

Оценка уровней дуговых перенапряжений в кабельной электрической сети 6-10 кВ

Кабаков А.Л.

Белорусский национальный технический университет

На рис. 1 представлена схема замещения электрической сети с основными параметрами, определяющими характер протекания переходных процессов при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ).

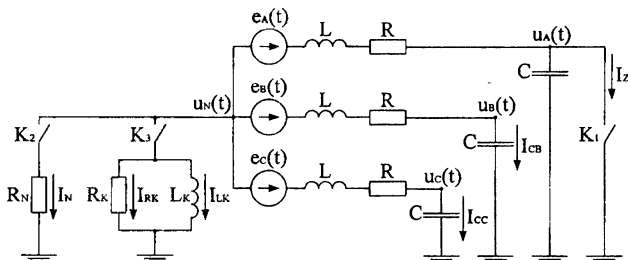


Рис. 1. Упрощённая схема электрической сети для оценки
уровня дуговых перенапряжений

При включённом ключе K_1 (моделирующим замыкание фаза «А» на землю) и в случае изолированной нейтрали (ключи K_2 и K_3 разомкнуты) процессы, протекающие в данной электрической цепи, могут быть описаны системой интергодифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 & -2 \int u_N(t) dt - \frac{3}{2\delta_1} u_N(t) + \int u_B(t) dt + \left(\frac{2\delta_1}{3\omega_1^2} + \frac{1}{2\delta_1} \right) u_B(t) + \frac{1}{3\omega_1^2} \frac{du_B(t)}{dt} + \\
 & + \int u_C(t) dt + \left(\frac{2\delta_1}{3\omega_1^2} + \frac{1}{2\delta_1} \right) u_C(t) + \frac{1}{3\omega_1^2} \frac{du_C(t)}{dt} = - \int e_A(t) dt \\
 & \int u_N(t) dt - \int u_B(t) dt - \frac{2\delta_1}{3\omega_1^2} u_B(t) - \frac{1}{3\omega_1^2} \frac{du_B(t)}{dt} = - \int e_B(t) dt \\
 & \int u_N(t) dt - \int u_C(t) dt - \frac{2\delta_1}{3\omega_1^2} u_C(t) - \frac{1}{3\omega_1^2} \frac{du_C(t)}{dt} = - \int e_C(t) dt
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\omega_1 = 1/\sqrt{3LC}$ - круговая частота собственных колебаний сети во время горения заземляющей дуги; $\delta_1 = R/2L$ - показатель затухания свободных колебаний.

Характеристическое уравнение системы (1):

$$(p^2 + 2\delta_1 p + \omega_1^2) \times (p^2 + 2\delta_1 p + 3\omega_1^2) = 0. \quad (2)$$

Корни данного уравнения умеют вид:

$$p_{1,2} = -\delta_1 \pm \sqrt{\delta_1^2 - \omega_1^2}, \quad p_{3,4} = -\delta_1 \pm \sqrt{\delta_1^2 - 3\omega_1^2}. \quad (3)$$

В большинстве случаев выполняются условия, при которых изменение свободной составляющей колебаний происходит по периодическому закону:

$$\delta_1 < \omega_1, \text{ или } R < 2\sqrt{\frac{L}{3C}} \text{ и } \delta_1 < \sqrt{3}\omega_1, \text{ или } R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4)$$

Таким образом, решение системы (1) можно записать в виде:

$$u_i(t) = u_{\omega i}(t) + A_{1i} e^{-\delta_1 t} \cdot \sin(\sqrt{\omega_1^2 - \delta_1^2} \cdot t + \varphi_{1i}) + A_{2i} e^{-\delta_1 t} \cdot \sin(\sqrt{3\omega_1^2 - \delta_1^2} \cdot t + \varphi_{2i}), \quad (5)$$

где $u_{\omega i}(t) = k_{\text{наиб.р}} \sqrt{2/3} U_{\text{ном}} \sin(\omega t + \varphi_i)$ - вынужденная составляющая колебаний, определяемая из расчёта установившегося режима; $k_{\text{наиб.р}} = 1.15$ - коэффициент, учитывающий допустимое превышение напряжения электрической сети относительно своего номинального значения; $i=A, B, C$ и N соответственно для каждой из фаз и нейтрали.

Постоянные интегрирования $A_{1i}, \varphi_{1i}, A_{2i}, \varphi_{2i}$ определяются на основании законов коммутации из начальных условий, т.е. зависят от характера горения заземляющей дуги.

На основании накопленного опыта асциллографирования сетей отмечено, что теория горения дуги Петерсена справедлива для малых токов замыкания на землю (до 5 А). Установленная Беляковым величина пика гашения, равная $0,4U_{\phi}$, была получена им экспериментально для сети 6 кВ. Распространение данного значения на сеть 10 кВ требует дополнительной экспериментальной проверки. Поскольку для кабельной электрической сети характерны значительные ёмкостные токи (десятки и сотни ампер), наиболее достоверной представляется теория Петерса и Слепяна.

Расчёты переходных процессов в цепи рис. 1 позволяют определить предельные значения перенапряжений, однако в реальных электрических сетях максимальные кратности будут меньшими. Факторы, ограничивающие перенапряжения, снижают амплитуду свободных колебаний, увеличивая их затухания; образуют пути стекания свободных зарядов в землю

при гашениях заземляющих дуг, снижая их начальное значение при повторных зажиганиям; уменьшают амплитуду квазиустановившейся составляющей. На рис. 2, 3 и 4 показано изменение напряжения фаз и нейтрали сети 10 кВ с различными способами рабочего заземления при ОЗЗ.

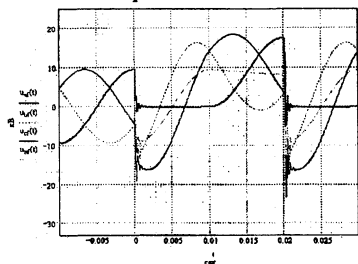


Рис. 2. Дуговые перенапряжения в сети с изолированной нейтралью (ключи K_2 и K_3 разомкнуты)

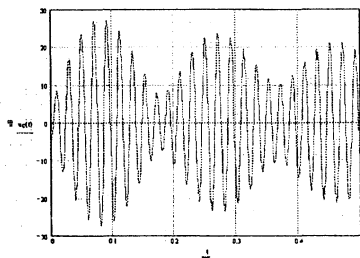


Рис. 3. Процесс биений в сети с компенсацией ёмкостных токов (ключ K_3 замкнут)

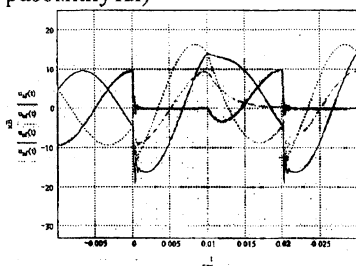


Рис. 4. Дуговые перенапряжения в сети с нейтралью, заземлённой через высокоомный резистор (ключ K_2 замкнут)

Как показали расчёты в реальных электрических сетях, комплексный учёт всех ограничивающих факторов приводит к снижению перенапряжений относительно их предельных значений на 20-30%. Перенапряжения в сети с изолированной нейтралью составили $2,5-2,7U_{ФМ}$; в сети с резистивным заземлением $1,9-2,1U_{ФМ}$. Уровень дуговых перенапряжений в сети с компенсацией ёмкостных токов зависит от настройки дугогасящей катушки и может превышать кратности, полученные для сети с изолированной нейтралью, достигая величины $3,0-3,2U_{ФМ}$.