

УДК 621.311

**Л. Б. Терешкевич, к. т. н., доц.; М. І. Цибульський, асп.****ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ В ПРОЦЕСІ КЕРУВАННЯ  
КОНДЕНСАТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ  
РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ В УМОВАХ НАЯВНОСТІ ПІСЛЯДІЙ**

*Математично поставлена задача оперативного управління несиметрією напруги в вузлі навантаження розподільчої електричної мережі за допомогою конденсаторних установок. Доведено необхідність врахування явищ післядії при такому управлінні вже на етапі попередньої оцінки ефективності комутацій. Розроблений ряд алгоритмів аналізу математичної моделі управління забезпечує отримання оптимального розв'язку та врахування в необхідному об'ємі явищ післядії. Працездатність алгоритмів демонструється на тестовому прикладі.*

Внаслідок підключення до електромережі несиметричних навантажень (НН) в трифазних мережах з'являється несиметрія напруг. В результаті виникають додаткові істотні втрати активної потужності та енергії в розподільчих мережах та електроприймачах, перевантаження та недовантаження окремих фаз, зниження потужності та моменту на валу електродвигунів та інші складові збитків. Враховуючи негативний вплив несиметрії напруг на роботу електричних мереж і приймачів електроенергії, ГОСТом 13109-97 регламентується її значення відповідними показниками, проте, як показують експериментальні дослідження, внаслідок недостатності контролю та відсутності технічних засобів керування в деяких випадках на підприємствах спостерігається суттєва несиметрія напруг. Усунення згаданих негативних явищ потребує симетрування напруг в вузлах живлення. Найбільш ефективним і економічним шляхом зниження несиметрії напруг, яка обумовлена підключенням НН чи несиметричністю джерела живлення, є застосування компенсаційних симетруючих установок (СУ) [1]. В зв'язку з тим, що несиметрія напруг змінюється в часі, СУ виконуються керованими із можливістю незалежного керування секціями дискретної потужності, що підключені на різні напруги.

В проблемі симетрування напруг можна виділити два принципово відмінних, з точки зору підходів в прийнятті управлінських рішень, випадки. Це симетрування режиму в мережах з ізольованою нейтраллю, де мають місце лише системи струмів і напруг прямої і зворотної послідовності, та в мережах із заземленою нейтраллю, де додатково мають місце системи нульової послідовності. Дана робота присвячена проблемам керування несиметрією режиму в мережах з ізольованою нейтраллю.

Процес симетрування напруги за допомогою СУ виконується в умовах післядій, оскільки пов'язаний із зміною вихідних параметрів, виходячи з яких приймається саме рішення. Дискретне за керуючими виливами управління вимагає якомога точної оцінки кінцевих параметрів стану системи електроспоживання і тому прийняття рішення повинно здійснюватись з врахуванням післядій.

Відомий ряд наукових робіт, присвячених питанню симетрування напруг. Параметри СУ, що забезпечують мінімальні значення коефіцієнту несиметрії напруг по зворотній послідовності можна визначити у відповідності до [1, 2]. У [2] крім того в процесі розрахунку передбачено в певній мірі враховувати післядію по напрузі від установки СУ з визначеними параметрами. Проте розрахунки ведуться в неперервних змінних і, отже, цими результатами неможливо скористатись для оперативного управління СУ з дискретними секціями комутації. В [3–5] запропоновано ряд математичних моделей та алгоритмів оперативного керування несиметрією режиму за допомогою СУ і, зокрема, несиметрією по напрузі зворотної послідовності. Проте, при управлінні за останніми, вплив післядій на процес керування не враховується.

Складність врахування післядій для такої задачі полягає у взаємозв'язку зміни параметрів режиму прямої і зворотної послідовності у відповідь на керуючі впливи, що ство-

рюються окремими секціями СУ. Збільшення напруги прямої послідовності не залежить від фазування конденсаторних батарей (важлива лише сумарна ввімкнута реактивна потужність секцій), а для покращення режиму зворотної послідовності суттєво важливі фазування і величини реактивних потужностей окремих ступенів. Ефекти післядії для задачі, що розглядається, можна описати наступним чином: включення чергової ступені змінює напругу (а саме складову прямої послідовності) в вузлі підключення СУ, що змінює потужність попередньо включених ступенів і генеровані ними добавки напруги прямої та зворотної послідовності, що, в свою чергу, призводить до зміни прикладеної напруги і т. д. Для врахування ефекту післядії в розробленій математичній моделі цей взаємозв'язок знайшов відображення.

Керованим параметром режиму системи електроспоживання може бути прийнята напруга зворотної послідовності в вузлах живлення, а критерієм ефективності для прийняття цілеспрямованого впливу — модуль напруги зворотної послідовності. Необхідні керуючі впливи здійснюються шляхом включення окремих ступенів, які, як правило, мають різну потужність та фазування.

Керівний вплив на стан системи електроспоживання повинен вибиратись із множини можливих, яка визначається всіма комбінаціями включення окремих секцій СУ. За змістом задача керування несиметрією напруг є оптимізаційною, але вирішення її методами дослідження операцій пов'язано з такими складнощами:

- критерій ефективності описується не скалярною функцією дійсної змінної, а для математичних моделей такого виду не існує класичних математичних методів їх аналізу;
- необхідність знаходження вектора керування в дискретних (булевих) змінних, що зумовлено конструктивним виконанням СУ;
- керуюче рішення доводиться приймати в умовах наявності післядії.

Вплив СУ на керований параметр стану — напругу зворотної послідовності в вузлі живлення, що відповідає меті керування, в залежності від положення комутаційних апаратів її секцій можна описати математичною моделлю:

$$\begin{cases} \left| \operatorname{Re} \dot{U}_2 + \sum_{i=1}^n a_i(U) x_i + j(\operatorname{Im} \dot{U}_2 + \sum_{i=1}^n b_i(U) x_i) \right| \rightarrow \min \\ x_i + \overline{x_i} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ x_i, \overline{x_i} = 1 \forall 0 \end{cases} \quad (1)$$

де  $\dot{U}_2$  — природне значення вектору напруги зворотної послідовності в вузлі навантаження (в припущенні, що всі секції СУ відключені);  $a_i, b_i$  — дійсна та уявна частини вектора падіння напруги зворотної послідовності від струмів, що створюються  $i$ -ю секцією СУ;  $x_i$  — булева змінна, що описує стан комутаційного апарату  $i$ -ої секції СУ, якщо  $x_i = 1$ , то відповідний комутаційний апарат включено, а якщо  $x_i = 0$ , то навпаки — відключено;  $\overline{x_i}$  — фіктивна змінна (що не має фізичного змісту), яка пов'язана із змінною  $x_i$  так, що коли  $x_i = 1$ , то  $\overline{x_i} = 0$  і навпаки;  $U$  — міжфазна напруга, до якої підключається секція  $i$ ;  $\forall$  — символ логічної операції «АБО».

Символьні залежності  $a_i(U)$  та  $b_i(U)$  вказують на необхідність врахування явища післядії.

Для знаходження розв'язку за математичною моделлю (1) можна скористатись деякими ідеями відомих методів не скалярної оптимізації, в яких використовується обчислювальна процедура методу динамічного програмування [4]. Такий вибір обґрунтовується тим, що процес вирішення задачі можна розглядати як багатоетапний, де на кожному етапі визначається для включення секція СУ, яка забезпечує максимальне зниження  $U_2$  відносно досягнутого стану. Так для  $k$ -го етапу із множини секцій СУ, рішення про включення яких не прийнято на попередніх  $(k-1)$  етапах, вибирається та, що забезпечить максимальний ефект, а якщо такої секції немає, то оптимальний розв'язок визначено на етапі

$(k - 1)$ . Множину, з якої на етапі  $k$  здійснюється вибір секції СУ для включення, позначимо  $D_k$ .

Процес визначення вектора управління може виконуватись за рекурентними відношеннями Р. Беллмана, які для даної задачі мають вид:

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

де  $f_k$  — оцінка стану системи (отримане значення модуля вектора напруги в вузлі живлення) за результатами  $k$ -го етапу процесу оптимізації,  $k = 1, 2, \dots, \tau$ ;  $a_{ki}$ ,  $b_{ki}$  — дійсна та уявна частини вектора падіння напруги зворотної послідовності від струмів, що створюються включенням  $i$ -ї секції СУ (секції, яка є елементом множини  $D_k$ );  $a_\lambda^{(k)}$ ,  $b_\lambda^{(k)}$  — те ж, але відносно реалізації найбільш ефективної секції на  $k$ -му етапі розв'язання задачі.

Використання методу динамічного програмування для аналізу математичної моделі (1) дає можливість для врахування післядії в оптимізаційній задачі, що підвищить ефективність керування компенсаторними СУ:

- точному визначенню найбільш ефективної для реалізації на заданому етапі ступені (з урахуванням можливих післядій);
- точній оцінці наслідків реалізації сукупності попередньо прийнятих рішень, що дозволить уникнути можливих хибних і неефективних включень і забезпечити виконання всіх можливих обмежень.

Таким чином, в залежності від ступеню врахування післядій можна запропонувати два алгоритми аналізу математичної моделі (1) у відповідності з рекурентними співвідношеннями (2).

Алгоритм 1 — наближено, за параметрами стану системи, що склалися в результаті реалізації рішення етапу  $(k-1)$ , визначається ефективна для включення на етапі  $k$  секція, потім точно, з урахуванням післядій, розраховується результат реалізації даної секції і приймається кінцеве рішення про її включення.

В алгоритмі 2 післядії враховуються як під час попереднього вибору ступені для включення так і при оцінці результатів реалізації вибраної ступені.

Для алгоритму 1 процес визначення рішення на  $k$ -му етапі в детальному вигляді можна сформулювати у такому вигляді.

Крок 1: Формується множина  $D_k$  шляхом вилучення з  $D_{(k-1)}$  номеру секції СУ, яку необхідно включити за результатами етапу  $(k-1)$ .

Крок 2: Розраховуються вектори  $a_{ki(1)} + jb_{ki(1)}$  (що відповідають напругам  $\dot{U}_{AB_{(k-1)}}$ ,  $\dot{U}_{BC_{(k-1)}}$ ,  $\dot{U}_{CA_{(k-1)}}$ ) для секцій СУ, перелік яких міститься в множині  $D_k$ .

Крок 3: Розглядається можливість включення всіх секцій, що перелічені в масиві  $D_k$ , і виконується оцінка відповідних станів системи —  $|\dot{U}_{2i}|$ , що створюють множину  $V_{k-(1)}$ .

Крок 4: З множини  $V_k(1)$  вибирається мінімальний за величиною елемент та фіксується відповідний номер секції для включення —  $m$ .

Крок 5: Значення елемента  $m$  —  $x_m$  в векторі  $\mathbf{X}_{(k-1)}$  прирівнюється до одиниці і тим самим формується вектор  $\mathbf{X}_k$ .

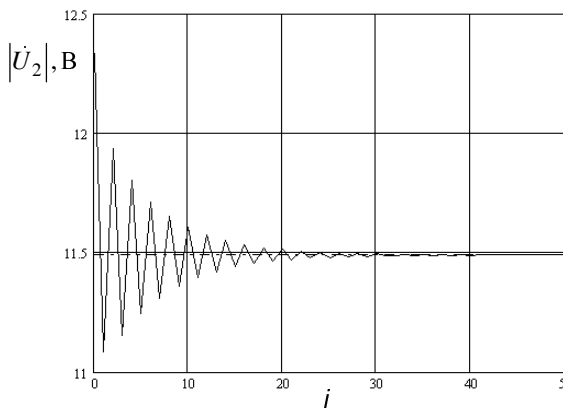
Крок 6: Шляхом послідовних наближень визначаються величини напруг  $\dot{U}_{AB_k}$ ,  $\dot{U}_{BC_k}$ ,  $\dot{U}_{CA_k}$ , що будуть мати місце при реалізації вектора  $\mathbf{X}_k$  та значення керувано-

го параметру  $\dot{U}_{2k}$ , виходячи, наприклад, з умови забезпечення наперед заданої точності наближення.

Крок 7: Якщо  $|\dot{U}_{2k}| < |\dot{U}_{2(k-1)}|$ , то перехід до кроку 1 для виконання наступного  $(k+1)$  етапу, інакше розрахунки припиняються. Оптимальним вектором керування є  $\mathbf{X}_{(k-1)}$ , керований параметр стану, що забезпечується реалізацією  $\mathbf{X}_{(k-1)} - \dot{U}_{2(k-1)}$ , а значення напруг в фазній системі координат  $\dot{U}_{AB(k-1)}, \dot{U}_{BC(k-1)}, \dot{U}_{CA(k-1)}$ .

Процес визначення розв'язку на  $k$ -му етапі для алгоритму 2 відрізняється від вищеведеного необхідністю замість кроків 2 та 3 здійснювати для кожного елемента з  $D_k$  розрахунки, аналогічні до тих, що виконуються на етапах 6 та 7 алгоритму 1 — тобто обчислювати з врахуванням післядій  $|\dot{U}_{2ki}|$ . Варто відмітити, що таке дворівневе врахування післядій в алгоритмі 2 призводить до різкого збільшення об'єму розрахунків (на 1 — 2 порядки, в залежності від кількості ступенів, їх потужності, фазування, порядкового номеру етапу, точності розрахунку).

Зважаючи на складність розрахунків із комплексними числами, доцільним є обґрунтувати мінімально необхідну кількість ітерацій для визначення найбільш-ефективної для включення на етапі ступені. Як видно з рисунку, результати перших двох ітерацій найбільш відхилені від дійсного. Це пов'язане із тим, що перше значення  $\dot{U}_2$  на кожному етапі розраховується в припущенні, що рішення про включення ступенів, прийняті на даному етапі та на попередніх, реалізуються одночасно в початковий момент керування, в подальшому це значення ітераційно уточнюється. Як показали дослідження, мінімально необхідна кількість ітерацій, що забезпечує задовільну похибку розрахунків — 3. У випадку близькості значень  $|\dot{U}_2|$ , отриманих за таким спрощеним процесом, від включення



Типовий уточнюючий розрахунок по ітераціях —  $i$ .

різних ступенів можна порекомендувати вибрати для включення найменшу з них за потужністю, так як це значення найближче до дійсного. Зазначимо, що таку спрощену процедуру неможливо застосувати для визначення дійсних результатів реалізації попередньо-вибраних для включення ступенів, так як похибка, пов'язана із неточністю розрахунків буде накопичуватись, і може привести до порушення оптимальності розв'язку.

Працездатність та ефективність розроблених алгоритмів визначення вектора керування СУ можна продемонструвати на числовому прикладі.

**Приклад.** В вузлі навантаження електричної мережі 0,4 кВ встановлена СУ з потужностями секцій 100, 150, 50, 15 та 10 квар на фазу, що відповідають номінальній напрузі, та з можливістю незалежної їх комутації.

Фазні напруги в вузлі мають значення  $\dot{U}_a = 240$ ,  $\dot{U}_b = 237e^{j237^\circ}$ ,  $\dot{U}_c = 225e^{j118,5^\circ}$  В. Опір живлячої мережі, приведений до напруги 0,4 кВ становить:  $\dot{z} = 0,01 + j0,021$  Ом. Необхідно знайти вектор управління СУ, що забезпечить оптимальний режим з несиметрії напруги.

Розв'язування.

Вихідний режим характеризується:

- напруга прямої послідовності —  $U_1 = 225$  В;
- напруга зворотної послідовності —  $U_2 = 15,1$  В;

- напруга нульової послідовності –  $U_0 = 0$  В;
- коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності  $k_{2U} = 3,98$  %.

Введемо позначення змінних:

- $x_1 - x_5$  – описує стан секцій, що підключаються до  $U_{AB}$ ;
- $x_6 - x_{10}$  ( $x_{11} - x_{15}$ ) – описують стан відповідних секцій, що підключаються до  $U_{BC}$  ( $U_{CA}$ ).

Розрахунок проводився у відповідності до алгоритмів 1 та 2 (алг.2а – розрахунок проводиться за 2-м алгоритмом, післядія при оцінюванні ефективності ввімкнення ступені враховується по 1-й ітерації; алг. 2б – післядія при оцінюванні ефективності ввімкнення ступені враховується по 3-й ітерації; алг. 2в – післядія при оцінюванні ефективності ввімкнення ступені враховується по 5-й ітерації).

Для порівняння шляхом повного перебору можливих розв'язків із врахуванням всіх можливих післядій було отримано еталонне рішення (позначене як алгоритм 0).

Всі результати розрахунку зведені до таблиці.

**Зведені результати розрахунку вектора керування СУ**

Алг. №		№ етапу									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	Потужність секції, яку слід включити, квар	150	100	50	150	100	50	15	10	15	10
	Змінна, що набуває значення одиниці	$x_2$	$x_1$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{11}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_4$	$x_5$
	$k_{2U}$ , %	3,492	3,228	3,125	3,005	2,838	2,744	2,717	2,701	2,684	2,676
1	Потужність секції, яку слід включити, квар	150	100	50	15	10	10	15	50	150	100
	Змінна, що набуває значення одиниці	$x_2$	$x_1$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_{15}$	$x_{14}$	$x_{13}$	$x_{12}$	$x_{11}$
	$k_{2U}$ , %	3,492	3,228	3,125	3,098	3,082	3,080	3,076	3,062	2,814	2,676
2а	Потужність секції, яку слід включити, квар	150	100	15	10	15	10	50	50	150	100
	Змінна, що набуває значення одиниці	$x_2$	$x_1$	$x_4$	$x_5$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{13}$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{11}$
	$k_{2U}$ , %	3,492	3,228	3,195	3,174	3,176	3,176	3,158	3,062	2,814	2,676
2б	Потужність секції, яку слід включити, квар	150	100	50	150	100	50	15	10	15	10
	Змінна, що набуває значення одиниці	$x_2$	$x_1$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{11}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_4$	$x_5$
	$k_{2U}$ , %	3,492	3,228	3,125	3,005	2,838	2,744	2,717	2,701	2,684	2,676
2в	Потужність секції, яку слід включити, квар	150	100	50	150	100	50	15	10	15	10
	Змінна, що набуває значення одиниці	$x_2$	$x_1$	$x_3$	$x_{12}$	$x_{11}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_4$	$x_5$
	$k_{2U}$ , %	3,492	3,228	3,125	3,005	2,838	2,744	2,717	2,701	2,684	2,676

В результаті проведених розрахунків, вектор керування СУ для заданого режиму мережі буде:  $X^T = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$ , що забезпечить зниження значення коефіцієнту несиметрії напруги по зворотній послідовності  $k_{2U} = 2,676$  %. Подальше зниження коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності потребує наявності додаткової потужності СУ.

Як видно з таблиці, наведені алгоритми дозволили ввімкнути всі ступені, включення яких покращує режим напруг і, відповідно, отриманий вектор керування однакокий і співпадає з еталонним. Проте всі ці алгоритми демонструють різну швидкість сходження процесу. Тобто, якщо ввести в умову розглянутої задачі обмеження на керування (наприклад обмеження по нарузі у вузлі чи по реактивній потужності СУ), процес симетрування напруг закінчується на етапі, коли досягається порогове значення відповідно-

го обмеження. В такому випадку, рішення отримане за алгоритмом 1 не буде оптимальним. Також можна зробити висновок про неможливість врахування післядій з достатньою степінню точності по одній (першій) ітерації (алгоритм 2а).

### Висновки

1. При оперативному симетруванні напруг за допомогою компенсуючих СУ доцільно вже на етапі попередньої оцінки ефективності комутацій враховувати ефекти післядії від останніх, що, в деяких випадках, може підвищити ефективність використання СУ.

2. Алгоритм 1 не забезпечує найбільш швидкого сходження процесу симетрування, проте може знайти застосування в системах, де не накладаються обмеження на параметри режиму в процесі симетрування напруг.

3. Алгоритм 2 забезпечить максимальну точність при визначенні вектора керування СУ і його оптимальність за будь яких обмежень математичної моделі, проте його недоліком є великий об'єм та громіздкість обчислень, що дозволяє його застосування лише в системах на основі ЕОМ.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов В. Г., Григорьев А. С., Данилюк В. Б. Снижение несиметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. — К.: Наукова думка, 1992. — 240 с.
2. Аввакумов В. Г. Вопросы качества электрической энергии тяговых подстанций. — Омск: Изд-во ОИИТ, 1970. — 67 с.
3. Терешкевич Л. Б. АСУ режимами систем электропоставки: Навчальний посібник — Вінниця: ВДТУ, — 1998. — 119 с.
4. Аввакумов В. Г. Методы не скалярной оптимизации и их приложения. — К.: Вища школа, 1990. — 188 с.
5. Аввакумов В. Г., Багиев Г. Л., Воскобойников Д. М. Техничко-экономическая оценка качества электроэнергии в промышленности. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. — 132 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом VIII Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2005, 24—27.10.2005 р)

Надійшла до редакції 10.11.05  
Рекомендована до друку 22.11.05

**Терешкевич Леонід Борисович** — доцент, **Цибульський Максим Іванович** — аспірант.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергозбереження, Вінницький національний технічний університет