

УДК 621.311.072

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.;

В. О. Лесько, асп.

## ЧУТЛИВІСТЬ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ У ВІТКАХ СХЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДО ЗБУРЕНЬ У ВУЗЛАХ

*Запропоновано метод оцінки чутливості сумарних втрат потужності в ЕЕС як критерій оптимальності її режимів та втрат потужності в окремих вітках електричних мереж до зміни навантаження у вузлах, який дозволяє визначити оптимальну послідовність коригуючих впливів на режими ЕЕС.*

Вступ

Електроенергетична система (ЕЕС) постійно знаходиться під дією зовнішніх і внутрішніх збурень. Збурення можуть виникати в ЕЕС в одній або декількох точках одночасно. В залежності від їх значення наслідки можуть характеризуватися кількісними змінами параметрів режиму в межах допустимих їх змін або якісними змінами режиму, наприклад, втратою стійкості. За післядією це дві різні задачі і розв'язуються вони різними методами [1—3]. Тут розглядається випадок, коли збурення за своїм впливом не можуть вивести режим з допустимої області або засобами автоматичного регулювання утримується в ній, але втрати потужності при цьому як в системі в цілому, так і в окремих її елементах можуть досягати критичних значень.

Складність утримання або введення режиму ЕЕС в допустиму область полягає в тому, що реакція параметрів режиму у різних її вузлах і вітках на збурення суттєво відрізняється. Відповідно вимагається різна дія окремих регулюючих пристроїв (РП) (джерел активної і реактивної потужності, трансформаторів з поздовжньо-поперечним регулюванням, лінійних регуляторів тощо) на параметри режиму елементів і підсистем ЕЕС. Дія РП носить системний характер і тому необхідно розглядати зміну їх параметрів як вплив не тільки на окремі параметри режиму, а й на загальносистемні характеристики, такі як сумарні втрати активної потужності в електричних мережах ЕЕС, втрати від транзитних перетоків потужності, розподіл навантаження між джерелами потужності, міжсистемні перетоки потужності. Останнє, по суті, стосується задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС [4, 5], а тому в рамках цієї задачі і доцільно визначати дію РП як реакцію на збурення в системі.

В даній статті розглядається метод оцінки чутливості сумарних втрат потужності в ЕЕС як критерію оптимальності її режимів та втрат потужності в окремих вітках електричних мереж до зміни навантаження у вузлах.

### Матриця коефіцієнтів чутливості втрат потужності

В [6] показано, що сумарні втрати потужності у вітках ЕЕС визначаються

$$\Delta \dot{S} = \mathbf{T} \dot{S}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{T}$  — матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності у вузлах  $\dot{S}$ .

У відповідності з (1) втрати потужності в  $i$ -й вітці ЕЕС

$$\Delta \dot{S}_i = \mathbf{T}_i \dot{S}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{T}_i = (\mathbf{U}_i \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i \mathbf{U}_d^{-1}$  —  $i$ -й рядок матриці  $\mathbf{T}$ , що відповідає  $i$ -й вітці;  $\mathbf{U}_i$  — транспонований вектор напруг у вузлах, включаючи і базисний;  $\mathbf{M}_{\Sigma i}$  —  $i$ -й стовпець матриці з'єднань віток у вузлах, включаючи і балансувальний;  $\hat{\mathbf{C}}_i$  —  $i$ -й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах по вітках схеми;  $\mathbf{U}_d$  — діагональна матриця напруг у вузлах, включаючи і базисний.

Якщо допустити, що коефіцієнти розподілу втрат потужності у вітках є незмінними, то зі зміною потужності у вузлах втрати потужності в  $i$ -й вітці також зміняться і будуть рівні

$$\delta \dot{S}_i = \dot{\mathbf{T}}_i \delta \dot{\mathbf{S}}, \quad (3)$$

де  $\delta \dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{S}}^{k+1}$  — зміна потужності у вузлах ЕЕС з переходом з  $k$ -го режиму до  $(k + 1)$ -го.

Якщо зміни відбулися тільки в одному вузлі —  $g$ -му, то приріст втрат потужності в  $i$ -й вітці від зміни потужності в  $g$ -му вузлі на  $\delta \dot{S}_g$  буде складати

$$\delta \dot{S}_{ig} = t_{ig} \delta \dot{S}_g. \quad (4)$$

З (4)

$$t_{ig} = \frac{\delta \dot{S}_{ig}}{\delta \dot{S}_g}. \quad (5)$$

З (5) у відповідності з [7] випливає, що  $t_{ig}$  є коефіцієнтом чутливості втрат потужності в  $i$ -й вітці до зміни потужності в  $g$ -му вузлі. Оскільки матриця  $\dot{\mathbf{T}}$  складається з елементів виду  $t_{ig}$ , то вона є матрицею чутливості, яка встановлює зв'язок між приростами втрат потужності у вітках ЕЕС і змінами потужності у вузлах. З визначення матриці чутливості в (2) видно, що коефіцієнти чутливості втрат залежать від параметрів системи (матриця струморозподілу  $\hat{\mathbf{C}}$ ), її топології (матриця з'єднань віток у вузлах  $\mathbf{M}_\Sigma$ ), а також від значень напруг у вузлах ЕЕС  $\dot{\mathbf{U}}$ .

На практиці в ЕЕС виникають задачі, коли у вузлах змінюються тільки активна або реактивна потужності. Якщо у вузлі змінюється тільки активна потужність ( $\delta Q_g = 0, \delta P_g \neq 0$ ), то з (5) випливає, що

$$t_{ig} = \frac{\delta P_{ig}}{\delta P_g} + j \frac{\delta Q_{ig}}{\delta P_g}. \quad (6)$$

І навпаки, якщо у вузлі змінюється тільки реактивна потужність (вмикається або вимикається джерело реактивної потужності,  $\delta Q_g \neq 0, \delta P_g = 0$ ), то з (5) маємо

$$t_{ig} = \frac{\delta Q_{ig}}{\delta Q_g} - j \frac{\delta P_{ig}}{\delta Q_g}. \quad (7)$$

Оскільки критерієм оптимальності нормальних режимів ЕЕС є втрати активної потужності, то як коефіцієнти чутливості інтерес в першу чергу викликають перша складова з (6) і друга складова з (7). Відповідно з них формуються матриці чутливості втрат активної потужності у вітках до змін у вузлах активної  $\mathbf{T}_{iP}$  і реактивної  $\mathbf{T}_{iQ}$  потужностей. Тоді втрати активної потужності в  $i$ -й вітці зі зміною режиму у вузлах визначаються

$$\delta P_{iP} = \mathbf{T}_{iP} \delta \mathbf{P}, \quad \delta P_{iQ} = \mathbf{T}_{iQ} \delta \mathbf{Q}, \quad (8)$$

де  $\delta \mathbf{P}$  і  $\delta \mathbf{Q}$  — зміни відповідно активної і реактивної потужностей у вузлах ЕЕС.

### Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках до напруги у вузлах ЕЕС

Як видно з (2) значення елементів матриці чутливості  $\mathbf{T}$  в загальному випадку залежать від напруги у вузлах  $\mathbf{U}$ , яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах. В цьому випадку зі зміною потужності у вузлах втрати потужності в  $i$ -й вітці зміняться і, на відміну від (3), будуть рівні

$$\delta \dot{S}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1} \dot{\mathbf{S}}^{k+1}$$

або, з врахуванням того, що  $\dot{\mathbf{S}}^{k+1} = \dot{\mathbf{S}}^k - \delta \dot{\mathbf{S}}$ , а  $\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^{k+1}$ ,

$$\delta \dot{S}_i = \delta \mathbf{T}_i \dot{S}^k + \mathbf{T}_i^{k+1} \delta \dot{S}. \quad (9)$$

Якщо зміни відбулися тільки в одному вузлі —  $g$ -му, то приріст втрат потужності в  $i$ -й вітці від зміни потужності в  $g$ -му вузлі на  $\delta \dot{S}_g$  у відповідності з (9) буде

$$\delta \dot{S}_{ig} = \delta t_{ig} \dot{S}_g^k + t_{ig}^{k+1} \delta \dot{S}_g. \quad (10)$$

З (10) коефіцієнт чутливості втрат потужності в  $i$ -й вітці до зміни потужності в  $g$ -му вузлі при переході від  $k$ -го до  $(k + 1)$ -го режиму з урахуванням зміни напруги у вузлах

$$t_{ig}^{k+1} = \frac{\delta \dot{S}_{ig}}{\delta \dot{S}_g} - \frac{\delta t_{ig}}{\delta \dot{S}_g} \dot{S}_g^k. \quad (11)$$

З порівняння (11) і (5) видно, що в загальному чутливість втрат потужності в  $i$ -й вітці до зміни потужності в  $g$ -му вузлі залежить також від чутливості коефіцієнта чутливості  $t_{ig} \frac{\delta t_{ig}}{\delta \dot{S}_g}$  до зміни потужності в  $g$ -му вузлі і від значення потужностей в режимі, що передує змінам,  $\dot{S}_g^k$ .

В (11) приріст коефіцієнта чутливості  $\delta t_{ig}$  можна знайти з визначення вектор-рядка матриці  $\mathbf{T}$

$$\delta \mathbf{T}_i = \mathbf{T}_i^k - \mathbf{T}_i^{k+1} = (\mathbf{U}_t^k \mathbf{M}_{\Sigma i}) \widehat{\mathbf{C}}_i (\mathbf{U}_\partial^k)^{-1} - (\mathbf{U}_t^{k+1} \mathbf{M}_{\Sigma i}) \widehat{\mathbf{C}}_i (\mathbf{U}_\partial^{k+1})^{-1}.$$

З урахуванням того, що  $\Delta \dot{U}_i^k = \mathbf{U}_t^k \mathbf{M}_{\Sigma i}$  і  $\Delta \dot{U}_i^{k+1} = \mathbf{U}_t^{k+1} \mathbf{M}_{\Sigma i}$  — відповідно падіння напруги на  $i$ -й вітці в  $k$ -му і  $(k + 1)$ -му режимах, останній вираз переписеться

$$\delta \mathbf{T}_i = \widehat{\mathbf{C}}_i \left[ \Delta \dot{U}_i^k (\mathbf{U}_\partial^k)^{-1} - \Delta \dot{U}_i^{k+1} (\mathbf{U}_\partial^{k+1})^{-1} \right] = \widehat{\mathbf{C}}_i \Delta \dot{U}_i^k (\mathbf{U}_\partial^k)^{-1} (1 - \sigma_{\Delta i} \sigma_u^{-1}). \quad (12)$$

де  $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta \dot{U}_i^{k+1}}{\Delta \dot{U}_i^k}$  — відносна зміна падіння напруги на  $i$ -й вітці зі зміною навантаження у вузлах;

$\sigma_u = \mathbf{U}_\partial^k (\mathbf{U}_\partial^{k+1})^{-1}$  — діагональна матриця відносної зміни напруги у вузлах зі зміною навантаження в системі.

Як видно з (12) приріст коефіцієнта чутливості  $\delta t$  залежить тільки від зміни напруги у вузлах при збуреннях в них. Наприклад, зі зміною навантаження тільки в  $g$ -му вузлі приріст коефіцієнта чутливості в  $i$ -й вітці

$$\delta t_{ig} = c_{ig} \frac{\Delta \dot{U}_i^k}{\dot{U}_g^k} \left( 1 - \frac{\sigma_{\Delta i}}{\sigma_{ug}} \right),$$

де  $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta \dot{U}_i^{k+1}}{\Delta \dot{U}_i^k} = \frac{\dot{U}_p^{k+1} - \dot{U}_q^{k+1}}{\dot{U}_p^k - \dot{U}_q^k}$  ( $p$  і  $q$  — номери вузлів, що обмежують  $i$ -ту вітку);  $\sigma_{ug} = \frac{\dot{U}_g^{k+1}}{\dot{U}_g^k}$ .

Отримані формули приростів коефіцієнтів чутливості  $\delta \mathbf{T}_i$  можуть використовуватися для уточнення чутливості втрат потужності у вітках схеми ЕЕС тоді, коли результати оцінки і ранжування віток за (5) виявились достатньо близькими, і це ускладнює прийняття оптимальних рішень.

### Висновки

Чутливість втрат потужності у вітках схеми ЕЕС залежить від параметрів системи, її топології та значень напруги у вузлах. Запропонований метод оцінки чутливості втрат потужності до збурень у вузлах з використанням матриці чутливості дозволяє визначити оптимальну послідовність коригуючих впливів на режими ЕЕС. Матриця чутливості втрат потужності до збурень у вузлах може визначатися за результатами розрахунків ustalених режимів ЕЕС або за результатами телевимірювань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Абраменкова Н. А., Воропай Н. И., Заславская Т. Б. Структурный анализ электроэнергетических систем в задачах моделирования и синтеза. — Новосибирск: Наука, 1990. — 224 с.
2. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / Войтов О. Н., Воропай Н. И., Гамм А. З. и др. — Новосибирск: Наука, 1999. — 250 с.
3. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 131 с.
4. Баринов В. А., Савалов С. А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 440 с.
5. Лежнюк П. Д., Кулик В. В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 188 с.
6. Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Бурикін О. Б. Функціональна залежність складових втрат потужності у вітках електричної мережі від потужності у вузлах // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2005. — № 4. — С. 58—62.
7. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. — М.: Наука, 1981. — 464 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем

Надійшла до редакції 31.10.07  
Рекомендована до друку 16.11.07

*Лежнюк Петро Дем'янович* — завідувач кафедри, *Лесько Владислав Олександрович* — аспірант.  
Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет