

Л. Б. Терешкевич¹
О. О. Хоменко¹

ОПТИМАЛЬНЕ ПІД'ЄДНАННЯ ОДНОФАЗНИХ НАВАНТАЖЕНЬ, ПАРАМЕТРИ ЯКИХ ЗМІНЮЮТЬСЯ В ЧАСІ, ДО ВУЗЛА ТРИПРОВІДНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

¹Вінницький національний технічний університет

Розроблено алгоритм розрахунку оптимального під'єднання однофазних навантажень до вузла трифазної трипровідної мережі, який враховує зміни їх параметрів в часі.

Ключові слова: однофазне навантаження, несиметрія напруги, додаткові втрати активної потужності.

Вступ

На промислових підприємствах використовується технологічне обладнання, яке з технологічних або конструктивних міркувань виконується однофазним. Це індукційні плавильні та нагрівальні установки, печі графітації, установки електроконтактного нагрівання, установки електрошлакового переплаву. Такі електроприймачі під'єднуються до трипровідних мереж 6—35 кВ і створюють несиметрію навантажень в мережі.

Одним із заходів, що дозволяє знизити несиметрію навантажень і, відповідно, несиметрію напруг, є їх оптимальне під'єднання до електричної мережі. Такий захід не завжди дозволяє забезпечити нормовані значення несиметрії, але за будь-яких умов повинен запроваджуватись в першу чергу, оскільки потужності спеціально встановлених для симетрування пристроїв при цьому будуть меншими.

Оптимальне під'єднання однофазних навантажень до трифазної мережі потребує проведення розрахунків значного обсягу, які мають бути автоматизованими. Складність задачі зумовлюється ще й тим, що параметри окремо взятих навантажень можуть змінюватись в часі і, як наслідок, оптимальне їх під'єднання для одного моменту часу може бути не оптимальним для іншого. Якщо в схемі електричних з'єднань не передбачена можливість перемикання навантажень на інші напруги, то рішення з їх під'єднання має прийматися з урахуванням цієї особливості.

Відомі роботи, де вирішувалась задача оптимального під'єднання однофазних навантажень до мережі [1—5], але фактор зміни їх параметрів в часі залишається неврахованим.

Метою роботи є розробка критерію ефективності, за яким можна розрахувати оптимальне під'єднання однофазних навантажень, параметри яких змінюються в часі, а також розробка алгоритму розрахунку оптимального під'єднання однофазних навантажень до трифазної мережі.

Обґрунтування критерію ефективності

Якщо параметри несиметричного режиму змінюються у часі, то оцінку будь-яких впливів, що здійснюються на нього на інтервалі часу t_1-t_K , слід виконувати за допомогою показника якості [6], який для зазначеної задачі можна записати так:

$$\int_{t_1}^{t_K} I_{II}^2(t) dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де I_{II} — струм зворотної послідовності в лінії живлення групи однофазних навантажень; t_1, t_K — початковий та кінцевий (не фіксований) моменти часу.

$$I_{II}(t) = \sum_{n=1}^N I_{IIIm}(t),$$

де $I_{IIIm}(t)$ — вектор струму зворотної послідовності, що створюється навантаженням n за його під'єднання до напруги m ; $m = 1; 2; 3$. Якщо $m = 1$, то навантаження під'єднується до напруги U_{AB} , якщо $m = 2$ — до напруги U_{BC} , а якщо $m = 3$ — до U_{CA} .

Показник якості (1) має енергетичний зміст. Він пропорційний додатковим втратам енергії, що зумовлені несиметричним режимом.

Математична модель оптимального під'єднання однофазних навантажень до трифазної мережі

На інтервалі часу $t_1 \dots t_K$ виділимо дискретні моменти часу t_k , $k = 1 \div K$ з однаковими інтервалами Δt_k між ними. На інтервалі часу Δt_k параметри кожного електроприймача будемо вважати незмінними і, як наслідок, $(\underline{I}_{Inm})_k = (\text{Re } \underline{I}_{Inm})_k + j(\text{Im } \underline{I}_{Inm})_k$ також залишаються незмінними. Якщо ввести керувані змінні x_{nm} , $x_{nm} \in \{1, 0\}$, то математичну модель оптимального під'єднання однофазних навантажень до трипровідної електричної мережі можна записати так:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^K \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^3 \text{Re}(\underline{I}_{Inm})_k x_{nm} + j \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^3 \text{Im}(\underline{I}_{Inm})_k x_{nm} \right)^2 \rightarrow \min; \\ \sum_{m=1}^3 x_{nm} = 1, \quad n = 1, 2, \dots, N; \\ x_{nm} \in \{1, 0\}, \end{cases} \quad (2)$$

де N — загальна кількість однофазних навантажень; x_{nm} — булева змінна, якщо в результаті розв'язання задачі $x_{nm} = 1$, то навантаження n слід під'єднувати до напруги m , а якщо $x_{nm} = 0$, тоді до напруги m не під'єднувати.

Змінні x_{nm} створюють вектор керування X_i , кількість компонент якого $(1 \times 3N)$,

$$X_i = (x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{21} \ x_{22} \ x_{23} \ x_{31} \ \dots \ x_{N1} \ x_{N2} \ x_{N3}).$$

Цільова функція моделі (2) потребує знаходження таких значень для x_{nm} , яким буде відповідати мінімум для показника якості (1). Обмеження математичної моделі описують вимогу обов'язкового під'єднання всіх навантажень до мережі.

Математична модель (2) нескаларна, дискретна та квадратична. Класичних методів розв'язання таких оптимізаційних задач не існує, що потребує розроблення алгоритму їх розв'язування.

Алгоритм розв'язання задачі оптимального під'єднання однофазних навантажень, параметри яких змінюються у часі, до електричної мережі

Загальна кількість варіантів під'єднання для цієї задачі обмежена і становить 3^N . Якщо під'єднання будь-якого навантаження зафіксувати до однієї напруги, то загальна кількість варіантів під'єднань зменшиться втричі і становитиме $\frac{1}{3}3^N$, а один із трьох оптимальних розв'язків буде знаходитись серед цієї множини варіантів. Для подальшого розгляду беремо саме такий випадок. Алгоритм, що пропонується, передбачає перебір, кількісне оцінювання усіх варіантів та вибір такого, для якого показник якості (1) буде мінімальним.

Для проведення розрахунку має бути складена матриця \mathbf{D} , рядками якої є вектори керування для всіх варіантів під'єднання однофазних навантажень до вузла мережі. Вимірність матриці \mathbf{D} —

$$\left(\frac{1}{3} 3^N \times 3N \right): \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \dots \\ \mathbf{X}_i \\ \dots \\ \mathbf{X}_{\frac{1}{3}3^N} \end{pmatrix},$$

де \mathbf{X}_i — вектор керування i -го варіанта під'єднання навантажень до мережі.

Кожний з векторів \mathbf{X}_i , якими формується матриця \mathbf{D} , передбачає під'єднання всіх однофазних навантажень до мережі і тим самим забезпечується відповідне обмеження математичної моделі (2).

Інформація про можливі впливи кожного однофазного навантаження на мережу, міститься в матриці \mathbf{I} . Стовпці матриці \mathbf{I} — це струми зворотної послідовності $\text{Re}\left(\underline{I}_{\underline{nm}}\right)_k + j \text{Im}\left(\underline{I}_{\underline{nm}}\right)_k$ для k -х моментів часу. Матриця \mathbf{I} має вимірність $(3N \times K)$, а її стовпець k виглядає таким чином:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} \dots \text{Re}\left(\underline{I}_{\underline{11}}\right)_k + j \text{Im}\left(\underline{I}_{\underline{11}}\right)_k & \dots \\ \dots \text{Re}\left(\underline{I}_{\underline{12}}\right)_k + j \text{Im}\left(\underline{I}_{\underline{12}}\right)_k & \dots \\ \dots \text{Re}\left(\underline{I}_{\underline{N3}}\right)_k + j \text{Im}\left(\underline{I}_{\underline{N3}}\right)_k & \dots \end{pmatrix}.$$

Всі можливі варіанти значень струмів $\underline{I}_{\underline{ll}}$ в лінії живлення містить матриця \mathbf{F} вимірністю $\left(\frac{1}{3}3^N \times K\right)$:

$$\mathbf{F} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}.$$

У будь-якому i -му рядку матриці \mathbf{F} струми $(\underline{I}_{\underline{ll}})_k$ в момент часу t_k за умови реалізації відповідного \mathbf{X}_i .

Для оцінювання ефективності деякого вектора \mathbf{X}_i у відповідності до показника якості (1) необхідно розрахувати суму квадратів модулів струмів $\underline{I}_{\underline{ll}}$ по i -му рядку матриці \mathbf{F} .

В цілому алгоритм розрахунку оптимального під'єднання однофазних навантажень, параметри яких змінюються в часі, полягає в такому:

КРОК 1. Складаються матриці \mathbf{D} та \mathbf{I} і розраховується матриця \mathbf{F} .

КРОК 2. По кожному i -му рядку матриці \mathbf{F} розраховується $\sum_{k=1}^K I_{\underline{ll}ik}^2$.

КРОК 3. Перебираються по всіх рядках розраховані $\sum_{k=1}^K I_{\underline{ll}ik}^2$ і вибирається найменше. Оптимальний вектор керування міститься в рядку матриці \mathbf{D} , що відповідає рядку матриці \mathbf{F} , в якому сума $\sum_{k=1}^K I_{\underline{ll}ik}^2$ мінімальна.

Приклад застосування алгоритму

Для групи з чотирьох однофазних навантажень, зміни параметрів яких наведено в таблиці, необхідно розрахувати оптимальне під'єднання до трипровідної електричної мережі.

Параметри однофазних навантажень

№ навантаження	Параметри	Інтервали часу				
		Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5
1	P , кВт	87,9	97,8	106,7	123,5	111,2
	$\cos \varphi$	0,8	0,8	0,8	0,85	0,85
2	P , кВт	79,9	86,5	61,1	50,5	65,6
	$\cos \varphi$	0,68	0,68	0,68	0,63	0,6
3	P , кВт	132,1	121,1	100,5	108,1	124
	$\cos \varphi$	0,71	0,78	0,76	0,79	0,86
4	P , кВт	123,3	99,8	75,6	89,7	91,1
	$\cos \varphi$	0,91	0,89	0,87	0,85	0,91

Оптимальним вектором керування, знайденим за розробленим алгоритмом, є такий:

$$\mathbf{X}_{\text{opt}} = (1000100001100). \quad (3)$$

Реалізується вектор (3) таким чином:

— на напругу U_{AB} під'єднується навантаження №1 та № 4;

— на напругу U_{BC} — № 2;

— на напругу U_{CA} — № 3.

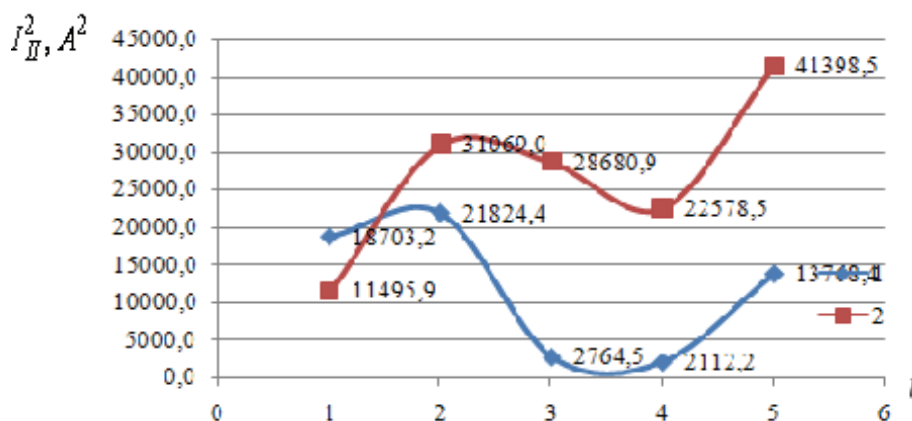
Значення показника якості (1), що відповідає такому під'єднанню, становить 59172 A^2 .

Якщо знехтувати фактором зміни параметрів однофазних навантажень в часі, а рішення приймати, наприклад, для часу t_1 за модифікованим симплекс-алгоритмом [3], то отримаємо вектор керування:

$$\mathbf{X} = (1000010101000). \quad (4)$$

За умови реалізації цього розв'язку буде отримано траєкторію $I_{II}^2(t)$, для якої значення показника якості (1) на всьому інтервалі часу сягне 135222 A^2 . Це свідчить, що врахування зміни параметрів режиму однофазних навантажень для визначення оптимального варіанту їх під'єднання до мережі дає позитивні результати.

Траєкторії $I_{II}^2(t)$, що отримуються у разі реалізації векторів (3) та (4), показані на рисунку.



Залежність $I_{II}^2(t)$ за умови реалізації: вектора керування (3) — крива 1; вектора (4) — крива 2

Висновки

1. Розрахунок оптимального під'єднання однофазних навантажень до трифазної мережі необхідно виконувати з урахуванням зміни їх параметрів.

2. За показник якості прийнятого рішення з під'єднання однофазних навантажень до трифазної мережі на інтервалі часу $t_1 - t_K$, може бути взято функціонал (1), числове значення якого пропорційне додатковим втратам активної енергії, що зумовлені несиметрією режиму.

3. Розроблений алгоритм дозволяє знайти оптимальне під'єднання однофазних навантажень до трифазної трипровідної мережі з урахуванням зміни їх параметрів у часі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аввакумов В. Г. Методы нескаларной оптимизации и их приложения / В. Г. Аввакумов. — К. : Вища шк., 1990. — 188 с. — ISBN 5-11-001321-7/.
2. Терешкевич Л. Б. АСУ в електроспоживанні : навч. посіб. / Л. Б. Терешкевич. — Вінниця : ВНТУ, 2016. — 136 с.
3. Терешкевич Л. Б. Оптимальне внутрішнє симетрування групи двоплечевих електроустановок / Л. Б. Терешкевич, Г. З. Сагайдак, В. В. Захаров // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2010 — № 6 — С. 48—52.
4. Терешкевич Л. Б. Внутрішнє симетрування у вузлах приєднання ліній з однофазним навантаженням / Л. Б. Терешкевич, І. О. Бандура, О. С. Владико // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 6. — С. 71—73.
5. Bnrtscher H. Liberlagerung von Oberschwüngen in Anlagen mit mehreren Strom-Richtern // Etz Archiv. — 1990. — 2, № 7. — Р. 193—198.
6. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления / Р. П. Федоренко. — М. : Наука, 1987. — 488 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 31.01.2017

Терешкевич Леонід Борисович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: lbter@meta.ua ;

Хоменко Олександр Олексійович — аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: cah4os2008@mail.ru .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

L. B. Tereshkevych¹
O. O. Khomenko¹

Optimal Connection of Single-phase Loads with Changing in Time Parameters, to Knot of Three-wire Electric Network

¹Vinnytsia National Technical University

There have been developed the algorithm calculating the optimal connection of single-phase loads to the knot of three-wire electric network taking into account the changes in their parameters in time.

Keywords: single-phase load, voltage asymmetry, additional active power losses.

Tereshkevych Leonid B. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electrical Systems of Power Consumption and Power Management, e-mail: lbter@meta.ua ;

Khomenko Oleksandr O. — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Power Consumption and Power Management, e-mail: cah4os2008@mail.ru

Л. Б. Терешкевич¹
А. А. Хоменко¹

Оптимальное подключение однофазных нагрузок, параметры которых изменяются во времени, к узлу трехпроводной электрической сети

¹Вінницький національний технічний університет

Разработан алгоритм расчета оптимального подключения однофазных нагрузок к узлу трехфазной трехпроводной сети, учитывающий изменения их параметров во времени.

Ключевые слова: однофазная нагрузка, несимметрия напряжения, дополнительные потери активной мощности.

Терешкевич Леонид Борисович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: lbter@meta.ua ;

Хоменко Александр Алексеевич — аспірант кафедри електротехнічних систем електропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: cah4os2008@mail.ru