

功率晶闸管的浪涌性能研究

董汉彬¹, 贾志杰¹, 王嘉易¹, 宁鑫¹, 李泳龙², 戴玲³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通态不重复浪涌电流 I_{TSM} 是晶闸管的一个重要参数, 能够反映该型号晶闸管承受故障电流的能力, 为此设计了一种能在低电压、低通态电流上升率条件下产生高浪涌电流的测试平台。通过调整平台的回路参数, 得到了被测晶闸管浪涌电流峰值和脉宽间的关系曲线, 确定了其安全工作区。

关键词: 晶闸管; 通态不重复浪涌电流; 换流阀; 脉冲功率

中图分类号: TN34 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)02-0038-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.009

Study on Surge Performance of Power Thyristor

Dong Hanbin¹, Jia Zhijie¹, Wang Jiayi¹, Ning Xin¹, Li Yonglong², Dai Ling³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Non-repetitive peak on-state current (I_{TSM}) is a key parameter of thyristor, which can indicate the short-circuit capacity. A test platform is designed to obtain high surge current under the condition of low voltage and di/dt . Plenty of tests are carried out to research the safe operation area of thyristor, and the relationship between pulse width and surge current amplitude of the tested thyristor is obtained.

Key words: thyristor; non-repetitive peak on-state current; converter valve; pulse power

0 引言

随着高压直流输电、柔性交流输电、高速铁路、脉冲功率等技术的发展与推广, IGBT、IGCT、GTO、晶闸管等功率半导体开关^[1-8]一直是研究的热点领域。其中晶闸管由于其通流能力大、耐压水平高、使用寿命长、性能稳定、控制相对简单等优点得到了广泛的应用和持续的改进。

通态不重复浪涌电流 I_{TSM} (以下简称浪涌电流) 作为表征晶闸管极限通流容量的参数, 能够反映该型号晶闸管承受故障电流的能力。一般的器件生产商仅提供工频情况(10 ms 脉宽)或者特定波形下的浪涌电流值, 而晶闸管的浪涌电流能力和浪涌脉宽密切相关。随着晶闸管应用环境的改变, 流过晶闸

管的电流波形也不是固定不变的, 仅用单个数据点来描述其浪涌电流能力, 信息十分有限。尤其对应用于变频电源、脉冲功率等非工频条件下的晶闸管, 该指标并不能有效评价晶闸管实际工况中能够承受的浪涌电流能力。

为提高晶闸管实际应用时的可靠性, 需要对其在不同脉宽下的浪涌电流性能进行研究, 得出两者的关系, 以便为晶闸管的选型提供参考和依据。

1 晶闸管的原理与结构

晶闸管是一种四层三端(A 阳极、K 阴极、G 门极)的可控型半导体器件, 共 3 个 PN 结。通常用双晶体管等效模型来进行分析, 如图 1 所示。

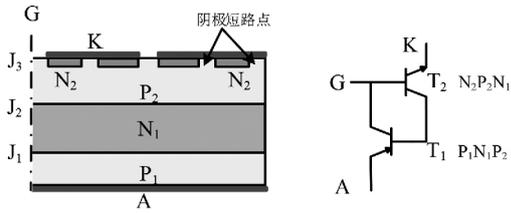


图1 晶闸管芯片结构与等效模型

功率晶闸管一般采用双面冷却的扁平圆盘形封装,又被成为冰球型封装,如图2所示。在此封装中,芯片被固定在2个钼层中间。因为两者膨胀系数接近,能够防止芯片被热应力破坏。而上下2个钼片固定在两个铜基座间。铜基座作为对外电极,并兼做散热器。管壳内充入略低于大气压的惰性气体,用以防止内部芯片被氧化^[9]。

晶闸管在开断的动态过程以及完全导通状态下都存在着电压降落,因此并不是理想开关。晶闸管工作时伴随功率损耗,生成焦耳热,当热量超过晶闸管芯片的热极限,就会损坏。一般认为晶闸管的平均耐受结温为125℃,超过这个温度晶闸管将因热损坏而失效^[10]。所以浪涌电流实际反映的是晶闸管的暂态热极限,并且和浪涌电流的脉宽相关联^[11]。

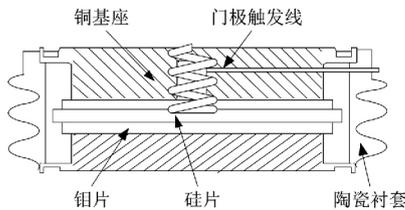


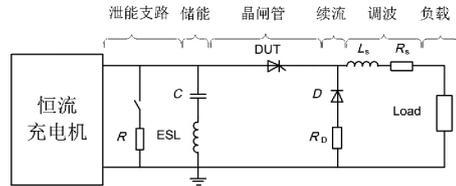
图2 冰球型封装晶闸管剖面图

2 试验平台的搭建

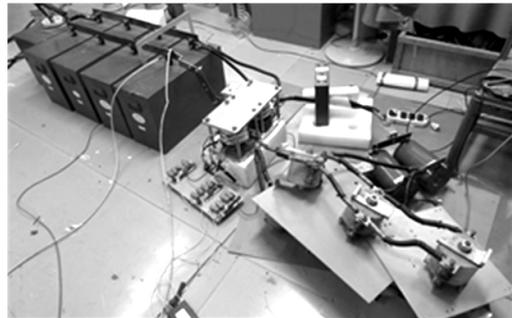
设计所使用的浪涌电流测试平台如图3所示。为避免晶闸管在进行浪涌电流能力测试时受到其他因素的影响,应该要求测试平台中晶闸管的断态重复峰值电压 V_{DRM} 、通态电流上升率 di/dt 尽量小于其额定值。并且为了降低试验成本,每次测试仅用单片晶闸管做测试,因此试验电压不能选择太高。结合上述原因,测试平台必须具备在较低电压下(远低于晶闸管额定电压)能够输出大电流的能力。

图3 a)为该测试平台电路图。根据仿真软件计算结果,图中电容器组容量为储能元件,最大值设置为5000 μF 。电感、电阻分别起到调波和阻尼的作用,其值根据所需浪涌电流的脉宽逐级调整。因为测试过程中,浪涌电流的脉宽跨度较大,续流二极管在电路中的位置也根据浪涌电流脉宽进行调整。脉宽较短的情况下,二极管支路被连接在晶闸管阴极

侧(如图3 b);脉宽较长的情况下,二极管支路被连接在晶闸管的阳极侧。为防止故障时电容器的能量无法释放,必须设计泄能装置用于释放能量。这里采用高压真空陶瓷继电器作为平台的泄能开关,水电阻作为泄能电阻。试验时由高压恒流充电机对电容器组充电,并采用 Pearson 4427 作为电流传感器。

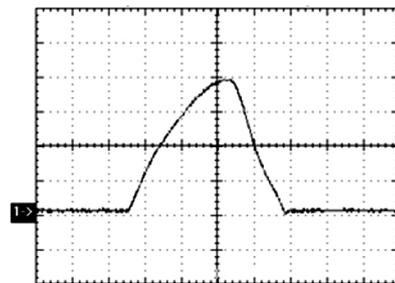


(a) 浪涌测试平台电路图

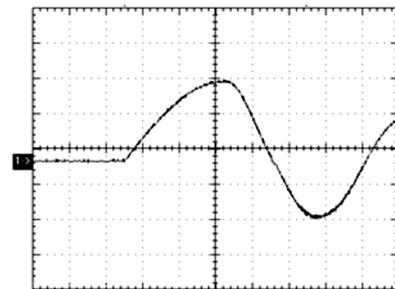


(b) 浪涌电流测试平台实物

图3 晶闸管浪涌电流测试平台



(a) 正常电流波形



(b) 损坏电流波形

图4 实验波形

因为测试平台输出的浪涌电流值与电容器组的充电电压为线性关系,所以通过调节充电机的输出电压来控制浪涌电流幅值。

短脉宽测试条件下,由于续流回路不包含晶闸管,因此可以直接根据流过晶闸管的电流波形来判断晶闸管是否已经被浪涌电流损坏。图4 a)为晶

闸管尚未损坏时的电流波形,图4 b)为晶闸管已经被浪涌损坏后的振荡电流波形,说明晶闸管已经没有阻断能力。长脉宽测试条件下,因为续流回路包含晶闸管,所以晶闸管损坏前后的电流波形没有差异,不能依靠电流波形判别晶闸管的好坏。因此必须在每次试验后对晶闸管进行一次耐压试验。

3 数据分析

利用此浪涌电流测试平台,对某型5 inch 功率晶闸管产品进行浪涌电流测试。通过调整平台充电电容器与调波电感的参数,获得了该型号晶闸管在不同脉宽下的浪涌电流,具体测试数据如表1所示。

表1 试验数据

序号	浪涌电流/kA	脉宽/ms	$I^2t/\text{kA}^2\text{s}$
1	105	13.1	144.4
2	140	7.5	147.0
3	180	3.0	97.2
4	222	1.0	49.3

试验对该型晶闸管进行了4种脉宽条件下的浪涌电流测试。从表1的数据可以看出,随着电流脉宽的减小,晶闸管的浪涌电流值是增加的,但同时晶闸管能够承受的热积分是在逐渐下降的。

由于浪涌电流试验是破坏性试验,每测试出一组浪涌电流,就要损坏一片晶闸管。为了排除其他因素的影响,此次试验采用的晶闸管为同一型号同一批次的产品。

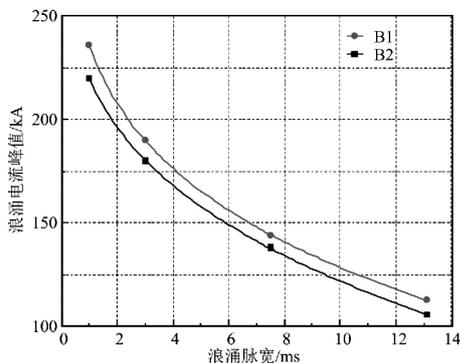


图5 某型晶闸管的安全工作曲线

根据表1的数据,将浪涌电流与脉宽的关系绘制出图5中的B2曲线,同时将各种脉宽下的损坏电流绘制出图5中B1曲线。当晶闸管工作在B2曲线左侧区域时,能够保证晶闸管不会被浪涌电流损坏。如果晶闸管的工作状态落在了B1曲线的右侧区域,则晶闸管就一定会被浪涌电流损坏。B1曲线和B2曲线之间的区域则是一个由于试验平台充电

电压分辨率导致的测试盲区。

用幂函数 $f(t) = a \cdot t^b + c$ 去拟合图5中曲线B2,可得 $a = -110.8$ $b = 0.2741$ $c = 330.1$,即

$$f(t) = -110.8 t^{0.2741} + 330.1 \quad (1)$$

对该型晶闸管,凡是符合 $f(t) - I_p \leq 0$ 的工作情况,晶闸管就可以保证不会因为浪涌电流而热损坏。



图6 被损坏的晶闸管芯片

4 结 语

通过设计低断态电压、低通态电流上升率和高浪涌电流的测试平台,测试出不同脉宽条件下晶闸管的浪涌电流。通过对试验数据分析,绘制出被测型号晶闸管的浪涌电流和脉宽的对应关系曲线。该曲线将有助于控制晶闸管使用时的安全裕量,为晶闸管的选型提供了更加全面的参考依据。

参考文献

- [1] 丁荣军,刘国友. ± 1100 kV 特高压直流输电用6英寸晶闸管及其设计优化[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5180-5187.
- [2] 钱照明,盛况. 大功率半导体器件的发展与展望[J]. 大功率变流技术, 2010(1): 1-9.
- [3] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [4] 周金明,莫正康. 可控硅技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1978.
- [5] 刘国友. IGCT-GTO技术的最新进展[J]. 半导体技术, 2000, 25(3): 9-11.
- [6] 王彩琳. 门极换流晶闸管(GCT)关键技术的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2006.
- [7] 戴玲,董汉彬,林福昌,等. 脉冲功率晶闸管的小型化[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 120-125.
- [8] 鲁万新. 脉冲晶闸管的放电特性及热特性研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2010.

(下转第75页)

可以看出靠近高压导线侧第二片、第三片绝缘子温度明显偏低,低于相邻绝缘子近 2 K,热像特征呈暗色调,根据 DL/T 664 - 2016 《带电设备红外诊断应用规范》,靠近高压侧第二片、第三片绝缘子为典型的零值绝缘子;根据 DL/T 626 - 2005 《劣化盘形悬式绝缘子检测规程》,该串绝缘子中劣化绝缘子片数较少,可不进行整串绝缘子更换。

5 结 论

1) 正常绝缘子的发热功率正比于分布电压的平方,绝缘子串的红外热像分布呈不对称的马鞍形,相邻绝缘子间温差很小。

2) 低值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏大,其热像特征表现为钢帽温度偏高,呈亮色调;零值绝缘子发热功率较正常绝缘子偏小,其热像特征表现为钢帽温度偏低,呈暗色调。

3) 现场检测结果表明,红外热像技术具有较好的可行性,能有效检测出低零值绝缘子。

参考文献

[1] 张文亮,吴维宁,吴光亚,等. 我国绝缘子的发展现状与应用前景[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 10 - 12.

[2] 谢冰. 基于红外测温的劣质绝缘子在线检测技术研究[J]. 云南电力技术, 2014, 42(4): 116 - 119.

[3] 王剑飞,邵兵,陶军. 基于红外测温法的故障绝缘子在线检测技术研究[J]. 电工技术, 2015(4): 29 - 31. [4] 祝嘉奇. 基于红外热像的劣化绝缘子诊断技术研究

[D]. 南昌:南昌大学, 2014.

[5] 陈勇,郭俊峰,鄢小均. 基于红外测温的零值和污秽绝缘子快速检测试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 191 - 194.

[6] 夏德分. 红外热像检测零值绝缘子影响因素研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.

[7] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热象特征[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 44 - 46.

[8] 姚建刚,关石磊,陆佳政,等. 相对温度分布特征与人工神经网络相结合的零值绝缘子识别方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 171 - 175.

[9] 黄军凯,曾华荣,杨佳鹏,等. 红外热像技术在低零值绝缘子检测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2013(2): 40 - 44.

[10] 陈金法. 绝缘子红外热像检测及诊断技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.

[11] 伍也凡. 基于红外检测方法的劣化绝缘子便携式带电检测系统研发[D]. 长沙:湖南大学, 2015.

[12] 周兆禹. 盘形悬式绝缘子的结构分析与优化[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2012.

[13] 国家能源局. 带电设备红外诊断应用规范: DL/T 664 - 2016[S]. 北京:中国电力出版社, 2017.

[14] 国家能源局. 劣化盘形悬式绝缘子检测规程: DL/T 626 - 2015[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.

作者简介:

何良(1987),工程师、硕士研究生,研究方向为输变电设备状态检测。

(收稿日期:2018-01-11)

(上接第 37 页)

[4] 黄子璇,席黎明,樊梦旭,等. 高压输电线下有建筑物时工频电场计算中模拟电荷设置方法的改进[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 788 - 793.

[5] Thomas A, Baginski. Hazard of Low - frequency Electro-magnetic Coupling of Overhead Power Transmission Lines to Electroexplosive Devices [J]. IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility, 1989, 31(4): 393 - 395.

[6] 王泽忠,金玉生,卢斌先. 工程电磁场[M]. 北京:清华

大学出版社, 2010: 46 - 48.

[7] Lee B Y, Myung S H, Min S W. An Effective Modeling Method to Analyze Electric Field Around Transmission Lines and Substation Using a Generalized Finite Line Charge [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1143 - 1149.

作者简介:

刘守豹(1983),博士、工程师,从事过电压及工程电磁场计算方面的工作。

(收稿日期:2017-11-05)

(上接第 40 页)

[9] 维捷斯拉夫·本达,约翰·戈沃,邓肯 A·格兰特. 功率半导体器件——理论及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.

[10] Taylor P. D. 著,庞银锁译. 晶闸管的设计与制造[M]. 北京:中国铁道出版社, 1992.

[11] 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.

作者简介:

董汉彬(1987),硕士、工程师,研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期:2018-01-08)