

УДК 621.316

Л. Б. Терешкевич, к. т. н., доц.;

Т. З. Сагайдак, студ.;

В. В. Захаров

ОПТИМАЛЬНЕ ВНУТРІШНЄ СИМЕТРУВАННЯ ГРУПИ ДВОПЛЕЧОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

Запропоновано математичну модель внутрішнього симетрування для двоплечових установок, що мають технологічні вимоги до підключення їх до мережі, та розроблено обчислювальний метод розрахунку оптимального їх фазування.

Постановка задачі дослідження

Актуальною проблемою в енергетичній галузі є гарантування якості електроенергії, що забезпечує не тільки продуктивну і надійну роботу різноманітних промислових та побутових електроприймачів, але й сприяє економному і раціональному споживанню енергоресурсів.

Одним із показників якості електроенергії є несиметрія напруги, яка призводить до низки небажаних явищ та створюється електроприймачами (ЕП) несиметричного виконання [1].

Серед можливих шляхів зниження впливу групи несиметричних ЕП на мережу є таке їх підключення до фаз трифазної системи, коли електричний режим, що ними створюється, буде характеризуватися найменшим рівнем несиметрії (внутрішнє симетрування навантажень). Зменшення несиметрії напруги за рахунок рівномірного розподілу електричних навантажень між фазами дозволяє іноді досягти бажаного результату без залучення симетрувальних пристроїв, а відповідно, і додаткових капіталовкладень, і при цьому покращити параметри якості електричної енергії.

Відомі наукові роботи, де розв'язується задача для внутрішнього симетрування однофазних навантажень, які підключені до лінійних [2] або до фазних [3] напруг.

Крім однофазних навантажень в промисловості використовуються електроустановки несиметричного виконання, які в науковій літературі прийнято називати двоплечовими [4], наприклад, індукційні каналні печі та нагрівальні установки для плавки сплавів на мідній основі та для плавки цинку, індукційні каналні міксери для обробки чавуну, індукційні магнітогідродинамічні машини, які використовуються як електромагнітні насоси для рідких металів в атомній енергетиці, металургії, літейному виробництві. Вони являють собою два одночасно працюючих взаємопов'язаних однофазних навантажень, що підключаються до різної напруги живильної мережі і становлять особливий клас несиметричних навантажень з точки зору симетрування [4].

За характеристиками плеч їх можна поділити на дві групи:

1) установки з однаковими або приблизно однаковими характеристиками плеч (наприклад, індукційні каналні печі, нагрівальні установки);

2) установки з різними характеристиками плеч, для яких існують певні технологічні умови їх підключення до мережі (наприклад, магнітодинамічні установки (МДУ)).

ЕП, що відносяться до першої групи, можна розглядати як два однофазних навантаження і до них можна застосувати відомі методи внутрішнього симетрування однофазних навантажень [2, 3]. Наукових робіт, які дозволяють виконати внутрішнє симетрування ЕП другої групи, недостатньо.

У разі внутрішнього симетрування МДУ, на відміну, наприклад, від індукційних каналних печей, необхідно враховувати вибір початкових фаз, який не може бути довільним [4]. Ця технологічна вимога визначає продуктивність МДУ і вона має бути забезпечена для підключення таких електроустановок до мережі. Робота МДУ супроводжується зміною в широких межах як коефіцієнта потужності, так і навантаження протягом всього процесу виплавки металу.

Метою роботи є розробка математичної моделі внутрішнього симетрування групи двоплечових ЕП, для яких існують технологічні вимоги щодо підключення до мережі. Це дозволить зменшити втрати електроенергії та покращити її якість.

Математична модель внутрішнього симетрування двоплечових ЕП

Рішення щодо підключення групи двоплечових ЕП до мережі повинно прийматися, виходячи з таких технічних обмежень.

1. Вимог технології, які полягають в тому, що плече МДУ з більшим коефіцієнтом потужності (далі 1-ше плече) має бути підключеним на фазну напругу, яка відстає на 30 ° від лінійної напруги, до якої підключається інше плече (далі 2-ге плече).

2. Необхідності підключення до мережі всіх двоплечових ЕП.

За критерій ефективності, який враховує всі кінцеві ефекти (вплив на режими зворотної та нульової послідовностей), можуть бути прийняті додаткові втрати активної потужності від несиметрії напруги в живильній лінії — ΔP_{Σ} :

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_2 + \Delta P_0, \tag{1}$$

де ΔP_2 — додаткові втрати активної потужності, зумовлені струмами зворотної послідовності; ΔP_0 — додаткові втрати активної потужності, зумовлені струмами нульової послідовності.

Вихідною інформацією для прийняття рішення є потужності і коефіцієнти потужності кожного плеча всіх ЕП, на підставі чого попередньо розраховується вторинна інформація, яку можна подати у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Вторинна інформація для формування математичної моделі керування

№ ЕП	Допустимі за технологією виробництва комбінації підключення ЕП до мережі					
	Допустима комбінація підключення № 1 (напруги U_A, U_{AB})		Допустима комбінація підключення № 2 (напруги U_B, U_{BC})		Допустима комбінація підключення № 3 (напруги U_C, U_{CA})	
	Плече, що підключається до фазної напруги U_A	Плече, що підключається до лінійної напруги U_{AB}	Плече, що підключається до фазної напруги U_B	Плече, що підключається до лінійної напруги U_{BC}	Плече, що підключається до фазної напруги U_C	Плече, що підключається до лінійної напруги U_{CA}
1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7
1	\dot{I}_{211}	$\dot{I}_{214}; \dot{I}_{014}$	\dot{I}_{212}	$\dot{I}_{215}; \dot{I}_{015}$	\dot{I}_{213}	$\dot{I}_{216}; \dot{I}_{016}$
2	\dot{I}_{221}	$\dot{I}_{224}; \dot{I}_{024}$	\dot{I}_{222}	$\dot{I}_{225}; \dot{I}_{025}$	\dot{I}_{223}	$\dot{I}_{226}; \dot{I}_{026}$
.....						
i	\dot{I}_{2i1}	$\dot{I}_{2i4}; \dot{I}_{0i4}$	\dot{I}_{2i2}	$\dot{I}_{2i5}; \dot{I}_{0i5}$	\dot{I}_{2i3}	$\dot{I}_{2i6}; \dot{I}_{0i6}$
.....						
n	\dot{I}_{2n1}	$\dot{I}_{2n4}; \dot{I}_{0n4}$	\dot{I}_{2n2}	$\dot{I}_{2n5}; \dot{I}_{0n5}$	\dot{I}_{2n3}	$\dot{I}_{2n6}; \dot{I}_{0n6}$

Примітка. $\dot{I}_{2ik}, \dot{I}_{0ik}$ — струми зворотної та нульової послідовностей, що створюються i -м ЕП у k -му варіанті підключення його плеча.

Оптимальне рішення з підключення групи двоплечових ЕП до мережі можна прийняти, використовуючи математичну модель

$$\begin{cases} 3 \left\{ \left| \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^3 \dot{I}_{2ik} x_{ik} \right| + \left| \sum_{i=1}^n \sum_{k=4}^6 \dot{I}_{2ik} x_{ik} \right| \right\}^2 r_2 + 12 \left\{ \left| \sum_{i=1}^n \sum_{k=4}^6 \dot{I}_{0ik} x_{ik} \right| \right\}^2 r_0 \rightarrow \min; \\ \sum_{k=1}^3 x_{ik} = 1, \quad i=1, 2, \dots, n; \\ \sum_{k=4}^6 x_{ik} = 1, \quad i=1, 2, \dots, n; \\ x_{ik} = 1 \forall 0, \end{cases} \quad (2)$$

де r_2 і r_0 — активні складові опору струму зворотної та нульової послідовності; n — кількість двоплечових установок; x_{ik} — Булева змінна, що може приймати значення 1 або 0; \forall — символ логічної операції «АБО».

Математична модель та табл. 1 складені для такої системи кодування напруг: U_A з $k=1$; U_B — $k=2$; U_C — $k=3$; U_{AB} — $k=4$; U_{BC} — $k=5$; U_{CA} — $k=6$.

Перших два обмеження математичної моделі (2) реалізують вимогу обов'язкового підключення обох плечей кожного ЕП до мережі.

В явному вигляді технологічна вимога щодо відносного зсуву фаз напруг, до яких підключаються плечі ЕП, в математичній моделі аналітично не описана. Але отримані розв'язки будуть завжди її задовольняти, оскільки в процесі вирішення задачі розглядаються лише допустимі комбінації підключення плечей кожного ЕП, які зазначені в табл. 1.

Керовані змінні x_{ik} формують вектор керування X , який для випадку n ЕП можна записати в такому вигляді:

$$X^T = (x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ \dots \ x_{n1} \ x_{n2} \ x_{n3} \ x_{14} \ x_{15} \ x_{16} \ \dots \ x_{n4} \ x_{n5} \ x_{n6}),$$

де T — індекс транспонування.

Якщо змінна x_{ik} в результаті розв'язання задачі або за результатами будь-якої ітерації дорівнює 1, то це реалізується підключенням 1-го плеча i -го ЕП до відповідної фазної напруги, якщо $k=1, 2, 3$. Те саме, 2-го його плеча до відповідної лінійної напруги, якщо $k=4, 5, 6$. Якщо $x_{ik}=0$, то плече i -го ЕП не підключається до відповідної напруги.

Обчислювальний метод знаходження оптимального підключення двоплечових ЕП до мережі

Математичну модель (2) можна класифікувати як квадратичну, нескаларну, дискретного програмування.

Для виразів, що знаходяться під знаком модуля, можна виконати перехід до модулів відповідних величин, але в результаті отримаємо нелінійну дискретну задачу.

Тому класичні методи аналізу розробленої оптимізаційної математичної моделі (методи дискретної оптимізації, розроблені тільки для лінійних задач), а також відомі методи нескаларної оптимізації (методи нескаларної оптимізації розв'язують лінійну задачу) для цього випадку використаними бути не можуть.

З цієї причини для аналізу математичної моделі розроблено числовий метод, який полягає в цілеспрямованому обмеженому переборі варіантів підключення електроприймачів до мережі.

Для проведення розрахунків за розробленим методом попередньо береться один із можливих варіантів будь-якого підключення групи МДУ до мережі.

В загальних рисах алгоритм розробленого обчислювального методу для етапу m аналізу математичної моделі (2) полягає в такому.

Крок 1. Оцінюються варіанти почергового перемикавання навантаження, що забезпечують технологічну вимогу до підключення на іншу напругу (визначаються сумарні додаткові втрати потужності ΔP_{Σ}).

Крок 2. Із всіх розглянутих варіантів вибирається той, де забезпечуються найменші додаткові втрати потужності — $\Delta P_{\Sigma m}$.

Крок 3. Порівнюється значення $\Delta P_{\Sigma m}$ із $\Delta P_{\Sigma(m-1)}$, отриманим на попередньому етапі.

Крок 4. Якщо $\Delta P_{\Sigma m} < \Delta P_{\Sigma(m-1)}$, то вибраний варіант реалізується (відповідні компоненти вектора керування $X_{(m-1)}$ прирівнюються до одиниці, а компоненти, що відповідали попередньому підключенню цього ЕП, прирівнюються до нуля) та виконується перехід до кроку 2. В іншому випадку варіант, визначений на попередньому ($m - 1$) етапі є оптимальним і розрахунки припиняються.

Тестовий приклад

Ефективність цієї математичної моделі та працездатність обчислювального методу можна підтвердити тестовим прикладом.

Вихідні дані для розв'язання прикладу, які характеризують електричну мережу та МДУ, наведені на рисунку та в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри МДУ

№ ЕП	Перше плече		Друге плече	
	P, кВт	cos φ	P, кВт	cos φ
1	45	0,7	20	0,4
2	27	0,8	15	0,7
3	15	0,85	10	0,6
4	20	0,84	18	0,55

Знайти оптимальне підключення групи МДУ до мережі.

Розв'язання

Розрахуємо сумарні втрати активної потужності для такого варіанту підключення двоплечових ЕП, коли перше плече кожного ЕП буде живитись напругою U_A , а друге — напругою U_{AB} . Тоді $\Delta P_{\Sigma} = 11,57$ кВт. Це одна із трьох допустимих комбінацій підключення для кожного ЕП. Оцінивши втрати потужності ΔP_{Σ} для кожної з них (крок 1), вибираємо той варіант підключення ЕП, де сумарні втрати потужності будуть найменші (крок 2). На цьому перший етап закінчується.

На 3-у кроці порівнюємо початкові сумарні втрати із тими, що отримані на першій ітерації ($\Delta P_{\Sigma} = 2,82$ кВт). І так, як на другому етапі втрати менші, ніж на попередньому, то вибраний варіант реалізується (крок 4).

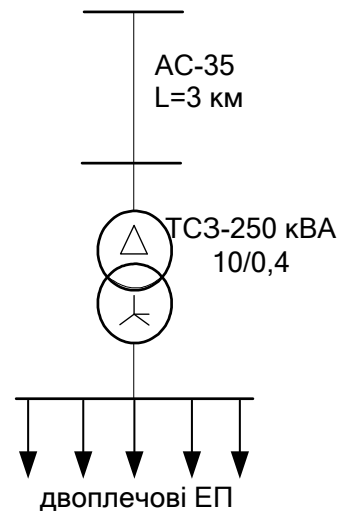
Відповідні розрахунки проводимо і за всіма іншими етапами можливих варіантів підключення чотирьох МДУ до трифазної системи напруг.

Результати розрахунків за етапами розв'язання задачі зводимо в таблицю.

Таблиця 3

Результати розрахунку на етапах розв'язання задачі

Етапи розв'язання задачі	Вектор керування X^T	ΔP_2 , кВт	ΔP_0 , кВт	ΔP_{Σ} , кВт
Вихідний стан	(1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0)	4,14	7,43	11,57
1	(0 1 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0 0 1 0 0)	1,5	1,32	2,82
2	(0 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0)	0,28	0,21	0,49
3	(1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0)	0,56	1,12	1,68



Розрахункова схема тестової задачі

Як видно з таблиці, найменші сумарні втрати ΔP_{Σ} отримані на другому етапі. За результатами третього етапу ці втрати збільшуються. Тому оптимальний розв'язок знайдено на другій ітерації, і розрахунки припиняються. Вибраний варіант реалізується таким чином: 1-ше плече 1-ї установки підключається на фазну напругу U_B , а 2-ге плече цієї ж установки на лінійну напругу U_{BC} . 1-ше плече 2-ї установки — на U_C , а 2-ге плече — на U_{CA} , і 1-ші плечі 3-ї і 4-ї установок на U_A , а інші плечі цих же установок — на U_{AB} . І в результаті такого вмикання втрати ΔP_{Σ} будуть мінімальні.

Використовуючи розроблену математичну модель, здійснюється керування несиметрією режиму в реальному масштабі часу через певні його проміжки у такій послідовності:

- вимірюються необхідні параметри двоплечових установок на момент прийняття рішення;
- розраховується вектор керування за математичною моделлю (2);
- якщо вектор керування відрізняється від реалізованого, то виконується корекція підключення двоплечових ЕП.

Для наступного моменту часу прийняття керованого рішення все повторюється.

Висновки

За допомогою розробленої математичної моделі та обчислювального методу можна знайти оптимальне рішення із внутрішнього симетрування групи магнітодинамічної установки і забезпечити при цьому технологічні вимоги щодо їх підключення до мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. — К. : Техніка, 1981. — 160 с.
2. Троицкий А. И. Теория и методы внутреннего симметрирования групповой нагрузки однофазных печей графитации : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Новочеркасск, 1982. — 20 с.
3. Терешкевич Л. Б. Об одном алгоритме внутреннего симметрирования при управлении несимметричным режимом электрической сети / Л. Б. Терешкевич // Известия высших учебных заведений. — 1980. — № 12. — С. 73. — ISSN 0579-2983.
4. Шидловский А. К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / А. К. Шидловский, Б. П. Борисов. — К. : Наукова думка, 1977. — 160 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Надійшла до редакції 13.09.10
Рекомендована до друку 20.09.10

Терешкевич Леонід Борисович — доцент, **Захаров Василь Володимирович** — інженер.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту;

Сагайдак Тетяна Зіновіївна — студентка Інституту магістратури, аспірантури та докторантури.

Вінницький національний технічний університет