

УДК 621.316.925

А.А. Лapidус (асп. каф. ЭСиАЭС)

## УВЕЛИЧЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ИХ НАГРЕВА ТОКОМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В связи с повышением установленных мощностей электрических станций, особенно острой является проблема обеспечения термической стойкости и пожаробезопасности кабельных коммуникаций в системе электроснабжения собственных нужд станции. Возникает необходимость точного определения температуры нагрева кабеля при протекании по нему тока короткого замыкания. В то же время, существующая нормативная методика, изложенная в циркуляре № Ц-02-98(Э) [1], имеет существенный недостаток: при определении температур нагрева жил кабелей не учитывается тепловой спад тока короткого замыкания, вызванный увеличением активного сопротивления кабеля из-за его нагрева.

Когда в электрической цепи имеется проводник, активное сопротивление которого составляет значительную часть полного сопротивления цепи, при прохождении по нему большого тока короткого замыкания нагрев проводника быстро возрастает. Последнее приводит к увеличению активного сопротивления проводника, что в свою очередь вызывает снижение тока.

Пусть проводник сечением  $q$  и длиной  $l$ , м, с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_{\theta_0}$  (при начальной температуре  $\theta_0$ ) и индуктивным сопротивлением  $x_l$ , Ом/м, присоединен через емкостное сопротивление  $x_c$ , Ом, к источнику ЭДС, напряжение которого  $U_{\phi}$  неизменно по амплитуде и частоте. При трехфазном коротком замыкании в конце этого проводника начальное значение периодической слагающей тока будет

$$I_{no} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{\left(\rho_{\theta_0} \frac{l}{q}\right)^2 + (x_c + x_l)^2}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{r_{\theta_0}^2 + x_{\Sigma}^2}}.$$

Дифференциальное уравнение теплового баланса для данного проводника, если рассматривать процесс его нагрева адиабатическим (ввиду кратковременности короткого замыкания), имеет вид

$$\left(\frac{U_{\phi}}{\sqrt{r_{\theta}^2 + x_{\Sigma}^2}}\right)^2 r_{\theta} dt = c \gamma q l d\theta, \quad (1)$$

где  $r_{\theta} = r_{\theta_0} \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0}$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника при  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $1/\text{град}$ ;  $c$  – средняя удельная теплоемкость материала,  $\text{Вт}\cdot\text{с}/\text{г}\cdot\text{град}$ ;  $\gamma$  – удельный вес материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

После разделения переменных ( $t$  и  $\theta$ ) в (1) и интегрирования в пределах от 0 до  $t$  и от  $\theta_0$  до  $\theta$ , получим зависимость между температурой проводника и временем его нагрева током короткого замыкания:

$$\Delta = \left( \frac{I_{n0}}{q} \right)^2 t = \frac{c\gamma}{\rho_{00}} \left\{ \frac{a}{1 + \alpha\theta_0} \left[ (\theta - \theta_0) + \frac{\alpha}{2} (\theta^2 - \theta_0^2) \right] + \frac{(1-a)(1 + \alpha\theta_0)}{\alpha} \ln \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0} \right\}, \quad (2)$$

где  $a = \frac{r_{\theta 0}^2}{r_{\theta 0}^2 + x_{\Sigma}^2}$ .

При температуре проводника  $\theta$  величина тока составляет

$$I_n = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{r_{\theta}^2 + x_{\Sigma}^2}} = \frac{U_{\phi} n_{\theta}}{\sqrt{r_{\theta 0}^2 + x_{\Sigma}^2}} = I_{n0} n_{\theta},$$

где  $n_{\theta} = \frac{I_n}{I_{n0}} = \frac{1}{\sqrt{a \left( \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta_0} \right)^2 + (1-a)}}$  – коэффициент, учитывающий тепловой спад тока;

$\theta = f(t)$  определяется из (2).

Из физической сущности явления и характера математических зависимостей следует, что тепловой спад тока короткого замыкания тем интенсивнее, чем больше плотность тока и продолжительность короткого замыкания, а также, чем большую долю составляет активное сопротивление данного проводника от общего сопротивления цепи короткого замыкания. Рассматриваемый фактор особенно сказывается в достаточно протяженных кабельных сетях.

Для проверки влияния эффекта теплового спада тока на расчетные конечные температуры жил кабелей необходимо выполнить расчеты для типовых энергоблоков. Ввиду сложности расчетных формул, учитывающих тепловой спад тока, целесообразно также выяснить, для какого диапазона сечений кабеля данным эффектом можно пренебречь.

Полученные результаты наглядно показывают необходимость учета теплового спада тока к.з. в случае принятия расчетной точки к.з. на некотором расстоянии от начала кабельной линии. Этот эффект наиболее сильно проявляется для кабелей с малым сечением жил и, соответственно, большим активным сопротивлением.

По результатам расчетов можно сделать следующие *выводы*:

1) При проверке силовых кабелей по условиям невозгорания рекомендации противоаварийного циркуляра Ц-02-98(Э) [1] справедливы при выборе расчетной точки к.з. в начале кабельной линии.

2) В случае выбора расчетной точки к.з. на некотором расстоянии от начала кабельной линии (20 м при  $U=0,4$  кВ и 50 м для  $U=6-10$  кВ) при неучете теплового спада тока к.з. возможна значительная погрешность в определении конечной температуры жил кабелей.

Область сечений жил кабелей, для которых неучет теплового спада тока к.з. не дает существенных погрешностей:

- на напряжении 6 кВ: сечения по алюминию 150 мм<sup>2</sup> и более, по меди 70 мм<sup>2</sup> и более;
- на напряжении 0,4 кВ: сечения по алюминию 95 мм<sup>2</sup> и более, по меди 70 мм<sup>2</sup> и более.

3) Необходимо обратить внимание на то, что увеличение активного сопротивления следует учитывать только для кабельной линии, по которой протекает ток к.з., и не нужно учитывать для остальных элементов системы электроснабжения, по которым протекает ток к.з. Например, для трансформатора ТСЗС-1000 его активное сопротивление много меньше индуктивного ( $r_T=0,0019$  Ом  $\ll$   $x_T=0,01265$  Ом – сопротивления приведены к ступени напряжения 0,4 кВ) и много меньше активного сопротивления участка кабельной линии длиной 20 м даже при сечении кабелей 95 мм<sup>2</sup> ( $r_k=0,039$  Ом для меди).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Циркуляр №Ц-02-98(Э) “О проверке кабелей на возгорание при воздействии тока короткого замыкания”. Департамент стратегии развития и научно-технической политики РАО ЕЭС “России”, СПО ОРГРЭС, 1998.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970.