

УДК 621.316.1

М. Й. Бурбело, д. т. н., проф.;

А. М. Волоцький;

О. В. Бабенко;

О. В. Салій, студ.

ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ СИМЕТРУВАННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Запропоновано застосування принципу багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг, що створює передумови для побудови ефективних інформаційно-керуючих систем симетрувальних трансформаторів і сприяє забезпеченню комплексного покращення якості електроенергії.

Розгляд проблеми

Забезпечення якості електроенергії на належному рівні — одна з головних задач енергопостачальних компаній України. Серед показників якості важливе місце займає рівень несиметрії та відхилення напруг в електричних мережах. Несиметричні режими виникають, головним чином, внаслідок впливу специфічного несиметричного навантаження: тягового навантаження, навантаження електродугових печей, частка яких в останні роки зростає.

Несиметрія напруг викликає зменшення надійності та економічності роботи споживачів (асинхронних двигунів, систем освітлення, конденсаторних установок, пристроїв автоматики та ін.), призводить до збільшення втрат потужності в лініях електропередавання і трансформаторах та зменшення їх пропускної здатності.

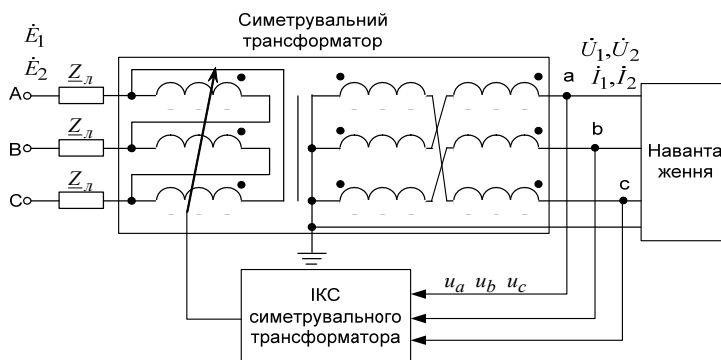
Серед багатьох заходів і засобів зменшення несиметрії напруг важливе місце займає використання симетрувальних трансформаторів, які здатні забезпечити зменшення одночасно несиметрії та відхилення напруг. В [1, 2] побудовано математичні моделі та алгоритми керування симетрувальним трансформатором з точки зору симетрування напруг. При цьому відхилення напруг вводились як обмеження, що є істотним недоліком розроблених інформаційно-керуючих систем симетрувальних трансформаторів, які можуть виконувати функції як симетрування, так і регулювання напруг.

Постановка завдання

Ставиться задача застосування принципу багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилень напруг за допомогою симетрувального трансформатора.

Обґрунтування результатів

На рисунку показано узагальнену структурну схему симетрувального трансформатора зі схемою з'єднання обмоток трансформатора — Δ/Z («трикутник»/«зустрічний зигзаг»). Симетрувальний трансформатор з такою схемою з'єднання обмоток виключає виникнення напруги нульової послідовності на низькій стороні.



Узагальнена структурна схема симетрувального трансформатора

На схемі прийнято такі позначення: $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ — комплексні напруги і струми прямої та зворотної послідовностей вторинної обмотки трансформатора; u_a, u_b, u_c — миттєві значення фазних напруг, що подаються на входи інформаційно-керуючої системи (ІКС) симетрувального трансформатора; \dot{E}_1, \dot{E}_2 — комплексні напруги прямої та зворотної послідовності джерела живлення; \underline{Z}_L — комплексний опір лінії електропередавання.

Напруги фаз на вторинній обмотці трансформатора можна виразити через напруги і струми на його первинній обмотці у такому вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= k_{AB} (\dot{U}_{AB} - \dot{I}_{AB} \underline{Z}_K) - k_{BC} (\dot{U}_{BC} - \dot{I}_{BC} \underline{Z}_K); \\ \dot{U}_b &= k_{BC} (\dot{U}_{BC} - \dot{I}_{BC} \underline{Z}_K) - k_{CA} (\dot{U}_{CA} - \dot{I}_{CA} \underline{Z}_K); \\ \dot{U}_c &= k_{CA} (\dot{U}_{CA} - \dot{I}_{CA} \underline{Z}_K) - k_{AB} (\dot{U}_{AB} - \dot{I}_{AB} \underline{Z}_K),\end{aligned}\quad (1)$$

де $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ — комплексні значення фазних напруг вторинної обмотки трансформатора; $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}, \dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$ — комплексні значення фазних напруг та струмів первинної обмотки трансформатора, з'єднаної за схемою «трикутник»; \underline{Z}_K — опір короткого замикання фази трансформатора; k_{AB}, k_{BC}, k_{CA} — коефіцієнти передавання напруг відповідних фаз трансформатора.

На основі (1) отримано вирази для напруг прямої та зворотної послідовностей на вторинній обмотці симетрувального трансформатора

$$\dot{U}_1 = \frac{e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} \left[k_{AB} (\dot{U}_{AB} - \dot{I}_{AB} \underline{Z}_K) + k_{BC} (\dot{U}_{BC} - \dot{I}_{BC} \underline{Z}_K) e^{-j120^\circ} + k_{CA} (\dot{U}_{CA} - \dot{I}_{CA} \underline{Z}_K) e^{j120^\circ} \right]; \quad (2)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} \left[k_{AB} (\dot{U}_{AB} - \dot{I}_{AB} \underline{Z}_K) + k_{BC} (\dot{U}_{BC} - \dot{I}_{BC} \underline{Z}_K) e^{-j120^\circ} + k_{CA} (\dot{U}_{CA} - \dot{I}_{CA} \underline{Z}_K) e^{j120^\circ} \right]. \quad (3)$$

Регулювання режиму роботи симетрувального трансформатора доцільно інтерпретувати як задачу багатоцільової оптимізації з декількома цільовими функціями

$$U_2 \rightarrow \min; \quad (4)$$

$$|\Delta U_1| \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$|\Delta U_{\phi i}| \rightarrow \min, \quad i = a, b, c, \quad (6)$$

де U_2 — діюче значення напруги зворотної послідовності; $|\Delta U_1|$ — модуль відхилення напруги прямої послідовності від номінальної напруги; $|\Delta U_{\phi i}|$ — модуль відхилення i -ої фазної напруги від номінального значення фазної напруги.

Виконаємо ранжування критеріїв на основі лексикографічного підходу [3, 4]. Оскільки апіорі відомо, що основним призначенням симетрувального трансформатора є симетрування напруг, то природно обрати за найважливіший критерій — критерій оптимальності (4). Наступним, другим за важливістю, більш узагальнюючим із критеріїв (5) і (6) є критерій (5), який є відповідальним за рівень відхилення напруги прямої послідовності від номінальної напруги. Врахування критерію (6) є необхідним з точки зору живлення однофазних споживачів і недопущення появи перенапруг на окремих фазах трифазних електроприймачів.

Для мінімізації за критерієм (4) з виразів (2), (3) отримано систему рівнянь, яка описує зв'язок між напругами прямої та зворотної послідовностей на первинній та вторинній обмотках симетрувального трансформатора

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} e^{j60^\circ} \underline{K}_1 & \underline{K}_3 \\ \underline{K}_2 & e^{-j60^\circ} \underline{K}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_1 - \dot{I}_{1L} \underline{Z} \\ \dot{E}_2 - \dot{I}_{2L} \underline{Z} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $\underline{K}_1 = \frac{1}{3}(k_{AB} + k_{BC} + k_{CA})$; $\underline{K}_2 = \frac{1}{3}(k_{AB} + ak_{BC} + a^2k_{CA})$; $\underline{K}_3 = \frac{1}{3}(k_{AB} + a^2k_{BC} + ak_{CA})$ — комплексні коефіцієнти передавання трансформатора з пофазовим регулюванням напруги; $\dot{I}_{1л}$, $\dot{I}_{2л}$ — комплексні лінійні струми прямої та зворотної послідовностей на стороні високої напруги симетрувального трансформатора; $\underline{Z} = \underline{Z}_л + \underline{Z}_T$ — комплексний опір системи електропередавання, тут $\underline{Z}_T = \frac{\underline{Z}_K}{3}$ — комплексний опір короткого замикання трансформатора.

З використанням методології побудови законів керування [1], з (7) отримано рекурентне рівняння, у відповідності до якого відбувається пофазове регулювання коефіцієнтів передавання симетрувального трансформатора для забезпечення виконання критерію (4), у вигляді

$$\left(\frac{\underline{K}_2}{\underline{K}_1}\right)_n \approx -\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} e^{j60^\circ} + \frac{\underline{K}_2}{\underline{K}_1}, \quad (8)$$

де $\left(\frac{\underline{K}_2}{\underline{K}_1}\right)_n$ — параметр пофазового регулювання, який необхідно встановити для компенсації напруги зворотної послідовності; $\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$ — відношення комплексних напруг, яке необхідно виміряти

на стороні низької напруги симетрувального трансформатора; $\frac{\underline{K}_2}{\underline{K}_1}$ — параметр пофазового регулювання, який був встановлений на момент вимірювання.

На основі виразу (8) отримано аналітичні вирази для коефіцієнтів передавання фаз обмоток симетрувального трансформатора. У випадку регулювання в двох фазах BC і CA (нерегульована обмотка фази AB); CA і AB (нерегульована обмотка фази BC) або AB і BC (нерегульована обмотка фази CA) закон регулювання, записаний через прирости коефіцієнтів передавання напруг фаз симетрувального трансформатора, набуде відповідно вигляду

$$\Delta k_{AB} = 0; \quad \Delta k_{BC} = -2\sqrt{3}k''_{U2}; \quad \Delta k_{CA} = 3k'_{U2} - \sqrt{3}k''_{U2}; \quad (9)$$

$$\Delta k_{AB} = 2\sqrt{3}k''_{U2}; \quad \Delta k_{BC} = 0; \quad \Delta k_{CA} = 3k'_{U2} + \sqrt{3}k''_{U2}; \quad (10)$$

$$\Delta k_{AB} = -3k'_{U2} + \sqrt{3}k''_{U2}; \quad \Delta k_{BC} = -3k'_{U2} - \sqrt{3}k''_{U2}; \quad \Delta k_{CA} = 0. \quad (11)$$

де k'_{U2} , k''_{U2} — відповідно дійсна та уявна частини відношення комплексних напруг $\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}$.

Проведене математичне моделювання законів керування (9)—(11) показало, наприклад, якщо за умови нерегульованих коефіцієнтів трансформації коефіцієнт зворотної послідовності напруг складає 2,7 %, то після симетрування за формулою (9) значення $k_{U2} = 0,075$ %, за (10) — $k_{U2} = 0,043$ %, за (11) — $k_{U2} = 0,13$ %. При цьому відхилення напруги прямої послідовності від номінального значення відповідно становить 4,6 %; 3,3 %; -3,5 % (до регулювання відхилення напруги прямої послідовності від номінального значення становило 1,5 %).

Для врахування критерію (5) у вирази (9)—(11) необхідно ввести однакові поправки, які пропорційні $(-\Delta U_1)$. Водночас при цьому необхідно враховувати відхилення напруг окремих фаз після регулювання, оскільки за різного характеру несиметрії ці відхилення, зумовлені дискретністю регулювання, можуть бути значними. З цією метою доцільним є використання адаптивного вибору одного з трьох законів регулювання (9)—(11), визначення оптимального значення поправки, що вводиться під час визначення приростів коефіцієнтів передавання напруг фаз симетрувального трансформатора, та аналізу впливу дискретності регулювання на відхилення напруг окремих фаз.

Висновки

Застосування принципу багатоцільової оптимізації для симетрування та зменшення відхилення напруг створює передумови для побудови ефективних інформаційно-керуючих систем симетрувальних трансформаторів і сприяє забезпеченню комплексного покращення якості електроенергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурбело М. Й., Бабенко О. В. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 6. — С. 242—251.
2. Бурбело М. Й., Терешкевич Л. Б., Бабенко О. В. Аналіз алгоритмів керування симетрувальним трансформатором // Вісник Харківського національного технічного університету. — 2005. — Вип. 37. — С. 13—18.
3. Аввакумов В. Г., Волоцкий А. М. Об одной лексикографической задаче многоцелевой оптимизации качества электроэнергетики // Изв. ВУЗов Энергетика. — 1977. — № 7. — С. 8—12.
4. Зорин В. В., Волоцкий А. М. Об одном правиле предпочтения частных целей в задачах многоцелевой оптимизации качества электроэнергетики // Электрические сети и системы. Республиканский межведомственный науч.-техн. сб. — 1987. — Вып. 23. — С. 43—46.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 27.11.07
Рекомендована до друку 20.12.07

Бурбело Михайло Йосипович — завідувач кафедри, **Волоцький Анатолій Михайлович, Бабенко Олексій Вікторович** — асистенти.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

Салій Олександр Володимирович — студент Інституту електроенергетики та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет