

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

Бржезицький В.О., д.т.н., проф., Десятов О.М., інженер., Копилець В.Р., студент

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

Вступ. Каскадні генератори напруги мають широке застосування в різноманітних високовольтних установках [1]. В роботах [2, 3] вперше досліджувались режими роботи високовольтних каскадних генераторів з нелінійним навантаженням. В [4] запропоноване загальне рішення для визначення коефіцієнта корисної дії каскадного генератора та втрат електроенергії в елементах його схеми.

Мета роботи. Використовуючи наведену в [3] схему живлення типової каскадної установки високої напруги постійного струму та метод визначення втрат електроенергії, наведений в [4], одержати аналітичні вирази для втрат електроенергії в нелінійних елементах каскаду – колоні стабілітронів.

Матеріали і результати дослідження. Згідно [4], потужність втрат електроенергії в нелінійних елементах каскаду має вираз:

$$P_2 = f \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left[U_0 + I_0 \cdot r + \Delta U_{3P}(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta U_{3P}(t)}{R_\delta + r} + I_0 \right] dt + f \cdot \int_{t_2}^{T+t_1} \left[U_0 + I_0 \cdot r + \Delta U_{PH}(t) \right] \cdot \left[\frac{\Delta U_{PH}(t)}{R_\delta + r} + I_0 \right] dt, \quad (1)$$

де U_0 , I_0 , r , R_δ – параметри схеми та $\Delta U_{3P}(t)$, $\Delta U_{PH}(t)$ пульсації напруги в навантаженні каскаду.

Для першого періоду часу $t_1 \leq t \leq t_2$, $\Delta U_{3P}(t)$ має вираз [4]:

$$\Delta U_{3P}(t) = A_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \Delta U_{усталене} \quad (2)$$

Для другого періоду часу $t_2 \leq t \leq T + t_1$, $\Delta U_{PH}(t)$ має вигляд:

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

Перетворимо вираз (1) з урахуванням (2, 3) до виду:

$$P_2 = \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 \cdot I_0 + \Delta U_{3P}(t) \cdot \left(I_0 + \frac{V_0}{R_\delta + r} \right) + (\Delta U_{3P}(t))^2 \cdot \frac{1}{R_\delta + r} \right] dt +$$

$$+ \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 \cdot I_0 + \Delta U_{\text{ПН}}(t) \cdot \left(I_0 + \frac{V_0}{R_0 + r} \right) + (\Delta U_{\text{ПН}}(t))^2 \cdot \frac{1}{R_0 + r} \right] dt, \quad (4)$$

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:

$$\begin{aligned} P_2 = & \int_{t_1}^{t_2} \left[V_0 \cdot I_0 + V_0' \cdot \left[A_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \Delta U_{\text{усталене}} \right] + \right. \\ & + V_0'' \cdot \left[(A_3)^2 \cdot \sin^2[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + (A_4)^2 \cdot e^{2 \cdot p_3 \cdot (t - t_1)} + (A_5)^2 \cdot e^{2 \cdot p_4 \cdot (t - t_1)} + (\Delta U_{\text{усталене}})^2 + \right. \\ & + 2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + 2 \cdot A_3 \cdot A_5 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \\ & + 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + 2 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot e^{(p_3 + p_4) \cdot (t - t_1)} + \\ & \left. \left. + 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} \right] \right] dt + \\ & + \int_{t_2}^{T+t_1} \left[V_0 \cdot I_0 + V_0' \cdot \left[A_1 \cdot e^{p_1 \cdot (t - t_2)} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot (t - t_2)} + \Delta U_{\text{усталене}} \right] + \right. \\ & + V_0'' \cdot \left[(A_1)^2 \cdot e^{2 \cdot p_1 \cdot (t - t_2)} + (A_2)^2 \cdot e^{2 \cdot p_2 \cdot (t - t_2)} + (\Delta U_{\text{усталене}})^2 + 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot e^{(p_1 + p_2) \cdot (t - t_2)} + \right. \\ & \left. \left. + 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_1 \cdot e^{p_1 \cdot (t - t_2)} + 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_2 \cdot e^{p_2 \cdot (t - t_2)} \right] \right] dt, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{де } V_0' = I_0 + \frac{V_0}{R_0 + r},$$

$$V_0'' = \frac{1}{R_0 + r}.$$

Проведемо інтегрування кожного з членів представленого виразу та одержимо формулу для потужності втрат в нелінійних елементах каскаду у вигляді:

$$P_2 = V_0 \cdot I_0 \cdot (t_2 - t_1) + V_0' \cdot A_3 \cdot \left[\frac{\cos \psi}{\omega} - \frac{\cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]}{\omega} \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + V_0' \cdot A_4 \cdot \frac{1}{p_3} \cdot [e^{p_3(t_2-t_1)} - 1] + V_0' \cdot A_5 \cdot \frac{1}{p_4} \cdot [e^{p_4(t_2-t_1)} - 1] + \\
& \quad + V_0' \cdot \Delta U_{усталене} \cdot (t_2 - t_1) + \\
& + V_0'' \cdot (A_3)^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{4 \cdot \omega} \cdot [\sin(2 \cdot \psi)] - \sin 2[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \right] + \\
& + V_0'' \cdot (A_4)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_3} \cdot [e^{2 \cdot p_3(t_2-t_1)} - 1] + V_0'' \cdot (A_5)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_4} \cdot [e^{2 \cdot p_4(t_2-t_1)} - 1] + \\
& + V_0'' \cdot \Delta U_{усталене} \cdot (t_2 - t_1) + V_0'' \cdot 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. \\
& \quad \left. \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} \right] + \\
& \quad + V_0'' \cdot 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. \\
& \quad \left. \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} \right] + \\
& + V_0'' \cdot 2 \cdot \Delta U_{усталене} \cdot A_3 \cdot \left[\frac{\cos \psi}{\omega} - \frac{\cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]}{\omega} \right] + \\
& \quad + V_0'' \cdot 2 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \frac{1}{p_3 + p_4} \cdot [e^{(p_3+p_4)(t_2-t_1)} - 1] + \\
& + V_0'' \cdot 2 \cdot \Delta U_{усталене} \cdot A_4 \cdot \frac{1}{p_3} \cdot [e^{p_3(t_2-t_1)} - 1] + V_0'' \cdot 2 \cdot \Delta U_{усталене} \cdot A_5 \cdot \frac{1}{p_4} \cdot [e^{p_4(t_2-t_1)} - 1] + \\
& \quad + V_0 \cdot I_0 \cdot (T + t_1 - t_2) + V_0' \cdot A_1 \cdot \frac{1}{p_1} \cdot [e^{p_1(T+t_1-t_2)} - 1] + \\
& + V_0' \cdot A_2 \cdot \frac{1}{p_2} \cdot [e^{p_2(T+t_1-t_2)} - 1] + V_0' \cdot \Delta U_{усталене} \cdot (T + t_1 - t_2) + \\
& \quad + V_0'' \cdot (A_1)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_1} \cdot [e^{2 \cdot p_1(T+t_1-t_2)} - 1] + \\
& + V_0'' \cdot (A_2)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_2} \cdot [e^{2 \cdot p_2(T+t_1-t_2)} - 1] + V_0'' \cdot (\Delta U_{усталене})^2 \cdot (T + t_1 - t_2) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + V_0'' \cdot 2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \frac{1}{p_1 + p_2} \cdot \left[e^{(p_1 + p_2)(T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
& + V_0'' \cdot 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_1 \cdot \frac{1}{p_1} \cdot \left[e^{p_1(T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
& + V_0'' \cdot 2 \cdot \Delta U_{\text{усталене}} \cdot A_2 \cdot \frac{1}{p_2} \cdot \left[e^{p_2(T + t_1 - t_2)} - 1 \right] \quad (6)
\end{aligned}$$

Застосовуючи отриманий вираз (6), проведемо розрахунок потужності втрат електроенергії в колоні стабілітронів в схемі каскаду з нелінійним навантаженням для режиму 1 кВ з використанням даних [3]:

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

Підставивши вказані значення та провівши відповідні розрахунки за виразом (6), отримаємо значення потужності втрат електроенергії в колоні стабілітронів для режиму установки [3] з номінальною напругою 1000 В:

$$P_2 = 5,024 \text{ Вт.}$$

Висновки: Вперше визначене поняття втрат електроенергії у колоні стабілітронів каскадного генератора з урахуванням пульсацій напруги та струму.

Одержаний аналітичний вираз для розрахунку потужності втрат електроенергії в нелінійних елементах високовольтного каскадного генератора.

Перелік посилань

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Бржезицький В. О., Десятов О. М., Бакало В. Р. Втрати електроенергії в схемі каскаду високої напруги з нелінійним навантаженням // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики». – 2017.