

УДК 621.316

П. Д. ЛЕЖНЮК (д-р техн.наук, проф.), В. В. НЕТРЕБСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет
lpd@inbox.ru

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ

Показана можливість використання здатності до самооптимізації електричної системи завдяки принципу найменшої дії для розв'язання задач найвигіднішого розподілу активної і реактивної потужності між джерелами енергії.

Джерела активної і реактивної потужності, оптимізація, принцип найменшої дії.

Вступ і постановка задачі. Для розв'язування задачі найвигіднішого розподілу навантаження між електричними станціями (ЕС) використовуються чисельні методи, як правило, градієнтні [1]. При цьому виникають проблеми збіжності обчислювального процесу. Особливо, коли ЕС в енергосистемі різнотипні і кількість їх значна. В [2] показано, що задача оптимізації нормальних режимів електроенергетичної системи (ЕЕС) може бути зведена до розрахунку економічного струморозподілу (за заступною R-схемою) з наступним введенням режиму в допустиму область. Як елемент електроенергетичної системи електрична станція в цьому обчислювальному процесі представляється економічним опором, який визначається

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i)U_i^2 y_i}{P_i^2 c}, \quad (1)$$

де $B_i(P_i)$ – витратна характеристика і-ої станції; P_i – потужність і-ї станції; U_i – напруга на шинах і-ї станції; y_i – ціна тони умовного палива на і-й станції; c – вартість 1 кВт·год втрат електроенергії.

За опорами R_{ei} розміщуються джерела струму і в ітераційному процесі обчислень досягається баланс потужностей в ЕЕС і виконання всіх обмежень на параметри режиму [3]. Недоліком такого розрахунку оптимального режиму ЕЕС з лінеаризацією є наявність додаткового циклу в процесі обчислень оптимальних параметрів режиму системи і навантаження ЕС.

Метою даної роботи є розроблення методу комплексної оптимізації режимів ЕЕС з представленням навантаження джерел активної і реактивної електроенергії в процесі розрахунку потужностями.

Оптимізація режиму ЕЕС по реактивній потужності і нарузі. За допущення, що генерування реактивної потужності не зв'язане з будь-якими затратами, метою оптимального розподілу реактивної потужності може бути зменшення втрат активної потужності в ЕЕС. Будемо вважати, що активні потужності задані і незмінні. Тоді втрати залежать тільки від реактивної потужності. Задача оптимізації режиму ЕЕС по реактивній потужності записується як задача мінімізації втрат активної потужності [4]:

$$V_Q = f(Q, U) \rightarrow \min, \quad (2)$$

за умов балансу реактивної потужності в системі

$$G = \sum_{i=1}^q Q_i - \sum Q_n - \Delta Q = 0, \quad (3)$$

де $\sum_{i=1}^q Q_i$ – сумарне генерування реактивної потужності; q – кількість джерел реактивної потужності (ДРП);

$\sum Q_n$ – сумарне навантаження, значення якого є постійним; ΔQ – втрати реактивної потужності в елементах системи.

Оптимальні значення навантаження джерел реактивної потужності знаходяться методом Лагранжа:

$$L = V_Q + \lambda G \rightarrow \min.$$

Відповідно умови оптимального розподілу реактивної потужності будуть [4]:

$$\frac{\partial V_Q / \partial Q_i}{1 - \partial \Delta Q / \partial Q_i} = idem. \quad (4)$$

Затрати від втрат електроенергії, викликаних потоками реактивної потужності в елементі системи з опором R_e на відрізок часу T , визначаються як

$$Z_{Qi} = V_{Qi} T c = \frac{Q_i^2}{U_i^2} R_{ei} T c. \quad (5)$$

Електроенергія на покриття цих втрат виробляється на електричних станціях. Витрати на її виробництво визначаються:

$$Z(V_{Qi}) = B_j(P_j) u_j T. \quad (6)$$

З (5) і (6) маємо, що економічний опір, вартість втрат електроенергії в якому еквівалентна затратам на її виробництво на станції, розраховується за формулою:

$$R_{ei} = \frac{B_j(P_j) U_i^2 u_j}{Q_i^2 c}. \quad (7)$$

Якщо станція в ЕЕС задається не витратною характеристикою $B_j(P_j)$, а відпускною ціною електроенергії з її шин β_j , то відповідно економічний опір визначається як

$$R_{ei} = \frac{P_j U_i^2 \beta_j}{Q_i^2 c}, \quad (8)$$

де P_j – потужність, що відпускається з шин станції на покриття втрат в електричній мережі від потоків реактивної потужності; β_j – вартість 1 кВт · год електроенергії, відпущеної з шин j -ої станції.

Якщо джерела реактивної потужності умовно розмістити за розрахованими таким чином опорами, то можна замінити визначення сумарних витрат на покриття втрат електроенергії від перетоків реактивної потужності розрахунком поточкорозподілу в заступній схемі ЕЕС, складеній тільки з активних опорів її елементів. Розрахований поточкорозподіл буде відповідати мінімуму витрат на генерування і транспортування реактивної потужності в ЕЕС. Покажемо це.

Задачу оптимізації режиму ЕЕС по реактивній потужності сформулюємо таким чином:

$$V_{Q\Sigma} = \sum_{i=1}^q 3R_{ei} I_i^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

за умов балансу реактивної потужності в системі

$$\sum_{i=1}^s Q_i - \sum Q_n - \Delta Q = 0. \quad (10)$$

Запишемо функцію Лагранжа для (9)–(10):

$$L = \sum_{i=1}^q 3R_{ei} I_i^2 + \lambda (\sum_{i=1}^q Q_i - \sum Q_n - \Delta Q)$$

Після підстановки значень економічних опорів згідно (8) з врахуванням того, що в (8) $P_j = V_{Qi}$,

$$L = \sum_{i=1}^q \frac{V_{Qi} \beta}{c} + \lambda (\sum_{i=1}^q Q_i - \sum Q_n - \Delta Q).$$

З умов $\partial L / \partial Q_i = 0, i = \overline{1, q}$ отримаємо критерій оптимального навантаження джерел реактивної потужності:

$$\frac{\partial V_Q / \partial Q_i}{1 - \partial \Delta Q / \partial Q_i} \frac{\beta}{c} = idem. \quad (11)$$

Критерій оптимальності навантаження ДРП отриманий за умови, що вартість виробленої на станціях електроенергії, яка йде на покриття втрат в ЕЕС, β і вартість втрат електроенергії в системі c є постійними на інтервалі часу T , тобто, $\beta/c = \text{const}$. За таких умов дії за критеріями оптимальності (11) і (4) не відрізняються. Якщо ж вартості електроенергії β і c однакові, то в цьому випадку маємо повне співпадіння критеріїв оптимальності (11) і (4).

Таким чином, задача оптимального розподілу навантаження між джерелами реактивної потужності може бути зведена до розрахунку ustalеного режиму ЕЕС з заступною R-схемою, в якій ДРП представляються нелінійними економічними опорами. Значення їх залежить від вибраного критерію оптимальності. Це можуть бути відповідно значення R_e , визначені за формулами (7) або (8).

Комплексна оптимізація режимів ЕЕС. Розглянемо випадок роботи s джерел активної і реактивної потужності (це можуть бути електростанції або окремі агрегати) та q джерел реактивної потужності в ЕЕС з сумарним навантаженням $\sum P_n$ і $\sum Q_n$. Цільову функцію представимо як суму затрат на виробництво активної потужності, в тому числі на покриття втрат потужності в електричних мережах. Тоді задача оптимізації формулюється [1]:

$$Z = \sum_{i=1}^s u_i B_i(P_i) \rightarrow \min \quad (12)$$

за умов балансу потужностей в системі

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^s P_i - \sum P_n - V &= 0, \\ \sum_{i=1}^s Q_i + \sum_{j=1}^q Q_j - \sum Q_n - \Delta Q &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Подамо витрати на виробництво електроенергії як вартість втрат електроенергії в активному опорі R_{ei} за такий же проміжок часу. Тоді при роботі станції з постійним навантаженням на проміжку часу T можна записати:

$$Z = \sum_{i=1}^s u_i B_i(P_i) = \sum_{i=1}^s V_i c + \sum_{j=1}^q V_{Q_j} c \rightarrow \min \quad (14)$$

за умов балансу потужностей в системі

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^s P_i - \sum P_n - V &= 0, \\ \sum_{i=1}^s Q_i + \sum_{j=1}^q Q_j - \sum Q_n - \Delta Q &= 0. \end{aligned} \right\}$$

В (14) витрати, еквівалентні затратам на виробництво електроенергії на i -й станції, визначаються:

$$B_i(P_i) u_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot R_{ei} c.$$

З останнього виразу визначається опір, вартість втрат в якому еквівалентна затратам на виробництво активної потужності на i -й станції, включаючи і активну потужність, що йде на покриття втрат від потоків реактивної потужності від i -ої станції Q_i :

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i) U_i^2 u_i}{(P_i^2 + Q_i^2) c}. \quad (15)$$

Якщо розмістити джерела електричної енергії за опорами, розрахованими за (15), то таким чином оптимізуються витрати на виробництво електроенергії для покриття навантаження ЕЕС $\sum P_i$ і $\sum Q_i$, а також втрат активної потужності від перетоків активної і реактивної потужностей в системі. Якщо при цьому в розрахунковій моделі ЕЕС електричні мережі представлені заступною R-схемою (див. рис. 1), то оптимізуються також сумарні втрати потужності в ЕЕС. Тобто досягається комплексна оптимізація ЕЕС по активній і реактивній потужностях.

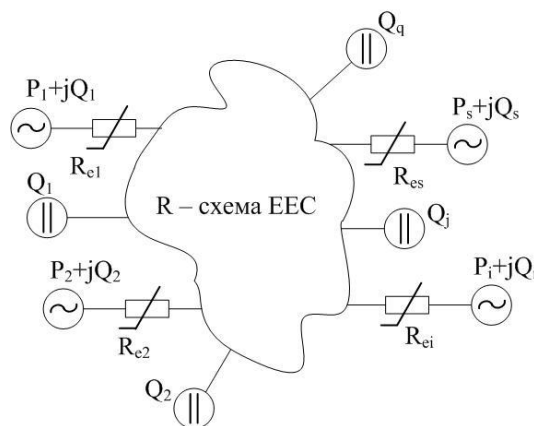


Рисунок 1 - Заступна схема ЕЕС з економічними опорами для комплексної оптимізації

Задачі оптимізації нормальних режимів ЕЕС за напругою і реактивною потужністю (2) та комплексної оптимізації (12) розглянуті без врахування вартості генерування реактивної потужності на станціях та джерелами реактивної потужності. В експлуатаційних задачах ця вартість визначається втратами активної потужності на станціях і в ДРП, яка витрачається на генерування реактивної потужності [5, 6].

Для врахування втрат на генерування реактивної потужності на відповідну величину збільшується R_e станції. Втрати активної потужності в генераторах станції визначаються за формулою [6]:

$$\Delta P_r = \frac{Q}{Q_{ном}} D_1 + \frac{Q^2}{Q_{ном}^2} D_2,$$

де D_1 і D_2 – постійні коефіцієнти, які залежать від типу і потужності генератора.

Отримані ΔP_f додаються в (8) або (15) до потужності станції i , відповідно, збільшується R_e .

Якщо оптимізація режиму ЕЕС здійснюється з врахуванням втрат активної потужності в ДРП, то останні розраховуються за формулою [6]:

$$\Delta P_{\text{ДРП}} = p_{\text{вт}} Q,$$

де $p_{\text{вт}}$ – питомі втрати активної потужності в ДРП.

Для врахування цих втрат при оптимізації режиму ЕЕС ДРП розміщається за економічним опором, значення якого визначається за формулою:

$$R_{e \text{ ДРП } i} = \frac{p_{\text{вт}} U_i^2}{Q_i}.$$

Таким чином при оптимізації нормальних режимів ЕЕС враховуються втрати активної потужності на генерування реактивної потужності. Щодо решти обмежень, то балансні обмеження і обмеження на значення P і Q станцій і ДРП враховуються в процесі розрахунку усталеного режиму.

Висновки.

1. Процес оптимального розподілу навантаження між електростанціями в енергосистемі можливо моделювати з використанням принципу найменшої дії. При цьому станція в моделі представляється активним опором, вартість втрат електроенергії в якому дорівнює витратам на виробництво такої ж кількості електроенергії на станції. Визначення оптимального навантаження станцій зводиться до розрахунку усталеного режиму ЕЕС за її заступною R-схемою.

2. Задача оптимального розподілу навантаження між джерелами реактивної потужності може бути зведена до розрахунку усталеного режиму ЕЕС з заступною R-схемою, в якій ДРП представляються нелінійними економічними опорами. Значення їх залежить від того, як компенсуються на електростанціях втрати електроенергії в ЕЕС від потоків реактивної потужності. Критерій оптимальності ЕЕС по реактивній потужності міняється в залежності від того як представлені в розрахунковій моделі електростанції – витратними характеристиками чи вартістю відпущеної з шин електроенергії.

3. Метод роздільної оптимізації режимів ЕЕС по активній і реактивній потужності з використанням ПНД, що зводиться до розрахунків режимів за заступною R-схемою, може бути поширений і на комплексну оптимізацію ЕЕС по активній і реактивній потужностях. В цьому випадку в економічних опорах станцій враховуються втрати активної потужності в ЕЕС від потоків реактивної потужності, яка генерується як електростанціями, так джерелами реактивної потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методы оптимизации режимов энергосистем / [В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др.] – М.: Энергоиздат, 1981. – 336 с.
2. Лежнюк П.Д. Принцип найменшої дії в задачах оптимізації електроенергетичних систем / Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нетребський В.В. // Технічна електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 35-41.
3. Лежнюк П.Д. Застосування принципу найменшої дії для оптимізації режимів електроенергетичних систем / Лежнюк П.Д., Нетребський В.В. // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – № 637. – С. 44–50.
4. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов / [Под ред. В.А. Веникова] – М.: Высшая школа, 1973. – 320 с.
5. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах / Железко Ю.С. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
6. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях / Карпов Ф.Ф. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.

Надійшла до редколегії 24.03.2011

Рецензент: І.П.Заболотний

П. Д. ЛЕЖНЮК, В. В. НЕТРЕБСКИЙ
Винницкий национальный технический университет

Оптимизация режимов работы источников электроэнергии в энергосистеме с использованием принципа наименьшего действия. Показана возможность использования способности к самооптимизации электрической системы благодаря принципу наименьшего действия для решения задач наивыгоднейшего распределения активной и реактивной мощности между источниками энергии.
Источники активной и реактивной мощности, оптимизация, принцип наименьшего действия.

P. LEZHNYUK, V. NETREBSKY
Vinnitsa National Technical University

Optimization of Power Energy Sources Modes in The Power Grid Using the Principle of Least Action. It is shown possibility of the use of capacity for optimization of the electric system due to principle of the least action for the decision of tasks of the most advantageous distributing of active and reactive power between energy sources.

Active and a reactive power sources, optimisation, least action principle.