Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова
т. LXXXIУ, 1979 г.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ УПК С ТИРИСТОРНЫМ РАЗРЯДНИКОМ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 кВ

О.В.ИВАНОВ, С.А.МАКСИМОВ,
Е.М.ПРОСКУРЯКОВ

Защита установок продольной компенсации УПК от перенапряжений при коротких замыканиях в сети 6 кВ может быть осуществлена с помощью тиристорного разрядника, включенного параллельно конденсаторам УПК. Для выбора силовых элементов тиристорного разрядника необходимо определить напряжение на конденсаторах u_c и ток шунтирующей ветви с тиристорами $i_ш$.

Процессы в цепи (см.схему) описываются уравнениями

$$u = U_m \sin(\tau + \phi_u), \quad \tau = \omega t;$$

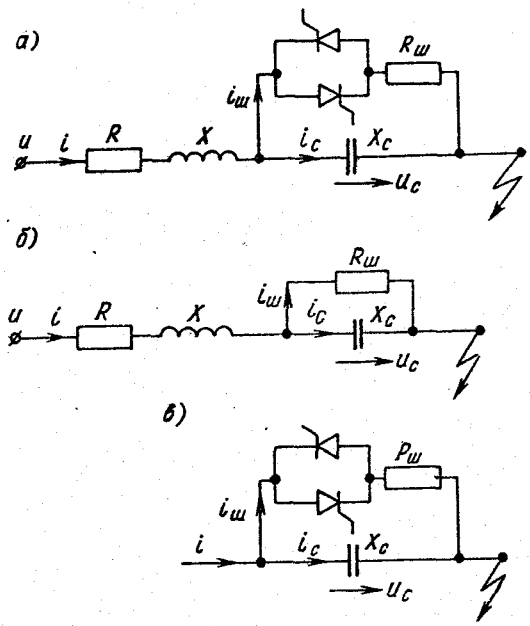
$$u = Ri + X\frac{di}{d\tau}, \quad i = i_c + i_ш, \quad i_ш = i_т, \qquad (I)$$

$$u_c = u_т + R_ш i_ш, \quad i_c = \frac{1}{X_c}\frac{du_c}{d\tau},$$

где R, X - сопротивления реактора и сети; X_c - сопротивление конденсаторов УПК; $R_ш$ - сопротивление шунтирующей ветви.

При внезапном коротком замыкании система уравнений (I) решается при ненулевых начальных условиях. Считая вентили идеальными, можно определить напряжения и токи на интервалах, когда $u_в = 0$ и $i_т = i_ш = 0$. Решение уравнений по интервалам трудоемко из-за многократного графического решения трансцендентных уравнений при определении момента перехода вентиля из открытого состояния в закрытое и обратно. Такой метод нецелесообразен при инженерных расчетах.

Как показывает анализ опытных данных, полученных при эксплуатации УПК на производственном объединении „Белорускалий", ток короткого замыкания в процессе работы тиристорного разрядника сохраняет практически синусоидальную форму. В связи с этим разработана упрощенная методика расчета режимов установки продольной компенсации с тиристорными разрядниками при коротком замыкании в распределительных сетях 6 кВ и допущено следующее:



Расчетные схемы распределительной сети 6 кВ с установками продольной компенсации при коротких замыканиях

I) периодическая составляющая тока короткого замыкания $i_{к.з}$ в схеме $а$ при работе разрядника сохраняет синусоидальную форму;

2) периодическая составляющая тока короткого замыкания $i_{к.з}$ в схеме $а$ имеет такую же амплитуду и начальную фазу, как и установившийся ток i в схеме $б$;

3) апериодическая составляющая тока короткого замыкания в схеме $а$, благодаря наличию дополнительного сопротивления $R_ш$, затухает очень быстро и при расчете разрядника, время действия которого ~ 0,2 с может не учитываться.

Согласно принятым допущениям, схема $а$ работает в режиме заданного синусоидального входного тока i по схеме $в$.

Упрощенный расчет производится в следующей последовательности.

I. Определяется амплитуда тока i установившегося режима в схеме $а$

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{R + jX - \dfrac{jX_c \cdot R_ш}{R_ш - jX_c}} .$$

2. Напряжение на конденсаторах при закрытых тиристорах

$$u_c = u_т = X_c \int_0^{\tau} i d\tau + u_c(0) .$$

В схеме $в$ тиристоры закрываются, когда $u_c(0) = 0$, $i_ш = 0$, поэтому

$$u_c = u_т = X_c \int_0^{\tau} i d\tau = X_c \int_0^{\tau} I_m \sin(\tau + \phi_{io}) d\tau =$$

$$= X_c I_m \left[\cos\phi_{io} - \cos(\tau + \phi_{io})\right] = U_{cm}\left[\cos\phi_{io} - \cos(\tau + \phi_{io})\right] ,$$

где ϕ_{io} - начальная фаза тока i при $u_c(0) = 0$.

3. Тиристоры открываются в момент τ, когда напряжение на конденсаторах достигает значения напряжения уставки разрядника U_0, т.е. $u_c(\tau_0) = U_0$. При открытых тиристорах напряжение на конденсаторах определяется уравнением

$$i = \frac{u_c}{R_ш} + \frac{1}{X_c}\frac{du_c}{d\tau}$$

и равно

$$u_c = U_{cm}\sin(\tau + \phi_{io} - \phi_{in}) + \left[U_0 - U_{cm}\sin(\tau_0 + \phi_{io} - \phi_{in})\right] e^{-\frac{X_c}{R_ш}(\tau - \tau_0)},$$

где $U_{cm} = \dfrac{I_m}{\sqrt{\dfrac{1}{R_ш} + \dfrac{1}{X_c}}}$ - амплитуда принужденной составляющей; $\phi_{in} = \operatorname{arctg}\dfrac{R_ш}{X_c}$ - угол сдвига фаз между током i и принужденной составляющей u_c.

4. Неизвестные τ_0 и ϕ_{io} определяются из начальных условий и условий периодичности

$$u_c(\tau_0) = U_0\ ; \quad u_c(0) = u_c(\pi) = 0\ ;$$

$$X_c I_m\left[\cos\phi_{io} - \cos(\tau_0 + \phi_{io})\right] = U_0\ ; \qquad (2)$$

$$\left[U_0 - U_{cm}\sin(\tau_0 + \phi_{io} - \phi_{in})\right] e^{-\frac{X_c}{R_ш}(\pi - \tau_0)} - U_{cm}\sin(\phi_{io} - \phi_{in}) = 0\ . \qquad (3)$$

Если $\dfrac{X_c}{R_ш} \geqslant 2$, то свободной составляющей в уравнении (3) можно пренебречь. При этом $\sin(\phi_{io} - \phi_{in}) = 0$ или

$$\phi_{io} = \phi_{in} = \phi_i = \operatorname{arctg}\frac{R_ш}{X_c}\ .$$

Величина $R_ш$ выбирается из условия

$$I_m \leqslant \sqrt{2} I_{доп}\ ;$$

$$U_{cm} \leqslant 2\sqrt{2} U_{сн}\ ;$$

$$\frac{U_0}{R_ш} \leqslant 1{,}2 I_m\ ,$$

где $I_{доп}$ - допустимая величина тока отключения для подземной коммутационной аппаратуры (4,83 кА); $U_{сн}$ - номинальное напряжение конденсаторов УПК (660 В).

При этих условиях и параметрах, характерных для распределительных сетей 6 кВ с УПК, неравенство $\dfrac{X_c}{R_ш} \geqslant 2$ всегда выполняется. Таким образом напряжение на конденсаторах и ток шунтирующей ветви при коротком замыкании можно достаточно точно определить на первом интервале (тиристоры закрыты)

$$u_c = U_{cm}\left[\cos\operatorname{arctg}\frac{R_ш}{X_c} - \cos\left(\tau + \operatorname{arctg}\frac{R_ш}{X_c}\right)\right]\ ;$$

$$i_ш = 0$$

и на втором интервале (тиристоры открыты)

$$u_c = U_{cm}\sin\tau + \left[U_0 - U_{cm}\sin\tau_0\right] e^{-\frac{X_c}{R_ш}(\tau - \tau_0)}\ ;$$

$$i_ш = \frac{u_c}{R_ш}\ .$$

Момент перехода тиристоров из закрытого состояния в открытое определяется из

$$\cos\left(\tau_0 + \operatorname{arctg}\frac{R_ш}{X_c}\right) = \cos\operatorname{arctg}\frac{R_ш}{X_c} - \frac{U_0}{U_{cm}} .$$

Для сравнения результатов предлагаемого расчета с точным расчетом исследуемой цепи в режиме заданного синусоидального напряжения на ЦВМ решены уравнения (I) при ненулевых начальных условиях

$$u_c(0) = X_c\sqrt{2}\sin(\phi_u - 135^\circ) ,$$

$$i(0) = \sqrt{2}\sin(\phi_u - 45^\circ) .$$

Параметры цепи, напряжение уставки разрядника в относительных единицах и начальную фазу входного напряжения при расчете варьировали в достаточно широких пределах:

ϕ_u	0	45	90	135
U_0	0,289	0,433	0,577	0,722
R	0,03	0,02	0,016	-
X	0,13	0,156	0,182	0,21
$R_ш$	0,09	0,052	0,017	-
X_c	0,104	0,125	0,156	0,208

Каждый из параметров изменяли в указанных пределах при постоянных остальных: $\phi_u = 0$; $U_0 = 0,433$; $R = 0,02$; $X = 0,156$; $R_ш = 0,052$; $X_c = 0,156$.

Одновременно с расчетом основных параметров режима на ЦВМ вычисляли относительную среднеквадратичную ошибку определения тока короткого замыкания по упрощенной методике

$$\Delta = \sqrt{\frac{\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}(\Delta i)^2 d\tau}{I_m^2}} ,$$

где Δi - разность мгновенных значений токов при точном и упрощенном расчетах; I_m - амплитуда установившегося тока в схеме $б$.

Это позволило оценить влияние изменения параметров на точность расчетов по упрощенной методике и тем определить область ее применения.

Анализ расчетных данных показывает, что в течение первого периода на величину тока короткого замыкания оказывает существенное влияние апериодическая составляющая, в связи с чем среднеквадратичная ошибка в первом периоде на порядок больше среднеквадратичных ошибок остальных периодов.

Приводим значения среднеквадратичных ошибок в первом периоде Δ_1 и в последующих Δ_3 (по значениям третьего периода):

ϕ_u	0°	45°	90°	135°	X	0,13	0,156	0,182	0,21
Δ_1	0,48	0,21	0,18	0,48	Δ_1	0,49	0,48	0,46	0,44
Δ_3	0,049	0,049	0,049	0,049	Δ_3	0,052	0,049	0,047	0,044

U_0	0,289	0,433	0,577	0,722	$R_ш$	0,09	0,052	0,017	-
Δ_1	0,48	0,48	0,47	0,46	Δ_1	0,33	0,48	0,72	-
Δ_3	0,024	0,049	0,077	0,11	Δ_3	0,04	0,049	0,07	-
R	0,03	0,02	0,016	-	X_C	0,104	0,125	0,156	0,208
Δ_1	0,42	0,48	0,50	-	Δ_1	0,48	0,48	0,48	0,49
Δ_3	0,048	0,049	0,049	-	Δ_3	0,057	0,051	0,049	0,045

Следовательно, наибольшее влияние на точность определения периодической составляющей тока короткого замыкания оказывает напряжение уставки разрядника. Если ограничить величину напряжения уставки разрядника 2,5-кратным значением номинального напряжения конденсатора, то ошибка расчета по упрощенной методике не превысит 10%. При обычно принимаемой 2-кратной уставке напряжения среднеквадратичная ошибка составляет примерно 5%, что приемлемо в инженерных расчетах.

Таким образом, предлагаемая упрощенная методика расчета дает достаточную для выбора силовых элементов разрядника точность во всем возможном диапазоне изменения параметров сети и УПК и хорошо согласуется с экспериментальными данными.