

Оптимізація режимів реактивної потужності з метою мінімізації втрат електроенергії в системі електропостачання Кіровоградського заводу "Червона зірка"

В статті наведена методика оптимального розташування компенсуючих пристроїв в системах електропостачання промислових підприємств та приведені результати розрахунків оптимізації режимів реактивної потужності в мережі заводу «Червона зірка».

компенсуючи пристрої, математична модель, схема заміщення, направлений граф, цільова функція

Оптимальне розташування компенсуючих пристроїв (КП) в електричній мережі заводу з математичної точки зору зводиться до знаходження такого вектору змінних (потужності КП), який забезпечує мінімум функції мети, яка відображає критерій якості системи.

Якщо в якості функції мети використати рокові розрахункові затрати на устаткування КП і оплату втрат електричної енергії, пов'язані з передачею реактивної потужності (РП) до місця споживання, то задача оптимального розміщення КП буде являти собою задачу нелінійного (квадратичного) програмування. Вирішення цієї задачі суттєво впливає на техніко-економічні параметри роботи системи електроспоживання промислового підприємства (СЕПП). Рівень компенсації реактивних навантажень і розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі заводу безпосередньо пов'язані з питаннями поліпшення якості напруги, економії електроенергії, збільшення пропускної здатності ліній, трансформаторів і інших елементів мережі.

Поставлена задача може бути сформульована наступним чином. Необхідно знайти значення аргументів, при яких забезпечується мінімум функції розрахункових затрат виду:

$$Z(\bar{Q}) = p \sum_{i=1}^n \Delta K_i \cdot Q_i + C_0 \left[\sum_{i=1}^n (\Delta P_{K_i} \cdot Q_i + a_i \cdot Q_i^2 + b_i \cdot Q_i) + a_c \cdot Q_c^2 + b_c Q_c + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(Q_{ni} - Q_i) \cdot (Q_{nj} - Q_j)}{U^2 \cdot 10^3} \cdot R_{ij} \right], \quad (1)$$

де n – кількість вузлів схеми в котрих прогнозується установка КП;

i, j – індекси змінних, значення яких відповідає номерам вузлів;

$$p = p_n + p_a + p_e \quad (2)$$

p_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

p_a, p_e – коефіцієнти амортизаційних відрахувань і експлуатаційних затрат, відповідно;

ΔK_i – питома вартість батареї статичних конденсаторів у відповідному вузлі схеми;

Q_i – потужність КП у відповідному вузлі;

C_0 – питома вартість втрат активної потужності;

$$C_0 = (\alpha \cdot K_M + \mu \cdot \tau) \cdot \varphi. \quad (3)$$

При відсутності відомостей про значення C_0 можна використовувати вираз:

$$C_0 \approx T \cdot \beta, \quad (4)$$

де T – число годин роботи КП за рік;

β – питома вартість втраченої електроенергії;

φ – коефіцієнт, що враховує затрати на розширення електричних мереж, що в свою чергу пояснюється передачею додаткової потужності для покриття втрат активної потужності;

K_M – відношення втрат активної потужності СЕПП в момент максимуму активного навантаження енергосистеми до середніх втрат активної потужності СЕПП;

μ – собівартість електроенергії на шинах електростанцій;

α – питомі втрати, що зумовлені розширенням електростанцій енергосистеми для покриття втрат активної потужності;

τ – число годин втрат електроенергії за рік в середньому;

ΔP_{ki} – питомі втрати активної потужності в конденсаторних батареях відповідного вузла;

a_i, b_i - коефіцієнти апроксимації кривої втрат активної потужності в синхронних двигунах відповідного вузла;

a_c, b_c - постійні коефіцієнти функції додаткових втрат активної потужності в мережі енергосистеми при заміні її еквівалентним джерелом реактивної потужності;

$$a_c = \frac{\delta}{2}; \quad (5)$$

$$b_c = \sigma_0,$$

де δ – друга похідна від додаткових втрат активної потужності в енергосистемі (ΔP_e) за значенням реактивної потужності, що передається даному підприємству;

σ_0 - значення першої похідної функції додаткових втрат при $Q = Q_0$ (Q – значення РП, що споживається заводом з енергосистеми).

Значення δ та σ_0 обумовлюються енергосистемою, виходячи з умов оптимальності режиму роботи її мережі:

$$\Delta P_e = b_c \cdot Q + a_c \cdot Q^2; \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{\partial \Delta P_e}{\partial Q} = b_c + 2a_c \cdot Q; \quad (7)$$

$$\delta = \frac{\partial^2 \Delta P_e}{\partial Q^2} = 2a_c, \quad (8)$$

де Q_{ni} – реактивна потужність навантаження у відповідному вузлі схеми;

U – середня напруга високовольтної мережі СЕПП;

R_{ij} – власні і взаємні опори вузлів схеми, приведені до середньої напруги високовольтної розподільчої мережі.

Під власним опором вузла схеми розуміють суму опорів, що лежать на шляху струму від балансного (нульового) вузла до даного вузла схеми (R_{ij} при $i=j$). Взаємним опором (R_{ij} при $i \neq j$) вважається сума опорів, що є загальною частиною шляху струму від балансного вузла до двох даних вузлів схеми (i -й та j -й вузли).

Вираз (1) можна розглядати як частинний випадок математичної моделі СЕПП. Формулювання задачі виглядає наступним чином: визначити числові значення потужностей компенсуючих пристроїв в вузлах схеми, що забезпечують мінімум річних розрахункових затрат при врахуванні обмежень, що накладаються на змінні:

$$\left. \begin{aligned} Z(\bar{Q}_{kn}) &\rightarrow \min \\ B_i \geq Q_{kni} \geq A_i, i = 1, n \\ \sum_{i=1}^n Q_{kni} &= Q_{kn\Sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де \bar{Q}_{kn} - вектор керованих змінних;

\bar{Q}_{kni} - потужність КП в даному вузлі схеми;

У такій постановці цільова функція (1) представляє собою деяку поверхню в n-мірному просторі. Дослідження показали, що n-мірна функція, яка описує оптимальне розподілення компенсуючих пристроїв в електричній мережі підприємства, залишається строго випуклою[4]. На основі вищесказаного можна зробити висновок, що цільова функція гладка, має один неявно виражений екстремум.

Рішення цієї задачі достатньо ефективно знаходиться при використанні методу спряженого градієнта в поєднанні з методом штрафних функцій.

Основою для вибору методу оптимізації послужило наступне:

1. Метод найбільш повно відповідає постановці задачі;
2. Метод відрізняється високою точністю розрахунку змінних і виконання обмежень;
3. Процес пошуку екстремуму цільової функції має достатньо високу результативність незалежно від заданого початкового наближення.

Рішення задачі оптимальної компенсації реактивної потужності в системі енергопостачання заводу передбачає наявність наступних початкових даних:

1. Електрична схема електропостачання заводу з нанесеними на неї високовольтними синхронними двигунами (СД);
2. Тип кожного СД і його характеристики;
3. Графіки споживання реактивної потужності для усіх живлячих ліній і підстанцій;
4. Економічно обумовлена найбільша величина РП, яка може бути передана з енергосистеми підприємству в режимі її максимальних активних навантажень;
5. Визначена за технічними умовами найменша величина РП, яка може бути передана з енергосистеми підприємству в режимі її мінімальних активних навантажень;
6. Визначені для режиму максимального реактивного навантаження заводу значення першої та другої похідної від сумарних втрат активної потужності в мережах енергосистеми за величиною реактивного навантаження заводу [1];
7. Технічні параметри живлячих ліній;
8. Години максимуму і мінімуму активного навантаження енергосистеми.

Підготовка початкових даних починається з опрацювання схеми електропостачання заводу і складання її схеми заміщення. При цьому враховуються тільки активні опори елементів схеми.

Трансформатор вводиться в схему заміщення опором:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U^2}{S_{н.м}} \cdot 10^3. \quad (10)$$

Лінія вводиться в схему заміщення опором:

$$R_l = R_0 \cdot l. \quad (11)$$

Всі опори приводяться до сумарної наружи високовольтної розподільчої мережі заводу, прийнятому в якості базового.

$$R_{np} = R_{факт} \cdot \frac{U^2_{баз}}{U^2_{факт}}. \quad (12)$$

Синхронні двигуни в схемі заміщення зображуються у вигляді окремих гілок з нульовим опором (рис. 1)

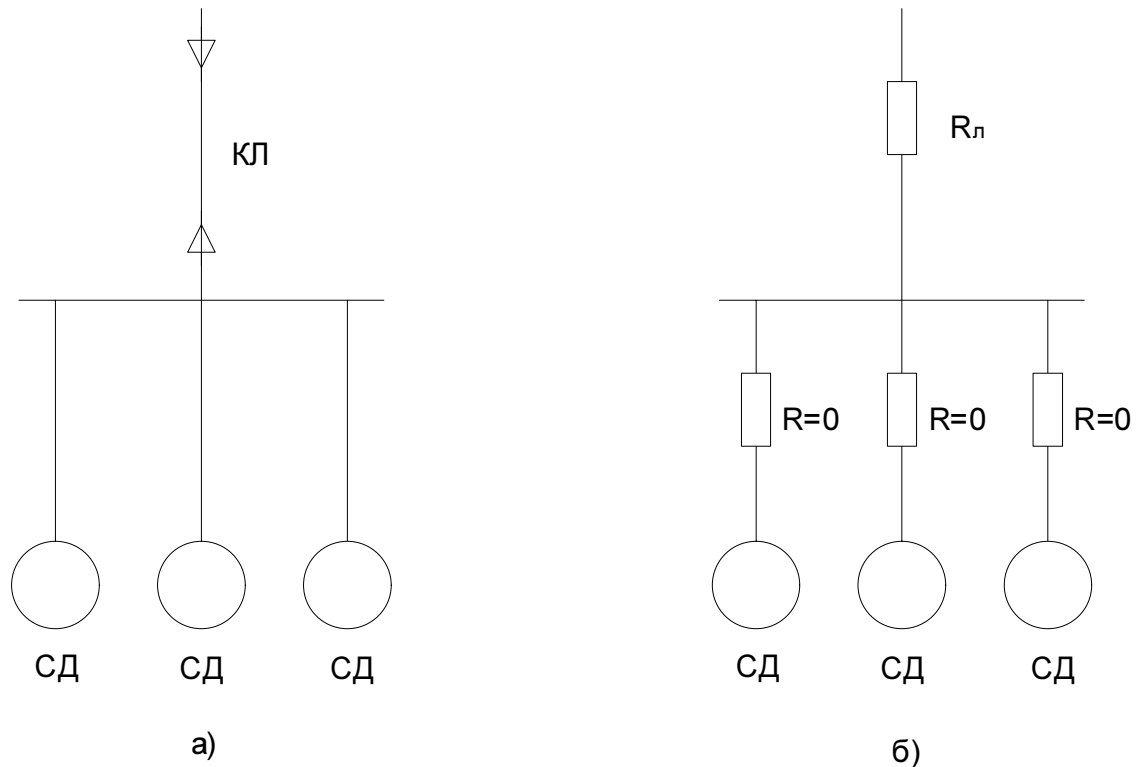


Рисунок 1 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) синхронних двигунів

Наступним етапом опрацювання схеми є нумерація її вузлів. Ця операція виконується за поколінням направленої графу, яким є електрична мережа системи електропостачання заводу.

Приклад нумерації вузлів схеми приведений на рис. 2:

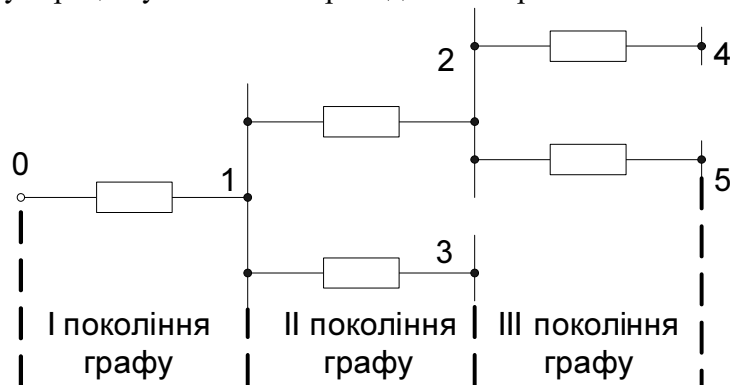


Рисунок 2 - Нумерація вузлів схеми заміщення

Реактивні навантаження в вузлах схеми зображуються їх середньорічними значеннями, а при розрахунку регулювання КП – середньозмінними величинами, що визначають за добовими графіками.

Схема електропостачання заводу і схема заміщення в даній статті не приведені.

Усього до оптимального розподілення компенсуючих пристроїв по мінімуму затрат в схемі електропостачання розглядалось 98 вузлів, на стороні напругою 6 кВ і 0,4 кВ.

Оцінка економічної ефективності впровадження оптимального режиму компенсації реактивних навантажень проводиться порівнянням річних розрахункових затрат при існуючому і оптимальному режимах компенсації:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_{\text{існ}} - \mathcal{Z}_{\text{опт}}, \quad (13)$$

$$\mathcal{Z}_{\text{існ}} = C_0 \cdot (\Delta P_{\text{бк}} + \Delta P_{\text{СД}} + \Delta P_{\text{мережі}}), \quad (14)$$

$$\mathcal{Z}_{\text{опт}} = p_n \cdot K_{\text{доод}} + C_0 \cdot (\Delta P'_{\text{бк}} + \Delta P'_{\text{СД}} + \Delta P'_{\text{мережі}}), \quad (15)$$

де $\Delta P_{\text{бк}}$, $\Delta P'_{\text{бк}}$ - середні втрати за рік активної потужності в конденсаторних батареях до і після оптимізації;

$\Delta P_{\text{СД}}$, $\Delta P'_{\text{СД}}$ - середні втрати за рік активної потужності в синхронних двигунах до і після оптимізації;

$\Delta P_{\text{мережі}}$, $\Delta P'_{\text{мережі}}$ - середні втрати за рік активної потужності в елементах електричної мережі до і після оптимізації;

$K_{\text{доод}}$ - капіталовкладення в установку додаткових конденсаторних батарей.

Величина економічного ефекту (грн./рік) в період окупності додаткових капіталовкладень може бути визначена за виразом:

$$E' = C_0 \cdot [(\Delta P_{\text{бк}} - \Delta P'_{\text{бк}}) + (\Delta P_{\text{СД}} - \Delta P'_{\text{СД}}) + (\Delta P_{\text{мережі}} - \Delta P'_{\text{мережі}})] - p_n \cdot K_{\text{доод}}. \quad (16)$$

Період окупності додаткових капіталовкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{доод}}}{E'}. \quad (17)$$

По закінченню терміну окупності величину економічного ефекту можна визначити, якщо використати наступний вираз:

$$E = C_0 \cdot [(\Delta P_{\text{бк}} - \Delta P'_{\text{бк}}) + (\Delta P_{\text{СД}} - \Delta P'_{\text{СД}}) + (\Delta P_{\text{мережі}} - \Delta P'_{\text{мережі}})]. \quad (18)$$

Результати розрахунків показали, що при існуючому режимі компенсації річні затрати склали величину 285241,94 грн., а при оптимальному розміщенні компенсуючих пристроїв величину 185743,52 грн.

Таким чином річний економічний ефект складає:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_{\text{існ}} - \mathcal{Z}_{\text{опт}} = 285241.94 - 185743.52 = 99498.42 \text{ грн.}$$

При цьому вартість електричної енергії C_0 у виразі (18) за даними Обленерго для електричних мереж напругою до 27,5 кВ складає $52,2 \frac{\text{конт}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$.

Якщо на діючому підприємстві знаходиться достатня кількість джерел реактивної потужності і додаткових капіталовкладень на їх придбання не потрібно, тоді достатньо в цільовій функції (1) нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень p_n прирівнювати до нуля і оптимальне розподілення компенсуючих пристроїв в вузлах системи електропостачання буде здійснюватися по мінімуму електричних втрат в системі електропостачання заводу.

Список літератури

1. Каялов Г.М, Каждан А.Э, Ковалёв И.Н, Куренный Э.Г. Основы построения промышленных электрических сетей. М.: Э.: 1978.
2. Скоков В.А., Орлова А.Е. Функции многих переменных. М.: МГУ им. Ломоносова, 1971.

3. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Э.: 1982.
4. Стрельников Н.А. О виде целевой функции в задаче оптимизации структуры и мощности компенсирующих устройств системы электроснабжения промышленных предприятий /Сб. «Режимы электрических сетей и систем». Новосибирск, 1974.
5. Оптимальное размещение компенсирующих устройств в электрической сети завода «Красная звезда». Отчёт по НИР № гос. рег. 80067925, КНТУ, Кировоград.

В статье приведена методика оптимального расположения компенсирующих устройств в системах электроснабжения промышленных предприятий и приведены результаты расчетов оптимизации режимов реактивной мощности в сети завода «Червона Зірка».

In the article resulted method of optimum location of compensating devices systems of electric supply of industrial enterprises and organized results of calculations for optimization of the modes of reactive-power in the network of factory «Chervona Zirka».