

ДОДАТКОВЕ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАТИВНИХ НАДЛИШКІВ КОНДЕНСАТОРНИХ УСТАНОВОК

Вступ

Впровадження конденсаторних установок (КУ) в електричні мережі створює умови значного зменшення втрат електричної енергії в них. Такого зменшення можна досягнути лише при автоматичному керуванні потужностями КУ протягом доби. На сьогоднішній день відомо ряд способів такого керування [1], і вони реалізуються шляхом комутацій КУ, зорієнтованих на реактивні навантаження вузлів, в яких вони знаходяться. Такий підхід не дозволяє повною мірою використовувати КУ протягом доби, тому що деякі споживачі в певні періоди доби не працюють або працюють з мінімальним навантаженням, а інші споживачі в цей час працюють з максимальним навантаженням або у них не встановлено КУ. Отже, у вузлах перших може з'явитися оперативний надлишок потужності КУ, а в інших – її дефіцит і створюється технічна можливість компенсації реактивної потужності одних вузлів за рахунок КУ інших [2]. Практична реалізація такої можливості потребує проведення її техніко-економічного аналізу і створення відповідних математичних моделей.

Розробка математичної моделі

Сформуємо модель використання оперативних надлишків КУ для радіальної електричної мережі, показаної на рис. 1 а, що є частиною енергосистеми. Оскільки в більшості споживачів потужність реактивних навантажень змінюється повільно, то будемо вважати її на коротких проміжках часу (0,5...1 год) постійною [3]. Це дає можливість представити величину реактивного навантаження у вигляді ступінчастого графіка та проводити оптимізаційні розрахунки для кожного ступеня окремо. Нехай до вказаної мережі підключено p споживачів, а i -ий споживач має добовий ступінчастий графік реактивного навантаження $Q_i(t)$, який наведений на рис. 1 б.

Як видно з рис. 1 б в i -их вузлах схеми протягом проміжків часу Δt_j можуть з'явитися надлишки реактивної потужності КУ:

$$\delta Q_{KU_i}^j = Q_{KU_i} - Q_i^j > 0, i = 1..n, j = 1..m, \quad (1)$$

де n – кількість вузлів, в яких утворилися надлишки реактивної потужності; m – кількість ступенів графіка $Q_i(t)$; Q_i^j – споживання реактивної потужності i -им вузлом протягом проміжку часу Δt_j .

В цей же час в k -их вузлах може виникнути дефіцит реактивної потужності:

$$\Delta Q_k^j = Q_k^j - Q_{KU_k} > 0, k = 1..q. \quad (2)$$

де q – кількість вузлів, в яких утворився дефіцит реактивної потужності.

Таким чином на проміжку часу Δt_j в мережі виникає надлишок реактивної потужності

$$\delta Q_{KU\Sigma}^j = \sum_{i=1}^n \delta Q_{KU_i}^j, \text{ який можна використати для компенсації дефіциту реактивної потужності}$$

$$\Delta Q_{\Sigma}^j = \sum_{k=1}^q \Delta Q_k^j. \quad (3)$$

Проведемо економічний аналіз використання оперативних надлишків, відповідно схеми заміщення розрахункової мережі, наведеної на рис. 2.

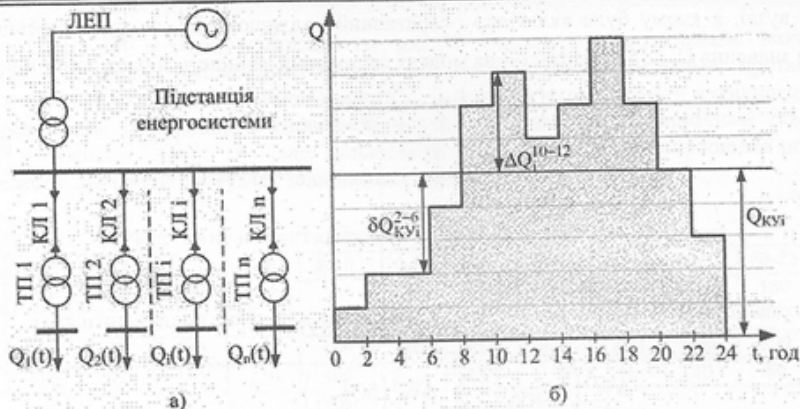


Рис. 1. а) схема розрахункової мережі; б) графік споживання реактивної потужності і-им споживачем (ЛЕП – лінія електропередачі; КЛ – кабельна лінія; ТП – трансформаторна підстанція; Q_{KV_i} – потужність КУ, встановлених в і-му вузлі; $\delta Q_{KV_i}^{2-6}$ – оперативний надлишок реактивної потужності КУ і-го вузла протягом проміжку часу Δt_{4-6} ; ΔQ_i^{10-12} – дефіцит реактивної потужності і-го споживача протягом проміжку часу Δt_{10-12})

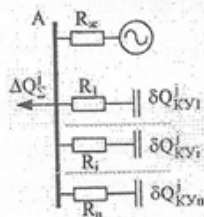


Рис. 2. Схема заміщення (R_i – сумарний активний опір лінії та трансформатора, що живить і-й вузол; R_k – сумарний активний опір лінії живлення та трансформатора підстанції)

При передачі реактивної потужності від і-их вузлів в к-гі на проміжку часу Δt_j зменшуються втрати в живильних лініях і мережах енергосистеми на величину

$$\Delta W_1^j = \left(\frac{2\Delta Q_{\Sigma}^j \sum_{i=1}^n \delta Q_{KV_i}^j - \left(\sum_{i=1}^n \delta Q_{KV_i}^j \right)^2}{U^2} \cdot R_{ж} + \sum_{i=1}^n \left(\delta Q_{KV_i}^j \right) \cdot D \right) \cdot \Delta t_j, \quad (4)$$

з іншого боку виникають додаткові втрати енергії в і-их лініях:

$$\Delta W_2^j = \sum_{i=1}^n \frac{\left(\delta Q_{KV_i}^j \right)^2}{U^2} R_i \cdot \Delta t_j, \quad (5)$$

де D – економічний еквівалент реактивної потужності для вузла А, що визначає питомі втрати активної потужності від передачі реактивної по мережах енергосистеми [4]. Результатне зменшення споживання активної енергії визначається як:

$$\Delta W^j = \Delta W_1^j - \Delta W_2^j. \quad (6)$$

Задача оптимального керування оперативними надлишками реактивної потужності КУ полягає в тому, щоб на кожному проміжку часу Δt_j ввімкнути такі потужності цих надлишків і в таких вузлах, які забезпечують максимальне зменшення втрат електроенергії ΔW^j за умови, що

напруга у вузлі, в якому буде включено оперативний надлишок, U_i^j не буде перевищувати її допустиме значення $U_{\text{доп}}^j$ [5]. Математична модель оптимізації запишеться наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W^j(\delta Q_{KYi}^j) &\rightarrow \max \\ \delta Q_{KY\Sigma}^j &\leq \Delta Q_{\Sigma}^j \\ \delta Q_{KYi}^j &\geq 0 \\ U_i^j &\leq U_{\text{доп}}^j \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Оскільки цільову функцію в моделі (7) $\Delta W^j(\delta Q_{KYi}^j)$ можна представити як

$$\Delta W^j(\delta Q_{KYi}^j) = \sum_{i=1}^n \Delta W_i^j(\delta Q_{KYi}^j), \quad (8)$$

то вона є адитивною, і для виконання оптимізації можна застосовувати метод динамічного програмування [6]. Він дозволяє здійснити направлений послідовний перебір варіантів вмикання δQ_{KYi}^j при виконанні вказаних обмежень, і відповідно знайти максимум цільової функції $\Delta W^j(\delta Q_{KYi}^j)$. Оптимізаційні розрахунки, в результаті яких ми одержуємо ΔW_{max}^j , проводяться на основі основного рекурентного співвідношення

$$\Delta W_i^j(\xi) = \max_{\delta Q_{KYi}^j=0 \dots \xi} \left\{ \Delta W_i^j(\delta Q_{KYi}^j; \xi) + \Delta W_{i-1}^j(\Delta Q_{\Sigma}^j - \xi; \delta Q_{KYi}^j) \right\}, \quad (9)$$

де ξ – параметр стану системи, що характеризує сумарну потужність можливо ввімкнених оперативних надлишків, $\xi = 0 \dots \Delta Q_{\Sigma}^j$. Величина потужності оперативного надлишку в i -му вузлі для досягнення максимального зниження втрат енергії визначається як

$$\delta Q_{KYi, \text{max}}^j = \Delta W_{\text{max}}^j{}^{-1}(\delta Q_{KYi}^j), \quad (10)$$

де $\Delta W_{\text{max}}^j{}^{-1}(\delta Q_{KYi}^j)$ – значення функції, оберненої до $\Delta W_{\text{max}}^j(\delta Q_{KYi}^j)$.

Аналогічно проводиться розрахунок для кожного проміжку часу Δt_j . Оскільки для кожного проміжку часу розрахунки проводяться незалежно один від одного, то сумарне максимальне зменшення величини втрат за весь розрахунковий період буде визначатися як сума максимальних знижень втрат на кожному проміжку часу Δt_j :

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum_{j=1}^m \Delta W_{\text{max}}^j. \quad (11)$$

Таким чином, можна сформулювати алгоритм розв'язання моделі для проміжку часу Δt_j .

Алгоритм розв'язання моделі для проміжку часу Δt_j

1. За (1) визначаються потужності та вузли, в яких виник оперативний надлишок. Відповідно заповнюється таблиця потужностей оперативних надлишків $\delta Q_{KY}(t)$, що виникають протягом доби.
2. За (2) визначаються потужності та вузли, в яких виник дефіцит реактивної потужності. Відповідно заповнюється таблиця дефіциту реактивної потужності $\Delta Q_{\Sigma}(t)$, що виникає протягом доби.
3. За (3) визначається сумарний дефіцит реактивної потужності в мережі ΔQ_{Σ}^j .
4. За (9) знаходимо максимальне зменшення втрат ΔW_{max}^j .
5. За (10) визначаються потужності оперативних надлишків та місця їх включення для максимального зменшення втрат.
6. За (11) розраховується сумарне зменшення втрат ΔW_{Σ} .

Приклад

Для розподільчої мережі, наведеної на рис. 3 розрахувати оптимальне використання оперативних надлишків. Споживання реактивної потужності споживачами протягом доби наведено в табл. 1. Потужності встановлених КУ вказано на схемі. Втрати активної енергії від передачі реактивної потужності в живильній мережі визначаються економічним еквівалентом реактивної потужності $D=0,05$ кВт/квар. Кількість робочих днів 265. Для спрощення розрахунків будемо вважати, що напруга у вузлах залишається в допустимих межах.

Таблиця 1

Реактивне навантаження вузлів протягом доби, квар

	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
$Q_1(t)$	50	50	100	150	200	220	300	350	250	200	150	100
$Q_2(t)$	60	80	120	180	230	230	250	300	260	240	180	150
$Q_3(t)$	80	90	100	120	160	200	210	220	300	350	390	240
$Q_4(t)$	180	200	230	250	300	210	180	100	60	40	60	80

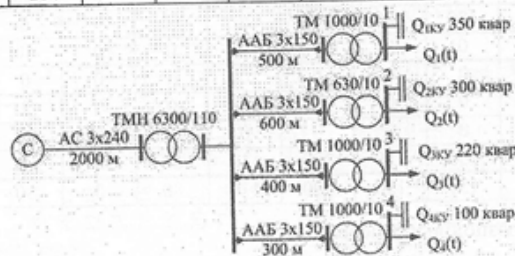


Рис. 3. Схема розподільчої мережі

Розв'язання

Для кожного проміжку часу Δt_i :

1. За (1) визначаються потужності та вузли, в яких виник оперативний надлишок δQ_{KYi}^j .

Наприклад, для проміжку часу Δt_{10-12} потужність оперативного надлишку реактивної потужності КУ у першому вузлі

$$\delta Q_{KY1}^{10-12} = 350 - 220 = 130 \text{ квар.}$$

2. За (2) визначаються потужності та вузли, в яких виник дефіцит реактивної потужності ΔQ_K^j .

Наприклад, для проміжку часу Δt_{10-12} дефіцит реактивної потужності у четвертому вузлі

$$\Delta Q_4^{10-12} = 210 - 100 = 110 \text{ квар.}$$

3. За (3) визначається сумарний дефіцит реактивної потужності в мережі ΔQ_{Σ}^j . Наприклад, для проміжку часу Δt_{10-12}

$$\Delta Q_{\Sigma}^j = 0 + 0 + 0 + 110 = 110 \text{ квар.}$$

Потужності оперативних надлишків реактивної потужності КУ, потужності дефіциту реактивної потужності та сумарні потужності дефіциту, що виникають протягом доби у вузлах, наведені в табл. 2.

4. За допомогою методу динамічного програмування визначаються потужності та місця вмикання оперативних надлишків. Наприклад, для проміжку часу Δt_{10-12} дефіцит реактивної потужності, що виник в четвертому вузлі $\Delta Q_4^{10-12} = 110$ квар, можна компенсувати чотирма способами: 1) використати оперативний надлишок з першого вузла $\delta Q_{KY1}^{10-12} = 110$ квар; 2) використати оперативні надлишки другого та першого вузлів - $\delta Q_{KY2}^{10-12} = 70$ квар, $\delta Q_{KY1}^{10-12} = 40$ квар; 3) використати оперативні надлишки другого, третього та першого вузлів - $\delta Q_{KY2}^{10-12} = 70$ квар, $\delta Q_{KY3}^{10-12} = 20$ квар, $\delta Q_{KY1}^{10-12} = 20$ квар; 4) використати оперативні надлишки третього та

першого вузлів – $\delta Q_{КУ3}^{10-12} = 20$ квар, $\delta Q_{КУ1}^{10-12} = 90$ квар. Для всіх випадків розрахуємо зменшення втрат за формулами (4) – (6). Наприклад, для другого випадку зменшення втрат в живильній мережі

$$\Delta W_1^{10-12} = \left(\frac{2 \cdot 110 \cdot (70 + 40) - (70 + 40)^2}{10^2} \cdot 15,517 \cdot 10^{-3} + (70 + 40) \cdot 0,05 \right) \cdot 2 = 14,755 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Таблиця 2

Потужності оперативних надлишків КУ та дефіцитів реактивної потужності вузлів протягом доби, квар

	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
$\delta Q_{1КУ}(t)$	300	300	250	200	150	130	50	0	100	150	200	250
$\delta Q_{2КУ}(t)$	240	220	180	120	70	70	50	0	40	60	120	150
$\delta Q_{3КУ}(t)$	140	130	120	100	60	20	10	0	0	0	0	0
$\delta Q_{4КУ}(t)$	0	0	0	0	0	0	0	0	40	60	40	20
$\Delta Q_1(t)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta Q_2(t)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta Q_3(t)$	0	0	0	0	0	0	0	0	80	130	170	20
$\Delta Q_4(t)$	80	100	130	150	200	110	80	0	0	0	0	0
$\Delta Q_{\Sigma}(t)$	80	100	130	150	200	110	80	0	80	130	170	20

Збільшення втрат в розподільній мережі

$$\Delta W_2^{10-12} = \left(\frac{70^2}{10^2} \cdot 2,296 \cdot 10^{-3} + \frac{40^2}{10^2} \cdot 1,348 \cdot 10^{-3} \right) \cdot 2 = 0,268 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

$$\Delta W^{10-12} = 14,755 - 0,268 = 14,487 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Аналогічно знаходимо для всіх випадків: для першого $\Delta W^{10-12} = 14,429$ кВт·год, для третього $\Delta W^{10-12} = 14,509$ кВт·год, для четвертого $\Delta W^{10-12} = 14,526$ кВт·год.

Максимальне зменшення втрат для проміжку часу Δt_{10-12}

$$\Delta W_{\max}^{10-12} = \max \{14,429; 14,487; 14,509; 14,526\} = 14,526 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Відповідно оптимальні потужності оперативних надлишків, що необхідно включити в проміжок часу Δt_{10-12} для компенсації дефіциту реактивної потужності $\Delta Q_4^{10-12} = 110$ квар –

$$\delta Q_{КУ3, \max}^{10-12} = 20 \text{ квар, } \delta Q_{КУ1, \max}^{10-12} = 90 \text{ квар.}$$

5. Відповідно ΔW_{\max}^j визначаються оптимальні потужності оперативних надлишків КУ вузлів. Значення зменшення втрат активної енергії в живильних мережах ΔW_1^j , втрат в лініях ΔW_2^j , сумарне зменшення втрат ΔW^j та величини оптимальних потужностей оперативних надлишків $\delta Q_{КУi, \max}^j$ для кожного вузла наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Зменшення втрат та оптимальні значення потужностей оперативних надлишків

	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
$\Delta W_1(t)$, кВт·год	9,986	13,103	18,245	21,983	32,414	14,755	9,986	0	9,986	18,245	25,969	2,124
$\Delta W_2(t)$, кВт·год	0,169	0,264	0,384	0,332	0,452	0,229	0,088	0	0,085	0,225	0,497	0,01
$\Delta W(t)$, кВт·год	9,817	12,839	17,861	21,651	31,961	14,526	9,898	0	9,902	18,019	25,472	2,114
$\delta Q'_{1КУ}(t)$, квар	0	0	10	50	70	90	50	0	40	70	130	0
$\delta Q'_{2КУ}(t)$, квар	0	0	0	0	70	0	20	0	0	0	0	0
$\delta Q'_{3КУ}(t)$, квар	80	100	120	100	60	20	10	0	0	0	0	0
$\delta Q'_{4КУ}(t)$, квар	0	0	0	0	0	0	0	0	40	60	40	20

6. Розраховується сумарне зменшення втрат ΔW_{Σ} за добу (11).

$$\Delta W_{\Sigma} = 9,817 + 12,839 + 17,861 + 21,651 + 31,962 + 14,526 + 9,898 + 0 + 9,901 + 18,020 + 25,472 + 2,114 = 174,06 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Відповідно зменшення втрат протягом року – $174,06 \cdot 265 = 46125,9 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

В тому числі зменшення втрат в живильних мережах:

$$\Delta W_{I\Sigma} = 9,986 + 13,103 + 18,245 + 21,983 + 32,414 + 14,755 + 9,986 + 0 + 9,986 + 18,245 + 18,969 + 2,124 = 176,796 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Відповідно зменшення втрат протягом року – $176,796 \cdot 265 = 46850,94 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$

Потужності КУ вузлів, що вмикаються протягом доби показано на рис. 4.

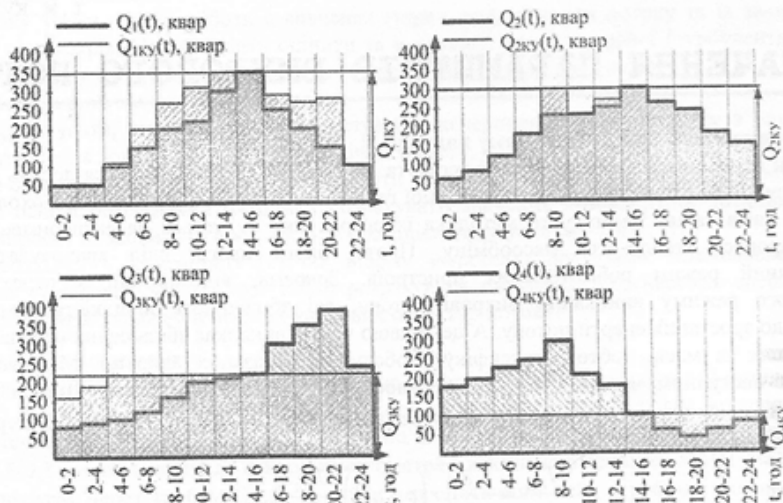


Рис.4. Графіки реактивних навантажень та ввімкнених потужностей КУ

Графік зменшення втрат активної енергії протягом доби показаний на рис.5.

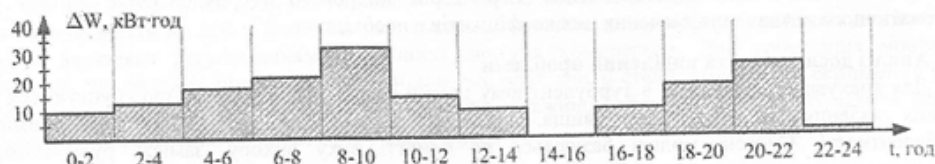


Рис. 5. Зменшення втрат активної енергії протягом доби

Висновки

1. Протягом доби у вузлах електричних мереж можуть виникати оперативні надлишки реактивної потужності, які доцільно використовувати для компенсації дефіциту реактивної потужності, що в цей же час може виникати в інших вузлах мережі.
2. Використання оперативних надлишків реактивної потужності КУ протягом доби дозволяє додатково зменшити втрати електроенергії в електричних мережах.

Література

1. Баркан Я.Д. Автоматическое управление режимом батарей конденсаторов. - М.: Энергия, 1978. - 112 с.
2. А.С. 1837269 (СССР), G05F1/170. Автоматический регулятор конденсаторных батарей/Рогальский Б.С., Демов А. Д., Непейвода В.М., Иванков В.О.// Заявл.10.12.90; Опубл.30.08.93; Бюл. №32.

3. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий/С.И.Вершинина, С.И.Гамзин, Ю.М.Голонов, Э.А.Киреева, А.И.Кирпа, Е.А.Конюхова, Э.Т.Сидоренко, Г.В.Стульников, А.А.Федоров/Под.ред. А.А.Федорова, Г.В.Сербиновского. Кн.2. – М.: Энергия, 1972. – 528с.
4. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами// Офіційний вісник України. – 2002. – №6.
5. Демов А.Д., Войнаровский А.Ж. Управление оперативным излишком мощности конденсаторных установок промышленных предприятий// Промышленная энергетика. – 2006. – №7. – С. 48-51.
6. Зайченко Ю.П. Исследование операций.–К. :Выща школа. Головное изд-во, 1988.–552 с.