
ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311.161

П. Д. Лежнюк, д-р техн. наук, проф.;**В. В. Кулик**, канд. техн. наук, доц.;**С. Я. Вишневський****УМОВИ ОПТИМАЛЬНОСТІ НОРМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З ДОВГИМИ ЛІНІЯМИ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

Наведено результати досліджень з вдосконалення математичної моделі умов оптимальності нормальних режимів електричних систем, до складу яких входять довгі лінії електропередачі. Зазначені моделі використовуються для формування законів оптимального керування потоками потужності та напругою в електричних мережах. Адекватність запропонованого підходу підтверджено на підставі натурно-імітаційного моделювання нормальних режимів електричних мереж 110—750 кВ Південно-Західної електроенергетичної системи.

Вступ

Електричні системи (ЕС), з огляду на організацію керування ними, належать до складних динамічних систем розподіленого типу. Враховуючи особливості режимного характеру ЕС та можливий економічний ефект від своєчасної реалізації їх оптимальних (за енергетичним критерієм) незалежних параметрів, очевидна доцільність застосування систем автоматичного керування (САК) регульовальними пристроями (РП). Визначення оптимальних параметрів станів ЕС у контурі керування може здійснюватися за допомогою різноманітних методів оптимізації. Але найефективніше розв'язання задачі забезпечують методи, які дозволяють отримати стійкі функціональні зв'язки між параметрами спостереження та керування САК у вигляді законів оптимального керування (пропорційного або диференціального типу). Останні доцільно встановлювати на підставі аналітичних умов оптимальності фізичних процесів передачі та розподілу електроенергії в ЕС.

Для формування математичних моделей нормальних та оптимальних станів ЕС, які використовують для відтворення нормальних режимів ЕС, та встановлення законів оптимального керування САК та керувальних впливів РП, традиційно використовуються підходи, що пов'язані з еквівалентуванням розподілених параметрів ліній електропередачі (ЛЕП) системоутворювальних електричних мереж у вигляді заступних схем із зосередженими параметрами [1, 2].

Простота та зручність використання таких моделей супроводжується їх обмеженою адекватністю. Тому для підвищення точності представлення довгих ЛЕП (довжиною більше 300 км) у вигляді зосереджених ланок використовують поправочні коефіцієнти. Однак, такий підхід не дозволяє врахувати повною мірою особливості передачі електроенергії лініями 330 кВ і вище, для яких прояв хвильових властивостей є досить суттєвим. Так, якщо для моделювання усталених режимів ЕС з метою їх планування, формування ремонтних схем тощо, точності традиційних моделей цілком достатньо, то для виявлення фізичних особливостей транспортування електроенергії їх електромережами необхідно використовувати адекватніші моделі об'єкта дослідження. Адже методичні похибки, закладені на стадії формування умов оптимальності нормальних режимів ЕС, разом з тим і для випадків паралельної роботи системоутворювальних та розподільних електромереж, будуть негативно проявлятися протягом всього часу використання отриманих на їх підставі законів оптимального керування САК ЕС.

Виходячи з вищенаведеного, *метою роботи* є вдосконалення математичної моделі умов оптимальності нормальних режимів електричних систем з урахуванням хвильових властивостей передачі електроенергії довгими ЛЕП, а також аналіз їх адекватності з використанням результатів натурно-імітаційного моделювання діючих електричних систем.

Економічний струморозподіл в електромережах з трансформаторними зв'язками та довгими лініями електропередачі

Паралельна робота електромереж напругою 330 кВ і вище з розподільними мережами часто супроводжується негативними наслідками взаємовпливу їх режимів [3]. За рахунок неоднорідності таких електромереж лінії нижчої напруги надмірно завантажуються, порівняно з так званим економічним струморозподілом [2], що призводить до зростання втрат потужності та електроенергії в електромережах, зменшення запасів пропускної здатності окремих перерізів, погіршення режиму напруг тощо.

Задача оптимального керування нормальними режимами ЕМ у цьому випадку зводиться до формування та реалізації керувальних впливів (наявними засобами регулювання), які б забезпечили максимальне наближення поточного розподілу потоків потужності до економічного [2—6]. Методи та алгоритми формування таких керувальних впливів для різноманітних регульовальних пристроїв (регульованих силових трансформаторів, пристроїв поперечної компенсації реактивної потужності, секційних вимикачів тощо) детально описані у [2—6], і можуть бути зведені до зіставлення поточного режиму ЕМ та деякого економічного [2] — ідеального за втратами активної потужності — режиму однорідної електромережі (мережі з однаковим співвідношеннями реактивних x_i до активних r_i поздовжніх параметрів для всіх її віток).

Визначити параметри такого режиму для замкненого кола із зосередженими параметрами (рис. 1), як показано в [2, 4], можна, розрахувавши усталений режим за заступною r -схемою. Неоптимальність струморозподілу в неоднорідному контурі (рис. 2а) може бути врахована додатковими фіктивними зрівнювальними струмами $\dot{I}_{зр}$, які визначаються як векторна різниця між відповідними струмами у вітках для природного \dot{I}_i та економічного $\dot{I}_i^{ек}$ струморозподілів. Для заступної r -схеми контуру \dot{I}_i та $\dot{I}_i^{ек}$ збігаються (рис. 2б) і, відповідно, зрівнювальні струми $\dot{I}_{зр}$, як і в однорідному замкненому колі, відсутні.

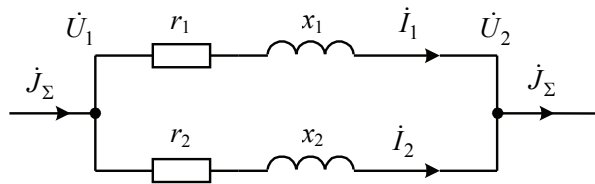


Рис. 1. Заступна схема замкненого кола із зосередженими параметрами

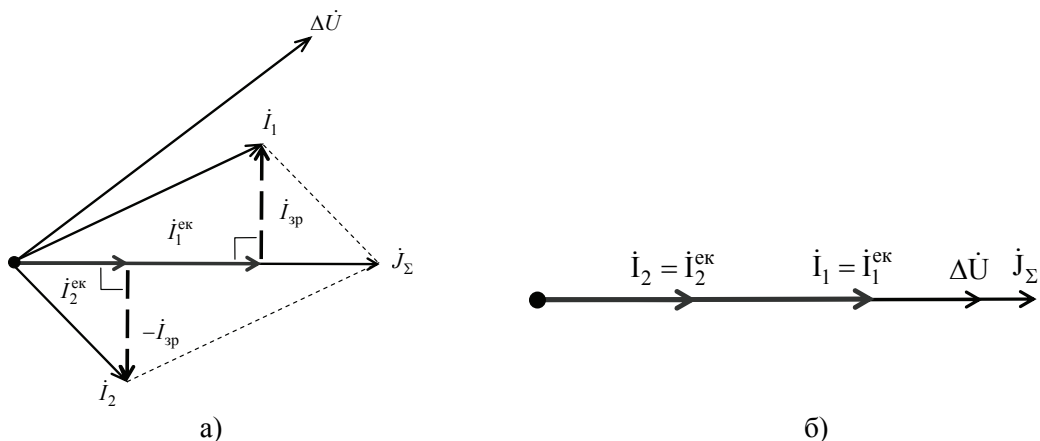


Рис. 2. Векторні діаграми струмів і напруг: а — для замкненого кола; б — його заступної r -схеми

Врахування комплексних коефіцієнтів трансформації в замкнених електромережах призводить до того, що у контурах (рис. 3а), для яких $k_1 \neq k_2$, на струми у вітках, зумовлені навантаженням \dot{J}_Σ , накладаються додаткові струми $\dot{I}_{нб}$, викликані дією е. р. с. $\dot{E}_{нб} = (1 - k_1/k_2)\dot{U}'_2$ від незбалансованих коефіцієнтів трансформації трансформаторів (рис. 4а). При цьому, залежно від співвідношення кое-

фіцієнтів трансформації, струми небалансу $\dot{I}_{\text{нб}}$ можуть частково компенсувати зрівнювальні струми $\dot{I}_{\text{зр}}$ (як це показано на рис. 4а), наближаючи струморозподіл до економічного, або погіршувати енергетичну ефективність кола, збільшуючи модулі струмів у його вітках і, відповідно, втрати потужності та енергії.

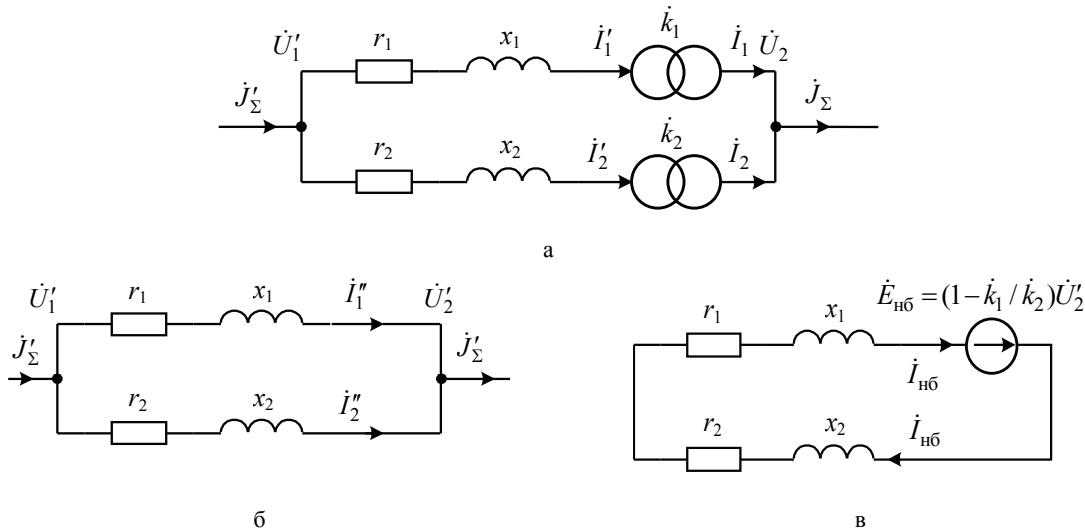


Рис. 3: а — заступна схема замкненого кола з трансформаторними зв'язками; б, в — розрахункові схеми для використання методу накладання

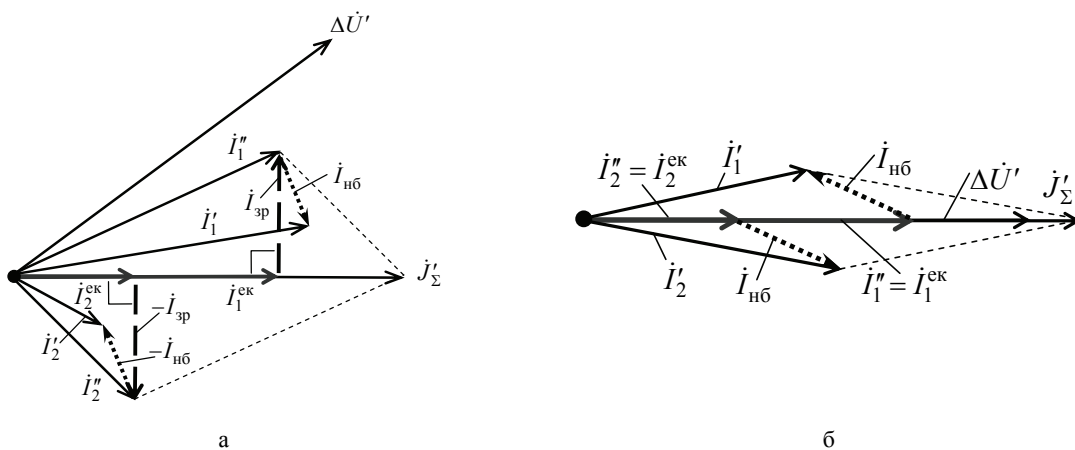


Рис. 4. Векторні діаграми струмів і напруг: а — для замкненого кола з трансформаторами; б — для його заступної r -схеми

Щодо визначення економічного струморозподілу в такому колі (див. рис. 3), то наявність незбалансованих коефіцієнтів трансформації ($k_1/k_2 \neq 1$) і, відповідно, струмів небалансу $\dot{I}_{\text{нб}}$ у контурах призводить до того, що економічний струморозподіл не відповідає струморозподілу, розрахованому за заступною r -схемою (див. рис. 4б), що формально доведено у [3]. Причому, незалежно від співвідношення коефіцієнтів трансформації, втрати енергії, визначені для такого розрахункового режиму, будуть вищі економічних. Очевидним рішенням для збереження можливості визначення економічного режиму такого кола шляхом розрахунку за заступною r -схемою є введення додаткової умови, що полягає у відсутності незбалансованих коефіцієнтів трансформації в процесі розрахунку ($k_1/k_2 = 1$).

Аналогічні розрахункові умови отримані у [3] для визначення економічного струморозподілу у складнозамкненій електромережі довільної конфігурації з трансформаторними зв'язками. Для цього можна використовувати у розрахунках номінальні коефіцієнти трансформації. Однак для врахування обмежень за напругою в ЕМ доцільно використовувати коефіцієнти трансформації, що

відповідають відгалуженню трансформатора, який забезпечує регулювання напруги в ЕМ у автоматичному або автоматизованому режимі (а його коефіцієнт трансформації є незалежним параметром для задачі оптимізації потокорозподілу в електромережах) [3].

Для визначення економічного режиму складнозамкнених електромереж з довгими ЛЕП (більше 300 км) необхідно враховувати особливості їх взаємовпливу з ЛЕП малої довжини, які функціонують паралельно. Довгі лінії мають подаватися як кола з розподіленими параметрами [7—9], для яких характерна просторова неодноразність змін стану. Співвідношення напруг для довгої електропередачі може бути подано так [7]:

$$\dot{U}_x = \text{ch}(\gamma_0 x) \dot{U}_2 + \sqrt{3} \dot{Z}_c \text{sh}(\gamma_0 x) \dot{I}_2, \quad (1)$$

або для напруг по кінцях електропередачі у вигляді чотириполосника [7]:

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \dot{U}_2 + \sqrt{3} \dot{B} \dot{I}_2, \quad (2)$$

де \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_x — лінійні напруги, відповідно, на початку, у кінці передачі та на відстані x від нього; \dot{I}_2 — фазний струм в кінці ЛЕП; $\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}}$, $\gamma_0 = \sqrt{(r_0 + jx_0)(g_0 + jb_0)}$ — відповідно,

хвильовий опір та коефіцієнт розповсюдження хвилі ЛЕП; r_0 , x_0 — питомі поздовжні опори, а g_0 , b_0 — питомі поперечні провідності ЛЕП; $\dot{A} = \text{ch}(\gamma_0 l)$, $\dot{B} = \dot{Z}_c \text{sh}(\gamma_0 l)$ — постійні пасивного чотириполосника (рис. 5а); l — довжина ЛЕП.

Як видно з (1) та (2), на розподіл напруги вздовж таких ЛЕП, крім протікання струму навантаження (як для ЛЕП малої довжини), буде впливати швидкість розповсюдження хвилі напруги. За рахунок цього, залежно від довжини такої ЛЕП буде змінюватися співвідношення (в основному, зсув фаз) між напругами по кінцях передачі навіть за відсутності струмів навантаження. Для заступної схеми з зосередженими параметрами (рис. 5б), що дозволяє відтворити паралельну роботу короткої ЛЕП з довгою електропередачею, це явище можна еквівалентувати ідеальним трансформатором з комплексним (переважно, поперечним) коефіцієнтом трансформації $\dot{k}_1 = \dot{A}$ [9].

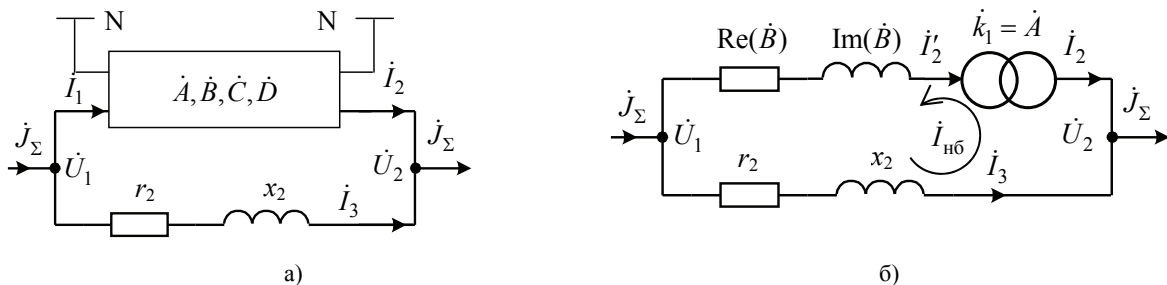


Рис. 5: а — заступна схема замкненого кола з короткою ЛЕП і довгою електропередачею у вигляді чотириполосника; б — заступна схема із зосередженими параметрами

Таким чином, на відміну від заступної схеми (див. рис. 1) для двох ЛЕП однієї напруги, у схемі (див. рис. 5б) враховано явище виникнення додаткового струму небалансу $\dot{I}_{нб}$. Він зумовлений е. р. с. небалансу $\dot{E}_{нб} = (1 - \dot{A}_1) \dot{U}_2$, що викликана зсувом вектора напруги на кінці довгої електропередачі через неодноразність розповсюдження хвилі напруги в ній.

На відміну від струму небалансу в контурі з трансформаторами, значення та напрямок якого можна коригувати пристроями керування, струм $\dot{I}_{нб}$ у контурі з довгими ЛЕП, враховуючи причину його виникнення і напрямок е. р. с. небалансу, завжди забезпечує додаткове завантаження коротких ЛЕП. А втрати енергії зростають не лише у зазначених лініях електропередачі, але й у електромережі в цілому.

На підставі подібності заступних схем (див. рис. 5б та рис. 3а) можна стверджувати, що економічний струморозподіл у контурі, який містить довгі ЛЕП, не буде відповідати струморозподілу у заступній r -схемі (остання, у цьому випадку буде складатися з активних опорів віток із зосередженими параметрами r_i та активних складових $\text{Re}(\dot{B})$ еквівалентів довгих ЛЕП). Для забезпечення

відповідності необхідно, за аналогією з поданим вище, додатково прийняти, що у розрахунковій r -схемі відсутні е. р. с. небалансу: $\dot{E}_{нб} = 0$, або $\dot{A}_i = 1$. Визначений таким чином струморозподіл буде відповідати ідеальному режиму функціонування контуру з довгими ЛЕП, а наближення до нього, за рахунок коригування трансформаторами струмів небалансу, буде забезпечувати позитивний ефект з огляду на зменшення втрат електроенергії в електромережах загалом.

Моделювання зрівнювальних е. р. с. у контурах електромереж з трансформаторними зв'язками та довгими електропередачами

Наявні перетоки потужності у елементах електромереж можуть бути наближені до економічних (тобто потоків в однорідній електромережі) через коригування комплексних коефіцієнтів трансформації регулювальних трансформаторів ЕМ [3, 4, 6]. За рахунок керувальних впливів у контури ЕМ необхідно ввести струми небалансу $\dot{I}_{нб}$, які б частково або повністю компенсували фіктивні зрівнювальні струми $\dot{I}_{зр}$, що враховують негативну дію неоднорідності ЕМ. Враховуючи, що $\dot{I}_{нб}$ та $\dot{I}_{зр}$ визначаються одними і тими самими пасивними параметрами замкнених контурів, для їх компенсації достатньо, щоб $\dot{E}_{нб} = -\dot{E}_{зр}$. В загальному випадку для j -го контуру, що належить системі базисних контурів [4], е. р. с. небалансу визначається як

$$\dot{E}_{нб_j} = \left(1 - \prod_{i \in \text{TP}_j} \dot{k}_i \right) \dot{U}_\delta, \quad (3)$$

де \dot{k}_i — коефіцієнт трансформації i -го трансформатора, що належить множині трансформаторів j -го контуру TP_j ; \dot{U}_δ — напруга базисного вузла ЕМ.

Фіктивні зрівнювальні е. р. с. у неоднорідних електромережах, що містять трансформаторні зв'язки та довгі електропередачі, можна визначити за виразом [3, 6]

$$\dot{E}_{зр} = \dot{N}_{Ak} \dot{Z}_B (\dot{I} - \dot{I}_{ек}), \quad (4)$$

де \dot{N}_{Ak} — матриця зв'язків віток ЕМ у її контурах, побудована з урахуванням трансформаторних зв'язків та довгих електропередач [9]; \dot{Z}_B — діагональна матриця опорів віток заступної схеми, в якій вітки довгих передач подані постійними чотириполюсника B [9]; $\dot{I}_{ек}$ — вектор економічних струмів у вітках заступної схеми електромереж, визначений на підставі розрахунку за поданими вище умовами; \dot{I} — вектор струмів у вітках, що відповідає реальному струморозподілу з урахуванням взаємовпливу працюючих паралельно електромереж різних класів напруги.

Вирази для визначення векторів \dot{I} та $\dot{I}_{ек}$ як функцій задавальних струмів \dot{J} у вузлах заступної схеми ЕМ можуть бути подані так:

$$\dot{I} = \dot{Z}_B^{-1} \dot{M}_{Ak}^T (\dot{M}_D \dot{Z}_B^{-1} \dot{M}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{J} - \dot{Y}_\delta \dot{U}_\delta) + \dot{Z}_B^{-1} \dot{M}_\delta^T \dot{U}_\delta; \quad (5)$$

$$\dot{I}_{ек} = \mathbf{R}_B^{-1} \dot{M}_{Ak}^T (\dot{M}_D \mathbf{R}_B^{-1} \dot{M}_{Ak}^T)^{-1} (\dot{J} - \mathbf{Y}_{R\delta} \dot{U}_\delta) + \mathbf{R}_B^{-1} \dot{M}_\delta^T \dot{U}_\delta, \quad (6)$$

де $\dot{M}_{Ak}^T = \mathbf{M}^{T+} \mathbf{K} + \mathbf{A}_d \mathbf{M}^{T-}$ — транспонована матриця зв'язків віток ЕМ у її вузлах з урахуванням ідеальних трансформаторів та довгих електропередач [9] (символ « T » тут і далі позначає операцію транспонування матриць); \mathbf{M}^{T+} , \mathbf{M}^{T-} — матриці, які формуються заміною, відповідно, від'ємних або додатних елементів транспонованої матриці з'єднань \mathbf{M}^T [1] нулями; \mathbf{K} , \mathbf{A}_d — діагональні матриці, відповідно, коефіцієнтів трансформації трансформаторних віток та постійних чотириполюсника A для інших віток заступної схеми ЕМ; $\dot{M}_{Ak} = \mathbf{M}^+ \mathbf{A}_d + \hat{\mathbf{K}} \mathbf{M}^-$ — матриця зв'язків віток ЕМ у її вузлах (символ « \wedge » тут і далі позначає комплексно-спряжені значення комплексних величин); \dot{Y}_δ , $\mathbf{Y}_{R\delta}$ — фрагменти матриці вузлових провідностей, визначені, відповідно, за повною заступною схемою та за r -схемою; \dot{U}_δ — вектор напруг базисного та балансувальних вузлів ЕМ;

$\dot{\mathbf{M}}_6^T$ — фрагмент матриці з'єднань $\dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T$, що відповідає балансувальним вузлам ЕМ; \mathbf{R}_B — діагональна матриця опорів віток, що містить лише активні складові опорів віток $\dot{\mathbf{Z}}_B$.

Підставивши у вираз зрівнювальних е. р. с. (4) вирази для $\dot{\mathbf{I}}$ і $\dot{\mathbf{I}}_{ек}$, після перетворень та спрощень отримано:

$$\dot{\mathbf{E}}_{зр} = \dot{\mathbf{N}}_{Ak} \left(1 - j\mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \right) \dot{\mathbf{M}}_6^T \dot{\mathbf{U}}_6 - j\dot{\mathbf{N}}_{Ak} \mathbf{X}_B \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T \left(\dot{\mathbf{M}}_{Ak} \mathbf{R}_B^{-1} \dot{\mathbf{M}}_{Ak}^T \right)^{-1} \left(\dot{\mathbf{J}} - \mathbf{Y}_{R6} \dot{\mathbf{U}}_6 \right), \quad (7)$$

де \mathbf{X}_B — діагональна матриця опорів віток, що містить лише реактивні складові опорів віток $\dot{\mathbf{Z}}_B$.

З (7) видно, що обидві складові виразу зрівнювальних е. р. с. визначаються співвідношенням реактивних та активних опорів віток заступної схеми ЕМ, коефіцієнтами трансформації трансформаторів та розповсюдження хвилі довгих передач (у вигляді постійних чотириполюсника A). Виходячи з (7), відсутність зрівнювальних е. р. с. у замкнених контурах характерна лише для електромереж, в яких коефіцієнти трансформації в контурах збалансовані, всі вітки відповідають класичній умові однорідності [4] $x_i/r_i = idem$, а також для довгих ЛЕП забезпечується умова узгодженості коефіцієнтів розповсюдження хвилі $\gamma_i = \sqrt{(r_i + jx_i)(g_i + jb_i)} = idem$. Виходячи з останнього, забезпечити однорідність електромереж з довгими ЛЕП практично неможливо. Для забезпечення режимів їх роботи, близьких до економічних, доцільно застосовувати заходи з оптимального керування трансформаторами зв'язку з подовжно-поперечним регулюванням.

Оцінювання впливу довгих електропередач на оптимальні параметри трансформаторів зв'язку в електромережах

Для характерного режиму фрагмента електричної мережі схеми ЕЕС 110—750 кВ Південно-західної енергосистеми (ПЗЕС), що містить 32 вузли, 38 віток, 10 трансформаторів зв'язку за виразами, описаними вище, було розраховано зрівнювальні е. р. с. $\dot{\mathbf{E}}_{зр}$, оптимальні е. р. с. небалансу $\dot{\mathbf{E}}_{нб}^{опт}$ та оптимальні коефіцієнти трансформації трансформаторів зв'язку 330/110 кВ та автотрансформаторів 750/330/110 кВ $\dot{\mathbf{K}}^{опт}$. Розрахунки виконано на підставі класичних моделей зрівнювальних е. р. с. [6] та моделі, що запропонована вище. Результати розрахунку показано у таблиці. Для моделювання усталених режимів ЕМ використано програмний комплекс «ГРАФСКАНЕР», у якому передбачено можливість наближеного врахування розподіленості параметрів довгих електропередач.

Результати розрахунку зрівнювальних е. р. с. та оптимальних коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку з використанням класичних та розроблених математичних моделей

| Трансформатор | Зрівнювальні е. р. с. $\dot{\mathbf{E}}_{зр}$, кВ | | Коефіцієнти трансформації $\dot{\mathbf{K}}^{опт}$, в. о. | |
|---------------|---|---|---|---|
| | Модель з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів | Модель з урахуванням розподіленості параметрів довгих ЛЕП | Модель з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів | Модель з урахуванням розподіленості параметрів довгих ЛЕП |
| 801-802 | 9,928 - j7,942 | (9,901 - j7,919)/(0,3 %) | 0,3491 + j0,0021 | (0,3492 + j0,0021)/(0,1 %) |
| 818-819 | 7,029 - j2,525 | (7,078 - j2,433)/(1,4 %) | 0,3435 - j0,0050 | (0,3435 - j0,0050)/(0,3 %) |
| 811-810 | - 2,638 - j16,094 | (- 2,710 - j19,260)/(16,3 %) | 0,3410 + j0,0025 | (0,3410 + j0,0022)/(13,6 %*) |
| 808-809 | - 1,907 + j10,316 | (- 2,436 + j20,924)/(50,4 %) | 0,4626 + j0,0169 | (0,4627 + j0,0210)/(19,5 %*) |

Примітка: у знаменнику зазначено відхилення розрахункових параметрів, отриманих за уточненими моделями.
* — врахування особливостей довгих ЛЕП впливає, переважно, на оптимальність поперечних коефіцієнтів трансформації, тому відхилення були розраховані для них.

З таблиці видно, що для контурів 3 та 4 (в якості регулювальних пристроїв тут обрано, відповідно, автотрансформатори розподільного пристрою Хмельницької атомної станції 808-809 та автотрансформатори підстанції Бар-330 811-810), до складу яких входять лінії електропередачі

750 кВ довжиною більше 200 км, спостерігається значне (від 16 до 50 %) відхилення уявних складових зрівноважених е. р. с. Для цих самих контурів також спостерігається значне відхилення оптимальних значень поперечних коефіцієнтів трансформації регулювальних трансформаторів.

Висновки

Задачі компенсації негативного впливу неоднорідності електромереж з трансформаторними зв'язками та довгими лініями електропередачі мають розв'язуватися з урахуванням особливостей їх впливу на процес транспортування та розподілу електроенергії. Урахування хвильових властивостей довгих ЛЕП, а також незбалансованих коефіцієнтів трансформації трансформаторів зв'язку у математичних моделях нормальних режимів ЕМ дозволяє точніше оцінювати потенційну ефективність оптимального керування такими режимами.

Для електричних мереж 330–110 кВ урахування хвильових властивостей ЛЕП вищих класів напруги не дає суттєвого уточнення оптимальних параметрів трансформаторів зв'язку. Отже, для таких мереж можна ефективно використовувати математичні моделі із зосередженими параметрами. Однак це не прийнятно для електромереж з лініями електропередачі 750 кВ довгими за 200...300 км.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: методы расчета / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. — М. : Энергия, 1979. — 416 с.
2. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Холмский. — М. : Высшая школа, 1975. — 280 с.
3. Лежнюк П. Д. Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Технічна електродинаміка. Темат. вип. : Проблеми сучасної електротехніки, ч. 7. — 2006. — С. 27—30.
4. Холмский В. Г. Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности / В. Г. Холмский // Электричество. — 1965. — № 9. — С. 16—21.
5. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. — К. : Наукова думка, 1992. — 216 с.
6. Лежнюк П. Д. Моделирование компенсации влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. І. Оболонський // Электричество. — 2007. — № 11. — С. 2—8.
7. Веников В. А. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока / В. А. Веников, Ю. П. Рыжов. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 272 с.
8. Сулейманов В. М. Електричні мережі та системи / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — 456 с.
9. Кулик В. В. Комбіновані моделі нормальних режимів електричних систем з урахуванням особливостей довгих ліній електропередачі [Електронний ресурс] / В. В. Кулик, С. Я. Вишневський // Наукові праці ВНТУ. — 2012. — № 1. — С. 1—7. — Режим доступу : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2012_1/2012-1.files/uk/12vkvkltl_ua.pdf.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 25.06.2013
Рекомендована до друку 22.07.2013

Лежнюк Петро Дем'янович — завідувач кафедри, *Кулик Володимир Володимирович* — доцент, *Вишневський Святослав Янович* — асистент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця