

三相桥式整流电路短路电流的计算方法*

樊 元 武

(上海电车供电所)

提 要

本文介绍三相桥式整流电路内、外部短路电流的计算方法。文中分暂态过程及稳态过程两部分,其中一部分分析方法是作者提出的。根据文中所介绍的计算方法,绘制了数种实用曲线,供读者参考使用。

一、引 言

在设计大功率硅整流器和可控硅变流器时,必须掌握内、外部短路电流的计算方法,否则,硅整流器和可控硅变流器在使用时会发生损坏事故,造成损失,因此各国电工界都很重视这些电流的计算方法。本文用分析法计算了三相桥式整流电路的内、外部短路暂态电流和稳态电流。

二、外 部 短 路

(一) 非控式整流器的情况

在存在电网阻抗,变压器阻抗,阳极电抗以及直流侧阻抗的情况下,三相桥式整流电路外部短路时的等效电路图如图1所示。并设:

X ——变压器次级侧的等效相电抗(包括电网电抗),

X_a ——阳极电抗,

Z_d ——直流侧阻抗,

R_d ——直流侧电阻,

$U_{1+}, U_{1-}, \dots$ ——整流桥臂1+、1-……的正向电压,

$i_{1+}, i_{1-}, \dots$ ——整流桥臂1+、1-……的短路电流瞬时值,

t ——时间,

e_{2a}, e_{2b}, e_{2c} ——变压器次级相电势,它们的方程式为:

$$e_{2a} = \sqrt{2} E \sin \theta, \quad e_{2b} = \sqrt{2} E \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right), \quad e_{2c} = \sqrt{2} E \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right).$$

Z_L ——变压器次级侧的等效相阻抗,

* 1979年9月14日收到。
1980年12月20日第三次修改定稿。

X_d ——直流侧电抗,

R ——变压器次级侧的等效相电阻 (包括电网电阻以及整流器接线和硅元件的等效电阻),

i ——直流侧短路电流瞬时值,

i_A, i_B, i_C ——变压器次级侧短路电流瞬时值,

ω ——角频率,

$\theta = \omega t$,

我们首先计算暂态电流。当变压器阳极处和直流侧存在电抗和电阻时, 外部短路暂态过程可以分成几个时间间隔来考虑: (1) 时间间隔 1: $\theta = \theta_1 - \theta_2$; (2) 时间间隔 2: $\theta = \theta_2 - \theta_3$; (3) 时间间隔 3: $\theta = \theta_3 - \theta_4 \cdots$ 依次类推。

现在计算这些时间间隔内的短路电流值。

1. 时间间隔 1 ($\theta_1 - \theta_2$) 假定外部短路是在 A 相电压上升过零的瞬间发生的 (在这种情况下, 整流桥臂的短路电流为最大, 情况为最恶劣), 这时, 正桥臂 C 相电位最正, 负桥臂 B 相电位最负, 因此整流桥臂 3+ 与 2- 导电。根据克希荷夫定律, 可列出下列方程组:

$$i^{(1)} = i_{3+}^{(1)} = i_{2-}^{(1)}, \quad (1)$$

$$(X_d + 2X + 2X_a) \frac{di^{(1)}}{d\theta} + (R_d + 2R)i^{(1)} = e_{2c} - e_{2b}. \quad (2)$$

上述方程组可按普通线性微分方程组的解法解出:

$$i^{(1)} = i_{3+}^{(1)} = i_{2-}^{(1)} = \frac{\sqrt{6}E}{\sqrt{(X_d + 2X + 2X_a)^2 + (R_d + 2R)^2}} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \phi_1'\right) + \left[I - \frac{\sqrt{6}E}{\sqrt{(X_d + 2X + 2X_a)^2 + (R_d + 2R)^2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1'\right)\right] e^{-\frac{R_d + 2R}{X_d + 2X + 2X_a} \theta}, \quad (3)$$

式中, I ——发生短路时的直流负荷电流值,

$$\phi_1' = \text{ctg}^{-1}\left(\frac{R_d + 2R}{X_d + 2X + 2X_a}\right).$$

2. 时间间隔 2 ($\theta_2 - \theta_3$) 整流桥臂 1+ 开始导电的瞬间可由下列条件求出:

$$U_{1+} = e_{2a} - e_{2c} + X \frac{di_{3+}^{(1)}}{d\theta} + Ri_{3+}^{(1)} \geq 0$$

在桥臂 3+、2- 和 1+ 同时导电的情况下, 可列出下列方程组:

$$i^{(2)} = i_{1+}^{(2)} + i_{3+}^{(2)} = i_{2-}^{(2)}, \quad (4)$$

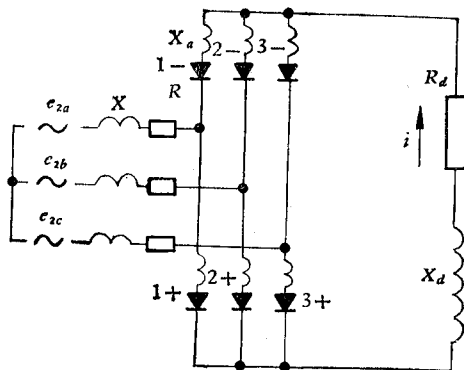


图 1 三相桥式整流电路外部短路时的等效电路

Fig. 1 The equivalent circuit of three-phase bridge rectifier under external short circuit condition

$$\begin{aligned} & \left\| \begin{array}{cc} 2X + 2X_a + X_d & X + X_a + X_d \\ X + X_a + X_d & 2X + 2X_a + X_d \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} \frac{di_{1+}^{(2)}}{d\theta} \\ \frac{di_{3+}^{(2)}}{d\theta} \end{array} \right\| \\ & + \left\| \begin{array}{cc} 2R + R_d & R + R_d \\ R + R_d & 2R + R_d \end{array} \right\| \left\| \begin{array}{c} i_{1+}^{(2)} \\ i_{3+}^{(2)} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} e_{2a} - e_{2b} \\ e_{2c} - e_{2b} \end{array} \right\|. \end{aligned} \quad (5)$$

按同样方法可列出时间间隔 3、4、5……的矩阵方程式。各个时间间隔的起始时间和终止时间可按下述方法求得：

(1) 当未导电桥臂上的电压从零上升到正值时，新的时间间隔开始；

(2) 当已导电桥臂的电流下降到零值时，则老的时间间隔终止，而新的时间间隔开始。

当 X_a 和 X_d 足够大时，4 只、5 只甚至 6 只桥臂可同时导电。

当 $X_d = 0$, $R_d = 0$ 时，4 只、5 只甚至 6 只桥臂可同时导电。

当 $X_a = 0$, X_d 足够大时，4 只桥臂可同时导电。条件如下（例如当桥臂 3+、2- 和 1+ 同时导电时桥臂 3- 开始导电的条件）：

$$e_{2b} - e_{2c} + X \frac{di_{2-}}{d\theta} + Ri_{2-} + X \frac{di_{3+}}{d\theta} + Ri_{3+} \geq 0 \quad (6)$$

在这种情况下，当 4 只桥臂同时导电时，由于其它桥臂上的电压等于零，所以其它桥臂不可能导电。4 只桥臂同时导电的情况是极限情况（许多论文和试验都证明了这个观点，见文献 [1、2、6—9]）。

如不能满足条件 (6)，则在这种情况下整流电路不可能有 4 只桥臂同时导电，极限情况为 3 只桥臂同时导电。

当 $X_a = X_d = 0$, $R_d = 0$ 时，极限情况亦为 3 只桥臂同时导电。

综上所述，在各个时间间隔内，各矩阵方程组可用下式代表：

$$X_p DI_{ap} + R_p I_{ap} = E_p(\theta), \quad (7)$$

式中， X_p 、 DI_{ap} 、 R_p 、 I_{ap} 和 $E_p(\theta)$ 均为矩阵。

当初始条件为 $\theta = \theta_i$ 时， $I_{ap} = I_{ap}\theta_i$ 的情况下，解 (7) 式得：

$$I_{ap} = e^{-X_p^{-1}R_p(\theta-\theta_i)} I_{ap}\theta_i + \int_{\theta_i}^{\theta} e^{-X_p^{-1}R_p(\theta-\tau)} X_p^{-1} E_p(\tau) d\tau,$$

式中， τ ——时间。

将参数代入各矩阵方程式运算时，运算将大大简化。现举实例来说明运算方法。

实例：某整流站的硅整流器接成三相桥式整流电路，其 $X = 0.028\Omega$ ； $R = 0.0098\Omega$ ； $X_d = 0.0065\Omega$ ； $R_d = 0.0049\Omega$ ； $X_a = 0$ ； $E = \frac{495}{\sqrt{3}}\text{V}$ ，需计算空载情况下 A 相电压过零

时的外部短路暂态电流。

根据上述方法可列出各个时间间隔内的方程组：

时间间隔 1 ($\theta_1 \leftarrow \theta_2$)：桥臂 3+ 和 2- 同时导电，方程组为：

$$i^{(1)} = i_{3+}^{(1)} = i_{2-}^{(1)}, \quad (8)$$

$$0.625 \frac{di^{(1)}}{d\theta} + 0.0245i^{(1)} = e_{2c} - e_{2b} \quad (9)$$

时间间隔 $2(\theta_2 - \theta_3)$: 桥臂 3+、2- 和 1+ 同时导电, 方程组为:

$$i^{(2)} = i_{1+}^{(2)} + i_{3+}^{(2)} = i_{2-}^{(2)}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 0.0625 & 0.0345 \\ 0.0345 & 0.0625 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{1+}^{(2)}}{d\theta} \\ \frac{di_{3+}^{(2)}}{d\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0245 & 0.0147 \\ 0.0147 & 0.0245 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1+}^{(2)} \\ i_{3+}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{2a} - e_{2b} \\ e_{2c} - e_{2b} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由于条件(6)不能满足, 在时间间隔 2 内, 4 只桥臂不可能同时导电.

时间间隔 $3(\theta_3 - \theta_4)$: 桥臂 3+ 停止导电, 桥臂 3- 立刻导电, 所以桥臂 1+、2- 及 3- 同时导电, 方程组为:

$$i^{(3)} = i_{1+}^{(3)} = i_{2-}^{(3)} + i_{3-}^{(3)}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 0.0625 & 0.0345 \\ 0.0345 & 0.0625 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{2-}^{(3)}}{d\theta} \\ \frac{di_{3-}^{(3)}}{d\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0245 & 0.0147 \\ 0.0147 & 0.0245 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2-}^{(3)} \\ i_{3-}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{2a} - e_{2b} \\ e_{2a} - e_{2c} \end{bmatrix} \quad (13)$$

用同样方法可列出其它时间间隔的方程组.

解这些方程组可求得各个时间间隔内的外部短路暂态电流值:

时间间隔 $1(\theta_1 = 0^\circ - \theta_2 = 3^\circ)$:

$$i^{(1)} = i_{3+}^{(1)} = i_{2-}^{(1)} = 10400[\sin(\theta + 21^\circ) - 0.358e^{-0.39\theta\frac{\pi}{180^\circ}}] \quad (14)$$

时间间隔 $2(\theta_2 = 3^\circ - \theta_3 = 102^\circ)$:

$$\begin{aligned} i_{1+}^{(2)} = \frac{1}{2} [1591e^{-0.4(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} + 11700\sin(\theta - 8^\circ) + 23300\sin(\theta - 101^\circ) \\ + 22500e^{-0.35(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}}] = 796e^{-0.4(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} + 5850\sin(\theta - 8^\circ) \\ + 11650\sin(\theta - 101^\circ) + 11250e^{-0.35(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} i_{3+}^{(2)} = 796e^{-0.4(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} + 5850\sin(\theta - 8^\circ) - 11650\sin(\theta - 101^\circ) \\ - 11250e^{-0.35(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$i^{(2)} = i_{2-}^{(2)} = 1591e^{-0.4(\theta-3^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} + 11700\sin(\theta - 8^\circ) \quad (17)$$

时间间隔 $3(\theta_3 = 102^\circ - \theta_4 = 167.5^\circ)$:

$$\begin{aligned} i_{2-}^{(3)} = 5850\sin(\theta - 67.5^\circ) + 2929e^{-0.4(\theta-102^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} - 11650\sin(\theta - 161^\circ) \\ - 3724e^{-0.35(\theta-102^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} i_{3-}^{(3)} = 5850\sin(\theta - 67.5^\circ) + 2929e^{-0.4(\theta-102^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} + 11650\sin(\theta - 161^\circ) \\ + 3724e^{-0.35(\theta-102^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$i^{(3)} = i_{1+}^{(3)} = 11700\sin(\theta - 67.5^\circ) + 5857e^{-0.4(\theta-102^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} \quad (20)$$

用同样方法可求出其它时间间隔的外部短路暂态电流.

根据上列各式作出外部短路暂态电流 i 、 i_{2-} 、 i_{3+} 、 i_{1+} 和 i_{3-} 的曲线,如图 2 所示。根据 $\frac{di^{(3)}}{d\theta} = 0$ 的原则可求得 $i^{(3)}$ 在 $\theta = 149^\circ$ 时为最大:

$$i^{(3)} = i_{1+}^{(3)} = 11700 \sin(149^\circ - 67.5^\circ) + 5857e^{-0.4(149^\circ - 102^\circ)\frac{\pi}{180^\circ}} = 15790\text{A} \quad (20')$$

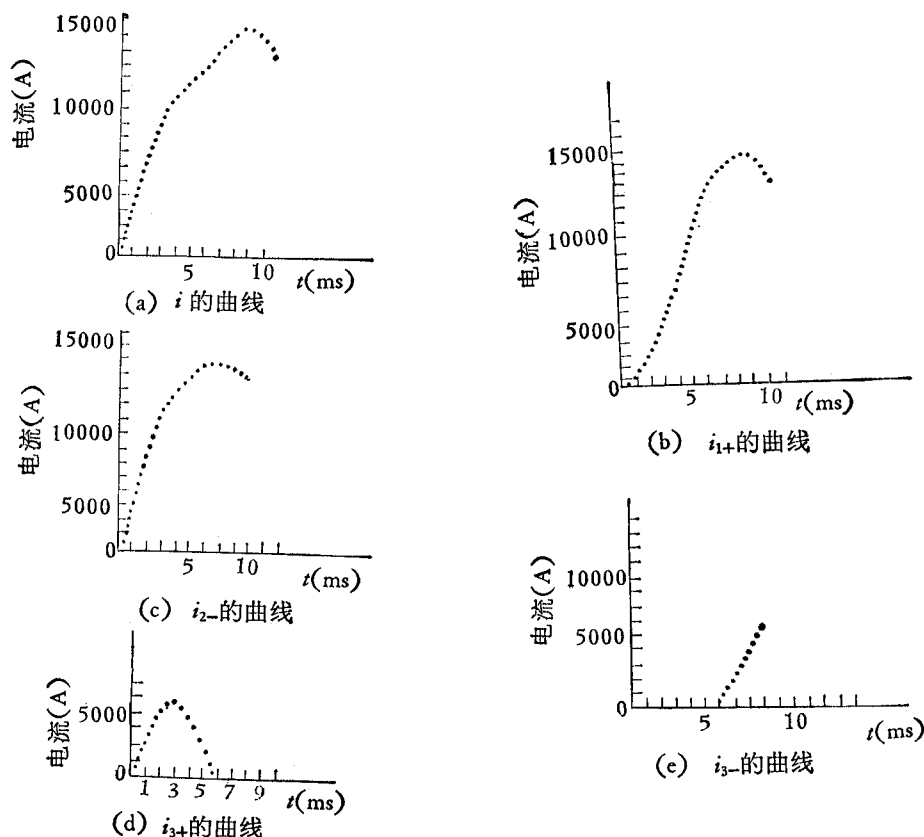


图 2 i 、 i_{2-} 、 i_{3+} 、 i_{1+} 和 i_{3-} 的曲线

Fig. 2 The curves of the currents i , i_{2-} , i_{3+} , i_{1+} and i_{3-}

该整流器在空载情况下 A 相电压过零时曾进行过外部短路试验,试验时所拍摄的示波图如图 3 所示。从图可见,用本文介绍的方法求得的曲线与其非常相近,电流 i 和 i_{1+} 的最大值也非常相近,证明这种方法是正确的。

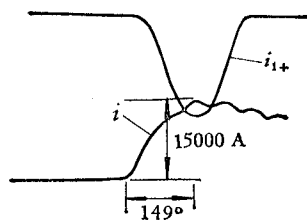


图 3 外部短路试验时所拍摄的示波图

Fig. 3 External short circuit currents oscillogram

根据上列各式可求出 $X_a = 0$, $X_d = 0$, $R_d = 0$ 时(仅存在电网阻抗和变压器阻抗的情况)的 i_{1+} 、 i_{2-} 和 i_{3+} 值如下:

$$i_{1+} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} [\sin(\theta - \phi_1) + \sin \phi_1 e^{-\frac{R}{X}\theta}], \quad (21)$$

$$i_{2-} = \frac{-\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left\{ \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3} - \phi_1\right) \right.$$

$$+ \left[-I^* - \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi_1\right) \right] e^{-\frac{R}{X}\theta}, \quad (22)$$

$$i_{3+} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \left\{ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3} - \phi_1\right) + \left[I^* - \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \phi_1\right) \right] e^{-\frac{R}{X}\theta} \right\}, \quad (23)$$

式中, I^* 为 I 与 $\frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}}$ 的比值 (I ——发生短路时的直流负荷电流值),

$$\phi_1 = \text{ctg}^{-1}(R/X).$$

根据 (21) 式可作出最恶劣情况下的一相短路电流曲线, 如图 4 所示. 图上划有影线的部分是整流桥臂的短路电流曲线.

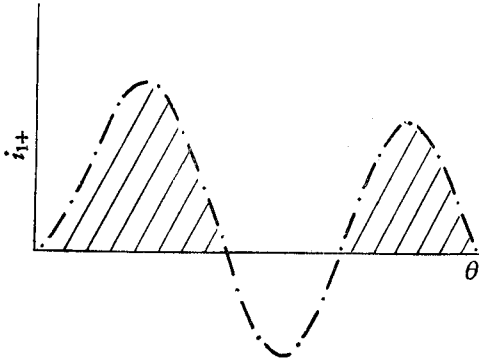


图 4 最恶劣情况下的短路电流曲线

Fig. 4 The curve of short circuit current under the worst condition

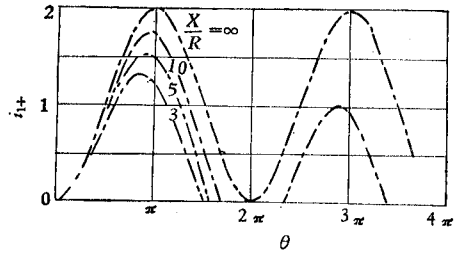


图 5 最恶劣情况下的外部短路电流曲线族

Fig. 5 The curves of external short circuit currents under the worst condition

根据 (21) 式可作出各种 $\frac{X}{R}$ 值时的短路电流曲线 i_{1+} , 如图 5 所示.

从 (21) 式可看出, 当 $\theta \rightarrow \infty$ 时, $e^{-\frac{R}{X}\theta} \rightarrow 0$, 因此 i_A 的稳态值为:

$$i_A = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \sin(\theta - \phi_1) \quad (24)$$

从 (24) 式可看出, i_A 为一正弦电流曲线. 由于 i_A 的正半波为 i_{1+} ; 负半波为 i_{1-} , 因此 i_{1+} 、 i_{1-} 的曲线在稳态时都是正弦半波曲线, 它们的最大值都等于:

$$I_{\text{短最大}} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}}; \quad (25)$$

式中, $I_{\text{短最大}}$ ——整流桥臂的稳态短路电流最大值.

短路电流的稳态曲线为一正弦半波曲线, 其有效值 $i_{\text{短有效}}$ 和平均值 $i_{\text{短平均}}$, 可由下列两式求出:

$$i_{\text{短有效}} = \frac{I_{\text{短最大}}}{2}, \quad (26)$$

$$i_{\text{短平均}} = \frac{I_{\text{短最大}}}{\pi}. \quad (27)$$

暂态曲线第一个冲击波最大值、有效值和平均值随 $\frac{X}{R}$ 值而变化,可由下列各式和图

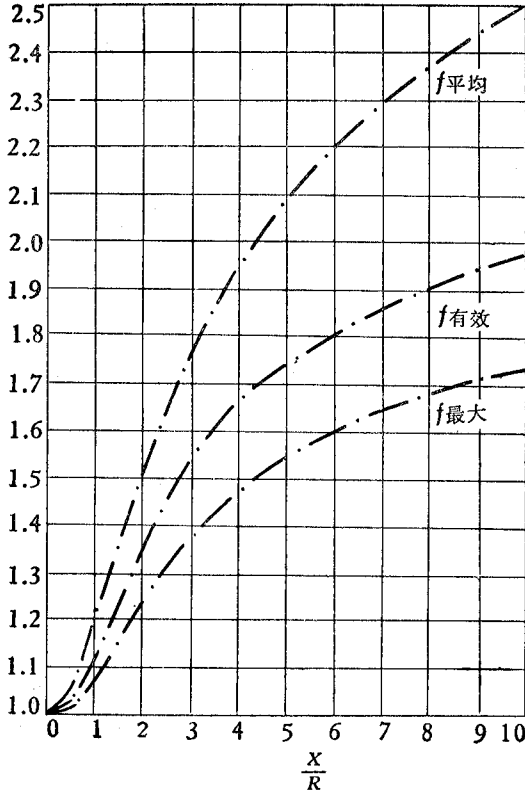


图 6 暂态系数曲线图

Fig. 6 Transient factors

6 求出:

第一个冲击波的最大值 $i'_{\text{短最大}}$ 为

$$i'_{\text{短最大}} = f_{\text{最大}} \cdot I_{\text{短最大}}, \quad (28)$$

第一个冲击波的有效值 $i'_{\text{短有效}}$ 为

$$i'_{\text{短有效}} = f_{\text{有效}} \cdot i_{\text{短有效}}, \quad (29)$$

第一个冲击波的平均值 $i'_{\text{短平均}}$ 为

$$i'_{\text{短平均}} = f_{\text{平均}} \cdot i_{\text{短平均}}, \quad (30)$$

式中, $f_{\text{最大}}$ 、 $f_{\text{有效}}$ 、 $f_{\text{平均}}$ ——暂态系数,可从图 6 中查出。

直流侧稳态短路电流的平均值 $I_{d\text{短平}}$ 等于 3 个整流臂的稳态短路电流平均值 $i_{\text{短平均}}$ 的总和,也就是等于 1 只整流桥臂的稳态短路电流平均值 $i_{\text{短平均}}$ 的 3 倍:

$$\begin{aligned} I_{d\text{短平}} &= 3i_{\text{短平均}} = 3 \frac{I_{\text{短最大}}}{\pi} \\ &= 3 \frac{\frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{X^2 + R^2}}}{\pi} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \\ &= 1.35 \frac{E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \approx 1.35 \frac{E}{X} \quad (31) \end{aligned}$$

$I_{d\text{短平}}$ 也可用百分阻抗 Z_{pu} 表示:

$$I_{d\text{短平}} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{\sqrt{X^2 + R^2}}$$

$$\approx 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{E_p/N}{Z_p/N} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\frac{E_p}{N}}{\frac{Z_{pu} \cdot E_p}{N^2 I_L \times 100}} = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot$$

$$\begin{aligned} \frac{\frac{E_p}{N}}{\frac{Z_{pu} \cdot E_p}{N^2 \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \frac{1}{N} \times 100}} &= 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{I_d}{Z_{pu}} \times 100 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \frac{I_d}{Z_{pu}} \times 100 = 1.1 \frac{I_d}{Z_{pu}} \times 100 \\ &= 110 \frac{I_d}{Z_{pu}}; \quad (32) \end{aligned}$$

式中,

E_p ——变压器初级侧线对中性点电压有效值,

N ——变压比,

Z_p ——换算到初级的相阻抗,

I_L ——变压器初级电流有效值,

I_d ——整流器额定输出电流平均值.

其他情况下的稳态电流计算方法见文献 [1, 7], 本文不再赘述.

(二) 可控式整流器的情况

用上述方法也可计算可控式整流器的外部短路电流, 但此时应注意下列各点:

(1) 当未导电可控硅元件上未加控制脉冲之前或其控制脉冲被撤消时, 它们不会开通;

(2) 正在导电的可控硅元件, 虽然其控制脉冲被撤消, 但它们务必在其电流小于维持电流后加上反向电压时才能关断.

设可控式硅整流器的控制角为 α , 则当可控式硅整流器具有快速保护装置时, 可控硅元件的控制脉冲一般在第一次换相或第二次换相以前(亦即在

$$\alpha < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha \text{ 或 } \alpha + \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} + \alpha$$

的时间间隔内)撤消. 在这两种情况下, 当 $\alpha = 0$, $Z_d = 0$, $X_a = 0$ 时外部短路电流为最

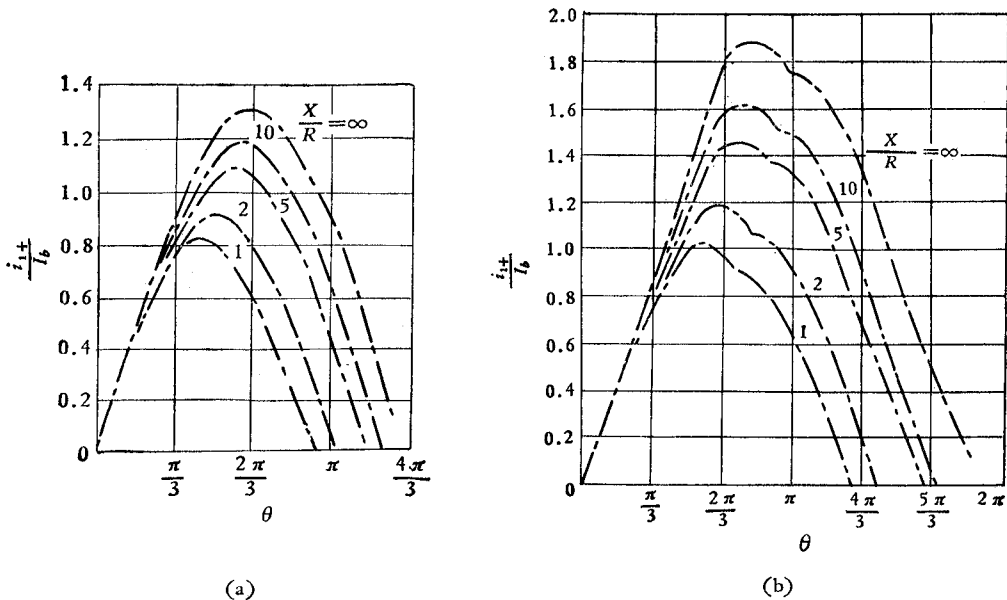


图7 可控式整流器的外部短路电流曲线

(a) 第一次换相以前 (在 $\alpha < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha$ 的时间间隔内) 可控硅元件的控制脉冲被撤消的情况

$$(\alpha = 0, Z_d = X_a = 0);$$

(b) 第二次换相以前 (在 $\alpha + \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} + \alpha$ 的时间间隔内) 可控硅元件的控制脉冲被

撤消的情况 ($\alpha = 0, Z_d = X_a = 0$)

Fig. 7 The curves of the external short circuit currents in silicon controlled rectifiers

大,其曲线族示于图 7(a)、(b) (假定短路前负荷电流等于零)。图上电流的基准值采用变压器输出端的三相短路稳态电流值:

$$I_b = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{X^2 + R^2}} \quad (33)$$

三、内部短路

(一) 非控式整流器的情况

先研究非控式整流器内部短路暂态电流的计算方法。假定整流桥臂 1+ 的一个并联支路在 e_{2a} 、 e_{2b} 电压曲线相交点(即自然换相点)发生内部短路(此种情况下升达的短路电流峰值为最大),则由于整流桥臂 1-、2- 与 3- 具有单向导电的特性,它们将阻止直流

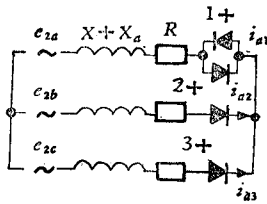


图 8 三相桥式整流电路发生内部短路时的等效线路

Fig. 8 The equivalent circuit of three-phase bridge rectifier under internal short circuit condition

侧的反馈电流(由反电动势送来的电流)送往整流桥臂 1+。因此在这种情况下,整流电路的等效线路图如图 8 所示(整流桥臂 1+ 代表桥臂内的故障并联支路)。从等效电路中可看出,此时整流桥臂 2+、3+ 将与整流阀 1+ 之间发生短路,它们的电流流通方向如图 8 所示。(空载情况下故障整流桥臂 1+ 的电流为最大,因此一般应计算空载情况下的内部短路电流。)设:

i_{a1} 、 i_{a2} 、 i_{a3} ——整流桥臂 1+ 发生内部短路时,通过整流桥臂 1+、2+ 与 3+ 的电流,

$$\phi = \text{ctg}^{-1}[R/(X + X_a)], \quad e_{2a} = \sqrt{2} E \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$e_{2b} = \sqrt{2} E \sin \theta, \quad e_{2c} = \sqrt{2} E \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right).$$

根据整流桥臂导电情况的不同,短路过程可分成几个时间间隔来考虑:(1)时间间隔 1: 整流桥臂 1+ 和 2+ 同时导电;(2)时间间隔 2: 整流桥臂 1+、2+ 和 3+ 全部导电;(3)时间间隔 3: 整流桥臂 2+ 停止导电,整流桥臂 1+ 和 3+ 同时导电;(4)时间间隔 4: 整流桥臂 1+、2+ 和 3+ 同时导电或全部停止导电,视 $\frac{X + X_a}{R}$ 值而定;……。现在计算这几个时间间隔内的内部短路暂态电流值。

1. 时间间隔 1(θ_1 — θ_2) 根据克希荷夫定律,可列出下列方程组:

$$e_{2b} - e_{2a} - (X + X_a) \left(\frac{di_{a2}^1}{d\theta} + \frac{di_{a1}^1}{d\theta} \right) - R(i_{a2}^1 + i_{a1}^1) = 0, \quad (34)$$

$$i_{a1}^1 = i_{a2}^1, \quad (35)$$

将(35)式代入(34)式可得:

$$\sqrt{6} E \sin\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right) - 2(X + X_a) \frac{di_{a1}^1}{d\theta} - 2Ri_{a1}^1 = 0. \quad (36)$$

用普通方法或拉氏变换法将(36)式解出,并将初始条件($\theta = \frac{\pi}{6}$ 时, $i_{a1}^1 = i_{a2}^1 = 0$)代入,

即可求得 $i_{a_1}^I$ 和 $i_{a_2}^I$ 的算式:

$$i_{a_1}^I = i_{a_2}^I = \frac{\sqrt{6} E}{2\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left[\sin\left(\theta - \frac{\pi}{6} - \phi\right) + \sin \phi e^{\frac{R(\theta - \frac{\pi}{6})}{X + X_a}} \right]. \quad (37)$$

2. 时间间隔 $2(\theta_2 - \theta_3)$ 整流桥臂 3+ 开始导电的瞬间, 亦即时间间隔 2 的初始瞬间, 可由下式求出:

$$\begin{aligned} e_{2c} &= e_{2a} + (X + X_a) \frac{di_{a_1}^I}{d\theta} + Ri_{a_1}^I = e_{2a} + \frac{1}{2}(e_{2b} - e_{2a}) = \frac{1}{2}(e_{2a} + e_{2b}) \\ &= -\frac{1}{2} e_{2c}, \end{aligned} \quad (38)$$

即

$$\frac{3}{2} e_{2c} = \frac{3}{2} \sqrt{2} E \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) = 0,$$

所以, $\theta = \frac{2\pi}{3}$. 因此整流桥臂 3+ 在 $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 的瞬间开始导电.

根据克希荷夫定律, 可列出下列方程组:

$$e_{2c} - e_{2a} - (X + X_a) \left(\frac{di_{a_3}^{II}}{d\theta} + \frac{di_{a_1}^{II}}{d\theta} \right) - R(i_{a_3}^{II} + i_{a_1}^{II}) = 0, \quad (39)$$

$$e_{2b} - e_{2a} - (X + X_a) \left(\frac{di_{a_2}^{II}}{d\theta} + \frac{di_{a_1}^{II}}{d\theta} \right) - R(i_{a_2}^{II} + i_{a_1}^{II}) = 0, \quad (40)$$

$$i_{a_1}^{II} = i_{a_2}^{II} + i_{a_3}^{II}. \quad (41)$$

(39)式加(40)式并将(41)式代入, 可得:

$$-e_{2a} = (X + X_a) \frac{di_{a_1}^{II}}{d\theta} + Ri_{a_1}^{II}; \quad (42)$$

用普通方法或拉氏变换法解此微分方程式 (初始条件为: 当 $\theta = \frac{2\pi}{3}$ 时, $i_{a_1}^I = i_{a_1}^{II}$, $i_{a_2}^I = i_{a_2}^{II}$; $i_{a_3}^{II} = 0$), 可得:

$$\begin{aligned} i_{a_1}^{II} &= \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left[\sin\left(\theta - \frac{\pi}{3} - \phi\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \phi (\sqrt{3} + e^{\frac{\pi}{2} \frac{R}{X + X_a}}) e^{-\frac{R}{X + X_a}(\theta - \frac{\pi}{6})} \right]; \end{aligned} \quad (43)$$

$$i_{a_2}^{II} = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left[\sin(\theta - \phi) + \frac{1}{2} \sin \phi (\sqrt{3} - e^{\frac{\pi}{2} \frac{R}{X + X_a}}) e^{-\frac{R}{X + X_a}(\theta - \frac{\pi}{6})} \right]; \quad (44)$$

$$i_{a_3}^{II} = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left[\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3} - \phi\right) + \sin \phi e^{-\frac{R}{X + X_a}(\theta - \frac{2\pi}{3})} \right]. \quad (45)$$

设时间间隔 2 的持续时间为 λ . 因为当 $\theta = \frac{2\pi}{3} + \lambda$ 时 $i_{a_2}^{II} = 0$, 所以利用(46)式就可

求出 λ 值:

$$\begin{aligned}
 i_{a2}^{II} &= \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left[\sin(\theta - \phi) + \frac{1}{2} \sin \phi (\sqrt{3} - e^{\frac{\pi}{2} \frac{R}{X+X_a}}) e^{-\frac{R}{X+X_a}(\theta - \frac{\pi}{6})} \right] \\
 &= \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \lambda - \phi\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \phi (\sqrt{3} - e^{\frac{\pi}{2} \frac{R}{X+X_a}}) e^{-\frac{R}{X+X_a}(\frac{2\pi}{3} + \lambda - \frac{\pi}{6})} \right] = 0,
 \end{aligned}$$

从而,

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \lambda - \phi\right) = \frac{1}{2} \sin \phi [1 - \sqrt{3} e^{-\frac{\pi}{2} \frac{R}{X+X_a}}] e^{-\frac{R}{X+X_a} \lambda} \quad (46)$$

根据(46)式用图解法即可求出 λ 值。 λ 值与 $\frac{X + X_a}{R}$ 值的关系曲线见图 9。

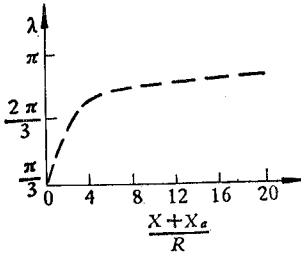


图 9 λ 值与 $\frac{X + X_a}{R}$ 值的关系曲线

Fig. 9 $\lambda - \left(\frac{X + X_a}{R}\right)$ curve

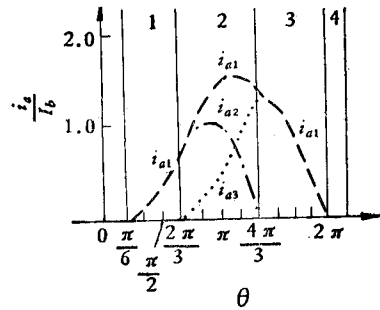


图 10 故障整流桥臂电流 i_{a1} 和正常整流桥臂 i_{a2} 、 i_{a3}

的曲线; 电流基准值 $I_b = \sqrt{2} E / \sqrt{R^2 + (X + X_a)^2}$

Fig. 10 The curves of the faulty arm current i_{a1} and the normal arm currents i_{a2} and i_{a3}

3. 时间间隔 3 ($\theta_3 - \theta_4$) 在此时间间隔内, 整流桥臂 1+ 和 3+ 导电, 根据克希荷夫定律, 可列出下列方程组:

$$e_{2c} - e_{2a} - (X + X_a) \left(\frac{di_{a3}^{III}}{d\theta} + \frac{di_{a1}^{III}}{d\theta} \right) - R(i_{a3}^{III} + i_{a1}^{III}) = 0, \quad (47)$$

$$i_{a3}^{III} = i_{a1}^{III}. \quad (48)$$

将(48)式代入(47)式, 并根据初始条件: 当 $\theta = \frac{2\pi}{3} + \lambda$ 时, $i_{a3}^{III} = i_{a1}^{III}$, 解此微分方程得:

$$\begin{aligned}
 i_{a1}^{III} = i_{a3}^{III} &= \frac{\sqrt{6} E}{2\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left\{ \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2} - \phi\right) + \left[\frac{1}{2\sqrt{3}} \sin(\lambda - \phi) e^{\frac{R}{X+X_a} \lambda} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{2} \cos(\lambda - \phi) e^{\frac{R}{X+X_a} \lambda} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \phi \right] e^{\frac{2\pi}{3} \frac{R}{X+X_a}} e^{-\frac{R}{X+X_a} \theta} \right\}. \quad (49)
 \end{aligned}$$

如果电流 i_{a3}^{III} 在 $\theta = 2\pi + \frac{\pi}{6}$ 前减小到零, 则时间间隔 4 内 $i_{a1} = i_{a2} = i_{a3} = 0$ 。

设此种情况下时间间隔 3 的持续时间为 μ 。因为当 $\theta = \frac{2\pi}{3} + \lambda + \mu$ 时, $i_{a1}^{III} = i_{a3}^{III} =$

0, 所以利用(49)式就可求出 μ 值:

$$i_{a1}^{II} = \frac{\sqrt{6} E}{2\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \left\{ \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \lambda + \mu - \frac{\pi}{2} - \phi\right) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \sin(\lambda - \phi) e^{\frac{R}{X+X_a} \lambda} \right. \\ \left. - \left[\frac{1}{2} \cos(\lambda - \phi) e^{\frac{R}{X+X_a} \lambda} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \phi \right] e^{\frac{2\pi}{3} \frac{R}{X+X_a}} e^{-\frac{R(\frac{2\pi}{3} + \lambda + \mu)}{X+X_a}} \right\} = 0, \quad (50)$$

因而,

$$\sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{6} + \lambda - \phi + \mu\right) = \left[\cos\left(\frac{\pi}{6} + \lambda - \phi\right) - 2 \sin \phi e^{-\frac{R}{X+X_a} \lambda} \right] e^{-\frac{R}{X+X_a} \mu}. \quad (51)$$

根据上式用图解法或电子计算机即可求出 μ 值。

在时间间隔 4 中, 整流桥臂 1+、2+、3+ 的电流等于零。当 e_A 和 e_B 相交的瞬间 ($\theta = 2\pi + \frac{\pi}{6}$), 所有短路过程重新进行。

如果电流 i_{a3}^{III} 在 $\theta = 2\pi + \frac{\pi}{6}$ 前不减小到零, 则在时间间隔 4 内整流桥臂 1+、2+、3+ 同时导电, 短路电流的计算方法与前相似, 不再赘述。

在第一种情况下, 根据(34)–(50)式可作出 i_{a1} 、 i_{a2} 与 i_{a3} 的曲线, 如图 10 所示。从图中可看出, 在时间间隔 2 内, 故障整流桥臂电流 i_{a1} 上升到最大值。

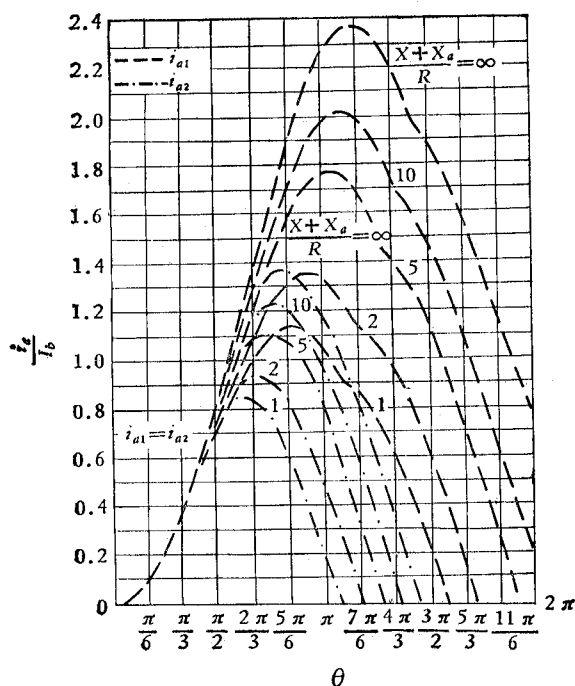


图 11 i_{a1} 和 i_{a2} 的曲线族

Fig. 11 The current curves of i_{a1} and i_{a2}

任何 $\frac{X + X_a}{R}$ 值情况下的 i_{a1} 和 i_{a2} 值可用电子计算机或人工算出, 其曲线族如图 11

所示。

用上述方法,经过若干次反复计算,即可确定三相桥式整流电路内部短路稳态电流。

在各种不同的 $\frac{X + X_a}{R}$ 值下,稳态电流 i_{a1} 和 i_{a2} 的相对值 (以 I_b 作为电流基准值,

$$I_b = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}})$$

随时间变化的曲线示于图 12。从图上可看出,故障整流桥臂 i_{a1} 含有直流分量,其相对值随 $\frac{X + X_a}{R}$ 值的增大而增大;最大内部短路电流 i_{a1} 最大的相对值也随 $\frac{X + X_a}{R}$ 值的增大而增大。但是在确定内部短路电流实际数值时,必须考虑到:当电抗 $(X + X_a)$ 增大时,电流基准值 I_b 将急剧下降;结果是,内部短路电流的实际数值将随 $(X + X_a)$ 值的增大而下降。从图上还可看出,当 $\frac{X + X_a}{R} > 7$ 时,故障整流桥臂电流 i_{a1} 的曲线是连续的,其数值始终大于零;当 $\frac{X + X_a}{R} < 7$ 时,则 i_{a1} 的曲线成为断续状*。

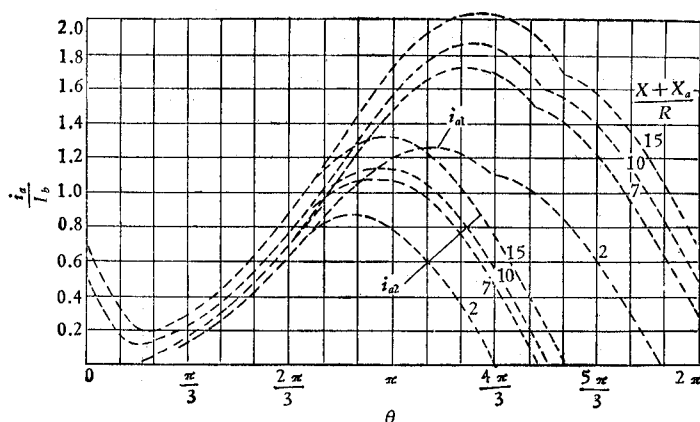


图 12 当三相桥式整流电路发生内部短路时,故障整流桥臂及正常整流桥臂的稳态电流

i_{a1} ——故障整流桥臂电流 i_{a2} ——正常整流桥臂电流

Fig. 12 Steady state currents for internal short circuit in the three-phase bridge rectifier

i_{a1} ——the faulty arm current i_{a2} ——the normal arm current

(二) 可控式整流器的情况

用上述方法也可计算可控式整流器的内部短路电流,此时应注意之各点与计算可控式整流器的外部短路电流时的相同。

当可控硅整流器具有快速保护装置时,可控硅元件的控制脉冲一般在第一次换相或第二次换相以前 (亦即在 $\alpha < \theta < \frac{\pi}{3} + \alpha$ 或者 $\alpha + \frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3} + \alpha$ 的时间间隔内) 撤消。在这两种情况下,当 $\alpha = 0$ 时,内部短路电流为最大,其曲线族示于图 13(a)、(b)。

* 当 $X_a = 0$ 时,同样可用上述方法计算内部短路暂态和稳态电流值。

图上电流的基准值等于:

$$I_b = \frac{\sqrt{2} E}{\sqrt{(X + X_a)^2 + R^2}} \quad (52)$$

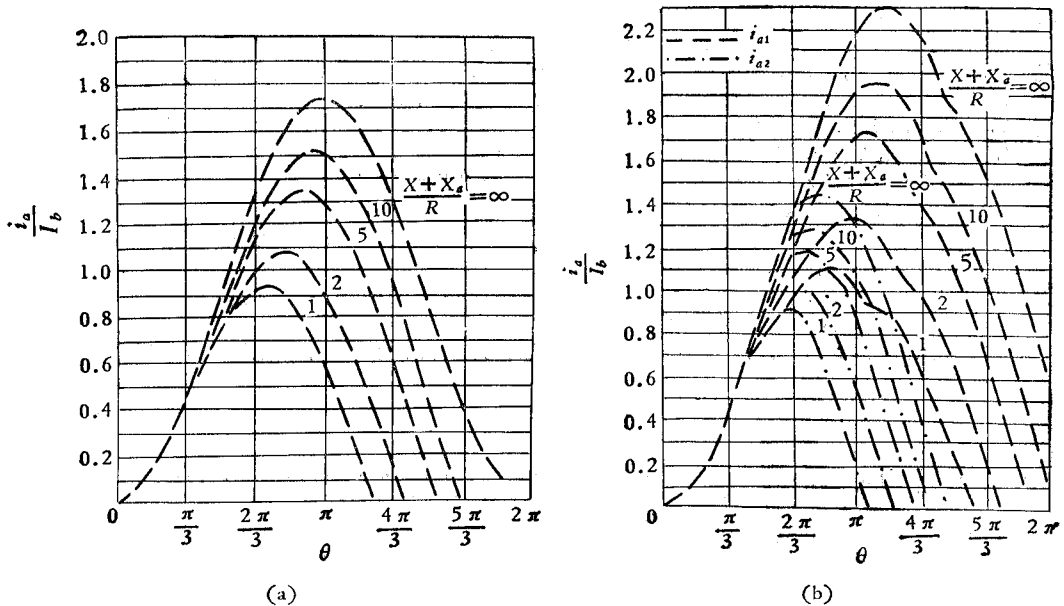


图 13 可控式整流器具有快速保护装置时的内部短路电流曲线 ($\alpha = 0$)

(a) 可控硅元件的控制脉冲在第一次换相前撤消的情况

(b) 可控硅元件的控制脉冲在第二次换相前撤消的情况

Fig. 13 The internal short circuit currents in silicon controlled rectifier when it is protected by quick acting devices ($\alpha = 0$)

(a) the short circuit currents when the control pulses are taken away before the first commutation interval

(b) the short circuit currents when the control pulses are taken away before the second commutation interval

四、结 束 语

1. 当三相桥式整流电路发生内、外部短路时,对某一时间间隔而言(在此时间间隔内,电路中的作用电势保持其变化规律),表述电流和电压变化规律的方程式的作法和线性电路完全相同。对随后的时间间隔而言(此时间间隔的特征是:或者作用电势的数目改变,或者起作用的电路的数目改变),方程式需重新列过,但其作法仍然和线性电路一样。因此内、外部短路电流可用作分析法计算。

2. 当存在直流侧阻抗、阳极电抗、变压器阻抗和电网阻抗时,三相桥式整流电路的外部短路暂态电流可用矩阵法计算。实验证明作者提出的这种计算方法是正确的。

3. 其他情况下的内、外部短路电流也可用矩阵法计算。

4. 本文所介绍的计算方法也适用于其他整流电路。

参 考 文 献

- [1] И. Л. Каганов, Электронные и ионные преобразователи, Ч, III, Госэнергоиздат, 1956.
- [2] В. И. Емельянов, Трехфазная мостовая схема, Известия НИИПТ, с. 8, госэнергоиздат, 1961.
- [3] Е. М. Глух и В. Е. Зеленев, Защита полупроводниковых преобразователей, Энергия, 1970.
- [4] Ф. И. Ковалев и др., Полупроводниковые выпрямители, Энергия, 1978.
- [5] М. П. Костенко и др., Электромагнитные процессы в мощных выпрямителях и их связь с параметрами энергоснабжающей системы, электричество, 1947, No. 1.
- [6] М. П. Костенко, П. Р. Нейман и Г. Н. Бладзевич, Электромагнитные процессы в Системах с мощными выпрямительными установками, Изд. АН СССР, 1946.
- [7] F. Holters, Direct Current, 5 (1960—1961), 112.
- [8] I. K. Dortort, Trans. of AIEE, 72 (1953, Pt. I), 192.
- [9] J. Schaffer, Rectifier circuit, theory and design, John Wiley, 1965,
- [10] C. C. Herskind, et al., Trans. of AIEE, 64(1945), 145.
- [11] R. M. Davis, Power diode and thyristor circuits, Combridge at the University press, 1971.
- [12] 整流器专门委员会, 半導体電力変換装置の過電流過電圧保護, 電氣学会技術報告II部, 第14号, 1971.
- [13] サイリスタ・エレクトロニクス編集委員会, サイリスタ装置, 丸善株式会社, 1974.
- [14] 樊元武, 水银整流器, 冶金工业出版社, 1961.
- [15] 樊元武, 六相曲折形整流电路逆弧电流的计算方法, 上海电机工程学会 1962 年年会论文集, 1962.

THE CALCULATION METHODS OF THE SHORT CIRCUIT CURRENTS IN THREE-PHASE BRIDGE RECTIFIER CIRCUITS

Fan Yuan-wu

(Shanghai Electrical Traction Supply Department)

This paper, using analytical methods, describes the calculation methods of external and internal short circuit currents in three-phase bridge rectifiers. A part of the analytical methods is first introduced by the author.