

УДК 621.311.161

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; Жан-П'єр Нгома, к. т. н., доц.; А. В. Килимчук
АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ПОТУЖНОСТІ В ЕЕС З
ВИКОРИСТАННЯМ КРОС-ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА ПОДІБНОСТІ
ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ

У роботі розглянуто задачу поперечно-поздовжнього регулювання потоками потужності і напруги в електричних мережах з використанням крос-трансформаторів та автотрансформаторів як задачу автоматичного керування, кінцевою метою розв'язання якої є формування закону оптимального керування і створення відповідної системи автоматичного керування. Поставлена задача розв'язується на основі подібності оптимальних режимів ЕЕС і з використанням критеріальних співвідношень між їх параметрами.

Ключові слова: поперечно-поздовжнє керування, потоки потужності, крос-трансформатор, автотрансформатор, подібність.

Вступ

З погляду на складність електроенергетичної системи (ЕЕС) як об'єкта керування та на її особливості режимного характеру, очевидно, що відслідковувати і змінювати оптимальні значення параметрів стосовно до станів ЕЕС можливо тільки з допомогою систем автоматичного керування (САК) відповідними регулювальними пристроями (РП). Як РП можуть бути використані крос-трансформаторні технології, які інтенсивно розвиваються у ФСК Російської Федерації і мають ряд переваг від інших РП [1]. У даній роботі на підставі встановлених в [2, 3] закономірностей розглядається функціонування САК потоками потужності і напругою в складі системи оптимального керування нормальними режимами (НР) ЕЕС з імітаційною моделлю [4].

В даній статті задача оптимізації режимів ЕЕС ставиться як задача автоматичного керування, кінцевою метою розв'язання якої є формування закону оптимального керування потоками потужності, в тому числі транзитними, і створення відповідної САК.

Керування потоками потужності в ЕЕС

Електричні мережі енергопостачальних компаній працюють паралельно, тому зміни в режимі роботи однієї мережі впливають на стан в інших (рис. 1). Тобто спостерігається взаємовплив режимів електричних мереж. Наслідком неоптимальності такого взаємовпливу є додаткові втрати електроенергії, які зменшують економічну ефективність енергопостачальних компаній. Значення додаткових втрат залежить від міри неоднорідності електричних мереж вищої напруги (ВН) та нижчої напруги (НН).

Основним та найменш витратним засобом зменшення неоднорідності є використання існуючих РП трансформаторів та автотрансформаторів зв'язку (АТ). За рахунок різних значень коефіцієнтів трансформації АТ в мережах виникає деякий зрівнювальний струм $I_{зр}$, який компенсує викликаний неоднорідністю ЕЕС струм небалансу $I_{нб}$. У реальних ЕЕС з використанням АТ зв'язана низка проблем. Основні з них – це недостатній регулювальний діапазон, необхідний для компенсації негативного впливу неоднорідності, та незадовільний технічний стан пристроїв РПН. Іншими словами, за допомогою АТ з РПН можна тільки частково компенсувати неоднорідність ЕЕС. Задача суттєво ускладнюється тоді, коли ЕЕС є транзитером електроенергії. У цьому випадку на власні потоки накладаються транзитні, якими необхідно керувати для зменшення втрат в ЕЕС.

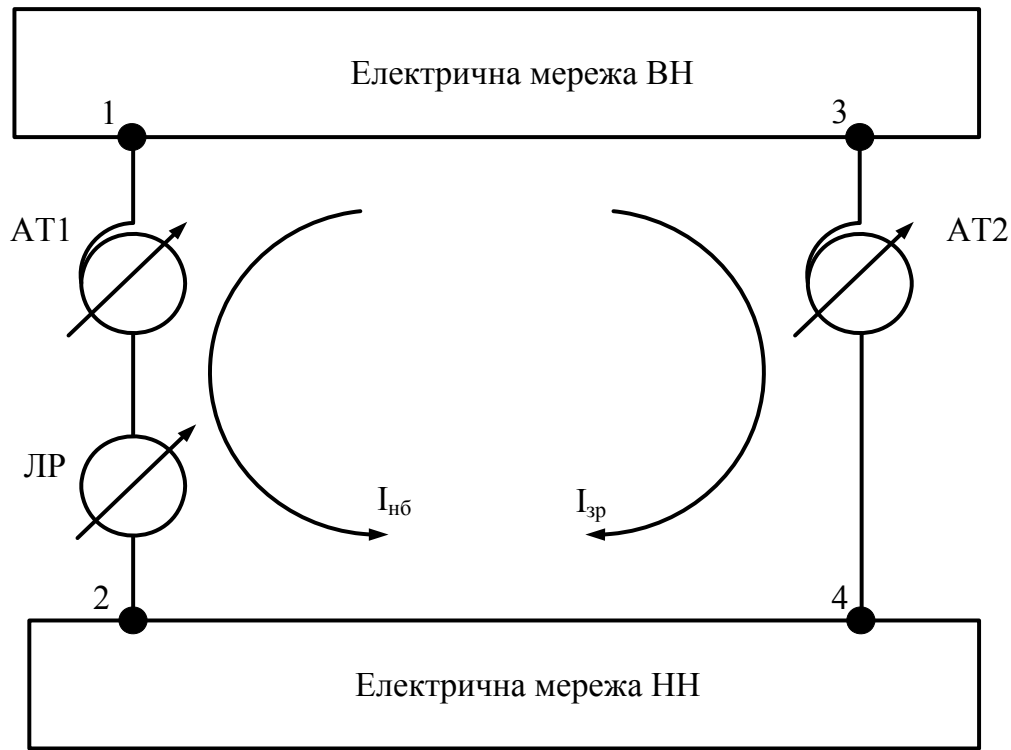


Рис. 1. Структурна схема паралельно працюючих електричних мереж

Для розширення регулювальної спроможності АТ пропонується послідовно з ними встановлювати лінійні регулятори (ЛР), в якості яких можуть бути крос-трансформатори (КТ). У системі регулювання потоками потужності КТ виконують роль регуляторів, якими оптимізуються відносно стабільні, глибокі потоки небалансу. АТ з РПН використовуються для компенсації відносно невеликих збурень в ЕЕС, викликаних змінами навантаження споживачів електроенергії і генерування на електричних станціях. Таким чином виникає задача узгодження дій КТ і АТ з РПН.

Дія розглядуваних тут 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. Ця задача може бути віднесена до класу задач теорії керування динамічними системами з квадратичним критерієм оптимальності (наприклад, втрати активної потужності):

мінімізувати

$$F(u) = \int_{t_0}^{t_k} [x_t(t)Qx(t) + u_t(t)Ru(t)]dt \quad (1)$$

у просторі станів

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) + Bu(t); & x(t_0) &= x_0; \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де $x(t)$, $u(t)$, $y(t)$ – відповідно вектори стану, керування і спостереження; A , B , C , D , Q , R – матриці постійних коефіцієнтів; t_0 , t_k – початок і кінець інтервалу часу; x_0 – початкове значення вектора стану.

У даній моделі

$$u(t) = \begin{bmatrix} \dot{k}_{am}(t) \\ \dot{k}_{km}(t) \\ Q(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{S}_e(t) \\ \dot{I}_e(t) \\ \dot{U}(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\dot{k}_{am}(t)$, $\dot{k}_{km}(t)$ – вектори комплексних коефіцієнтів трансформації АТ і КТ; $Q(t)$ – вектор навантаження джерел реактивної потужності (ДРП); $\dot{S}_e(t)$, $\dot{I}_e(t)$ – вектори потужностей і струмів у вітках ЕЕС, де здійснюються телевимірювання; $\dot{U}(t)$ – вектор напруг у вузлах.

Перше рівняння в (2) є рівнянням стану системи, розв'язок якого задовольняє початковій умові $x_0 = x(t_0)$ і дає вектор стану $x(t) = \psi[x(t_0), u(t)]$. Друге рівняння в (2) визначає вихідні параметри в залежності від $x(t)$ і $u(t)$.

Задача оптимального керування потоками потужності в ЕЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення F^* у встановленій зоні нечутливості δF^* (див. рис. 2) (* означає, що керування здійснюється у відносних одиницях, де за базис прийнято оптимальні значення параметрів) [3]. Для цього при виході з неї здійснюються керувальні впливи трансформаторами. З рис. 2 видно роль КТ в системі керування. Без КТ всі дії по введенню критерію оптимальності F в зону оптимальності здійснюються АТ, що призводить до великої кількості перемикань пристроїв РПН. За допомогою КТ вводяться незмінні е.р.с., які корегують потоки потужності таким чином, що значення критерію оптимальності F наближається до мінімуму, віддаляючись від границь області оптимальності. У результаті кількість перемикань РПН АТ зменшується.

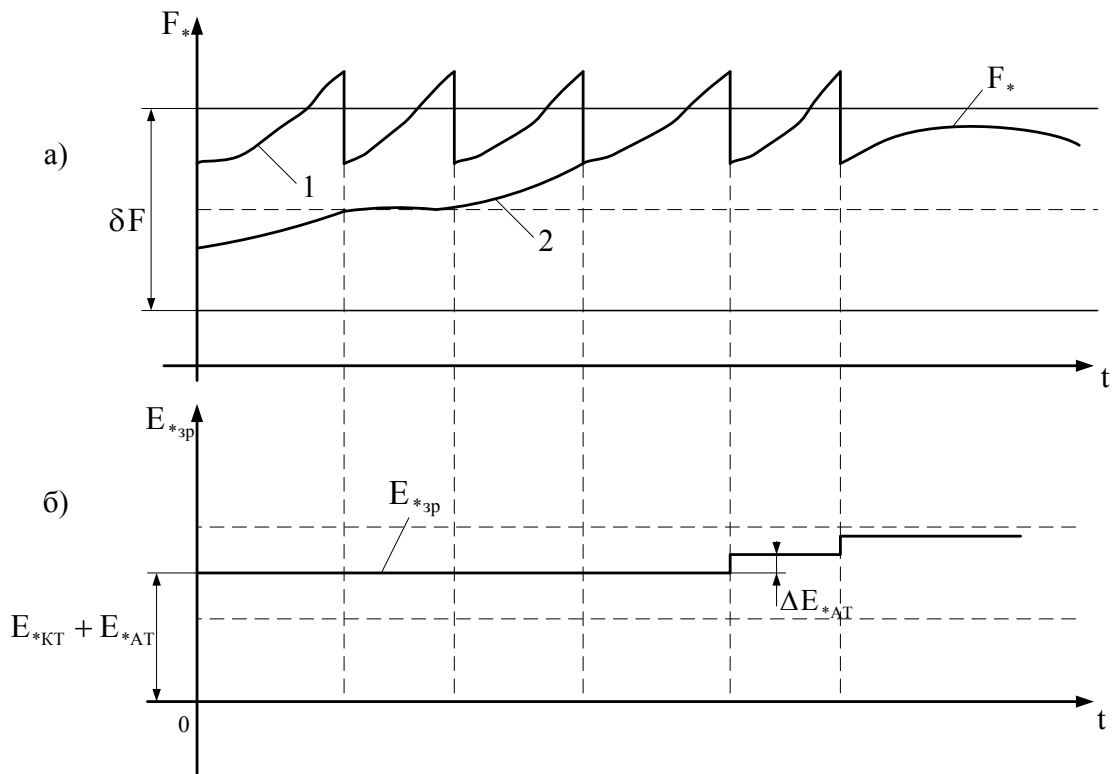


Рис. 2. Зміна: а) критерію оптимальності без КТ (крива 1) і з КТ (крива 2); б) відповідної зрівнювальної е. р. с.

Для підвищення ефективності керування потоками потужності в ЕЕС з метою зменшення втрат потужності необхідно виявляти реальні можливості трансформаторів з РПН, оцінюючи чутливість втрат потужності до змін коефіцієнтів трансформації [5]. Для підвищення ефективності використання трансформаторів з РПН в ЕЕС при формуванні керуючих Наукові праці ВНТУ, 2009, № 4

впливів необхідно також враховувати їх технічний стан та залишковий ресурс. З врахуванням сказаного в задачі оптимізації режиму ЕЕС критерій оптимальності може бути встановлено такий [6]:

$$F = \Delta P + P(\omega) + \sum_{i=1}^q \text{Ш}_{mi}, \quad (4)$$

де ΔP – сумарні втрати активної потужності в ЕЕС; $P(\omega)$ – потужність, еквівалентна збитковій внаслідок недовідпуску електроенергії, який викликаний відмовами трансформаторів, зокрема відмовами пристроїв РПН; Ш_{Ti} – штрафна функція, що вводиться для врахування ресурсу трансформаторів, в тому числі перемикачів пристроїв РПН; q – кількість трансформаторів, які регулюються.

Математична модель і закон оптимального керування

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

$$E_{* \text{ зра}}^e(t) = \pi_a^e J_{* p}^e(t), \quad E_{* \text{ зpp}}^e(t) = \pi_p^e J_{* a}^e(t), \quad (5)$$

де $E_{* \text{ зра}}^e(t)$, $E_{* \text{ зpp}}^e(t)$ – вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівнювальних е. р. с., якими вводяться зрівнювальні струми $I_{\text{зр}}$; $J_{* a}^e(t)$, $J_{* p}^e(t)$ – вектори активних і реактивних складових відносних значень струмів у вузлах; π_a^e, π_p^e – матриці критеріїв подібності.

Матриці критеріїв подібності визначаються за формулами [3]:

$$\pi_a^e = -[E_{\text{зpa}}^{\delta}]_b^{-1} \nu r_a M_a^{-1} [J_p^{\delta}]_b; \quad \pi_p^e = [E_{\text{зpp}}^{\delta}]_b^{-1} \nu r_p M_p^{-1} [J_a^{\delta}]_b, \quad (6)$$

де $\nu = N_a x_{\text{вa}} r_{\text{вa}}^{-1} - x_{\text{к}} r_{\text{к}}^{-1} N_a$ – матриця системних показників неоднорідності ЕЕС; $r_{\text{в}}$, $x_{\text{в}}$ – діагональні матриці опорів віток; $r_{\text{к}}$, $x_{\text{к}}$ – діагональні матриці опорів контурів; M_a , N_a – матриці з'єднань віток у вузлах і контурах дерева схеми.

Е. р. с. в контури вводяться сумісною дією АТ і КТ. За допомогою КТ вводиться базова частина змінної в часі $E_{* \text{зр}}^e$ е. р. с. $E_{* \text{кт}}^e$, до якої ступенями $\Delta E_{* \text{ат}}$ додається е.р.с. АТ.

З врахуванням 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) (5) можуть бути переписані у вигляді [3]:

$$k'_{\text{км}}(t) = 1 - E''_{* \text{км}}(t), \quad k''_{\text{км}}(t) = -E'_{* \text{км}}(t), \\ k'_{\text{ам}}(t) = 1 - E''_{* \text{ам}}(t), \quad k''_{\text{ам}}(t) = -E'_{* \text{ам}}(t), \quad (7)$$

де $k'(t)$, $k''(t)$ – вектори дійсних і уявних складових коефіцієнтів трансформації відповідно АТ і КТ.

Система автоматичного керування та особливості її функціонування

У критеріальній формі всі параметри подаються у відносних одиницях [4]. Отже закон

оптимального керування відповідно запишеться:

$$u_*(t) = -\pi y_*(t), \quad (8)$$

$$r_{*i} = \begin{cases} +\Delta u_{*ycm\ i} & \text{при } u_{*i} \geq u_{*i}^+; \\ 0 & \text{при } u_{*i}^+ > u_{*i} > u_{*i}^-; \\ -\Delta u_{*ycm\ i} & \text{при } u_{*i} \leq u_{*i}^-, \end{cases} \quad (9)$$

де r_{*i} – коригувальні дій САК, які вводять систему в область оптимальності (нечутливості) у відносних одиницях (в.о.); $\Delta u_{*ycm\ i}$ – добавка, яка, додаючись до уставки $u_{*ycm\ i}$, викликає відповідні дії АТ і КТ по введенню керованого параметра в область оптимальності; u_{*i}^+ , u_{*i}^- – верхня та нижня межі зони нечутливості зміни u_{*i} у в.о., π – за своїм змістом ϵ , як це показано в [3], матрицею критеріїв подібності; $u_{*i} = u_i / u_{i0}$ – параметри РП, за допомогою яких оптимізуються режими ЕЕС, у в.о. (за базисні приймаються оптимальні значення параметрів u_{i0}).

Серед можливих способів реалізації відповідної САК віддається перевага адаптивному регулюванню з еталонною моделлю. Такий підхід відповідає вимогам до керування нормальними режимами ЕЕС, в його рамках можуть застосовуватись багато із напрацьованих і використовуваних на сьогодні в АСДК алгоритмів і програм. Він досить просто реалізується на практиці за допомогою сучасних мікропроцесорних систем.

Структурна схема оптимального керування потоками потужності в ЕЕС з використанням подібності оптимальних режимів наведена на рис. 3.

Дана схема керування складається з двох контурів. У першому контурі (головному) здійснюється автоматичне керування окремими АТ і КТ за допомогою пристроїв контролю і керування автоматичного функціонування автотрансформаторів і крос-трансформаторів (АФАКТ). Вони діють за законами керування (8)–(9). Вектори спостереження y' для керування АТ і КТ формуються з телевимірів у виділеній області корекції, в якій забезпечується часткова або повна спостережність.

У другому контурі (адаптації) в залежності від міри порушення режиму ЕЕС і рішення диспетчера можуть виконуватись дії по переналадженню пристроїв АФАКТ або по прямому керуванню параметрами АТ і КТ. В останньому випадку пристрої АФАКТ використовуються для узгодження каналу телемеханіки і схеми керування АТ і КТ. Команди диспетчера по зміні коефіцієнтів трансформації реалізуються шляхом відповідної зміни складових вектора коригувальних дій r [4]. У випадку, коли оптимальне керування здійснюється автоматично, у контурі адаптації по повній інформації про стан ЕЕС у визначаються матриці критеріїв подібності π_a^e і π_p^e і з них визначальні для даного КТ критерії подібності. Їх склад визначається допустимою похибкою обчислень і реалізації оптимальних коефіцієнтів трансформації. Ще один налагоджувальний параметр – зона нечутливості коефіцієнта трансформації δk_i задається після аналізу чутливості критерію оптимальності F до зміни коефіцієнтів трансформації за методикою, викладеною в [5].

У такій схемі еталонна модель є частиною системи керування. На різних етапах впровадження САК еталонна модель може виконувати різні функції. На початковому етапі автоматизації, коли необхідно узгоджувати оперативне керування диспетчером з автоматичним, це імітаційна модель, з допомогою якої оперативний персонал не тільки аналізує, визначає і коригує налагоджувальні параметри САК, але і має можливість "програвати" стани ЕЕС і оцінювати наслідки керуючих дій, у тому числі автоматичних. На завершальному етапі, коли оптимальне керування потоками потужності в ЕЕС здійснюється переважно локальними САК, еталонна модель стає основним елементом самоналадження і

самоаналізу САК.

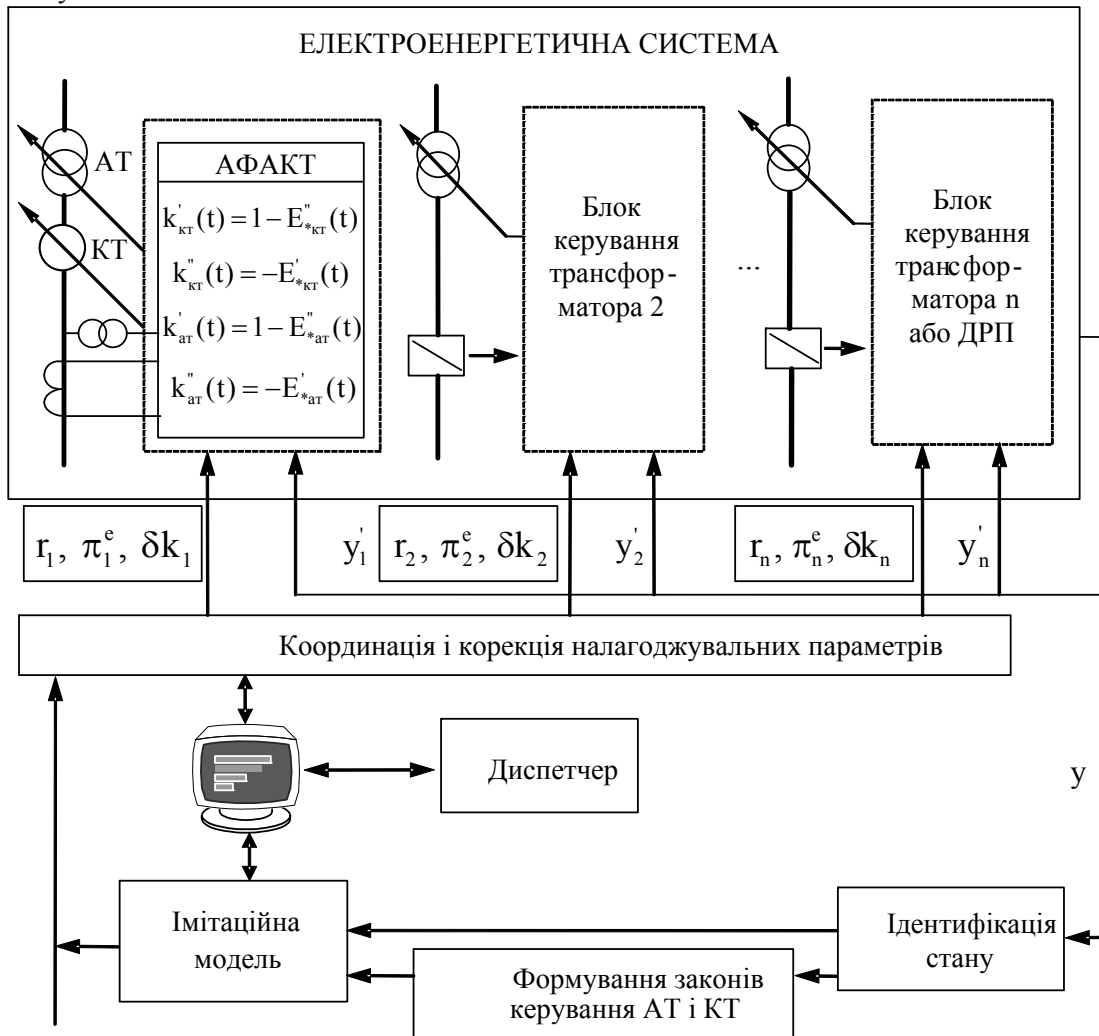


Рис. 3. Структурна схема оптимального керування

Координація роботи трансформаторів при оптимальному керуванні здійснюється за критеріальними залежностями $F_* = f(k_*)$. Вони відображають технічні можливості трансформаторів у керуванні втратами потужності в ЕЕС та використовуються для визначення впливу їх на потоки потужності. Для того, щоб розділити трансформатори на функціональні групи та визначити роль кожного з них в САК потоками потужності, розв'язується зворотна задача чутливості [5 – 7]. У результаті її розв'язання при заданій зоні нечутливості критерію оптимальності δF_* визначаються зони нечутливості δk_i коефіцієнтів трансформації. Розміри цих зон відповідають реальним можливостям трансформаторів впливати на втрати. Відповідно з їх регульовальним ефектом встановлюється різна інтенсивність перемикачів для трансформаторів ЕЕС. За такого порядку роботи системи керування введення режиму ЕЕС в область оптимальності реалізується мінімально можливою кількістю керуючих впливів, що в свою чергу забезпечує надійність та раціональне спрацювання ресурсу регулюючих пристроїв.

Приклад. Оптимізація потокорозподілу активної потужності за допомогою крос-трансформатора на прикладі фрагменту схеми Південно-Західної ЕЕС (ПЗЕС).

На основі вище викладеної методики, щодо оцінки потужності від взаємовпливу режимів електричних мереж ЕЕС, було проведено розрахунковий експеримент по зменшенню додаткових втрат, на прикладі фрагменту схеми ПЗЕС 110-750 кВ, що подана на рис. 4. Як

приклад розглядається транзит потужності мережами ПЗЕС з вузла 599 у вузол 945.

У розрахункову схему введено крос-трансформатор між шинами 330 кВ автотрансформатора зв'язку розподільної установки ХАЕС та 809 вузлом. Передбачається, що зміна коефіцієнта трансформації на крос-трансформаторній підстанції буде виконуватися ступенями 4, 6, 8, 12 та 16 електричних градусів.

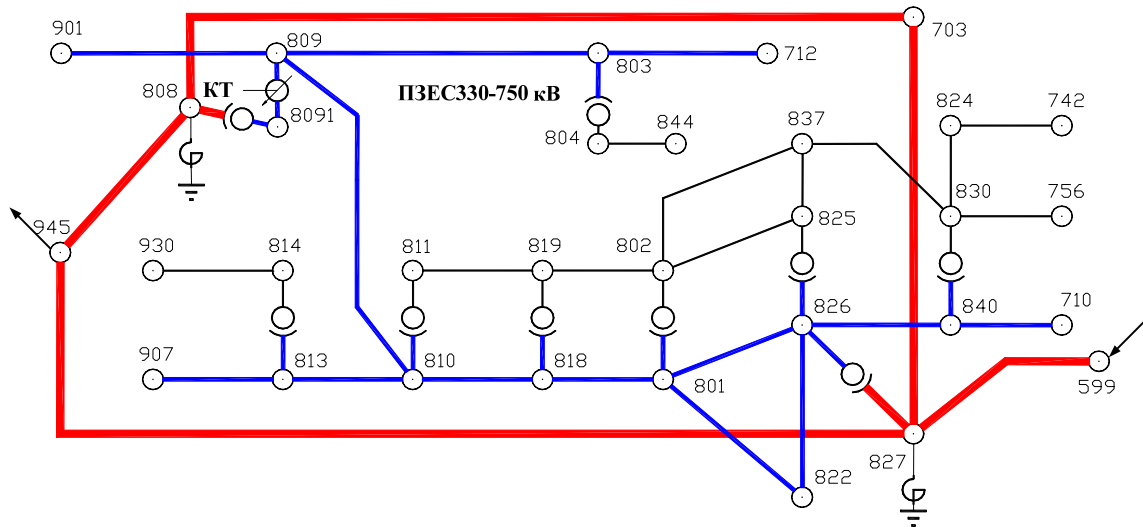


Рис. 4. Фрагмент схеми ПЗЕС 110-750 кВ

Використаємо метод спрямованого перебору для визначення оптимальних зрівнювальних е. р. с. та коефіцієнтів трансформації крос-трансформатора. Для розрахункового експерименту застосовувались параметри крос-трансформатора, які наведені в [8]. Для порівняння розглянемо спочатку, як змінюються втрати потужності в мережах в залежності від значення транзитного перетоку потужності до встановлення КТ. Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Зміна втрат в ЕЕС в залежності від значення транзиту потужності до встановлення КТ

Транзит, МВт	Втрати активної потужності в лініях, МВт			
	110	330	750	Σ
0	2,588	24,059	10,350	36,997
500	2,899	24,939	13,923	41,761
1000	3,312	26,287	26,635	56,234

Для зменшення цих втрат будемо змінювати поперечну складову коефіцієнту трансформації за допомогою крос-трансформатора. Це дасть змогу завантажити ЛЕП 330-750 кВ та розвантажити ЛЕП 110 кВ.

Після кожної зміни значення потужності транзиту та зміни кута на крос-трансформаторі здійснювався розрахунок усталеного режиму ЕЕС за допомогою програми розрахунку режимів "ГрафСКАНЕР" та визначалися втрати. У результаті розрахунків отримані графічні залежності загальносистемних втрат активної потужності від коефіцієнта трансформації без транзиту та з транзитом 500 та 1000 МВт (рисунок 5).

Аналізуючи отримані дані, спостерігаємо вплив крос-трансформатора, що надає можливість розвантажити лінії нижчих класів напруг і завантажити ЛЕП вищих класів напруг, і при цьому втрати в ЕЕС зменшуються. З метою визначення оптимального коефіцієнта трансформації крос-трансформатора проаналізуємо графік, зображений на рис. 5. Відповідно до цього графіка загальносистемні втрати будуть найменші, якщо

встановити коефіцієнт трансформації КТ рівний 8 або 12 електричним градусам. Причому при регулюванні поперечної складової крос-трансформатора режими напруги та частоти ЕЕС є допустимими.

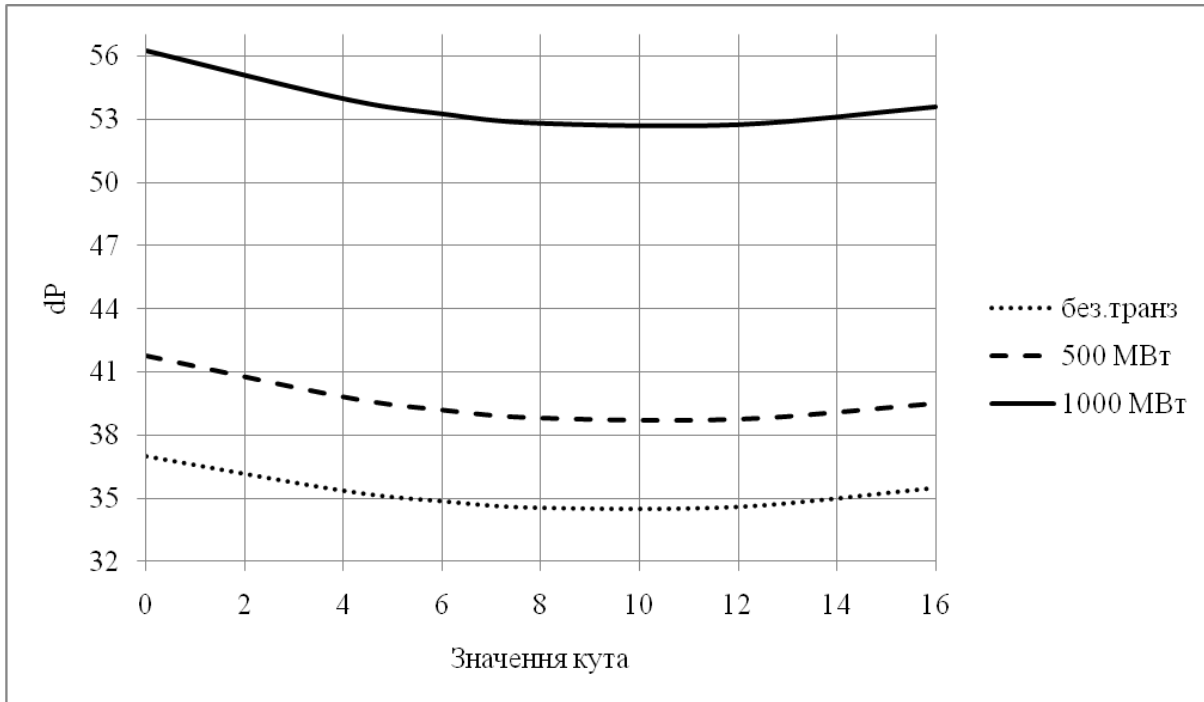


Рис. 5. Залежність загальносистемних втрат активної потужності від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 500 та 1000 МВт

Електричні мережі ЕЕС мають різних власників, тому оптимізація режиму за критерієм загальносистемних втрат не завжди є доцільною, з точки зору їх економічної ефективності. Тому розглянемо оптимізацію за критерієм мінімальних втрат активної потужності для окремої електричної мережі.

Проаналізуємо залежність втрат активної потужності в лініях 110 кВ від коефіцієнта трансформації без транзиту та з транзитом 500 та 1000 МВт (рис. 6).

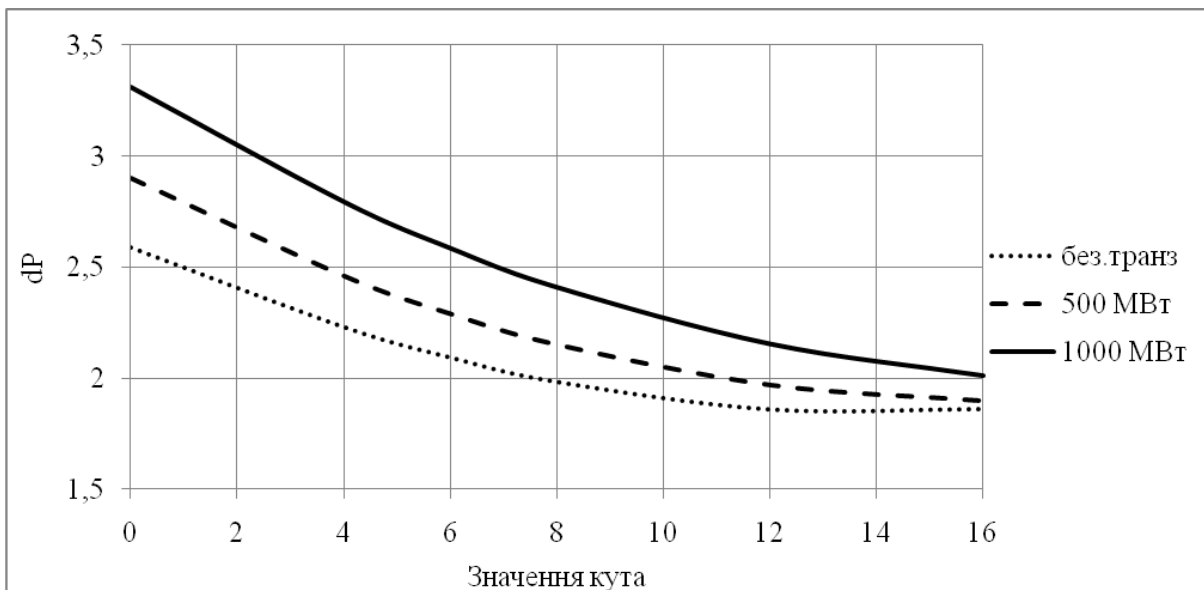


Рис. 6. Залежність величини втрат активної потужності в лініях 110 кВ від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 500 і 1000 МВт

Як видно з рис. 6, за відсутності транзиту і коефіцієнту трансформації, який відповідає 12-ти електричним градусам, втрати в лініях 110 кВ є найменшими і становлять 1,859 МВт, що значно менше порівняно з втратами, які виникають при розрахунку тієї ж самої електричної схеми без використання КТ. При цьому втрати становили 2,588 МВт (див. таблиця 1). Отже, вдалося знизити втрати приблизно на 0,729 МВт. При збільшенні транзиту до 500 МВт зміна коефіцієнта трансформації дала змогу зменшити втрати в ЛЕП. І як видно з графіка (рис. 6), ці втрати найменші, коли коефіцієнт трансформації відповідає куту в 16 ел. гр. Вони становлять 1,901 МВт, що на 1 МВт менше при невикористанні КТ. При транзиті 1000 МВт та при регулюванні крос-трансформатором, тобто зміні його поперечної складової коефіцієнту трансформації, втрати вдалося знизити на 1,3 МВт. При даному транзиті найефективніше встановити коефіцієнт трансформації 16 електричних градусів. Значення кута КТ, при якому втрати в лініях 110 кВ найменші, не збігається із значенням кута КТ, при якому загальносистемні втрати були найменшими.

Розглянемо залежність величини втрат активної потужності в лініях 330 кВ від коефіцієнта трансформації крос-трансформатора без транзиту та з транзитом 500 та 1000 МВт (див. рис. 7).

Як і в лініях 110 кВ, так і в лініях 330 кВ при збільшенні транзиту потужності спостерігається зміна втрат в них. Зміна коефіцієнта трансформації КТ дозволила зменшити втрати в ЛЕП. Як видно з рис. 7, при відсутності транзиту та при транзитах 500 МВт, 1000 МВт відповідно найоптимальнішими є кути 6, 8, 12 ел. гр.

В ЛЕП 750 кВ зміна коефіцієнта трансформації КТ не суттєво вплинула на значення втрат в лінях даного класу напруги, про що свідчать криві, які зображені на рис. 8 і які показують залежність втрат активної потужності від кута в лініях 750 кВ за відсутності транзиту та під час транзиту 500 і 1000 МВт.

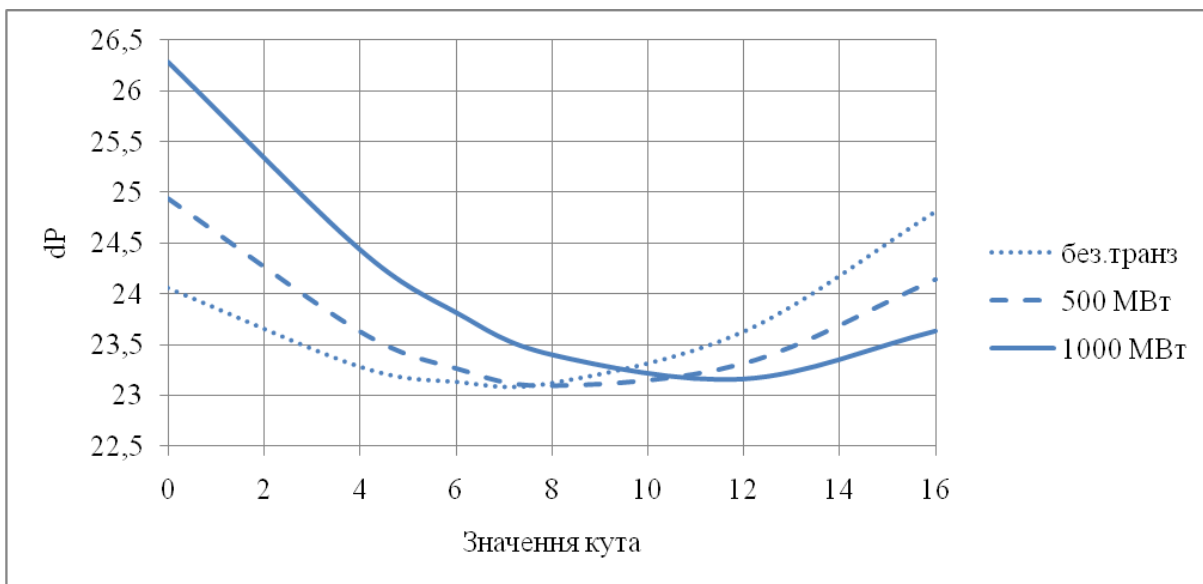


Рис. 7. Залежність втрат активної потужності в лініях 330 кВ від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 500 і 1000 МВт

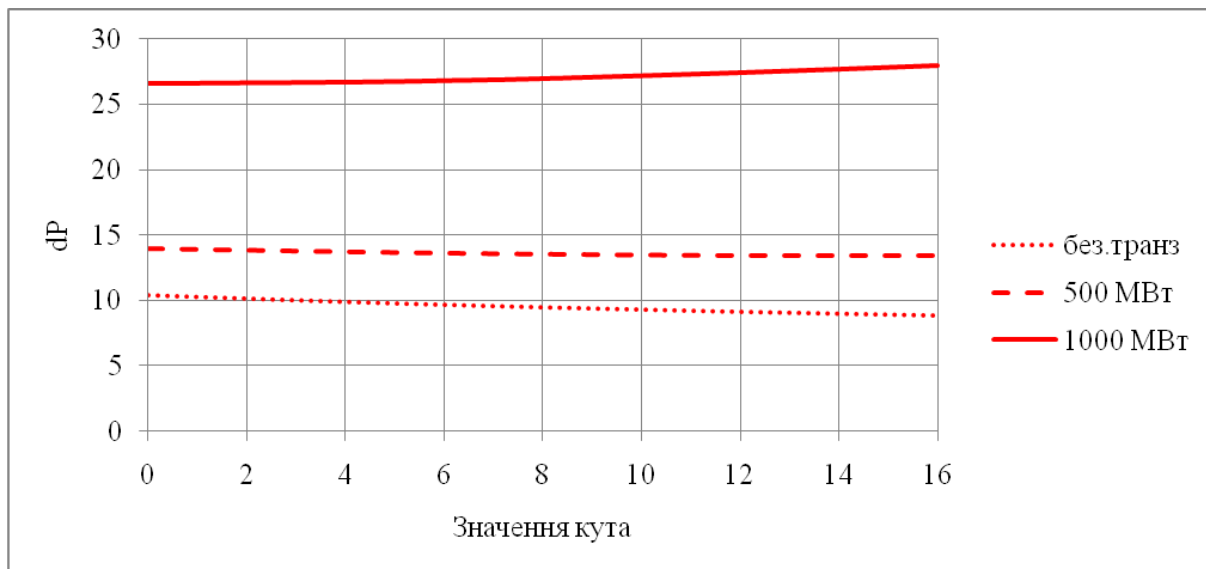


Рис. 8. Залежність величини втрат активної потужності в лініях 750 кВ від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 500 і 1000 МВт

Висновки

1. Для досягнення бажаного ефекту від оптимізації нормальних режимів ЕЕС процес оптимального керування необхідно автоматизувати. Для цього в даний час є всі необхідні умови – апаратне, програмне і інформаційне забезпечення. Автоматизація оптимального керування потоками потужності і напругою в ЕЕС забезпечить перехід від спорадичних до регулярних оптимізуючих дій, що дозволить зменшити втрати електроенергії при її транспортуванні електричними мережами ЕЕС.

2. При автоматизації оптимального керування потоками потужності в ЕЕС можливо і доцільно застосовувати методи теорії подібності та моделювання. На основі них можна розв'язувати задачі, характерні для АСДК, з єдиних методологічних засад на всіх етапах оптимального керування. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну САК з децентралізацією частини функцій АСДУ практично без порушення принципів централізованого керування.

3. Використання крос-трансформаторних технологій дозволяє зменшити додаткові втрати, викликані розвантаженням магістральних мереж на мережі нижчої напруги. Застосування крос-трансформаторів дозволяє розширити можливості щодо керування потоками активної потужності в ЕЕС. При цьому суттєво покращуються умови для роботи автотрансформаторів зв'язку на електростанціях і в системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ольшванг М. В. Особенности кросс-трансформаторной технологии транспортирования энергии по сетям 110-765 кВ // Электро. – 2004. – №2. – С.52.
2. Лежнюк П. Д., Пауткина Л. Р. Подобие и расчет оптимального токораспределения в электрической сети // Изв. вузов. Энергетика. – 1989. – №2. – С. 51–53.
3. 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.
4. Мокін Б. І., Лежнюк П. Д., Лук'яненко Ю. В. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи // Вісник ВПІ. – 1995. – № 3. – С. 5–9.
5. Воротицкий В. Э., Лежнюк П. Д., Серова И. А. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях // Электрические станции. – 1992. – №1. – С. 60–66.
6. Астахов Ю. Н., Лежнюк П. Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1990. – №5. – С.3–11.

7. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
8. Кулаков А. В., Ольшванг М. В., Савкин Д. А. Кросс-трансформаторная технология оптимизации потоков передачи и распределения энергии в сетях 110-765 кВ и ее технико-экономическое обоснование // VII Симпозиум: Электротехника 2010 год: Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии. Сб. докл. – М.: ВЭИ-ТРАВЕК, 2003. – С. 1-6.

Лежнюк Петро Дем'янович – д. т. н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет.

Жан-П'єр Нгома – к. т. н., доцент кафедри електротехніки.

Університет Дуала, Камерун.

Килимчук Антон Володимирович – магістрант.

Вінницький національний технічний університет.