

В.Г. Кузнєцов канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна)

ОЦІНКА ВТРАТ НАПРУГИ ПРИ ПАРАЛЕЛЬНІЙ РОБОТІ ТЯГОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Важливим заходом щодо економії втрат при експлуатації тягових підстанцій залізниць України є своєчасне відключення в резерв силових трансформаторів при зниженні їх навантаження і включення при зростанні навантаження [1].

Наявність надлишкових трансформаторних потужностей висуває завдання раціонального їх використання. В [2] запропоновано кількісні оцінки навантажень силових трансформаторів тягових підстанцій, при яких перехід на паралельну роботу створює позитивний ефект.

Оцінимо зниження втрат напруги при паралельній роботі тягових трансформаторів. Напруги по плечах живлення можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{Л}(t) &= U_{С}(t) - \Delta U_{Л}(t), \\ U_{П}(t) &= U_{С}(t) - \Delta U_{П}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де $U_{Л}(t), U_{П}(t)$ – напруги на лівій і правій підстанційних зонах; $U_{С}(t)$ – напруга в системі; $\Delta U_{Л}, \Delta U_{П}(t)$ – втрати напруги, які можна обчислити за формулами [3]:

$$\begin{aligned} \Delta U_{Л} &= x \left[\frac{2}{3} I_{Л} \sin j_{Л} + \frac{1}{3} I_{П} \sin(60^\circ + j_{П}) \right] = x J_1, \\ \Delta U_{П} &= x \left[\frac{2}{3} I_{П} \sin j_{П} - \frac{1}{3} I_{Л} \sin(60^\circ - j_{Л}) \right] = x J_2, \end{aligned} \quad (2)$$

де $I_{Л}$ й $I_{П}$ – струми лівого й правого плечей живлення; J_1 і J_2 – струми в робочих фазах трансформатора; $x = x'_S + x_{TP}$, $x'_S = 3U_H^2 10^3 / S_{КЗ}$ – опір системи до шин тягової підстанції.

Вузкий діапазон зміни кута зсуву фаз напруг і струмів по плечах живлення, що становить $35^\circ \pm 5^\circ$, робить функцію втрат напруги в тяговому трансформаторі майже лінійною.

Скористаємося відомою методикою статистичної лінеаризації, для чого розкладемо функції J_1 й J_2 у ряд Тейлора в околиці точки $0(m_{Л}, m_{П}, m_{j_{Л}}, m_{j_{П}})$, де $m_{Л}$ та $m_{П}$ – математичні очікування струмів навантаження лівого та правого плечей живлення; $m_{j_{Л}}$ і $m_{j_{П}}$ – математичні очікування кутів зсуву фаз по плечах живлення. В розкладанні враховуємо тільки лінійні складові, а $m_{j_{Л}}$ й $m_{j_{П}}$ приймаємо рівними 35° . Беремо відповідні часткові похідні:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial J_1}{\partial I_n}\right) &= \left(\frac{2}{3} \sin j_n\right)_0 = 0,38, \\
\left(\frac{\partial J_1}{\partial j_n}\right) &= \left(\frac{2}{3} I_n \cos j_n\right)_0 = 0,6m_n, \\
\left(\frac{\partial J_1}{\partial I_n}\right) &= \left(\frac{1}{3} \sin(60^\circ + j_n)\right)_0 = 0,33, \\
\left(\frac{\partial J_1}{\partial j_n}\right) &= \left(\frac{1}{3} I_n \cos(60^\circ + j_n)\right)_0 = 0,03m_n.
\end{aligned} \tag{3}$$

Тоді

$$\begin{aligned}
\Delta U_n = xJ_1 \approx & x(0,38m_n + 0,33m_n + 0,38(I_n - m_n) + \\
& + 0,6m_n(j_n - m_{j_n}) + 0,33(I_n - m_n) + 0,03m_n(j_n - m_{j_n})) \tag{4}
\end{aligned}$$

Математичне очікування втрат напруги можна визначити, виконавши підстановку у формули (2) математичних очікувань струмів і кутів зсуву фаз по плечах живлення, тобто

$$\begin{aligned}
m_1 &= x \left[\frac{2}{3} m_n \sin m_{j_n} + \frac{1}{3} m_n \sin(60^\circ + m_{j_n}) \right] = x[0,38m_n + 0,33m_n], \\
m_2 &= x \left[\frac{2}{3} m_n \sin m_{j_n} - \frac{1}{3} m_n \sin(60^\circ - m_{j_n}) \right] = x[0,38m_n - 0,08m_n].
\end{aligned} \tag{5}$$

Для визначення дисперсій втрат напруги по плечах живлення скористаємося відомою формулою

$$D[J_1] = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial J_1}{\partial y_i} \right)_0^2 D[y_i] + 2 \sum_{i=j} \left(\frac{\partial J_1}{\partial y_i} \right)_0 \left(\frac{\partial J_1}{\partial y_j} \right)_0 \cdot K[y_i y_j], \tag{6}$$

де $y_1 = I_n; y_2 = j_n; y_3 = I_n; y_4 = j_n$; $K[y_i y_j]$ – кореляція між відповідними величинами.

Як показали статистичні дослідження, кореляція між струмами різних плечей живлення, між зсувами фаз струмів по різних плечах близька до нуля. Відрізняється від 0 буде кореляція між струмами й зсувами фаз на одному плечі живлення. Для всіх цих величин кореляційна матриця буде мати вигляд:

$$K = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & 0 & 0 \\ r_{12} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_{34} \\ 0 & 0 & r_{34} & 1 \end{vmatrix},$$

де r_{12} – кореляція між I_n і j_n ; r_{34} – кореляція між I_n і j_n .

Підставляючи у формулу (6) значення, визначені в (3), одержуємо:

$$\begin{aligned} D_1 &= x^2 D[J_1] = \\ &= x^2 [0,38^2 s_n^2 + (0,6m_n)^2 s_{j_n}^2 + 0,33^2 s_n^2 + (0,03m_n)^2 s_{j_n}^2 + 2 \cdot 0,38 \cdot 0,6m_n s_n s_{j_n} r_{12} + 2 \cdot 0,33 \cdot 0,03m_n s_n s_{j_n} r_{34}] = \\ &= x^2 [0,14s_n^2 + 0,36m_n^2 s_{j_n}^2 + 0,116s_n^2 + 0,9 \cdot 10^{-3} m_n s_{j_n}^2 + 0,46m_n s_n s_{j_n} r_{12} + 0,02m_n s_n s_{j_n} r_{34}] \end{aligned}$$

За відсутності оцінок дисперсії кута зсуву фаз можна скористатися правилом $3s$. Приймаємо $3s_{j_n} = 3s_{j_n} = 5^0 = 0,087 \text{ рад}$. Тоді $s_{j_n} = s_{j_n} = 0,029$; $s_{j_n}^2 = s_{j_n}^2 = 0,84 \cdot 10^{-3}$ і формула приймає вид:

$$D_1 = x^2 [0,14s_n^2 + 0,11s_n^2 + 0,3 \cdot 10^{-3} m_n^2 + 0,75 \cdot 10^{-8} m_n^2 + 0,013m_n s_n r_{12} + 0,7 \cdot 10^{-4} m_n s_n r_{34}].$$

Відкидаючи четверту і шосту складову правої частини через їх малість, остаточно одержуємо:

$$D_1 = x^2 [0,14s_n^2 + 0,11s_n^2 + 0,3 \cdot 10^{-3} m_n^2 + 0,013m_n s_n r_{12}]. \quad (7)$$

Застосовуючи аналогічні викладення для дисперсії втрати напруги на правому плечі живлення, одержуємо вирази:

$$D_2 = x^2 [0,14s_n^2 + 0,02s_n^2 + 0,3 \cdot 10^{-3} m_n^2 + 0,013m_n s_n r_{34} - 0,0024m_n s_n r_{12}]. \quad (8)$$

Похибка статистичної лінеаризації може бути оцінена з відношення максимального значення залишкового члена ряду Тейлора R_2 до максимуму функції J_1 . Взевши другі часткові похідні і виконавши викладення, аналогічні попереднім, одержуємо наступні оцінки:

$$R_2 = 0,149s - 0,005m, \quad \max J_1 = 2,13s + 0,76m.$$

Відносна похибка статистичної лінеаризації визначається з наступної формули:

$$d \leq \frac{0,149s - 0,005m}{2,13s + 0,76m} = \frac{0,149 - 0,005d}{2,13 + 0,76d}, \quad (9)$$

де $d = \frac{m}{s}$.

Результати розрахунку за формулою (9) для значень $d = 3 \div 10$ показують, що відносна похибка змінюється від 0,03 до 0,011.

Таким чином, статистична лінеаризація вносить малу похибку через те, що

нелінійна функція кута змінюється у вузьких межах, а функція струму, що змінюється в широких межах, входить у вихідні формули лінійно.

Дослідження профілю навантаження тягової підстанції "Д" Львівської залізниці виявило стаціонарність тягового навантаження з наступними статистичними характеристиками:

$$m_d = 200A, s_d^2 = 2.56 \cdot 10^4 A^2; \quad m_n = 300A, s_n^2 = 6.5 \cdot 10^4 A^2; \quad m_p = 260A, s_p^2 = 4.4 \cdot 10^4 A^2.$$

На цій підстанції встановлені два тягових трансформатори ТДТНЭ-40000/110. У результаті розрахунків були отримані наступні оцінки математичних очікувань квадратів активних та реактивних струмів:

$$M_{акр} = 1333000A^2; M_{ркр} = 362700A^2. \quad [2].$$

Розрахункова схема тягової підстанції "Д" наведена на рисунку, а характеристики тягової підстанції подані в таблиці.

Оцінимо втрати напруги в трансформаторах при одному та двох працюючих трансформаторах.

При одному працюючому трансформаторі математичні очікування втрат напруги по плечах живлення становлять: $m_1=4976$ В, $m_2 = 2787$ В, $s_1=2985$ В, $s_2=2816$ В при перекосі напруг по плечах живлення в режимі максимального навантаження $\approx 2,4$ кВ.

Включення другого трансформатора на паралельну роботу істотно поліпшує режим напруги, тому що в цьому випадку втрати напруги по плечах живлення складуть: $m_1 = 2488$ В, $m_2 = 1393$ В, $s_1 = 1492$ В, $s_2 = 1408$ В, тобто при перекосі напруг у режимі максимального навантаження $\approx 1,2$ кВ. Зменшення

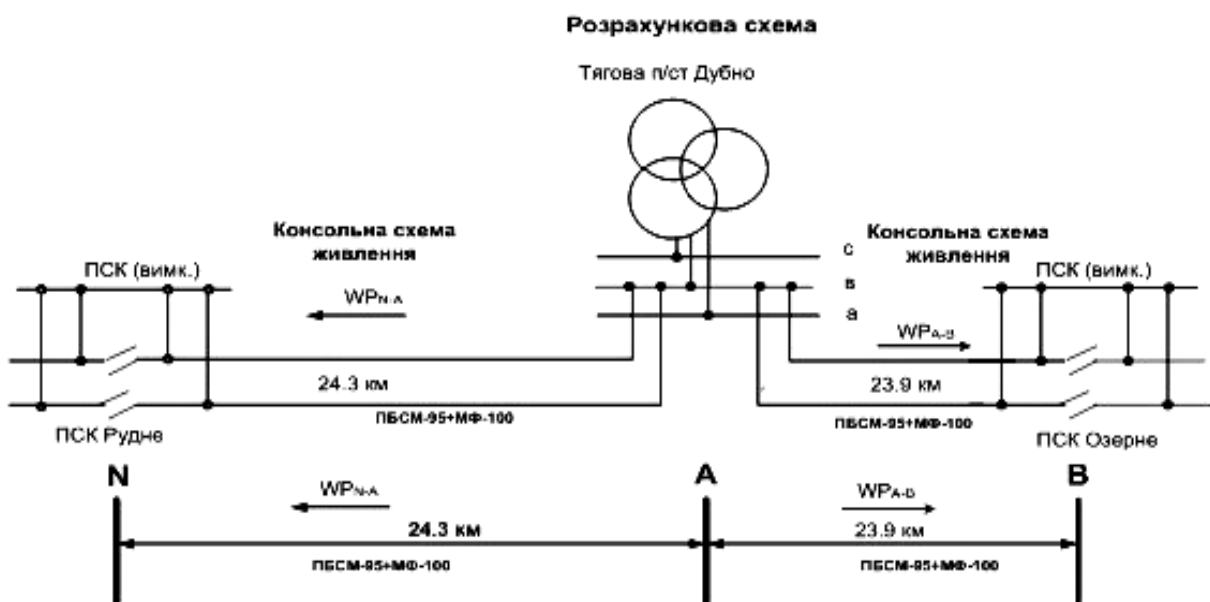


Рис.1 Розрахункова схема тягової підстанції "Д" Львівської залізниці

Характеристики розрахункової тягової підстанції

Назви параметрів і розрахункових величин	Одиниця виміру	Назви діляниць тягової мережі	
		ПСК "Р" – "Д"	"Д" – "О" (ПСК)
		N – A	A – B
Довжина діляниці	км	24,3	23,9
Тип контактної підвіски		ПБСМ-95+МФ-100	ПБСМ-95+МФ-100
Схема живлення діляниці		Двоколійна консоль	Двоколійна консоль
Активний опір тягової мережі	Ом/км	0,182	0,182
Активний опір тягової мережі при консольному роздільному живленні колій	Ом	4,4226	4,3498
Кількість пар поїздів в добу на діляниці		45	45
Витрати ел.енергії на тягу поїздів на тяговій підстанції "Д"	тис. кВт·год	3325,30	

перекошу напруг по плечах живлення полегшує роботу системи регулювання напруги під навантаженням, а значне зниження втрат напруги зменшує необхідне число перемикачів цієї системи.

Висновки

1. Включення другого трансформатора на паралельну роботу істотно поліпшує режим напруги, зменшується перекис напруг.
2. Статистична лінеаризація вносить малу похибку через те, що нелінійна функція кута змінюється у вузьких межах, а функція струму, що змінюється в широких межах, входить у вихідні формули лінійно.

Список літератури

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2005 році. – К.: Державна адміністрація залізничного транспорту, 2006. – 202 с.
2. Кузнецов В.Г. Критерии оптимальной параллельной работы силовых трансформаторов для тяговых подстанций / Вісн. Приазов. держ. техн. ун. – 2008 – № 18. – Ч.2. С.35-39.
3. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.
4. Мамошин Р. Р., Зимакова А. Н. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1980. – 296 с.
5. Карякин Р. Н. Тяговые сети переменного тока. – М.:Транспорт, 1987. – 279с.