

## ВИБІР ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА ЗМЕНШЕННЯМ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ, ЩО ВІДНОСЯТЬСЯ НА БАЛАНС СПОЖИВАЧІВ

*Бурбело М.Й., д.т.н., проф., Войнаровський А.Ж., Кузьменко М.В.  
Вінницький національний технічний університет  
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021  
E-mail: burbelom@rambler.ru*

**Вступ.** З переходом до балансуючого енергоринку, основанийого на двосторонніх контрактах, загострюється питання відшкодування втрат електроенергії в мережах енергопостачальних компаній, що зумовлені перетоками активної та реактивної електроенергії, наприклад, за наявності її транзитного передавання [1–6]. Одним із актуальних є питання вибору джерел реактивної потужності. Незважаючи на те, що питанням вибору джерел реактивної потужності приділено достатньо уваги в фундаментальних працях, наприклад [7], в сучасних умовах існує певна специфіка його вирішення, яка полягає у відсутності механізмів державного регулювання і прийнятті рішень суб'єктом господарювання виключно з точки зору власних інтересів.

**Аналіз попередніх досліджень.** В [8–10] розроблено математичні моделі для визначення та розподілення навантажувальних втрат потужності між споживачами в мережах будь-якої конфігурації, в основу яких покладено матрицю вузлових опорів:

$$\Delta \mathbf{S} = \frac{1}{U^2} (\hat{\mathbf{S}}^{\Delta} \mathbf{Z} \mathbf{S}), \quad (1)$$

де  $\Delta \mathbf{S}$  – вектор-стовпець втрат комплексних потужностей, які відносяться на баланс окремих споживачів;  $\hat{\mathbf{S}}^{\Delta}$  – діагональна матриця комплексних спряжених потужностей навантажень споживачів;  $\mathbf{S}$  – вектор-стовпець комплексних потужностей навантажень споживачів;  $\mathbf{Z}$  – матриця вузлових комплексних опорів мережі;  $U$  – середня експлуатаційна напруга мережі.

Для визначення втрат потужностей у вітках електричної мережі можна використати формулу:

$$\Delta \mathbf{S}_B = \frac{1}{U^2} (\hat{\mathbf{S}}_B^{\Delta} \mathbf{Z}_B \mathbf{S}_B), \quad (2)$$

де  $\hat{\mathbf{S}}_B^{\Delta}$  – діагональна матриця комплексних спряжених потужностей у вітках мережі;  $\mathbf{S}_B$  – вектор-стовпець комплексних потужностей у вітках;  $\mathbf{Z}_B$  – діагональна матриця комплексних опорів віток мережі.

Розподілення втрат потужності  $i$ -ої вітки між споживачами [11] можна виконати за формулою:

$$\Delta \mathbf{S}_i = \frac{Z_i}{U^2} (\hat{\mathbf{S}}^{\Delta} \hat{\mathbf{C}}_i \mathbf{C}_i^{\Delta} \mathbf{S}), \quad (3)$$

де  $Z_i$  – комплексний опір  $i$ -ої вітки мережі;  $\mathbf{C}_i^{\Delta}$  –  $i$ -й рядок матриці розподілу струмів вузлів між вітками мережі;  $\hat{\mathbf{C}}_i$  – вектор-стовпець спряжених коефіцієнтів  $i$ -го рядка матриці розподілу струмів вузлів між вітками мережі.

У разі застосування формул (1), (3) втрати потужності розподіляються між споживачами пропорційно споживаній (генерованій) потужності з урахуванням електричної відстані (опору) до споживачів.

**Мета роботи** полягає у визначенні потужності та місць розміщення джерел реактивної потужності з урахуванням втрат активної потужності в усій мережі та для окремих споживачів.

**Матеріал і результати досліджень.** Найменше значення втрат потужності в мережі у разі можливості регулювання реактивної потужності навантаження  $i$ -го споживача визначають з умови:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} = \frac{1}{U^2} \left( Q_i R_{ii} - \sum_{i \neq j} Q_j R_{ij} \right) = 0, \quad (4)$$

де  $\Delta P$  – втрати активної потужності в мережі;  $Q_i$  – реактивна потужність навантаження  $i$ -го споживача;  $Q_j$  – реактивні потужності навантаження решти  $j$ -их споживачів мережі;  $R_{ij}$  – елементи матриці вузлових опорів.

Умову визначення оптимальної потужності реактивного навантаження  $i$ -го споживача з точки зору мінімальних втрат, які відносяться на його баланс за їх пропорційного розподілення між споживачами, можна подати у вигляді:

$$\frac{\partial \Delta P_i}{\partial Q_i} = \frac{1}{U^2} \left( 2Q_i R_{ii} - \sum_{i \neq j} Q_j R_{ij} \right) = 0, \quad (5)$$

де  $\Delta P_i$  – втрати активної потужності, які відносяться на баланс  $i$ -го споживача;  $Q_i$  – реактивна потужність навантаження  $i$ -го споживача;  $Q_j$  – реактивні потужності навантаження решти  $j$ -их споживачів мережі, на розподілення втрат яких впливає зміна навантаження  $i$ -го споживача.

Для прикладу на рис. 1 зображено конфігурацію замкнутої мережі, яка характеризується матрицею вузлових активних опорів

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0,074 & 0,012 & 0,043 & 0,043 \\ 0,012 & 0,135 & 0,074 & 0,074 \\ 0,043 & 0,074 & 0,258 & 0,258 \\ 0,043 & 0,074 & 0,258 & 0,658 \end{bmatrix}$$

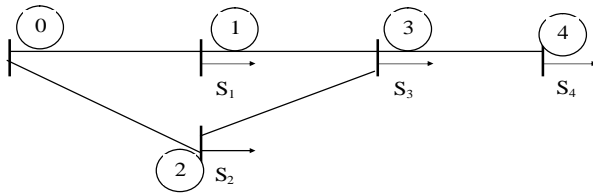


Рисунок 1 - Конфігурація замкнутої мережі

З матриці вузлових активних опорів видно, що найбільше значення власного опору має вузол 4. Отже, з точки зору мінімуму втрат джерело реактивної потужності доцільно приєднувати у вузлі 4.

На рис. 2 наведено залежності втрат активної потужності в мережі за однакових навантажень вузлів  $S_i=20+j20$  МВА як функцій реактивної потужності навантаження  $i$ -го вузла  $Q_i$ ,  $i=1,\dots,4$ , з якого наглядно видно, що для зменшення втрат потужності, дійсно, найкращим є розміщення джерела реактивної потужності у вузлі 4. З рис. 2 також випливає, що генерована реактивна потужність у вузлі 4 не повинна перевищувати 11,4 Мвар, що відповідає умові (4), після чого втрати зростають.

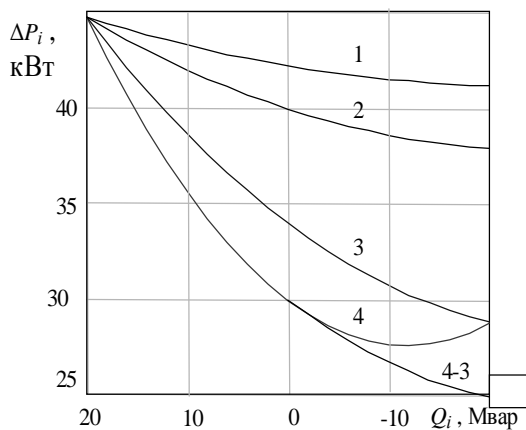


Рисунок 2 - Залежності втрат активної потужності в мережі як функцій  $Q_i$

Закономірно виникає питання доцільності перекомпенсації реактивної потужності. Так, якщо за відсутності компенсації реактивної потужності загальні втрати активної потужності в мережі становлять 44,7 кВт, то при повній компенсації у вузлі 4 ( $Q_4=0$ ) вони зменшуються до 28,6 кВт (зменшення втрат становить 36%), а при  $Q_4=11,4$  Мвар втрати потужності – 27,55 кВт (зменшення втрат становить 38,3%). Отже, перекомпенсація реактивної потужності на 50% у даному випадку забезпечує приблизно 6% від загальної економії втрат.

Водночас з рис. 2 видно, що починаючи з режиму повної компенсації реактивної потужності у вузлі 4, питомі прирости зменшення втрат активної потужності в мережі за реактивним навантаженням у вузлі 4 стають меншими ніж за реактивним навантаженням у вузлі 3. Якщо після повної компенсації реактивної потужності у вузлі 4 розглянути можливість встановлення джерела реактивної потужності у вузлі 3, то, як видно з порівняння залежностей 4 і 4-3, на початковій ділянці після повної компенсації реактивної потужності у вузлі 4 прирости зменшення втрат активної потужності відрізняються незначно. Водночас, встановлення джерела реактивної потужності у вузлі 3 пов'язане з додатковими матеріальними витратами, що може виявитись не доцільним.

Пропонується для визначення верхньої межі використання джерела реактивної потужності в режимі перекомпенсації скористатись питомими приростами втрат активної потужності, що відносяться на баланс окремого споживача, при зміні його реактивного навантаження. У такому випадку умову визначення найбільшої реактивної потужності в режимі перекомпенсації можна подати у вигляді (5). З (5) можна отримати, що найбільше значення генерованої реактивної потужності у вузлі 4 не повинно перевищувати 5,7 Мвар. Встановлення більшої потужності приведе до різкого збільшення втрат, що відносяться на баланс даного споживача (рис. 3), і є не вигідним для нього. Характерною особливістю є те, що це значення генерованої реактивної потужності вдвічі менше від значення, розрахованого за формулою (4).

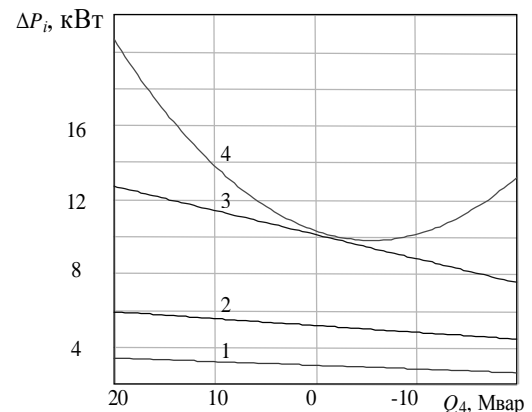


Рисунок 3 - Залежності втрат, які відносяться на баланс споживачів як функцій  $Q_4$

На рис. 4 зображено залежності втрат потужності у вітках мережі у разі регулювання реактивної потужності у вузлі 4, з якого випливає, що за відсутності компенсації реактивної потужності найбільшими є втрати в лініях 0-2 та 1-3, відповідно 11,35 кВт та 11,89 кВт. По мірі компенсації реактивної потужності у вузлі 4 вони зменшуються. Так, при  $Q_4=0$  втрати потужності в лініях 0-2 та 1-3 становлять відповідно 8,95 кВт та

7,63 кВт. У разі генерування реактивної потужності  $Q_4=5,7$  Мвар, вони зменшуються відповідно до 8,4 кВт та 6,9 кВт.

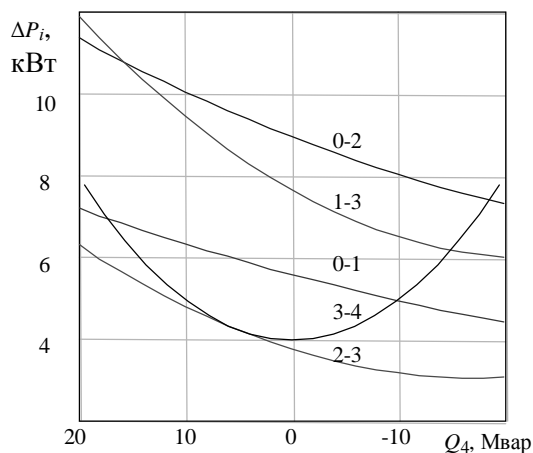


Рисунок 4 - Залежності втрат активної потужності у вітках мережі як функцій  $Q_4$

Залежності розподілення втрат потужності, що виникають в одній з найбільш завантажених віток (1-3), між споживачами як функцій реактивної потужності  $Q_4$  (рис. 5), показують яким чином будуть розподілені втрати між споживачами за різної балансової приналежності ліній при збільшенні реактивної потужності джерела.

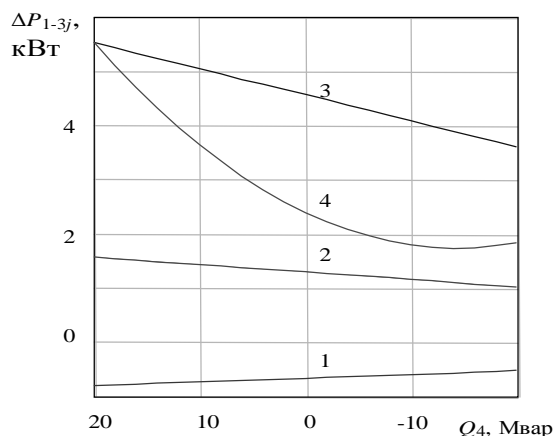


Рисунок 5 - Залежності розподілення втрат вітки (1-3) між споживачами як функцій  $Q_4$

Від'ємний знак втрат потужності свідчить про те, що напрямок перетоку потужності через вітку 1-3 до вузла 1 протилежний напрямку результуючого потоку потужності у вітці 1-3.

**Висновки.** Таким чином, використання (1)–(5) забезпечує можливість аналізу зменшення втрат потужності у вітках електричної мережі, зокрема за наявності транзитних перетоків електроенергії, у разі використання джерел-регуляторів реактивної потужності. Найбільше значення генерованої реактивної потужності джерела може бути визначене за мінімальним значенням втрат, які відносяться на баланс споживача, або ж як одна друга від генерованої реактивної потужності

джерела, що забезпечує мінімальне значення втрат потужності в мережі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Гамм А. З. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергетической системе / А. З. Гамм, И. И. Голуб // *Электричество*. – 2003. – №3. – С. 10–15.
2. Стогний Б. Определение транзитных потерь мощности в фрагментированных электрических сетях областных энергоснабжающих компаний / Б. Стогний, В. Павловский // *Энергетическая политика Украины*. – 2004. – №5. – С. 26–31.
3. Дерзкий В. Г. Распределение технологического расхода электрической энергии в общих элементах электрической сети между различными потребителями / В. Г. Дерзкий // *Энергетика и электрификация*. – 2001. – №3. – С. 33–37.
4. Толасов А. Г. Потери на транзит электроэнергии и их распределение между участниками энергообмена / А. Г. Толасов // *Электрические станции*. – 2002. – №1. – С. 20–25.
5. Забелло Е. П. Распределение потерь электроэнергии в общих элементах электрической сети между различными потребителями / Е. П. Забелло, А. Н. Евсеев // *Промышленная энергетика*. – 2002. – №7. – С. 37–41.
6. Лежнюк П. Д. Определение и анализ потерь мощности от транзитных перетоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, А. Б. Бурыкин // *Электрические сети и системы*. – 2006. – №1. – С. 5–11.
7. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы): Учебное пособие / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1973. – 280 с.
8. Рогальский Б. С. Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами / Б. С. Рогальський, Л. М. Мельничук // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2004. – №1. – С. 38–41.
9. Мельничук Л. М. Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами з урахуванням їх графіків навантажень / Л. М. Мельничук // *Енергетика та електрифікація*. – 2006. – №5. – С. 19–21.
10. Бурбело М. Й. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах: Монографія / М. Й. Бурбело, Л. М. Мельничук – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. – 110 с.
11. Лежнюк П. Д. Функціональна залежність складових втрат потужності у вітках електричної мережі від потужності у вузлах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикин // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2005. – №4. – С. 58–62.

