

## ДЕКОМПОЗИЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПІД ЧАС РОЗРАХУВАННЯ КОМПЕНСУВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В НИХ

© Демов О.Д., Паламарчук О.П., Григораш Ю.А., 2009

Запропоновано декомпозицію радіальної електричної мережі на підсистеми, що дає змогу розрахувати компенсування реактивної потужності окремо в цих підсистемах. Показано незалежність оптимальних реактивних потоків у живильних та розподільчих мережах, що дозволяє спростити розрахунок компенсування реактивної потужності в цих мережах.

The radial electric networks decomposition for the calculation of the reactive power compensation is proposed in this work. The purpose of this research is the electric network simplification. This work shows that the optimal reactive flows are independent in the feeding and distributive networks. This allows to calculate the reactive power compensation separately in these networks.

**Вступ.** Однією з важливих задач електричних мереж є зменшення втрат електроенергії в них. Зменшення цих втрат можна досягти компенсуванням реактивної потужності (КРП) в електричних мережах. Основою існуючих методів розрахунку КРП є системний підхід, що базується на розв'язанні такої задачі одночасно для всієї електричної мережі [1, 2]. Розв'язувати цю задачу в такій постановці складно, оскільки:

- 1) електрична мережа є ієрархічною системою, в якій її частини можуть приймати рішення відповідно до своїх інтересів окремо від інших частин;
- 2) розв'язання задачі загалом потребує значних затрат на збір інформації.

Отже, з одного боку, виникають техніко-економічні складності розрахунку КРП одночасно для всієї мережі, а з іншого, існує певна незалежність частин електричної мережі під час зазначеного розрахування [3]. Отже, виникає необхідність розділення електричної мережі при розв'язанні задачі КРП на окремі частини (декомпозиції електричної мережі).

Отже, **метою роботи** є спрощення розрахунку КРП в електричних мережах за рахунок їх декомпозиції.

**Декомпозиція радіальних електричних мереж при розрахунку КРП.** Основною умовою можливості вказаної декомпозиції є рівність значень функцій критеріїв КРП електричних мереж до і після їх декомпозиції [4]:

$$\alpha_{\Sigma} (Q_{КУi}) = \sum_{j=1}^n \alpha_j(Q_{КУj}), \quad (1)$$

де  $\alpha_{\Sigma} (Q_{КУi})$  – значення функції критерію КРП для всієї електричної мережі залежно від значень потужностей компенсувальних установок (КУ)  $Q_{КУi}$  під час розв'язання задачі без декомпозиції;  $i=1, \dots, k$ ,  $k$  – кількість вузлів електричної мережі, в яких установлені КУ;  $\alpha_j(Q_{КУj})$  – значення функцій критерію КРП  $j$ -ї підсистеми залежно від потужностей КУ  $Q_{КУj}$ , які установлені в цих підсистемах;  $j=1, \dots, n$ ,  $n$  – кількість підсистем електричної мережі.

Розв'язуючи задачу, за критерій доцільності КРП в електричних мережах приймемо:

- 1) величину максимального зниження втрат активної енергії від перетоків реактивної;
- 2) величину мінімуму затрат на передавання і генерування реактивної потужності.

Умова (1) за першим критерієм для довільної радіальної електричної мережі, в якій кожна з підсистем замінена активним опором  $R_j$  та реактивним навантаженням  $Q_j$ , запишеться так:

$$\delta P_{\Sigma} (Q_{КУj}) = \sum_{j=1}^n \frac{(Q_j - Q_{КУj})^2}{U_H^2} \cdot R_j, \quad (2)$$

де  $\delta P_{\Sigma} (Q_{КУj})$  – сумарне зниження втрат електроенергії в радіальній електричній мережі залежно від потужностей  $Q_{КУj}$ ;  $U_H$  – номінальна напруга мережі.

З (2) очевидно, що для цієї мережі виконується умова (1) і під час розрахунку КРП така мережа може бути розділена на  $n$ -підсистем.

Розглянемо декомпозицію радіальної електричної мережі, заданої матрицею вузлових активних провідностей  $Y$ , відповідно до другого критерію КРП. Відповідно [5, 6] матриця-стовпець оптимальних значень потоків реактивної потужності для цієї мережі визначається так:

$$Q_c^{opt} = Y \cdot C, \quad (3)$$

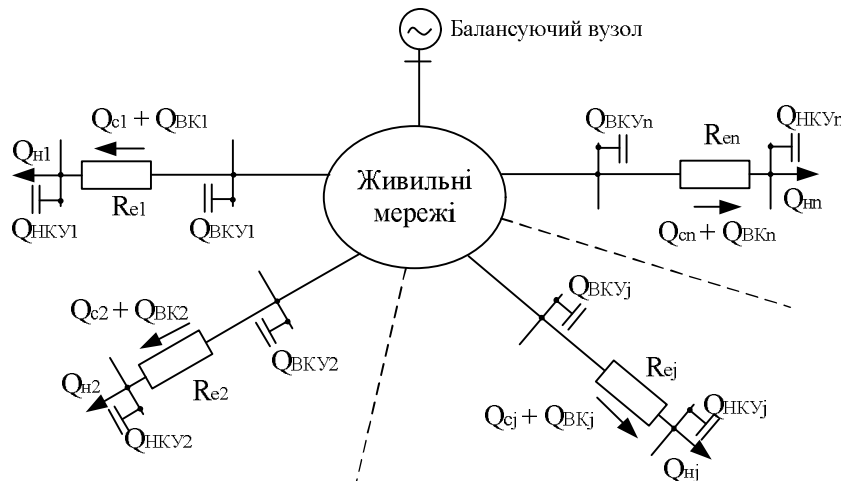
де  $C$  – матриця-стовпець, всі елементи якої  $C_i = \frac{C_{КУ} \cdot U_H^2}{2 \cdot C_0}$ ;  $C_{КУ}$  – питома вартість КУ;  $C_0$  – питома вартість втрат активної потужності [2].

Якщо врахувати, що для радіальної мережі матриця вузлових активних провідностей є діагональною, а її елементи – це власні провідності вузлів  $Y_{ii}$ , то відповідно до формули (3) оптимальний потік  $i$ -ї лінії цієї мережі запишемо так:

$$Q_{ci}^{opt} = Y_{ii} \cdot C_i \quad (4)$$

З (4) зрозуміло, що значення оптимальних реактивних потоків ліній радіальної електричної мережі не залежать одне від одного. Інакше кажучи, розраховуючи КРП за мінімумом затрат, радіальна мережа ділиться на незалежні частини. Тобто, у цьому разі також можлива декомпозиція електричної мережі.

**Декомпозиція електричної мережі на живильні та розподільні мережі.** Розглянемо можливість декомпозиції електричної мережі, заданої матрицями вузлових активних опорів  $R$  та розрахункових реактивних навантажень  $Q_{Hj}$ , відповідно другого критерію КРП. Заступну схему розрахункової мережі наведено на рисунку.



Заступна схема розрахункової мережі:

$R_{ej}$  – значення активного опору розподільчої мережі, яка живляться від  $j$ -го вузла живильної мережі;

$Q_{ВКУj}$ ,  $Q_{НКУj}$  – значення потужностей, відповідно високовольтних КУ (ВКУ) та низьковольтних КУ

(НКУ);  $Q_{Hj}$  – розрахункове реактивне навантаження  $j$ -го вузла живильної мережі;  $Q_{cj}$  – значення реактивного потоку, що передається від живильної мережі до  $j$ -го навантажувального вузла;

$Q_{ВКj}$  – значення реактивної потужності, генерованої  $j$ -ю ВКУ

У цьому разі оптимальні потоки реактивної потужності відповідають мінімуму функції затрат:

$$Z = \frac{C_0}{U_n^2} \cdot (\mathbf{Q}_c^t \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{Q}_c + \sum_{j=1}^n (R_{ej} (Q_{cj} + Q_{BKj})^2) + 3_{BKU} \cdot Q_{BKj} + 3_{HKU} \cdot (Q_{Hj} - Q_{cj} - Q_{BKj})) \rightarrow \min, \quad (5)$$

за умови

$$Q_{BKj} \geq 0, \quad Q_{HKj} \geq 0. \quad (6)$$

де  $\mathbf{R}$  – матриця вузлових активних опорів живильної мережі;  $\mathbf{Q}_c$  – матриця-стовпець потоків реактивних потужностей  $Q_{cj}$ ;  $Q_{HKj}$  – значення реактивної потужності, генерованої  $j$ -ю НКУ;  $3_{BKU}$ ,  $3_{HKU}$  – питомі вартості відповідно ВКУ та НКУ.

Продиференціюємо функцію (5) за незалежними змінними  $Q_{cj}$ ,  $Q_{BKj}$  і одержимо систему двох лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{2 \cdot C_0}{U_n^2} \cdot ((Q_{c1} \cdot R_{j1} + Q_{c2} \cdot R_{j2} + \dots + Q_{cj} \cdot R_{jj} + \dots + Q_{cn} \cdot R_{jn}) + Q_{cj} \cdot R_{ej} + Q_{BKj} \cdot R_{ej}) - 3_{HKU} = 0 \\ \frac{2C_0}{U_n^2} \cdot (Q_{cj} \cdot R_{ej} + Q_{BKj} \cdot R_{ej}) + 3_{BKU} - 3_{HKU} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Віднімемо, відповідно, праві та ліві частини рівнянь системи (7) і одержимо

$$\frac{2C_0}{U_n^2} \cdot (Q_{c1} \cdot R_{j1} + Q_{c2} \cdot R_{j2} + \dots + Q_{cj} \cdot R_{jj} + \dots + Q_{cn} \cdot R_{jn}) - 3_{BKU} = 0. \quad (8)$$

З рівняння (8) знайдемо оптимальне значення  $Q_{cj}$ :

$$Q_{cj}^0 = \frac{3_{BKU} \cdot U_n^2}{2R_{jj} \cdot C_0} - \frac{Q_{c1}R_{j1}}{R_{jj}} - \frac{Q_{c2}R_{j2}}{R_{jj}} - \dots - \frac{Q_{cn}R_{jn}}{R_{jj}}, \quad (9)$$

Підставимо значення  $Q_{cj}^0$  в друге рівняння системи (7) та знайдемо оптимальне значення  $Q_{BKj}$ :

$$Q_{BKj}^0 = \frac{(3_{HKU} - 3_{BKU}) \cdot U_n^2}{2R_{ej} \cdot C_0} - \frac{3_{BKU} \cdot U_n^2}{2R_{jj} \cdot C_0} + \frac{Q_{c1}R_{j1}}{R_{jj}} + \frac{Q_{c2}R_{j2}}{R_{jj}} + \dots + \frac{Q_{cn}R_{jn}}{R_{jj}}. \quad (10)$$

З (9) очевидно, що оптимальний потік реактивної потужності в живильних мережах  $Q_{cj}^0$  залежить від параметрів цих мереж та ВКУ, але не залежить від параметрів розподільчих мереж. Це справедливо за можливості установаження ВКУ і виконання умови (6).

Сумарний оптимальний потік реактивної потужності, який передається від живильних електричних мереж та ВКУ в  $j$ -й навантажувальний вузол:

$$Q_{\sum j}^0 = Q_{cj}^0 + Q_{BKj}^0, \quad (11)$$

$$Q_{\sum j}^0 = \frac{(3_{HKU} - 3_{BKU}) \cdot U_n^2}{2R_{ej} \cdot C_0}. \quad (12)$$

З формул (9), (10), (12) зрозуміло, що у разі виконання умови (6) розв'язувати задачу КРП можна окремо в живильних та розподільчих мережах.

**Висновки.** 1. Електричні радіальні мережі під час розрахунку КРП можна розділити на підсистеми, що дозволить розраховувати КРП окремо в цих підсистемах.

2. За наявності в електричних мережах високовольтних та низьковольтних КУ, оптимізація потоків реактивної потужності в живильних мережах не залежить від параметрів розподільчих мереж, що дозволяє спростити розрахунок КРП в цих мережах.

1. *Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами // Офіційний вісник України. – 1998. – № 1. – С. 174–193.*
2. *Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М.:*

*Энергоатомиздат, 1985. – С. 200. 3. Журавлев В. Г., Арион В. Д. Применение принципа сокращения схемы для наиболее выгодного размещения источников реактивной мощности // Промышленная энергетика. – 1976. – № 4. – С. 36–39. 4. Сингл М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / Пер. с англ. А.В. Запорожца. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 496. 5. Ковалев И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 200. 6. Демов О. Д. Планування електроспоживання промислових підприємств та управління ним. – В.: УНІВЕРСУМ, 2001. – С. 104.*

УДК 621.791.75

А.М. Жерносков, В.М. Сидорець

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З ДРІБНОКРАПЕЛЬНИМ ПЕРЕНОСОМ МЕТАЛУ

© Жерносков А.М., Сидорець В.М., 2009

**На основі математичної моделі системи “джерело живлення – дуга з плавким електродом” та визначеної системи диференціальних рівнянь керованих величин процесу знайдено передавальні функції систем та побудовані структурні схеми, що відображають взаємні зв’язки між елементами.**

**The transfer functions and flowcharts that represent the interconnection among the parts have been developed on base of the mathematical model of “power source – consumable electrode arc” system and its differential equations.**

Розробка нових технологічних електротехнічних пристроїв, установок та їхнє широке застосування в різних галузях промисловості вимагає чіткого розуміння перебігу фізичних явищ і їх взаємодії з процесами управління, регулювання та автоматизації. Зварювання металу охоплює значну кількість фізичних процесів. В останні роки розвивається зварювання плавким електродним дротом у сумішах захисних газів, особливо імпульсно-дугове зварювання, з застосуванням новітніх джерел живлення дуги, що містять зворотні зв’язки [1]. Оскільки процес зварювання має багато параметрів регулювання, то математичне моделювання таких систем є достатньо актуальним та перспективним.

При дуговому зварюванні об’єктами математичного моделювання, як правило, є зварювальна ванна та процеси плавлення і переносу металу електрода [2–4]. Так в роботі [2] автори аналізують застосування математичних моделей та розглядають тривимірну нестационарну теплову модель зварювання в активних газах. Ця модель може використовуватись для різних процесів дугового зварювання, наприклад, багатопрохідного зварювання та зварювання кутових швів з поперечними коливаннями пальника. За допомогою цієї моделі можливо прогнозування профілю шва. Деякі дослідники [3] розглядають підходи до зниження зовнішніх збурень по швидкості плавлення електрода під час роботизованого дугового зварювання на основі принципу інваріантності та синтезу структури компенсаційного контуру. Вивчаються також фізико-математичні моделі каплепереносу металу електродного дроту при дуговому зварюванні с короткими замиканнями дугового проміжку [4]. Однак розробляючи сучасне електрозварювальне устаткування, необхідно знати взаємодію між собою таких об’єктів, як джерело живлення, процеси в дузі, механізми подачі зварювального дроту, система керування. Крім того, при застосуванні зворотних зв’язків, необхідно визначення стійкості систем.

**Мета роботи** – дослідження взаємодії між параметрами процесу дугового зварювання плавким електродом з дрібнокрапельним переносом металу.