

# 功率晶闸管的热敏特性研究

董汉彬<sup>1</sup>, 贾志杰<sup>1</sup>, 王嘉易<sup>1</sup>, 宁鑫<sup>1</sup>, 李泳龙<sup>1</sup>, 张明丽<sup>2</sup>, 余丰<sup>3</sup>  
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;  
2. 东方电气(成都)工程设计咨询有限公司, 四川 成都 611731;  
3. 国网杭州供电公司, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 功率晶闸管的诸多电气参数以及使用寿命都和其运行温度相关。研究功率晶闸管结温对提高其性能和可靠性具有重要的实际意义。研究了功率晶闸管通态压降和结温之间的关系, 并设计试验测得待测功率晶闸管的热敏曲线。在实际应用中, 通过该曲线可将功率晶闸管的运行结温由相对容易测量的通态电压来表征, 进而为运行中功率晶闸管的状态监测提供重要依据。

**关键词:** 功率晶闸管; 结温; 换流阀

中图分类号: TN34 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)05-0054-02

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.05.011

## Research on Thermal – sensitive Performance of Power Thyristor

Dong Hanbin<sup>1</sup>, Jia Zhijie<sup>1</sup>, Wang Jiayi<sup>1</sup>, Ning Xin<sup>1</sup>, Li Yonglong<sup>1</sup>, Zhang Mingli<sup>2</sup>, Yu Feng<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;  
2. DongFang Electric (Chengdu) Engineering & Consulting Co., Ltd., Chengdu 611731, Sichuan, China;  
3. State Grid Hangzhou Electric Power Supply Company, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

**Abstract:** Many electrical parameters and lifetime of thyristor are related to its junction temperature. Research on junction temperature of thyristor will help a lot in its capability and reliability. The relationship between on – state voltage and junction temperature is studied. And some experiments are carried out to obtain the thermal – sensitive curve. According to this curve, the junction temperature can be measured with its on – state voltage. In addition, the proposed method will help to evaluate the condition of thyristor.

**Key words:** power thyristor; junction temperature; converter valve

## 0 引言

随着脉冲功率技术的发展, 晶闸管作为闭合开关在该领域也得到广泛应用。作为核心器件之一, 晶闸管的状态也直接关系到系统的正常运行<sup>[1-3]</sup>。微观研究和实际应用表明<sup>[4]</sup>, 晶闸管的电气性能、使用寿命等参数均和其结温有着很大的关系。因此研究晶闸管各种工况下的结温不仅有助于优化改善晶闸管的性能, 而且对提高其可靠性也具有重要的意义。

由于晶闸管不是理想开关, 当其被触发导通后<sup>[5-6]</sup>, 正向电流会在 PN 结中产生焦耳热, 并且热量不会立即传递给封装中的铝片和铜基座, 所以晶

闸管的外壳温度并不等于其结温。这就导致晶闸管的结温无法从外部测量。目前, 分析和研究其结温的主要手段有热阻抗法、有限元分析法、扫描电镜、红外光谱法等<sup>[2, 4]</sup>。由于功率晶闸管在测量中存在封装复杂、额定电流高等实际情况, 上述方法都存在一定的局限性。下面讨论一种通过功率晶闸管的热敏参数来反映结温的方法。

## 1 晶闸管的热敏特性

晶闸管是一种具有 3 个 PN 结的功率半导体器件<sup>[7-8]</sup>, 而 PN 结的很多特性参数都对温度敏感, 随着温度的变化而变化。因此可以通过测量 PN 结的某些特征参数和温度之间的关系来反映 PN 结的温

度,进而获得运行状态下晶闸管芯片的结温。

由文献可知,单个PN结的通态压降具有负温度特性,并且其通态压降随着PN结温度的升高在一定温度范围内呈现线性的下降。单个PN结的正向电流 $I_f$ 和通态电压 $U_f$ 具有式(1)所述的关系:

$$I_f = I_0 \left( \exp\left(-\frac{qU_f}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

式中: $k$ 为玻尔兹曼常数, $1.3806505 \times 10^{-23}$  J/K; $q$ 为电子的电荷量, $1.602192 \times 10^{-19}$  C。 $T$ 为热力学温度; $U_f$ 为通态压降; $I_0$ 为PN结的反向饱和电流。 $I_0$ 的表达式为

$$I_0 = AT^3 \exp\left(-\frac{qU_{g0}}{kT}\right) \quad (2)$$

式中: $A$ 为一个与温度无关的常数; $U_{g0}$ 为半导体材料的禁带宽度。

将式(2)代入式(1),两边同时取对数整理可得式(3)。

$$U_f = \left( \frac{k}{q} \ln \frac{I_f}{A} \right) T + U_{g0} - \frac{3k}{q} T \ln T = U_1 + U_{nl} \quad (3)$$

式中: $U_1 = \left( \frac{k}{q} \ln \frac{I_f}{A} \right) T + U_{g0}$ ;  $U_{nl} = -\frac{3k}{q} T \ln T$ 。

式(3)描述了PN结的通态压降、正向电流、结温三者之间的关系。可以看出,当 $I_f$ 为恒流时,通态压降只与PN结的温度相关。易知当 $T=0$ 和 $T=1$ 时, $U_{nl}=0$ 。对 $U_{nl}$ 表达式求导可得式(4)。

$$U_{nl}' = \left( -\frac{3k}{q} T \ln T \right)' = -\frac{3k}{q} (1 + \ln T) \quad (4)$$

易知当 $T=1/e$ 时, $U_{nl}$ 存在一个极值点且为极大值。

$U_{nl}$ 与 $T$ 的关系如图1所示,在图中的高温区和低温区, $U_{nl}$ 随 $T$ 的变化非线性很强;而在中温区两者则趋向于线性关系。

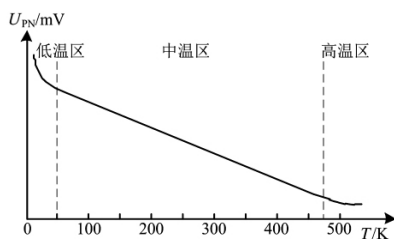


图1 硅PN结的典型 $U-T$ 特性曲线

实际应用中,硅半导体元件的工作极限温度为473 K,在图1位于中温区,因此可以利用式(3)研究其特性。

## 2 热敏特性的测试

设计并搭建了如图2所示的实验平台对功率晶闸管的热敏特性进行测试。待测功率晶闸管为某型5 in 冰球型封装功率晶闸管,其额定电流为2200 A。测试电流 $I_f$ 在取值时既要保证功率晶闸管能够完全开通,又要尽量减少其自身导致的附加发热。根据文献[6]可知,当 $I_f=20$  A时,可认为功率晶闸管芯片已经充分导通且远小于额定电流,因此,平台中采用了一台20 A的恒流源提供式中的 $I_f$ 。

实验时,用烘箱将待测功率晶闸管逐级加热至不同的目标温度,经过足够长时间达到热平衡后触发功率晶闸管使其导通,测量其在20 A恒定电流下(热敏电流)的通态压降 $U_f$ (由图2中a、b端点引出)。将获得的通态压降与对应温度关系绘制成曲线,即热敏特性校准曲线(简称热敏曲线)。

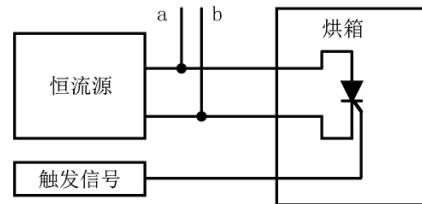


图2 实验平台示意

## 3 数据分析

图3为本次实验获得的某型功率晶闸管的热敏曲线。

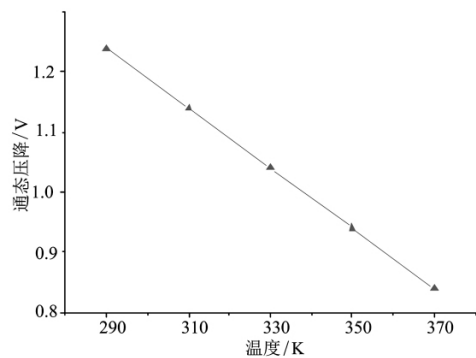


图3 待测功率晶闸管在20 A时的热敏曲线  
通过图3可知,该区间内热敏曲线的线性度较好,拟合出式(5)。

(下转第85页)

避免了因多次电话联系导致的信息失真风险和战机延误问题,同时有效梳理主配电网电网信息,切实提高了应急处置的可靠性和及时性。

## 6 结 语

多级联合调控管理体系适用于各地、县公司开展大型重要活动的调度保电工作,特别是对于保电场馆多、保电范围大的场合。调度业务前移,建立现场保电指挥中心模式,适用于大型重要保电活动中活动主会场保电工作。

在大型重要活动保电期间,应用多级联合调控管理体系,开展省、地、县三级调度联合值班,构建信息共享、处置会商、统一决策的三级联合调度防线,能有效提高保电期间调度应对保电时期突发电网事件、设备紧急缺陷、保电临时升级、电网电压异常调整等工作的信息交互和快速响应能力,通过联合调度,最大限度、最高优先等级确保重要用户供电万无一失。

### 参考文献

[1] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.  
 [2] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.  
 [3] 刘振亚. 中国电力与能源 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

(上接第55页)

$$T_j = \Delta U_r \cdot M + T_{j0} = -200\Delta U_r + 531.04 \quad (5)$$

由式(5)可以通过功率晶闸管的通态压降得出该状态下的稳态结温。

## 4 结 语

对待测功率晶闸管的热敏特性进行研究,通过设计的试验平台对其热敏性能进行了测试,并绘制出试品在20 A恒定电流时的热敏特性曲线,拟合出功率晶闸管温度与通态压降的表达式。获得的实验趋势与理论一致,为后期测量功率晶闸管通态压降获得其暂态结温打下基础。

在后续研究中将通过搭建更大容量的实验平台,来测定实际工程中额定工况下的温敏曲线。以此获得运行中功率晶闸管的结温,进而达到监测功率晶闸管运行状态的目的。

### 参考文献

[1] 丁荣军, 刘国友. ±1100 kV 特高压直流输电用6英寸

[4] 曹国卫. 加强重大活动保供电工作的思考[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(3): 72-73.  
 [5] 彭选辉, 马兴龙, 莫宝律, 等. 浅析供电企业保供电工作的常态化管理[J]. 电力安全技术, 2015, 17(10): 6-9.  
 [6] 田新利. 大型发电公司保电期间应急处置基本原则与程序探讨[J]. 电力安全技术, 2010, 12(4): 6-8.  
 [7] 吴文传, 张伯明, 曹福成, 等. 电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 1-6.  
 [8] 杜兆斌, 陈曾, 管霖, 等. 移动保供电电源储能电池优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 215-221.  
 [9] 陈晟. 电能质量与供电可靠性关系分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 99-103.  
 [10] 汤军, 张弛, 姜芸, 等. 世博供电保障管理系统的研究及应用[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 584-587.  
 [11] 陈展纶, 王毅. 重点地区及用户保供电工作分类策略研究[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(5): 58-63.  
 [12] 王红, 刘明峰, 刘明. 信息安全评估在青岛重大活动电力保障中的应用[J]. 电力信息化, 2009, 7(3): 32-36.  
 [13] 陈靓. 重大活动电力保障措施探讨[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(5): 51-54.  
 [14] 杨翮, 王坚俊, 楼华辉, 等. “三公”调度筑牢电力发展基石[J]. 中国电力企业管理, 2017(10): 84-85.

作者简介:

杨翮(1987), 博士、高级工程师, 主要从事电力系统调度监控工作, 研究领域包括电网调控运行、电力系统状态估计、新能源接入及消纳管理等。

(收稿日期: 2018-05-09)

晶闸管及其设计优化[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5180-5187.

[2] 胡永银, 李兴源, 李宽. 晶闸管结温计算方法综述[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1881-1886.  
 [3] 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.  
 [4] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的探讨[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 1-6.  
 [5] 彭勇殿, 李世平, 黄建伟, 等. 高压直流输电系统故障电流下晶闸管的温升计算[J]. 交流技术与电力牵引, 2008(1): 20-23.  
 [6] 秦贤满. 电力半导体器件结温的计算和测试[J]. 电气应用, 1995(4): 22-24.  
 [7] 聂代祚. 电力半导体器件[M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.  
 [8] W. 格尔拉赫著, 卞抗译. 晶闸管[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.

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: 2018-06-16)