

П. Д. Лежнюк¹
 О. Є. Рубаненко¹
 А. В. Килимчук¹

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ЛОКАЛЬНИХ САК З УРАХУВАННЯМ СИСТЕМНОГО ЕФЕКТУ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто задачу оптимізації режимів ЕЕС, як задачу автоматичного керування, кінцевою метою розв'язання якої є формування закону оптимального керування режимами електричних мереж з урахуванням системного ефекту. Розглянуто математичну модель оптимального керування установленими режимами ЕЕС.

Ключові слова: крос-трансформатор, трансформатор з РПН, подібність, зрівнювальна е. р. с., неоднорідність.

Вступ

Паралельна робота ліній електропередачі (ЛЕП) різної напруги через високий рівень неоднорідності викликає ускладнення під час транспортування та розподілу електроенергії. Між електричними мережами ЕЕС через неоднорідність виникають взаємні перетоки потужності, які завантажують мережі суміжних енергопостачальних компаній. Відомо, що мережі вищої напруги розвантажуються на паралельно працюючі мережі нижчої напруги. Наслідком цього є додаткові втрати електроенергії, а також перевантаження комутаційних апаратів та ЛЕП нижчої напруги.

Дослідження міри впливу взаємних і транзитних перетоків потужності на рівень втрат електроенергії є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить контролювати та оцінювати вплив перетоків потужності магістральних електричних мереж на додаткові втрати в розподільних мережах обласних енергетичних компаній, а також аналізувати наслідки взаємовпливу електричних мереж. Компенсація додаткових втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних їх взаємовпливом, можлива шляхом введення в контури е. р. с. лінійними регуляторами типу крос-трансформаторів (КТ) та силовими трансформаторами з РПН. Тобто дія розглядуваних САК трансформаторами зв'язку ЕЕС, які об'єднують електричні мережі різних напруг в електричну систему, направлена на зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні в ЕЕС шляхом перерозподілу природних потоків потужності і примусового наближення їх до потокорозподілу в однорідній ЕЕС.

В роботі задача оптимізації режимів ЕЕС ставиться як задача автоматичного керування, кінцевою метою розв'язання якої є формування закону оптимального керування режимами електричних мереж з урахуванням системного ефекту.

Матеріали дослідження

Закон оптимального керування нормальними режимами ЕЕС

Дослідження показали, що використання узагальнених методів теорії подібності дає можливість отримати в критеріальній формі аналітичні залежності між параметрами режимів [1, 2]. У відповідності з поставленою задачею для формування законів керування САК необхідно отримати критеріальні залежності між оптимальними керувальними впливами для розв'язання задачі оптимізації струморозподілу в ЕЕС в різних режимах її роботи. В якості аргументу цільової функції доцільно прийняти зрівнювальні е. р. с., що вводяться у контури ЕЕС з метою компенсації її неоднорідності.

Активні і реактивні складові зрівнювальних е. р. с. у критеріальній формі, (за умови, що базисний режим є оптимальним зі значеннями $\mathbf{E}_{\text{р.а}\Sigma}^{(6)}$, $\mathbf{E}_{\text{р.р}\Sigma}^{(6)}$, $\mathbf{J}_{\text{а}\Sigma}^{(6)}$, $\mathbf{J}_{\text{р}\Sigma}^{(6)}$, записаними у вигляді діагональних матриць) (1)

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{*_{зр.а\Sigma}} &= -\left[\mathbf{E}_{зр.а\Sigma}^{(6)}\right]_д^{-1} \mathbf{v}_\Sigma \mathbf{r}_{в\Sigma} \mathbf{M}_{\alpha\Sigma}^{-1} \left[\mathbf{J}_{р\Sigma}^{(6)}\right]_д \mathbf{J}_{*_{р\Sigma}}; \\ \mathbf{E}_{*_{зр.р\Sigma}} &= \left[\mathbf{E}_{зр.р\Sigma}^{(6)}\right]_д^{-1} \mathbf{v}_\Sigma \mathbf{r}_{в\Sigma} \mathbf{M}_{\alpha\Sigma}^{-1} \left[\mathbf{J}_{а\Sigma}^{(6)}\right]_д \mathbf{J}_{*_{а\Sigma}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де елементи векторів $\mathbf{E}_{*_{зр.а\Sigma}}$, $\mathbf{E}_{*_{зр.р\Sigma}}$, $\mathbf{J}_{*_{а\Sigma}}$, $\mathbf{J}_{*_{р\Sigma}}$ визначаються як відношення відповідних параметрів поточного і базисного режимів.

У такій постановці задачі, керуючими змінними є е. р. с., які необхідно ввести коефіцієнтами трансформації у всі замкнені контури для реалізації оптимального струморозподілу. В [3] показано, що оптимальне значення втрат в ЕЕС досягається за відносних значень е. р. с., які визначаються за формулами

$$\mathbf{E}_{*_{зр.а\Sigma}}(t) = \boldsymbol{\pi}_{а\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{р\Sigma}}(t); \quad \mathbf{E}_{*_{зр.р\Sigma}}(t) = \boldsymbol{\pi}_{р\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{а\Sigma}}(t), \quad (2)$$

де $\mathbf{E}_{*_{зр.а\Sigma}}(t)$, $\mathbf{E}_{*_{зр.р\Sigma}}(t)$ — вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівнювальних е. р. с. трансформаторів з РПН та крос-трансформаторів, якими вводяться зрівнювальні струми $\mathbf{I}_{зр}$; $\mathbf{J}_{*_{р\Sigma}}(t)$, $\mathbf{J}_{*_{а\Sigma}}(t)$ — вектори активних і реактивних складових відносних значень струмів у вузлах; $\boldsymbol{\pi}_{а\Sigma}^E$, $\boldsymbol{\pi}_{р\Sigma}^E$ — матриці критеріїв подібності.

Як бачимо, зрівнювальні е. р. с. оптимальних режимів визначаються через постійні коефіцієнти (критерії подібності), які не залежать від параметрів поточного режиму. Вони подібні відповідним е. р. с. режиму, взятого за базисний. Тобто, в ЕЕС зрівнювальні е. р. с. подібні для різних режимів. Для визначення оптимального режиму ЕЕС залишається ввести їх в контури і виконати розрахунок усталеного режиму.

Матриці критеріїв подібності визначаються за формулами

$$\boldsymbol{\pi}_{а\Sigma}^E = -\left[\mathbf{E}_{зр.а\Sigma}^{(6)}\right]_д^{-1} \mathbf{v}_\Sigma \mathbf{r}_{в\Sigma} \mathbf{M}_{\alpha\Sigma}^{-1} \left[\mathbf{J}_{р\Sigma}^{(6)}\right]_д; \quad \boldsymbol{\pi}_{р\Sigma}^E = \left[\mathbf{E}_{зр.р\Sigma}^{(6)}\right]_д^{-1} \mathbf{v}_\Sigma \mathbf{r}_{в\Sigma} \mathbf{M}_{\alpha\Sigma}^{-1} \left[\mathbf{J}_{а\Sigma}^{(6)}\right]_д, \quad (3)$$

де \mathbf{M}_{α} — матриця з'єднань віток у вузлах дерева схеми.

Для автоматичної реалізації оптимальних коефіцієнтів трансформації необхідно отримати відповідні закони керування, що вимагає встановлення умов однозначності. Ця задача зводиться до задачі формування прийнятих на початку розрахункових умов і може бути розв'язана таким чином [4].

З усіх трансформаторів з РПН, в ЕЕС для керування втратами потужності відбираються (в результаті критеріального аналізу) q таких крос-трансформаторів, які мають найбільший регульований ефект [1, 2]. Якщо тепер розрахункову модель ЕЕС сформувати так, що всі ці q трансформатори будуть знаходитися в хордах базової системи контурів, то

$$\dot{\mathbf{k}}_{\Sigma^*i,j} = 1 - \dot{E}_{\Sigma^*зрi}, \quad i = \overline{1, q}.$$

Вектор оптимальних коефіцієнтів трансформації запишеться таким чином:

$$\dot{\mathbf{k}}_{*\Sigma} = 1 - \boldsymbol{\pi}_{а\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{р\Sigma}} - j \boldsymbol{\pi}_{р\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{а\Sigma}}$$

або

$$\mathbf{k}_{*а\Sigma} = 1 - \boldsymbol{\pi}_{а\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{р\Sigma}}; \quad \mathbf{k}_{*р\Sigma} = -\boldsymbol{\pi}_{р\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{а\Sigma}},$$

де $\mathbf{k}_{*а\Sigma}$, $\mathbf{k}_{*р\Sigma}$ — вектори дійсних та уявних складових коефіцієнтів трансформації у відносних одиницях.

Останній вираз коефіцієнтів трансформації для системи автоматичного керування є законом оптимального керування нормальними режимами ЕЕС. З урахуванням фактору часу вони записуються в такому вигляді [5]:

$$\mathbf{k}_{*а\Sigma}(t) = 1 - \boldsymbol{\pi}_{а\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{р\Sigma}}(t); \quad \mathbf{k}_{*р\Sigma}(t) = -\boldsymbol{\pi}_{р\Sigma}^E \mathbf{J}_{*_{а\Sigma}}(t). \quad (4)$$

Кінцеві розрахункові формули законів оптимального керування трансформаторами з РПН та крос-трансформаторами з урахуванням зведення параметрів ЕЕС до напруги базисного вузла мають вигляд

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{a\Sigma}(t) &= 1 - \left[\mathbf{E}_{зр,a\Sigma}^{(6)} \right]_{\text{д}} \cdot \mathbf{U}_{\text{бд}}^{-1} \cdot \boldsymbol{\pi}_a^E \cdot \mathbf{J}_{*p\Sigma}^E(t); \\ \mathbf{k}_{p\Sigma}(t) &= - \left[\mathbf{E}_{зр,p\Sigma}^{(6)} \right]_{\text{д}} \cdot \mathbf{U}_{\text{бд}}^{-1} \cdot \boldsymbol{\pi}_p^E \cdot \mathbf{J}_{*a\Sigma}^E(t), \end{aligned} \quad (5)$$

де $\mathbf{U}_{\text{бд}}$ — діагональна матриця, кожний елемент якої дорівнює напрузі базисного вузла.

Ці закони покладені в основу функціонування САК [6]. Як видно з (5) вони визначаються неоднорідністю та мірою незбалансованості коефіцієнтів трансформації трансформаторного обладнання ЕЕС. Їх реалізація компенсує з точністю до ступеня регулювання коефіцієнтів трансформації неоптимальність поточкорозподілу в ЕЕС, що викликана неоднорідністю і наближає втрати потужності в ЕЕС до мінімальних.

Як видно з (5), математичний опис законів функціонування САК регульованими трансформаторами є достатньо складним, а їх формування, адаптація та реалізація вимагають істотних витрат машинного часу, особливо, враховуючи необхідність коригування матриці критеріїв подібності у разі істотних змін стану регульованих пристроїв. Необхідні обчислювальні витрати та обсяги передачі інформації можуть бути істотно знижені, якщо на етапі математичного моделювання врахувати умови практичної реалізації розроблених моделей.

Математична модель оптимального керування усталеними режимами ЕЕС

Таким чином, у результаті отримано математичну модель оптимального керування усталеними режимами ЕЕС у часовій області у вигляді лінеаризованої багатомірної системи з зосередженими постійними параметрами.

Е. р. с. в контури вводяться сумісною дією трансформаторів з РПН і КТ. За допомогою КТ вводиться базова частина змінної в часі $E_{*зр}$ е. р. с. $E_{*кт}$, до якої поступово $\Delta E_{*ат}$ додається е. р. с. трансформаторів з РПН. З урахуванням зв'язку між контурними е. р. с. і коефіцієнтами трансформації трансформаторів за певних умов (трансформатори в базовій системі контурів знаходяться в хордах, кількість регульованих трансформаторів дорівнює кількості контурів) можуть бути переписані у вигляді [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}'_{КТ}(t) &= 1 - E''_{*КТ}(t); & \mathbf{k}''_{КТ}(t) &= 1 - E'_{*КТ}(t); \\ \mathbf{k}'_{РПН}(t) &= 1 - E''_{*РПН}(t); & \mathbf{k}''_{РПН}(t) &= 1 - E'_{*РПН}(t), \end{aligned}$$

де $\mathbf{k}'(t)$, $\mathbf{k}''(t)$ — вектори дійсних і уявних складових коефіцієнтів трансформації трансформаторів з РПН і КТ, відповідно.

Висновки

1. Розроблено математичну модель зрівнювальних е. р. с. в електричних системах, яка на відміну від існуючих, містить коефіцієнти трансформації крос-трансформаторів і трансформаторів з РПН, що дає можливість враховувати вплив крос-трансформаторів на зрівнювальні струми з метою зменшення незбалансованих коефіцієнтів трансформації, неоднорідності ЕЕС та наслідки їх взаємовпливу.

2. Отримано критеріальні співвідношення, які пов'язують вектори оптимальних комплексних коефіцієнтів трансформації КТ та параметри поточного режиму ЕЕС через матриці постійних коефіцієнтів (критеріїв подібності).

3. Показано, що отримані критеріальні залежності є законами оптимального керування. За певних умов вони вимагають переформування з урахуванням параметрів крос-трансформаторів і можуть бути використані як закони керування адаптивних САК нормальними режимами ЕЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лежнюк П. Д. Автоматизація керування потоками потужності та напругою в електричних системах на основі теорії подібності / П. Д. Лежнюк, К. І. Кравцов, С. Я. Вишневський // Управління енерговикористанням : зб. доп. / під ред. А. В. Праховнікі. — К. : Альянс за збереження енергії, 2001. — С. 219—224.
2. Астахов Ю. Н. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1990. — № 5. — С. 3—11.
3. Автоматизация управления энергообъединениями / Гончуков В. В., Горнштейн В. М., Крумм Л. А. и др. — М. : Энергия, 1979. — 432 с.
4. Petro Lezhnuk. Optimal control of power flows in electric power systems using theory of similarity / Petro Lezhnuk, Eugene Didichenko, Konstantin Kravtsov // Proceedings of the 5th International Conference on "Development and application systems" (DAS — 2000). — Suceava, Romania : MUSATINII, 2000. — С. 10—15.

5. Лежнюк П. Д. Формування умов самооптимізації електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Н. В. Собчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 3. — С. 49—56.
6. Лежнюк П. Д. Натурно-імітаційне моделювання з використанням критеріального методу в оптимальному керуванні електроенергетичними системами / П. Д. Лежнюк, В. М. Гайдамака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2003. — № 1. — С. 37—41.
7. Автоматизація керування потоками потужності в ЕЕС з використанням крос-трансформаторів та подібності оптимальних режимів [Електронний ресурс] / П. Д. Лежнюк, Жан-П'єр Нгома, А. В. Килимчук // Наукові праці ВНТУ. — 2009. — № 4 — Режим доступу до журн.: http://www.nbv.gov.ua/e-journals/vntu/2009-4/2009-4_ru.files/ru/09pdloms_ru.pdf.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 23.04.2014

Лежнюк Петро Дем'янович — д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, e-mail: lpd@inbox.ru;

Рубаненко Олександр Євгенійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: rubanenko@bk.ru;

Килимчук Антон Володимирович — аспірант кафедри електричних станцій та систем, e-mail: anton_kylymchuk@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

P. D. Lezhniuk¹
O. Ye. Rubanenko¹
A. V. Kylymchuk¹

Optimal control mode of electric network for local ACS considering the systemic effect

¹Vinnitsia National Technical University

The paper considers the problem of optimization EPS regimes, as the problem of automatic control; the ultimate goal is to form solutions of optimal control law modes of electrical networks with regard to the system effect. A mathematical model of optimal control to set the mode of EPS is considered in the paper.

Keywords: cross-transformer, transformer tap changers, like, equalizing EMF heterogeneity.

Lezhniuk Petro D. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electric Power Stations and Systems, e-mail: lpd@inbox.ru;

Rubanenko Oleksandr Ye. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Power Stations and Systems, e-mail: rubanenko@bk.ru;

Kylymchuk Anton V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Stations and Systems, e-mail: anton_kylymchuk@mail.ru.

П. Д. Лежнюк¹
О. Є. Рубаненко¹
А. В. Килимчук¹

Оптимальное управление режимами электрических сетей для локальных САУ с учетом системного эффекта

¹Вінницький національний технічний університет

Рассмотрена задача оптимизации режимов ЭЭС, как задача автоматического управления, конечной целью решения которой является формирование закона оптимального управления режимами электрических сетей с учетом системного эффекта. Рассмотрена математическая модель оптимального управления установившимися режимами ЭЭС.

Ключевые слова: крос-трансформатор, трансформатор с РПН, подобие, уравнительная э. д. с., неоднородность.

Лежнюк Петр Демьянович — д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем, e-mail: lpd@inbox.ru;

Рубаненко Александр Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: rubanenko@bk.ru, тел. (0432)-598377;

Килимчук Антон Владимирович — аспирант кафедры электрических станций и систем, e-mail: anton_kylymchuk@mail.ru, тел. (0432)-598377