

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Доповідь
до захисту магістерської кваліфікаційної роботи на тему:
Оптимальне керування графіком реактивної потужності
підприємства

Доповідач: ст. гр. ЕСЕ-16м
Ніколюк Ю.В.

Науковий керівник: к.т.н., проф.
Терешкевич Л.Б.

Вінниця 2018

Актуальність теми. Впровадження компенсувальних установок (КУ) в електричних мережах промислових підприємств дозволяє значно знизити втрати електричної енергії, які в даний час складають істотну частку від енергії генеруючої.

Ефективне використання КУ в заводських мережах досягається лише при їх автоматичному управлінні з урахуванням реальних умов функціонування. Існуючі способи автоматичного управління потужностями КУ не враховують ряд умов передачі, споживання і генерації реактивної потужності в мережах підприємства, що знижує ефективність їх використання. У зв'язку з цим виникає завдання більш ефективного управління КУ з метою поліпшення стану мереж промислових підприємств. Роботи, що спрямовані на поліпшення законів керування потужного КУ, слід вважати актуальними.

Мета дослідження. Додаткове зниження втрат активної енергії в електричних мережах і забезпечення нормованих відхилень напруги біля електроприймачів шляхом впровадження розроблених моделей та методів комплексного використання КУ, що, на відміну від, відомих дозволяють ще і забезпечити заданий, енергопостачальною компанією, графік РН.

Задачі дослідження. Відповідно до вказаної мети в роботі були поставлені такі основні задачі:

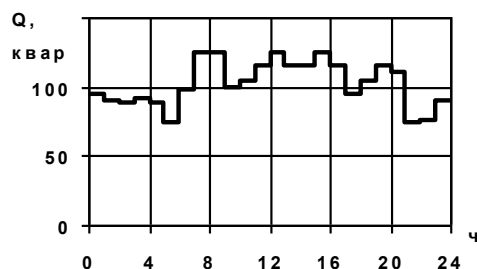
- математично постановити задачу забезпечення графіка РН;
- розробити алгоритм знаходження послідовності векторів керування, що забезпечують заданий графік РН;
- привести числовий експеримент, що підтверджує ефективність отриманих наукових положень.

Об'єктом дослідження. Втрати потужності та відхилення напруги в електричних мережах.

Предметом дослідження. Зниження втрат активної енергії та забезпечення допустимих відхилень напруги шляхом керування КУ в умовах заданого графіка електричних навантажень.

Математична постановка задачі оптимального керування графіком реактивної потужності

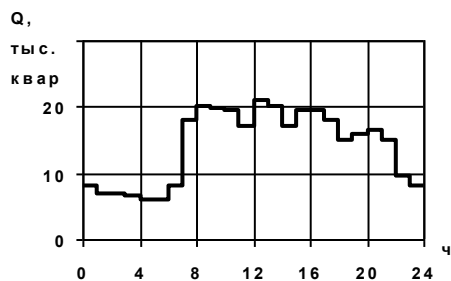
Добові графіки реактивної потужності підприємства різних типів промисловості:



Текстильна промисловість



Харчова промисловість



Легка промисловість



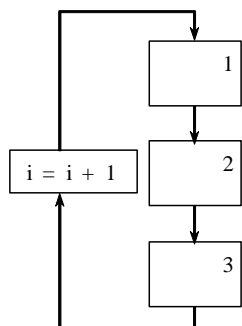
Машинобудівна промисловість

Математична постановка задачі оптимального керування графіком реактивної потужності (продовження)

$$\min \left\{ \int_{t_1}^{t_N} Q[Q'(t), \mathbf{x}(t)] dt \mid \mathbf{q}[Q'(t), \dots, \mathbf{x}(t)] \geq 0; \mathbf{h}[Q'(t), \dots, \mathbf{x}(t)] = 0 \right\} \quad (1)$$

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N Q[Q'(t_i), \mathbf{x}(t_i)] \Delta t \mid \mathbf{q}[Q'(t_i), \dots, \mathbf{x}(t_i)] \geq 0; \mathbf{h}[Q'(t_i), \dots, \mathbf{x}(t_i)] = 0 \right\} \quad (2)$$

Алгоритм оптимального управління графіком реактивної потужності:



1. Збір необхідної зовнішньої інформації для часу t_i .
2. Розрахунок вектора управління $\mathbf{x}(t_i)$.
3. Вектор управління $\mathbf{x}(t_i)$ реалізується.

Математичні моделі керування реактивною потужністю

$$(1) \begin{cases} Q' - \Delta Q \mathbf{x} \rightarrow \min \\ \mathbf{x} + \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{n} \\ Q' - \Delta Q \mathbf{x} \geq Q_{\text{dop}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} Q' - \Delta Q \mathbf{x} \rightarrow \min \\ \mathbf{x} + \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{n} \\ U' + \Delta U \mathbf{x} \leq U_{\text{min. dop}} + \varepsilon \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases}$$

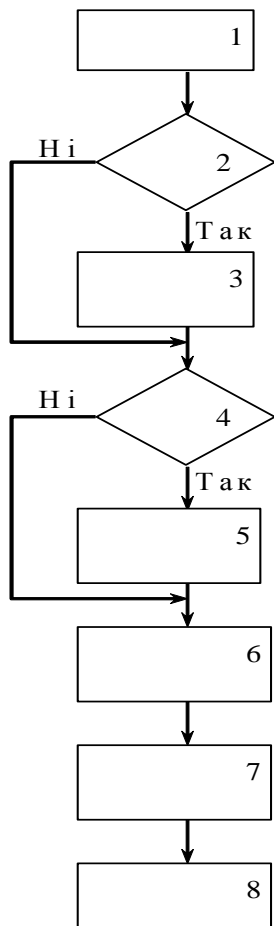
$$(3) \begin{cases} Q' - \Delta Q \mathbf{x} \rightarrow \min \\ \mathbf{x} + \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{n} \\ U' + \Delta U \mathbf{x} \leq U_{\text{max. dop}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases}$$

Методи аналізу розроблених математичних моделей

Рекурентні співвідношення Р. Беллмана для вирішення задачі оптимального керування РН:

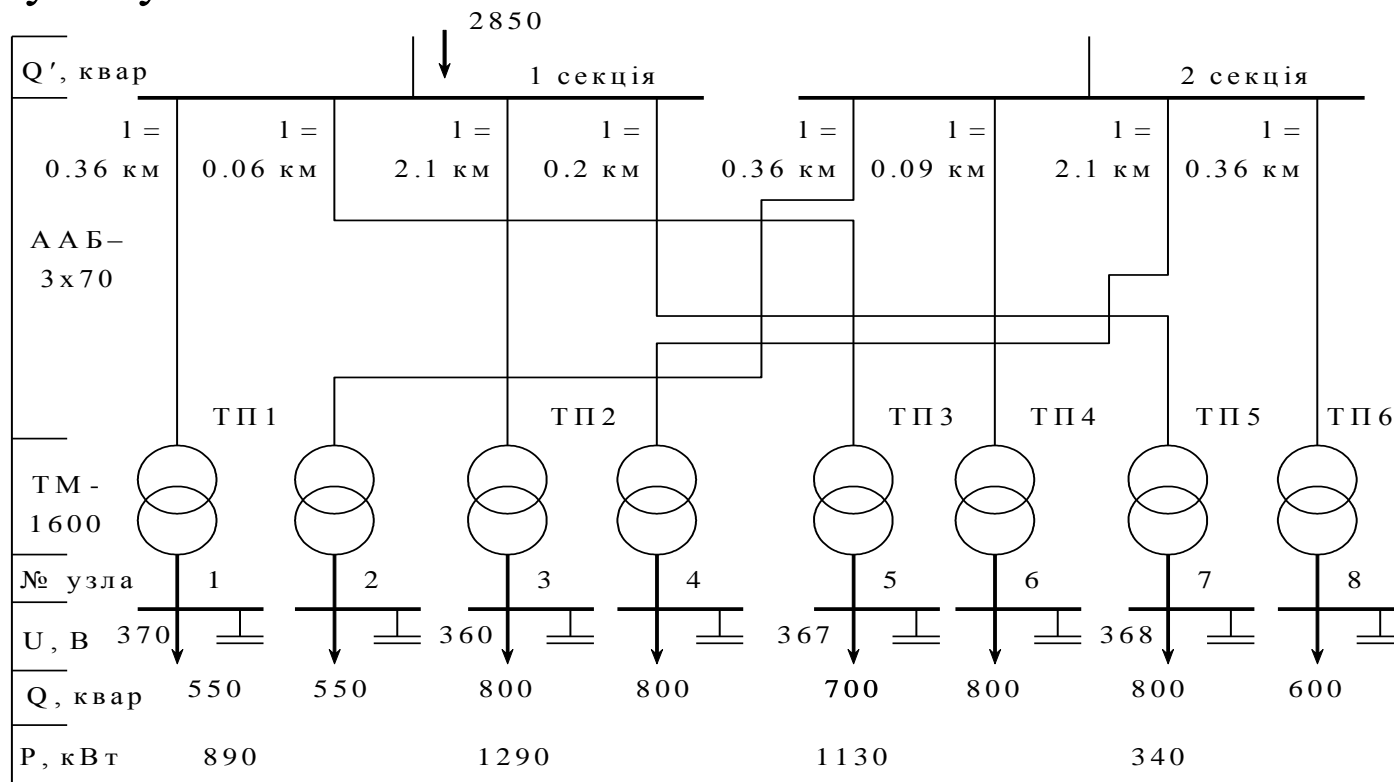
$$\left. \begin{aligned}
 f_1 &= \min_{1 \leq r \leq R_1} \{-\Delta Q_{r1} + Q'\} \\
 &\dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \dots\dots\dots \\
 f_k &= \min_{1 \leq r \leq R_k} \{-\Delta Q_{rk} + f_{(R-1)}\}, k = 2, 3, \dots, n
 \end{aligned} \right\}$$

Алгоритм розрахунку вектора керування для дискретного моменту часу



1. Розрахунок вектора z і формування множини M .
2. Вузли, де необхідно приймати рішення з урахуванням рівнів напруги, ϵ ?
3. Розрахунок вектора \mathbf{x}_1 , $\mathbf{x}_1^t = (\mathbf{x}_{11}^t \ \mathbf{x}_{12}^t \ \dots \ \mathbf{x}_{1k}^t)$ і формування множини M_1 , $M_1 \subset M$.
4. Вузли, де необхідно приймати рішення з урахуванням стійкості, ϵ ?
5. Розрахунок вектора \mathbf{x}_2 , $\mathbf{x}_2^t = (\mathbf{x}_{21}^t \ \mathbf{x}_{22}^t \ \dots \ \mathbf{x}_{2l}^t)$ і формування множини M_2 , $M_2 \subset M$.
6. Формування множини M_3 ; $M_3 = (M \setminus M_1) \setminus M_2$.
7. Розрахунок вектора управління \mathbf{x}_3 , $\mathbf{x}_3^t = (\mathbf{x}_{31}^t \ \mathbf{x}_{32}^t \ \dots \ \mathbf{x}_{3m}^t)$, відповідного оптимальної реалізації M_3 .
8. Визначення $\mathbf{x}(t_i)$, $\mathbf{x}^t(t_i) = (\mathbf{x}_1^t \ \mathbf{x}_2^t \ \mathbf{x}_3^t)$.

Тестовий приклад розрахунку вектора управління для дискретного моменту часу 9



Потужності ступенів КУ для першої секції збірних шин:

Вузол 1: 200 квар, 200 квар, 100 квар, 25 квар;

Вузол 3: 300 квар, 400 квар, 150 квар, 50 квар, 25 квар;

Вузол 5: 300 квар, 200 квар, 100 квар, 50 квар;

Вузол 7: 300 квар, 400 квар, 150 квар, 50 квар, 25 квар.

$$Q_{\text{доп}} = 0 \text{ квар.}$$

Тестовий приклад розрахунку вектора управління для дискретного моменту часу (продовження)

Математична модель прийняття рішення на найвищому рівні:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2850 - (200 \ 200 \ 100 \ 25 \ 300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25 \ 300 \ 200 \ 100 \ 50 \ 300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) x_{11} \rightarrow \min \\ x_{11} + \bar{x}_{11} = n \\ 2850 - (200 \ 200 \ 100 \ 25 \ 300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25 \ 300 \ 200 \ 100 \ 50 \ 300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) x_{11} \geq 0 \\ x_i, \bar{x}_i \in \{1;0\} \end{array} \right.$$

де $x^t = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16} \ x_{17} \ x_{18})$;

$$\bar{x}^t = (\bar{x}_1 \ \bar{x}_2 \ \bar{x}_3 \ \bar{x}_4 \ \bar{x}_5 \ \bar{x}_6 \ \bar{x}_7 \ \bar{x}_8 \ \bar{x}_9 \ \bar{x}_{10} \ \bar{x}_{11} \ \bar{x}_{12} \ \bar{x}_{13} \ \bar{x}_{14} \ \bar{x}_{15} \ \bar{x}_{16} \ \bar{x}_{17} \ \bar{x}_{18})$$

$$n^t = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1).$$

$$x^t = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0).$$

Отримаємо множину потужностей КУ, що мають бути включеними:

$$M_1 = (200 \ 200 \ 100 \ 300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 300 \ 200 \ 100 \ 300 \ 400 \ 150);$$

$$Q_{\text{доп}} = 0 \text{ квар.}$$

Тестовий приклад розрахунку вектора управління для дискретного моменту часу (продовження)

Математична модель, що забезпечує рівні напруги у вузлі 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} 800 - (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \mathbf{x}_{11} \rightarrow \min \\ \mathbf{x}_{11} + \bar{\mathbf{x}}_{11} = \mathbf{n} \\ 360 + (4.35 \ 5.8 \ 2.2 \ 0.73 \ 0.36) \mathbf{x}_{11} \leq 368 + 0.36 \\ \mathbf{x}_i, \bar{\mathbf{x}}_i = 1 \forall 0 \end{array} \right.$$

$$\mathbf{x}_1^t = \mathbf{x}_{11}^t = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0).$$

$$M_1 = (400 \ 150);$$

Тоді:

$$M_3 = M \setminus M_1 = (200 \ 200 \ 100 \ 300 \ 50 \ 300 \ 200 \ 100 \ 300 \ 400 \ 150).$$

Тестовий приклад розрахунку вектора управління для дискретного моменту часу (продовження)

В результаті проведених обчислень остаточно отримаємо вектор управління:

$$\mathbf{x}^t(t_i) = ((1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)(1 \ 1 \ 1 \ 0)(1 \ 1 \ 1 \ 1)(1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0)),$$

який реалізується в такий спосіб:

- у вузлі 1 включити потужності 200 квар, 200 квар, 100 квар; залишкова потужність по введенню вузла 50 квар;
- у вузлі 3 включити потужності 300 квар, 400 квар, 150 квар; залишкова потужність по введенню вузла -50 квар; напруга у вузлі забезпечується на рівні 372.35 В;
- у вузлі 5 включити потужності 300 квар, 200 квар, 100 квар, 50 квар; залишкова потужність по введенню вузла 50 квар;
- у вузлі 7 включити потужності 300 квар, 400 квар, 150 квар; залишкова потужність по введенню вузла -50 квар.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розроботани нові теоретичні та практичні положення підвищення ефективності впровадження конденсаторних установок і управління ними в мережах промислових підприємств, що створює сприятливі умови впровадження цих установок, дозволяє знизити експлуатаційні витрати і втрати електроенергії в зазначених мережах.

1. Синтезовано цілочисельні моделі багатокритеріального управління графіком реактивної потужності, які дозволяють раціонально використовувати потужності КУ, знизити кількість комутацій вимикачів КУ і підвищити точність управління.

2. Розроблено математичні моделі, які дозволяють використовувати КУ для регулювання графіка реактивної потужності і підвищити ефективність використання цих пристроїв для компенсації реактивної потужності промислового підприємства.

3. Запропоновано алгоритми аналізу цілочисельних лінійних і цілочисельних нескалярних математичних моделей управління з обмеженнями у вигляді рівностей і нерівностей для КУ в схемах компенсуючих і симетрувальних пристроїв методом динамічного програмування на основі розроблених рекурентних відносин Р. Беллмана. Проведеними дослідженнями показана їх обчислювальна ефективність.

Наукова новизна. Отримали подальший розвиток моделі комплексного використання КУ шляхом їх реалізації в дворівневій ієрархічній системі прийняття рішення, що забезпечує вимоги енергосистеми до графіка реактивних навантажень споживача, допустимих відхилення напруги у вузлах мережі та мінімальні втрати активної потужності за цих умов в мережах споживача.

Практична цінність. Розроблені математичні моделі можуть використовуватися для керування реактивними навантаженнями споживачів, яким енергопостачальна компанія задає графік РН.

Апробація роботи. Основні положення роботи та її результати доповідались і обговорювались на XLV науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки.

Публікації. Отримані результати опубліковані в збірнику праць XLV науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки.

Дякую за увагу!