

МЕТОД ОБМЕЖЕНОГО ПЕРЕБОРУ ВАРІАНТІВ ДЛЯ ЗАДАЧ ВНУТРІШНЬОГО СИМЕТРУВАННЯ ОДНОФАЗНИХ ЕЛЕКТРОПРИЙМАЧІВ

Л.Б. Терешкевич*, канд.техн.наук, О.О. Хоменко**

Вінницький національний технічний університет,

Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна.

E-mail: o.o.khomenko.vntu@gmail.com

Розроблено метод, який може бути спільним для вирішення наступних задач внутрішнього симетрування однофазних електроприймачів: їхнього оптимального під'єднання до вузла трифазної трипровідної мережі; те саме, але із врахуванням зміни їхніх параметрів у часі; визначення оптимального зсуву графіків навантажень елек-троприймачів з метою симетрування режиму; те саме та їхнє оптимальне під'єднання до мережі. Суть ме-тоду полягає в обробці однієї третини усіх можливих варіантів під'єднання однофазних навантажень до вузла електричної мережі за алгоритмом відповідної задачі. Вирішення таких задач включає в себе: складання мат-риці векторів керування та матриці значень струмів зворотної послідовності, що генерують однофазні на-вантаження. Метод забезпечує знаходження розв'язків, яким відповідає глобальний мінімум критеріальних функцій. Бібл. 8, рис. 5, табл. 3.

Ключові слова: симетрування навантажень, несиметрія напруги, струм зворотної послідовності, оптимальне рішення.

Одним із технічних заходів, який дає змогу зменшити несиметрію режиму в електричних мережах без суттєвих додаткових капітальних вкладень, є внутрішнє симетрування однофазних електроприймачів (ОЕ) [3]. Існує ряд методів, що забезпечують реалізацію зазначеного заходу: модифікований симплекс-метод [4], який позначено далі як *метод 1*, метод динамічного програмування [2] – *метод 2*, метод Монте-Карло [1] – *метод 3*, метод, що базується на аналізі М-моделі [5] – *метод 4*. Останній захід ефективно реалізовано на практиці [2, 6, 7, 8]. У роботі розглядаються лише задачі внутрішнього симетрування, що полягають у знаходженні такого варіанта під'єднання ОЕ до вузла трипровідної мережі, якому відповідає мінімальна несиметрія навантажень у мережі. За своєю природою будь-яка задача внутрішнього симетрування є оптимізаційною, оскільки існує багато варіантів її реалізації, кожен з яких забезпечує той або інший результуючий ефект. Наприклад, кількість варіантів під'єднання групи ОЕ до мережі становить 3^N , де N – загальна кількість ОЕ в групі.

Застосування класичних оптимізаційних методів для вирішення таких задач супроводжується низкою труднощів [2, 4], серед яких необхідність знаходження розв'язків у цілочислових змінних; критерії ефективності описуються не скалярною функцією дійсного змінного; розв'язки, знайдені існуючими методами вирішення таких задач, можуть відповідати локальним мінімумам цільових функцій, якими описані критерії ефективності.

Метою роботи є розробка методу, що забезпечить знаходження розв'язків комплексу задач внутрішнього симетрування ОЕ, яким відповідає глобальний мінімум цільових функцій.

Обґрунтування та результати досліджень. Критерієм ефективності для задач, в яких є потреба оцінювати ефект на деякому інтервалі часу (для задач внутрішнього симетрування, де враховується зміна їхніх параметрів у часі), можуть бути додаткові втрати активної енергії, зумовлені несиметрією режиму. Для задач, де параметри ОЕ залишаються незмінними, – додаткові втрати активної потужності. Виділимо дискретні моменти часу t_k , $k = 1; 2; \dots; K$, в межах яких електричний режим будемо вважати незмінним. Тоді для задач, де враховується зміна параметрів ОЕ в часі, можна скористатися цільовою функцією, за якою розраховується деяке значення, пропорційне додатковим втра-там енергії

$$\sum_{k=1}^K I_{IIk}^2(\mathbf{X}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де I_{II} – струм зворотної послідовності в лінії, що живить вузол, до якого під'єднані ОЕ; \mathbf{X} – вектор рішень із внутрішнього симетрування.

У випадку задач, де параметри ОЕ залишаються незмінними в часі, цільовою функцією може бути така, за якою розраховуються значення, пропорційні додатковим втратам потужності в лінії живлення

$$I_{II}(\mathbf{X}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Для знаходження оптимальних розв'язків усіх зазначених задач попередньо розраховується матриця \mathbf{F} – матриця можливих значень струмів I_{II} ,

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{X}, \quad (3)$$

де \mathbf{I} – матриця можливих впливів кожного окремо взятого ОЕ на режим в електричній мережі.

Вимірність та кількість матриць \mathbf{I} та \mathbf{X} і, як наслідок, \mathbf{F} залежить від змісту задачі внутрішнього симетрування. Для всіх задач, що розглядаються, елементи матриць \mathbf{F} обробляються за відповідним алгоритмом і на підставі цього визначається оптимальне рішення.

Розроблений метод (позначимо його як *метод 5*) полягає у знаходженні оптимального варіанта під'єднання ОЕ у задачах 1, 2 та 4, а також оптимального зсуву індивідуальних графіків навантажень у задачах 3, 4. Цей метод передбачає обмежений перебір варіантів і знаходження глобального екстремуму цільових функцій для кожної із задач.

Задача 1 – оптимального під'єднання групи ОЕ до вузла трипровідної мережі. Для задачі 1 матриця \mathbf{I} – матриця струмів зворотної послідовності, що генеруються окремими ОЕ за умови їхнього під'єднання до різних напруг вимірністю $(1 \times 3N)$, де N – загальна кількість ОЕ в групі.

Кожний стовпчик матриці рішень \mathbf{X} – аналітичний опис одного із варіантів під'єднання групи однофазних навантажень до мережі. Під'єднання n -го навантаження, $n = 1, 2, \dots, N$, описується булевими змінними $x_n; x_{n-1}$ та x_{n-2} . Якщо змінна $x_{n-2} = 1$, то навантаження n під'єднується до напруги U_{AB} , якщо $x_{n-2} = 0$, то, навпаки, не під'єднується, якщо $x_{n-1} = 1$, то навантаження n під'єднується до напруги U_{BC} , а якщо $x_n = 1$, – то до напруги U_{CA} . Числові значення змінних пов'язані між собою співвідношенням $x_n + x_{n-1} + x_{n-2} = 1$, забезпечення якого можливе за умови обов'язкового під'єднання навантаження n до мережі.

Матриця \mathbf{X} охоплює всі можливі варіанти під'єднання групи ОЕ до мережі за умови фіксованого під'єднання одного із них до будь-якої напруги. В дану множину варіантів входить оптимальний, а кількість варіантів, що розглядаються, в порівнянні із загальною зменшується втричі і становить 3^{N-1} . За алгоритмом вирішення задачі передбачається оцінка за критерієм ефективності (2) реалізації кожного варіанта і за результатом цього визначається найкращий. Тому можна стверджувати, що знайдений розв'язок забезпечує глобальний мінімум цільової функції. Вимірність матриці \mathbf{X} у задачі 1 становить $3N \times 3^{N-1}$. Її будова має певні характерні закономірності, які не залежать від N , що дає змогу алгоритмізувати процес складання \mathbf{X} для будь-якого випадку.

Елементи матриці \mathbf{F} (у задачі 1 вимірність $\mathbf{F} - 1 \times 3^{N-1}$) – значення струмів $(I_{II})_l$, $l = 1, 2, \dots, 3^{N-1}$, що відповідають реалізації відповідного рішення про під'єднання ОЕ. Мінімальний струм I_{II} знаходиться як

$$\min \{ (I_{II})_1 \quad (I_{II})_2 \quad \dots \quad (I_{II})_l \quad \dots \quad (I_{II})_{3^{N-1}} \} = (I_{II})_l,$$

а вектор під'єднання до мережі, якому відповідає $(I_{II})_l$, знаходиться в l -му стовпчику матриці \mathbf{X} .

Висновки про працездатність та переваги розробленого методу вирішення задачі 1, у порівнянні з іншими методами можна зробити за результатами розрахунків, наведених у табл. 1.

Таблиця 1				
	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 5
Під'єднати до U_{AB}	№2; №3	№4	№4	№1; №5
Під'єднати до U_{BC}	№1; №5	№1; №3	№1; №5	№2; №3
Під'єднати до U_{CA}	№4	№2; №5	№2; №3	№4
Струм I_{II} , А	5,87	4,78	3,22	3,22

Розрахунки проводилися для п'яти ОЕ, що мають такі параметри:

ОЕ №1: $P_1 = 6,688$ кВт, $\cos\varphi_1 = 0,88$;

ОЕ №2: $P_2 = 5,814$ кВт, $\cos\varphi_2 = 0,9$;

ОЕ №3: $P_3 = 5,415$ кВт, $\cos\varphi_3 = 0,95$;

ОЕ №4: $P_4 = 8,075$ кВт, $\cos\varphi_4 = 0,85$;

ОЕ №5: $P_5 = 4,104$ кВт, $\cos\varphi_5 = 0,9$,

де P , $\cos\varphi$ – активна потужність та коефіцієнт потужності ОЕ відповідно.

Задача 2 – оптимального під'єднання групи ОЕ, параметри яких змінюються у часі, до вузла трифазної мережі. Рішення щодо під'єднання ОЕ до мережі у разі зміни їхніх параметрів у часі має прийматися із врахуванням цієї обставини. Для такої задачі матриця \mathbf{I} – це матриця вимірністю $K \times 3N$ і

кожний її рядок містить інформацію про впливи на електричну мережу для відповідних дискретних моментів часу. Кожний стовпчик l ($l=1,2,\dots,3^{N-1}$) матриці \mathbf{F} – це значення струмів I_{ll_k} для моментів часу t_k за умови реалізації вектора під'єднань l . Матриця \mathbf{X} залишається такою самою, як і для задачі 1.

Інформація для оцінки l -го варіанта під'єднання ОЕ за критерієм (1) міститься в l -ому стовпчику матриці \mathbf{F} . Для цього слід розрахувати $\left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_l$.

Для визначення оптимального варіанта під'єднань знаходиться

$$\min \left\{ \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_1, \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_2, \dots, \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_l, \dots, \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_{3^{N-1}} \right\} = \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_l.$$

Цьому відповідає l -ий стовпчик матриці \mathbf{X} і l -ий вектор приєднань.

Розрахунки внутрішнього симетрування ОЕ, параметри яких змінюються в часі, виконані для двох прикладів. Вихідні дані для цих розрахунків наведено у табл. 2.

Таблиця 2

№ навантаження	Параметри	Інтервали часу				
		Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5
1	P, кВт/ cosφ	2,1/0,8	2,25/0,8	2,4/0,8	2,65/0,85	2,7/0,85
2	P, кВт/ cosφ	7,7/0,68	8/0,68	7,6/0,68	7,5/0,63	7,2/0,6
3	P, кВт/ cosφ	6,1/0,71	6,2/0,78	6,3/0,76	6,2/0,79	6/0,86
4	P, кВт/ cosφ	3/0,91	3,3/0,89	3,6/0,87	3,9/0,85	4,2/0,91

Ефективність розробленого методу в порівнянні з методом, який базується на аналізі М-моделі внутрішнього симетрування – *метод 4*, видно з табл. 3, де наведено розв'язки для двох прикладів. Звідси видно, що рішення, розраховані за *методом 4*, не завжди можуть відповідати глобальному мінімуму. У прикладі 2 контролювалося 20 проміжків часу.

Таблиця 3

	Приклад 1		Приклад 2	
	Метод 4	Метод 5	Метод 4	Метод 5
Під'єднати до U_{AB}	№1; №4	№2	№4	№3; №4
Під'єднати до U_{BC}	№2	№1; №4	№2;	№1
Під'єднати до U_{CA}	№3	№3	№3; №1	№2
$\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2, A^2$	256,9	256,9	1028,6	1014,3

ричний режим із мінімальним значенням (1) за умови фіксованого під'єднання електроприймачів до мережі. В цьому випадку матриця \mathbf{X} вимірністю $3N \times 1$ описує реалізоване під'єднання ОЕ до мережі.

Оцінку i -го варіанта зсуву можна виконати, розрахувавши матрицю \mathbf{F}_i ,

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{I}_i \cdot \mathbf{X},$$

де \mathbf{F}_i – матриця сумарних струмів зворотної послідовності в лінії живлення, які створюються групою ОЕ на всіх інтервалах часу $t_k \div t_{k+1}$ при i -му варіанті зсуву графіків навантаження, $i=1,2,\dots,M^{N-1}$; вимірність матриці $K \times 1$; \mathbf{I}_i – матриця струмів зворотної послідовності, що генеруються окремими ОЕ в k -і моменти часу за умови їхнього під'єднання до різних напруг для i -го варіанта зсуву їхніх графіків навантаження вимірністю $K \times 3N$; матриці \mathbf{I}_i формуються за окремим алгоритмом. Значення критерію ефективності (1) несиметричного режиму, який складається для i -го варіанта зсуву графіків навантаження, можна розрахувати – $\left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_i$. Оптимальний варіант зсуву можна визначити, порівнявши числові значення критеріїв ефективності всіх варіантів і обравши найменше

$$\min \left\{ \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_1, \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_2, \dots, \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_i, \dots, \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_{M^{N-1}} \right\} = \left(\sum_{k=1}^K I_{ll_k}^2 \right)_i.$$

Оптимальним є i -ий варіант зсуву графіків навантаження.

Приклад вирішення задачі оптимального зсуву графіків навантажень. До вузла електричної мережі 0,4 кВ приєднано три однофазних електроприймача (ЕП).

Перший ЕП1 під'єднано до напруги U_{AB} , другий ЕП2 – до U_{CA} , а третій ЕП3 – до U_{BC} . Графіки навантажень ЕП на інтервалі часу технологічного циклу показано на рис. 1: а – ЕП1; б – ЕП2; в – ЕП3. Кожний

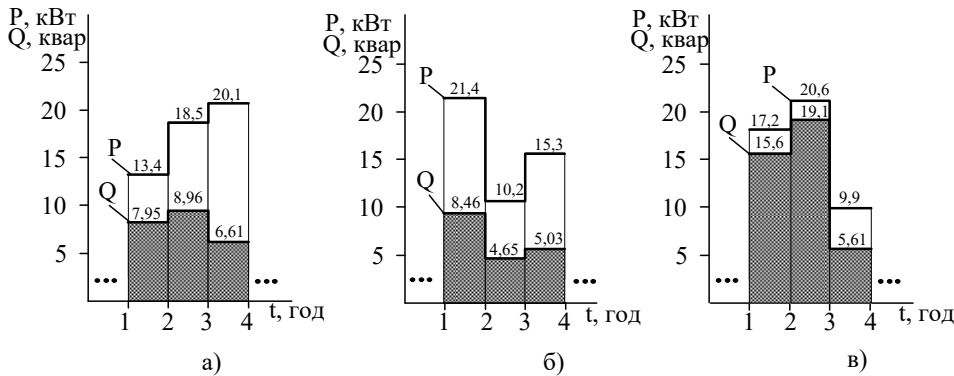


Рис. 1

наступний технологічний цикл (ТЦ) починається відразу після закінчення попереднього.

Проводяться розрахунки, які дають змогу сформуванати множину матриць I_i . Перший стовпчик

матриці I_1 буде таким: $I_1 = \begin{pmatrix} 20,64 + j11,59 & \dots \\ 27,39 + j21,73 & \dots \\ 33,64 + j10,76 & \dots \end{pmatrix}$. Формується вектор під'єднань – X :

$X^T = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0)$. Розраховується множина матриць F_i і за отриманими результатами – показники якості для всіх варіантів можливих зсувів. У підсумку формується масив $\{J_i\}$:

$$\{1249 \ 1746 \ 775,7 \ 617,1 \ 1486,6 \ 1493,3 \ 1194 \ 714 \ 1093\},$$

з якого видно, що мінімальне значення показника якості становить 617,1 А² і відповідає воно $i=4$. Таким чином, оптимальним варіантом зсуву графіків навантаження однофазних електроприймачів є четвертий.

четвертий.

Для реалізації оптимального рішення потрібно забезпечити початки технологічних циклів, як показано на осі часу рис. 2, а. Залежність $I_{II}^2(t)$ для оптимального зсуву графіків навантажень (залежність 1) та зсуву за варіантом 1 (залежність 2) на інтервалі часу технологічного циклу показана на рис. 2, б.

Задача 4 – оптимального зсуву графіків навантажень ОЕ та їхнє під'єднання до електричної мережі. У разі, коли можна реалізувати будь-який варіант під'єднання ОЕ до мережі, з'являється можливість поліпшити результат, отриманий шляхом оптимального зсуву графіків навантажень. Найкращий результат можна отримати, якщо поєднати в одній задачі дві: задачу 2 та задачу 3.

Матриці I_i мають таку саму вимірність і такий самий зміст рядків, що і в задачі 3, і складаються для всіх M^{N-1} варіантів зсуву графіків навантажень. Матриця X , як і в задачі 2, охоплює всі можливі рішення з під'єднання електроприймачів до мережі.

Для кожного i -го варіанта зсуву знаходиться оптимальне рішення щодо під'єднання ОЕ до мережі – li та формується масив відповідних числових значень (оптимальних для варіанта зсуву i) критеріїв ефективності – $\left(\sum_{k=1}^K I_{IIk}^2 \right)_{li}$.

критеріїв ефективності – $\left(\sum_{k=1}^K I_{IIk}^2 \right)_{li}$.

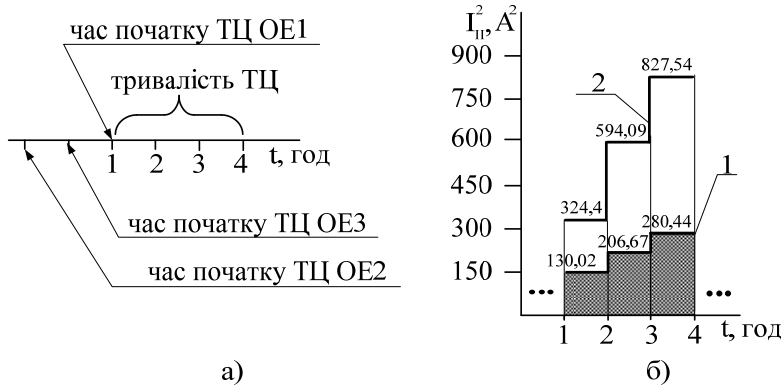


Рис. 2

Оптимальне рішення із врахуванням результуючого ефекту від зсуву графіків навантажень і під'єднання ОЕ до мережі можна знайти так:

$$\min \left\{ \left(\sum_{k=1}^K I_{II_k}^2 \right)_{I_1} \left(\sum_{k=1}^K I_{II_k}^2 \right)_{I_2} \dots \left(\sum_{k=1}^K I_{II_k}^2 \right)_{I_i} \dots \left(\sum_{k=1}^K I_{II_k}^2 \right)_{I_{M^{N-1}}} \right\} = \left(\sum_{k=1}^K I_{II_k}^2 \right)_{I_i}$$

За отриманими результатами реалізується i -ий зсув графіків навантаження і відповідний йому l -ий варіант під'єднання електроприймачів до мережі.

Приклад. Група чотирьох ОЕ, що мають однакові циклічні індивідуальні графіки навантажень (ІН), які показані на рис. 3, під'єднані до трипровідної електричної мережі напругою 10 кВ: 1 – графік активної потужності, P ; 2 – графік реактивної потужності, Q .

Розрахуємо оптимальні зсуви ІН з метою вирівнювання групового графіка навантажень (ГГН) та варіант їхнього під'єднання до мережі.

Оптимальні зсуви ІН зображені на числовій осі рис. 4, а. ГГН, що відповідає оптимальному зсуву, – на рис 4, б.

Залежність $I_{II}^2(t)$ у лінії живлення, що відповідає розрахованим зсувам ІН та оптимальному під'єднанню ОЕ до мережі, показана на рис. 5.

Висновки.

1. За розробленим методом доцільно вирішувати такі задачі внутрішнього симетрування ОЕ: оптимального під'єднання групи ОЕ до вузла трифазної трипровідної мережі; те саме електроприймачів, параметри яких змінюються у часі; визначення оптимального зсуву графіків навантажень ОЕ з метою зниження несиметрії режиму; те саме, та їхнього оптимального під'єднання до електричної мережі.

2. Розв'язки, отримані за розробленим методом, забезпечують глобальний мінімум цільових функцій, оскільки вибір варіанта для реалізації здійснюється із обмеженої множини варіантів, в якій гарантовано присутній варіант оптимальний.

3. Всі етапи вирішення задач внутрішнього симетрування алгоритмізовані, що дає змогу використовувати інформаційні технології для практичної реалізації виконаних досліджень.

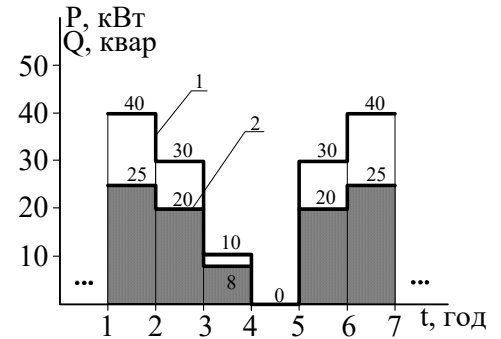


Рис. 3

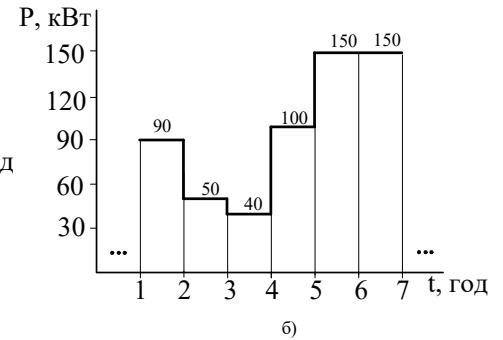
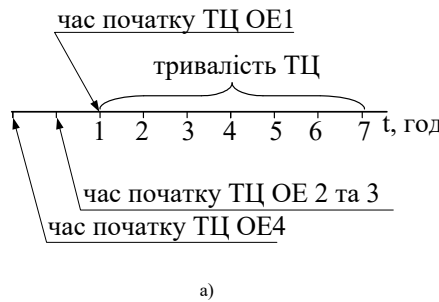


Рис. 4

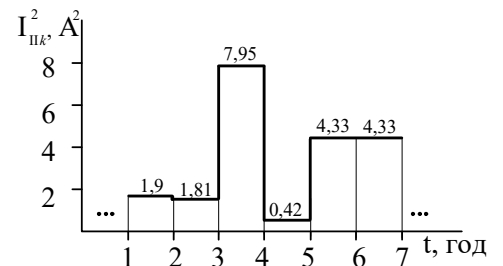


Рис. 5

1. Аввакумов В.Г. Экономико-математические методы: идеи, алгоритмы, программы. Омск: РосЗИТЛП, 2009. 194 с.
2. Аввакумов В.Г. Методы нескалярной оптимизации и их приложения. К.: Вища школа, 1990. 188 с.
3. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. Київ: Наукова думка, 1992. 240 с.
4. Терешкевич Л.Б. АСУ в электроспоживанні. Вінниця: ВНТУ, 2016. 136 с.
5. Юдин Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. М.: Советское радио, 1974. 400 с.
6. Noruzi M., Basiri A. Current balancing for distributed single phase loads based on automated phase tracing. IEEE 23rd International Conference on Electricity Distribution. Lyon, 15-18 June 2015. Pp 1-4.
7. Son T.T., Tung T.A. Current unbalance reduction in low voltage Distribution networks using automatic phase Balancing device. Vietnam Journal of Science and Technology. 2017. Vol. 55. No 1. Pp. 108-119.
DOI: <https://doi.org/10.15625/0866-708X/55/1/8330>

8. Zheng Y., Zou L., He J., Su Y., Feng Z. Fast Unbalanced Three-phase Adjustment base on Single-phase Load Switching. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2013. Vol. 11. No 8. Pp. 4327-4334.

УДК 621.316.13

МЕТОД ОГРАНИЧЕННОГО ПЕРЕБОРА ВАРИАНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ВНУТРЕННЕГО СИММЕТРИРОВАНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

Л.Б. Терешкевич, канд.техн.наук, А.А. Хоменко

Винницкий национальный технический университет,
Хмельницкое шоссе, 95, Винница, 21021, Украина.

E-mail: o.o.khomenko.vntu@gmail.com

Разработан метод, который может быть общим для решения таких задач внутреннего симметрирования однофазных электроприемников: оптимального их подключения к узлу трехфазной трехпроводной сети; то же, но с учетом изменения их параметров во времени; определение оптимального смещения графиков нагрузок электроприемников с целью симметрирования режима; то же, и их оптимального подключения к сети. Суть метода заключается в обработке одной трети всех возможных вариантов подключения однофазных нагрузок к узлу электрической сети по алгоритму соответствующей задачи. Решение таких задач включает в себя: составление матрицы векторов управления и матрицы значений токов обратной последовательности, которые генерируются однофазными нагрузками. Метод обеспечивает нахождение решений, которым соответствует глобальный минимум критериальных функций. Библи. 8, рис. 5, табл. 3.

Ключевые слова: симметрирование нагрузок, несимметрия напряжения, ток обратной последовательности, оптимальное решение.

METHOD OF LIMITED VERSION OF OPTIONS FOR THE PROBLEMS OF INTERNAL SYMMETRY OF SINGLE-PHASE ELECTRIC DEVICES

L.B. Tereshkevych, O.O. Khomenko

Vinnitsia National Technical University,
Khmelnyske shose, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine.

E-mail: o.o.khomenko.vntu@gmail.com

A method has been developed that can be common for solving such problems of internal symmetry of single-phase electric receivers: their optimal connection to a three-phase three-wire network node; the same, but taking into account the change in their parameters over time; determination of the optimal displacement of the load diagrams of electric receivers for the purpose of symmetrization mode; the same, and their optimal connection to the network. The essence of the method is to process one-third of all possible options for connecting single-phase loads to the node of the electrical network, according to the algorithm of the corresponding task. The solution of such problems includes: compiling a matrix of control vectors and a matrix of values of negative sequence currents, which are generated by single-phase loads. The method ensures finding solutions to which the global minimum of criterial functions corresponds. References 8, figures 5, tables 3.

Key words: load balancing, voltage asymmetry, reciprocal suction current, optimal solution.

1. Avvakumov V.H. Economic and mathematical methods: ideas, algorithms, programs. Omsk: RosZITLP, 2009. 194 p. (Rus)
2. Avvakumov V.H. Methods of non-scalar optimization and their applications. Kyiv: Vyshcha shkola, 1990. 188 p. (Rus)
3. Kuznetsov V.H., Hryhoriev A.S., Danyliuk V.B. Reduction of asymmetry and nonsinusoidal voltage in electrical networks. Kyiv: Naukova dumka, 1992. 240 p. (Rus)
4. Tereshkevych L.B. ACS in electrical consumption. Vinnitsia: VNTU, 2016. 136 p. (Ukr)
5. Yudin D.B. Mathematical methods of control under incomplete information. Moskva: Sovetskoe radio, 1974. 400 p. (Rus)
6. Noruzi M., Basiri A. Current balancing for distributed single phase loads based on automated phase tracing IEEE 23rd International Conference on *Electricity Distribution*. Lyon, 15-18 June 2015. Pp 1-4.
7. Son T.T., Tung T.A. Current unbalance reduction in low voltage Distribution networks using automatic phase Balancing device. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2017. Vol. 55. No 1. Pp. 108-119.
DOI: <https://doi.org/10.15625/0866-708X/55/1/8330>
8. Zheng Y., Zou L., He J., Su Y., Feng Z. Fast Unbalanced Three-phase Adjustment base on Single-phase Load Switching. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2013. Vol. 11. No 8. Pp. 4327-4334.

Надійшла 09.11.2017

Остаточний варіант 14.12.2018