Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. /XXX1У, 1979 г.

ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СИЛОВОЙ ЦЕПИ ТИРИСТОРНОГО РАЗРЯДНИКА НА РЕЖИМЫ УПК ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

С.А.МАКСИМОВ

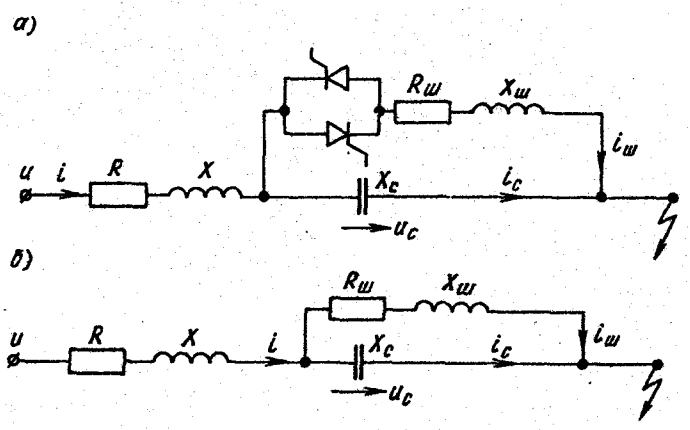


Рис.1. Расчетные схемы распределительной сети 6 кВ с установками продольной компенсации при коротких замыканиях

Индуктивность силовой цепи тиристорного разрядника, необходимая для ограничения скорости нарастания прямого тока тиристоров, весьма мала ($x_ш/R_ш<0,1$) и при расчете режимов установки продольной компенсации УПК обычно не учитывается. Однако при конструировании и монтаже элементов тиристорного разрядника можно получить величины индуктивного сопротивления $x_ш$ шунтирующей ветви, существенно превышающие требуемые расчетные значения. В связи с этим представляет интерес оценка влияния индуктивного сопротивления на режимы короткого замыкания в сети с УПК и сравнение величины напряжений и токов в ветвях цепи (рис.I,а) при различных отношениях сопротивлений шунтирующей ветви $\frac{x_ш}{R_ш}$.

Периодическую составляющую тока короткого замыкания $i = I_m \sin(\tau + \phi_i)$ рассчитаем (в относительных единицах) по схеме I,б при $x_c = \frac{1}{\omega C} = 0,15$; $x = \omega L = 0,15$; $R = 0,015$; $R_ш = 0,04$ и $u = \sqrt{2}\sin(\tau + \phi_u)$; $\phi_{i_ш} = 0$ и получим:

$x_ш/R_ш$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
I_m	9,406	9,221	8,98	8,756	8,911	9,052
ϕ_i, град	15	15,3	15,7'	16,2	16,6	17,1

Как видим, при изменении $x_ш/R_ш$ в указанных пределах величина периодической составляющей тока короткого замыкания изменяется несущественно.

Напряжение на конденсаторах и ток шунтирующей ветви определим, рассчитывая схему рис.I,б в режиме заданного синусоидального тока, равного периодической составляющей тока короткого замыкания в схеме рис.I,а.

На первом интервале $0 \leqslant \tau \leqslant \tau_0$, когда тиристоры разрядника закрыты, процессы в исследуемой цепи описываются уравнениями

$$i_т = i_ш = 0; \qquad i_C = i = I_m \sin(\tau + \phi_i);$$

$$u_C = x_C \int_0^{\tau} i_C d\tau + u_C(0) = x_C \int_0^{\tau} I_m \sin(\tau + \phi_i) d\tau + u_C(0) = \tag{I}$$

$$= x_C I_m \left[\cos\phi_i - \cos(\tau + \phi_i)\right] + u_C(0),$$

где u_C, i_C - напряжение и ток на конденсаторах УПК; $i_ш$ - ток в шунтирующей ветви с тиристорами; x_C - сопротивление конденсаторов УПК.

Тиристоры открываются в момент времени, определяемый углом τ, при котором напряжение на конденсаторах достигает значения напряжения уставки разрядника U_0, принятого равным $0{,}306\sqrt{2}$. Исходя из этого,

$$u_C(\tau) = U_0 = x_C I_m \left[\cos\phi_i - \cos(\tau + \phi_i)\right] + u_C(0)$$

или

$$\cos(\tau + \phi_i) = \cos\phi_i - \frac{U_0 - u_C(0)}{x_C I_m}. \tag{2}$$

На интервале $\pi \geqslant \tau \geqslant \tau_0$ тиристоры открыты и уравнения цепи имеют вид

$$i_C + i_ш = i = I_m \sin(\tau + \phi_i); \qquad i_C = \frac{1}{x_C} \frac{du_C}{d\tau};$$

$$u_C = R_ш \left(i_ш + \frac{x_ш}{R_ш} \frac{di_ш}{d\tau}\right)$$

или

$$\frac{x_ш}{x_C} \frac{d^2 i_ш}{d\tau^2} + \frac{R_ш}{x_C} \frac{di_ш}{d\tau} + i_ш = I_m \sin(\tau + \phi_i).$$

Приводим величины принужденных напряжения $u_{C\,пр} = U_{Cm} \sin(\tau + \phi_{u_C})$ и тока $i_{ш\,пр} = I_{ш m} \sin(\tau + \phi_{i_ш})$, соответствующие частным решениям данной системы уравнений при $\phi_{i_ш} = 0$:

$x_ш/R_ш$	U_{Cm}	ϕ_{u_C}, град	$I_{ш m}$
0	0,364	0	9,095
0,1	0,367	5,7	9,137
0,2	0,347	11,3	9,133
0,3	0,382	16,7	9,141
0,4	0,412	21,8	9,558
0,5	0,447	26,6	9,983

Характеристическое уравнение

$$\kappa^2 + \frac{R_ш}{x_ш}\kappa + \frac{x_c}{x_ш} = 0$$

имеет корни

$$\kappa_{1,2} = -\frac{R_ш}{2x_ш} \pm \sqrt{\frac{R_ш^2}{4x_ш^2} - \frac{x_c}{x_ш}}.$$

Численные значения их следующие:

$x_ш/R_ш$	κ_1	κ_2	$u_c(0)$	τ_0, град.	A_1	A_2
0	-3,75	-	0	33,7	5,739	-
0,1	$-5+j3,53$	$-5-j3,53$	0,037	32	-4,836	21,517
0,2	$-2,5+j3,53$	$-2,5-j3,53$	0,073	30	-4,568	9,799
0,3	$-1,67+j3,12$	$-1,67-j3,12$	0,109	28	-4,286	6,627
0,4	$-1,25+j2,79$	$-1,25-j2,79$	0,152	25	-4,033	4,75
0,5	$-1+j2,55$	$-1-j2,55$	0,20	21	-3,581	3,398

За исключением случая $x_ш/R_ш = 0$, корни характеристического уравнения являются комплексными и, следовательно, переходные процессы в исследуемой цепи имеют колебательный характер. Коэффициенты затухания во всех случаях достаточно велики и при $\tau = \bar{\tau}$ переходные процессы можно считать полностью законченными, т.е.

$$\begin{aligned} i_ш(\bar{\tau}) &= i_{ш\,пр} = 0, \\ u_c(\bar{\tau}) &= u_{c\,пр}(\bar{\tau}) = -U_{cm}\sin\Phi_{u_c}. \end{aligned} \qquad (3)$$

В периодическом режиме

$$u_c(0) = -u_c(\bar{\tau}) = U_{cm}\sin\Phi_{u_c}.$$

На этом основании по приведенным данным из уравнения (2) можно определить углы открытия тиристоров τ_0. Численные его значения приведены выше. Свободный ток шунтирующей ветви можно представить в виде

$$i_{ш\,св} = \left(A_1\cos n\tau' + A_2\sin n\tau'\right)e^{-\delta\tau'},$$

где

$$n = \sqrt{\frac{x_c}{x_ш} - \frac{R_ш^2}{4x_ш^2}}; \quad \delta = \frac{R_ш}{2x_ш}; \quad \tau' = \tau - \tau_0.$$

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 определяются из уравнений

$$i_ш(\tau_0) = i_{ш\,пр}(\tau_0) + A_1 = 0,$$

$$\frac{di_ш}{d\tau}(\tau_0) = \frac{di_{ш\,пр}}{d\tau}(\tau_0) + nA_2 - \delta A_1 = \frac{U_0}{x_ш}$$

или

$$A_1 = -i_{ш\,пр}(\tau_0),$$

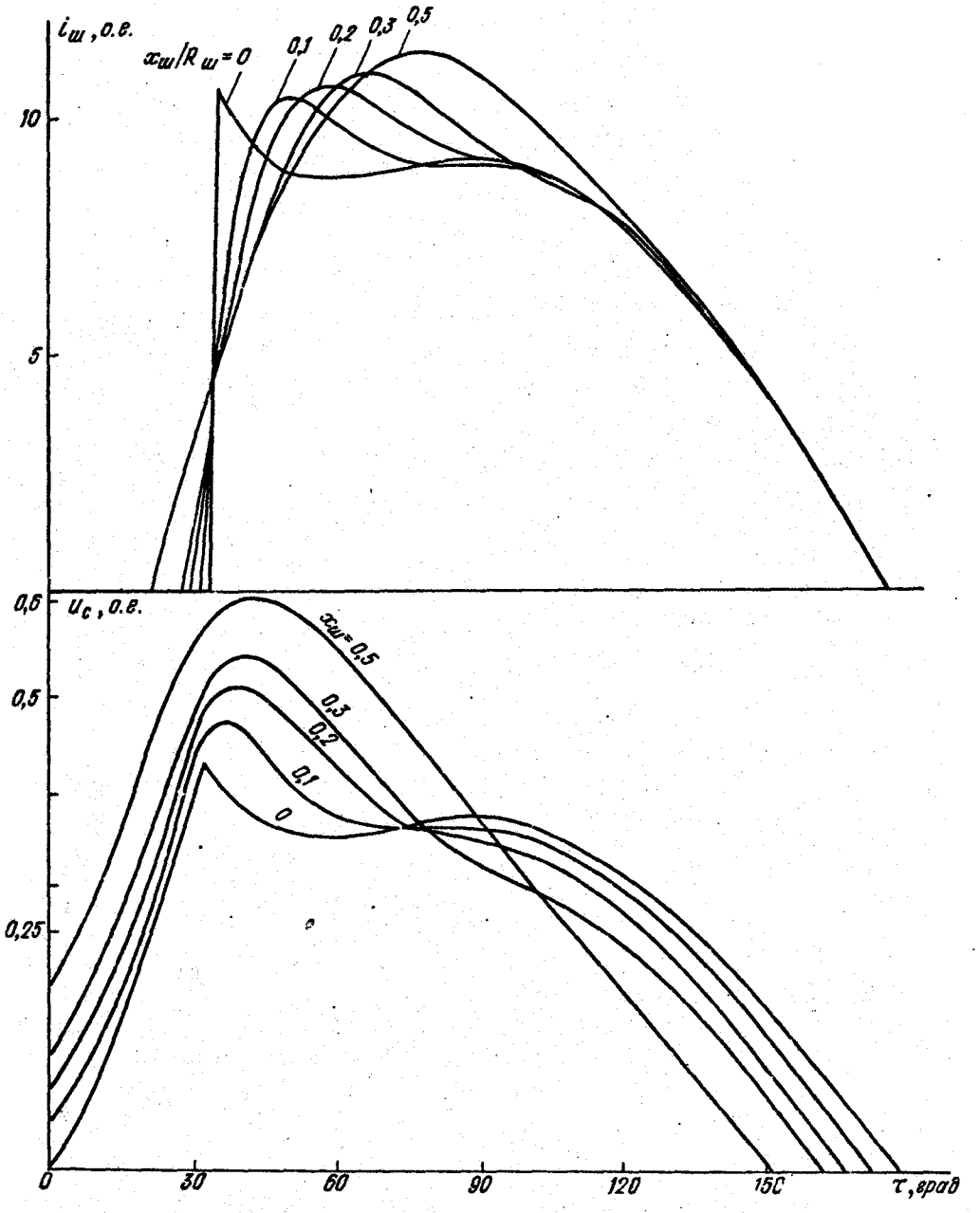


Рис.2. Положительные полуволны $i_ш(\tau)$ и $u_c(\tau)$, построенные по выражениям (1), (4) для нескольких значений $x_ш/R_ш$

$$A_2 = \frac{\frac{U_0}{x_ш} - \frac{di_{ш пр}}{d\tau}(\tau_0) - \delta i_{ш пр}(\tau)}{n}$$

Численные значения A_1 и A_2 приведены выше.

Свободная составляющая напряжения на конденсаторах

$$u_{Cсв} = R_ш\left(i_{ш св} + \frac{x_ш}{R_ш}\frac{di_{ш св}}{d\tau}\right).$$

Определив принужденные и свободные составляющие тока $i_ш$ и напряжения u_C, запишем искомые функции

$$i_ш = i_{ш пр} + i_{ш св}, \qquad (4)$$

$$u_C = u_{C пр} + u_{C св}.$$

Как видно из рис.2, при изменении $x_ш/R_ш$ в рассмотренных пределах наиболее существенно меняется напряжение на конденсаторах. Самое большое его значение при $x_ш/R_ш = 0,5$ в 1,39 раза превышает принятое напряжение уставки разрядника U_0. Для конденсаторов КСП кратковременные перенапряжения такой величины вполне допустимы. Следовательно, при конструировании защитного разрядника индуктивность его силовой цепи может варьироваться в весьма широких пределах

$$\frac{0,5R_ш}{\omega} \geq L_ш \geq \frac{U_0}{\frac{di}{dt}(доп)}.$$

Величина тока тиристоров $i_т = i_ш$, как следует из рис.2,а, при изменении $x_ш/R_ш$ в указанных пределах меняется незначительно. При выборе тиристорного разрядника по нагреву такое изменение тока $i_т$ за счет $x_ш$ можно не учитывать.

Для сравнения результатов, полученных при расчете цепи рис.1,в режиме заданного синусоидального тока на ЦВМ рассчитаны внезапные короткие замыкания в этой же цепи при заданном входном напряжении $u = \sqrt{2}\sin\tau$ и $x_ш/R_ш$, равном 0,2-0,6. При этом определялись ток i, напряжение на конденсаторах u_C и ток тиристоров $i_т = i_ш$.

Для количественной оценки погрешности вычисления тока $i(t)$ по схеме рис.1,а на ЦВМ определялась относительная среднеквадратичная ошибка

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

где Δi - разность мгновенных значений токов при заданных входном напряжении $u = U_m\sin\tau$ (рис.1,а) и входном токе $i = I_m\sin(\tau + \phi_i)$ (рис.1,б); I_m - амплитуда установившегося тока в схеме рис.1,б.

За первый Δ_1 и последующие периоды Δ_3 получены следующие относительные среднеквадратичные ошибки:

$x_ш/R_ш$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Δ_1	0,495	0,499	0,508	0,517	0,532
Δ_3	0,051	0,068	0,068	0,084	0,061

После затухания апериодической составляющей (I,0-I,5 периода) среднеквадратичная ошибка Δ_3 имеет величину, допустимую для инженерных расчетов. Таким образом, и при наличии индуктивности в шунтирующей ветви разрядника его силовые элементы достаточно точно можно рассчитать в режиме заданного синусоидального тока.