

УДК 621.316.13

Бандура І.О., к.т.н.

Луцький національний технічний університет

ПІДХОДИ ДО СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ З ПРІОРИТЕТНИМ ВИКОРИСТАННЯМ КОНДЕНСАТОРНИХ УСТАНОВОК СИМЕТРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Бандура І.О. Підходи до симетрування навантаження з пріоритетним використанням конденсаторних установок симетруючих пристроїв. Розроблені математичні моделі керування несиметрією навантаження, які дозволяють знаходити вектор керування для СП, який забезпечує мінімальне значення струму зворотної послідовності в лінії живлення та компенсацію реактивних навантажень.

Ключові слова: компенсація реактивних навантажень, симетрування навантаження, конденсаторні установки симетруючих пристроїв.

Бандура И.А. Подходы к симметрированию нагрузок с приоритетным использованием конденсаторных установок симметрирующих устройств. Разработаны математические модели управлением несимметрией нагрузки, которые позволяют находить вектор управления, который обеспечивает минимальное значение тока обратной последовательности в линиях питания и компенсацию реактивной нагрузки.

Ключевые слова: компенсация реактивных нагрузок, симметрирование нагрузок, конденсаторные установки симметрирующих устройств.

Bandura I.O. Approaches to balancing the load of priority using capacitors symetryuychyh devices. Mathematical models asymmetry load control that allow vector control to find joint venture that provides the minimum value of negative sequence current in power lines and compensation of reactive loads.

Keywords: compensation of reactive loads, load balancing and condenser units symetryuychyh devices.

Постановка наукової проблеми. Симетрування електричного режиму за допомогою СП в мережах енергопостачальних організацій може виконуватись як на шинах високої, так і низької напруги трансформаторних підстанцій (симетрування напруг), а також в деяких випадках у вузлах, наближених до джерела несиметрії, наприклад, в електрощитових багатоповерхових будинків (симетрування навантажень). Місця, де може виконуватись таке керування, перш за все визначаються технічною можливістю установки СП.

Для отримання висновків щодо залежності додаткових втрат активної потужності, а також інших складових збитків, пов'язаних із несиметрією режиму, від віддаленості вузла мережі в якому виконується керування параметрами зворотної послідовності, необхідно провести відповідні дослідження.

Аналіз досліджень. Відомо ряд наукових робіт, де вирішується задача симетрування електричного режиму та компенсації реактивних навантажень [1, 2]. Такі наукові напрацювання стосуються розв'язків в неперервних та в дискретних змінних. Відомі підходи, коли задачам симетрування та компенсації реактивної потужності надаються певні пріоритети [3] та коли таких пріоритетів немає [4]. Згадані роботи дозволяють прийняти обґрунтовані рішення, але не охоплюють всіх випадків, які можуть скластися в системі електропостачання.

Дослідження, результати яких наведені в статті, стосуються випадку, коли пріоритетною задачею, яка вирішується з використанням КУ СП, є задача компенсації реактивної потужності, і є подальшим розвитком відомих напрацювань. Всі результати отримані стосовно СП, секції яких під'єднані до лінійних напруг і здійснюють цілеспрямовані впливи лише на складові зворотної послідовності.

Формулювання цілі статті. Зважаючи на недоліки існуючих методів вирішення задачі симетрування електричного режиму, доцільно розробити математичні моделі керування несиметрією навантаження, які дозволяють знаходити вектор керування для СП, який забезпечує мінімальне значення струму зворотної послідовності в лінії живлення та компенсацію реактивних навантажень.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Розглянемо заступні схеми для струмів прямої та зворотної послідовностей, рис. 3.5, де \underline{z}_1 – еквівалентний опір живильних мереж до вузла А – вузла під'єднання СП; \underline{z}_2 – те саме, від вузла А до групи несиметричних навантажень. Згідно із [1] опори \underline{z}_1 та \underline{z}_2 в заступних схемах для струмів прямої і зворотної послідовностей приймемо однаковими.

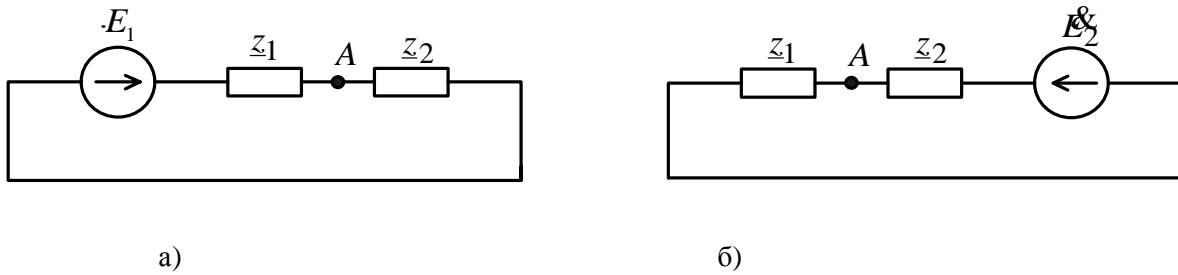


Рисунок 1. Заступні схеми:
 а) прямої послідовності;
 б) зворотної послідовності

Припустимо, що СП забезпечує повне симетрування напруг і напруга у вузлі A симетрична. Втрати активної потужності в мережі описуються виразом:

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_Q + \Delta P_2,$$

де ΔP_p ; ΔP_Q ; ΔP_2 – втрати активної потужності в мережі, зумовлені передачею активних і реактивних навантажень та несиметрією режиму.

Втрати активної потужності ΔP_Q , що відповідають сталому режиму (до під'єднання СП):

$$\Delta P_Q = \frac{Q^2}{U_n^2} \cdot (r_1 + r_2) = 3 \cdot I_1^2 \cdot \sin^2 \varphi \cdot (r_1 + r_2),$$

де Q – реактивна потужність, що споживається несиметричним навантаженням;

r_1 ; r_2 – активні складові опорів z_1 та z_2 ;

I_1 – струм прямої послідовності через z_1 та z_2 природного режиму.

Далі в дослідженнях ΔP_Q вважається як стала величина і за значенням, що дорівнює вихідному режиму. Втрата активної потужності ΔP_2 :

$$\Delta P_2 = 3\alpha^2 I_1^2 r_2 = 3\alpha^2 I_1^2 [(r_1 + r_2) - (r_1 + r_2)k],$$

де α – коефіцієнт несиметрії струмів;

$$k = \frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

Якщо вважати, що $r_1 + r_2 = const$, то коефіцієнт k є мірою віддаленості вузла A від групи несиметричних електроприймачів ($k=1$ – вузол A співпадає із вузлом, до якого під'єднані однофазні навантаження).

Виконаємо оцінку зміни ΔP_2 в процесі наближення вузла під'єднання СП до групи несиметричних електроприймачів по відношенню до деякої сталої величини, наприклад, ΔP_Q :

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_Q} = \frac{\alpha^2}{\sin^2 \varphi} \cdot (1 - k).$$

Залежність $\frac{\Delta P_2}{\Delta P_Q}(k)$ наведена на рис.2.

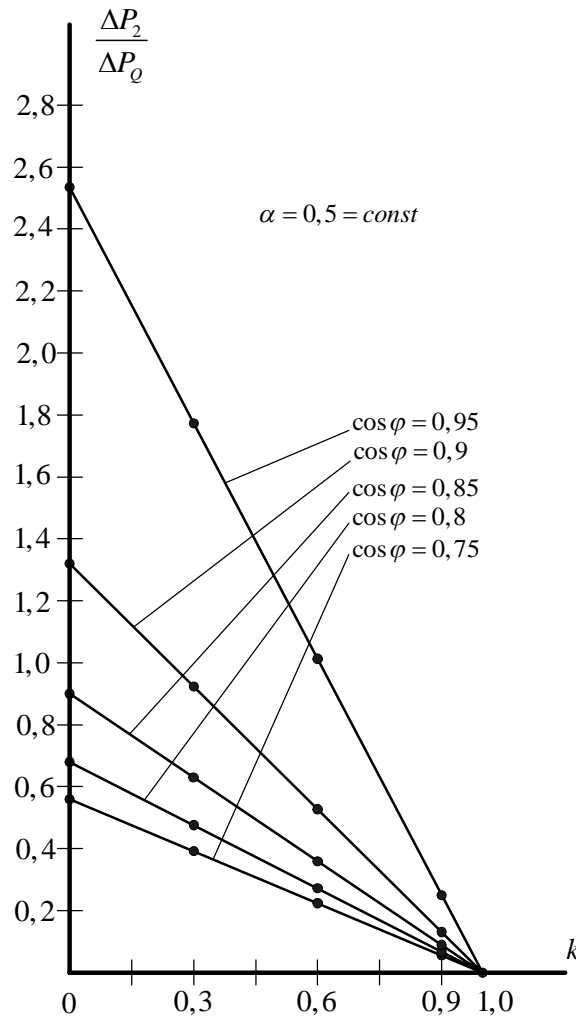


Рисунок 2. Залежності додаткових втрат ΔP_2 від віддаленості вузла A

Можна зробити такі висновки:

- при наближенні вузла під'єднання СП до джерела несиметрії втрати ΔP_2 , що будуть мати місце за результатами симетрування режиму, зменшуються і дорівнюють нулю, якщо СП під'єднано безпосередньо до шин E_2 (для такого варіанту $k = 1$);

- позитивний результат, пов'язаний із зниженням ΔP_2 при симетруванні навантажень (в порівнянні із випадком симетрування напруг) посилюється ефектом від компенсації реактивної потужності КУ СП, оскільки воно виконується безпосередньо біля електроприймачів і тим самим знижуються втрати активної потужності від передачі реактивної в розподільній мережі;

- симетрування електричного режиму необхідно здійснювати якомога ближче до несиметричного навантаження.

Якщо розглянути епіюру напруги зворотної послідовності вздовж лінії електропередачі при симетруванні навантажень, рис. 3, то можна перекопатися, що по всій довжині (і відповідно по всім вузлам мережі) при повному симетруванні відбувається зниження до нуля напруги зворотної послідовності. Оскільки всі складові збитків від несиметрії режиму функціонально залежать від напруги зворотної послідовності, то можна констатувати про їх повне усунення.

Симетрування навантажень за своїми кінцевими результатами більш ефективно в порівнянні з симетруванням напруг. Тому у вузлах мережі, до яких під'єднані несиметричні електроприймачі, у разі технічної можливості необхідно здійснювати керування несиметрією навантажень.

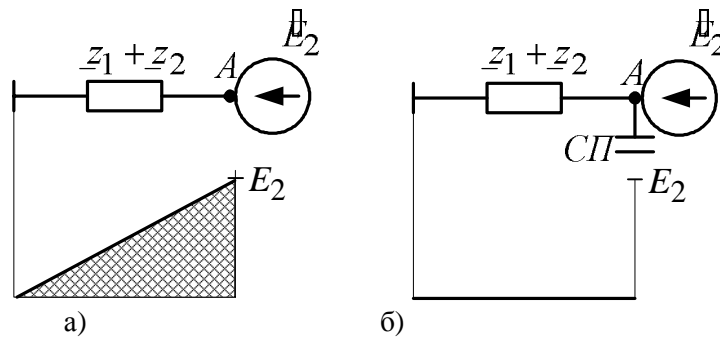


Рисунок 3. Епюра напруги зворотної послідовності вздовж лінії електропередачі:
 а) – вихідного режиму (при відсутності СП);
 б) – для випадку під'єднання СП

Вектор керування можна знаходити за відомим алгоритмом, який охоплює всі можливі випадки використання потужності КУ СП. Керування несиметрією режиму в даному випадку (симетрування навантажень) за будь-яких обставин доцільно здійснювати, забезпечуючи максимальний ефект і з симетрування.

Якщо, наприклад, керування виконується за допомогою СП з мінімальною кількістю вимикачів, то розрахунок складової $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$ може бути виконаним за математичною моделлю, яка розроблена в [3].

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \mathcal{I}_2 + \sum_{i=1}^n c_i x_i + j \left(\operatorname{Im} \mathcal{I}_2 + \sum_{i=1}^n d_i x_i \right) \right| \rightarrow \min \\ Q' - \sum_{i=1}^n \Delta Q_i x_i \geq Q_{\text{оон}} \\ x_i + \bar{x}_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ x_i; \bar{x}_i \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (1)$$

де \mathcal{I}_2 – вихідне значення струму зворотної послідовності в лінії живлення групового несиметричного навантаження (при умові вимкнених секцій СП);

$c_i; d_i$ – дійсна та уявна частина вектора струму зворотної послідовності, який створюється при ввімкненні i -ої секції СП, а стан цієї секції описується i -им елементом вектора керування $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$.

Математична модель (1) передбачає знаходження таких значень для елементів вектора $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$, реалізація якого забезпечить мінімум модуля струму зворотної послідовності в лінії живлення. Обмеження на реактивну потужність позначається на кінцевому результаті лише тоді, коли можливе отримання недопустимого результату по реактивній потужності в лінії живлення.

Якщо за результатами розрахунку $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$ залишилися симетричні елементи СП, що не використовуються, і розрахований вектор $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$ не забезпечує вимоги на значення реактивної потужності СП, то вектор $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$ можна визначити за математичною моделлю (2).

Складова $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$ визначається за математичною моделлю, яка відрізняється від (1) лише тим, що цільова функція забезпечує мінімум модуля струму зворотної послідовності в лінії живлення:

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \mathcal{I}_2(\mathbf{X}_1^{\text{cn}} + \mathbf{X}_2^{\text{cn}}) + \sum_{i=1}^{\tau} c_i z_i + j \left(\operatorname{Im} \mathcal{I}_2(\mathbf{X}_1^{\text{cn}} + \mathbf{X}_2^{\text{cn}}) + \sum_{i=1}^{\tau} d_i z_i \right) \right| \rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^{\tau} \Delta Q_i z_i \geq Q_d - Q^{\text{cn}}(\mathbf{X}_1^{\text{cn}} + \mathbf{X}_2^{\text{cn}}) \\ z_i + \bar{z}_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, \tau \\ z_i; \bar{z}_i \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (2)$$

де $\mathcal{I}_2(\mathbf{X}_1^{\text{cn}} + \mathbf{X}_2^{\text{cn}})$ – вектор струму зворотної послідовності в лінії живлення за умови реалізації вектора $\mathbf{X}_1^{\text{cn}} + \mathbf{X}_2^{\text{cn}}$.

Аналіз математичної моделі (2) можна здійснити за відомим алгоритмом. Розглянемо процес розрахунку вектора керування за розробленим обчислювальним методом, який підтверджує правильність отриманих наукових результатів.

Вихідними даними для розрахунку є такі параметри режиму в лінії 0,4кВ, яка живить групу несиметричних електроприймачів:

$$\begin{aligned} I_A &= 127,8 \text{ А}; \quad \cos \phi_A = 0,756; \\ I_B &= 146,7 \text{ А}; \quad \cos \phi_B = 0,578; \\ I_C &= 189,3 \text{ А}; \quad \cos \phi_C = 0,845. \end{aligned}$$

До вузла навантаження приєднано СП з такими параметрами секцій по напругах трифазної системи, табл.1.

Даний режим характеризується споживанням реактивної потужності, $Q' = 66,89$ квар, і струмами в координатах симетричних складових:

$$\begin{aligned} \text{– струм прямої послідовності,} \quad \mathcal{I}_1 &= 150e^{-j45^\circ} \text{ А}; \\ \text{– струм зворотної послідовності,} \quad \mathcal{I}_2 &= 18e^{-j75^\circ} \text{ А}; \\ \text{– струм нульової послідовності,} \quad \mathcal{I}_0 &= 42e^{-j109,5^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Таблиця 1. Технічні характеристики СП

Параметри секцій, які під'єднуються до напруги U_{AB}		Параметри секцій, які під'єднуються до напруги U_{BC}		Параметри секцій, які під'єднуються до напруги U_{CA}	
№ секції, i	ΔQ_i , квар	№ секції, i	ΔQ_i , квар	№ секції, i	ΔQ_i , квар
1	5	6	5	11	5
2	5	7	5	12	5
3	5	8	5	13	5
4	5	9	5	14	5
5	5	10	5	15	5

Знайдемо вектор керування для СП, який забезпечує мінімальне значення струму зворотної послідовності в лінії живлення та компенсацію реактивних навантажень 65 квар. Як пріоритетною для даного стану є задача компенсації реактивних навантажень.

Результати розрахунків із визначення вектора керування \mathbf{X}_1^{cn} за ітераціями наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати, отримані за окремими ітераціями

Ітерація	Вектор керування $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$	Струм I_2 в лінії живлення, А	Реактивна потужність, що споживається, квар
Вихідний режим	$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}})_0^T = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	18,0	66,89
1	$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}})_1^T = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	13,6	61,89
2	$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}})_2^T = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	10,62	56,89
3	$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}})_3^T = (1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)$	5,94	51,89
4	$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}})_4^T = (1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$	4,96	46,89
5	$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}})_5^T = (1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$	2,92	41,89

Отримані результати свідчать, що для умов наведеного прикладу, маючи СП зазначених параметрів, можна досягти ефективного симетрування струмів (за умови відсутності вимог до реактивної потужності СП).

Оскільки результати розрахунку $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$ не забезпечують необхідних умов з компенсації реактивних навантажень, яка є пріоритетною задачею, виконаємо розрахунок $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$.

II Розрахунок $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$.

За результатами розрахунку $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$ залишаються незадіяними два симетричних елемента, ввімкнення яких не позначиться на досягнутому ефекті із симетрування режиму. Перший симетричний елемент утворюють секції № 4; №9 та №14, а другий – № 5; №10 та №15.

Математична модель для прийняття технічного рішення щодо ввімкнення симетричних елементів (аналіз якої дозволить визначити вектор $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$) в числовому вигляді може бути записаною:

$$\begin{cases} 41,89 - 3(5\ 5)\mathbf{Y} \rightarrow \min \\ \mathbf{Y} + \bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{n} \\ 41,89 - 3(5\ 5)\mathbf{Y} \geq 0 \\ y_i; \bar{y}_i \in \{1, 0\}, \end{cases}$$

де $\mathbf{Y}^T = (y_1\ y_2)$ - вектор керування симетричними елементами СП;

\mathbf{n} – одинична матриця вимірністю (2×1) .

Розв'язком задачі є вектор $\mathbf{Y}^T = (1\ 1)$, реалізація якого забезпечить реактивну потужність споживання 11,89 квар.

Вектор керування \mathbf{Y} знаходиться у певній відповідності з вектором $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$, скориставшись якою можна вказати на значення вектора $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$:

$$(\mathbf{X}_2^{\text{сп}})^T = (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1).$$

Використання симетричних елементів СП не дозволяє забезпечити вимогу із компенсації реактивних навантажень.

III Розрахунок $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$.

Для запису математичної моделі (2) в числовому вигляді знайдемо $(\mathbf{X}_1^{\text{сп}} + \mathbf{X}_2^{\text{сп}})$,

$$(\mathbf{X}_1^{\text{сп}} + \mathbf{X}_2^{\text{сп}})^T = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1),$$

та сформуємо вектор \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z}^T = (z_6 \ z_7 \ z_8 \ z_{13}).$$

Математична модель (2) в числовому вигляді запишеться:

$$\begin{cases} \left[-1,92 + (0 \ 0 \ 0 \ 6,58)\mathbf{Z} + j[2,21 + (-7,83 \ -7,83 \ -7,83 \ 9,92)\mathbf{Z}] \right] \rightarrow \min \\ (5 \ 5 \ 5 \ 5)\mathbf{Z} \geq 65 - 55 \\ \mathbf{Z} + \bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{n} \\ z_i; \bar{z}_i \in \{1, 0\}. \end{cases}$$

Прирівняємо всі елементи $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$ до нуля.

Сформуємо вектор $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$ за результатами першої ітерації:

$$(\mathbf{X}_3^{\text{сп}})_1^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0).$$

Реалізація вектора $(\mathbf{X}_3^{\text{сп}})_1$ одночасно із $\mathbf{X}_1^{\text{сп}}$ та $\mathbf{X}_2^{\text{сп}}$ забезпечує компенсацію 60 квар реактивних навантажень. Реактивна потужність, що буде споживатись по лінії живлення становить 6,89 квар. Струм зворотної послідовності зростає і становить 5,93А.

Вектор керування, який забезпечує необхідну степінь компенсації реактивної потужності при мінімальному (за цієї умови) струмі зворотної послідовності в лінії живлення, становить:

$$\mathbf{X}^{\text{сп}} = \mathbf{X}_1^{\text{сп}} + \mathbf{X}_2^{\text{сп}} + \mathbf{X}_3^{\text{сп}} = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1).$$

Остаточне та проміжні значення для вектора $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$, отримані на окремих ітераціях, подані в табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунку $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$, отримані за окремими ітераціями

Ітерація	Вектор керування $\mathbf{X}_3^{\text{сп}}$	Струм I_2 в лінії живлення, А	Реактивна потужність, що споживається, квар
Вихідний режим	$(\mathbf{X}_3^{\text{сп}})_0^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	2,92	11,89
1	$(\mathbf{X}_3^{\text{сп}})_1^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$	5,93	6,89
2	$(\mathbf{X}_3^{\text{сп}})_2^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$	4,96	1,89

Для порівняння в табл. 4 наведені результати, отримані для умов розглянутого прикладу за відомим підходом до вирішення даної задачі [4].

Таблиця 4. Варіанти керування режимом за розробленим і відомим підходами та результати їх реалізації

Метод розрахунку	Вектор керування \mathbf{X}^{cp}	Струм I_2 в лінії живлення, А	Реактивна потужність, що компенсується, квар
Розроблений	(1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1)	4,96	65
Відомий	(1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0)	25,64	65

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

З вище наведеного можна зробити наступні висновки:

1. Потужності КУ СП можуть пріоритетно використовуватись як для симетрування напруг (або струмів), так і для компенсації реактивних навантажень. Розв'язки таких задач можуть бути суперечливими: мінімальне значення для показників, які оцінюють несиметрію режиму, не завжди забезпечують оптимальну степінь компенсації реактивної потужності.

2. У випадку пріоритетного використання потужності КУ СП для компенсації реактивних навантажень вектор керування можна розрахувати як такий, що має три складові. Перша складова \mathbf{X}_1^{cp} забезпечує оптимальне симетрування електричного режиму, друга \mathbf{X}_2^{cp} передбачає використання симетричних елементів СП для компенсації реактивної потужності, третя забезпечує вимогу з компенсації реактивних навантажень, але при цьому має місце відхід від оптимуму, досягнутого при визначенні \mathbf{X}_1^{cp} . В часткових випадках вирішення задачі може обмежуватись як розрахунком \mathbf{X}_1^{cp} , так і \mathbf{X}_1^{cp} та \mathbf{X}_2^{cp} .

3. Розроблений підхід до розрахунку вектора керування може бути використаний при симетруванні напруг та струмів.

4. Вектор \mathbf{X}_3^{cp} у випадках симетрування напруг та струмів можна розрахувати, використовуючи розроблені математичні моделі.

5. Аналіз синтезованих математичних моделей можна провести у відповідності з розробленим обчислювальним методом.

6. Розрахунок, проведений для одного із реальних режимів в мережі енергопостачальної компанії, підтвердив ефективність запропонованого підходу до визначення вектора керування та працездатність розробленого обчислювального методу.

Список використаних джерел.

1. Терешкевич Л.Б. Математична модель керування реактивною потужністю в електричних мережах з несиметричною напругою / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Кременчуцького державного університету ім. Михайла Остроградського. – 2010. – №3/2010(62), частина 1. – С. 161 – 164.

2. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы / Т. Саати. – М.: Мир, 1973. – 302 с.

3. Терешкевич Л. Б. Симетрування напруги (струмів) з пріоритетним використанням КУ СП для компенсації реактивної потужності в мережах енергопостачальних компаній / Л.Б. Терешкевич, І.О. Бандура // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – 2011. – Випуск 117. – С. 82–84.

4. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.