

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ В НЕОДНОРІДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ З УРАХУВАННЯМ ЧУТЛИВОСТІ

© Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О. Б., Тетя В. В., 2010

Розглянуто задачу оптимального керування режимами електричних систем, що полягає в оптимізації режимів напруг та перетоків потужності в них для зниження втрат активної потужності.

The problem of electric systems modes optimal control is considered. It consists in optimisation of voltages modes and power flows for active power losses decreasing.

Вступ. Одним з найменш затратних способів підвищення ефективності функціонування електричної системи (ЕС) є оптимальне керування її режимами. Ведення оптимальних режимів може виконуватись диспетчером за результатами прогнозних розрахунків або автоматичних систем керування (АСК) у темпі процесу за даними телеінформаційних систем. Останнє набагато ефективніше, оскільки для формування керувальних впливів використовуються наближені до реальних параметри стану системи. Однак для реалізації такого керування необхідно розраховувати режими ЕС з частотою отримання телеінформації для формування та виявлення доцільності керувальних впливів згідно поставлених задач оптимального керування.

У даній статті розглядається задача оптимального керування режимами ЕС, що полягає в оптимізації режимів напруг та перетоків потужності в них для зниження втрат активної потужності. Для реалізації оптимальних рішень з керування потоками потужності та напругами в ЕС можуть використовуватися автотрансформатори з поздовжньо-поперечним регулюванням. Оскільки їхній вплив на режими ЕС є різним, то для виявлення доцільних керувальних впливів необхідно дослідити міру впливу зміни параметрів регулювальних пристроїв (РП) на критерій оптимальності (втрати активної потужності). Причому, регулювальні пристрої, що мають найменший вплив на перетоки потужності і, відповідно, втрати активної потужності в ЕС, доцільно використовувати для оптимізації режимів напруг у комплексі з використанням пристроїв компенсації реактивної потужності [1]. Пристрої регулювання, що мають значний вплив на перетікання в ЕС, доцільно використовувати для оптимального керування ними з метою зменшення втрат активної потужності. Кількість комбінацій задіяних пристроїв регулювання, за допомогою яких можна забезпечити оптимальний режим, є значною, тому необхідним є застосування принципів та підходів, що дозволяють на етапі формування моделі об'єкту керування забезпечити інваріантність розв'язку.

У статті пропонується використання відомого підходу оптимізації потоків потужності в складнозамкнених електричних мережах за допомогою уведення в замкнені контури зрівнювальних е.р.с. регулювальними пристроями силових трансформаторів [2]. На відміну від [2, 3] запропонована математична модель у матричній формі містить коефіцієнти трансформації в явному вигляді, що дозволяє отримувати вектор оптимальних коефіцієнтів трансформації, базуючись лише на умовно постійних параметрах заступної схеми та інформації про зміни режиму навантаження.

Визначення оптимальних е.р.с. від незбалансованих коефіцієнтів трансформації. У [2, 3] показано, що при роботі неоднорідної мережі з економічним струморозподілом рівняння другого закону Кірхгофа в матричному вигляді має вигляд:

$$\mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{z}}_{\text{в}} \cdot \dot{\mathbf{I}}_{\text{е}} = \dot{\mathbf{E}}_{\text{зр}}, \quad (1)$$

де \mathbf{N} – матриця з'єднань віток у контурах заступної схеми; $\dot{\mathbf{z}}_b$ – діагональна матриця опорів віток; $\dot{\mathbf{I}}_e$ – вектор економічних струмів у вітках заступної схеми; $\dot{\mathbf{E}}_{зр}$ – вектор зрівнювальних е.р.с. у контурах схеми, введення яких забезпечує перехід до економічного струморозподілу.

У контурах, що містять трансформаторні вітки, необхідно виконати приведення параметрів пасивних елементів до однієї напруги (напруги вузла початку контуру – часто базисного вузла) та врахувати е.р.с. у даних вітках. Тоді робота неоднорідної мережі в режимі економічного струморозподілу може бути описана таким рівнянням у матричній формі:

$$\mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{z}}'_b \cdot \dot{\mathbf{I}}_e = \dot{\mathbf{E}}_{зр} + \mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{E}}, \quad (2)$$

де $\dot{\mathbf{z}}'_b$ – діагональна матриця опорів віток з приведенням до напруги базисного вузла; $\dot{\mathbf{E}}$ – е.р.с. у вітках схеми, викликані наявністю трансформаторних зв'язків.

Використовуючи метод урахування коефіцієнтів трансформації трансформаторів у контурній моделі ЕС, описаний в [4], праву частину рівняння (2) можна переписати:

$$\mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{z}}'_b \cdot \dot{\mathbf{I}}_e = \dot{\mathbf{N}}_{кзб} \cdot \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \dot{\mathbf{I}}_e, \quad (3)$$

де $\dot{\mathbf{N}}_{кзб}$ – матриця зв'язків віток у контурах заступної схеми ЕС з урахуванням комплексних збалансованих коефіцієнтів трансформації, що на відміну від матриці з'єднань віток у контурах схеми \mathbf{N} для віток, які входять в i -ий контур містить добутки коефіцієнтів трансформації трансформаторних віток у напрямку обходу цього контуру [4].

Підставивши (3) у (2), отримаємо:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = \dot{\mathbf{N}}_{кзб} \cdot \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \dot{\mathbf{I}}_e - \dot{\mathbf{E}}_k, \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{E}}_k = \mathbf{N} \cdot \dot{\mathbf{E}}$ – вектор контурних е.р.с., що викликані незбалансованими коефіцієнтами трансформації трансформаторних зв'язків.

Отже, задача оптимального керування потоками потужності в такій постановці полягає в коригуванні поточних коефіцієнтів трансформації регульовальних пристроїв з метою введення в замкнені контури додаткових е.р.с. небалансу, рівних за значенням $\dot{\mathbf{E}}_{зр}$, але протилежних за напрямком.

Для переходу від поточного режиму до оптимального необхідно увести в контури схеми е.р.с. небалансу з урахуванням зрівнювальних е.р.с. та поточних коефіцієнтів трансформації:

$$\dot{\mathbf{E}}_{нб} = -(\dot{\mathbf{E}}_k - \dot{\mathbf{E}}_{зр}). \quad (5)$$

Підставивши (4) у (5), отримаємо:

$$\dot{\mathbf{E}}_{нб} = -\dot{\mathbf{N}}_{кзб} \cdot \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \dot{\mathbf{C}}_e \cdot \dot{\mathbf{J}}^B, \quad (6)$$

де $\dot{\mathbf{C}}_e$ – матриця коефіцієнтів струморозподілу для заступної r -схеми; $\dot{\mathbf{J}}^B$ – вектор-стовпець задавальних струмів вузлів схеми.

Слід зазначити, що складова $-\dot{\mathbf{N}}_{кзб} \cdot \dot{\mathbf{z}}_b \cdot \dot{\mathbf{C}}_e$ виразу (6) постійна й не залежить від параметрів режиму, виходячи з таких розрахункових умов [4, 5]:

– у схемі ЕЕС виділяється система базисних контурів;

- кількість регульованих трансформаторів приймається рівною кількості контурів i , відповідно, кількості контурних зрівнювальних е.р.с.;
- система базисних контурів формується так, щоб регульовані трансформатори знаходилися в її хордах.

Визначення оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку. Як відомо, е.р.с. небалансу у відносних одиницях визначається добутком коефіцієнтів трансформації, що входять у контур з урахуванням напрямку його обходу [2, 4, 5]:

$$\dot{E}_{нб*} = 1 - \dot{k}, \quad (7)$$

де $\dot{E}_{нб*} = \dot{E}_{нб} \cdot U_{б}^{-1}$; \dot{k} – вектор добутків коефіцієнтів трансформації, що входять у контур з урахуванням напрямку його обходу.

Для забезпечення однозначності розв'язання задачі оптимізації струморозподілу в ЕС [2, 4] кількість регульованих трансформаторів приймається рівною кількості контурів, тобто решта трансформаторів, що входять у контур є незмінними. Тоді кожен елемент виразу (7) визначається так:

$$\dot{E}_{нб*d} = 1 - \prod_d \dot{k}^{дер} \cdot \dot{k}_d^{хор}, \quad (8)$$

де $\dot{k}_d^{хор}$ – коефіцієнт трансформації регульованого трансформатора, що знаходяться в хорді d -го контуру заступної схеми; $\prod_d \dot{k}^{дер}$ – добуток незмінних коефіцієнтів трансформації трансформаторів d -го контуру заступної схеми, які входять у дерева графа.

Підставивши (6) у (8), отримаємо:

$$-\dot{N}_{кзб} \cdot \dot{z}_в \cdot \dot{C}_e \cdot \dot{J}^в \cdot U_{б}^{-1} = 1 - \dot{k}_{діаг}^{дер} \cdot \dot{k}^{хор} \quad (9)$$

або, після перетворень

$$\dot{k}^{хор} = \dot{k}_{діаг}^{дер}^{-1} \cdot \mathbf{n}_t + \dot{k}_{діаг}^{дер}^{-1} \cdot \dot{N}_{кзб} \cdot \dot{z}_в \cdot \dot{C}_e \cdot \dot{J}^в \cdot U_{б}^{-1}, \quad (10)$$

де $\dot{k}^{хор}$ – вектор-стовпець коефіцієнтів трансформації регульованих трансформаторів, що є хордами контурів графа схеми; $\dot{k}_{діаг}^{дер}$ – діагональна матриця, кожен елемент якої є добутком коефіцієнтів трансформації трансформаторів, що входять у відповідний контур та належать до віток дерева графу; \mathbf{n}_t – одиничний транспонований вектор-рядок.

Вираз (10) складається з параметрів схеми, які не залежать від поточного режиму та за вказаних умов є незмінними.

Уведемо позначення:

$$\alpha = \dot{k}_{діаг}^{дер}^{-1} \cdot \dot{N}_{кзб} \cdot \dot{z}_в \cdot \dot{C}_e \cdot \quad (11)$$

Елементи матриці α мають зміст коефіцієнтів впливу потужностей вузлів на оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів зв'язку. Указані коефіцієнти впливу є незмінними й не залежать від параметрів режиму.

Враховуючи (11), вираз (10), як функція від часу набуде вигляду:

$$\dot{\mathbf{k}}^{\text{хор}}(t) = \dot{\mathbf{k}}_{\text{діаг}}^{\text{дер}}{}^{-1} \cdot \mathbf{n}_t + \alpha \cdot \mathbf{J}^{\text{В}}(t) \cdot U_{\text{б}}^{-1}(t). \quad (12)$$

Вираз (12) дозволяє визначати оптимальні за критерієм мінімуму втрат потужності коефіцієнти трансформації трансформаторів, які розташовані в хордах заступної схеми електричної мережі при зміні задавальних струмів вузлів без перерахунку матриці коефіцієнтів впливу α . Це дозволяє скоротити витрати часу на формування керувальних впливів та їх адаптацію.

Замінивши в (12) $\mathbf{J}^{\text{В}}(t)$ виразом для його визначення $\mathbf{J}^{\text{В}}(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{\mathbf{S}}_{\text{Д}} \bar{\mathbf{U}}_{\text{Д}}^{-1} \mathbf{n}_t$, отримаємо математичну модель оптимальних коефіцієнтів трансформації в координатах потужностей вузлів заступної схеми ЕС:

$$\dot{\mathbf{k}}^{\text{хор}}(t) = \dot{\mathbf{k}}_{\text{діаг}}^{\text{дер}}{}^{-1} \cdot \mathbf{n}_t + \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{\mathbf{S}}_{\text{Д}}(t) \cdot \bar{\mathbf{U}}_{\text{Д}}^{-1}(t) \cdot \mathbf{n}_t \cdot U_{\text{б}}^{-1}(t). \quad (13)$$

Враховуючи характер залежності вузлових напруг $\dot{\mathbf{U}}_{\text{Д}}$ від потужностей у вузлах $\dot{\mathbf{S}}_{\text{Д}}$, задавальні струми $\mathbf{J}^{\text{В}}$ визначаються переважно саме потужностями у вузлах. Отже, коефіцієнти впливу α , що характеризують вплив зміни задавальних струмів на оптимальні коефіцієнти трансформації, можуть використовуватися для аналізу їх чутливості до зміни потужностей у вузлах.

Аналіз чутливості оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку до зміни потужностей у вузлах ЕС. Для ілюстрації ефективності розробленої моделі оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку та аналізу її чутливості до зміни навантажень (генерування) ЕС розраховано матрицю коефіцієнтів впливу потужностей вузлів, а також визначено оптимальні коефіцієнти трансформації для трансформаторів зв'язку. Як приклад використано фрагмент схеми 110-330 кВ (рис.1) ПЗЕС, що містить 8 вузлів, 11 віток та 3 трансформаторних зв'язки.

Використовуючи результати розрахунку нормального усталеного режиму за допомогою програми "ГрафСканер" за законом керування (13) визначено оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів 801-802 та 818-819, що знаходяться в хордах графа заступної схеми:

$$\dot{\mathbf{k}}^{\text{хор}} = \begin{vmatrix} 0,35776 + j0,02574 \\ 0,35109 + j0,01803 \end{vmatrix},$$

за коефіцієнта трансформації в дереві графа $\dot{\mathbf{k}}^{\text{дер}} = 2,874$ (з урахуванням напрямку обходу контура).

У результаті імітації впровадження повздовжньої складової оптимальних коефіцієнтів трансформації отримано зменшення сумарних втрат активної потужності на 7% ($\Delta P_{\text{онм}} = 5,229$ МВт). Зауважимо, що використані пристрої регулювання дозволяють реалізувати лише повздовжню складову оптимального коефіцієнта трансформації. Встановлення у вказаних трансформаторах зв'язку пристроїв поперечного регулювання дозволило б зменшити втрати потужності до $\Delta P'_{\text{онм}} = 4,616$ МВт, тобто на 21,2%.

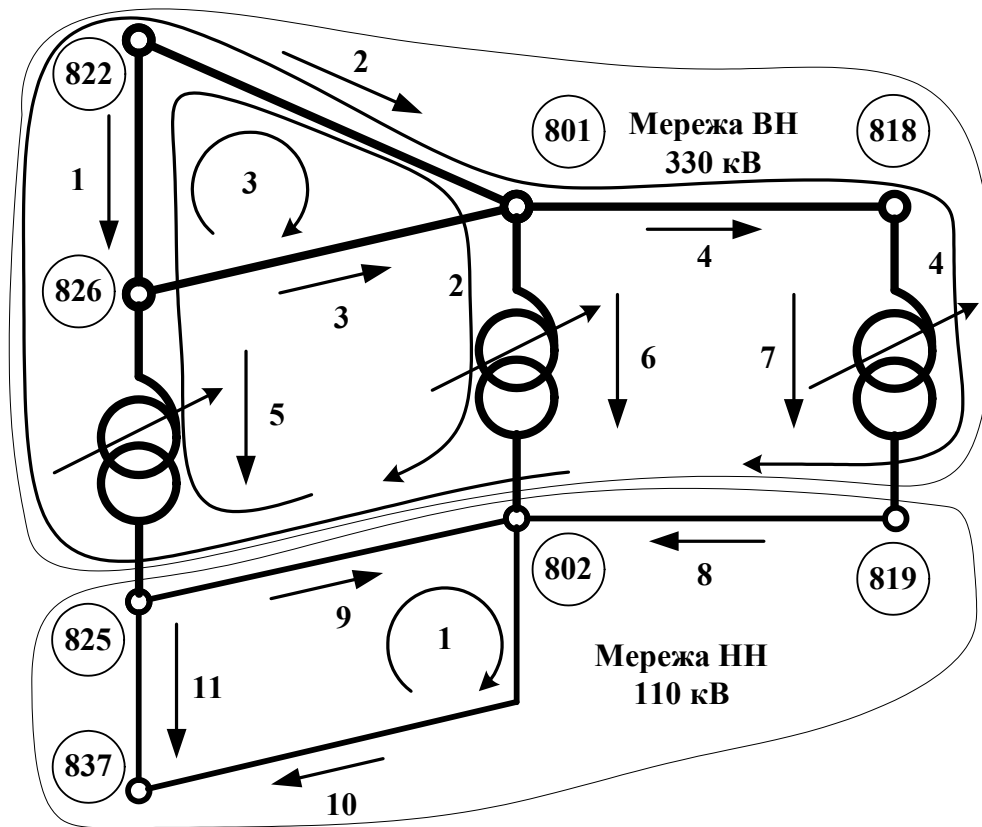


Рис.1 – Фрагмент схеми 110-330 кВ

За виразом (11) визначено матрицю коефіцієнтів впливу потужностей вузлів на оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів зв'язку

$$\alpha = \begin{array}{ccccccc|c} & 801 & 802 & 818 & 819 & 825 & 826 & 837 & \\ \hline & -j0,003 & -j0,003 & -j0,003 & -j0,001 & j0,007 & j0,003 & -j4,701 & 1 \\ & -j0,313 & -j3,18 & -j0,551 & -j0,248 & j9,426 & j0,243 & j2,633 & 2 \\ & -j0,993 & -j0,33 & -j0,992 & -j0,345 & j0,219 & j0,784 & -j0,077 & 3 \\ & -j0,451 & j0,073 & -j4,935 & -j12,029 & j9,759 & j0,371 & j4,539 & 4 \end{array}$$

З аналізу приведеної матриці α видно, що її коефіцієнти містять лише уявну складову. Це пояснюється відсутністю пристроїв поперечного регулювання в розглянутому прикладі.

Найбільший вплив на коефіцієнт трансформації трансформатора зв'язку розташованого в хорді другого контуру (801-802), має зміна навантаження вузла 825 оскільки коефіцієнт $\alpha_{25} = j9,426$ має найбільше значення. Зміна навантаження у вузлі 825 на $100 + j61.974$ МВА призводить до необхідності виконання трьох перемикань у бік зменшення коефіцієнта трансформації РП 801-802 для введення режиму в область оптимальності.

Збільшення або зменшення навантаження у 801 вузлі практично не впливає на оптимальність поточкорозподілу тому в зміні коефіцієнтів трансформації не має потреби. Даний висновок підтверджується значенням коефіцієнту $\alpha_{21} = -j0,313$ який є близьким до нуля.

Аналогічно досліджено вплив зміни потужності у вузлах 825, 819 та 801 на оптимальний коефіцієнт трансформації РП трансформатора 818-819.

Збільшення навантаження у 819 вузлі призводить до необхідності виконання п'яти перемикань на РП 818-819 у бік збільшення коефіцієнту трансформації, однак не впливає на

оптимальний коефіцієнт трансформації РП трансформатора 801-802. Це підтверджується значеннями коефіцієнтів, відповідно, $\alpha_{44} = -j12,029$ та $\alpha_{24} = -j0,248$.

Таким чином, отримані результати підтверджують ефективність приведеної математичної моделі як для визначення оптимальних коефіцієнтів трансформації так і для аналізу їх чутливості. Коефіцієнти матриці впливу α дають можливість кількісної оцінки чутливості оптимальних коефіцієнтів трансформації до зміни навантаження у вузлах та одночасно вказують на напрямок перемикачів.

Висновки. 1. Запропонована математична модель оптимальних за критерієм мінімуму втрат потужності коефіцієнтів трансформації трансформаторів ЕС, що містить матрицю умовно постійних коефіцієнтів впливу, дозволяє визначати оптимальні коефіцієнти трансформації за мінімальної кількості обчислень. Це має важливе значення для реалізації оптимального керування потоками потужності в темпі процесу.

2. Аналіз чутливості оптимальних рішень в задачах керування потужністю в ЕС на підставі запропонованого підходу дозволяє обґрунтовано зменшити необхідну кількість контрольованих вузлів, залишивши у переліку такі, що мають найбільший вплив на оптимальні параметри регулювальних пристроїв.

3. Елементи матриці коефіцієнтів впливу вузлів ЕС на оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів зв'язку дозволяють визначати перелік вузлів, зміна параметрів яких спричиняє найменший вплив на втрати активної потужності. Це може бути використано під час планування заходів з розвитку ЕС.

1. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. *Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. Монографія.* – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.

2. Холмский В.Г. *Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности // Электричество.* – 1965. – №9. – С. 16–21.

3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Баженов В.А. *Оптимизация режимов электрических сетей.* – К.: Наукова думка, 1992. – 216 с.

4. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Кравцов К.І. *Моделювання та формування умов самооптимізації режимів електроенергетичної системи // Технічна електродинаміка / Тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки, ч.3.* – 2002. – С. 96–101.

5. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Оболонский Д.И. *Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов // Электричество.* – 2007. – №11. – С. 2–8.