

高电压大电流晶闸管组件的热特性

张星汝, 冯冰洋, 刘俊, 李元晟, 肖豪龙, 张梦瑜, 何孟兵

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 晶闸管具有控制特性好、寿命长、噪声小等优点, 目前在脉冲功率技术应用中, 利用大功率晶闸管代替传统气体开关是研究趋势。晶闸管在高电压、大电流、重复频率工作条件下使用, 需要对开关组件进行仔细的选型和组合。基于晶闸管的失效机理, 对晶闸管组件在高电压、大电流、高 di/dt 、高 du/dt 、重复频率工作下的发热问题进行了理论分析、仿真计算和试验研究, 对晶闸管组件在重复频率脉冲功率系统中的使用条件给出了理论依据。随着晶闸管工作电压、电流、频率增大, 晶闸管的热损耗也越大, 晶闸管的发热也越严重。为保证晶闸管安全稳定地工作, 需要结温保持在安全范围内, 不能长时间在重复频率下工作。

关键词: 高功率脉冲电源; 脉冲功率开关; 晶闸管; 热特性; 热阻抗

中图分类号: TM832

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.190346

Thermal characteristics of high voltage and high current thyristor assembly

Zhang Xingru, Feng Bingyang, Liu Jun, Li Yuansheng, Xiao Haolong, Zhang Mengyu, He Mengbing

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and New Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Thyristors have the advantages of good control characteristics, long life and low noise. At present, in the application of pulse power technology, the use of high-power thyristors instead of traditional gas switches is a research trend. Thyristors are used under high voltage, high current, and repetitive operating conditions, requiring careful selection and combination of switch components. Based on the failure mechanism of thyristors, the theoretical analysis, simulation calculation and experimental research on the heating of thyristor components under high voltage, high current, high di/dt , high du/dt and repetitive frequency are carried out. The use conditions of the thyristor components in repetitive frequency pulse power system thus have a theoretical basis. As the operating voltage, current, and frequency of the thyristor increase, the thermal loss of the thyristor increases and the heating of the thyristor becomes more serious. To ensure the safe and stable operation of the thyristor, the junction temperature needs to be kept within a safe range, and it cannot work at repetitive frequencies for a long time.

Key words: high power pulse power supply; pulse power switch; thyristor; thermal characteristics; thermal impedance

在脉冲功率装置中, 晶闸管开关器件需要承受高电压、大电流, 尤其是在重复脉冲的工作方式下, 晶闸管的发热问题不能被忽视。晶闸管的泄露电流随着温度的上升呈指数形式增大, 结温超过 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 会导致漏电流过大, 器件失去阻断能力, 产生不受门极控制的误导通, 影响器件的正常工作。当晶闸管局部温度过高, 甚至会发生晶闸管的热击穿, 造成晶闸管的损坏^[1-2]。本文针对晶闸管在重复脉冲功率下的热特性进行了实验和仿真分析。

1 热阻抗模型

晶闸管的发热与热损耗和热阻抗有关, 对晶闸管热阻抗的研究, 可以根据晶闸管的物理结构, 将每层导热物看成是热容和热阻的 Γ 型联接, 得到热阻抗模型^[3]。一维热传导微分方程组和一维电传导方程组具有相同的形式, 通过相应的参数交换, 热传导参数和电传导参数对比如表 1 所示, 根据晶闸管的热阻抗模型, 可以将热学问题转换成电学问题。

在几何位置 A 和 B 之间的热阻

收稿日期: 2019-09-10; 修订日期: 2019-11-26

作者简介: 张星汝 (1996—), 女, 硕士研究生, 从事脉冲功率技术研究; 2440905234@qq.com。

通信作者: 何孟兵 (1971—), 男, 博士, 教授, 从事脉冲功率技术研究; pulhmb@hust.edu.cn。

$$R_{th(A-B)} = \frac{T_A - T_B}{P} = \frac{\Delta T}{P} \quad (1)$$

热阻抗模型的等效网络有两种,一种是福斯特模型,如图1所示,一种是考尔模型,如图2所示。热源的功率消耗用一个电流源表示,网络中的电阻和电容代表模拟系统中的热阻和热容。在已知热阻抗模型和功率损耗的情况下,根据表1的热参数和电参数对比,可以得到晶闸管的温升。福斯特模型中,热阻和热容并联, R_s 和 C_s 的成对交换不会改变整个系统的瞬时响应,参数一般在数据表中给出^[4-5]。

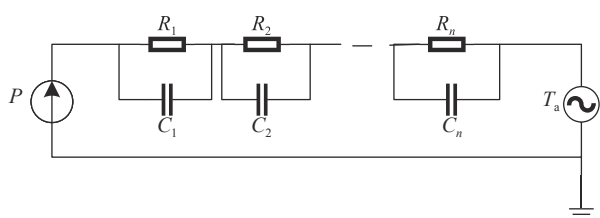


Fig. 1 Foster model

图1 福斯特模型

表1 电传导参数和热传导参数对比
Table 1 Comparison of electrical conduction parameters and heat transfer parameters

electrical parameters	thermal parameter
voltage $U(V)$	temperature difference $\Delta T(K)$
current $i(A)$	thermal power $P(W)$
amount of charge $Q(C)$	heat $Q_{th}(J)$
resistance $R(\Omega)$	thermal resistance $R_{th}(K \cdot W^{-1})$
capacitance $C(F)$	heat capacity $C_{th}(J \cdot K^{-1})$

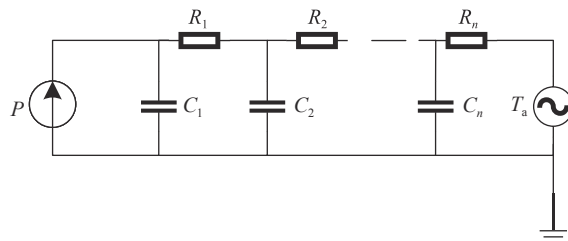


Fig. 2 Cauer model

图2 考尔模型

考尔模型中,热容由模型中的每个节点连接到地电位,如果系统中产生了功率损耗,节点温度将升高,热能储存在这些热容中,存储的能量和温差成正比,这个网络正确反映了物理事实,内部节点可以解释为系统的几何位置, R_s 和 C_s 的交换将改变系统的瞬态响应^[2]。

2 晶闸管热特性实验测试和仿真分析

晶闸管的热特性和晶闸管的热损耗和热阻抗有关。由于晶闸管的漏电流很小,可以忽略晶闸管在阻断情况下的损耗,因此晶闸管的热损耗主要来自晶闸管的通态损耗和开关损耗。当晶闸管关断时,由于反向并联了续流二极管,晶闸管两端电压很小且反向电流小,则可以忽略晶闸管的关断损耗。因此通过测量晶闸管开通和通态时的电压电流,可以计算得到晶闸管的开通热损耗和通态热损耗。为了建立晶闸管的热等效电路,本文以一组串联晶闸管组件作为实验对象,研究其在重复频率工作情况下的热特性。

2.1 实验过程

实验原理图如图3所示, U_s 为高压电源,脉冲功率开关由晶闸管和反向并联的续流二极管组成,T为脉冲变压器。工作原理如下:高压电源 U_s 正常工作,驱动电路使晶闸管导通,电容 C_1 为50 μF ,通过脉冲变压器T向电容 C_2 放电,电容 C_2 连接陡化间隙和负载,负载为水间隙,当没有驱动信号,且流过晶闸管的电流过零时,晶闸管反向关断,脉冲发生装置停止工作。触发信号频率为5 Hz。

本文采用的晶闸管开关由三个耐压4 500 V,平均电流2 700 A的晶闸管串联组成,且反向并联了续流二极管、静态均压电路和动态RC均压电路^[6],如图4所示。

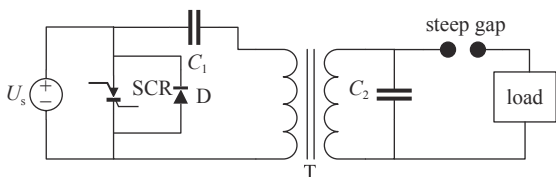


Fig. 3 Pulsed power generator structure

图3 脉冲功率发生装置结构

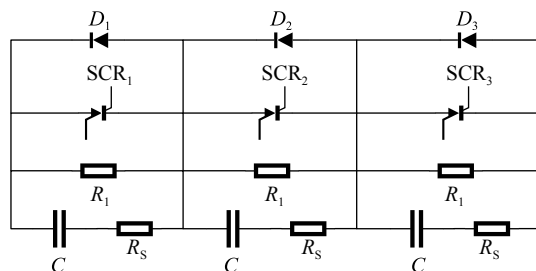


Fig. 4 Thyristor switch connection

图4 晶闸管开关连接

为测量晶闸管的通态损耗,分别在3,4和5 kV工作电压下,测量开关组件上的电流,在不同电压下的放电的电流波形如图5所示。由于在4 kV和5 kV工作电压下,负载水间隙击穿,负载等效电阻变化,从而导致与3 kV工作电压时的电流波形的相位差异^[7-8]。但这并不影响我们对晶闸管通态损耗的计算。图6为晶闸管触发开通时的

电压电流波形。

2.2 实验数据分析

计算晶闸管的通态损耗,还需要得到晶闸管的通态压降。晶闸管开关组件工作在几 kV 的电压下,通态压降只有几 V,在开关工作状态下无法通过实验准确测量晶闸管的导通压降^[9-10]。晶闸管的通态压降随着电流的增大而增大,随着结温的上升而减小,通态压降的减小会导致晶闸管的耗散功率减小^[2]。通态压降和流过电流的关系由晶闸管厂家给出,如图 7 所示。

晶闸管的触发信号的频率保持 5 Hz 不变。根据实验测得的电流波形和通态压降曲线,积分可以得到一次放电晶闸管通态热损耗,晶闸管没有在第一个谐振周期内关断,一次放电导通时间大约为 1 ms。在热等效电路中,可以将晶闸管的通态热损耗等效成一个 5 Hz, 占空比为 0.5% 的方波电流源。晶闸管开通电压电流波形如图 6 所示,晶闸管开通时间大约为 4.5 μs ,其中电压电流重合的时间为 3.6 μs ,晶闸管的开通热损耗由触发开通的电压电流积分计算得到。在热等效电路中,可以将晶闸管的开通热损耗等效成一个 5 Hz, 脉宽为 3.6 μs 的方波电流源。

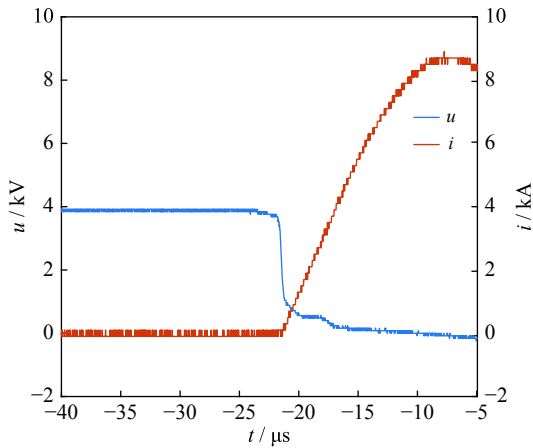


Fig. 6 Thyristor triggering on voltage and current
图 6 晶闸管触发导通电压电流

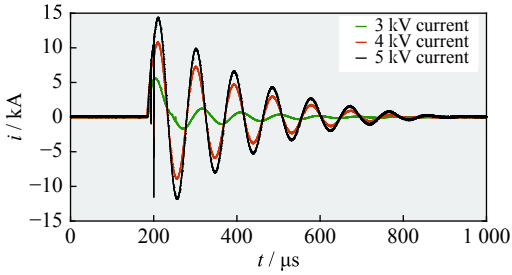


Fig. 5 Thyristor switch current at different voltages
图 5 不同电压下的晶闸管开关电流

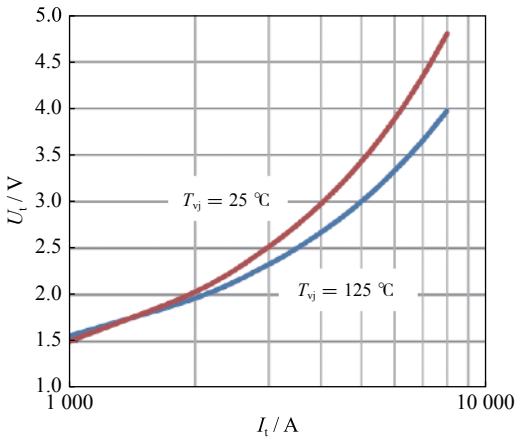


Fig. 7 Thyristor conduction voltage drop
图 7 晶闸管导通压降

2.3 晶闸管热等效电路仿真分析

以 Matlab 中的 Simulink 为软件仿真平台,建立晶闸管的热等效电路模型,采用福斯特模型进行热等效电路的仿真,厂家提供的晶闸管的热阻抗参数如表 2 所示。

晶闸管的热损耗根据上个小组的实验结果计算整理得出,将 3 kV, 4 kV 和 5 kV 的热损耗代入热等效电路,可以得到晶闸管壳结之间的温升,如图 8 所示。

表 2 晶闸管热阻抗参数	
Table 2 Thyristor's thermal impedance parameters	
thermal resistance $R_{th}/(\text{K} \cdot \text{W}^{-1})$	heat capacity $C_{th}/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$
2.06	0.777 00
1.60	0.169 00
0.76	0.034 00
0.08	0.006 75

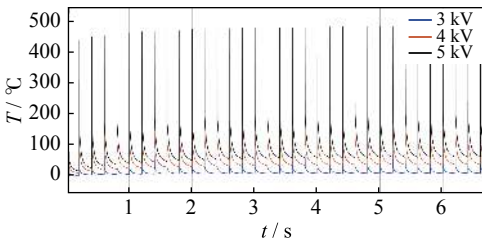


Fig. 8 Simulation results of thermal equivalent circuit
图 8 热等效电路仿真结果

根据仿真结果,晶闸管的壳和结之间的温差在 4 s 之后呈周期性变化,最大的温差和稳定温差如表 3 所示。

在晶闸管结温和壳温未达到热平衡的情况下,功率器件表面温度不是恒定的。芯片边缘的温度比芯片内中心的温度要低,热通量不仅可以垂直向散热器传播,也可以远离芯片中心传播,以上实验和仿真用到的数据都是有效结温 T_{vj} , 是实际温度分布的平均值,实际芯片上可能还会出现更高的温度。

表 3 热等效电路仿真结果

Table 3 Simulation data of thermal equivalent circuit

voltage/kV	maximum temperature difference/℃	stable temperature difference/℃
3	71.9	9.13
4	292.7	37.35
5	484.6	61.55

3 晶闸管壳温测量

热等效电路得到的结果是壳和结之间的温差,要得到晶闸管的结温必须要测量晶闸管的壳温 T_c ,测量环境温度 T_a 为 26 ℃,记录晶闸管在放电前和放电结束时的壳温,晶闸管没有散热装置,自然冷却,晶闸管的热阻抗参数由厂家提供,如表 2 所示。用热电偶测量晶闸管中心的壳温 T_c ,由于热电偶的瞬态响应时间为 100 ms 或者 100 ms 以上,不能用来测量功率模块快速的温度变化,所测量的壳温处于热平衡状态。保持晶闸管的触发信号的频率 5 Hz 不变,触发信号脉宽为 200 μ s,放电结束时,用热电偶测量不同电压和工作时间下晶闸管的壳温。再通过仿真得到的壳温和结温的温差,得到结温的最大值和稳定值,整理得到实验数据如表 4 所示。

表 4 热平衡壳温

Table 4 Heat balance shell temperature

voltage/ kV	duration/ min	initial shell temperature/℃	final shell temperature/℃	shell temperature rise/℃	minimum junction temperature/℃	maximum junction temperature/℃	single average temperature rise/℃
3	1	20.8	23.2	2.4	32.30	95.1	0.008 0
3	3	22.0	26.2	4.2	36.33	99.1	0.004 7
3	5	23.0	30.2	7.2	39.33	102.1	0.004 8
4	1	22.2	27.1	4.9	64.45	319.8	0.016 3
4	3	24.7	35.5	10.8	72.85	328.2	0.012 0
5	1	23.4	29.9	6.5	91.45	514.5	0.021 7

当在 5 kV 实验时,由于导通电流增大,晶闸管关断延时增加,导致电源保护停机,因此只得到了晶闸管工作一分钟的温升数据。

根据实验测量结果可以得到,在相同工作电压下,测量得到的壳温随着放电时间增大而增大。热电路仿真结果显示,随着实验时间的增长,晶闸管的结温会迅速升高。且由于晶闸管的导通压降会随着晶闸管的结温升高而减小(如图 7 所示),导致导通热损耗减小,温升减小,最终单次放电的平均温升应该随着放电时间的增大而减小。实验得到的单次放电的壳温平均温升基本符合这个规律,在 3 kV 电压下 3 min 和 5 min 不符合的原因可能是实验温度测量误差导致的。

4 结 论

本文在实验的基础上,对晶闸管在高电压、大电流、重复频率工作条件下的发热特性进行了研究,通过晶闸管的热阻抗等效电路和壳温的测量,得到晶闸管在重复频率情况下的结温。晶闸管的最大结温在脉冲功率电路中可以达到 500 ℃,但是稳定结温需要控制在 125 ℃ 以内。为保证晶闸管安全稳定的工作,需要结温保持在安全范围内,不能长时间在重复频率下工作。已知晶闸管的壳温和结温的差,可以通过测量壳温,得到近似的结温,保证晶闸管工作在安全范围内,当壳温达到临界温度时,需要停止工作。在本文的工作条件下,频率 5 Hz, 3 kV 的管壳临界温度为 115.87 ℃,能连续工作 48.3 min; 4 kV 的管壳临界温度为 87.65 ℃,能连续工作 24.3 min; 5 kV 的管壳临界温度为 63.45 ℃,能连续工作 9.76 min。本文中的晶闸管没有加散热装置,下一步将会研究晶闸管加上散热装置之后的重复频率运行的发热情况,连续工作时间应该可以提高。不同的电路和不同型号的晶闸管的发热情况不同,工作电压、电流、频率越高时,晶闸管的热损耗也越大,晶闸管的发热也越严重。

参考文献:

- [1] 尉健翔, 张金友. 散热对晶闸管使用寿命的影响[J]. 电子元器件应用, 2001(3): 26-27. (Wei Jianxiang, Zhang Jinyou. Effect of heat dissipation on the service life of thyristors[J]. Electronic Components & Applications, 2001(3): 26-27)
- [2] 卢茨 J. 功率半导体器件: 原理、特性和可靠性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013. (Lutz J.. Power semiconductor devices: Principles, characteristics and

- reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2013)
- [3] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007(19): 3-8. (Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Yin Yonghua, et al. Research on thermal impedance analysis method of high power thyristor[J]. Proceedings of the CSEE, 2007(19): 3-8)
 - [4] 杨俊, 汤广福, 曹均正, 等. HVDC阀晶闸管结温计算等效电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 156-163. (Yang Jun, Tang Guangfu, Cao Junzheng, et al. Equivalent circuit model for calculation of thyristor junction temperature of HVDC valve[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 156-163)
 - [5] 李皎明, 余岳辉, 白铁城, 等. 晶闸管的瞬态热阻抗及其结温温升的研究[J]. 微纳电子技术, 2001, 38(2): 52-55. (Li Yuming, Yu Yuehui, Bai Tiecheng, et al. Study on transient thermal impedance of thyristor and its junction temperature rise[J]. Micronanoelectronic Technology, 2001, 38(2): 52-55)
 - [6] 宋峰青. 高压变频器中晶闸管串联的均压问题[J]. 电气时代, 2004(12): 138-138. (Song Fengqing. Voltage equalization problem of thyristor series in high voltage frequency converter[J]. Electric Age, 2004(12): 138-138)
 - [7] 张适昌. 磁开关[C]//全国高功率粒子束文集: 第5卷. 绵阳: 中国粒子束加速器学会, 1995: 323-326. (Zhang Shichang. Magnetic switch[C]//Proc of National High Power Particle Beam Collection: Volume 5. Mianyang: China Particle Beam Accelerator Society, 1995: 323-326)
 - [8] Jiang J, Liu J, Liu M, et al. Design and construction of a ± 100 kV gas switch for linear transformer drivers[J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(2): 1292-1297.
 - [9] 陈旭. 高压脉冲晶闸管热特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015. (Chen Xu. Study on thermal characteristics of high voltage pulse thyristors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.)
 - [10] 董汉彬. 功率晶闸管的暂态热特性研究及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. (Dong Hanbin. Research and application of transient thermal characteristics of power thyristors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012)