УДК 621.316.1

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЄМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ В МЕРЕЖІ З ГЛУХОЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

Плєшков П. Г., Зінзура В. В., Кубкін М. В.

Кіровоградський національний технічний університет

Запропоновано спосіб регулювання напруги в мережі з глухозаземленою нейтраллю, який полягає в одночасному зниженню рівнів відхилення напруг та несиметрії напруг шляхом використання безконтактного пристрою РПН силового трансформатора.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку систем електропостачання важливу роль відіграє питання якості електричної енергії. Погіршення показників якості електроенергії, зазначених в ГОСТ 13109-97, негативно впливає на роботі елементів систем електропостачання [1]. Однією з найбільших проблем якості електроенергії електричних мереж АПК є завищені показники усталеного відхилення напруги та коефіцієнтів несиметрії напруги по зворотній та нульовій послідовностях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання зниження рівня несиметрії напруг за допомогою симетрувальних установок висвітлювалося в [1], [2]. В [2] для одночасного зменшення рівня несиметрії напруг і відхилення напруги пропонується використовувати симетрувальний трансформатор зі схемою з'єднання обмоток "трикутник – зустрічний зигзаг". Недоліком даного методу є висока вартість такого трансформатора та наявність додаткових втрат потужності в його обмотках.

Мета статті. Розробка методології векторного керування пристроєм РПН силового трансформатора, що працює в мережі з глухозаземленою нейтраллю з метою одночасного зниження рівнів відхилення і несиметрії напруг.

Основні матеріали дослідження. В [3] запропоновано закон управління безконтактним пристроєм РПН силового трансформатора для одночасного зниження рівнів відхилення та несиметрії напруги по зворотній послідовності шляхом використання математичного апарату багатокритеріальної (векторної) оптимізації. Для мереж з глухозаземленою нейтраллю актуальною є проблема зменшення рівня напруги нульової послідовності. Дану проблему також можна вирішити з допомогою застосування апарату векторної оптимізації.

Сформулюємо задачу векторної оптимізації для схеми, приведеної на рис. 1.

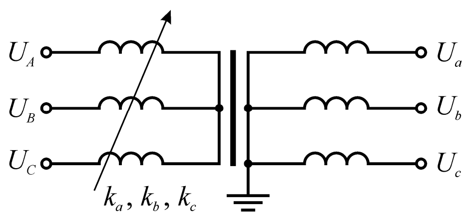

Рисунок 1 – Схема трансформатора із з'єднанням обмоток "зірка"-"зірка з нулем".

Дана задача буде мати вигляд:

$$\begin{cases} Q_1(\mathbf{K}) = \left|\Delta U_1(\mathbf{K})\right| = \left|U_1(\mathbf{K}) - U_{\text{ном}}\right| \to \min; \\ Q_2(\mathbf{K}) = U_2(\mathbf{K}) \to \min; \\ Q_3(\mathbf{K}) = U_0(\mathbf{K}) \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega; \end{cases} \qquad (1)$$

де $\mathbf{Q}(\mathbf{K}) = \left(Q_1(\mathbf{K}),\, Q_2(\mathbf{K}),\, Q_3(\mathbf{K})\right)$ – *вектор критеріїв* управління; $\mathbf{K} = (k_a,\, k_b, k_c)$ – вектор коефіцієнтів трансформації трансформатора у фазах А, В, С (*вектор управління*); $U_1(\mathbf{K})$ – напруга прямої послідовності; $\Delta U_1(\mathbf{K})$ – різниця значень модуля напруги прямої послідовності та номінальної напруги (пропорційний відхиленню напруги); $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга мережі ($U_{\text{ном}} = 1$); $U_2(\mathbf{K})$ – напруга зворотної послідовності; $U_0(\mathbf{K})$ – напруга нульової послідовності; $\Omega = \left\{\mathbf{K} \in \mathbb{R}^3 \left| k_{i\min} \le k_i \le k_{i\max},\; i = a, b, c\right.\right\}$ – область допустимих значень вектора коефіцієнтів трансформації трансформатора, яка визначається глибиною регулювання коефіцієнта трансформації (допустимий простір управління); $k_{i\min}, k_{i\max}$, $i = a, b, c$ – відповідно мінімальне та максимальне значення коефіцієнту трансформації трансформатора для кожної з фаз.

Розв'язок задачі (1) отримується в два етапи [4]:

1 етап. Оптимізацією окремих критеріїв визначаються координати утопічної точки $\mathbf{Q}_{\text{ут}} = (\Delta U_{\text{ут}}, U_{2\text{ут}}, U_{0\text{ут}})$ в просторі критеріїв $\{\mathbf{Q}\} \subset \mathbb{R}^3$.

2 етап. Шляхом використання одного з методів звуження парето-оптимальної множини (наприклад, мінімаксного), на основі використання додаткової інформації, знаходяться координати розв'язку $\mathbf{K}^*$ в просторі управління $\Omega \subset \mathbb{R}^3$.

Розглянемо задачу знаходження координат $\mathbf{Q}_{\text{ут}} = (\Delta U_{\text{ут}}, U_{2\text{ут}}, U_{0\text{ут}})$ утопічної точки. Задача знаходження $\Delta U_{\text{ут}}$ та $U_{2\text{ут}}$ була описана в [3]. Тому приведемо лише розв'язок задачі знаходження $U_{0\text{ут}}$:

$$\begin{cases} U_0(\mathbf{K}) \to \min; \\ \mathbf{K} \in \Omega. \end{cases} \qquad (2)$$

Будемо шукати вираз для $U_0(\mathbf{K})$ у вигляді:

$$U_0(\mathbf{K}) = \sqrt{\left[\mathrm{Re}\underline{U}_0(\mathbf{K})\right]^2 + \left[\mathrm{Im}\underline{U}_0(\mathbf{K})\right]^2}. \qquad (3)$$

Згідно методу симетричних складових:

$$\begin{gathered}\underline{U}_2(\mathbf{K}) = \frac{1}{3}\left(\frac{\underline{U}_A}{k_a} + \frac{\underline{U}_B}{k_b} + \frac{\underline{U}_C}{k_c}\right) = \\ = \frac{1}{3}\left(\frac{U_{A\text{а}} + jU_{A\text{р}}}{k_a} + \frac{U_{B\text{а}} + jU_{B\text{р}}}{k_b} + \frac{U_{C\text{а}} + jU_{C\text{р}}}{k_c}\right).\end{gathered} \qquad (4)$$

де $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ – вектори напруг в фазах A, B, C відповідно; $U_{A\text{а}}$, $U_{B\text{а}}$, $U_{C\text{а}}$ – активні складові векторів напруги в фазах A, B, C відповідно; $U_{A\text{р}}$, $U_{B\text{р}}$, $U_{C\text{р}}$ – реактивні складові векторів напруги в фазах A, B, C відповідно.

Виділивши дійсну та уявну частини виразу (4) та підставивши їх в рівняння (3) отримаємо:

$$\begin{gathered}U_0(\mathbf{K}) = \sqrt{\left[\frac{k_b k_c U_{A\text{а}} + k_a k_c U_{B\text{а}} + k_a k_b U_{C\text{а}}}{3k_a k_b k_c}\right]^2 +} \\ \overline{+\left[\frac{k_b k_c U_{A\text{р}} + k_a k_c U_{B\text{р}} + k_a k_b U_{C\text{р}}}{3k_a k_b k_c}\right]^2}.\end{gathered} \qquad (5)$$

Очевидно, що глобальним мінімумом (5) є нуль ($\min U_0(\mathbf{K}) = 0$). Останній буде досягатись за умов:

$$\begin{cases} k_b k_c U_{A\text{а}} + k_a k_c U_{B\text{а}} + k_a k_b U_{C\text{а}} = 0; \\ k_b k_c U_{A\text{р}} + k_a k_c U_{B\text{р}} + k_a k_b U_{C\text{р}} = 0; \\ k_a \neq 0;\ k_b \neq 0;\ k_c \neq 0. \end{cases} \qquad (6)$$

Умову $k_a \neq 0;\ k_b \neq 0;\ k_c \neq 0$ можна не враховувати, так як величини коефіцієнтів трансформації, що входять в область Ω, приймають значення більше 0, тобто завжди виконується умови $k_a > 0,\ k_b > 0,\ k_c > 0$.

Система рівнянь (6) є невизначеною системою двох нелінійних рівнянь з трьома невідомими k_a, k_b, k_c. Взявши k_c в якості параметру і розв'язавши дану систему рівнянь отримаємо:

$$\begin{cases} k_a = \dfrac{U_{A\text{а}} U_{B\text{р}} - U_{A\text{р}} U_{B\text{а}}}{U_{B\text{а}} U_{C\text{р}} - U_{B\text{р}} U_{C\text{а}}} k_c = a k_c; \\ k_b = \dfrac{U_{A\text{а}} U_{B\text{р}} - U_{A\text{р}} U_{B\text{а}}}{U_{A\text{р}} U_{C\text{а}} - U_{A\text{а}} U_{C\text{р}}} k_c = b k_c. \end{cases} \qquad (7)$$

Вирази (7) описують співвідношення між коефіцієнтами трансформації трансформатора при якому функція $U_0(\mathbf{K})$ досягає свого глобального мінімуму.

Далі необхідно вирішити питання про знаходження мінімуму функції $U_0(\mathbf{K})$ враховуючи обмеження $\mathbf{K} \in \Omega$. Хід вирішення цієї задачі аналогічний знаходженню мінімуму функції $U_0(\mathbf{K})$, що детально описано в [3]. Тому наведемо лише кінцевий вираз для знаходження мінімуму $U_0(\mathbf{K})$.

$$U_{0\text{ут}} = \begin{cases} U_0\left[k_{a\min}, \Phi_b\left(k_{a\min}, k_{c\max}\right), k_{c\max}\right], \\ \left(k_{a2} < k_{a\min}\right) \wedge \left(k_{b2} < k_{b\min}\right) \wedge (\xi > 1); \\ U_0\left[\Phi_a\left(k_{b\min}, k_{c\max}\right), k_{b\min}, k_{c\max}\right], \\ \left(k_{a2} < k_{a\min}\right) \wedge \left(k_{b2} < k_{b\min}\right) \wedge (\xi \le 1); \\ U_0\left[k_{a\min}, \Phi_b\left(k_{a\min}, k_{c\max}\right), k_{c\max}\right], \\ \left(k_{a2} < k_{a\min}\right) \wedge \left(k_{b\min} \le k_{b2} \le k_{b\max}\right); \\ U_0\left[\Phi_a\left(k_{b\min}, k_{c\max}\right), k_{b\min}, k_{c\max}\right], \\ \left(k_{b2} < k_{b\min}\right) \wedge \left(k_{a\min} \le k_{a2} \le k_{a\max}\right); \\ U_0\left[\Phi_a\left(k_{b\max}, k_{c\min}\right), k_{b\max}, k_{c\min}\right], \\ \left(k_{b1} > k_{b\max}\right) \wedge \left(k_{a\min} \le k_{a1} \le k_{a\max}\right); \\ U_0\left[k_{a\max}, \Phi_b\left(k_{a\max}, k_{c\min}\right), k_{c\min}\right], \\ \left(k_{a1} > k_{a\max}\right) \wedge \left(k_{b1} > k_{b\max}\right) \wedge (\xi > 1); \\ U_0\left[\Phi_a\left(k_{b\max}, k_{c\min}\right), k_{b\max}, k_{c\min}\right], \\ \left(k_{a1} > k_{a\max}\right) \wedge \left(k_{b1} > k_{b\max}\right) \wedge (\xi \le 1); \\ U_0\left[k_{a\max}, \Phi_b\left(k_{a\max}, k_{c\min}\right), k_{c\min}\right], \\ \left(k_{a1} > k_{a\max}\right) \wedge \left(k_{b\min} \le k_{b1} \le k_{b\max}\right); \\ U_0\left[k_{a\min}, k_{b\max}, \Phi_c\left(k_{a\min}, k_{b\max}\right)\right], \\ \left(\xi > \dfrac{k_{b\max}}{k_{a\min}}\right) \wedge \neg\left[\left(k_{b2} < k_{b\max}\right) \vee\right. \\ \left.\vee\left(k_{a1} > k_{a\min}\right)\right]; \\ U_0\left[k_{a\max}, k_{b\min}, \Phi_c\left(k_{a\max}, k_{b\min}\right)\right], \\ \left(\xi > \dfrac{k_{b\min}}{k_{a\max}}\right) \wedge \neg\left[\left(k_{a2} < k_{a\max}\right) \vee\right. \\ \left.\vee\left(k_{b1} > k_{b\min}\right)\right]; \\ 0, \left(\dfrac{k_{b\min}}{k_{a\max}} \le \xi \le \dfrac{k_{b\max}}{k_{a\min}}\right) \wedge \neg\left\{\left[\left(k_{a2} < k_{a\min}\right) \wedge\right.\right. \\ \left.\wedge\left(k_{b2} < k_{b\max}\right)\right] \vee \left[\left(k_{a1} > k_{a\min}\right) \wedge\right. \\ \left.\wedge\left(k_{b1} > k_{b\max}\right)\right] \vee \left[\left(k_{a2} < k_{a\max}\right) \wedge\right. \\ \left.\wedge\left(k_{b2} < k_{b\min}\right)\right] \vee \left[\left(k_{a1} > k_{a\max}\right) \wedge\right. \\ \left.\left.\wedge\left(k_{b1} > k_{b\min}\right)\right]\right\}. \end{cases} \qquad (8)$$

де

$$\Phi_a\left(k_b, k_c\right) = \frac{-k_b k_c\left(U_{A\text{а}}^2 + U_{A\text{р}}^2\right)}{k_b U_{A\text{а}} U_{C\text{а}} + k_c U_{A\text{а}} U_{B\text{а}} + k_b U_{A\text{р}} U_{C\text{р}} + k_c U_{A\text{р}} U_{B\text{р}}};$$

$$\Phi_b\left(k_a, k_c\right) = \frac{-k_a k_c\left(U_{B\text{а}}^2 + U_{B\text{р}}^2\right)}{k_a U_{B\text{а}} U_{C\text{а}} + k_c U_{A\text{а}} U_{B\text{а}} + k_a U_{B\text{р}} U_{C\text{р}} + k_c U_{A\text{р}} U_{B\text{р}}};$$

$$\Phi_c\left(k_a,k_b\right)=\frac{-k_a k_b\left(U_{C\text{a}}^2+U_{C\text{p}}^2\right)}{k_a U_{B\text{a}}U_{C\text{a}}+k_b U_{A\text{a}}U_{C\text{a}}+k_a U_{B\text{p}}U_{C\text{p}}+k_b U_{A\text{p}}U_{C\text{p}}}$$

є коренями рівнянь $\frac{\partial U_0(\mathbf{K})}{\partial k_a}=0$, $\frac{\partial U_0(\mathbf{K})}{\partial k_b}=0$, $\frac{\partial U_0(\mathbf{K})}{\partial k_c}=0$ відповідно;

$$\xi=\frac{b}{a}=\frac{U_{B\text{a}}U_{C\text{p}}-U_{B\text{p}}U_{C\text{a}}}{U_{A\text{p}}U_{C\text{a}}-U_{A\text{a}}U_{C\text{p}}}$$ – постійний коефіцієнт;

k_{a1}, k_{a2}, k_{b1}, k_{b2} – значення коефіцієнтів трансформації, отримані в результаті підстановки в перше та друге рівняння системи (7) значень $k_{c\min}$, $k_{c\max}$ відповідно.

Кінцевим етапом розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації є звуження множини парето-оптимальних розв'язків. В нашому випадку скористаємося мінімаксним методом звуження, який модифікуємо для врахування пріоритетності критеріїв управління [5]:

$$\begin{cases}\Delta U_1\left(\mathbf{K}\right)\to\min\Rightarrow\mathbf{K}^*;\\ \Delta U_{1\text{ут}}-\Delta U_1\left(\mathbf{K}\right)=k_{\text{пр1}}\left[U_{2\text{ут}}-U_2\left(\mathbf{K}\right)\right];\\ \Delta U_{1\text{ут}}-\Delta U_1\left(\mathbf{K}\right)=k_{\text{пр2}}\left[U_{0\text{ут}}-U_0\left(\mathbf{K}\right)\right];\\ \mathbf{K}\in\Omega;\end{cases}\qquad(9)$$

де $\mathbf{K}^*$ – розв'язок задачі (1);

$k_{\text{пр1}}$, $k_{\text{пр2}}$ – коефіцієнти пріоритетності, що враховують перевагу одного критерію управління над іншим.

В даному випадку при $k_{\text{пр1}}>1$ більш бажаним є критерій $Q_1=\Delta U(\mathbf{K})$, а при $k_{\text{пр1}}<1$ – критерій $Q_2=U_2\left(\mathbf{K}\right)$. Те ж саме стосується і коефіцієнту $k_{\text{пр2}}$. Величину коефіцієнтів $k_{\text{пр1}}$, $k_{\text{пр2}}$ обирають на основі додаткової апріорної інформації про характер навантаження, а також про вимоги до показників якості електричної енергії в даній конкретній мережі.

Аналітичний розв'язок задачі скалярної оптимізації (9) є досить складним, тому найбільш доцільно скористатися одним із чисельних методів скалярної оптимізації.

Висновки. В результаті проведеного дослідження:

1. Формалізовано задачу векторного керування пристроєм РПН силового трансформатора з метою одночасного зниження відхилень напруги та рівня несиметрії по зворотній та нульовій послідовності.

2. Знайдено аналітичні вирази для знаходження координати $U_{0\text{ут}}$ утопічної точки $\mathbf{Q}_{\text{ут}}$, що значно спрощує перший етап розв'язку задачі векторної оптимізації.

3. Запропоновано модифікацію методу мінімаксного звуження парето-оптимальної множини розв'язків задачі векторної оптимізації, яка дозволяє враховувати пріорітетність кожного з критеріїв управління.

Список використаних джерел

1. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжения в электрических сетях / Кузнецов В. Г., Григорьев А. С., Данилюк В. Б. – К.: Наукова думка, 1992.

2. Бурбело М. Й. Застосування багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг в електричних мережах /М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький, О. В. Бабенко, О. В. Салій // Вісник ВПІ. – 2007. – № 6. – С. 76–79.

3. Плєшков П. Г., Зінзура В. В., Кубкін М. В. Теоретичні засади оптимального керування пристроєм РПН силового трансформатора за векторним критерієм//Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету (техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація). Вип. 24, ч. 2. – Кіровоград: КНТУ, 2011.

4. Растригин Л. А. Современные принципы управления сложными объектами. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.

5. Нетушил А. В., Балтрушевич А. В., Бурляев В. В. и др. Теория автоматического управления: нелинейные системы, управление при случайных воздействиях: учебник для вузов / Под ред. Нетушила А. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1983 – 432 с.

Аннотация

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВОМ РПН СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, КОТОРЫЙ РАБОТАЕТ В СЕТИ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Плешков П. Г., Зинзура В. В., Кубкин М. В.

Предложен способ регулирования напряжения в сети с глухозаземленной нейтралью, который состоит в одновременном снижении уровней отклонения напряжений и несимметрии напряжений путем использования бесконтактного устройства РПН силового трансформатора

Abstract

OPTIMAL CONTROL DEVICE OF OLTC OF POWER TRANSFORMER WHICH WORKS IN NETWORK WITH GROUNDED NEUTRAL

P. Pleshkov, V. Zinzura, M. Kubkin

A method for regulating voltage to the grounded neutral, which consists in the simultaneous reduction of levels of voltage fluctuation and voltage unbalance through the use of contactless OLTC the power transformer