

晶闸管阀过电流试验装置过电压保护策略的研究

贺之渊, 邓占锋, 查鲲鹏, 汤广福

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

Study on Overvoltage Protection Strategy of the Thyristor Valve Overcurrent Test Equipment

HE Zhi-yuan, DENG Zhan-feng, ZHA Kun-peng, TANG Guang-fu
(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: The principle of the first overcurrent test equipment for FACTS and HVDC thyristor valve in China is introduced. The mathematics and simulation model for transient and fault overvoltage are established and their generation mechanisms, harm and characteristic are analyzed. Based on the study above, some protective methods are compared, and a novel protection strategy is proposed, which is composed of BOD(break over diode) triggering thyristor valve and RC snubber circuit. Its validity is verified by the theoretical analysis and simulation results. So the safe operation of the overcurrent test equipment is guaranteed.

KEY WORDS: overvoltage; overcurrent test; thyristor valve; protection strategy

摘要: 介绍了我国第1套适用于灵活交流输电系统(FACTS)和高压直流输电系统(HVDC)的高压晶闸管阀过电流试验装置的基本原理。针对试验过程中可能产生的瞬时过电压和故障过电压分别建立了数学和仿真模型,分析了过电压的产生机理、危害及特点。在上述分析的基础上对不同的保护策略进行比较,提出阻容吸收回路与BOD(break over diode)触发晶闸管阀相结合的新型过电压保护策略,理论分析和仿真结果都证明所提出的保护策略的正确性和有效性,从而确保过电流试验装置的安全可靠运行。

关键词: 过电压; 过电流试验; 晶闸管阀; 保护策略

0 引言

随着电力电子技术的发展,FACTS装置在电力系统中得到了越来越广泛的应用,并逐步走向产业化。以大功率电力电子器件为基础的高压串联阀作

为FACTS和HVDC的核心部件,其运行可靠性和在各种电力系统状态下的生存能力逐渐成为一个关系到FACTS和HVDC能否在电力系统中得到广泛应用的关键问题。为了提高晶闸管阀的可靠性,已经进行了大量的理论研究工作,但完备的试验仍然是提高和保证晶闸管串联阀可靠性的最终技术手段^[1-7]。

过电流试验是检验阀在故障情况下,耐受过电流、电压及其相关热效应的能力。然而,随着电力电子元器件制造水平的提高,装置的容量和电压等级也不断提高,已经难以对电力电子装置整体直接进行试验,这就要求用来替代实际系统的过电流试验装置和试验方法能产生与实际工况相同的效果。国际上从事HVDC和FACTS设备研制和开发的几大公司,如ABB、SIEMENS、TOSHIBA等都拥有自己的全套高压串联阀的试验装置,这其中就包括过电流试验装置^[8-11]。为了推动我国FACTS和HVDC产业化发展,国家电网公司于1999年批准立项在中国电力科学研究院建立中国第1个用于高压串联阀开发与试验的大功率电力电子实验室,其中就包括研制一套高压阀过电流试验装置。该装置由低压大电流系统、高压谐振系统和相应的控制、隔离阀组成。

虽然通过阀体对过电流试验装置的高压、低压系统进行了隔离,但由于阻尼回路的存在,在阀体开通和关断的瞬间,高压侧的电压会耦合到低压侧,使低压侧承受瞬时过电压。同时,一旦隔离阀误导通,高压谐振系统的高电压就会串入低压大电流回路,引起大电流系统的过电压。本文分析了这些过电压的产生机制,对不同的保护方法进行比较,提出阻容吸收加BOD触发晶闸管阀相结合的新型保护策略。最后用EMTDC对其有效性进行仿真分析。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金项目(2004CB217907);
国家电网公司科学技术项目(SP11-2002-01-13)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217907).

1 过电流试验装置故障过电压问题

1.1 过电流试验装置原理

过电流试验装置的主电路结构如图 1, 其中 C_{s1} 、 R_{s1} 、 C_{s2} 、 R_{s2} 、 C_{st} 、 R_{st} 分别为阻尼吸收回路, R_{p1} 、 R_{p2} 、 R_{pt} 为静态均压电阻, V_1 、 V_2 为隔离和控制阀。该装置可以分为低压大电流回路和高电压谐振回路, 前者由大电流源和隔离阀组成, 用以提供被试阀所需的稳态电流试验强度; 后者由电容器组、谐振电抗以及控制阀组成, 提供试验所需的过电流及其前后的高电压^[12]。试验的主要工作过程如下:

- (1) t_1 时刻前, 触发隔离阀 V_1 和试品阀 V_t , 使试品通过大电流, 模拟试品实际工况中正常电流。
- (2) 当试品阀达到热平衡且结温达到试验要求后, 闭锁 V_1 和 V_t 。
- (3) t_2 时刻, 连续触发控制阀 V_2 , 使高电压首先加到试品阀 V_t 上, 模拟试品过电流前承受的正向电压。
- (4) t_3 时刻, 触发试品 V_t , 使其通过过电流。
- (5) t_4 时刻, 试品电流经过半个周期后电容器电压反向, V_t 重新闭锁, 此时连续触发 V_2 阀, 使试品阀承受反向高电压。

谐振过程试品阀上的电流电压波形如图 2 所示。

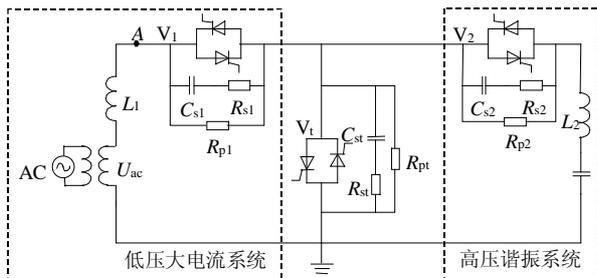


图 1 过电流试验装置原理图
Fig.1 Schematic diagram of the overcurrent test equipment

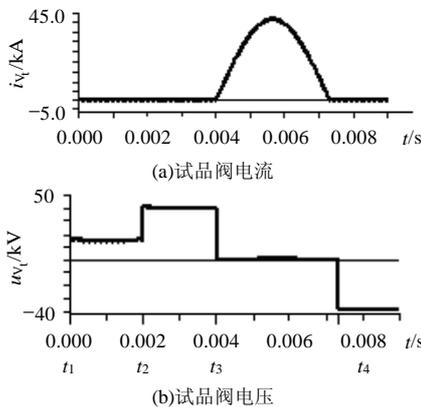


图 2 谐振过程试品阀电流、电压波形
Fig.2 Waveforms of valve on test in the period of resonance

该试验波形很好地模拟了高压阀过电流随后闭锁故障的电流、电压应力。

1.2 过电流试验装置瞬时过电压及其机制

虽然试验回路中 V_1 阀起到了隔离的作用, 但由于隔离阀阻尼吸收回路的存在, 高压谐振回路电压将会耦合到低压大电流系统使其承受过电压, 在控制阀 V_2 和试品阀 V_t 的开通和关断时刻, 大电流系统将要耐受瞬时过电压的冲击, 上述试验过程中的瞬时过电压波形如图 3 所示。

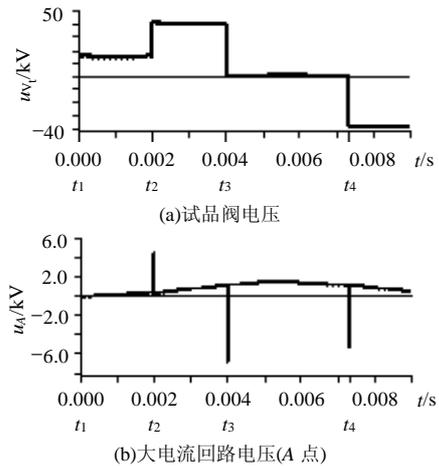


图 3 瞬时过电压波形

Fig.3 Waveforms of transient overvoltage

该过电压产生的机制可以用图 4 的等效电路图来分析, 由于阻尼回路充放电时间常数远大于晶闸管的开通关断时间, 因此分析中可以将晶闸管看作理想开关。

t_2 时刻之前, V_t 、 V_2 、 V_1 都闭锁, 电容器上电压为 U_C , 低压大电流源瞬时电压为峰值 U_m , $U_C \gg U_m$ 。由于控制阀 V_2 串联数一般远远大于试品阀 V_t , $R_{p2} > R_{pt}$, 则回路 A 点电位为 U_m , B 点电位为

$$U_B = \frac{R_{pt}}{R_{pt} + R_{p2}} U_C \quad (1)$$

阻尼电容 C_{s2} 上的电压为

$$U_{C_{s2}} = -\frac{R_{p2}}{R_{pt} + R_{p2}} U_C \quad (2)$$

t_2 时刻, V_2 阀开通, 相当于在 C_{s2} 两端加入电压跳变 ΔU , 如图 4 所示, 其幅值与 C_{s2} 上的电压相同, 方向相反。 C_{s1} 、 C_{st} 上的电压不能突变, 因此该电压跳变加在电感 L_1 和 L_2 上, 即相当于 A 点承受一个瞬时过电压冲击

$$U_s = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \cdot \frac{R_{p2}}{R_{pt} + R_{p2}} U_C \quad (3)$$

其后当 t_3 时刻 V_1 阀开通和 t_4 时刻关断时都会在 A 点出现瞬时过电压, 如图 3 所示, 其产生机制与上述分析相同。

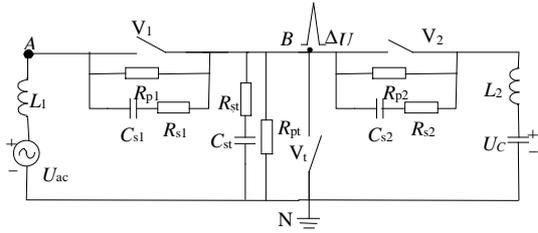


图4 瞬时过电压产生的等效电路图
Fig.4 Equivalence circuit of transient overvoltage generation

1.3 故障状态下过电压及其机制分析

虽然专门为高低压系统设计了隔离阀, 但也有可能出现控制阀 V_2 和隔离阀 V_1 同时导通, 试品阀 V_1 闭锁的严重故障。在这种情况下, 电容器上的高压会对大电流回路产生过电压和过电流的威胁。故障发生还可能引起大电流系统的保护动作, 使得问题更加严重。为了分析这种情况下的故障状况, 将图 1 等效为图 5 所示的形式。其中变压器 T 采用的是 EMTDC 中的带饱和特性的变压器模型^[13]。

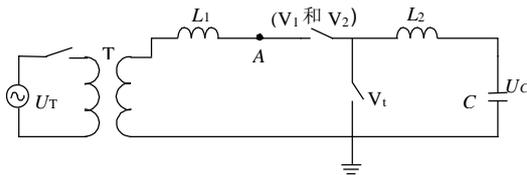


图5 故障过电压产生的等效电路图
Fig.5 Equivalence circuit of fault overvoltage generation

故障开始时变压器对外表现为漏抗, 整个回路的微分方程为

$$(L_1 + L_2 + L_T)C \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = u_T \quad (4)$$

$$u_T = U_m \sin(\omega t + j) \quad (5)$$

$$u_C(0) = U_C \quad (6)$$

其中: L_T 为大电流回路变压器的等效电抗; j 为发生故障时大电流回路电源电压的初相角; U_C 为电容器上的初始电压; U_m 为变压器输出电压峰值。由式(4)~(6)可以解出 u_C , 考虑到回路电阻很小, 可以化简为

$$u_C = \frac{-U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \cdot \frac{1}{\omega C} [\cos(\omega t + j_i) - \sqrt{\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \sin^2 j_i + \cos^2 j_i} e^{-dt} \cos(\omega_0 t + q)] \quad (7)$$

式中: $j_i = j - \arctan \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$;

$d = \frac{R}{2L}$; $\tan q = \frac{\omega}{\omega_0} \tan j_i$; 则 A 电位为

$$U_A = \frac{L_T}{L_1 + L_2 + L_T} u_C + \frac{L_1 + L_2}{L_1 + L_2 + L_T} u_T \quad (8)$$

由 U_A 的表达式可以看出, 故障发生时的角 j 不同, 则故障发生后的过电压的最大值及其出现的时刻也不同。当故障刚刚发生时, 变压器对外表现为漏抗, 即 L_T 较小, 但由于 $U_C \gg U_m$, 变压器上仍会承受过电压, 进一步造成大电流回路的变压器保护动作, 导致其跳闸。当变压器跳闸以后, 变压器对外表现为励磁阻抗, 即 L_T 很大, 变压器二次侧电压更高, 几乎承受所有的高压回路电压, 这必然对变压器造成致命的损坏。上述故障波形如图 6 所示, 其中故障发生在 0.04s, 故障发生后变压器二次侧的电压、电流瞬间超过其额定值, 随保护系统动作。变压器跳闸(约在 0.06s)以后, 故障电流减小, 故障电压相应的迅速增大, 变压器出现饱和。

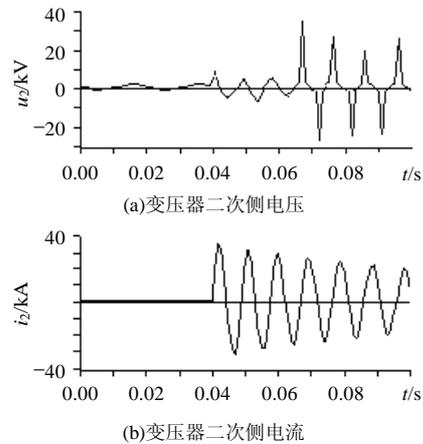


图6 故障条件下电流系统变压器的电压、电流波形
Fig.6 Waveform of fault voltage and current on high-current system transformer

2 过电压保护策略

根据第 1 节中过电压产生机制的分析, 在正常的晶闸管阀过电流试验中, 存在能量较小的瞬时过电压, 在故障状态则会出现能量较大的故障过电压。

故障过电压的一个显著特点是: 正常工作电压、保护动作电压、保护动作残压之间的差别很小。正常工作条件下, 由于晶闸管反向恢复电荷的影响, 大电流装置上的冲击电压可能达到额定值的 1.59 倍, 而大电流回路所允许的最高电压为额定值的 2 倍, 因此保护装置动作电压及残压必须限定在

额定值的 1.59~2 倍之间。另外，该故障过电压能量大、危害极大。

传统的过电压保护采用的是避雷器或者间隙。避雷器的动作电压范围比较大，残压也较高，很难满足上述保护要求，即使能够满足，避雷器的通流容量也需要很大，并且由于不同试验模式下变压器的输出电压不同，还需要多组不同电压等级的避雷器来配合。这在技术上、空间上、灵活性和经济性上都不适合，而间隙虽然可以满足残压要求，但其动作电压很不稳定，也不适合^[14-16]。

为了抑制低压侧出现的过电压，本文提出了一种晶闸管保护阀和 RC 吸收回路构成的过电压保护回路。其主电路结构如图 7 所示。晶闸管阀 V_p 是能量泄放的主体，采用多级串联的形式，晶闸管阀的触发动作则依靠 BOD 在过电压的击穿，BOD 是一种无门极的晶闸管，当正向电压超过某一特定值时转换到通态，靠一种急剧的短路作用保护晶闸管免受过电压的危害^[17]。BOD 的动作电压可决定过电压的保护水平。阀 V_p 的阻尼吸收回路 R_s 、 C_s 不仅可以起到阻容吸收保护的作用，还抑制了瞬时过电压。 R_p 为保护阻尼电阻，可以起到抑制电流的作用，其电阻值的选择也同时决定了保护动作残压的大小。

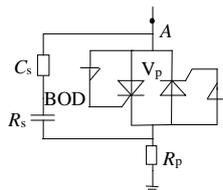


图 7 BOD 触发晶闸管阀保护原理图
Fig.7 Schematic diagram of BOD triggering thyristor valve protection

加上保护装置以后的过电流试验装置的等效电路如图 8 所示，其保护原理分析如下：

对于瞬时过电压，由于阻容吸收回路的存在，电容 C_{sp} 上的电压不能突变，因此电压冲击 ΔU 都将加在 L_2 上，A 点不会出现瞬时电压冲击；对于故障过电压，当故障发生时 BOD 保护动作，导致保护

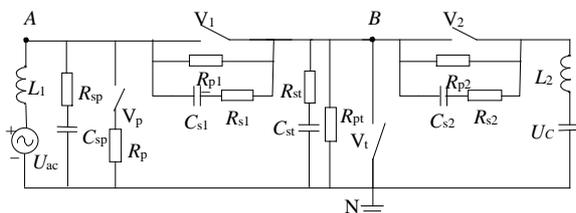


图 8 晶闸管阀保护的等效电路图
Fig.8 Equivalence circuit of overcurrent test circuit with valve protection

阀 V_p 的触发导通，A 点电位限制为 R_p 的压降，从而将过电压能量转化为大电流消耗掉。

保护阀中的晶闸管虽然通过的电流很大，但电流持续的时间很短，由于电流对晶闸管造成破坏主要是：当晶闸管 PN 结由于过电流而上升到一定温度时，内部会形成“中一等离子体”(mosoplasmas)(例如丝状导通载流子电流在晶闸管内部形成的一个具有很高电流密度的大的等离子体)，该等离子体的形成使器件的耐压能力和其它性能大大降低^[18]。因此只要晶闸管在该故障电流下的结温上升在可以允许的程度，就可能满足预期的要求。保护阀导通过程中的温升可以用以下方法计算：

晶闸管的瞬态耗散功率计算公式如下：

$$P_T(t) = u_{dT}(i_T)i_T(t) \quad (9)$$

$$u_{dT}(i_T) = A + Bi_T + C \ln(i_T + 1) + D\sqrt{i_T} \quad (10)$$

式中： $u_{dT}(t)$ 为晶闸管的通态压降； $i_T(t)$ 为晶闸管的通态电流； A, B, C, D 为厂家提供的计算参数。

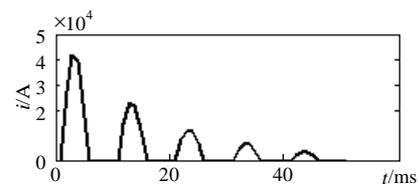
晶闸管的结到壳暂态热阻为

$$Z_{th,JC} = \sum_{n=1}^{n_{max}} R_{thn}(1 - e^{-t/t_n}) \quad (11)$$

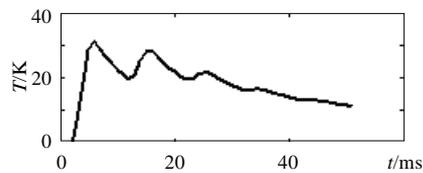
晶闸管的温升计算如下

$$\Delta T = P_T(t)Z_{th,JC} \quad (12)$$

代入实际参数，晶闸管选择 ABB 公司的 5STP42U6500，采用 3 层串联。用 Matlab 进行计算，其单管电流和结温上升波形如图 9 所示。



(a)晶闸管电流



(b)晶闸管结温

图 9 保护阀电流和温升曲线
Fig.9 Curves of the current and temperature of the protection valve

可以看出，瞬时电流峰值虽然达到 40kA，但晶闸管的最高温升只有 30°，而且器件可以允许的浪涌电流为 67kA，因此所选用的晶闸管完全可以满足要求。经过串联设计核算，其它的如反向恢复电压、开通 di/dt 、关断 du/dt 等指标都能满足要求。

该保护方式具有以下特点:

(1) BOD 的击穿动作电压分散性小, 动作误差一般只有 2% 左右, 这就使得该保护方式具有良好的动作电压稳定性。

(2) BOD 动作和晶闸管导通的快速性, 使得该保护方式具有 μs 级的动作速度。

(3) 大功率晶闸管串联技术已经成熟, 器件的水平不断提高, 因此这种保护方式可以被应用于高压大电流领域。

(4) 保护阀的阻尼回路可以起到缓解过电压波头和抑制暂态过电压的目的。

(5) BOD 触发电压、阀的串联数以及阻尼电阻的大小都灵活可调, 即阀的运行电压、保护动作电压、残压以及故障电流等都可调。保护装置具有良好的适应性和可调节能力。

3 过电压保护策略的仿真实证

对于第 2 节分析的阀运行试验过电压的抑制策略, 本文采用 PSCAD-EMTDC 软件进行了仿真, 结果如下。

图 10 示出了并联保护阀 V_p 的阻尼吸收电路后的仿真结果, 在试品阀开通、关断时刻 A 点已经不再有瞬时过电压, 而只是有一些波形的畸变(由吸收后的瞬时过电压与电流源电压叠加引起)。

图 11 示出了 BOD 触发的保护阀 V_p 可靠动作后的仿真结果, 此时由于 BOD 触发 V_p 阀导通, 所以在故障发生后, A 点电位被限制为保护电阻电压, 大电流系统变压器电压电流过冲都在保护限值范围内, 大电流系统不会遭受故障过电压的侵袭。

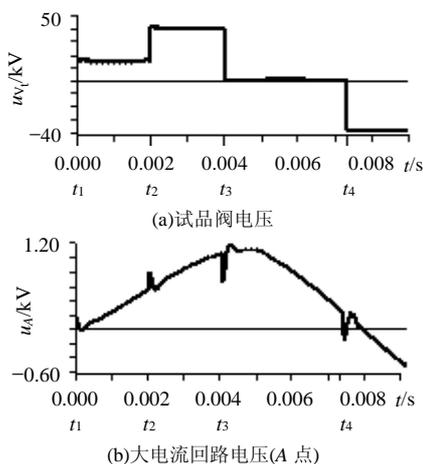


图 10 瞬时过电压保护效果图

Fig.10 Waveform of transient over voltage protection effect

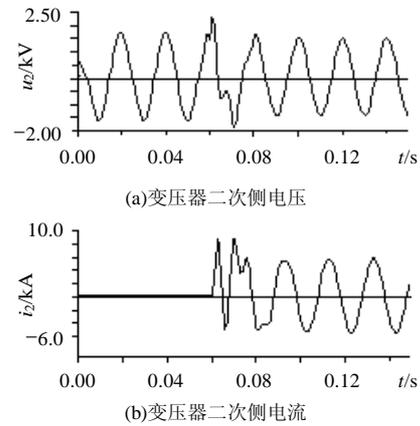


图 11 故障过电压保护效果图

Fig.11 Waveform of fault over voltage protection effect

4 结论

本文分析了阀过电流试验中的瞬时过电压和故障过电压的产生机制, 对应两种过电压的自身特点提出了与之相适应的保护策略。理论分析和仿真结果都表明了这些保护策略的正确性与有效性。

参考文献

- [1] 陈刚, 江道灼, 蔡永华, 等. 具有旁路电感的新型固态故障限流器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 200-205.
Chen Gang, Jiang Daozhuo, Cai Yonghua, et al. Study on a novel solid state fault current limiter with bypass reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 200-205(in Chinese).
- [2] 杨秀, 陈陈. 基于采样数据模型的高压直流输电动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 7-11.
Yang Xiu, Chen Chen. HVDC dynamic characteristic analysis based on sample D-Data model [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 7-11(in Chinese).
- [3] 邹刚, 陈祥训, 郑健超. 用于电力电子系统暂态过程分析的晶闸管宏模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 2-5.
Zou Gang, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao. Macro-model of thyristor for transient analysis in power electronic system [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 2-5(in Chinese).
- [4] 邹刚, 陈祥训, 郑健超, 等. 一种微观-宏观相结合的晶闸管 PISPIICE 模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 6-10.
Zou Gang, Chen Xiangxun, Zheng Jianchao, et al. Micro-macro pispice model of thyristor [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 6-10(in Chinese).
- [5] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管阀复合全工况试验装置的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 38-43.
Wen Jialiang, Tang Guangfu, Zha Kunpeng, et al. Investigation on synthetic test equipment for high voltage thyristor valve[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 38-43(in Chinese).
- [6] 余建国, 杨明, 罗海云, 等. 天广直流输电工程换流站中新技术的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 52-54.
Yu Jianguo, Yang Ming, Luo Haiyun, et al. Application of new technologies in converter stations of tian-guang HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 52-54(in Chinese).

- [7] 余建国, 晁剑, 钱海. 天广直流输电工程极 1 单极运行强迫停运故障原因分析与改进措施[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 80-83.
Yu Jianguo, Chao Jian, Qian Hai. Analysis of forced outages of pole 1 in tian-guang HVDC transmission project under single pole operation and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 80-83(in Chinese).
- [8] Sheng B L, Jansson E, Blomberg A, et al. A new synthetic test circuit for the operational tests of HVDC thyristor valves[C]. Proceedings of 2001 IEEE 16th Applied Power Electronics Conference, Anaheim, USA, 2001, 1: 1242-1246.
- [9] Boban I, Kilchenmann P. A modern tests facility for large power electronics components[R]. ABB Review, 1993.
- [10] Tanabe S, Kobayashi S. Operational test methods on valve sections for HVDC thyristor valve[C]. CIGRE Symposium, Tokyo, 1995.
- [11] Bauer T, Lips H P, Thiele G, et al. Operational tests on HVDC thyristor modules in a synthetic test circuit for the sylmar east restoration project[J]. IEEE Trans on Power delivery, 1997, 12(3): 1151-1158.
- [12] 贺之渊, 汤广福, 邓占锋, 等. 新型高压晶闸管阀过电流试验回路的建立[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 22-26.
He Zhiyuan, Tang Guangfu, Deng Zhanfeng, et al. A novel overcurrent test equipment for high voltage thyristor valves[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 22-26(in Chinese).
- [13] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2004, 28(22): 11-14.
Lin Liangzhen, Ye Lin. An Introduction to PSCAD/EMTDC [J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 11-14(in Chinese).
- [14] 陈清恒, 何金良, 谈克雄, 等. 氧化锌非线性电阻片微观结构及特性对电流分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 62-66.
Chen Qingheng, He Jinliang, Tan Kexiong, et al. Influence of the macrostructure on the current distribution in ZnO varistors [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 62-66(in Chinese).
- [15] 文远芳, 梁毓锦, 招誉颐, 等. 用 MOV 做变压器绕组内保护的试验研究[J]. 中国电机工程学报 1997, 17(2): 97-105.
Wen Yuanfang, Liang Yujin, Zhao Yuyin, et al. The experimental research of transformer inner protection with MOV[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(2): 97-105(in Chinese).
- [16] 陈葛松, 林集明, 郭剑波, 等. 500kV 串补站过电压保护研究[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 21-24.
Chen Gesong, Lin Jiming, Guo Jianbo, et al. Overvoltage protection for 500kV series compensation station[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 21-24(in Chinese).
- [17] Lawatsch H M, Vitins J. Protection of thyristors against overvoltage with breakover diodes[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1988, 24(3): 444-448.
- [18] Krishnappa P C S. Important characteristics of thyristors of valves for hvdc transmission and static var compensators[R]. CIGRE, France, 1984.

收稿日期: 2006-02-25。

作者简介:

贺之渊(1977—), 男, 博士研究生, 从事 FACTS 和 HVDC 技术及其相关试验方法的研究, codeep@epri.ac.cn;

邓占锋(1976—), 男, 博士, 工程师, 长期从事 FACTS 和 HVDC 的开发及其相关试验方法的研究;

查鲲鹏(1977—), 男, 博士研究生, 从事 FACTS 和 HVDC 技术及其相关试验方法的研究;

汤广福(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事 FACTS 和 HVDC 的开发及其相关试验方法的研究。

(责任编辑 韩 蕾)