

УДК 621.311

П. Д. ЛЕЖНЮК, В. О. ЛЕСЬКО, В. А. ВИДМИШ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

ВПЛИВ ВИБОРУ БАЛАНСУЮЧОГО ВУЗЛА НА ЧУТЛИВІСТЬ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЕС

Анотація. У статті розглянуто питання впливу вибору місця розташування балансуєчого вузла на зміну втрат потужності. Показано залежність чутливості втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи (ЕЕС) від параметрів системи, її топології, значень напруги у вузлах, а також розрахункових умов, зокрема місця розташування балансуєчого вузла.

Ключові слова: електроенергетична система, чутливість втрат потужності, балансуєчий вузол.

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос влияния выбора места расположения балансирующего узла на изменение потерь мощности. Показана зависимость чувствительности потерь мощности в ветках схемы электроэнергетической системы (ЭЭС) от параметров системы, ее топологии, значений напряжения, в узлах, а также расчетных условий, в частности места расположения балансирующего узла.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, чувствительность потерь мощности, балансирующий узел.

Abstract. In the article a question is considered in relation to influence of choice of place of location of balancing knot on changing of losses of power. Dependence of sensitiveness of losses of power is rotined in the branches of chart of the electroenergy system (EES) from the parameters of the system, its topology, values of tension, in knots, and also calculation terms, in particular places of location of balancing knot.

Keywords: electroenergy system, sensitiveness of losses of power, balancing knot.

Вступ

У результаті переходу до моделі двосторонніх договорів та балансуєчого ринку застосування нових ринкових принципів ціноутворення відбудеться в усіх сегментах майбутнього ринку. Основні обсяги енергії будуть реалізовуватися за двосторонніми договорами, наприклад, між виробниками та постачальниками, ціна на які буде визначатися двосторонніми домовленостями сторін. Що буде стимулюватиме учасників ринку до підвищення ефективності своєї діяльності, скорочення неефективних витрат та підвищення якості надання послуг [1].

Запровадження платежів за балансування, що базуються на фактичних витратах для досягнення балансу, стимулюватиме зростання наявної робочої потужності та створення достатніх резервів потужності. Перспективна модель ринку також передбачає перехід від солідарної до індивідуальної відповідальності за створення небалансу в системі та платежів за нього. Таким чином, кожен суб'єкт нестиме «економічну» відповідальність за свої небаланси, а отже намагатиметься звести їх до мінімуму. Такий механізм забезпечить не лише відшкодування витрат на послуги з балансування, а й сприятиме покращенню режимів роботи ОЕС України та її складових [1].

Розрахунки установлених режимів (УР) та поточкорозподілу в електричних мережах енергосистеми мають значний вплив при розв'язку задач, пов'язаних з проектуванням і експлуатацією електроенергетичних систем (ЕЕС) для "нового" ринку. Результати цих розрахунків можуть використовуватися при плануванні режимів і оперативному керуванні ЕЕС, а також бути базою для оптимізації режимів, аналізу стійкості і надійності [2–4].

З метою спрощення і пониження розмірності задачі оптимізації режимів енергосистем на кожному рівні територіальної і часової ієрархії диспетчерського керування здійснюється роздільне вирішення задачі оптимального розподілу активних навантажень і оптимізації режиму за напругою і реактивною потужністю у вузлах спостереження для прийняття керуючих дій. Крім того оптимізація режимів може здійснюватися по окремих підсистемах зі своїми балансуєчими вузлами (БВ). При об'єднанні підсистем для розрахунків з метою досягнення загальносистемного ефекту виникають небаланси в точках примикання підсистем. Часто ці небаланси співрозмірні з ефектом від оптимізації потоків потужності в ЕЕС [5, 6]. Тому науковий і практичний інтерес представляє дослідження питання впливу вибору БВ на результати оптимізації режиму енергосистем за активною потужністю, з врахуванням чутливості зміни втрат потужності в системі при зміні БВ.

Актуальність

Одним із видів розрахункових умов та зміни параметрів режиму є зміна балансуєчого вузла. В балансуєчому вузлі приймається фіксоване значення напруги, а також здійснюється балансування вузлових потужностей та втрат в елементах ЕЕС. Оскільки змінюється точка балансу вузлових потужностей, отже, змінюються перетоки потужності й втрати активної та реактивної потужності в системі. При цьому більшість існуючих методів розрахунку вважають те, що величина напруги базисного вузла, як вихідна інформація, повинна бути заданою та фіксованою. В дійсності, напруга базисного вузла протягом доби змінюється, і її величину ми точно не знаємо. Тому напруга задається апріорно, виходячи з аналітичних та інтуїтивних міркувань та емпіричних оцінок, які вносять в результат розв'язку задачі неточність та похибку. В деяких випадках ці похибки можуть бути значними та спотворювати реальну картину поточкорозподілу, і, як наслідок, привести до додаткових втрат активної потужності в мережах ЕЕС. Причому такі відхилення мають методичний характер. Тому вибір балансуєчого вузла та відхилення напру-

ги в ньому впливає на розрахункові умови, а отже постає задача в дослідженні чутливості результатів розрахунку оптимальних режимів ЕЕС до зміни вибору балансуєчого вузла.

Мета дослідження

Метою даної роботи є визначення чутливості втрат потужності при зміні балансуєчого вузла та напруги в ньому на результати розрахунків втрат потужності як в системі в цілому так і в окремих її елементах.

Задача

Задача - враховувати чутливість зміни втрат потужності у вітках до вибору балансуєчого вузла й напруги в ньому, при розрахунку ustalених режимів ЕЕС для підвищення ефективності заходів по зменшенню втрат потужності в неоднорідних ЕЕС.

Вплив місця розташування БВ на результати розрахунку балансу потужностей

Вузлове рівняння ВР у формі балансу потужностей у матричній формі з врахуванням БВ має наступний вигляд [2]:

$$\dot{Y}_y \dot{U} = \sqrt{3} \dot{I} - \dot{Y}_\delta U_\delta, \quad (1)$$

де \dot{U} – вектор-стовбець напруги у вузлах системи; \dot{Y}_y – матриця вузлових провідностей порядку N ; \dot{I} – вектор-стовбець задаючих струмів у вузлах системи; \dot{Y}_δ – фрагмент матриці вузлових провідностей, що вміщують стовпці, які відповідають балансуєчому вузлу; U_δ – напруга балансуєчого вузла.

Даний вираз домножуємо на вектор напруги \dot{U}_δ із комплексно-спряженими діагональними елементами та розпишемо усі величини через їх активні і реактивні складові:

$$\dot{S} = \sqrt{3} \hat{U}_a \dot{I} = P - jQ; \quad \dot{U} = U' + jU'';$$

$$\dot{Y}_y = G_y - jB_y; \quad \dot{Y}_a = G_a - jB_a,$$

де P і Q – вектор-стовпці відповідно активної і реактивної складових потужностей у вузлах; U' і U'' – вектор-стовпці дійсної і уявної складових вектора-стовпця шуканої напруги у вузлах системи; G_y і B_y – відповідно активна та реактивна складові матриці вузлових провідностей \dot{Y}_y ; G_δ , B_δ – відповідно активна та реактивна складові матриці вузлових провідностей балансуєчого вузла.

Таким чином, отримуємо:

$$(U'_\delta - jU''_\delta) \cdot (G_y - jB_y) \cdot (U' + jU'') = P - jQ - (U'_\delta - jU''_\delta) \cdot (G_\delta - jB_\delta) \cdot U_\delta. \quad (2)$$

Розкриємо другі та треті дужки справа та зліва формули (2). Маємо, що:

$$\begin{aligned} (U'_\delta - jU''_\delta) \cdot (G_y U' - jB_y U' + jG_y U'' + B_y U'') = \\ = P - jQ - (U'_\delta G_\delta - jU''_\delta B_\delta - jU''_\delta G_\delta - U''_\delta B_\delta) \cdot U_\delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Розділимо дійсну і уявну складову виразу (3):

$$\begin{cases} U'_\delta \cdot (G_y U' + B_y U'') - U''_\delta \cdot (B_y U' - G_y U'') = P - (U'_\delta G_\delta - U''_\delta B_\delta) \cdot U_\delta; \\ U'_\delta \cdot (B_y U' - G_y U'') + U''_\delta \cdot (G_y U' + B_y U'') = Q - (U'_\delta B_\delta + U''_\delta G_\delta) \cdot U_\delta. \end{cases} \quad (4)$$

В розгорнутому вигляді даний вираз можна записати:

$$\left. \begin{aligned} U'_k \sum_{j=1}^N (g_{kj} U'_j + b_{kj} U''_j) - U''_k \sum_{j=1}^N (b_{kj} U'_j - g_{kj} U''_j) &= P_k - (g_{k\delta} U'_k - b_{k\delta} U''_k) U_\delta; \\ U'_k \sum_{j=1}^N (b_{kj} U'_j - g_{kj} U''_j) + U''_k \sum_{j=1}^N (g_{kj} U'_j + b_{kj} U''_j) &= Q_k - (b_{k\delta} U'_k + g_{k\delta} U''_k) U_\delta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де b_{kj} і g_{kj} – елементи активної та реактивної складових матриці вузлових провідностей.

Вузлове рівняння (ВР) у формі балансу потужностей має наступний вигляд у полярній системі координат:

$$\left. \begin{aligned} U_k \sum_{j=1}^N [g_{kj} \cos(\varphi_k - \varphi_j) - b_{kj} \sin(\varphi_k - \varphi_j)] U_j &= P_k - (g_{k\bar{0}} \cos(\varphi_k) - b_{k\bar{0}} \sin(\varphi_k)) U_k U_{\bar{0}}; \\ U_k \sum_{j=1}^N (g_{kj} \sin(\varphi_k - \varphi_j) + b_{kj} \cos(\varphi_k - \varphi_j)) U_j &= Q_k - (g_{k\bar{0}} \sin(\varphi_k) + b_{k\bar{0}} \cos(\varphi_k)) U_k U_{\bar{0}}, \end{aligned} \right\}$$

$\varphi_k - \varphi_j$ - різниця початкових фаз напруг між k-им та j-им вузлами.

Аналізуючи вище отримані формули бачимо, що при зміні напруги та місця розташування БВ змінюються й результати розрахунку балансу потужностей, а отже втрати у системі.

Визначення матриці коефіцієнтів чутливості втрат потужності при зміні розрахункових умов

В статті розглядається метод оцінки чутливості сумарних втрат потужності в неоднорідних ЕЕС як критерій оптимальності режимів та втрат потужності в окремих вітках електричних мереж до зміни балансуєчого вузла. За ідеєю запропонований тут підхід схожий з методом використання відносних приростів технологічних втрат електроенергії (ТРЕ) на шляху в електричній мережі від джерела електроенергії до споживача [7, 8].

Як відомо з [9] якщо коефіцієнти розподілу втрат потужності у вітках є незмінними, то при зміні потужності у вузлах втрати потужності в i-й вітці також зміняться і будуть рівні:

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i \delta \dot{\mathbf{S}}, \quad (6)$$

де $\delta \dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{S}}^{k+1}$ – вектор зміни потужності у вузлах ЕЕС при переході з k-го режиму до k+1-го.

Введемо позначення:

$$\dot{\mathbf{T}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_t \dot{\mathbf{M}}_{\Sigma ki}) \hat{\mathbf{C}}_{ki} \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}, \quad (7)$$

де $\dot{\mathbf{T}}_i$ – вектор-рядок матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності для i-тої вітки від потужності вузлів схеми, який залежить від топології схеми та напруги у вузлах з урахуванням балансуєчого; $\dot{\mathbf{U}}_t$ – транспонований вектор напруг у вузлах включаючи і балансувальні (тут і далі індекс “t” означає, що матриця або вектор є транспонованими). $\dot{\mathbf{U}}_d$ – діагональна матриця напруг у вузлах без балансувальних вузлів, $\dot{\mathbf{M}}_{\Sigma kt}$ – матриця зв’язків віток у вузлах, що за структурою подібна до першої матриці з’єднань $\dot{\mathbf{M}}_{\Sigma t}$, але в якій замість значень “-1” для вузлів кінця віток з трансформаторами знаходяться їх коефіцієнти трансформації; $\hat{\mathbf{C}}_{ki}$ – i-й вектор-рядок матриці розподілу струмів у вузлах $\dot{\mathbf{J}}$ по вітках схеми з урахуванням коефіцієнтів трансформації;

Так як при зміні балансуєчого вузла змінюється напруга у вузлах, отже й змінюються прирости втрат потужності у вітках, що впливає на сумарні втрати. 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 $\delta \dot{\mathbf{S}}_g$ буде складати

$$\delta \dot{\mathbf{S}}_{ig} = \dot{\mathbf{t}}_{ig} \delta \dot{\mathbf{S}}_g. \quad (8)$$

З (8) знайдемо $\dot{\mathbf{t}}_{ig}$

$$\dot{\mathbf{t}}_{ig} = \frac{\delta \dot{\mathbf{S}}_{ig}}{\delta \dot{\mathbf{S}}_g}. \quad (9)$$

З (9) у відповідності з [6, 10] слідує, що $\dot{\mathbf{t}}_{ig}$ 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 $\dot{\mathbf{t}}_{ig}$, то вона є матрицею чутливості, яка встановлює зв’язок між приростами втрат потужності у вітках ЕЕС і змінами потужності у вузлах.

Коефіцієнти чутливості втрат потужності у вітках до напруги у вузлах ЕЕС при зміні БВ

Як видно з (7) значення елементів матриці чутливості $\dot{\mathbf{T}}$ в загальному випадку залежать від напруги у вузлах $\dot{\mathbf{U}}$, яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах та напруги балансуєчого вузла. В цьому випадку при зміні балансуєчого вузла втрати потужності в і-й вітці зміняться і, на відміну від (6), будуть рівні:

$$\delta \Delta \dot{\mathbf{S}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k \dot{\mathbf{S}}^k - \dot{\mathbf{T}}_i^b \dot{\mathbf{S}}^b$$

та з врахуванням того, що навантаження не змінилося $\dot{\mathbf{S}}^b = \dot{\mathbf{S}}^k = \dot{\mathbf{S}}$, а $\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^b$, отримуємо:

$$\delta \Delta \dot{\mathbf{S}}_i = \delta \dot{\mathbf{T}}_i \dot{\mathbf{S}}. \quad (10)$$

$\dot{\mathbf{T}}_i$ складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах і-тої вітки складає протікання по ній потужності до кожного вузла. $\dot{\mathbf{T}}_i^k$ - матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми при k-му БВ, $\dot{\mathbf{T}}_i^b$ - матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми при b-му БВ.

Якщо відбулася зміна БВ з k-го на b-тий, то приріст втрат потужності в і-й вітці від зміни БВ у відповідності з (10) буде такою:

$$\delta \Delta \dot{\mathbf{S}}_i = \delta t_i \dot{\mathbf{S}}. \quad (11)$$

З (11) приріст коефіцієнта чутливості δt_i можна знайти з визначення вектор-рядка матриці $\dot{\mathbf{T}}$:

$$\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \dot{\mathbf{T}}_i^k - \dot{\mathbf{T}}_i^b = (\dot{\mathbf{U}}_i^k \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_\delta^k)^{-1} - (\dot{\mathbf{U}}_i^b \mathbf{M}_{\Sigma i}) \hat{\mathbf{C}}_i (\dot{\mathbf{U}}_\delta^b)^{-1} = \hat{\mathbf{C}}_i (\delta \dot{\mathbf{U}}_{i\delta}^k - \delta \dot{\mathbf{U}}_{i\delta}^b). \quad (12)$$

В діагональній матриці $\delta \dot{\mathbf{U}}_{3a}$ її елементи визначаються як

$$\delta \dot{\mathbf{U}}_{3a} = \frac{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i}{\dot{\mathbf{U}}_j}, \quad j = \overline{1, m},$$

де $\Delta \dot{\mathbf{U}}_i = \dot{\mathbf{U}}_i \mathbf{M}_{\Sigma i}$ - спад напруги в і-й вітці схеми.

Значення елементів матриці $\dot{\mathbf{T}}$ дає можливість визначити які вітки найбільше реагують на зміну напруги у вузлах яка, в свою чергу, також залежить від потужностей навантаження і генерування у вузлах.

З врахуванням того, що $\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^k = \dot{\mathbf{U}}_i^k \mathbf{M}_{\Sigma i}$ і $\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^b = \dot{\mathbf{U}}_i^b \mathbf{M}_{\Sigma i}$ - відповідно падіння напруги на і-й вітці при k-му і b-му БВ, вираз (12) переписеться:

$$\delta \dot{\mathbf{T}}_i = \hat{\mathbf{C}}_i [\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^k (\dot{\mathbf{U}}_\delta^k)^{-1} - \Delta \dot{\mathbf{U}}_i^b (\dot{\mathbf{U}}_\delta^b)^{-1}] = \hat{\mathbf{C}}_i \Delta \dot{\mathbf{U}}_i^k (\dot{\mathbf{U}}_\delta^k)^{-1} (1 - \sigma_{\Delta i} \sigma_u^{-1}). \quad (13)$$

У виразі (13): $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^b}{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^k}$ - відносна зміна напруги на і-й вітці при зміні БВ; $\sigma_u = \dot{\mathbf{U}}_\delta^k (\dot{\mathbf{U}}_\delta^b)^{-1}$ -

діагональна матриця відносної зміни напруги у вузлах при зміні БВ.

Як видно з (13) приріст коефіцієнта чутливості δt_i залежить тільки від зміни напруги у вузлах при різних розрахункових умовах. Наприклад, при зміні БВ приріст коефіцієнта чутливості в і-й вітці

$$\delta t_i = c_i \frac{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^k}{\dot{\mathbf{U}}_i^k} \left(1 - \frac{\sigma_{\Delta i}}{\sigma_u}\right),$$

де $\sigma_{\Delta i} = \frac{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^b}{\Delta \dot{\mathbf{U}}_i^k} = \frac{\dot{\mathbf{U}}_p^b - \dot{\mathbf{U}}_q^b}{\dot{\mathbf{U}}_p^k - \dot{\mathbf{U}}_q^k}$ (р і q - номери вузлів, що обмежують і-ту вітку); а $\sigma_u = \frac{\dot{\mathbf{U}}^b}{\dot{\mathbf{U}}^k}$.

Тоді, з врахуванням останнього виразу, чутливість втрат для і-тої вітки по відношенню до втрат в ній, розрахованих до зміни БВ визначиться як:

$$t_i = \frac{\Delta S_i^b}{\Delta S_i^k} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{T_{ij}^b S_j^b}{T_{ij}^k S_j^k} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{T_{ij}^b}{T_{ij}^k} = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\Delta \dot{U}_i \cdot \hat{C}_{ij}^b \cdot (\dot{U}_j^b)^{-1}}{\Delta \dot{U}_i \cdot \hat{C}_{ij}^k \cdot (\dot{U}_j^k)^{-1}} = \sum_{j=1}^{n-1} \sigma_{\Delta i} \cdot \sigma_{b/k}^{ij} \cdot \sigma_{ij}^{-1},$$

де $\sigma_{b/k}^{ij} = \frac{\hat{C}_{ij}^b}{\hat{C}_{ij}^k}$ – відношення коефіцієнтів струморозподілу відповідно при k – му та b – му балансує-чому вузлі.

Отримані формули приростів коефіцієнтів чутливості δT_i можуть використовуватися для уточнення чутливості втрат потужності у вітках схеми ЕЕС тоді, коли результати оцінки і ранжування віток не виявились достатньо близькими і це ускладнює прийняття оптимальних рішень при зміні розрахункових умов.

Висновки

Чутливість втрат потужності у вітках схеми ЕЕС залежить від параметрів системи, її топології, значень напруги у вузлах, а також розрахункових умов, зокрема місця розташування балансуєчого вузла. Запропонований метод оцінки чутливості втрат потужності при зміні БВ або напруги в них, з використанням матриці чутливості дозволяє визначити оптимальну послідовність корегуючих впливів регулюючих пристроїв на режими ЕЕС.

Список літератури

1. Доповідь. Голови Національної комісії регулювання електроенергетики України. Кальченка В. М. Перехід до нової моделі ринку електроенергії в Україні.
2. Идельчик В. И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем. / Виталий Исаакович Идельчик – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. Аюев Б. И. Анализ эффективности вычислительных моделей расчета установившихся режимов электрических систем / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, В. Г. Неуймин // Электричество. – 2008. – №8. – С. 2–13.
4. Жуков Л. А. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчетов / Л. А. Жуков, И. П. Стратан. – М.: Энергия, 1979. – 416 с
5. Горнштейн В. М. Методы оптимизации режимов энергосистем / [Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др.] ; под ред. Горнштейна В. М. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.
6. Анализ неоднородностей электроэнергетических систем / [Войтов О. Н., Воропай Н. И., Гамм А. З. и др.]. – Новосибирск: Наука, 1999. – 250 с.
7. Щербина Ю. В. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях / Щербина Ю. В., Бойко Н. Д., Бутенко А. Н. – К.: Техніка, 1981. – 104 с.
8. Экономия электроэнергии в электрических сетях / [Магда И. И., Меженный С. Я., Сулейманов В. Н. и др.] ; под ред. Н. А. Качановой и Ю. В. Щербины. – К.: Техніка, 1986. – 167 с.
9. Лежнюк П. Д. Чутливість втрат потужності у вітках схеми електроенергетичної системи до збурень у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. О. Лесько // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 2007. – №6. – С. 63–66.
10. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

Відомості про авторів

Лежнюк Петро Дем'янович – д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598377, lpd@inbox.ru;

Лесько Владислав Олександрович – к.т.н., доцент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598245, leskovlad@mail.ru;

Видмиш Володимир Андрійович – асистент кафедри електричних станцій та систем, тел.: (0432)-598245, prof_vydmysh@mail.ru.