

Инж. И. Д. КУТЯВИН.

ЖЕЛЕЗНЫЕ ТОКООГРАНИЧИТЕЛИ.

Ограничение токов короткого замыкания в маломощных ответвлениях, присоединенных к шинам с мощными источниками питания, является совершенно необходимым, так как оборудование таких ответвлений, рассчитанное на полный ток короткого замыкания, получается громоздким и дорогим по сравнению с тем, которое необходимо для номинальных токов.

Особенно остро стоит вопрос ограничения токов короткого замыкания в мощных установках низкого напряжения до 500 в, где эти токи могут также достигать чрезвычайно больших значений.

Применявшиеся до сих пор до напряжений 6 кв бетонные реакторы дороги, громоздки и ненадежны в эксплуатации. Практика эксплуатации Ленэнерго, Мосэнерго, Челябгрэс и Сталинской ТЭЦ показала, что бетонные реакторы не способны противостоять возникающим при авариях в сети перенапряжениям. Кроме того, эти реакторы почти совершенно не пригодны к установке в неотапливаемых помещениях, так как большая гигроскопичность бетона приводит во время короткого замыкания за реактором к перекрытию фазы по бетонной стойке.

Поэтому чрезвычайно большой интерес представляет вопрос ограничения токов короткого замыкания железными сопротивлениями (резисторами). Резисторы, нашедшие широкое распространение в Германии, строятся до 6 кв и обладают несравненно меньшими габаритами и стоимостью, чем реакторы. Принцип действия резисторов основан на увеличении сопротивления железа с повышением температуры нагрева.

Нормальной температурой при коротком замыкании принято считать 800—900° С, при этом увеличение сопротивления железа можно получить в 9—10 раз, в зависимости от качества железа. Из всех примесей железа наиболее значительное влияние на температурный коэффициент сопротивления оказывает углерод, с увеличением содержания которого температурный коэффициент уменьшается.

Существенную роль играют также форма и размеры сечения железа. У сравнительно толстых полос сильно сказывается вредное влияние скин-эффекта, поэтому рекомендуется брать железо ленточное, толщиной не более одного миллиметра.

В имеющейся литературе по данному вопросу теория расчета резисторов освещена сравнительно полно, но материал представлен в разбросанном и недостаточном обработанном виде; поэтому

пользование этим материалом представляет затруднения. Вследствие этого в задачу настоящей статьи входит дать полную и простую теорию теплового расчета резистора с учетом реактивности схемы и теорию расчета токов короткого замыкания в цепях с резисторами. Кроме того, в литературе до сих пор не появлялось никаких указаний о способе расчета на термическую устойчивость от токов короткого замыкания токоведущих частей в установках с резисторами; поэтому этот вопрос здесь также разработан достаточно полно.

1. Тепловой расчет резистора.

Величина начального сопротивления резистора ограничивается потерями мощности при номинальном режиме и обычно выражается в виде процентного падения напряжения от номинального тока ответвления к фазовому напряжению, т. е.

$$E_{rn} = \frac{r_n J_n}{E_{\phi}} 100,$$

где r_n —сопротивление резистора в омах при номинальном режиме. Потери в резисторе будут выражаться тем же процентом от общей пропускаемой резистором мощности

Рассмотрим теперь случай, когда резистор с процентным сопротивлением E_{rn} приключен к шинам станции. Если суммарной реактанс в процентах генераторов и трансформаторов, питающих шины, отнесенный к номинальному току ответвления, обозначим через E_x , то переходный ток короткого замыкания выразится в виде равенства:

$$J_k = \frac{J_n 100}{V E_x^2 + E_{rn}^2 (1 + \alpha \tau)^2} \dots \dots \dots (1)$$

где τ —температура нагрева резистора от тока короткого замыкания, а α —температурный коэффициент сопротивления резистора.

Так как время действия тока короткого замыкания мало, вследствие незначительных выдержек времени в схемах с резисторами (до 0,5—1 сек), то можно считать, что процесс нагрева резистора происходит адиабатически; тогда ур-е баланса энергии напишется в виде:

$$J_k^2 r dt = g c d\tau \dots \dots \dots (2)$$

где g —вес железа резистора на фазу, C —средняя теплоемкость железа в пределах 50—800°С (может быть принята равной $550 \frac{W}{kg \cdot c}$).

Если подставить J_k по ур-нию (1) и значение

$$r = r_n (1 + \alpha \tau) = \frac{E_{\phi} E_{rn}}{100 J_n} (1 + \alpha \tau),$$

то равенство (2) примет вид:

$$\frac{J_n E_{\phi} 100 E_{rn} (1 + \alpha \tau) dt}{E_x^2 + E_{rn}^2 (1 + \alpha \tau)^2} = g c d \tau.$$

Обозначив через $\psi = \frac{1000 g}{J_n E_{\phi}}$ вес железа на 1 КВА, $\delta = \frac{E_x}{E_{rn}}$ и разделив переменные, проинтегрируем предыдущее выражение в пределах $0 - t$ и $0 - \tau$

$$\frac{10^5 t}{\psi C E_{rn}} = \delta^2 \frac{1}{\alpha} \ln (1 + \alpha \tau) + [(1 + \alpha \tau)^2 - 1] \frac{1}{2 \alpha} \dots (3)$$

Из последнего равенства можно определить ψ , если положить $t = t_m$ — выдержке времени защиты отсечения и $\tau = \tau_m$ — нормально допустимой температуре нагрева железа резистора при коротком замыкании, а именно:

$$\psi = \frac{2 \alpha 10^5 t_m}{E_{rn} C \{ [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1] + \delta^2 \ln (1 + \alpha \tau_m)^2 \}} \dots (4a)$$

при $\alpha = 0,0091/^\circ C$, $\tau_m = 800^\circ C$ и $C = 550 \frac{\omega}{kg^\circ C}$

$$\psi = \frac{0,78 \frac{t_m}{E_{rn}}}{15,8 + \delta^2} \dots (4b)$$

На рис. 1 построены кривые $\psi = f\left(\frac{t_m}{E_{rn}}\right)$ для различных значений δ по ур-ю (4b).

Характер повышения температуры нагрева резистора при коротком. Для выяснения характера нарастания температуры нагрева железа резистора по времени протекания тока короткого замыкания подставим в у-ние (3) значение ψ из (4):

$$\frac{2 \alpha 10^5 t}{C E_{rn} 2 \alpha 10^5 t_m} = \delta^2 \ln (1 + \alpha \tau)^2 + [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1] \\ C E_{rn} \{ [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1] + \delta^2 \ln (1 + \alpha \tau_m)^2 \}$$

или

$$\delta^2 \ln (1 + \alpha \tau)^2 + [(1 + \alpha \tau)^2 - 1] = \frac{t}{t_m} \{ [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1] + \delta^2 \ln (1 + \alpha \tau_m)^2 \}. (5)$$

Решение этого ур-я относительно τ не представляется возможным, поэтому исследуем его графически. На рис. 2 построены кривые изменения температуры по времени в функции $\tau = f\left[\frac{t}{t_m}\right]$ для $\tau_m = 800^\circ C$, $\alpha = 0,0091/^\circ C$ и $\delta = 0,1$ и 2 .

Из сравнения кривых для отдельных значений δ можно заключить, что: 1) величина предельной передержки времени, в случае

отказа действия реле масляного выключателя, может быть допущена (1,5—2) t_m и ступенчатость выдержек времени реле должна быть подчинена этому значению и 2) с достаточной точностью для всех практических расчетов можно принять закон изменения температуры по времени из у-ния (5) в виде следующего простого выражения:

$$(1 + \alpha \tau)^2 = 1 + \frac{t}{t_m} [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1], \dots \dots \dots (6)$$

так как величина δ для маломощных фидеров мала, а из рис. 2 видно, что члены у-я (5) с множителем δ очень мало влияют на результат.

Размеры железа резистора. Длину и сечение железа резистора можно определить из следующих соотношений:

$$\psi = \frac{Sl\gamma}{E_\phi J_n} \dots \dots \dots (7)$$

$$E_{rn} = \frac{J_n \rho l}{E_\phi S} 100,$$

где S —сечение ленты в $мм^2$, l —длина ее в $м$, ρ —удельное сопротивление железа и γ —удельный вес в $кг/дм^3$.

Решая последние два равенства совместно, получим:

$$S = 10 J_n \sqrt{\frac{\psi \rho}{E_{rn} \gamma}} \quad мм^2 \dots \dots \dots (8)$$

$$l = 0,1 E_\phi \sqrt{\frac{\psi E_{rn}}{\rho \gamma}} \quad м,$$

где ψ по у-ю (4 в) или из рис. 1.

В начале было указано, что для избежания вредного влияния скин-эффекта толщина ленты железа должна быть не более 1 $мм$, но размеры сечения железа ограничены еще и максимально допустимой тепловой нагрузкой на поверхность ленты от номинального тока. Охлаждающая поверхность ленты может быть представлена в виде:

$$Q = 2 \frac{Sl}{1000 \delta} m^2,$$

где b —толщина ленты в $мм$, а потери мощности в резисторе на фазу

$$P = \frac{E_{rn}}{100} J_n E_\phi \text{ ватт.}$$

Тогда поверхностная тепловая нагрузка будет

$$p = \frac{P}{Q} = \frac{10 \delta E_{rn} E_\phi J_n}{2 Sl} \omega/м^2 \dots \dots \dots (9)$$

и не должна превосходить максимально допустимых значений, так как температура нагрева железа резистора от номинального тока оказалась бы высокой и сузился бы диапазон колебания температуры при коротком.

Заменим в выражении (9) S и l их значениями из (8), тогда получим, что

$$p = \frac{100 \nu E_{rn} E_{\phi} J_n}{2,10 J_n 0,1 E_{\phi} \sqrt{\frac{\psi^2 \rho E_{rn}}{\gamma^2 \rho E_{rn}}}}$$

или

$$p = \frac{5 \nu E_{rn} \gamma}{\psi} \frac{\omega}{M^2} \dots \dots \dots (10)$$

На основании последнего равенства можно определить толщину ленты b , если положить для свободно излучающих поверхностей $p_{доп} = 500-550 \frac{\text{ватт}}{M^2}$ (что соответствует повышению температуры над окружающей средой на $20-30^{\circ}\text{C}$), т. е.

$$b = \frac{p_{доп} \psi}{5 E_{rn} \gamma} \text{ мм}, \dots \dots \dots (11)$$

а зная толщину и сечение ленты, можно определить и ширину ее.

Однако, лента не должна быть чрезмерно тонкой, так как тогда усложняется подвод тока, ослабляется механическая прочность и уменьшается долговечность ее вследствие окисления.

Практически толщина ленты берется в пределах $0,5-1 \text{ мм}$.

Превышение температуры нагрева резистора над окружающей средой, при нормальном режиме и при известных габаритах ленты, можно определить из выражения (10), если положить, что $p_{доп} = \tau_n q_{доп}$, где τ_n — превышение температуры, а $q_{доп} = 20 \frac{\omega}{M^{20}\text{C}}$ (в среднем для $0-50^{\circ}\text{C}$), т. е.

$$\tau_n = \frac{5 \nu E_{rn} \gamma}{q_{доп} \psi} \text{ }^{\circ}\text{C} \dots \dots \dots (12)$$

Время охлаждения резистора. Время охлаждения резистора после короткого замыкания до нормальной температуры (50°C) играет существенную роль в эксплуатации. Включать масляный выключатель, после его отключения воздействием реле, можно только тогда, когда резистор охладится до нормальной температуры; в противном случае повторное включение на короткое приведет к перегоранию железа резистора. Если допустить, что процесс охлаждения точно следует по экспоненциальному закону, то

$$\tau_n = \tau'_m e^{-\frac{t}{T}} \dots \dots \dots (13)$$

где τ_n — начальная температура при нормальном режиме,

τ_m' — конечная температура при коротком замыкании,
 t' — время охлаждения резистора и

$T = \frac{gc}{Qq_{дон}}$ постоянная времени.

Конечная температура нагрева резистора будет $\tau_m' = \tau_n + \tau$, где τ из ур-ния (6), т. е.

$$\tau = \frac{\sqrt{1 + \frac{t}{t_m} [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1]} - 1}{\alpha}$$

Далее поставим для постоянной времени T значения $g = \frac{Sl\gamma}{1000} \text{ gk}$

и $Q = \frac{2Sl}{1000 \text{ в}} \text{ м}^2$;

тогда

$$T = \frac{\gamma C}{2q_{дон}} \dots \dots \dots (14)$$

Решим теперь ур-ние (13) относительно t' и, подставим в него значения τ_m' и T , получим:

$$t' = T (\ln \tau_m' - \ln \tau_n) = T \ln \frac{\tau_m'}{\tau_n}$$

или $t' = \frac{\gamma C}{2q_{дон}} \ln \frac{\sqrt{1 + \frac{t}{t_m} [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1]} - 1}{\alpha \tau_n} + 1 \dots \dots \dots (15)$

На рис. 3 построена кривая зависимости вида $\frac{t'}{\text{в}} = f\left(\frac{t}{t_m}\right)$ для $\tau_n = 50^\circ \text{ C}$, $\tau_m = 800^\circ \text{ C}$, $\alpha = 0,009 \text{ } 1/^\circ \text{ C}$, $\gamma = 7,9 \text{ kg/dm}^3 \text{ C} = 550 \frac{\text{w}}{\text{kg}^\circ \text{ C}}$ и $q_{дон} = 20 \frac{\text{w}}{\text{M}^\circ \text{ C}}$.

При пользовании кривой в зависимости от $\frac{t}{t_m}$ можно определить отношение $\frac{t'}{\text{в}} = m$ и тогда $t' = m \text{ в}$.

2. Характер изменения тока К. 3. по времени.

Весьма большой интерес представляет закон взменения тока короткого замыкания по времени. Если известен закон спадания тока при коротком, то можно судить о величине выключаемых токов и о характере нагревания токоведущих частей. Интересно также проследить, как на эти изменения влияет величина процентной реактивности.

При внезапном коротком замыкании шин станции через резистор спадание тока будет происходить, во-первых, за счет увеличившегося размагничивающего действия потока якоря и, во-вторых, за счет увеличения сопротивления резистора. Рассмотрим сначала влияние реакции якоря на величину тока короткого замыкания. Как известно, в первый момент короткого реакция якоря не может размагнитить машину вследствие успокоительного действия системы ротора, но затем постепенно начнет сказываться влияние размагничивающего потока якоря; результирующий поток ослабнет, а с ним и индуцированная ЭДС, и, следовательно, ток короткого замыкания будут уменьшаться.

Для выяснения характера затухания тока при коротком через резистор вследствие реакции якоря, воспользуемся решением профессора Рюденберга для внезапного короткого замыкания синхронных трехфазных машин.

Как известно, кроме установившихся токов в обмотках, после внезапного короткого, возникают свободные токи, подчиняющиеся следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + M \frac{di_2}{dt'} &= 0 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt'} &= 0; \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (16)$$

где L_2 и L_1 —самоиндукция ротора и статора, $R_1 = R^1 + r$ —сумма сопротивления обмотки статора и резистора,

R_2 —сопротивление системы ротора,

M —коэффициент взаимной индукции.

Эту систему дифференциальных уравнений проф. Рюденберг решает, предположив гармонический закон для изменения токов в статоре с частотой α и в роторе с частотой β :

$$\begin{aligned} i_1 &= J_1 e^{i\alpha t} \\ i_2 &= J_2 e^{i\beta t}, \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (17)$$

где частоты α и β связаны соотношением $\alpha = \omega + \beta$.

Последние члены уравнений (16) выражают индукцию между движущимся ротором и покоящимся статором, и действие роторной частоты β на статор нужно увеличить на величину ω , а действие статорной частоты α на ротор уменьшить на величину ω , чтобы правильно учесть действие вращения ротора.

При внезапном коротком замыкании в цепях без резистора частоты α и β постоянны и зависят лишь от омических и индуктивных сопротивлений обмоток статора и системы ротора. Предположим теперь, что при коротком замыкании шин станции на резистор

$$\alpha = f_1(t) \text{ и}$$

$$\beta = f_2(t);$$

тогда мы получим из уравнений (16) при подстановке значений (17) соотношение между амплитудами и частотами токов:

$$\begin{aligned} jL_1 J_1 \frac{d(\alpha t)}{dt} + R_1 J_1 + jM J_2 \frac{d(\alpha t)}{dt} &= 0 \\ jL_2 J_2 \frac{d(\beta t)}{dt} + R_2 J_2 + jM J_1 \frac{d(\beta t)}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (18)$$

Чтобы получить выражение для неизвестных частот, исключим амплитуды токов:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{-jM \frac{d(\alpha t)}{dt} \cdot R_2 + jL_2 \frac{d(\beta t)}{dt}}{R_1 + jL_1 \frac{d(\alpha t)}{dt} \cdot -jM \frac{d(\beta t)}{dt}}$$

Если введем для упрощения коэффициент рассеяния $\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2}$

и кроме того заменим $\frac{d(\alpha t)}{dt} = u$, а

$$\frac{d(\beta t)}{dt} = \frac{d[\alpha - \omega] t}{dt} = u - \omega,$$

то получим:

$$u^2 - u \left[\omega + j \left(\frac{R_1}{\sigma L_1} + \frac{R_2}{\sigma L_2} \right) \right] = \sigma \frac{R_1 R_2}{\sigma L_1 \sigma L_2} - j \omega \frac{R_1}{\sigma L_1}.$$

Решение этого квадратного уравнения дает приближенные корни вида:

$$\begin{aligned} \frac{d(\alpha_1, t)}{dt} = u_1 &= \frac{d(\gamma'_t)}{dt} + j \frac{d(\rho'_t)}{dt} \\ \frac{d(\alpha_2, t)}{dt} = u_2 &= \frac{d(\gamma''_t)}{dt} + j \frac{d(\rho''_t)}{dt}, \end{aligned}$$

а интегрирование этих корней дает значения для частот уравнительных токов

$$\begin{aligned} \alpha_1 t &= \gamma'_t + j \rho'_t \\ \alpha_2 t &= \gamma''_t + j \rho''_t \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (19)$$

Мы видим, что как для частоты переходного тока, так и для коэффициента его затухания получается по 2 значения; следовательно изменение тока во времени при подстановке значений (19) в (17) выражается через:

$$i_1 = i'_1 + i''_1 = J_1 (e^{-\rho'_t} \text{Cos } \gamma'_t + e^{-\rho''_t} \text{Cos } \gamma''_t) \dots \dots (20)$$

Первая, составляющая переходного тока i'_1 имеет чрезвычайно

малую частоту и представляет собой как бы мгновенный постоянный ток, а составляющая i''_1 изменяется с частотой

$$\frac{\rho_t''}{t} = \omega.$$

Так как нас интересует затухание свободных токов, то мы и займемся рассмотрением ρ_t' и ρ_t'' , значения которых имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho_t')}{dt} &= \frac{R_1}{\sigma L_1} + \frac{R_2}{\sigma L_2} \frac{\left(\frac{R_1}{\sigma L_1}\right)^2 (1-\sigma)}{\omega^2 + \left(\frac{R_1}{\sigma L_1}\right)^2} \dots \dots \dots (21) \\ \frac{d(\rho_t'')}{dt} &= \frac{R_2}{\sigma L_2} - \frac{R_2}{\sigma L_2} \frac{\left(\frac{R_1}{\sigma L_1}\right)^2 (1-\sigma)}{\omega^2 + \left(\frac{R_1}{\sigma L_1}\right)^2} \end{aligned}$$

Произведем следующую замену в предыдущих выражениях, пренебрегая омическим сопротивлением статора по сравнению с сопротивлением резистора

$$\frac{R_1}{\sigma L_1} = \frac{\omega r}{x_1} \quad \text{и} \quad \frac{R_2}{\sigma L_2} = \frac{\omega R_2}{x_2},$$

где x_1 и x_2 индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; кроме того на основании уравнения (6)

$$r = r_n \cdot (1 + \alpha \tau) = r_n \sqrt{1 + \frac{t}{t_m} \left[(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1 \right]} = r_n \sqrt{1 + A \frac{t}{t_m}};$$

следовательно

$$\frac{R_1}{\sigma L_1} \approx \frac{\omega r_n \sqrt{1 + A \frac{t}{t_m}}}{x_1} = \frac{\omega}{\delta} \sqrt{1 + A \frac{t}{t_m}}, \quad \text{где} \quad \delta = \frac{x_1}{r_n} = \frac{E_x}{E_{rc}}$$

Тогда уравнения (21) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_t'}{dt} &= \omega \left\{ \frac{\sqrt{1 + A \frac{t}{t_m}}}{\delta} + \frac{R_2}{X_2} \left[\frac{(1-\sigma) \left(1 + A \frac{t}{t_m}\right)}{\delta^2 + \left(1 + A \frac{t}{t_m}\right)} \right] \right\} \dots \dots \dots (22) \\ \frac{d\rho_t''}{dt} &= \omega \frac{R_2}{X_2} \left[\frac{\delta^2 + \sigma \left(1 + A \frac{t}{t_m}\right)}{\delta^2 + \left(1 + A \frac{t}{t_m}\right)} \right] \end{aligned}$$

Проинтегрируем теперь эти уравнения в пределах $0 - t$, получим:

$$\rho'_t = \omega \left\{ \frac{2 t_m}{3 A \delta} \left[\left(1 + A \frac{t}{t_m} \right)^{3/2} - 1 \right] + \frac{(1 - \sigma) t_m \frac{R_2}{x_2}}{A} \left[A \frac{t}{t_m} - \delta^2 \ln \left(\frac{\delta^2 + 1 + A \frac{t}{t_m}}{\delta^2 + 1} \right) \right] \right\}$$

$$\rho''_t = \omega \frac{R_2}{x_2} \left[\frac{t_m \delta^2}{A} (1 - \sigma) \ln \left(\frac{\delta^2 + 1 + A \frac{t}{t_m}}{\delta^2 + 1} \right) + \sigma t_m \frac{t}{t_m} \right] \dots \dots \dots (23)$$

На рис. 4 построены кривые относительного затухания свободных токов по уравнениям (23) в зависимости от $\frac{t}{t_m}$

$$\frac{i'_1}{J_1} = e^{-\rho'_t} \text{ — кривая 1'}$$

$$\frac{i''_1}{J_1} = e^{-\rho''_t} \text{ — кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6.}$$

При построении принято $\frac{R_2}{X_2} = 0,01$, $\tau_m = 800^\circ \text{ C}$, $\alpha = 0,009^\circ \frac{1}{\text{C}}$

и коэффициент рассеяния $\sigma = 0,1$.

Как видно из рисунка 4 (кривая 1) постоянная, составляющая переходного тока к моменту скачка тока короткого замыкания ($t = 0,01$ сек.) для $\delta = 1$ и $t_m = 1$ затухает до 6—7% от своего начального значения. Для значений $\delta < 1$ $t_m < 1$ кривые затухания постоянной составляющей лежат между осью ординат и приведенной кривой, так что а периодический ток на амплитуде первой полуволны почти не отразится.

На рис. 5 построены кривые относительного затухания постоянной составляющей в зависимости от $\frac{t}{t_m}$ для различных значений

$\frac{t_m}{\delta}$, при чем второй член уравнения (23) для ρ''_t пренебрежен

вследствие незначительности множителей $\frac{R_2}{X_2}$ и δ . Мы видим, что с

увеличением относительной реактивности δ время затухания постоянной составляющей увеличивается, увеличивается оно и с увеличением t_m .

Затухание переменной составляющей переходного тока по времени, а также и ЭДС генератора, незначительно (рис. 4: кривые 4; 5 и 6 для $\delta = 0$ и 1, 2 и 3 для $\delta = 1$), оно увеличивается с увеличением относительной индуктивности δ и расчетной выдержки времени t_m . Это затухание обусловлено исключительно размагничивающим действием продольного и поперечного полей якоря, при этом поперечное поле, в отличие от короткого в цепях без резистора, играет первенствующую роль.

Поэтому при расчете токов короткого замыкания учет влияния реакции якоря на величину тока едва ли имеет смысл. Кроме того, все современные электрические станции обычно снабжаются быстродействующими автоматическими регуляторами напряжения; поэтому незначительное понижение ЭДС при коротком будет компенсироваться их действием (если отсутствуют ограничители тока).

В самом деле, в момент внезапного короткого замыкания за счет освобождающейся части магнитного потока генератора происходит скачкообразное увеличение тока возбуждения, затухание которого должно быть подчинено закону затухания ЭДС генератора. Затухание ЭДС, а также поля генератора происходит постепенно, тогда как напряжение на зажимах, вследствие увеличившейся потери напряжения в обмотках статора в момент первоначального скачка тока короткого замыкания резко понизится и приведет в действие регулятор напряжения. Увеличение тока в цепи возбуждения генератора в обычных условиях происходит по экспоненциальному закону, с постоянной времени $\frac{\sigma L_2}{R_2}$, но этот закон нарастания тока

при коротком замыкании не будет справедлив, так как задачей регулятора напряжения в этом случае будет не увеличить, а поддерживать уже увеличившийся ток в цепи возбуждения генератора.

Расчет токов короткого замыкания. На основании предыдущих соображений можно считать, что ЭДС генераторов, питающих короткое, во все время короткого замыкания остается постоянной; тогда все расчеты весьма упрощаются. При постоянной ЭДС генераторов, питающих короткое, изменение тока короткого замыкания во времени будет обусловлено лишь изменением температуры нагрева железа резистора.

Относительное значение переходного тока в зависимости от температуры железа резистора может быть написано из (1), имея в виду (6):

$$\frac{J_k}{J_n} = \frac{100}{\sqrt{E_x^2 + E_m^2 (1 + \alpha \tau)^2}} = \frac{100}{E_m \sqrt{\delta^2 + 1 + \frac{t}{t_m} [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1]}}$$

$$\text{или } \frac{J_k}{J_n} E_m = K = \frac{100}{\sqrt{\delta^2 + 1 + \frac{t}{t_m} [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1]}} \dots \dots \dots (24a)$$

При $\alpha = 0,009 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ и $\tau_m = 800^\circ\text{C}$ предыдущее уравнение примет вид:

$$\frac{J_k}{J_n} E_m = K = \frac{100}{\sqrt{\delta^2 + 1 + 66 \frac{t}{t_m}}} \dots \dots \dots (24b)$$

На рис. 6 построены кривые по уравнению (24*б) для $\delta = 0,1,2$ в функции $k = f\left(\frac{t}{t_m}\right)$.

По уравнению (24 а) при известных δ , τ_m, α и t_m можно определить все значения переходного тока, подставляя соответствующие значения времени t . Так например, эффективное значение первой полуволны переходного тока можно определить из (24 а) при $t = 0,01$ сек., т. е.

$$J_{v0} = \frac{J_n 100}{E_m \sqrt{\delta^2 + 1 + \frac{0,01}{t_m} \left[(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1 \right]}}, \dots (25)$$

а ударный ток, или амплитуда первой полуволны— $J_s = \sqrt{2} J_{v0}$, так как на основании вышесказанного постоянная составляющая за время $t = 0,01$ сек. почти полностью затухает.

Разрывной ток для выбора масляных выключателей при $t = 0,25$ сек. будет:

$$J_e = \frac{J_n 100}{E_m \sqrt{\delta^2 + 1 + \frac{0,25}{t_m} \left[(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1 \right]}}, \dots (26)$$

И установившийся ток при $t = t_m$

$$J_{ky} = \frac{J_n 100}{\sqrt{\delta^2 + (1 + \alpha \tau_m)^2}}, \dots (27)$$

Здесь J_n —номинальный ток фидера.

3. Расчет токоведущих частей.

Если положить, что все тепло, выделяемое током короткого замыкания в токоведущей части, идет на повышение ее температуры, то баланс энергии выразится соотношением:

$$0,24 J_k^2 R dt = g_1 c_1 d\tau, \dots (28)$$

где g_1 —вес токоведущей части в граммах и

c_1 —средняя теплоемкость токоведущей части в $\frac{\text{кал}}{\text{гр}^\circ \text{C}}$.

Если подставить J_k по уравнению (24а)

$R = R_0 (1 + \alpha_1 \tau) = \frac{\rho_1 l}{q} (1 + \alpha_1 \tau)$ —сопротивление токоведущей части

и $g_1 = l q \gamma_1$ —вес ее, то соотношение (28) примет вид:

$$\frac{0,24 \cdot 10^4 J_n^2 \rho_1 \frac{l}{q} (1 + \alpha_1 \tau) dt}{E_m^2 \left\{ \delta^2 + 1 + \frac{t}{t_m} \left[(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1 \right] \right\}} = l q \gamma_1 c_1 d\tau$$

или, разделив переменные, получим:

$$\frac{J_n^2}{q^2} \cdot \frac{0,24 \cdot 10^4 \rho_1}{\gamma_1 C_1 E_{rn}^2} \cdot \frac{dt}{\left(\delta^2 + 1 + A \frac{t}{t_m}\right)} = \frac{d\tau}{1 + \alpha_1 \tau},$$

где $A = [(1 + \alpha \tau_m)^2 - 1]$.

Интегрируя предыдущее выражение в пределах $0 - t$ и $0 - \tau$ будем иметь:

$$\frac{J_n^2}{q^2} \cdot \frac{t_m}{A E_{rn}^2} \cdot \frac{0,24 \cdot 10^4 \alpha_1 \rho_1}{\gamma_1 C_1} \ln \left[\frac{\delta^2 + 1 + A \frac{t}{t_m}}{\delta^2 + 1} \right] = \ln(1 + \alpha_1 \tau) \quad \dots (29)$$

Далее введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{J_n^2 t_m}{q^2 E_{rn}^2} &= \Delta \quad \text{и} \\ 0,24 \cdot 10^4 \alpha_1 \rho_1 &= B, \\ A \cdot \gamma_1 C_1 & \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (30)$$

где B — постоянная, зависящая от материала проводника; тогда

$$\Delta = \frac{\ln(1 + \alpha_1 \tau)}{B \ln \left[\frac{\delta^2 + 1 + A \frac{t}{t_m}}{\delta^2 + 1} \right]} \quad \dots \dots \dots (31)$$

По уравнению (31) на рис. 7 построена номограмма для меди, а на рис. 8 для алюминия.

При построении принято 1) для резистора $\tau_m = 800^\circ\text{C}$ и $\alpha = 0,009 \frac{1}{^\circ\text{C}}$, т. е. $A = 66$; 2) для меди $\gamma_1 = 8,9 \text{ гр/см}^3$ $C_1 = 0,093 \frac{\text{кал}}{\text{гр}^\circ\text{C}}$,

$\rho_1 = 0,0178 \frac{\Omega \text{ мм}^2}{\text{м}}$ и $\alpha_1 = 0,00428 \text{ 1/}^\circ\text{C}$; 3) для алюминия $\gamma_1 = 2,7 \text{ гр/см}^3$,

$C_1 = 0,219 \frac{\text{кал}}{\text{гр}^\circ\text{C}}$, $\rho_1 = 0,03 \frac{\Omega \text{ мм}^2}{\text{м}}$ и $\alpha_1 = 0,0039 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Пользование номограммой весьма просто. При проверке выбранного сечения токоведущей части на нагрев от токов короткого замыкания определяем из (30) значения Δ , а затем по величине Δ , $\delta = \frac{E_x}{E_{rn}}$ и $\frac{t}{t_m}$ на номограмме определяем температуру нагрева токоведущей части. При выборе сечения токоведущей части из условий допустимого нагрева от токов короткого замыкания определяем Δ из номограммы для определенных $\frac{t}{t_m}$, δ , и $\tau_{доп}$; тогда сечение определится из (30), т. е.

$$q_{min} = \frac{J_n}{E_{rn}} \sqrt{\frac{t_m}{\Delta}} \quad \dots \dots \dots (32)$$

Список использованной литературы:

1. Буткевич и Кулакова. Железные сопротивления для ограничения токов короткого замыкания. "Эл-во", 1933 г., № 2, стр. 31.
2. Буткевич, Михайлов и Ротгауз.—Реакторы. Москва 1933 г.
3. Поярков. Центральные электрические станции. Москва, 1933 г.
4. Рюденберг. Токи короткого замыкания в практике эксплуатации крупных электростанций. Перевод с немецкого И. Б. Мандельштама. Ленинград, 1930 г.

SUMMARY.

The principal aim of the present article is to give the most complete and simple theory for the calculation of iron resistors, having the function to limit the short circuit currents in the schemes of power stations.

In the first part of this article the author gives a resolution of principal equations for determining the parameters of resistors which depend on the normal working regime of the network as well as on that of breakage taking the reactance of the scheme into consideration. The law of time changes of a resistor heating temperatures, during the short circuit as well as the time of cooling of the resistor after the short circuit are also defined.

The question of the time change of a short circuit current depending on the influence of the reaction of the generator armature and on the increase of resistance in the resistor during the short circuiting is also narrowly examined.

In order to determine the influence of the generator armature reaction during the passage of the short circuit through the resistor on the character of damping of the transient current, the author made use of Prof. Rüdénberg's method of resolution for the sudden short circuit of synchronous three phase machines, it being ascertained that the reaction of the armature during the short circuiting in circuits with resistors influences but very little the value of the short circuit current.

The constant component of the transient current toward the moment of the short circuit skip (10,01 sec.) damps to several per cent from its initial value. The damping of the variable component of the transient current is negligible, therefore, in equations recommended by the author, for the calculation of short circuit currents in circuits with resistors only the influence of the resistance of the resistor and the reactance of the scheme on the value of the transient current is taken into consideration.

These equations are very simple and convenient for use.

At the end of the article a theory for the calculation of the current-conducting parts is given with consideration of conditions of their heating by the short circuit current in circuits with resistors. To simplify the calculations, nomograms for aluminium and copper are given.







