

П. Д. Лежнюк¹
 О. Є. Рубаненко¹
 А. В. Килимчук²

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ ВЗАЄМВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ДОПОМОГОЮ КРОС-ТРАНСФОРМАТОРА

¹Вінницький національний технічний університет;
²Публічне акціонерне товариство «Рівнеобленерго»

Розглянуто задачу зменшення додаткових втрат активної потужності викликаних взаємними та транзитними перетоками потужності електричної мережі, шляхом визначення оптимального місця встановлення крос-трансформатора та його кута в мережах нижчої напруги на прикладі тестової схеми IEEE 230/138 кВ. Оцінено техніко-економічний ефект встановлення крос-трансформатора в електричну мережу.

Ключові слова: крос-трансформатор, втрати активної потужності, неоднорідність, узагальнений показник неоднорідності, втрати електроенергії, техніко-економічний ефект.

Вступ

Через взаємовплив електричних мереж і втрат потужності від транзитних потоків виникають задачі визначення в них додаткових втрат потужності та електроенергії. Результати розв'язання цих задач використовуються для аналізу та оцінювання взаємовпливу електричних мереж і впливу транзитних перетоків на режими, зокрема на втрати в мережах вищих напруг (ВН) і нижчих напруг (НН). Відповідно до значення цих втрат розробляються заходи для досягнення їх оптимальних значень.

За паралельної роботи мереж ВН та НН струми з віток ВН витісняються у вітки НН і зростають втрати в мережі НН, а також перевантажуються лінії електропередач мереж НН та комутаційні апарати [1—4]. Враховуючи, що за паралельної роботи мереж ВН та НН втрати збільшуються в мережі НН, розв'язується задача

$$\Delta P_{\text{НН}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де \mathbf{x} — параметри режиму електричної мережі; \mathbf{u} — параметри регулювальних пристроїв (коефіцієнти трансформації трансформаторів з РПН, вольтододаткових трансформаторів, кути крос-трансформаторів (КТ)).

Дослідження міри впливу взаємних і транзитних перетоків потужності на рівень втрат потужності та електроенергії є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить контролювати та оцінювати вплив перетоків потужності мереж ВН на додаткові втрати в мережах НН, а також аналізувати наслідки взаємовпливу електричних мереж. Розв'язання цієї задачі розглянуто в низці робіт вітчизняних і закордонних вчених. Ними розроблено методи визначення втрат від транзитних перетоків в електричних мережах і засоби їх зменшення. Проте ці методи не повністю відповідають сучасним умовам і потребують розвитку та вдосконалення. Одним із можливих напрямків вдосконалення методів і засобів оптимізації потоків потужності та зменшення додаткових втрат в електричних мережах є використання залежності їх від неоднорідності паралельно працюючих електричних мереж.

Компенсація неоднорідності електричних мереж і зменшення додаткових втрат електроенергії в них можлива шляхом введення в контури електрорушійної сили лінійними регуляторами типу крос-трансформаторів [5—7] та трансформаторами з РПН. Дія КТ та трансформаторних зв'язків, які об'єднують електричні мережі різних напруг, може бути направлена на зменшення втрат електроенергії під час її транспортування шляхом перерозподілу природних потоків електричної потужності і

примусового наближення їх до потокорозподілу в однорідній електричній мережі [8—9].

Метою роботи є визначення оптимального місця встановлення КТ та його оптимального кута, а також розрахунок техніко-економічного ефекту використання запропонованого лінійного регулятора.

Визначення оптимального місця встановлення КТ за мінімумом втрат потужності

Виконано обчислювальний експеримент на прикладі тестової схеми електричної мережі IEEE 230/138 кВ, що містить 23 вузли та 33 вітки (рис. 1). Вибір оптимальної вітки для встановлення крос-трансформатора та кута КТ здійснено відповідно до добового графіка навантаження (рис. 2). Визначення оптимальної вітки для встановлення КТ проведено за узагальненим показником неоднорідності.

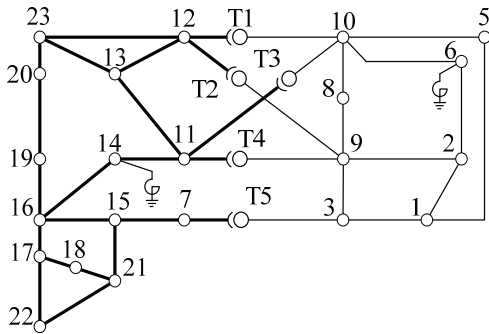


Рис. 1. Тестова мережа IEEE 230/138 кВ на 23 вузли

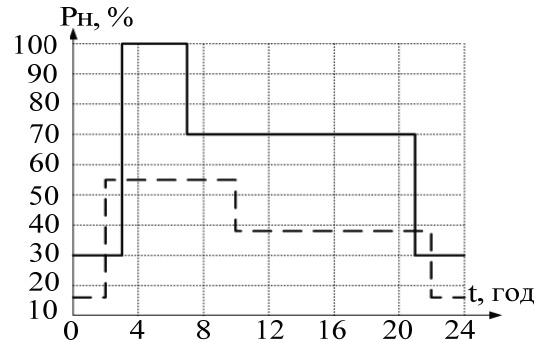


Рис. 2. Добовий графік навантажень: — зима; - - - літо

Для того, щоб визначити оптимальне місце встановлення КТ, визначається матриця показників неоднорідності, в якій враховується неоднорідність кожної вітки $\mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1}$ і коефіцієнти трансформації трансформаторів з РПН та КТ [8, 10]:

$$\gamma = \mathbf{k}_{\text{КТ+РПН}} \left(\mathbf{M}_t^- \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t^- \right) + \left(\mathbf{M}_t^+ \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t^+ \right), \quad (2)$$

де \mathbf{M}_t^+ — матриця, яка містить фрагмент матриці з'єднань, елементами якої є нулі та одиниці зі знаком «+»; \mathbf{M}_t^- — та ж матриця, але її елементами є нулі та одиниці зі знаком «-»; $\mathbf{k}_{\text{КТ+РПН}}$ — діагональна матриця коефіцієнтів трансформації КТ $\mathbf{k}_{\text{КТ}}$ (якщо в i -й вітці КТ відсутній, то i -й діагональний елемент $k_{i,i} = 0 \cdot j$, де $j = \sqrt{-1}$) та коефіцієнтів трансформації трансформаторів з РПН ($\mathbf{k}_{\text{РПН}}$) (якщо в i -й вітці трансформатор з РПН відсутній, то i -й діагональний елемент $k_{i,i} = 1$); \mathbf{x}, \mathbf{r} — реактивна і активна складові матриці вузлових опорів; $\mathbf{x}_B, \mathbf{r}_B$ — реактивна і активна складові матриці опорів віток.

Оптимальною віткою для встановлення КТ буде та, яка є найвпливовішою на узагальнений показник неоднорідності $|\gamma|$, який визначається як евклідова норма матриці γ

$$|\gamma|_{i=1,2, \dots, m} = \left[\sqrt{\sum_{j_1=1}^n \gamma_{i,j_1}^2} \right]_{i=1,2, \dots, m}, \quad (3)$$

де m — кількість віток електричної мережі; n — кількість вузлів електричної мережі; j_1 — порядковий номер вузла електричної мережі ($j_1 \in \{1, 2, \dots, n\}$); i — порядковий номер вітки електричної мережі ($i \in \{1, 2, \dots, m\}$).

Найбільші значення оцінок впливу параметрів окремих віток на значення узагальненого показника неоднорідності мережі IEEE 230/138 кВ показані на рис. 3.

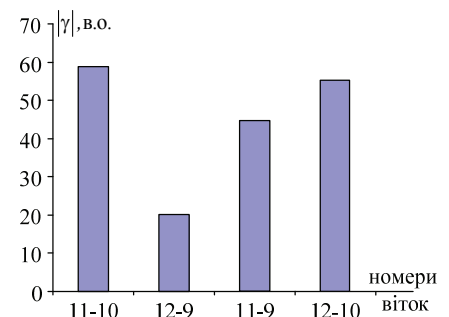


Рис. 3. Оцінки впливу параметрів окремих віток на значення показника неоднорідності тестової електричної мережі IEEE 230/138 кВ

Як видно з рис. 3, в першу чергу КТ необхідно встановити у вітці 11—10 зі сторони НН.

Визначення оптимального кута КТ та вплив його на втрати електроенергії

Для визначення оптимального кута КТ у визначеній вітці, необхідно за мінімальними значеннями втрат активної потужності для кожної сходинки добового графіка навантаження знайти кути КТ. Для реалізації оптимального струморозподілу в мережі НН необхідно вводити в контури зрівнювальні е.р.с. Їх введення здійснюється за допомогою трансформаторів з РПН та КТ, який встановлений у попередньо вибрану вітку. Для досягнення однозначності зв'язку зрівнювальних е.р.с. з коефіцієнтами трансформації, е.р.с. визначаються для системи базисних контурів. Причому система базисних контурів формується так, щоб трансформаторні вітки з КТ знаходилися в її хордах. Тоді для i_l -го контуру, в якому встановлено трансформатор з поздовжнім регулюванням коефіцієнта трансформації і КТ, коефіцієнт трансформації трансформатора та кут КТ будуть мати вигляд

$$k_{i_l} = 1 - E_{*зрр i_l}^*, \quad (4)$$

$$\delta_{i_l} = \arctg \left(-\frac{E_{*зпа i_l}^*}{1 - E_{*зрр i_l}^*} \right), \quad (5)$$

де $E_{*зпа i_l}^*$, $E_{*зрр i_l}^*$ — активна і реактивна складові відносних значень зрівнювальної е.р.с. i_l -го контуру, які є відношенням їх значень до напруги базисного вузла; k_{i_l} — коефіцієнт трансформації трансформатора, що входить в i_l -й контур; δ_{i_l} — фазозсувний кут КТ i_l -го контуру.

Так як добовий графік (див. рис. 2) має 6 сходинок (зима, літо), то, відповідно, отримано 6 кутів для КТ. Однак, для зменшення собівартості та умов експлуатації лінійного регулятора, необхідно знайти один оптимальний кут КТ. Тобто КТ з таким кутом повинен вводитись в роботу або шунтуватись (виводитись) за допомогою вимикачів залежно від режимів мережі.

Але, якщо проводити вибір оптимального кута КТ (δ) за мінімальним значенням втрат активної потужності, то зі зміною графіка навантаження може змінюватись оптимальне значення кута КТ. Отже, оптимальний δ вибирається за критерієм мінімальних річних втрат електроенергії. Для цього переходимо від розглянутих добових графіків навантаження до річного графіка навантаження за тривалістю. Розрахунок режиму проводиться з урахуванням оперативних перемикачів (введенням або виведенням КТ) протягом року. За результатами розрахунку режимів будуються залежності різниці втрат електроенергії при введеному та виведеному КТ. Для прикладу на рис. 4 показано таку залежність.

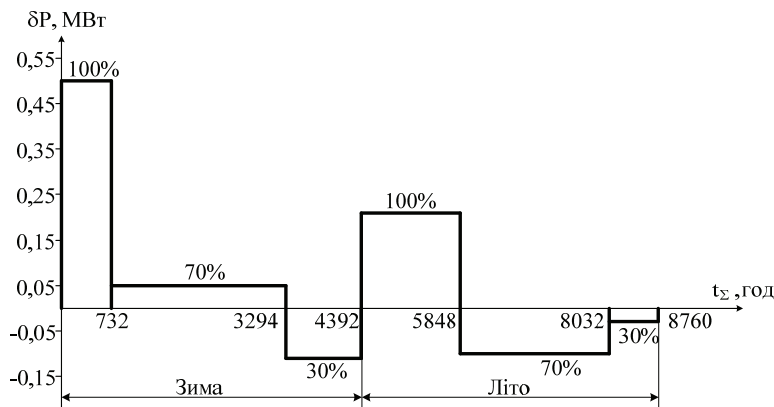


Рис. 4. Графік залежності різниці втрат електроенергії за рік, коли $\delta = 0,048$ рад

На рис. 4 ширина стовпчиків відповідає річній тривалості зменшень втрат електроенергії (відповідно до добового графіка навантажень) у зимовому та літньому режимах роботи електричної мережі. Висота стовпчика діаграми відповідає значенню економії потужності за використання КТ. Від'ємні значення втрат потужності свідчать про необхідність вимкнення КТ. Інакше його використання в запропонованій вітці та з заданим δ замість зменшення втрат електроенергії приведе до їх зростання. Для визначення оптимального δ додаються всі різниці втрат енергії і отримуються зменшення втрат енергії за рік ($\Sigma\delta W$). З табл. видно, що найбільше зменшення річних втрат електро-

енергії очікується, коли у вітку 11—10 встановлюється крос-трансформатор з $\delta = 0,036$ рад.

Значення зменшення втрат енергії за рік

Оптимальний δ , рад	Зменшення втрат енергії, $\Sigma\delta W$, МВт·год
0,048	6657,6
0,036	<u>10687,2</u>
0,015	5869,2
0,030	5256,0
0,020	8847,6
0,010	4642,8

Як впливає з результатів розрахунків, встановлення КТ значно поліпшує роботу електричної мережі, а саме зменшуються втрати електроенергії, зменшується кількість перемикачів РПН трансформаторів, а в деяких випадках і взагалі їх не потрібно робити. Враховуючи той факт, що електрообладнання застаріле, РПН деяких трансформаторів не працюють або подальше регулювання напруги фізично неможливе, то використання КТ вирішує значну частину проблем електричної мережі.

Техніко-економічна ефективність використання крос-трансформаторів

Розрахуємо техніко-економічний ефект встановлення КТ в мережу НН на прикладі розглядуваної схеми. Показник загальної економічної ефективності капіталовкладень (Е) визначається як відношення прибутку (П) до капітальних вкладень (рентабельності) (К).

$$E = \frac{P}{K} \quad (6)$$

Відповідно до постанови № 2653 від 28.10.2015 р. «Про затвердження прогнозованої оптової ринкової ціни на листопад 2015 року», національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг затвердила на листопад 2015 року прогнозовану оптову ринкову ціну електричної енергії 1178,08 грн за 1 МВт·год (без ПДВ).

З табл. 1 економія електроенергії за рік за встановленого КТ в мережу НН складає 10687,2 МВт·год звідси прибуток для енергопостачальної компанії становитиме

$$P = 10687,2 \cdot 1178,08 = 12590376,576 \text{ грн.}$$

Вартість КТ потужністю 120 МВА беремо, враховуючи особливості його виконання та монтажу, як збільшену в 1,5 рази вартість трансформатора 110/ НН потужністю 125 МВА, що складає приблизно 27 млн грн (запропонована ціна компанією ТОО SKALA GROUP (Павлодар)), тому приблизна вартість КТ складає 40 млн грн.

Отже, рентабельність КТ

$$P = \frac{K}{\Pi} = \frac{40000000}{12590376,576} = 3,2 \text{ (роки).}$$

Розрахунок техніко-економічної ефективності встановлення КТ в мережі 138 кВ тестової схеми ПЕЕЕ, показав, що крос-трансформатори відносно дешеві, а розрахунковий строк окупності реконструкції підстанції 110 кВ складає 3,2 роки.

Висновки

1. Під час паралельної роботи мереж ВН і НН через їх неоднорідність в мережах НН виникають додаткові втрати потужності. Для зменшення цих втрат може бути встановлений крос-трансформатор у вітку електричної мережі НН. В процесі експлуатації виникає необхідність щодо зміни кута КТ або тимчасового вимкнення та шунтування КТ. Оскільки основний ефект від встановлення крос-трансформатора спостерігається в мережі НН, то має бути забезпечений доступ до КТ власнику цієї мережі. Найкраще це можна забезпечити тоді, коли крос-трансформатор встановлений з боку мережі НН.

2. Застосування крос-трансформаторів з оптимальним кутом у вітці, знайденій за запропонованим методом визначення оптимального місця розташування КТ, дозволяє зменшити як втрати потужності в мережах НН, так і сумарні втрати потужності в електричній мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сулейманов В. М. Электрические сети и системы / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — 456 с.
2. Wide-Area Monitoring, Protection and Control of Future Electric Power Networks / [V. Terzija, V. Valverde, G. Deyu Cai, and others] // Proceedings of the IEEE. — 2011. — Vol. 99, Issue 1. — P. 80—93.
3. Jakushokas, R. Power Network Optimization Based on Link Breaking Methodology / R. Jakushokas, E. G. Friedman // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. — 2013. — Vol. 21, Issue 5. — P. 983—987.
4. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / Василий Григорьевич Холмский. — М. : Высшая школа, 1975. — 280 с.
5. Кулаков А. В. Кросс-трансформаторная технология оптимизации потоков передачи и распределения энергии в сетях 110—765 кВ и ее технико-экономическое обоснование [Электронный ресурс] / А. В. Кулаков, М. В. Ольшванг, Д. А. Савкин // Электротехника 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии : VII Симпозиум. : сб. докл. — М. : ВЭИ-ТРАВЕК, 2003. — С. 1—6. — Режим доступа : <http://mvo.ipc.ru/KrossTranTe/KrossTranTe.htm>.
6. Ступенчато-регулируемые фазосдвигающие автотрансформаторы как средство оптимизации потокораспределения в электрических сетях / М. В. Ольшванг, Е. И. Остапенко, Г. А. Кузнецова, Е. К. Лоханин // Электротехника 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии : VII Симпозиум. : сб. докл. — М. : ВЭИ-ТРАВЕК, 1997. — С. 1—6.
7. Ольшванг М. В. Особенности кросс-трансформаторной технологии транспортирования энергии по сетям 110—765 кВ / М. В. Ольшванг // Электро. — 2004. — № 2. — С. 6—12.
8. Лежнюк П. Д. Зменшення додаткових втрат електроенергії в неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Вісник Хмельницького національного університету. — 2013. — № 5. — С. 194—201. — (Технічні науки).
9. Рубаненко О. Є. Крос-технології як засіб оптимізації потоків потужності в електричних мережах / О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук // Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах : IV Міжнарод. наук.-техн. конф. : матер. конфер. — Луцьк—Шацкі озера, 2012. — С. 119—122.
10. Kylymchuk A. Reduction of Additional Losses of Electric Energy in Parallel Operating Non-Uniform Electrical Grids Taking into Account Non-Uniformity and Sensitivity [Electronic resource] / A. Kylymchuk, P. Lezhnyuk, O. Rubanenko // International Journal of Energy Policy and Management. — 2015. — № 1 (1). — P. 1—5. — Mode of access : <http://article.aascit.org/file/html/8950726.html>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 8.04.2016

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.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Килимчук Антон Володимирович — канд. техн. наук, заступник начальника служби релейного захисту та автоматики, e-mail: anton_kylymchuk@mail.ru.

Публічне акціонерне товариство «Рівнеобленерго», Рівне

P. D. Lezhniuk¹
O. Ye. Rubanenko¹
A. V. Kylymchuk²

Practical Implementation of Optimal Control Power Flux Mutual Payment of Electric Networks with Cross-Transformer

¹Vinnitsia National Technical University;

²Public joint stock company «Rivneoblenergo»

There has been considered the problem of reducing the additional active power losses caused by mutual and transit overflows of power mains, by determining the optimal location of the cross angle of the transformer and its networks at download an example test circuit IEEE 230/138 kV. The technical and economic effect of setting a cross-transformer to the electric grid has been estimated.

Keywords: cross-transformer active power losses, heterogeneity, generalized index of heterogeneity, loss of electricity, technical and economic effect.

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

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

Kylymchuk Anton V. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Manager of Service of Relaying and Automation, e-mail: anton_kylymchuk@mail.ru

П. Д. Лежнюк¹
А. Е. Рубаненко¹
А. В. Килимчук²

Практическая реализация оптимального управления потоками мощности для компенсации взаимовлияния электрических сетей при помощи кросс-трансформатора

¹Винницкий национальный технический университет;

²Публичное акционерное общество «Ровнооблэнерго»

Рассмотрена задача уменьшения дополнительных потерь активной мощности, вызванных взаимными и транзитными перетоками мощности электрической сети, путем определения оптимального места установки кросс-трансформатора и его угла в сетях меньшей загрузки на примере тестовой схемы ИЭЭЭ 230/138 кВ. Рассчитан технико-экономический эффект установки кросс-трансформатора в электрическую сеть.

Ключевые слова: кросс-трансформатор, потери активной мощности, неоднородность, обобщенный показатель неоднородности, потери электроэнергии, технико-экономический эффект.

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

Рубаненко Александр Евгениевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: rubanenko@bk.ru;

Килимчук Антон Владимирович — канд. техн. наук, заместитель начальника службы релейной защиты и автоматики, e-mail: anton_kylymchuk@mail.ru