

一种计算晶闸管反向恢复电流参数的新方法

魏伟 李黎

(武汉城市建设学院6系, 武汉 430074)

摘要 本文从一组反向恢复电荷曲线和一组反向能耗曲线出发, 给出了晶闸管关断模型反向恢复参数的一种新的计算方法。此方法的计算误差在 di/dt 和 I_F 较宽的变化范围内, 较其它的传统方法小得多。因此, 此方法具有一定的实际应用价值。

关键词 晶闸管; 关断模型; 电流参数; 反向恢复

1. 前言

对含有晶闸管的模拟电路, 迄今已提出了各种晶闸管模型^[1,2]。然而, 大多数晶闸管关断模型有内部正反馈回路, 存在着收敛性问题。此外, 计算误差也较大。因此, 我们在建立晶闸管的关断模型时, 应考虑各种因素的影响, 如果模型良好应是无收敛性问题的。

文献[3]中提出的晶闸管关断模型, 它通过实验获得存储时间 t_s 与反向恢复时间 t_{rr} 之比约为 0.6。显然, 此值对不同的模拟电路实际上有着较大的差别。因为它仅考虑了数据表中给出的一组反向恢复电荷曲线, 而忽略了另一组重要曲线, 即反向能耗曲线。

2. 晶闸管关断模型

图1给出了1个典型的晶闸管关断模型的特性曲线。在 $t = T_1$ 时, $i_{Th} = 0$, 即晶闸管电流为零; 当 $t = T_2$ 时, $i_{Th} = I_{RM}$, 即晶闸管反向电流达到最大值。存储时间 $t_s = T_2 - T_1$ 。在存储时间内, 设 $di/dt = \text{常数}$, $t > T_2$ 为晶闸管的反向恢复特性, 并且电流 i_{Th} 以时间常数 τ 按指数规律变化; 当 $t = T_3$ 时, $i_{Th} = 10\% I_{RM}$ 。此恢复曲线可用2个时间常数很好地逼近, 但仅用1个时间常数经简化后仍能够较好地逼近。此时间间隔 $T_3 - T_1$ 称为反向恢复时间 t_{rr} (即 $t_{rr} = T_3 - T_1$)。

在给定结温(T_J)下, 晶闸管制造厂家通常提供一组反向恢复电荷 Q_{rr} 曲线作为 di/dt 和 I_F 的函数, 如图2所示。 di/dt 为晶闸管电流变化率, 而 I_F 为晶闸管正向峰值电流。由图1, 有

$$Q_d = I_{RM} t_s / 2, \quad t_s = T_2 - T_1 \quad (1)$$

$$Q_i = \int_0^{\infty} I_{RM} \exp(-t/\tau) dt = \tau I_{RM} \quad (2)$$

1992.05.15 收到, 1992.10.19 定稿。

魏伟 男, 1956年生, 工程师, 现从事建筑电气专业教学工作。
李黎 男, 1961年生, 助理工程师, 现从事电化教学工作。

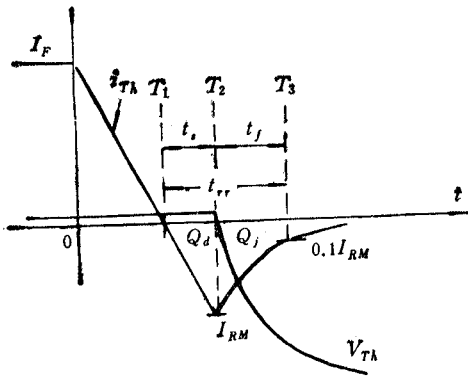


图1 晶闸管关断特性曲线

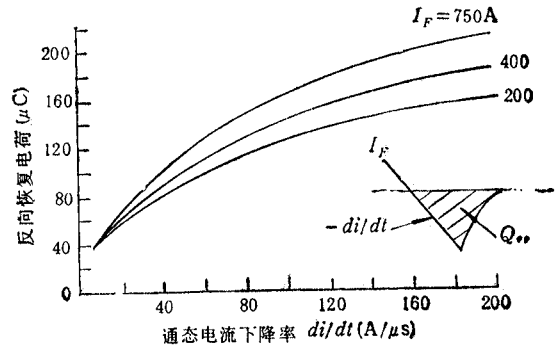


图2 典型恢复电荷 ($T_J = 125^\circ\text{C}$)

因此

$$Q_{rr} = Q_d + Q_j = I_{RM}(t_s/2 + \tau) \tag{3}$$

式中 Q_d, Q_j 为存储电荷。另一方面

$$I_{RM} \exp(-t_f/\tau) = 0.1I_{RM}, \quad t_f = T_3 - T_2 \tag{4}$$

式中 t_f 为晶闸管位降时间。因此

$$\tau = t_f / \ln 10 \tag{5}$$

又有

$$I_{RM} = t_s di/dt \tag{6}$$

把(5)和(6)式代入(3)式, 可得

$$Q_{rr} = t_s^2 (0.5 + T/\ln 10) di/dt \tag{7}$$

在这里

$$T = t_f/t_s \tag{8}$$

文献[4]数据表中给出的另一组重要曲线为反向能耗 E_r 。在给定结温下, E_r 为 di/dt 和 I_F 的函数, 如图3所示。

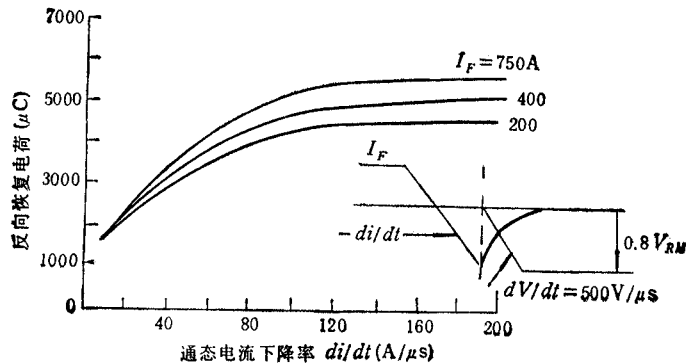


图3 典型反向能耗 ($T_J = 125^\circ\text{C}$)

D_{VT} 为晶闸管阳极到阴极电压的 dV/dt , V_{RM} 为晶闸管重复截止峰值电压。 D_{VT} 和 V_{RM} 的数值通常由数据表中给出。假设 dV/dt 达到 $80\% V_{RM}$, 那么晶闸管反向能耗 E_r (图4) 可由下式表示:

$$E_r = \int_0^{t'} I_{RM} \exp(-t/\tau) D_{VT} dt + \int_{t'}^{\infty} I_{RM} \exp(-t/\tau) 0.8 V_{RM} dt \tag{9}$$

把 $i' = 0.8V_{RM}/D_{VT}$ 代入上式可得

$$E_r = I_{RM}D_{VT}\tau^2[1 - 0.8V_{RM}/\exp(\tau D_{VT})] \quad (10)$$

可把 E_r 看作是 I_{RM} 和 τ 的函数,并且由(5),(6)和(8)式可知, I_{RM} 和 τ 都与 t_s 和 T 有关. 因此,可把 Q_{rr} 和 E_r 都看作是 t_s 和 T 的函数.

由于 t_s 和 T 都依赖于 di/dt 和 I_F ,我们假设其函数形式为

$$t_s = t_{s_0}(di/dt)^{k_1}I_F^{k_2} \quad (11)$$

$$T = T_0(di/dt)^{k_3}I_F^{k_4} \quad (12)$$

我们想找出一组数值 ($t_{s_0}, k_1, k_2, k_3, k_4, T_0$), 以便按(7)和(10)式计算 Q_{rr} 和 E_r , 并且在 di/dt 和 I_F 较大变化范围内, 求出此模型误差最小的曲线. 对任一给定的晶闸管, 一旦决定了这一组数值, 就能计算出晶闸管电路模型参数 t_s 和 T (或 I_{RM} 和 τ). 因此有

$$I_{RM} = t_{s_0}(di/dt)^{1+k_1}I_F^{k_2} \quad (13)$$

$$\tau = t_{s_0}T_0(di/dt)^{k_1+k_3}I_F^{k_2+k_4}/\ln 10 \quad (14)$$

3. 参数的提取

按以上所述,我们的目的是尽量减小数据表中读出的 Q_{rr} 和 I_F 的误差. 并且它们是按照(7)和(10)式来计算的. E_R 函数定义为两组曲线上许多点的权重平方误差总和. 即

$$E_R = \sum_{i=1}^m w_i [Q_{rr}(i) - Q'_{rr}(i)]^2 + \sum_{j=1}^n w_j [E_r(j) - E'_r(j)]^2 \quad (15)$$

这里 w_i 和 w_j 是权重系数,而 m 和 n 是在两组曲线上采集的数据点数目.

(11)和(12)式把 $k_1, k_2, k_3, k_4, t_{s_0}$ 和 T_0 看作变量, David-Fletcher-Powell 方法^[5]通常采用减小 E_R 的方法. 图 5 给出了一个计算步骤最少的简化流程图. 这是个重复过程, 它一直继续到满足下列条件

$$|1 - E_R^k/E_R^{k+1}| \leq \epsilon \quad (16)$$

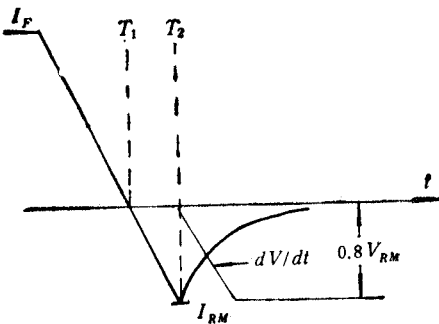


图 4 为计算反向能耗假定的关断特性曲线

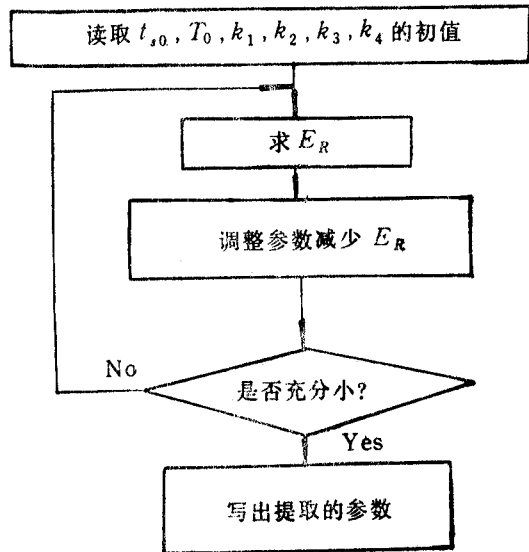


图 5 简化流程图

为止. 式中 E_R^k 和 E_R^{k+1} 是 E_R 在 k 和 $k+1$ 次分别迭代的数值, 而 ϵ 是一给定的小数.

4. 计算结果

表 1 展示了 3 个系列晶闸管所提取的 6 个参数, 它们是通过提取参数法获得的. 表

1 也同时给出了 Q_{rr} 和 E_r 的最大误差。由表 1 我们可看出, 对 3 个系列晶闸管的计算, 在 di/dt 和 I_F 较大的变化范围内, Q_{rr} 和 E_r 的最大误差均小于 8%。与此对照, 如采用文献[1]的方法计算, 晶闸管的反向能耗 E_r 的最大误差将高达 125%。

表 1 提取的参数和最大误差

装置模型	电压范围 (V)	$t_{S0}(\mu s)$	k_1	k_2	T_0	k_3	k_4	最大误差(%)	
								恢复电荷	反向能耗
S18CF 系列	1600—1400	2.4938	-0.23993	0.087596	0.49313	0.063320	-0.069542	5.7	4.3
S18CF/S18CFH	800—600	1.3797	-0.24060	0.10053	0.65617	0.065627	-0.097267	5.7	5.5
S23AF/S23AFH 系列	400—200	1.2381	-0.21985	0.08302	0.80265	0.04123	-0.08495	7.4	8.0

5. 结论

在反向恢复特性时, 晶闸管关断模型的 2 个特性参数, 即反向峰值电流 I_{RM} 和时间常数 τ (或存储时间 t_S 和 $T = t_f/t_S$), 用已知的模拟电路是较容易得到的。例如, 对含有晶闸管整流器的电路来说, 此电路中晶闸管的正向峰值电流 I_F 和零电流时的 di/dt , 可用 6 个参数 $t_{S0}, k_1, k_2, k_3, k_4, T_0$ 来表示。这 6 个参数的确定, 目的是把 Q_{rr} 和 E_r 作为 I_F 和 di/dt 的函数。这些计算出的数值可适用于数据表中所给出的相应曲线。只要电路中的元件是良好的, 在 I_F 和 di/dt 较宽的变化范围内, Q_{rr} 和 E_r 的最大误差均在 8% 以内。因此, 此模拟电路将会达到较令人满意的结果。

参 考 文 献

- [1] S. L. S. Jacoby et al., Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems, Prentice-Hall, (1972), Chap. 3.
- [2] F. M. Matheson et al., IEEE Trans. on IA, IA-12(1976)6, 305—310.
- [3] G. N. Revankar, P. K. Srivastava, IEEE Trans. on IECEI, IECEI-22(1975)7, 507—510.
- [4] R. L. Avant et al., International Rectifier Data Sheets, International Rectifier, McGraw-Hill, (1984), pp. 161—165.
- [5] D. Y. Chen, F. C. Lee, Westcode Data Sheets, Westcode, McGraw-Hill, (1985), Chap. 6.

A NEW METHOD FOR CALCULATING THYRISTOR REVERSE RECOVERY CURRENT PARAMETERS

Wei Wei Li Li

(Wuhan Urban Construction Institute, Wuhan 430074)

Abstract Based on a set of reverse recovery charge curves and a set of reverse energy loss curves, a new method for calculating the reverse recovery current parameters of the thyristor turn off model is given. In a wide range of di/dt and I_F , the error of this calculating method is less than that of the other traditional methods. Therefore, this method has certain value for actual applications.

Key words Thyristor; Turn off model; Current Parameters; Reverse recovery