

Л. М. Мельничук

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Запропоновано підхід для визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження, який оснований на розподіленні зменшення затрат між споживачами, що дозволяє здійснювати ефективне стимулювання споживачів, які впроваджують заходи з енергозбереження.

Вступ

В математичних моделях задач оптимізації систем електропостачання (СЕР) цільову функцію формують у вигляді мінімуму розрахункових затрат [1, 2]:

$$Z = \mathbf{x}^t \mathbf{c} + \mathbf{x}^t \mathbf{D} \mathbf{x}, \quad (1)$$

де \mathbf{x} — вектор активної, реактивної або повної потужностей вузлів навантажень $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^t$; \mathbf{c} — вектор вартості потужності, віднесеної до розрахункового періоду часу; \mathbf{D} — матриця відносної вартості втрат потужності за цей же період часу.

Елементи $c_i, i = \overline{1, n}$ вектора \mathbf{c} можуть бути визначені як добуток питомої вартості c_0 енергії, що споживається в вузлах електричної мережі, і часу використання максимального навантаження — у разі, якщо навантаження задаються максимальними значеннями потужностей або фактичного часу роботи споживачів i -го вузла навантаження — у разі, якщо навантаження задаються середніми потужностями.

Матрицю відносної вартості втрат потужності можна подати у такому вигляді [3]:

$$\mathbf{D} = \frac{10^{-3}}{U_n^2} \mathbf{\Pi}^t \mathbf{R} \mathbf{D}_0 \mathbf{\Pi}, \quad (2)$$

де \mathbf{R} — діагональна матриця активних опорів віток розрахункової схеми мережі $\mathbf{R} = \text{diag}(R_1, \dots, R_m)$; $\mathbf{\Pi}$ — модифікована матриця коефіцієнтів розподілу (матриця шляхів) розміром $(m \times n)$; \mathbf{D}_0 — діагональна матриця відносної вартості втрат електричної енергії в вітках $\mathbf{D}_0 = \text{diag}(c_0 \tau_1 / d_1^2, \dots, c_0 \tau_m / d_m^2)$ — у разі використання максимальних значень потужностей і $\mathbf{D}_0 = \text{diag}(c_0 k_{\Phi 1}^2 T / d_1^2, \dots, c_0 k_{\Phi m}^2 T / d_m^2)$ — у разі використання середніх значень потужності, тут τ_j — час максимальних втрат активного, реактивного або повного навантаження j -ї вітки ($j = \overline{1, m}$); $k_{\Phi j}$ — коефіцієнт форми графіка навантаження j -ї вітки; T — розрахунковий період часу; $d_j = U_j / U_n$ — відносне значення середньої напруги j -ї вітки до номінальної напруги.

Для зменшення розрахункових затрат можливими є чотири підходи: по-перше, зменшення середніх навантажень, що можна досягти за допомогою встановлення та дотримання прогресивних норм електроспоживання електричної енергії і запровадження новітніх технологій; по-друге, вирівнювання графіків навантажень шляхом зміщення в часі початку технологічних процесів, виділенням споживачів-регуляторів; по-третє, зменшення вартості споживаної енергії завдяки використанню обліку електроенергії за зонними тарифами і перенесенням навантажень з пікової та напівпікової зони доби в зону нічного провалу навантажень; по-четверте, зменшення втрат потужності шляхом оптимізації режимів електричної мережі.

Передумовою впровадження конкретних заходів з енергозбереження є заінтересованість конкретних споживачів. Однак відомі методи оцінювання економічної ефективності не дають можливості визначити частку вкладу в енергозбереження кожного окремого споживача. Це не дозволяє використати ефективне стимулювання заходів з енергозбереження.

В статті розв'язується задача побудови математичних моделей для оцінювання економічної ефективності заходів з енергозбереження у разі зменшення середніх навантажень та вирівнювання їх графіків.

Оцінювання ефективності заходів з енергозбереження у разі зменшення середніх навантажень

Одним з найефективніших заходів є зменшення середніх навантажень завдяки використанню прогресивних технологій і зменшенню енергомісткості продукції.

У разі зменшення вектора навантаження \mathbf{x} на значення $\Delta\mathbf{x} = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)^t$ розрахункові затрати зменшуватимуться на значення [3]:

$$\Delta Z = \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{c} + \mathbf{x}^t \mathbf{D}\Delta\mathbf{x} - (\mathbf{x} - \Delta\mathbf{x})^t \mathbf{D}(\mathbf{x} - \Delta\mathbf{x}) = \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{c} + \mathbf{x}^t \mathbf{D}\Delta\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{D}(\mathbf{x} - \Delta\mathbf{x}). \quad (3)$$

Оскільки $\mathbf{x}^t \mathbf{D}\Delta\mathbf{x} = \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{D}\mathbf{x}$, то вираз (3) можна записати у вигляді [1]

$$\Delta Z = \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{c} + 2\Delta\mathbf{x}^t \mathbf{D}\mathbf{x} - \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{D}\Delta\mathbf{x} = \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{c} + \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{D}(2\mathbf{x} - \Delta\mathbf{x}). \quad (4)$$

Для зменшення навантажень необхідні капітальні вкладення, а також матеріальне стимулювання, яке змістовно є обсягом коштів, що виплачуються технологічному і експлуатаційному персоналу у вигляді премій з метою заохочення до впровадження прогресивних технологій. Залежність необхідної суми коштів, що використовується на капітальні вкладення та матеріальне стимулювання i -го споживача, можна апроксимувати квадратичним поліномом Δx_i . Отже,

$$\Delta u = \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{a} + \Delta\mathbf{x}^t \mathbf{B}\Delta\mathbf{x}, \quad (5)$$

де \mathbf{a} — вектор питомих затрат на стимулювання $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)^t$; \mathbf{B} — діагональна матриця приростів питомих затрат на стимулювання $\mathbf{B} = \text{diag}(b_1, \dots, b_n)$.

Можливі декілька підходів для визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження. Перший підхід полягає у визначенні зменшення функції затрат ΔZ у разі зміни i -ї компоненти вектора навантаження $\Delta\mathbf{x}$ і знаходженні вектора чутливостей цільової функції $\mathbf{G}_z = (\Delta Z/\Delta x_1, \dots, \Delta Z/\Delta x_n)^t$, який дозволяє визначити найбільш впливові вузли електричної мережі СЕП, зменшення навантаження в яких забезпечує найменші розрахункові затрати. Після визначення вектора чутливостей функції затрат на стимулювання $\mathbf{G}_u = (\Delta u/\Delta x_1, \dots, \Delta u/\Delta x_n)^t$ і порівняння компонентів цього вектора з компонентами вектора \mathbf{G}_z можна вибрати вузли і значення Δx_i , які приносять найвідчутніший економічний ефект.

Недоліком такого підходу є те, що економічний ефект визначається для системи в цілому, а частка виграшу для даного споживача залишається невідомою. Це не забезпечує ефективного стимулювання споживачів, які впроваджують заходи з енергозбереження.

Ще один підхід до визначення економічної ефективності заходів зі збереження електричної енергії, може бути оснований на розподіленні розрахункових затрат між споживачами [4]

$$\mathbf{Z} = \mathbf{x}^L \mathbf{c} + \mathbf{x}^L \mathbf{D}\mathbf{x}, \quad (6)$$

де \mathbf{x}^L — діагональна матриця навантажень вузлів електричної мережі $\mathbf{x}^L = \text{diag}(x_1, \dots, x_n)$.

Аналогічно, вектор зменшення затрат, розподілених між споживачами, буде

$$\Delta \mathbf{Z} = \Delta\mathbf{x}^L \mathbf{c} + \mathbf{x}^L \mathbf{D}\Delta\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}^L \mathbf{D}(\mathbf{x} - \Delta\mathbf{x}), \quad (7)$$

де $\Delta\mathbf{x}^L$ — діагональна матриця зменшення навантажень вузлів, а вектор затрат на матеріальне стимулювання:

$$\Delta u = \Delta\mathbf{x}^L \mathbf{a} + \Delta\mathbf{x}^L \mathbf{B}\Delta\mathbf{x}. \quad (8)$$

Порівнюючи відношення відповідних компонент векторів $\Delta \mathbf{Z}$ і $\Delta \mathbf{u}$ можна вибрати найефективніший варіант впровадження нових технологій. Результат доцільно подати у вигляді вектора чутливостей $\mathbf{G} = (\Delta Z_1/\Delta u_1, \dots, \Delta Z_n/\Delta u_n)^t$ або сформувати вектор

$$\Phi = \Delta \mathbf{Z} - \Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{x}^T (\mathbf{c} - \mathbf{a}) + \mathbf{x}^T \mathbf{D} \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}^T [\mathbf{D}(\mathbf{x} - \Delta \mathbf{x}) - \mathbf{B} \Delta \mathbf{x}], \quad (9)$$

за значенням компонент якого приймають рішення про доцільність впровадження заходів з енергозбереження.

Оцінювання ефективності регулювання графіків навантажень

Для визначення економічної ефективності вирівнювання графіків навантажень з метою зменшення дисперсійної складової втрат у виразі (1) другий доданок необхідно розділити на дві частини, які б враховували окремо вартість середніх та дисперсійних втрат. Тоді (1) можна записати у вигляді

$$Z = \mathbf{x}^t \mathbf{c} + \mathbf{x}^t \mathbf{D} \mathbf{x} + \mathbf{1}^t \mathbf{K}_D \mathbf{1}, \quad (10)$$

де $\mathbf{1}$ — одиничний вектор-стовпець; \mathbf{K}_D — матриця, що враховує коваріацію навантажень у вузлах електричної мережі.

У цьому випадку визначення матриці \mathbf{D} за формулою (2) здійснюється з використанням матриці $\mathbf{D}_0 = \text{diag}(c_0 T/d_1^2, \dots, c_0 T/d_m^2)$, в якій не враховуються коефіцієнти форми, а елементи матриці \mathbf{K}_D є добутком відповідних коефіцієнтів коваріації навантажень вузлів та елементів матриці \mathbf{D}

$$\mathbf{K}_D = \begin{bmatrix} k_{11} D_{11} & k_{12} D_{12} & \dots & k_{1n} D_{1n} \\ k_{21} D_{21} & k_{22} D_{22} & \dots & k_{2n} D_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} D_{n1} & k_{n2} D_{n2} & \dots & k_{nn} D_{nn} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

де k_{ij}, D_{ij} — відповідно коефіцієнти коваріації навантажень вузлів та елементи матриці \mathbf{D} .

Оцінювання ефективності заходів з вирівнювання графіків навантажень виконується аналогічно як і у разі зменшення середніх навантажень.

Крім того, розділення зменшення затрат, зумовлених зменшенням середніх навантажень і вирівнюванням графіків навантажень, дозволяє оцінити економічну ефективність заходів у разі одночасного різного впливу на ці фактори вибраного заходу енергозбереження.

Для різко вираженої нестационарності графіків навантажень за умови збереження їх ергодичності необхідним є врахування часових залежностей затрат

$$Z = \int_0^T z(t) dt,$$

де $z(t)$ — миттєве значення затрат.

Останній інтеграл доцільно замінити сумою з урахуванням тривалостей інтервалів стаціонарності.

Для таких навантажень доцільним є застосування канонічного розкладання випадкового процесу [5, 6]

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{m}_x(t) + \sum_k V_k \varphi_k(t), \quad (12)$$

де $\mathbf{m}_x(t)$ — вектор математичних сподівань навантажень у вузлах мережі; V_k — випадкові некорельовані величини розкладання; $\varphi_k(t)$ — детерміновані функції розкладання графіків навантажень.

Застосування розкладання (12) дозволяє зберегти структуру розрахунків економічної ефективності (3)—(11) для нестационарних ергодичних навантажень. У даному випадку необхідно ввести

часові залежності вектора $\mathbf{c}(t)$ та матриць $\mathbf{D}(t)$, $\mathbf{K}_D(t)$, а це, в свою чергу, попередньо задавши часову залежність $c_0(t)$, дає можливість оцінити ефективність зміщення графіків навантажень з урахуванням зонних тарифів.

Висновки

Запропоновано підхід для визначення економічної ефективності заходів з енергозбереження, який оснований на розподіленні зменшення затрат між споживачами, що дозволяє здійснювати ефективне стимулювання споживачів, які впроваджують заходи з енергозбереження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. — М.: Энергоиздат, 1981. — 200 с.
2. Ковалев И. Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 200 с.
3. Сиуда И. И., Свешников В. И. Алгоритм расчета мощности компенсирующих устройств в сетях электроэнергетических систем // Изв. АН СССР Энергетика и транспорт. — 1978. — № 2. — С. 148—152.
4. Рогальський Б. С., Мельничук Л. М. Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами // Вісник ВПІ. — 2004. — № 1. — С. 38—41.
5. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. — М.: Наука. — 1991. — 384 с.
6. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. — М.: Наука, 1979. — 496 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження

Надійшла до редакції 16.06.05
Рекомендована до друку 5.09.05

Мельничук Людмила Михайлівна — асистент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження.

Вінницький національний технічний університет