуючого рішення виникнути не може і відповідне обмеження з математичної моделі (1) можна виключити.

За характером змінних математична модель (1) відноситься до цілочислових моделей. Технічні обмеження, що контролюють напруги зворотної і нульової послідовностей та напругу в одній із фаз описуються не скалярною функцією дійсного змінного. Всі інші обмеження та цільова функція лінійні залежності від змінних. Класичних методів аналізу таких математичних моделей не існує. З цієї причини розроблено обчислювальний метод, який дозволяє знайти розв'язок задачі.

Та обставина, що змінні математичної моделі цілочислові, дає можливість оптимізаційну задачу вирішувати методом динамічного програмування, оскільки кількість варіантів обмежена і можна сформулювати множину допустимих. На кожному етапі здійснюється вибір найефективнішого рішення із множини допустимих.

Алгоритм аналізу математичної моделі керування:

Крок 1. Розраховуються потужності секцій БСК, що відповідають реальним напругам в мережі. Виконується перебір секцій БСК, по яким не прийнято рішення, і відбираються такі, що задовольняють обмеження моделі (1). Потужності відібраних секцій формують масив D^k , де k – номер етапу.

Якщо D^k пустий, то оптимальний розв'язок досягнуто на етапі $k-1$. Вектор керування реалізується.

Крок 2. Перебираються всі потужності секцій масиву D^k і визначається та, що забезпечує максимальний від'ємний приріст цільової функції. Розрахунки проводяться згідно з рекурентними співвідношеннями:

$$\begin{cases} f^I = \min_{1 \leq r \leq R^I} \{Q - DQ_r^I(U)\} \\ K \\ f^k = \min_{1 \leq r \leq R^k} \{f^{k-1} - DQ_r^k(U)\}, \quad k = II, III, \dots, n, \end{cases} \quad (4)$$

де f^k – оцінка стану системи на k -му етапі – реактивна потужність на вводі, якщо реалізувати всі рішення, що прийняті на попередніх етапах, включаючи

даний; $DQ_r^k(U)$ - елемент множини D^k ; R^k - загальна кількість елементів множини D^k .

Крок 3. Проводиться розрахунок для уточнення потужності, відібраної до ввімкнення секції і тих секцій, рішення по яким прийнято по всіх попередніх $k-1$ етапах, вважаючи, що вона ввімкнена.

Перевіряються на виконання умови, описані обмеженнями моделі (1).

Якщо будь-яке обмеження не виконується, то потужність даної секції вилучається із масиву D^k та з подальшого розгляду, а розрахунки проводяться, починаючи з кроку 2.

Крок 4. Відповідна компонента вектора керування прирівнюється до одиниці, $k=k+1$, та здійснюється перехід до кроку 1.

Тестовий приклад за результатами дослідження.

У вузлі навантаження чотирипровідної електричної мережі промислового підприємства (рис. 1), встановлено БСК із керованими секціями симетричного виконання, що мають схему зірки з нулем. Потужності секцій, які відповідають номінальній напрузі, 450, 300, 225, 150, 105, 60, 30 кВАр. Фазні напруги в вузлі під'єднання БСК $U_A = 224,26e^{-j1,48^\circ} \text{ В}$, $U_B = 217,28e^{-j118,83^\circ} \text{ В}$, $U_C = 218,08e^{j120,35^\circ} \text{ В}$. Вихідний режим відповідає вимкненим секціям БСК.

Знайти вектор керування БСК за умов, що:

1) допустиме значення реактивної потужності $Q_{\text{дир}} = 0 \text{ еАА} \delta$;

2) фазна напруга на збірних шинах не повинна перевищувати $U_{\text{max,дон}} = 231 \text{ В}$;

3) k_{2U} зумовлений несиметричними навантаженнями в енергосистемі, а також, під'єднаними до кабельної лінії 0,4 кВ, $k_{2U \text{ дон}} = 2\%$;

4) k_{0U} зумовлений несиметричними навантаженнями, під'єднаними до кабельної лінії 0,4 кВ, $k_{0U \text{ дон}} = 2\%$.

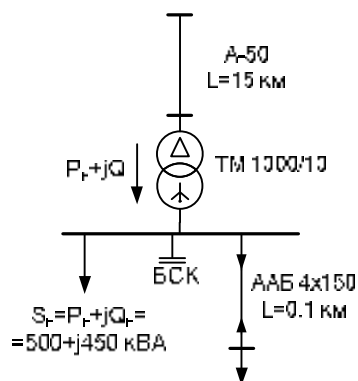


Рисунок 1 – Схема електропостачання споживача

Розв'язування.

Вихідний стан системи характеризується вектором параметрів:

$$\begin{pmatrix} Q \\ U_A \\ U_1 \\ U_2 \\ U_0 \\ k_{2U} \\ k_{0U} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 450 \\ 224,26e^{-j1,48^\circ} \\ 220e^{j0^\circ} \\ 3,5e^{-j70^\circ} \\ 3,9e^{-j40^\circ} \\ 1,59 \\ 1,77 \end{pmatrix}.$$

Оскільки $k_{2U} < k_{2U \text{ дон}}$, $k_{0U} < k_{0U \text{ дон}}$ та $U_A < U_{\text{max,дон}}$, то за розробленим обчислювальним методом виконаємо розрахунки, спрямовані на покращення стану системи.

В цілому процес вирішення задачі за окремими етапами наведений в таблиці 1. Для порівняння в таблиці 2 наведені результати вирішення тієї ж задачі, але без врахування фактора несиметрії напруги.

Таблиця 1 - Результати розрахунку на етапах вирішення задачі за розробленим обчислювальним методом

№ етапу	За розробленим обчислювальним методом				
	Вектор керування X^T	Q, квар	k_{2U} , %	k_{0U} , %	U_A , В
Вих. стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	1,59	1,77	224,26
1	(0 0 0 1 0 0 0)	295,75	1,66	1,94	228,7
2	(0 0 0 1 0 0 1)	263,89	1,68	1,97	229,62

Таблиця 2 - Результати розрахунку на етапах вирішення задачі за розрахунком без урахування несиметрії напруг

№ етапу	За розрахунком без урахування несиметрії напруг				
	Вектор керування X^T	Q, квар	k_{2U} , %	k_{0U} , %	U_A , В
Вих. стан	(0 0 0 0 0 0 0)	450	1,59	1,77	224,26
1	(1 0 0 0 0 0 0)	-0,26	1,83	2,27	237,96

Висновки.

1. В умовах несиметрії напруги керування реактивною потужністю за допомогою БСК, які мають схему ввімкнення «зірка з нулем», необхідно виконувати з урахуванням їх впливів на режим зворотної та нульової послідовностей, що виключить можливість отримання технічно недопустимих рішень.

2. Розрахунок вектора керування можна здійснювати у відповідності до математичної моделі (1) за розробленим обчислювальним методом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лебедин А. А., Джус Н. И. Повышение эффективности конденсаторных установок // Промышленная энергетика. – 1996. - №1. – С. 34 - 35.
2. Рогальський Б. С. Проблеми енергозбереження. Зниження втрат електроенергії в електричних мережах: [навчальний посібник] – Вінниця : ВДТУ, 1996. – 112 с.
3. Рогальський Б. С., Непийвода В. М., Сосенко П. В., Вознюк С. І. Способи та технічні засоби керування компенсувальними установками нового технічного рівня // Вісник ВПІ. – 2001. - №3. – С. 62 - 70.
4. Терешкевич Л. Б., Червінська Т. М. Керування реактивною потужністю в умовах несиметрії напруги мережі // Промелектро. – 2008. - №5. – С. 16-20.

Стаття надійшла 9.03.10 р.
Рекомендовано до друку к.т.н., доц.
Огарь В.О.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

*Терешкевич Л. Б., к.т.н, доцент, Червинская Т. Н., аспирант
Винницкий национальный технический университет
21021, г. Винница, ул. В. Интернационалистов, 3, кв. 415
E-mail: chervinskatom@rambler.ru*

Разработана математическая модель управления реактивной мощностью при помощи секций батарей статических конденсаторов, которые соединены по схеме звезды с нулем и подсоединяются к узлу с несимметричным напряжением, а также числовой метод ее анализа. Эффективность выполненных научных разработок продемонстрирована на числовом примере.

Ключевые слова: батареи статических конденсаторов, несимметрия напряжения.

THE MATHEMATICAL MODEL OF REACTIVE POWER MANAGEMENT IN ELECTRIC GRIDS WITH THE ASYMMETRIC VOLTAGE

*Tereshkevich L., Chervinska T.
Vinnitsa National Technical University
Vinnitsa, 21021, st. V. Internatsionalistiv 3
E-mail: chervinskatom@rambler.ru*

The mathematical model of reactive power management by sections of static condensers battery which is joined by star with zero scheme and is connected to node with asymmetric voltage and numerical method of its analysis is developed. The efficiency of the executed scientific development is demonstrated on a numerical example.

Keywords: battery of static condensers, asymmetry of the voltage.