

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В АКТИВНОМУ ОПОРІ ФІЛЬТРА В СХЕМІ КАСКАДУ ВИСОКОЇ НАПРУГИ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Бржезицький В.О., д.т.н., проф., Десятов О.М., інженер., Корнєв В.С., Бакало В.Р., студенти

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

Вступ. Каскадні генератори високої напруги застосовуються у електротехнічних пристроях та технологічних процесах, пов'язаних з використанням сильних електростатичних полів та енергії джерел високої напруги [1]. У зв'язку з цим питання дослідження режимів роботи високовольтних каскадних генераторів з нелінійним навантаженням є актуальним [2, 3]. Для визначення коефіцієнта корисної дії каскадного генератора [2, 3] необхідно отримати загальні вирази потужності втрат електроенергії в елементах його схеми [4].

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 активному опорі фільтра каскаду.

Матеріали і результати дослідження. Згідно [4], потужність втрат електроенергії в активному опорі фільтру каскаду розраховується за виразом:

$$P_3 = f \cdot \int_{t_1}^{t_2} [(i_{\phi(3P)})^2 \cdot R_{\phi}] dt + f \cdot \int_{t_2}^{T+t_1} [(i_{\phi(ПН)})^2 \cdot R_{\phi}] dt, \quad (1)$$

де $i_{\phi(3P)}$; $i_{\phi(ПН)}$ залежності струму фільтра i_{ϕ} у часі, відповідно, у період зарядження $t_1 \leq t \leq t_2$ та у період перерозподілу напруги $t_2 \leq t \leq T + t_1$ та мають наступний вигляд:

$$i_{\phi(3P)} = I_0 + \frac{U_0 + I_0 \cdot r}{R_{ПН}} + \Delta U_{3P}(t) \cdot \left(\frac{1}{R_{ПН}} + \frac{1}{R_{\phi} + r} \right) + C_3 \cdot \frac{d\Delta U_{3P}(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$i_{\phi(ПН)} = I_0 + \frac{U_0 + I_0 \cdot r}{R_{ПН}} + \Delta U_{ПН}(t) \cdot \left(\frac{1}{R_{ПН}} + \frac{1}{R_{\phi} + r} \right) + C_3 \cdot \frac{d\Delta U_{ПН}(t)}{dt}. \quad (3)$$

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

$$\Delta U_{3P}(t) = A_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_1) + \psi] + A_4 \cdot e^{p_3 \cdot (t - t_1)} + A_5 \cdot e^{p_4 \cdot (t - t_1)} + \Delta U_{усталене}. \quad (4)$$

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

$$\Delta U_{\text{ПН}}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot (t-t_2)} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot (t-t_2)} + \Delta U_{\text{устален}} \quad (5)$$

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

$$P_3 = f \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left[\left(I_0' + \Delta U_{3P}(t) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_0 + r} \right) + C_3 \cdot \frac{d\Delta U_{3P}(t)}{dt} \right)^2 \cdot R_\phi \right] dt +$$

$$+ f \cdot \int_{t_2}^{T+t_1} \left[\left(I_0' + \Delta U_{\text{ПН}}(t) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_0 + r} \right) + C_3 \cdot \frac{d\Delta U_{\text{ПН}}(t)}{dt} \right)^2 \cdot R_\phi \right] dt, \quad (6)$$

$$\text{де } I_0' = I_0 + \frac{U_0 + I_0 \cdot r}{R_{\text{ПН}}}.$$

Запишемо формулу (1) з урахуванням (2) - (5) та проведемо математичні операції для інтегрування її членів:

$$\frac{P_3}{R_\phi \cdot f} = \int_{t_1}^{t_2} \left[I_0'' + X_1 \cdot \sin[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + A_3 \cdot \omega \cdot C_3 \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + \right.$$

$$\left. + X_2 \cdot e^{p_3 \cdot (t-t_1)} + X_3 \cdot e^{p_4 \cdot (t-t_1)} \right]^2 dt + \int_{t_2}^{T+t_1} \left[I_0'' + X_4 \cdot e^{p_1 \cdot (t-t_2)} + X_5 \cdot e^{p_2 \cdot (t-t_2)} \right]^2 dt =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} \left[\left(I_0'' \right)^2 + (X_1)^2 \cdot \sin^2[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + (A_3 \cdot \omega \cdot C_3)^2 \cdot \cos^2[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + \right.$$

$$\left. + (X_2)^2 \cdot e^{2 \cdot p_3 \cdot (t-t_1)} + (X_3)^2 \cdot e^{2 \cdot p_4 \cdot (t-t_1)} + 2 \cdot I_0'' \cdot X_1 \cdot \sin[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot I_0'' \cdot A_3 \cdot \omega \cdot C_3 \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + 2 \cdot I_0'' \cdot X_2 \cdot e^{p_3 \cdot (t-t_1)} + 2 \cdot I_0'' \cdot X_3 \cdot e^{p_4 \cdot (t-t_1)} + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot X_1 \cdot \sin[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] \cdot A_3 \cdot \omega \cdot C_3 \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \sin[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] \cdot e^{p_3 \cdot (t-t_1)} + 2 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot \sin[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] \cdot e^{p_4 \cdot (t-t_1)} + \right.$$

$$\left. + 2 \cdot A_3 \cdot \omega \cdot C_3 \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] \cdot X_2 \cdot e^{p_3 \cdot (t-t_1)} + \right.$$

$$\left. 2 \cdot A_3 \cdot \omega \cdot C_3 \cdot \cos[\omega \cdot (t-t_1) + \psi] \cdot X_3 \cdot e^{p_4 \cdot (t-t_1)} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot e^{(p_3+p_4)(t-t_1)} \Big] dt + \int_{t_2}^{T+t_1} \left[(I_0'')^2 + (X_4)^2 \cdot e^{2 \cdot p_1 \cdot (t-t_2)} + (X_5)^2 \cdot e^{2 \cdot p_2 \cdot (t-t_2)} + \right. \\
& \left. + 2 \cdot I_0'' \cdot X_4 \cdot e^{p_1 \cdot (t-t_2)} + 2 \cdot I_0'' \cdot X_5 \cdot e^{p_2 \cdot (t-t_2)} + 2 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot e^{(p_1+p_2)(t-t_2)} \right] dt, \quad (7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{де } I_0'' &= I_0' + \Delta U_{\text{усталене}} \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_{\text{д}} + r} \right), \quad X_1 = A_3 \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_{\text{д}} + r} \right), \\
X_2 &= A_4 \cdot \left(p_3 \cdot C_3 + \frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_{\text{д}} + r} \right), \quad X_3 = A_5 \cdot \left(p_4 \cdot C_3 + \frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_{\text{д}} + r} \right), \\
X_4 &= A_1 \cdot \left(p_1 \cdot C_3 + \frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_{\text{д}} + r} \right), \quad X_5 = A_2 \cdot \left(p_2 \cdot C_3 + \frac{1}{R_{\text{ПН}}} + \frac{1}{R_{\text{д}} + r} \right).
\end{aligned}$$

Проведемо інтегрування кожного з членів представленого виразу та одержимо формулу для потужності втрат в активному опорі фільтра каскаду у вигляді:

$$\begin{aligned}
\frac{P_3}{R_{\phi} \cdot f} &= (I_0'')^2 \cdot (t_2 - t_1) + (X_1)^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{4 \cdot \omega} \cdot [\sin(2 \cdot \psi)] - \sin 2[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] \right] + \\
& + (A_3 \cdot \omega \cdot C_3)^2 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{1}{4 \cdot \omega} \cdot [\sin 2[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]] - \sin(2 \cdot \psi) \right] + \\
& + (X_2)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_3} \cdot [e^{2 \cdot p_3 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + (X_3)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_4} \cdot [e^{2 \cdot p_4 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + \\
& + 2 \cdot I_0'' \cdot X_1 \cdot \left[\frac{\cos \psi}{\omega} - \frac{\cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]}{\omega} \right] + 2 \cdot I_0'' \cdot A_3 \cdot C_3 \times \\
& \times [\sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] - \sin(\psi)] + 2 \cdot I_0'' \cdot X_2 \cdot \frac{1}{p_3} \cdot [e^{p_3 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + \\
& + 2 \cdot I_0'' \cdot X_3 \cdot \frac{1}{p_4} \cdot [e^{p_4 \cdot (t_2 - t_1)} - 1] + 2 \cdot X_1 \cdot A_3 \cdot C_3 \cdot \frac{1}{4} \times \\
& \times [\cos(2 \cdot \psi) - \cos 2[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]] + 2 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot \frac{1}{\omega \cdot e^{\frac{p_3 \cdot \psi}{\omega}}} \cdot \left[e^{\frac{p_3}{\omega} [\omega(t_2 - t_1) + \psi]} \times \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left. \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 + 2 \cdot X_1 \cdot X_3 \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 \left. \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] + \\
& \quad + 2 \cdot X_2 \cdot A_3 \cdot C_3 \cdot \frac{1}{e^{\frac{p_3 \cdot \psi}{\omega}}} \cdot \left[e^{\frac{p_3}{\omega} [\omega(t_2 - t_1) + \psi]} \cdot \frac{P_3}{\omega} \cdot [\cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] + \right. \\
& \quad \left. + \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]] - e^{\frac{p_3 \cdot \psi}{\omega}} \cdot \left(\frac{P_3}{\omega} \cdot \cos \psi + \sin \psi \right) \right] + \\
& \quad + 2 \cdot X_3 \cdot A_3 \cdot C_3 \cdot \frac{1}{e^{\frac{p_4 \cdot \psi}{\omega}}} \cdot \left[e^{\frac{p_4}{\omega} [\omega(t_2 - t_1) + \psi]} \cdot \frac{P_4}{\omega} \cdot [\cos[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi] + \right. \\
& \quad \left. + \sin[\omega \cdot (t_2 - t_1) + \psi]] - e^{\frac{p_4 \cdot \psi}{\omega}} \cdot \left(\frac{P_4}{\omega} \cdot \cos \psi + \sin \psi \right) \right] + \\
& \quad + 2 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \frac{1}{p_3 + p_4} \cdot \left[e^{(p_3 + p_4)(t_2 - t_1)} - 1 \right] + (I_0'')^2 \cdot (T + t_1 - t_2) + \\
& \quad + (X_4)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_1} \cdot \left[e^{2 \cdot p_1 \cdot (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + (X_5)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot p_2} \cdot \left[e^{2 \cdot p_2 \cdot (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
& \quad + 2 \cdot I_0'' \cdot X_4 \cdot \frac{1}{p_1} \cdot \left[e^{p_1 \cdot (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + 2 \cdot I_0'' \cdot X_5 \cdot \frac{1}{p_2} \cdot \left[e^{p_2 \cdot (T + t_1 - t_2)} - 1 \right] + \\
& \quad + 2 \cdot X_4 \cdot X_5 \cdot \frac{1}{p_1 + p_2} \cdot \left[e^{(p_1 + p_2)(T + t_1 - t_2)} - 1 \right]. \tag{8}
\end{aligned}$$

Застосовуючи отриманий вираз (8), проведемо розрахунок потужності втрат електроенергії в активному опорі фільтра схеми каскаду з нелінійним навантаженням для режиму 1 кВ з використанням даних [3]:

$$V_0 = U_0 + I_0 \cdot r = 1000 \text{ В}, I_0 = 0,005 \text{ А}, R_{\text{ПН}} = 1,2 \cdot 10^7 \text{ Ом}, r = 1 \cdot 10^4 \text{ Ом},$$

$$\Delta U_{\text{усталене}} = -56,267 \text{ В}, \psi = -0,233 \text{ рад.}, t_1 = 1,985 \cdot 10^{-3} \text{ с}, t_2 = 3,267 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$p_1 = -7,754 \text{ 1/с}, p_2 = -1,264 \cdot 10^3 \text{ 1/с}, p_3 = -3,246 \text{ 1/с}, p_4 = -1,264 \cdot 10^3 \text{ 1/с},$$

$$A_1 = 60,811 \text{ В}, A_2 = -4,304 \text{ В}, A_3 = 20,804 \text{ В}, A_4 = 52,185 \text{ В}, A_5 = 5,221 \text{ В}.$$

Підставивши вказані значення та провівши відповідні розрахунки за виразом (8), отримаємо значення потужності втрат електроенергії в активному опорі фільтра для режиму установки [3] з номінальною напругою 1000 В:

$$P_3 = 40,55 \text{ Вт}.$$

Співставивши, значення потужності втрат в активному опорі фільтра та інші складові потужностей, наведених в [4], визначимо коефіцієнт корисної дії каскадної установки високої напруги:

$$ККД = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вих}} + P_3} = \frac{P_1 + P_2}{P_1 + P_2 + P_3} = \frac{1}{1 + \frac{P_3}{P_1 + P_2}},$$

що визначає ККД для установки [4]:

$$ККД(\%) = 11,65\%.$$

Висновки: Визначене поняття втрат електроенергії у опорі фільтра каскадного генератора з урахуванням пульсацій напруги та струму.

Одержаний аналітичний вираз для розрахунку потужності втрат електроенергії в активному опорі фільтра, що використовується в схемі каскаду високої напруги з нелінійним навантаженням.

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.