

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ПОДІЛЬНИКУ ВИСОКОЇ НАПРУГИ В СХЕМІ КАСКАДУ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Бржезицький В.О., д.т.н., проф., Десятов О.М., інженер., Клименко О.С., Манзуля Р.О., студенти

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра техніки і електрофізики високих напруг

Вступ. В сучасних умовах важливим питанням є дослідження та зменшення втрат електроенергії в високовольтних установках, що мають різне застосування. У попередніх роботах [1, 2] розглядалось питання дослідження режимів каскадних генераторів постійного струму з нелінійним навантаженням, а також пульсацій напруги в установках подібного типу. Дослідження режимів високовольтних каскадних установок постійного струму звичайно виконуються наближеними методами [3] у допущенні незмінності їх параметрів у часі (лінійне наближення). В [4] визначене питання втрат електроенергії в схемі каскаду з нелінійним навантаженням, що є актуальним.

Мета роботи. Використовуючи наведені в [2] схему живлення типової каскадної установки високої напруги постійного струму та метод визначення втрат електроенергії, наведений в [4], запропонувати аналітичні вирази для втрат електроенергії в подільнику високої напруги установки [2].

Матеріали і результати дослідження. В зазначеній вище установці присутній подільник високої напруги, який має втрати P_1 . Загальний вираз для визначення даної величини:

$$P_1 = f \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{[U_H(t)]^2}{R_{ПН}} dt + f \cdot \int_{t_2}^{T+t_1} \frac{[U_H(t)]^2}{R_{ПН}} dt, \quad (1)$$

де $U_H = U_0 + I_0 \cdot r + \Delta U(t)$.

Для першого періоду часу $t_1 \leq t \leq t_2$, $\Delta U_1(t)$ має вигляд:

$$\Delta U_1(t) = A_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \Delta U_{усталене}. \quad (2)$$

Для другого періоду часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$, $\Delta U_2(t)$ має вигляд:

$$\Delta U_2(t) = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot (t - t_2)} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot (t - t_2)} + \Delta U_{усталене}. \quad (3)$$

Перетворимо вираз (1) до виду:

$$R_{ПН} \cdot P_1 = \int_{t_1}^{t_2} [\Delta U_1(t) + V_0]^2 dt + \int_{t_2}^{T+t_1} [\Delta U_2(t) + V_0]^2 dt, \quad (4)$$

де $V_0 = U_0 + I_0 \cdot r$.

Запишемо формулу (4) з урахуванням (2), (3) та проведемо математичні операції для подальшого інтегрування його членів:

$$\begin{aligned}
R_{\text{ПН}} \cdot P_1 = & \int_{t_1}^{t_2} \left[(V_0')^2 + (A_3)^2 \cdot \sin^2[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + (A_4)^2 \cdot e^{2 \cdot p_3 \cdot (t - t_1)} + (A_5)^2 \cdot e^{2 \cdot p_4 \cdot (t - t_1)} + \right. \\
& + 2 \cdot V_0' \cdot A_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + 2 \cdot V_0' \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + 2 \cdot V_0' \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \\
& + 2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + 2 \cdot A_3 \cdot A_5 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \\
& + 2 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot e^{(p_3 + p_4) \cdot (t - t_1)} \left. \right] dt + \int_{t_2}^{T + t_1} \left[(V_0')^2 + (A_1)^2 \cdot e^{2 \cdot p_1 \cdot (t - t_2)} + (A_2)^2 \cdot e^{2 \cdot p_2 \cdot (t - t_2)} + \right. \\
& + 2 \cdot V_0' \cdot A_1 \cdot e^{p_1 \cdot (t - t_2)} + 2 \cdot V_0' \cdot A_2 \cdot e^{p_2 \cdot (t - t_2)} + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot e^{(p_1 + p_2) \cdot (t - t_2)} \left. \right] dt, \quad (5)
\end{aligned}$$

де $V_0' = V_0 + \Delta U_{\text{усталенє}}$

Проведемо інтегрування кожного з членів представленого виразу для визначення втрат P_1 в подільнику високої напруги:

$$\begin{aligned}
R_{\text{ПН}} \cdot P_1 = & (V_0')^2 \cdot (t_2 - t_1) + (A_3)^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{4 \cdot \omega} \cdot [\sin(2 \cdot \psi)] - \right. \\
& - 2 \cdot \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \left. \right] + (A_4)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_3} \cdot [e^{2 \cdot p_3 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + \\
& + (A_5)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_4} \cdot [e^{2 \cdot p_4 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + 2 \cdot V_0' \cdot A_3 \cdot \left[\frac{\cos \psi}{\omega} - \frac{\cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]}{\omega} \right] + \\
& + 2 \cdot V_0' \cdot A_4 \cdot \frac{1}{p_3} \cdot [e^{p_3 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + 2 \cdot V_0' \cdot A_5 \cdot \frac{1}{p_4} \cdot [e^{p_4 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + \\
& + 2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \frac{1}{\omega \cdot e^{\frac{p_3 \cdot \psi}{\omega}}} \cdot \left[e^{\frac{p_3}{\omega} [\omega(t_2 - t_1) + \psi]} \times \right. \\
& \times \frac{\frac{p_3}{\omega} \cdot \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]}{\left(\frac{p_3}{\omega}\right)^2 + 1} - e^{\frac{p_3 \cdot \psi}{\omega}} \cdot \frac{\frac{p_3}{\omega} \cdot \sin \psi - \cos \psi}{\left(\frac{p_3}{\omega}\right)^2 + 1} \left. \right] + \\
& + 2 \cdot A_3 \cdot A_5 \cdot \frac{1}{\omega \cdot e^{\frac{p_4 \cdot \psi}{\omega}}} \cdot \left[e^{\frac{p_4}{\omega} [\omega(t_2 - t_1) + \psi]} \times \right. \\
& \times \frac{\frac{p_4}{\omega} \cdot \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] - \cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]}{\left(\frac{p_4}{\omega}\right)^2 + 1} - e^{\frac{p_4 \cdot \psi}{\omega}} \cdot \frac{\frac{p_4}{\omega} \cdot \sin \psi - \cos \psi}{\left(\frac{p_4}{\omega}\right)^2 + 1} \left. \right] + \\
& + 2 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \frac{1}{p_3 + p_4} \cdot [e^{(p_3 + p_4) \cdot (t_2 - t_1)} - 1] +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (V_0')^2 \cdot (T + t_1 - t_2) + (A_1)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_1} \cdot [e^{2 \cdot p_1 \cdot (T+t_1-t_2)} - 1] + \\
& + (A_2)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_2} \cdot [e^{2 \cdot p_2 \cdot (T+t_1-t_2)} - 1] + 2 \cdot V_0' \cdot A_1 \cdot \frac{1}{p_1} \cdot [e^{p_1 \cdot (T+t_1-t_2)} - 1] + \\
& + 2 \cdot V_0' \cdot A_2 \cdot \frac{1}{p_2} \cdot [e^{p_2 \cdot (T+t_1-t_2)} - 1] + \\
& + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \frac{1}{p_1 + p_2} \cdot [e^{(p_1+p_2) \cdot (T+t_1-t_2)} - 1]. \tag{6}
\end{aligned}$$

Застосовуючи отриманий вираз (6), проведемо розрахунок потужності втрат електроенергії в подільнику високої напруги в схемі каскаду з нелінійним навантаженням для режиму 1 кВ з використанням даних [2]:

$$\begin{aligned}
V_0 &= U_0 + I_0 \cdot r = 1000 \text{ В}, \quad I_0 = 0,005 \text{ А}, \quad R_{\text{ПН}} = 1,2 \cdot 10^7 \text{ Ом}, \quad r = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом}, \\
\Delta U_{\text{усталене}} &= -56,267 \text{ В}, \quad \psi = -0,233 \text{ рад.}, \quad t_1 = 1,985 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \quad t_2 = 3,267 \cdot 10^{-3} \text{ с}, \\
p_1 &= -7,754 \text{ 1/с}, \quad p_2 = -1,264 \cdot 10^3 \text{ 1/с}, \quad p_3 = -3,246 \text{ 1/с}, \quad p_4 = -1,264 \cdot 10^3 \text{ 1/с}, \\
A_1 &= 60,811 \text{ В}, \quad A_2 = -4,304 \text{ В}, \quad A_3 = 20,804 \text{ В}, \quad A_4 = 52,185 \text{ В}, \quad A_5 = 5,221 \text{ В}.
\end{aligned}$$

Підставивши вказані значення та провівши відповідні розрахунки, отримаємо значення потужності втрат електроенергії в подільнику напруги для режиму установки [2] з номінальною напругою 1000 В:

$$P_1 = 0,083 \text{ Вт.}$$

Висновки: Визначене поняття потужності втрат електроенергії у вимірювальному пристрої – подільнику напруги високовольтного генератора з урахуванням пульсацій напруги та струму.

Одержаний аналітичний вираз для розрахунку втрат електроенергії у високовольтному подільнику напруги каскадного генератора з нелінійним навантаженням.

Перелік посилань

1. Бржезицький В. О., Вендичанський Р. В., Десятов О. М., Гаран Я. О. Обґрунтування вибору стабілітронів і режимів електроживлення еталонних установок високої напруги постійного струму // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 1. – С. 7-13.
2. Бржезицький В. О., Десятов О. М., Сулейманов В. М., Хомініч В. І. Аналіз пульсацій високовольтного каскадного генератора напруги постійного струму // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 1/1 (21). – С. 56-61.
3. Бржезицький В. О. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посібник / В. О. Бржезицький, А. В. Ісакова, В. В. Рудаков та ін.; за ред. В. О. Бржезицького, В. М. Михайлова. – Х.: Торнадо. – 2005. – С. 514-580.
4. Бржезицький В. О., Десятов О. М., Бакало В. Р. Втрати електроенергії в схемі каскаду високої напруги з нелінійним навантаженням // Міжнародний науково-технічний журнал «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – 2017.