

±500 kV 换流站换流阀结构分析

张俊玮¹, 王民慧¹, 邓文斌², 罗斌², 朱俊²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵阳 550003; 2. 中国南方电网超高压输电公司贵阳局, 贵阳 550003)

摘要: 分析了±500 kV 换流站换流阀的结构组成和电气组成, 对换流阀的工作原理进行了详细的阐述, 并对组件内各元件的作用进行了详细说明, 对一个 12 脉动换流单元的两侧换流站如何与交流系统进行连接给予了阐述。通过各组成结构的具体分析, 对换流阀存在隐患和故障的预知、预测起到一定的作用。

关键词: 超高压直流输电; 换流阀; 12 脉动换流单元

中图分类号: TM721.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)07-0022-05

Analysis on the Thyristor Valve Structure of ±500 kV Converter Station

ZHANG Jun-wei¹, WANG Min-hui¹, DENG Wen-bin², LUO Bin², ZHU Jun²

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid, Guiyang 550003, China)

Abstract: The structure and electrical components of the thyristor valve for ±500 kV converter station are analyzed. The working principle of the thyristor valve and the role of each component are discussed. And the connection of the 12-pulse thyristor units on both sides of the converter station to AC power system is described. This study may be helpful to the fault prediction of the thyristor valves.

Key words: UHV DC power transmission; thyristor valve; 12-pulse thyristor unit

0 引言

在直流输电系统中, 为实现换流所需要的三相桥式换流器的桥臂称为换流阀, 它是换流器的基本单元设备。换流阀是高压直流输电系统的最核心部分^[1-5]。高压直流输电系统, 就是将送端系统的高压交流电, 经过换流变变压, 由换流阀将高压交流转换成高压直流^[6], 用直流输电线路输送到另外一端换流站, 再由换流阀将高压直流转换成高压交流, 然后经过换流变压器与受端交流电网相连。高压直流输电能量转换方式为交流—直流—交流。通常将交流变直流成为整流, 实现整流功能的装置成为整流器; 将直流转换成交流称为逆变, 实现逆变功能的装置成为逆变器。整流器和逆变器统称为换流器^[7]。

1 工作原理

1.1 换流阀工作原理

从目前国内运行的高压直流输电系统来看, 换

流器的主要连接方式均采用 12 脉动换流器。12 脉动换流器的工作原理是利用交流系统的两相短路电流来进行换相。为降低谐波, 将两组三相桥(6 脉动)串连形成 12 脉动阀组, 其交流侧通过换流变压器的网侧绕组而并联。换流变压器的阀侧绕组一个为星形接线^[8], 而另外一个为三角形接线, 从而使两个 6 脉动换流器的交流侧得到相差 30°的换相电压。图 1 给出了当采用两组双绕组变压器时的 12 脉动换流器原理接线图。

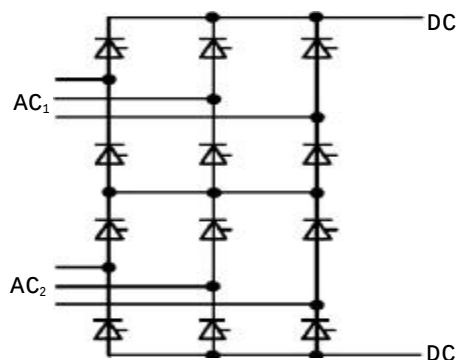


图 1 12 脉动换流器原理接线图

Fig. 1 The principle of flow changing 12 pulsation hookup

收稿日期: 2012-01-08; 修回日期: 2012-02-18

根据晶闸管单向导通的性质, 换流阀导通必须具备两个条件: ①阀电压必须是正向的, 即阀阳极电位必须高于阴极电位; ②控制极必须加上适当的出发脉冲。阀由导通转向关断的条件是: 在阀电流下降到零后, 阀电压在足够长的时间内保持负值。

12 脉动换流器有 V_1 - V_{12} 共 12 个换流阀组成。在每 1 个工频周期内有 12 个换流阀轮流导通, 它需要 12 个与交流系统同步的按顺序触发脉冲。脉冲之间的间距为 30° , 这样的连接方式的一个优点是其交流电流质量好, 谐波成分少。12 脉动换流器的工作原理是利用交流系统的两相短路电流来进行换相。当换相角 $\mu < 30^\circ$ 时, 在非换相期的两个桥中只有 4 个阀同时导通(每个桥中 2 个), 而当有一个桥进行换相时, 则同时有 5 个阀导通(换相桥中 3 个, 非换相桥中 2 个), 从而形成 4 个阀和 5 个阀轮流交替同时导通的“4-5”工况, 此时, 相当于 6 脉动换流器的“2-3”工况。当换相角 $\mu = 30^\circ$ 时, 两个桥中总有 5 个阀同时导通, 在一个桥中的一对阀换相刚完, 在另外一个桥中的另一对阀紧接着开始换相, 而形成“5”工况。当 $30^\circ < \mu < 60^\circ$ 时, 将出现一个桥中一对阀换相尚未结束之前, 在另一个桥中就有另一对阀开始换相。即出现在两个桥中同时有两对阀进行换相的时段, 在此时段内两个桥共有 6 个阀同时导通, 当在一个桥中换相结束时, 则又转为 5 个阀同时导通的状态, 从而形成“5-6”工况。随着换流器负荷的增大, 换相角 μ 也增大, 其结果使 6 个阀同时导通的时间延长, 相应的 5 个阀同时导通的时间缩短。当 $\mu = 60^\circ$ 时, “5-6”工况即结束。在正常运行时, $\mu < 30^\circ$ 时不会出现“5-6”工况, 只有在换流器过负荷或交流侧电压过低时, 才可能出现 $\mu > 30^\circ$ 的情况。

1.2 换流阀原理框图

换流阀由晶闸管元件及其相应的电子电路、阻尼回路以及组装阀组件所需的阳极电抗器、均压元件通过电气连接后组装而成。每个可控硅组件由两个阀段组成, 每个阀层由 13 个可控硅级分别与 RC 阻尼回路并联, 再与 2 个电抗器串联组成。换流阀原理框图见图 2。

1.3 晶闸管特性和保护电路的关系

目前 ± 500 kV 换流站采用的光直接触发晶闸管, 可以省去用于再次进行光电转换的触发电路板, 实现了晶闸管的高可靠性、紧凑以及经济, 而且很少有维护要求。

直接光控晶闸管的性能见图 3。

从图 3 可以看出, 换流站直接光控晶闸管 and 传统电控晶闸管主要区别有两点: ①晶闸管的控制极

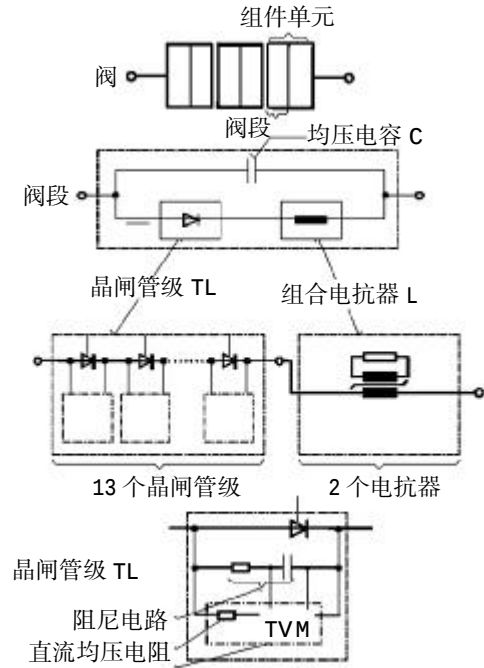


图 2 换流阀原理图

Fig. 2 Principle diagram of thyristor valve

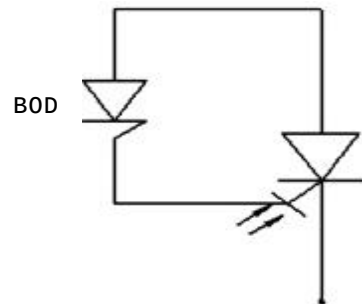


图 3 直接光控晶闸管的原理图

Fig. 3 Direct control thyristor principle diagram

已不是传统的电控门极, 而是一个光敏面, 直接依靠光能量触发晶闸管; ②传统晶闸管的正向保护性触发通常依靠设在 TE/TCU 板中的电子线路来实现。而直接光控晶闸管的正向保护则是依靠集成在晶闸管内部的被称为 BOD 的器件实现。

图 4 为 BOD 的伏安特性曲线。

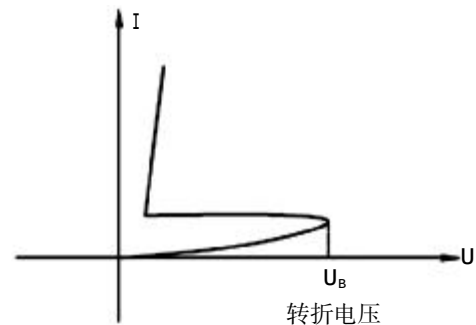


图 4 直接光控晶闸管伏安特性

Fig. 4 Direct control thyristor volt-ampere characteristics

在 ± 500 kV 换流站直流系统中晶闸管 BOD 保

护动作的值 $U_b = 7\ 500\text{ V}$ 。

1) 正向时, 如果正向电压超过保护水平, LTT 集成的 BOD 过电压保护触发, 使晶闸管导通;

2) 反向时, 晶闸管由于雪崩特性将自行保护;

3) 在反向恢复期内, 当电压上升率大于 $100\text{ V}/\mu\text{s}$ 的允许值时, RPU 会发出触发脉冲, 使晶闸管导通。

如果不考虑冗余, 重复和不重复电压耐受水平和采用浪涌保护的关系为: ①考虑电压分布的不一致性和 LTT 光可控硅正向集成的 BOD 保护水平, 阀将能承受动态过电压包括换相过冲电压; ②反向时非重复耐受水平应高于阀避雷器保护水平, 包括 1.15 倍操作波电压和雷电波电压及 1.2 倍陡前沿波电压^[9]。

2 结构组成

2.1 术语和定义

2.1.1 晶闸管级

由晶闸管、RC 阻尼回路、TVM 板组成。

2.1.2 阀层

13 个晶闸管级与 2 台阀电抗器串联后, 再与一只均压电容器并联构成一个阀层。

2.1.3 阀组件

两个阀层串联后构成一个阀组件。

2.1.4 阀

3 个阀组件串联构成一个阀。

2.1.5 四重阀

4 个阀串联构成一个四重阀, 即单相阀塔(单相阀塔中, 分成左塔 L 和右塔 R)。

阀塔填报缺陷方法: 先分 A、B、C 相; 再分左 L、右 R; 然后分层从高向低, 即从低电位向高电位; 然后再确定是哪个元件有缺陷。

2.2 电气组成

2.2.1 四重阀

可控硅换流阀在阀厅采用悬吊式布局, 每极阀厅内悬挂 3 个四重阀塔, 阀塔顶部为地电位(0), 底部为高电位($\pm 500\text{ kV}$)。由空气进行绝缘。每个多重阀单元(即四重阀塔)有 4 个阀(桥臂), 每个四重阀塔由左右两边、上下 6 层共 12 个模块组成。为避免阀遭受外部过电压的侵害, 每个阀并联一个阀避雷器。可控硅阀片是组成换流阀的最基本元件, 26 个可控硅阀片组成一个阀组件。每个阀(桥臂)由 3 个阀组块串联构成, 两个阀串联构成 6 脉动换流器中的一相, 4 个阀串联构成一个四重阀(阀塔), 即 12 脉动换流器中的一相, 单极换流阀则由 3 座阀塔(三相)构成。四重阀结构见图 5。



图 5 四重阀外观图

Fig. 5 Four heavy valve appearance figure

2.2.2 组件

换流阀的基本组成单位为晶闸管级, 13 个晶闸管级与两台阀电抗器串联后, 再与一只均压电容器并联构成一个阀层单元, 两个阀层单元串联后构成一个阀模块。图 6 为 $\pm 500\text{ kV}$ 换流站阀组件的外形图。

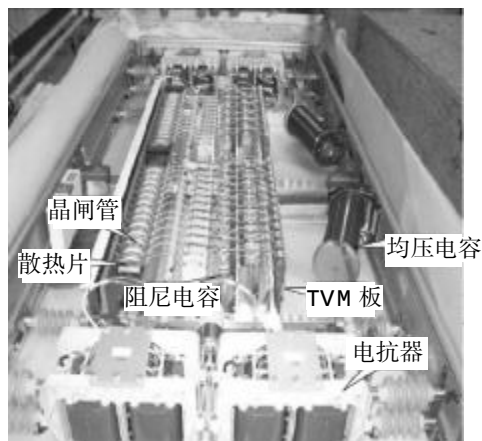


图 6 直流阀组件

Fig. 6 DC valve components

2.2.3 晶闸管级

每个晶闸管级组成部分为: ①晶闸管; ②晶闸管电压监测(TVM), 为阀控制系统的一部分; ③用于晶闸管冷却的散热器; ④和晶闸管并联的阻尼电路, 由电容和电阻串联组成。另外有用于直流均压的电阻, 安装在 TVM 板上^[10]。

$\pm 500\text{ kV}$ 换流站晶闸管级的组成见图 7。

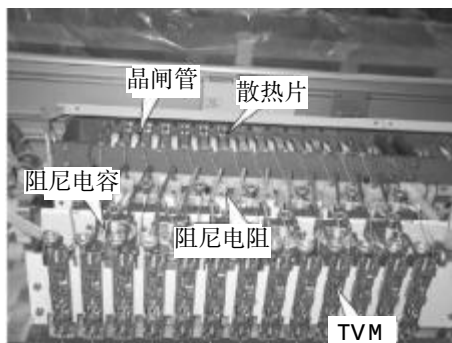


图 7 晶闸管级

Fig. 7 Thyristor level

2.2.4 组件内各元件作用

1) RC 阻尼回路(电阻和电容):对阀片电应力进行限制,在阀片开通或关断过程中的均压都起重要作用。

2)电抗器:限制流经阀单元的冲击电流,也可以在阀单元出现浪涌电压现象时限定电压水平与限制电压上升率^[11],见图 8。

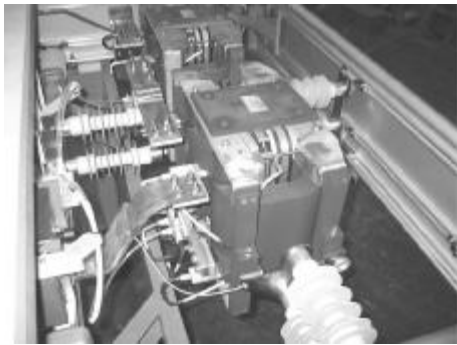


图 8 直流电抗器
Fig. 8 DC reactor

3)均压电容器:在回路中出现陡前波冲击电压现象时,在四重阀内将电压均匀分布到四个阀上,避免局部过压导致阀片损坏的现象。

4)TVM 板:保证在每个换流阀内串联状态下所有可控硅阀片承受相同的直流电压,同时监测阀片级内部电压并产生回检光信号^[12],见图 9。

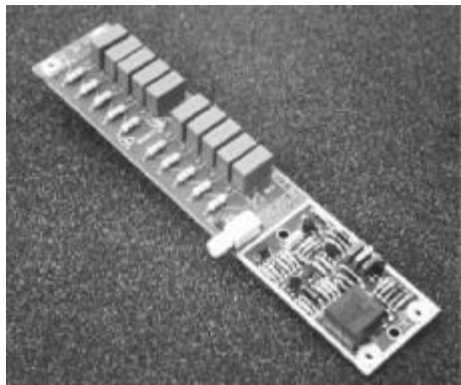


图 9 TVM 板
Fig. 9 TVM board

5)MSC:多模型耦合器。将来自 VBE 系统内 3 个不同光信号发送器板上的激光二极管的光信号指令,经过一个三取二的选择逻辑后再分别发送至 13 个 LTT 阀片上^[13],见图 10。

6)RPU:恢复保护单元,在可控硅阀片关断以后的恢复期间保护换流阀,在此期间如果电压变化率超过保护预设值,RPU 在接收到 VBE 系统内 RPU 板发送的控制信号后,将发送一个光触发脉冲送 MSC,将阀单元内的阀片触发开通,见图 11。

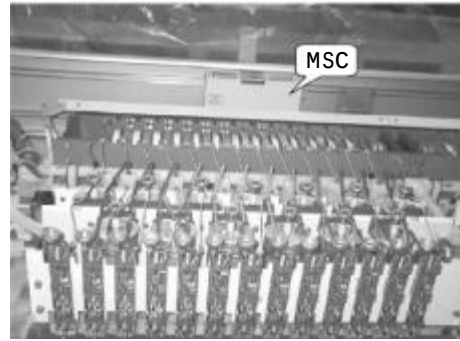


图 10 MSC
Fig. 10 MSC

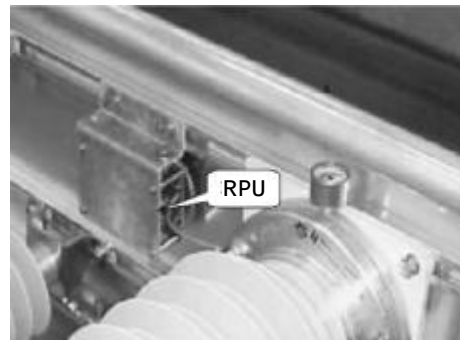


图 11 RPU
Fig. 11 RPU

阀组件内各元件参数的计算和选择除了应满足各种运行工况下的电压应力与电流应力外,还应满足冲击电压(如操作冲击、雷电冲击、陡波冲击)下的电压应力。和阀段并联的冲击均压电容器使陡波冲击电压线性分布,非线性电抗器的作用是减小在干扰和正常换相时非周期触发的应力和前沿冲击电压时的应力。这个作用是由每级晶闸管的 RC 阻尼回路辅助完成的。同时减缓阀开通时的 di/dt 。RC 阻尼回路另一个作用是限制阀在关断时的换向过冲,使晶闸管级间在工频和操作冲击电压下的电压成线性分布。晶闸管级的直流均压由每一级的直流均压电阻完成。每个晶闸管的自保护由集成在 LTT 内的正向过电压保护触发实现,避免由于触发脉冲丢失而使晶闸管承受过电压。它是作为连续运行设计,当正常触发脉冲在一个单级晶闸管丢失情况下作为后备触发保护。另外,为了避免电位浮动,或晶闸管级间过度电压偏差。处理办法将水路的均压电极连接在主电路的适当位置,同样还要注意通过选择适当的电极和间距,避免组件电压电晕和局放。

2.3 与交流部分的连接

换流阀通过换流变压器与交流系统连接,换流变压器接到与交流系统相连的交流母线上的绕组称为网侧绕组,接到换流阀的绕组称为阀侧绕组。目前直流输电工程主要采用的是 12 脉动换流单元。12

脉动换流单元是由两个交流侧电压相位相差 30° 的 6 脉动换流单元在直流侧串联而在交流侧并联组成。12 脉动换流单元可以采用双绕组换流变压器或者三绕组换流变压器组成。为了得到换流变压器阀侧绕组的电压相差 30° ，其阀侧绕组的接线方式必须为一个星型接线，另外一个为三角型接线。换流

变压器可以选择为单相结构。因此，对于一组 12 脉动换流单元的换流变压器可以有多种结构。而安顺换流站则采用 6 台单相双绕组变压器。

一个 12 脉动换流单元的两侧换流站与交流系统的连接方式见图 12。

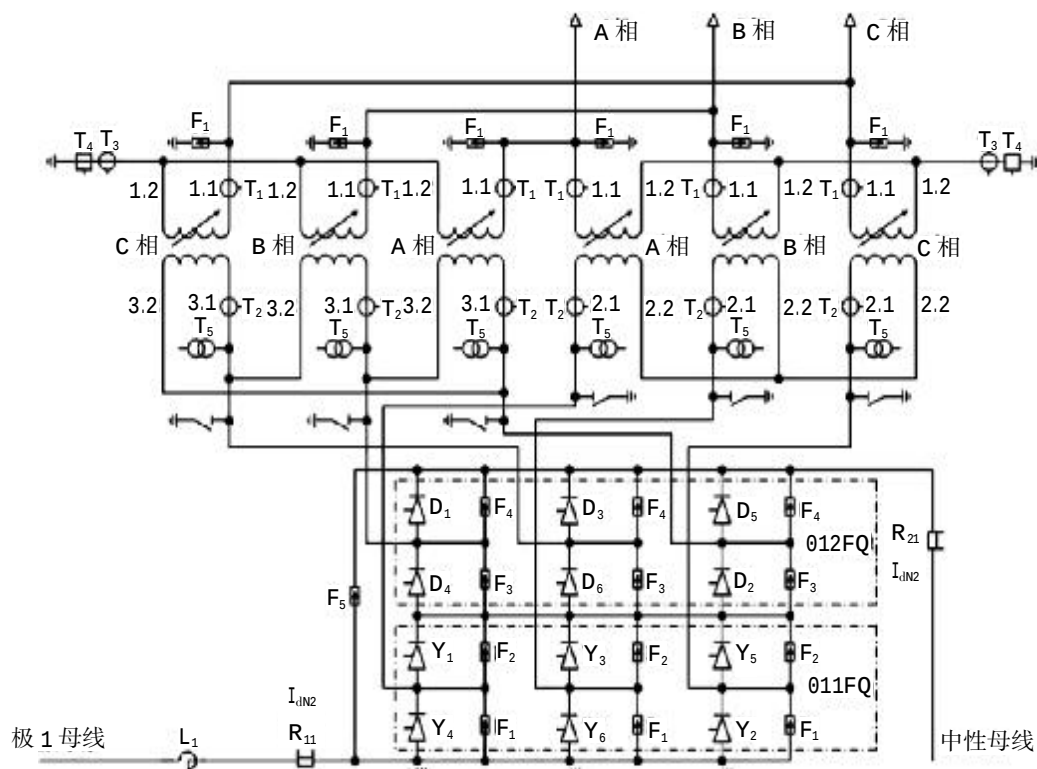


图 12 换流阀与交流系统连接

Fig. 12 The connection of thyristor valve and AC system

3 结语

直流输电的发展与换流技术的发展有着密切的关系，其中特别是大功率换流器件起着关键作用。直流输电换流技术包括实现换流的高压大功率换流阀和控制保护装置以及进行换流的理论和方法，而前者往往起着决定性作用。换流技术是实现直流输电的基本条件，换流技术的发展促进了直流输电的发展，而直流输电发展的需要又反过来促进换流技术的发展。换流技术水平的高低是决定直流输电各种运行性能和经济性能的重要因素。

参考文献:

[1] 张建峰, 马振军. HVDC 直接光控换流阀中激光发射电路监测中几个问题的探讨[J]. 高压电器, 2009, 45(2): 106-107.
ZHANG Jian-feng, MA Zhen-jun. Discussion on issues about laser emitter monitoring for HVDC light triggered thyristor valve[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 106-107.

[2] 李 侠, SACHS G, UDER M. ± 800 kV 特高压直流输电用 6 英寸大功率晶闸管换流阀[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 1-5.
LI Xia, SACHE G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for ± 800 kV UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
[3] 王惠艳, 李 侠, 冯松奎. 4 500 A 晶闸管换流阀局部放电问题的分析与处理[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 86-87.
WANG Hui-yan, LI Xia, FENG Song-kui. Analysis and treatment of partial discharge excess in 4 500 A thyristor valve[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 86-87.
[4] 李 强, 周敏刚, 陈 楠, 等. 特高压直流换流阀单阀交流试验方法研究[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 1-4.
LI Qiang, ZHOU Min-gang, CHEN Nan, et al. Study on AC voltage test method of UHVDC valve[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 1-4.
[5] 陆建挺, 杨 涛, 申 萌, 等. HVDC 晶闸管换流阀非周期触发试验中恢复期保护的探讨[J]. 高压电器, 2011, 47(11): 102-105.

(下转第 30 页)

- XIAO Hong-xia, FAN Rui-xiang, PENG Xi-dan. Analysis of power quality monitoring data and research of typical comprehensive treatment program for Zhe-Gan electrified railway[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 43-46.
- [4] 刘军成. 电能质量分析方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- LIU Jun-cheng. Power quality analyzing method [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [5] 焦 莉, 刘军成. 电力市场与电能质量监测评估策略[J]. 西北电力, 2004(1): 9-11.
- JIAO Li, LIU Jun-cheng. Power quality monitoring and its evaluation under power market [J]. Northwest China Electric Power, 2004(1): 9-11.
- [6] EN 50160:2007. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks[S].
- [7] IEC 61000-3-6—2007. Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3: Limits—Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems—Basic EMC publication[S].
- [8] IEC 61000-4-7:2002. Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-37: Testing and measurement techniques—General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto[S].
- [9] IEC 61000-4-30:2003. Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 4-30: Testing and measurement techniques—Power quality measurement methods[S].
- [10] GB/T 12325—2008. 电能质量 供电电压允许偏差[S].
- GB/T 12325—2008. Power quality—Admissible deviation of supply voltage[S].
- [11] GB/T 15945—2008. 电能质量 电力系统频率允许偏差[S].
- GB/T 15945—2008. Power quality—Permissible deviation of frequency for power system[S].
- [12] GB/T 15543—2008. 电能质量 三相电压允许不平衡度[S].
- GB/T 15543—2008. Power quality—Admissible three-phase voltage unbalance factor[S].
- [13] GB/T 14549—1993. 电能质量 公用电网谐波[S].
- GB/T 14549—1993. Power quality—Harmonics in public supply network[S].
- [14] GB/T 24337—2009. 电能质量 公用电网间谐波[S].
- GB/T 24337—2009. Power quality—Sub-harmonics in public supply network[S].
- [15] GB/T 12326—2008. 电能质量 电压波动和闪变[S].
- GB/T 12326—2008. Power quality—Voltage fluctuation and flicker[S].
- [16] GB/T 19862—2005. 电能质量监测设备通用要求[S].
- GB/T 19862—2005. General requirements for monitoring equipments of power quality[S].
- [17] IEEE Std 519—1992. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power system[S].
- [18] IEC 61000-3-6:2008. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems[S].
- [19] AS 61000.3.100—2011. Steady state voltage limits in public electricity systems[S].

赵 亮(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统变电运行及检修技术研究及管理工作。

梁 东(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统变电检修管理工作。

张建军(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统变电检修管理工作。

(上接第 26 页)

- LU Jian-ting, YANG Tao, SHEN Meng, et al. Discussion on recovery protection for HVDC thyristor valve in the non-periodic firing tests [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(11): 102-105.
- [6] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering [M]. Beijing: China Power Press, 2004.
- [7] 李景禄. 高电压技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- LI Jing-lu. High voltage technology [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.
- [8] 李 诚. 变压器故障的色谱分析与判断[J]. 电力安全技术, 2002, 4(9): 13-14.
- LI Cheng. The chromatographic analysis of transformer faults with judgment[J]. Power Security Technology, 2002, (9): 13-14.
- [9] DUVAL M, DEPABLO A. Interpretation of gas-in-oil analysis using new IEC publication 60599 and IEC TC 10 database [J]. IEEE Electrical Insulation magazine, 2001, 17(2): 31-41.
- [10] DL/T 722—2000. 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- DL/T 722—2000. Gases dissolved in transformer oil analysis and judgment[S].
- [11] Siemens. Tian—Guang HVDC transmission project: Thyristor valves maintenance manual EB4.1 1 1. TZ-a[Z]. Germany: Siemens, 1999.
- [12] Siemens. Gui—Guang ±500 kV DC Transmission project: Valve cooling system maintenance manual EB4.120. AZ_RI[Z]. Germany: Siemens, 2004.
- [13] Siemens. Gui—Guang n Line 500 kV DC transmission project: Valve cooling system maintenance manual EB4.121.XS—0[Z]. Germany: Siemens, 2007.

张俊伟(1987—), 女, 硕士, 研究方向为检测技术与自动化装置。