

Собко Сергій Петрович

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ
НЕСИМЕТРІЄЮ РЕЖИМУ ЗА
ДОПОМОГОЮ СИМЕТРУЮЧОГО
ПРИСТРОЮ З МІНІМАЛЬНОЮ
ПОТУЖНІСТЮ КОНДЕНСАТОРІВ**

Магістерська кваліфікаційна робота

Керівник :
Терешкевич Леонід Борисович
Кандидат технічних наук, професор

Актуальність.

Несиметричні режими негативно впливають на роботу електрообладнання, на технологічні процеси, зменшують пропускну здатність елементів електричних мереж, супроводжуються додатковими втратами активної потужності та енергії

Для зниження несиметрії напруг використовуються різноманітні технічні засоби, серед яких симетруючі пристрої (СП) на основі несиметричної батареї статичних конденсаторів, які мають суттєві переваги в порівнянні з іншими пристроями [6, 7]. Такі пристрої крім симетрування електричних режимів здійснюють вплив на рівень напруги, реактивну потужність, на стійкість роботи електричних машин.

Ефективність симетрування в таких випадках визначається довершеністю математичного забезпечення засобів керування. Дослідження умов симетрування режимів в електричних мережах, розробка методів і способів керування ними, які дозволяють підвищити ефективність передачі електроенергії, слід вважати актуальними

Об'єкт дослідження – процеси симетрування електричних режимів в системах електропостачання.

Предмет дослідження – математичні моделі симетрування електричних режимів.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета. Метою роботи є покращення якості електроенергії за рахунок впровадження розроблених методів і моделей симетрування напруг та струмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести порівняльний аналіз існуючих технічних засобів, методів та моделей керування несиметричними режимами, з'ясувати їх недоліки і переваги;
- розробити моделі симетрування електричних режимів за допомогою СП з мінімальною конденсаторною потужністю;
- розробити методи метод аналізу математичної моделі;
- виконати перевірку працездатності розроблених алгоритмів на числовому прикладі.

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ВІННИЦЬКОМУ АГРЕГАТНОМУ ЗАВОДІ

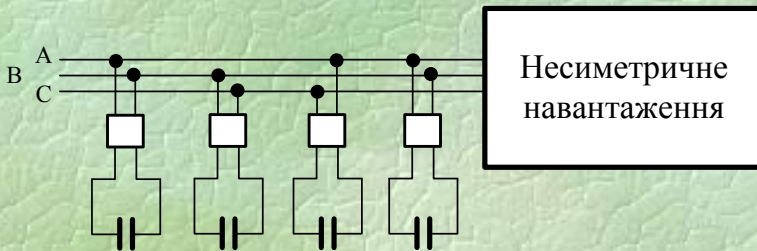
№ експерименту	Параметри, що вимірювались						Розраховані значення параметрів якості електроенергії			
	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$\delta U_{yA},$ В	$\delta U_{yB},$ В	$\delta U_{yC},$ В	$k_{2U},$ %
1	219,1	232,2	222,0	390,9	388,8	397,4	0,9	12,2	2,0	2,36
2	225,7	231,2	226,5	398,4	400,1	394,8	5,7	11,2	6,5	1,42
3	231,0	232,1	228,0	403,3	402,2	401,2	11,0	12,1	8,0	0,55
4	224,0	227,0	225,0	405,0	404,0	399,0	4,0	7,0	5,0	1,68

Разові вимірювання фазних та лінійних напруг на шинах низької напруги однієї із підстанцій 10/0,4 кВ Вінницького агрегатного заводу проведені 18 квітня 2017 року.

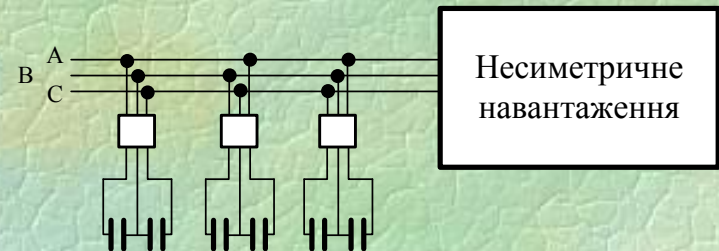
Оскільки значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в деяких випадках (експеримент №1) перевищує допустимі значення, то для умов агрегатного заводу є потреба в симетруванні напруг.

СХЕМИ СИМЕТРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

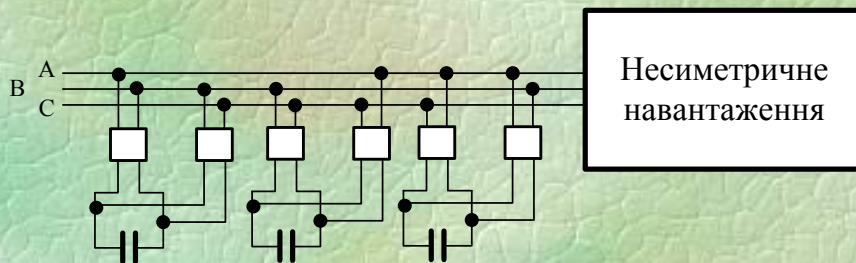
з мінімальною кількістю вимикачів



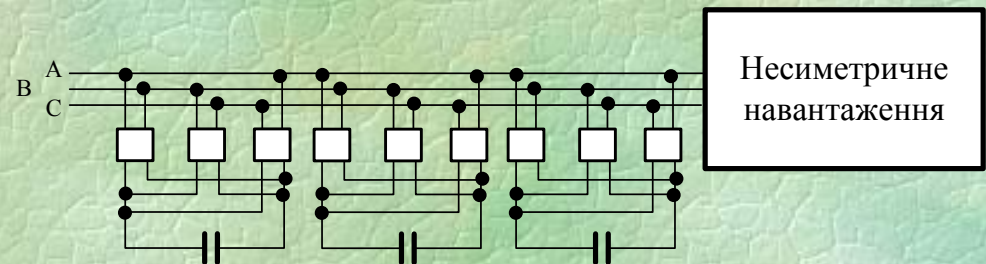
з двома конденсаторними батареями під один вимикач



з мінімальним числом симетруючих елементів



з найменшою потужністю конденсаторних батарей



ЗАГАЛЬНА СХЕМА ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ

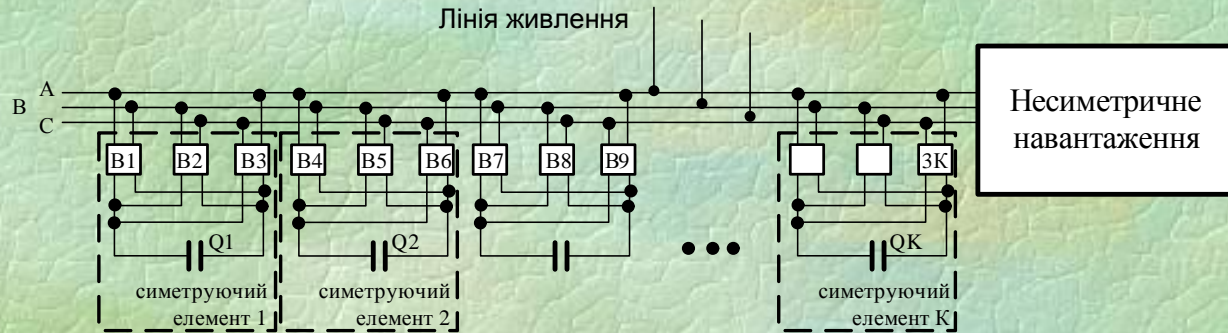
Етап 1. Розраховується вектор керування X_1 , що забезпечує максимальний симетруючий ефект наявними засобами.

Етап 2. Розраховується вектор керування X_2 , який дозволяє у разі необхідності та якщо є незадіяні симетричні секції СП, прийняти додаткове рішення з компенсації реактивних навантажень.

Вектор керування X , що має бути реалізованим розраховується:

$$X = X_1 + X_2$$

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВЕКТОРА x_1



Цільова функція описує струм зворотної послідовності в лінії, яка живить групу однофазних електроприймачів в залежності від того в якому стані буде знаходитись кожний із вимикачів.

Перше обмеження моделі описує можливі стани окремих вимикачів і симетруючих елементів в цілому. Це обмеження виключає з розгляду варіант одночасного ввімкнення двох або трьох вимикачів одразу одного симетруючого елемента, що є технічно недопустимим.

Друге обмеження контролює величину реактивної потужності, що генерується СП.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \left(\operatorname{Re} \dot{I}_2^H + \sum_{i=1}^{3k} a_i x_i \right) + j \left(\operatorname{Im} \dot{I}_2^H + \sum_{i=1}^{3k} b_i \right) \right| \rightarrow \min \\ x_{(3i-2)} + x_{(3i-1)} + x_{3i} + \bar{x}_i = 1, \quad i = 1, 2, 3 \dots k \\ \sum_{i=1}^k Q_i (x_{(3i-2)} + x_{(3i-1)} + x_{3i}) \leq Q_d \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{array} \right. \quad (1)$$

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВЕКТОРА X_2

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i=1}^K Q_i y_i \\ y_i + \bar{y}_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, K \\ Q_H - 3 \sum_{i=1}^K Q_i y_i \geq Q_{\text{доп}} \\ y_i, \bar{y}_i \in \{1, 0\}, \end{array} \right. \quad (2)$$

Математична модель (2) забезпечує компенсацію реактивної потужності шляхом ввімнення симетричного елемента СП до величини $Q_{\text{доп}}$. Точність наближення до $Q_{\text{доп}}$ визначається наявними потужностями секцій симетричного елемента.

За результатами розрахунку вектора Y формується вектор керування X_2 .

Алгоритм встановлення відповідності між векторами Y та X_2

Крок 1. Проглядаємо масив Y . Якщо змінна y_i , то змінним $x_{(3i-2)}$, $x_{(3i-1)}$ та x_{3i} присвоюється значення 1.

Крок 2. Якщо масив Y пустий, то розрахунки закінчуються, якщо в масиві Y залишилися елементи, то повертаємось до кроку 1.

РЕКУРЕНТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ Р.БЕЛМАНА ДЛЯ АНАЛІЗУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

ДЛЯ МОДЕЛІ (1)

$$\left. \begin{aligned}
 f_1 &= \min_{\substack{\text{по всіх} \\ a_{li}, b_{li}}} \left\{ \left(\operatorname{Re} \dot{I}_2^H + a_{li} \right) + j \left(\operatorname{Im} \dot{I}_2^H + b_{li} \right) \right\} = \\
 &= \left| \left(\operatorname{Re} \dot{I}_2^H + a_{\lambda}^{(1)} \right) + j \left(\operatorname{Im} \dot{I}_2^H + b_{\lambda}^{(1)} \right) \right| = |\dot{f}_1| \\
 &\dots \\
 f_k &= \min_{\substack{\text{по всіх} \\ a_{ki}, b_{ki}}} \left\{ \left(\operatorname{Re} \dot{f}_{k-1} + a_{ki} \right) + j \left(\operatorname{Im} \dot{f}_{k-1} + b_{ki} \right) \right\} = \\
 &= \left| \left(\operatorname{Re} \dot{f}_{k-1} + a_{\lambda}^{(k)} \right) + j \left(\operatorname{Im} \dot{f}_{k-1} + b_{\lambda}^{(k)} \right) \right| = |\dot{f}_k| \quad k=1, 2, \dots, \tau
 \end{aligned} \right\}$$

ДЛЯ МОДЕЛІ (2)

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

Для знаходження розв'язків за моделлю (1) вибрано алгоритм узагальненого методу динамічного програмування для оптимізації нескалярних функціоналів.

Розв'язки за моделлю (2) знаходяться за методом динамічного програмування

РОЗРАХУНКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Знайдемо вектор керування СП з мінімальною встановленою потужністю конденсаторних батарей.

Параметри природного режиму (в припущенні, що всі вимикачі СП вимкнені) в живильній лінії:

$$I_A = 115 \text{ A};$$

$$I_B = 130 \text{ A};$$

$$I_C = 160 \text{ A};$$

$$\cos\varphi_A = 0,59;$$

$$\cos\varphi_B = 0,84;$$

$$\cos\varphi_C = 0,65.$$

Номінальна напруга у вузлі – 10 кВ.

Потужності секцій СП:

$$Q_1 = 100 \text{ квар};$$

$$Q_2 = 100 \text{ квар};$$

$$Q_3 = 100 \text{ квар};$$

$$Q_4 = 120 \text{ квар};$$

$$Q_5 = 120 \text{ квар};$$

$$Q_6 = 120 \text{ квар};$$

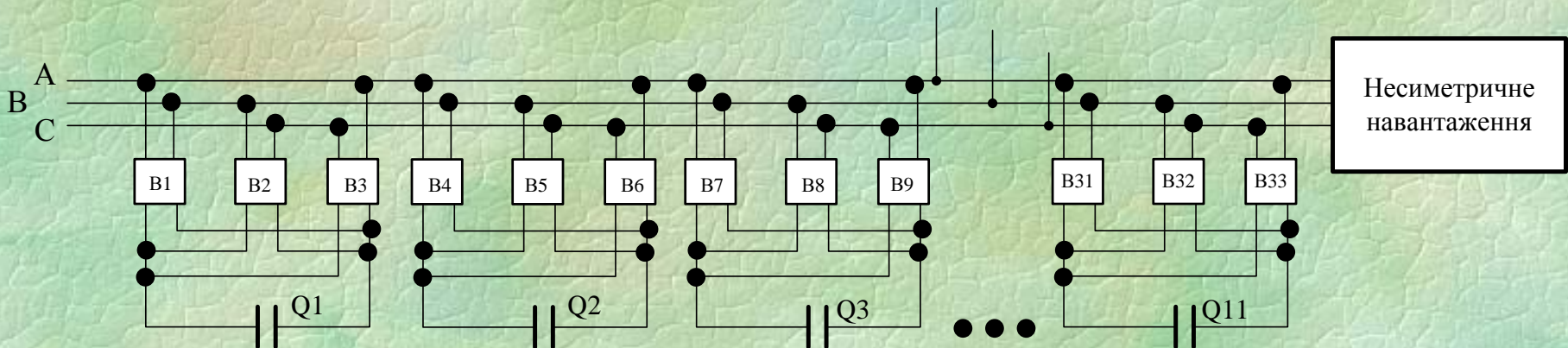
$$Q_7 = 150 \text{ квар};$$

$$Q_8 = 150 \text{ квар};$$

$$Q_9 = 150 \text{ квар};$$

$$Q_{10} = 300 \text{ квар};$$

$$Q_{11} = 400 \text{ квар}.$$



РОЗРАХУНКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ (продовження)

$$\mathbf{X}_1^T = (00000000000000000000000001000000001001)$$

$$\mathbf{X}_2^T = (1000100011000100010000000000000000)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^T &= \mathbf{X}_1^T + \mathbf{X}_2^T = (00000000000000000000000001000000001001) + \\ &+ (1000100011000100010000000000000000) = \\ &= (100010001100010001001000000001001). \end{aligned}$$

Подальше поліпшення наявними можливостями несиметричного режиму здійснити не можливо. Для реалізації вектора керування \mathbf{X} необхідно увімкнути вимикачі: $B_1, B_5, B_9, B_{10}, B_{14}, B_{18}, B_{21}, B_{29}$ та B_{33} . Результатом керування буде отримання струму зворотної послідовності 1,56 А (природне значення – 27,86 А), а реактивна потужність, що споживатиметься групою несиметричних електроприймачів зменшиться до значення 1340 квар (природне споживання – 2850 квар).

В даній роботі було вирішено актуальне наукове завдання розробка моделі керування несиметрією режиму за допомогою однієї із відомих схем симетруваньного пристрою

1. Дістало подальший розвиток математичне моделювання процесів симетрування струмів для випадку використання СП з мінімальною конденсаторною потужністю, яка дозволяє реалізувати оптимальне керування в реальному часі, максимально використовуючи всі можливості такого пристрою

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Полягає у розробці на основі отриманих теоретичних результатів математичної моделі симетрування струмів за допомогою СП з мінімальною конденсаторною потужністю. Реалізація керування можлива в мікропроцесорних системах управління. Їх впровадження сприятиме зниженню втрат потужності та рівня несиметрії напруг в розподільних мережах енергопостачальних компаній.

ВИСНОВКИ

1. В деякі моменти часу при роботі СП можуть залишатися симетричні елементи, що не використовуються для симетрування режиму. Зазначені симетричні елементи можуть бути використані для компенсації реактивних навантажень по вузлу несиметричних електроприймачів.
2. Додатковий економічний ефект в роботі СП може бути досягнуто, якщо керування здійснювати за розробленими математичними моделями, які передбачають використання СП для симетрування електричного режиму та компенсації реактивних навантажень.
3. Працездатність розроблених математичних моделей та алгоритмів їх аналізу підтверджена числовим прикладом.