

三相全控整流电流波形系数的估算^{*}

王耀德

(南京师范大学电气与工程学院, 南京, 210042)

[摘要] 全面地讨论有电势负载的三相晶闸管全控整流电流波形系数的估算方法, 给出了一些计算数据, 从而提出一个简便实用的估算电流波形系数的途径.

[关键词] 三相整流电路; 电流波形系数; 晶闸管

[中图分类号] TM 131; [文献标识码] A; [文章编号] 1008- 1925(2001) 01- 0024- 06

与单相全控晶闸管整流电路类似, 反电势负载下三相全控整流电路输出电流的波形系数计算同样是繁琐的. 相关教材中只有定性的分析, 而有关设计手册中未能提供实用的计算途径.

本文首先给出整流电流断续连续边界下若干个电流波形系数的计算结果, 其次提出断续电流下简便实用的电流波形系数估算方法. 同时将指出电流波形系数与其纹波系数、谐波含量之间的联系.

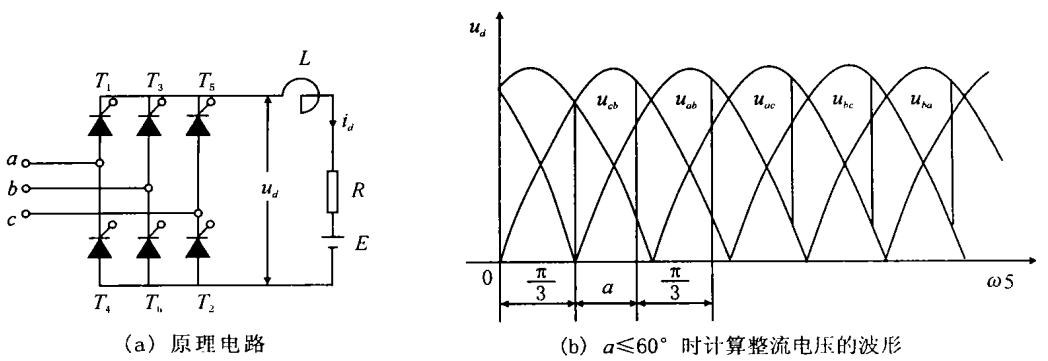


图1 主电路原理线路和交流线电压波形

图1(a)和(b)示出三相全控晶闸管桥、电势负载下的原理电路和交流侧相电压波形, 输出的整流电流 i_d 可用如下方程表示:

$$L \frac{d i_d}{d t} + R i_d + E = \frac{\sqrt{2}}{2} U_l \sin(\omega t + \frac{\pi}{3} + \alpha) \quad 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} \quad (1)$$

式中 L —— 平波电感; R —— 主回路电阻; E —— 负载电势; U_l —— 交流线电压有效值; ω —— 交流电源角频率; 时间坐标起点选在控制角 $\alpha = 0$ 处. 式(1) 的电流解表达式为:

$$i_d(\omega) = A \exp(-\omega t / \text{tg} \varphi) + \frac{\sqrt{2}}{R} U_l \cos \varphi \sin(\omega t + \frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi) - \frac{E}{R} \quad (2)$$

式中 $\text{tg} \varphi = \omega L / R$, A 为积分常数.

* 收稿日期: 2000- 10- 08

作者简介: 王耀德, 1934- , 教授, 主要从事电气自动化方面的研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

下面依次求出电流连续和断续状态下的电流解, 再介绍电流波形系数的计算.

1 电流连续状态

电流连续的边界条件是:

$$i_d(\omega = 0) = i_d(\omega = \pi/3) = 0 \quad (3)$$

代入式(2) 得:

$$i_d(\omega = 0) = A + \frac{\overline{2} U_l}{R} \cos \varphi \sin \left[\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] - \frac{E}{R} \quad (4)$$

$$i_d \left(\omega = \frac{\pi}{3} \right) = A \exp \left[- \frac{\pi}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right] + \frac{\overline{2} U_l}{R} \cos \varphi \sin \left[\frac{2\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] - \frac{E}{R} \quad (5)$$

从式(4) 和(5) 解得:

$$A = \left[\exp \left[- \frac{\pi}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right] - 1 \right]^{-1} \left[\left(\overline{2} U_l / R \right) \cos \varphi \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad (6)$$

将它代入式(2) 得到连续状态下电流表达式:

$$i_d(\omega) = \frac{\overline{2} U_l}{R} \left\{ \exp(-\omega / \operatorname{tg} \varphi) \left[\exp(-\pi / 3 \operatorname{tg} \varphi) - 1 \right] \left[\sin(\alpha - \varphi + \sin \left[\omega + \frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] \cos \varphi - \epsilon \right] \right\} \quad (7)$$

式中 $\epsilon = E / \overline{2} U_l < 1$ 为负载电势值与交流电源电压峰值之比.

于是, 整流电流 i_d 的平均值 I_d 为:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} i_d(\omega) d\omega = \\ &= \frac{3}{\pi} \frac{\overline{2} U_l}{R} \left\{ \cos \varphi \left[- \sin(\alpha - \varphi \operatorname{tg} \varphi - \cos \left[\frac{2\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] + \cos \left[\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] - \frac{\pi}{3} \epsilon \right] \right. \\ &\quad \left. - \frac{\overline{2} U_l}{R} \left[\frac{3}{\pi} \cos \alpha - \epsilon \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

上式表明, 当有平波电感 L 使整流电流连续后, 它的平均值将决定于控制角 α 以及负载电势值 ϵ 的大小, 而与主电路参数 $\operatorname{tg} \varphi = \omega L / R$ 无关. 即在整流电流连续状态下, 改变 $\operatorname{tg} \varphi$ 值不会改变电流均值 I_d , 只会影响电流 i_d 的脉动幅度, 有效值和谐波含量的大小.

同样, 根据式(7) 可求出整流电流的有效值 I_{rms} :

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} i_d^2(\omega) d\omega} = \frac{\overline{2} U_l}{R} \sqrt{\frac{3}{\pi} B} \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} B &= \frac{3}{\pi} \left\{ \frac{\pi}{3} \epsilon^2 + \cos^2 \varphi \left[\frac{\pi}{6} + \frac{3}{4} \cos 2(\alpha - \varphi) \right] + \left[\sin(\alpha - \varphi) \cos \varphi (\exp(-\pi / 3 \operatorname{tg} \varphi) - 1) \right]^2 \right. \\ &\quad \left. (\operatorname{tg} \varphi)^2 \left[1 - \exp(-2\pi / 3 \operatorname{tg} \varphi) \right] - 2\epsilon \cos \varphi \cos(\alpha - \varphi) + 2\epsilon \sin(\alpha - \varphi) \sin \varphi + \right. \\ &\quad \left. \left[2\sin(\alpha - \varphi) \cos^2 \varphi (\exp(-\pi / 3 \operatorname{tg} \varphi) - 1) / (1 + 1 / \operatorname{tg}^2 \varphi) \right] \left[1 / \operatorname{tg} \varphi \sin \left[\frac{\pi}{3} - \alpha - \varphi \right] + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \cos \left[\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] - \exp(-\pi / 3 \operatorname{tg} \varphi) \left[(1 / \operatorname{tg} \varphi) \sin \left[\frac{2\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] + \cos \left[\frac{2\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] \right] \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

2 电流连续 — 断续边界状态

当边界条件式(3) 取 $i_d(\omega = 0) = i_d(\omega = \pi/3) = 0$ 时, 是整流电流刚刚由断续进入连续的边界状态, 将它代入式(7) 可得

$$\epsilon = [\sin(2\pi/3 + \alpha - \varphi) - \sin(\pi/3 + \alpha - \varphi)\exp(-\pi/3\tan\varphi)]/[1 - \exp(-\pi/3\tan\varphi)] \cos\varphi \quad (11)$$

由上式可以计算出电流连续 — 断续边界状态下 ϵ 与 α 、 φ 之间的数值关系, 表 1 中列出部分计算数据. 这里给出一个计算数据实例, 如先指定: $\tan\varphi = 1.5$, 即 $\varphi = 56.3099^\circ$ 和 $\alpha = 30^\circ$; 则有 $\alpha - \varphi = -26.3099^\circ$, $\sin(2\pi/3 + \alpha - \varphi) = 0.99792675$, $\sin(\pi/3 + \alpha - \varphi) = 0.55470067$, $\exp(-\pi/3\tan\varphi) = 0.49751394$, $\cos\varphi = 0.5547002$, $\epsilon = 0.797 \sim 0.8$. 若所得的 ϵ 值不是预期值, 则需适当变更 α 值就会使计算出的 ϵ 值非常接近或等于预期值, 以便于列表和绘制曲线.

表 1 α 与 ϵ 、 $\tan\varphi$ 之间的数值关系

ϵ	$\tan\varphi$				
	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0
0.8	18.5°	24°	28°	30°	30.5°
0.6	35°	41°	46°	47°	48°
0.3	55.5°	62°	65°	68.2°	69°

将表 1 中各组数代入式(8) 以及(9)、(10) 分别计算出各点的电流平均值和有效值, 例如表 2. 表 2 中给出的是平均值电流和有效值电流的相对值 $I_d^* = I_d / \sqrt{2} U_i / R$ 和 $I_{rms}^* = I_{rms} / \sqrt{2} U_i / R$, 同时有波形系数 $K_f = I_{rms} / I_d = I_{rms}^* / I_d^*$. 这里也给出一个实例计算, 如根据 $\tan\varphi = 0.25$, $\varphi = 14.036^\circ$; $\alpha = 18.5^\circ$; $\epsilon = 0.7987$; 计算得 $I_d^* = 0.1056$; 而由 $\alpha - \varphi = 4.464^\circ$; $\sin(\alpha - \varphi) = 0.0778327$, $\cos(\alpha - \varphi) = 0.996966$, $\cos\varphi = 0.9701435$, $\exp(-\pi/3\tan\varphi) = 0.0151646$, $\exp(-2\pi/3\tan\varphi) - 1 = -0.99977$, $\sin(120^\circ + \alpha - \varphi) = 0.824482$, $\cos(120^\circ + \alpha - \varphi) = 0.565888$, $\sin(60^\circ + \alpha - \varphi) = 0.9023146$, $\cos(60^\circ + \alpha - \varphi) = 0.431078$, 得 $I_{rms}^* = 0.1158$; $K_f = 1.097$.

表 2 电流平均值和有效值与 ϵ 、 $\tan\varphi$ 等之间的数值关系

$\tan\varphi$	ϵ											
	0.8				0.6				0.3			
	α	I_d^*	I_{rms}^*	K_f	α	I_d^*	I_{rms}^*	K_f	α	I_d^*	I_{rms}^*	K_f
0.25	18.5°	0.1056	0.1158	1.097	35°	0.1822	0.1988	1.09	55.5°	0.2499	0.2656	1.103
0.5	24°	0.0724	0.0795	1.098	41°	0.1133	0.1243	1.097	62°	0.148	0.163	1.101
1.0	28°	0.043	0.047	1.093	46°	0.0634	0.0696	1.098	65°	0.0808	0.0886	1.096
1.5	30°	0.030	0.033	1.10	47°	0.0435	0.048	1.103	68.2°	0.0547	0.0599	1.095
2.0	30.5°	0.0225	0.0247	1.098	48°	0.031	0.0344	1.109	69°	0.0442	0.0462	1.10

由表 2 中的数据我们可以看到, 在整流电流处于断续连续边界点上, 波形系数 $K_f = I_{rms}^* / I_d^*$ 均在 1.1 附近. 这个结果再一次表明全控桥整流电流波形系数主要决定于导通角的大小^[2], 因为边界点的导通角同是 $\pi/3$, 所以 K_f 就非常接近相等, 后面还会说明这个电流波形系数与纯电阻负载时电流断续 — 连续边界状态下的波形系数也很接近.

在这里, 有几个与电流波形系数相关的问题值得加以阐明.

(1) 用表 2 中的数据画成图 2 中曲线 $I_d^* = f_{id}(\tan\varphi)$, $\epsilon = \cos\alpha$. 由图形可见, 维持连续的 I_d^* 最小值随 $\tan\varphi$ 的增大而迅速减小, 其中 ϵ 愈大, 增大 $\tan\varphi$ 维持电流连续的作用将减弱, 即 I_d^* 随

$\operatorname{tg} \varphi$ 变化的斜率趋小. 反之亦然. 换句话说, 要在同样的 I_d 值下达到电流连续, 因负载电势值 ϵ 不同, 所需的 $\operatorname{tg} \varphi$ 亦不相同.

(2) 由于电流断续—连续边界状态是指 $i_d(\omega = 0) = i_d(\omega = \pi/3) = 0$, 按照电流脉动率(系数) S_i 的一种定义:

$$S_i = (i_{d, \max} - i_{d, \min}) / (i_{d, \max} + i_{d, \min}) \quad (12)$$

这时的 S_i 应是 100%, 与电流断续状态下相同, 因为 $i_{d, \min}$ 均为 0.

(3) 当整流电流进入连续状态, 对应于 $i_d(\omega = 0) = i_d(\omega = \pi/3) > 0$, 与断续—连续边界点相比较, S_i 显然要减小. 同样, 整流电流的有效值也会有所减小, 即在电流连续状态下其波形系数只会比 1.1 值小.

虽说 $I_{rms}^*/I_d^* = 1.1$ 并不算大, 但并不表示整流电流的谐波分量 I_H^* 就小, 因为这时 $I_H^* = \sqrt{(I_{rms}^*)^2 - (I_d^*)^2} =$

$0.458 I_d^*$, 即谐波总有效值为 I_d^* 的 45.8%, 就是电流纹波系数: $r_i = I_H^*/I_d^* = 0.458$.

(4) 在平波电感 L 时, 三相整流桥电路中网侧交流电流有效值 I_2 与整流电流 I_d 之间的关系是 $I_2 = 0.816 I_d$, I_d 既是平均值又是有效值. 当电感 L 为有限值, 如刚刚使 I_d 连续, 平均值为 I_d 的电流有效值是 $1.1 I_d$, 于是 I_2 就是 $0.816 \times 1.1 I_d$ 了. 可见, 连续电流下 $0.816 \times 1.1 I_d$ 基本上是计算 I_2 的上界值.

3 电流断续状态

电流断续的边界条件是:

$$i_d(\omega = 0) = i_d(\omega = \theta) = 0$$

这里的导通角 $\theta < \pi/3$. 此时整流电流的表达式不能用式(7)表示, 而要用下式表示:

$$i_d(\omega) = \frac{2 U_L}{R} \left\{ \left[\epsilon - \cos \varphi \sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right) \right] \exp \left(- \frac{\omega}{\operatorname{tg} \varphi} \right) + \cos \varphi \sin \left(\frac{\pi}{3} + \omega + \alpha - \varphi \right) - \epsilon \right\} \quad (13)$$

其导通角 θ 可从下式中解出:

$$\epsilon = \left[\sin \left(\theta + \frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right) - \sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right) \exp \left(- \frac{\theta}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \right] / \left[1 - \exp \left(- \frac{\theta}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \right] \cos \varphi \quad (14)$$

整流电流的平均值 $I_{d, \theta}$ 可用下式计算:

$$\begin{aligned} I_{d, \theta} &= \frac{3}{\pi} \int_0^\theta i_d(\omega) d\omega \\ &= \frac{2 U_L}{R} \frac{3}{\pi} \left\{ \left[\epsilon - \cos \varphi \sin \left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right) \right] \operatorname{tg} \varphi \left[1 - \exp \left(- \frac{\theta}{\operatorname{tg} \varphi} \right) \right] - \right. \\ &\quad \left. \cos \left[\frac{\pi}{3} + \theta + \alpha - \varphi \right] + \cos \left[\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi \right] - \epsilon \theta \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

整流电流的有效值 $I_{rms, \theta}$ 需按下式计算:

$$I_{rms, \theta} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_0^\theta i_d^2(\omega) d\omega} = \frac{2 U_L}{R} \sqrt{\frac{3}{\pi} B_\theta} \quad (16)$$

式中

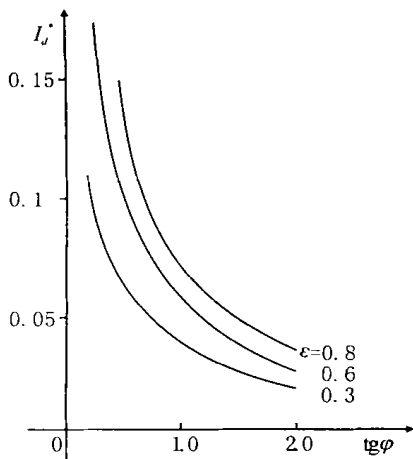


图2 电流断续连续边界状态下 I_d^* 与 $\operatorname{tg} \varphi$ 的关系曲线

$$B\theta = \frac{\text{tg}\varphi}{2} \left[\epsilon - \cos\varphi \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) \right]^2 \left[1 - \exp\left(\frac{-2\theta}{\text{tg}\varphi}\right) \right] + \cos^2\varphi \left[\frac{\theta}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\left(\frac{\pi}{3} + \theta + \alpha - \varphi\right) + \frac{1}{4} \sin 2\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) \right] + \epsilon^2\theta + 2 \left[\epsilon - \cos\varphi \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) \right] \cos \left\{ \frac{1}{\text{tg}\varphi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) - \exp\left(\frac{-\theta}{\text{tg}\varphi}\right) \left[\frac{1}{\text{tg}\varphi} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta + \alpha - \varphi\right) + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta + \alpha - \varphi\right) \right] \right\} \sin^2\varphi + 2\epsilon \left[\epsilon - \cos\varphi \sin\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) \right] \text{tg}\varphi \left[\exp\left(\frac{-\theta}{\text{tg}\varphi}\right) - 1 \right] + 2\epsilon \cos\varphi \left[\cos\left(\frac{\pi}{3} + \theta + \alpha - \varphi\right) - \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha - \varphi\right) \right]$$

(17)

以上诸式的推导与电流连续状态下相类似, 不一一详细列出.

根据式(14) 计算得到的一组 θ 与 $\text{tg}\varphi\alpha, \epsilon$ 的关系数据列成表3, 再用该数据代入式(15) 以及(16)、(17) 计算出一组 $I_{d.\theta}^*, I_{\text{rms}.\theta}^*$ 与 $\alpha, \text{tg}\varphi\epsilon$ 的关系数据列成表4. 表中 $I_{d.\theta}^* = I_{d.\theta} / \sqrt{2} U_l / R$, $I_{\text{rms}.\theta}^* = I_{\text{rms}.\theta} / \sqrt{2} U_l / R$, 电流波形系数 $K_f = I_{\text{rms}.\theta} / I_{d.\theta} = I_{\text{rms}.\theta}^* / I_{d.\theta}^*$.

表 3 θ 与 $\epsilon, \text{tg}\varphi\alpha$ 之间的数值关系

ϵ	$\text{tg}\varphi$							
	$\alpha = 50^\circ$				$\alpha = 65^\circ$			
	0.25	0.5	1.0	1.5	0.25	0.5	1.0	1.5
θ								
0.8	25°	28°	30°	30°	4°	5°	5°	5°
0.7	36°	40°	43°	45°	17°	19°	20°	20°
0.6	45°	49.5°	55°	57°	27°	30°	32°	33°

表 4 $\alpha = 50^\circ$ 时电流平均值和有效值与 $\epsilon, \text{tg}\varphi$ 之间关系

	$\epsilon = 0.8$				$\epsilon = 0.6$			
$\text{tg}\varphi$	0.25	0.5	1.0	1.5	0.25	0.5	1.0	1.5
θ	25°	28°	30°	30°	45°	49.5°	55°	57°
$I_{d.\theta}^*$	0.01364	0.01005	0.00616	0.00444	0.08997	0.07113	0.0489	0.03705
$I_{\text{rms}.\theta}^*$	0.0233	0.01767	0.00964	0.00686	0.1146	0.0857	0.0563	0.0419
K_f	1.708	1.652	1.564	1.546	1.274	1.205	1.152	1.131
$K_{f.R}$	1.783	1.084	1.625	1.625	1.32	1.256	1.188	1.165

用表4 中的数据在图3 上画出波形系数 K_f 与导通角 θ 的关系曲线, 可见 K_f 随 θ 增大而减小, 当 θ 接近 $\pi/3$ 时 K_f 就接近 1.1.

4 断续电流波形系数的估算

三相全控桥整流电路在纯电阻负载(即图 1(a)) 中 $L = 0, E = 0$ 下, 控制角 α 处于 $\pi/3 < \alpha < 2\pi/3$ 区间电路的整流电流是断续的. 该电流波形系数 $K_{f.R}$ 可用下式计算:

$$K_{f.R} = \frac{\frac{3}{3}\pi}{\frac{3}{3}\pi} \frac{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{4} \sin 2 \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right]}{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\theta}{2} + \frac{1}{4} \sin(-2\theta) \right]} \frac{1}{1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right)} = \frac{1}{1 + \cos(\pi - \theta)}$$

(18)

式中导通角 $\theta = 2\pi/3 - \alpha$, $K_{f.R}$ 与 θ 之间的关系如下所列:

θ	10°	20°	30°	40°	50°	55°	60°
$K_{f.R}$	2.827	1.996	1.625	1.403	1.25	1.188	1.134

在图 3 画出 $K_{f.R} = f_R(\theta)$ 的关系曲线(以小圆和虚线表示), 并将表 4 中各点的电流波形系数值以实点标出, 实点与虚线很接近. 同时在表 4 中也给出相关的 $K_{f.R}$ 值, 它与 K_f 的偏差均在 $\pm 5\%$ 左右, 可见用 $K_{f.R}$ 作为 K_f 的估算值是可行的.

这一结果与作者在文^[2]中研究单相晶闸管全控桥整流电路、电势负载下整流电流波形系数与导通角关系的结论是一致的, 即波形系数 K_f 直接由导通角 θ 所决定, 无需关注控制角 α 、平波参数 $\text{tg}\varphi$ 和电势值 ϵ 等的组合情况.

5 结论

当三相晶闸管全控桥式电路的整流电流处于断续状态或断续-连续边界状态下, 电流波形系数 K_f 直接由导通角 θ 来决定, 知道 θ 角就可按式(18)来估算 K_f 值, 与整流电路的控制和负载性质的参数 $\alpha, \text{tg}\varphi, \epsilon$ 组合无关.

整流电流连续后, 再增大平波电感 L 或相应增大 $\text{tg}\varphi$ 对电路的整流电流平均值大小没有影响. 整流电路的平波电感 L 并不充分大时, 只要能维持电流连续, 网侧电流有效值 I_2 可按 $1.1 \times 0.816I_d$ 估算.

以上结论已在作者的实际工作中得到证实.

[参考文献]

- [1] 黄俊. 半导体变流技术(第二版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986
 [2] 王耀德. 电流断续的波形系数计算和分析[J]. 南京动力高等专科学校学报, 2000, (1)

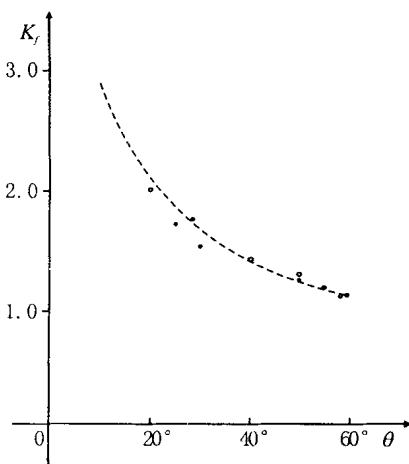


图 3 断续电流波形系数 K_f 与导通角 θ 的关系曲线

Estimate for current Wave Factor in Three-Phase Full-controlled Rectifier

Wang Yaode

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, 210042, PRC)

Abstract: In this paper the calculation of current wave factor in three-phase thyristor full-controlled rectifier with emf load is discussed, with the calculated data given. Besides a simple and practical approach to the estimate of current wave factor in three-phase rectifier is presented.

Key words: three-phase rectifier; current wave factor; thyristor

[责任编辑: 刘健]