

## МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Відповідно до директивних документів по розрахунку компенсації реактивної потужності (КРП) в електричних мережах, її розрахунок базується на розв'язанні задачі одночасно для всієї електричної мережі. Такий підхід спонукає до розділення електричної мережі при оптимізації потоків реактивної потужності на частини (просторової декомпозиції електричної мережі), а також до поетапного впровадження компенсувальних установок (КУ) (часової декомпозиції процесу впровадження КУ). Просторова декомпозиція проводиться на основі розділення функції втрат, створених реактивним навантаженням одного вузла, на власні та спільні втрати, що дозволяє спростити вказаний розрахунок. Часова декомпозиція базується на розділенні функції втрат при встановленні КУ на зниження втрат на певному етапі впровадження вказаних установок і на наступних етапах. Це дає можливість проводити поетапний розрахунок КРП. Очевидно, яким би не був стан мережі в результаті попередніх кроків впровадження КУ, потрібно вибирати впровадження на найближчому кроці так, щоби воно в сукупності з впровадженням на всіх подальших кроках забезпечувало максимальне зниження втрат за період впровадження. Це показує незалежність встановлення КУ на кожному етапі і, відповідно, часову декомпозицію процесу впровадження КУ. Таким чином, величини потужностей КУ, які забезпечують максимальне зниження втрат на одному етапі їх впровадження, не залежать від реактивних навантажень і параметрів мереж інших етапів. Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки: а) оптимальні реактивні потоки окремих ліній мереж не залежать від реактивних навантажень інших ліній, що дає можливість проводити просторову декомпозицію цих мереж; б) величини потужностей КУ, які забезпечують максимальне зниження втрат потужності в електричній мережі на одному етапі впровадження КУ, не залежать від реактивних навантажень і параметрів мереж інших етапів, що дає можливість проводити часову декомпозицію цього впровадження.

**Ключові слова:** реактивна потужність, електрична мережа, просторова-часова декомпозиція, компенсація реактивної потужності.

### Вступ

Однією з основних задач електричних мереж є зменшення втрат електроенергії в них. Зменшення цих втрат можна досягти шляхом компенсування реактивної потужності (КРП) в електричних мережах. Відповідно до [1] розрахунок КРП базується на розв'язанні такої задачі одночасно для всієї електричної мережі. Розв'язувати цю задачу в такій постановці складно, оскільки:

– електрична мережа є ієрархічною системою, для якої рішення по оптимізації одних частин мережі можуть прийматися незалежно від інших;

– впровадження компенсувальних установок (КУ) в електричній мережі проводиться, зазвичай, в умовах дефіциту коштів і, відповідно, встановлення КУ проводять тільки в певній частині цих мереж, що потребує поетапного впровадження КУ.

Це спонукає до:

– розділення електричної мережі під час оптимізації потоків реактивної потужності на частини (просторової декомпозиції електричної мережі);

– поетапного впровадження компенсувальних установок (часової декомпозиції процесу впровадження КУ).

Метою роботи є просторово-часова декомпозиція моделей оптимізації реактивних потоків в електричних мережах, що дозволяє значно спростити розрахунок компенсації реактивної потужності в цих мережах.

### Результати дослідження

Відповідно до [2]—[4] величина втрат активної потужності в електричній мережі, зумовлених реактивним навантаженням  $Q_{cj}$ , визначається як

$$\Delta P_j = \frac{1}{U_n^2} \left( 2Q_{cj} (Q_{c1}R_{1,j} + Q_{c2}R_{2,j} + \dots + Q_{c_{j-1}}R_{j-1,j} + Q_{c_{j+1}}R_{j+1,j} + \dots + Q_{cn}R_{nj}) + Q_{cj}^2 R_{jj} \right), \quad (1)$$

де  $R_{ij}$  — спільний активний опір для реактивних навантажень  $Q_{ci}$  і  $Q_{cj}$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  — кількість навантажувальних вузлів в мережі.

З (1) видно, що величину  $\Delta P_j$  можна розділити на дві складові: величину втрат, зумовлену власне реактивним навантаженням  $j$ -го вузла

$$\Delta P_{jj} = \frac{1}{U_n^2} \cdot Q_{cj}^2 \cdot R_{jj}$$

та величину втрат, зумовлену накладанням реактивних потоків  $j$ -го  $Q_{cj}$  та всіх інших вузлів,

$$\Delta P_{ij} = \frac{2 \cdot Q_{cj}}{U_n^2} \cdot (Q_{c1} \cdot R_{1,j} + Q_{c2} \cdot R_{2,j} + \dots + Q_{c_{j-1}} \cdot R_{j-1,j} + Q_{c_{j+1}} \cdot R_{j+1,j} + \dots + Q_{cn} \cdot R_{nj}).$$

Аналіз формул показує, що сумарну величину втрат для всієї мережі можна представити так:

$$\Delta P^\Sigma = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sum_{j=1}^n Q_{cj}^2 \cdot R_{jj} + \frac{2}{U_n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n Q_{ci} \cdot Q_{cj} \cdot R_{ij}, \quad (2)$$

або

$$\Delta P^\Sigma = \sum_{j=1}^n \Delta P_{jj}^\Sigma + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \Delta P_{ij}^\Sigma. \quad (3)$$

Складова

$$\Delta P_{jj}^\Sigma = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sum_{j=1}^n Q_{cj}^2 \cdot R_{jj}$$

враховує втрати, зумовлені безпосередньо реактивними навантаженнями вузлів. Назвемо цю складову власними втратами.

Складова

$$\Delta P_{ij}^\Sigma = \frac{2}{U_n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n Q_{ci} \cdot Q_{cj} \cdot R_{ij}$$

враховує втрати від накладання реактивних навантажень  $i$ -го та  $j$ -го вузлів електричної мережі. Назвемо ці втрати спільними втратами [5].

З аналізу наведених формул випливає, що основною задачею декомпозиції функції втрат є ділення спільних втрат

$$\Delta P(Q_{ci}, Q_{cj}) = f_1(Q_{ci}) + f_2(Q_{cj}), \quad (4)$$

де  $f_1(Q_{ci})$  — функція, яка залежить тільки від величини реактивного навантаження  $Q_{ci}$ ;  $f_2(Q_{cj})$  — функція, яка залежить від реактивного навантаження  $Q_{cj}$ .

Таке ділення в загальному випадку неможливе. Якби ця умова виконувалась, то не було б фізичного впливу реактивних навантажень одних вузлів на інші. Це можливо тільки у випадку, коли навантаження не мають спільних ділянок живлення, наприклад, для радіальних мереж.

Покажемо декомпозицію радіальних електричних мереж в розрахунку КРП за критерієм мінімального значення втрат активної потужності від перетоків реактивної і за заданого значення

вхідної реактивної потужності (ВРП)  $Q_3$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \Delta P_i \rightarrow \min, \\ \sum Q_{ci} = Q_3. \end{cases} \quad (5)$$

Для розв'язання задачі використаємо метод невизначених множників Лагранжа

$$F = \lambda (\sum Q_{ci} - Q_3) + \sum_{i=1}^n \Delta P_i \rightarrow \min,$$

де  $\lambda$  — множник Лагранжа;  $Q_{ci}$  — ВРП  $i$ -го вузла.

Продиференціюємо функцію  $F$  за змінними  $\lambda$  і  $Q_c$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial Q_{ci}} = \lambda + 2 \frac{Q_{ci} \cdot R_i}{U_n^2}, \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum Q_{ci} - Q_3 \end{cases} \quad (6)$$

та в результаті розв'язання системи лінійних рівнянь (6) отримаємо вираз для визначення оптимальних значень ВРП вузлів

$$Q_{ci}^o = Q_3 \cdot \frac{R_e}{R_i}, \quad (7)$$

де  $R_e$ ,  $R_i$  — відповідно, еквівалентний активний опір мережі та активний опір  $i$ -ї лінії.

З (7) видно, що потік  $i$ -ї лінії радіальної лінії не залежить від реактивних навантажень інших ліній. Це дає можливість проводити просторову декомпозицію електричної мережі під час розв'язання задачі.

Розглянемо поетапне впровадження КУ. Зниження втрат, яке отримується від установаження КУ на всіх етапах їх установаження, починаючи з  $t$ -го, складається зі зниження на  $t$ -му етапі  $\delta P_t$  плюс умовне оптимальне зниження на всіх подальших етапах, починаючи з  $(t+1)$ -го —  $\delta P_{t+1}$

$$\delta P_{\Sigma t} = \delta P_t(S, U_t) + \delta P_{t+1}(S, U_t), \quad (8)$$

де  $\delta P_t$  — зниження втрат на  $t$ -му кроці;  $\delta P_{t+1}$  — умовне оптимальне зниження втрат на всіх наступних кроках, починаючи з  $(t+1)$ -го;  $S$  — стан мережі, який вона набула в результаті попередніх кроків;  $U_t$  — процедура впровадження КУ на  $t$ -му кроці [6].

Очевидно, яким би не був стан мережі в результаті попередніх кроків впровадження КУ, потрібно вибирати впровадження на найближчому кроці так, щоб воно, в сукупності з впровадженням на всіх подальших кроках забезпечувало максимальне зниження втрат за період впровадження  $T$

$$\delta P_{\Sigma t}^{\max} = \max_{t=1}^{t=T} \{ \delta P_t(S, U_t) + \delta P_{t+1}(S, U_t) \}, \quad (9)$$

Формула (9) показує незалежність установаження КУ на кожному етапі  $i$ , відповідно, часову декомпозицію процесу впровадження КУ. Таким чином, величини потужностей КУ, які забезпечують максимальне зниження втрат на одному етапі їх впровадження, не залежать від реактивних навантажень і параметрів мереж інших етапів.

### Висновки

1. Оптимальні реактивні потоки окремих ліній радіальних мереж не залежать від реактивних навантажень інших ліній, що дає можливість проводити просторову декомпозицію цих мереж.

2. Величини потужностей КУ, які забезпечують максимальне зниження втрат потужності в електричній мережі на одному етапі впровадження КУ, не залежать від реактивних навантажень і параметрів мереж інших етапів, що дає можливість проводити часову декомпозицію цього впровадження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Міністерство палива та енергетики України, *Методика визначення економічно доцільних обсягів компенсації реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації та споживача (основного споживача та субспоживача)*, Затверджено наказом № 1 від 05.01.2006 р.
- [2] Н. А. Мельников, *Электрические сети и системы*. Москва: Энергия, 1969.
- [3] Н. А. Мельников, *Матричный метод анализа электрических цепей*. Москва: Энергия, 1972.
- [4] Ю. С. Железко, *Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах*. Москва: Энергоиздат, 1981.
- [5] О. Д. Демов, *Оптимізація процесу впровадження компенсуювальних установок в розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.
- [6] Е. С. Вентцель, *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. Москва: Наука, 1988.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.10.2021

**Демов Олександр Дмитрович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: odemov@ukr.net ;

**Бабенко Олексій Вікторович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: oleksij\_babenko@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**O. D. Demov<sup>1</sup>**  
**O. V. Babenko<sup>1</sup>**

## Models of Reactive Power Compensation in Electrical Networks on the Basis of Spatial-Temporal Decomposition

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*According to the directives on the calculation of reactive power compensation (RPC) in electrical networks, its calculation is based on solving the problem simultaneously for the entire electrical network. This approach encourages the division of the electrical network in the optimization of reactive power flows into parts (spatial decomposition of the electrical network), as well as the phased implementation of compensating installations (temporal decomposition of the implementation process CI). Spatial decomposition is performed on the basis of the division of the function of losses created by the reactive load of one node into own and total losses, which simplifies this calculation. Temporary decomposition is based on the division of the loss function in the establishment of CI on: reduction of losses at this stage of implementation of these installations and in subsequent stages. This makes it possible to carry out a phased calculation of RPC. Obviously, whatever the state of the network as a result of the previous steps of the CI implementation, we must choose the implementation in the next step so that it, together with the implementation in all subsequent steps provides the maximum reduction of losses during the implementation period. This shows the independence of the establishment of the CI at each stage and, accordingly, the temporal decomposition of the process of implementation of the CI. Thus, the values of the capacities of the CI, which provide the maximum reduction of losses at one stage of their implementation, do not depend on the reactive loads and network parameters of other stages. The conducted researches allow to draw the following conclusions: a) the optimal reactive flows of separate lines of networks do not depend on reactive loadings of other lines that gives the chance to carry out spatial decomposition of these networks; b) the values of CI capacities, which provide the maximum reduction of power losses in the electrical network at one stage of CI implementation, do not depend on reactive loads and network parameters of other stages, which allows temporary decomposition of this implementation.*

**Keywords:** reactive power, electric network, space-time decomposition, reactive power compensation.

**Demov Oleksandr D.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Power Consumption Systems and Energy Management, e-mail: odemov@ukr.net ;

**Babenko Oleksii V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Power Consumption Systems and Energy Management, e-mail: oleksij\_babenko@ukr.net

А. Д. Демов<sup>1</sup>  
А. В. Бабенко<sup>1</sup>

## Модели компенсации реактивной мощности в электрических сетях на основе пространственно-временной декомпозиции

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Согласно директивным документам по расчету компенсации реактивной мощности (КРМ) в электрических сетях ее расчет базируется на решении задачи одновременно для всей электрической сети. Такой подход побуждает к разделению электрической сети при оптимизации потоков реактивной мощности на части (пространственной декомпозиции электрической сети), а также поэтапному внедрению компенсирующих установок (КУ) (временной декомпозиции процесса внедрения КУ). Пространственная декомпозиция проводится на основе разделения функции потерь, созданных реактивной нагрузкой одного узла, на собственные и общие потери, что позволяет упростить указанный расчет. Временная декомпозиция базируется на разделении функции потерь при установлении КУ на снижение потерь на данном этапе внедрения указанных установок и на последующих этапах. Это позволяет проводить поэтапный расчет КРМ. Очевидно, каким бы ни было состояние сети в результате предыдущих шагов внедрения КУ, мы должны выбирать внедрение на ближайшем шаге так, чтобы оно, в совокупности с внедрением на всех последующих шагах, обеспечивало максимальное снижение потерь за период внедрения. Это показывает независимость установления КУ на каждом этапе и соответственно временную декомпозицию процесса внедрения КУ. Таким образом, величины мощностей КУ, обеспечивающие максимальное снижение потерь на одном этапе их внедрения, не зависят от реактивных нагрузок и параметров сетей других этапов. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы: а) оптимальные реактивные потоки отдельных линий сетей не зависят от реактивных нагрузок других линий, что позволяет проводить пространственную декомпозицию этих сетей; б) величины мощностей КУ, обеспечивающие максимальное снижение потерь мощности в электрической сети на одном этапе внедрения КУ, не зависят от реактивных нагрузок и параметров сетей других этапов, что позволяет проводить временную декомпозицию этого внедрения.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, электрическая сеть, пространственно-временная декомпозиция, компенсация реактивной мощности.

*Демов Александр Дмитриевич* — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: odemov@ukr.net ;

*Бабенко Алексей Викторович* — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических систем электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: oleksij\_babenko@ukr.net