

±660 kV 宁东—山东直流输电换流阀 最小交流电压运行试验的关键应力

杨俊, 高冲, 查鲲鹏, 邱宇峰

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Key Stresses in Minimum AC Voltage Operational Tests of Thyristor Valves for ±660 kV HVDC Transmission Project From Ningdong to Shandong

YANG Jun, GAO Chong, ZHA Kunpeng, QIU Yufeng

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: As a part of DC valve operational tests, the minimum AC voltage operation tests aims at examining the firing and extinction characteristics of converter valves under low AC voltage at valve side, so special requirement are put forward to testing devices. To implement test test purposes, it is the key to put forward concrete requirements to testing devices in the viewpoint of equivalence, and its presupposition is to determine the needed key stresses. Firstly, the basic structure an operational characteristic of DC converter valves are presented, and the transient processes of firing and extinguishing the converter valves under minimum AC voltage are analyzed; then the factors impacting the reliable operation of DC converter valves are pointed out and on this basis the key stresses under minimum AC voltage operational tests are summarized to provide the foundation for the synthesis of testing devices; finally, the results of minimum AC voltage operational tests of DC converter valves for ±660kV transmission project from Ningdong to Shandong are given. It is verified by the results that the minimum AC voltage operational tests, which is based on the key stresses and performed by synthetical method, can be fully equivalent to actual system and meet engineering demands, and it is economical and practicabel.

KEY WORDS: HVDC transmission project; converter valve; operational test; minimum AC voltage; key stresses; synthetic test method

摘要: 首先介绍了直流换流阀基本结构与运行特性, 分析了换流阀在最小交流电压条件下开通、关断的暂态过程, 指出了影响直流换流阀可靠运行的因素, 在此基础上总结了最小交流电压运行试验的关键应力, 为合成试验装置输出提供了依据。最后通过宁东—山东±660 kV 直流换流阀最小交流电压运行试验结果, 验证了以关键应力为依据、以合成方法

进行的最小交流电压运行试验经济实用、充分等效, 能够满足工程要求。

关键词: 直流输电工程; 换流阀; 运行试验; 最小交流电压; 关键应力; 合成试验方法

0 引言

直流输电在远距离输电及大规模电网互联方面的优势, 使其成为我国建设统一坚强智能电网的重要组成部分。未来 10 年, 我国将陆续建设 20 余条高压直流工程^[1-5]。作为直流输电系统的核心设备, 直流换流阀的可靠性是系统稳定运行的关键。在实际工程中, 直流换流阀将面临各种复杂的运行工况。当系统阀侧交流电压降低时, 其开通、关断、通态、断态 4 种工作状态具有特殊的表现形式。为确保换流阀设计正确, 需要对换流阀进行最小交流电压运行试验^[6-7]。

目前, 国内外对换流阀进行最小交流电压运行试验均采用合成方法^[8-11]。合成试验方法降低了试验装置容量、节省了试验成本, 但其等效性是试验质量的关键。为确保等效, 需要对换流阀在最小交流电压运行工况下的行为特征进行深入分析, 抓住影响换流阀可靠运行的关键因素, 并要求试验装置能够复现相应的关键应力, 以达到良好的考核效果。

文献[4-5]是目前直流换流阀运行试验有关的主要国际标准, 2 文献对换流阀运行试验提出了一般性要求, 包括最小交流电压运行试验, 但并未给出这些要求的内涵, 即为何提出这些要求。此外, 直流输电换流阀最小交流电压运行试验实际实施过程中, 试品取能理应成为重要考核对象之一, 但相关文献很少述及, 更没有对此项功能提出具体考

核指标。本文从对换流阀中半导体器件开通及关断暂态过程中试品电流、电压应力以及半导体器件自身开通与关断的微观机理的分析入手，确定在最小交流电压运行状态下影响直流换流阀开通与关断的关键应力，并对此提出相应的考核指标；通过分析取能电路的工作原理，确定衡量取能状态的量，对取能方面的等效性提出定量的考核指标。

1 高压直流输电系统及其阀结构

典型的双极直流输电系统如图1所示。系统主要由送、受端交流系统、换流变压器、换流器、平波电抗器、直流输电线路、滤波装置、水冷设备等组成。其中换流阀是其核心设备，主要由串联的高压晶闸管及辅助元件组成，现代直流换流阀一般采用空气绝缘、水冷的户内悬挂式结构。阀体内主要包括：晶闸管阀模块、阀避雷器、水冷回路和机械支撑结构。虽然各种换流阀的设计有所不同，但其基本结构类似。

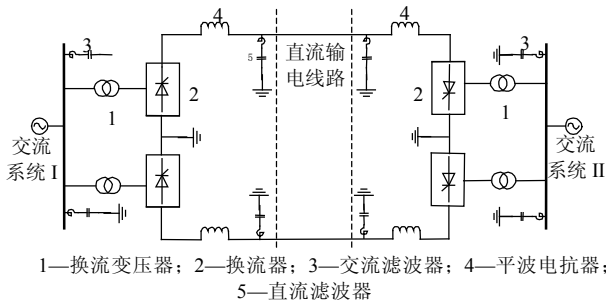


图1 高压直流输电原理

Fig. 1 Schematic for HVDC transmission system

单阀一般由若干个阀模块串联而成，阀模块是1个独立的机械单元。阀模块又由2个阀组件串联构成，阀组件一般由1个阳极饱和电抗器与串联的晶闸管级组成，其中每个晶闸管级由单个晶闸管及阻尼支路、门极电子单元构成，是能够代表单阀电气特性的基本单元^[12]，如图2所示。

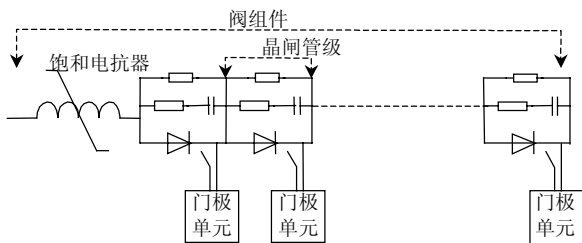


图2 阀组件结构

Fig. 2 Structure of a valve section

2 高压直流输电阀最小交流电压下工作应力分析

2.1 最小触发角运行工况关键应力

直流换流阀在稳态运行中，分为整流和逆变

2种工况。整流和逆变状态下换流阀电压、电流波形如图3所示。2种工况下，阀均经过开通、通态、关断、断态4个阶段。

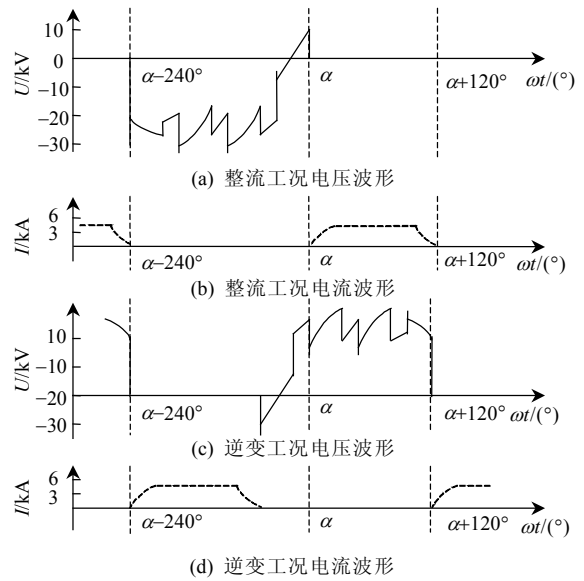


图3 三相桥式换流器中典型的阀电压、电流波形

Fig. 3 Waveforms of three-phase converter valves

在阀侧交流电压降低到正常运行的最低值并持续运行、直流电流保持恒定的情况下，整流阀的波形由触发滞后角 α 唯一确定，当整流阀触发滞后角 α 处于系统运行允许的最小值时，换流阀即处于一种极端运行工况。此时，整流阀的开通电压为

$$u_{fr} = \sqrt{2}U_0 \sin \alpha_{min} \quad (1)$$

式中： U_0 为阀侧交流电压有效值； α_{min} 为整流阀最小触发角。

保证晶闸管可靠开通的基本条件是在门极触发撤销前，其阳极电流不低于擎住电流，而阳极电流开通暂态过程由主回路结构及参数、触发电压决定^[13-14]。

直流阀开通瞬间等效电路如图4所示。其中， U 为主回路电源电压，即开通电压，开通暂态过程可视为常数； L 为换相电抗； C_s 为阀端杂散电容； L_{sat} 和 R_{sat} 为饱和电抗器的饱和电感及阻尼。阀开通瞬间其单级晶闸管中流过的电流由主回路电流 i_1 、杂散电容放电电流 i_2 、晶闸管级阻尼电容放电电流 i_3 这3部分叠加而成，由于同时存在感性与容性元件，在开通瞬间电流有振荡成分，且在开通的前几十 μs 内会出现1个极小值，如图5所示。

在开通时刻前，杂散电容电压等于开通电压 U ，且阻尼电容上的电压也与 U 成正比。由于开通暂态前期电流值较小，包括饱和电抗器在内的所有元件均为线性元件，因此在其他变量均不变的情况下，

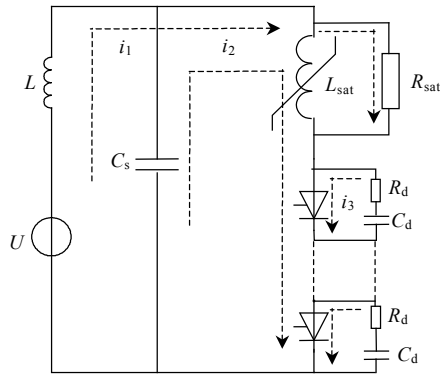


图4 直流阀触发时刻等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit at firing moment

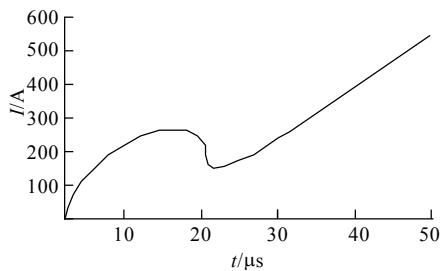


图5 阀开通瞬间电流波形

Fig. 5 Current during firing transients

开通电流及其变化率与开通电压成正比, 振荡过程中出现的极小值也与开通电压成正比, 因此当触发滞后角处于稳态运行中的最小值时, 开通电压最小, 开通电流振荡过程中的极小值也最小, 有可能比擎住电流更小, 此时若触发脉冲已经撤销, 则换流阀开通失败。因此在设计换流阀时应考虑该工况下的开通特性, 应保证晶闸管元件能够在该条件下可靠开通。而在运行试验中为验证此方面设计的正确性, 必须提供等同甚至更为苛刻的开通条件, 其关键参数即为开通电压, 试验设备应能够为试品阀提供等于或小于换流阀在最小交流电压、最小触发角条件下的开通电压。

在现代高压直流换流阀设计中, 换流阀每级触发脉冲一般由其门极电子单元提供, 而为电子单元提供工作能量的是其取能单元, 取能单元主要的取能部分是串联于晶闸管阻尼回路的取能电容 C , 从主回路取得能量后提供给电子单元, 供其正常工作。直流换流阀晶闸管级门极电子电路取能单元如图6所示。其中, V_i 为阀中的1个晶闸管; R_d 、 C_d

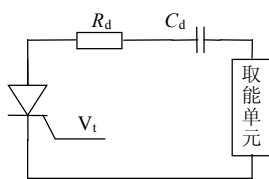


图6 取能单元

Fig. 6 Schematic of energizing circuit

为晶闸管的阻尼电阻。正常工作条件下, 当晶闸管级端电压正向上升时, 取能电容 C 充电取能。

取能回路作为阻尼电路的一部分, 整个回路等效为容性, 且阻尼回路电容 C_d 的容抗远大于用于取能电容 C 的容抗, $i=C_d du/dt$ 为充电电流。因此, 取能电容 C 1个周期中的充电电量为

$$Q = \sum \int i dt = C_d \sum \int du = C_d \sum \Delta u = C_d \Delta u_a \quad (2)$$

阀在每个周期中的最大取能电量由阀的电压累计正向上升幅度值 Δu_a 决定。6脉动整流阀的电压波形如图7所示。图中, T 为开通时刻, T' 为关断时刻, 其下标为阀臂序号。由图中可以看出, 阀1关断期间, 在其他桥臂没有换相的时间里, 其电压为交流线电压, 在其他阀之间的换相开始和结束时(或1个阀臂开通、另1个阀臂关断), 阀的电压波形都会产生跃变, 即存在换相齿, 且其他阀臂开通和关断引起的跃变大小分别为阀1自身开通和关断时跃变电压的一半, 即分别为

$$\Delta u_t = \sqrt{2}/2 \sin \alpha \quad (3)$$

$$\Delta u_d = \sqrt{2}/2 \sin(\alpha + \mu) \quad (4)$$

式中 α 、 μ 分别为触发角和换相角。可以计算出1个周期中阀电压上升累计量为

$$\Delta u_a = \sqrt{2}U(1 + \sin \alpha) + 2(\Delta u_t + \Delta u_d) = \sqrt{2}U[1 + \sin(\alpha + \mu) + 2 \sin \alpha] \quad (5)$$

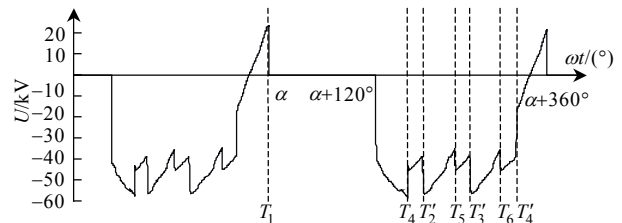


图7 阀端电压波形

Fig. 7 Waveforms of voltage across a valve

在换流阀运行试验中, 以换流阀端电压单周期电压上升区间的累计量考核取能单元设计的正确性, 而这个最小值对应的工况即为最小交流电压下的最小触发角工况。

综合上述分析, 对于最小触发角, 决定试验等效性的2个关键参量就是开通电压及阀端电压单个周期上升的累计量 Δu_a , 主要考核阀在低压下的开通与取能的可靠性。

2.2 最小关断角运行工况关键应力

当系统阀侧交流电压处于额定允许范围的最低值、处于逆变运行工况的换流阀在稳态运行中的关断角为系统设计允许的最小值时, 换流阀处于最小关断角运行状态。此时, 换流阀的关断电压为

$$u_{ri} = \sqrt{2}U_0 \sin \gamma_{\min} \quad (6)$$

换流阀的关断时间为

$$t_{\text{off}} = \frac{\gamma_{\min}}{360} \times 0.02 \quad (7)$$

式中： U_0 为阀侧交流线电压有效值； γ_{\min} 为最小关断角度。

关断过程中换流阀器件实现从正向导通态向正向阻断态的转变。在通态下，晶闸管内部各层都充满了载流子，其浓度随着通态电流增加而增加，高浓度的过剩载流子形成 1 个电子-空穴等离子体。在阻断恢复之前，载流子的浓度必须降低到接近热平衡值的程度，以便使 J_2 结的空间电荷区能够重新建立起来。

直流换流阀关断过程中电流的变化与载流子浓度变化情况如图 8 所示。以反向恢复电流达到峰值、晶闸管开始承受反向电压的时刻(即图中 t_2)作为计时零点，并设此时晶闸管中剩余的残存自由电荷量为 Q_1 ，则在关断时间结束、反向电压正向过零的时刻 t_3 晶闸管中的过剩自由电荷为

$$Q(t_q) = Q_1 \exp\left(-\frac{t_q - t_s}{\tau}\right) \quad (8)$$

式中 τ 为过剩载流子的寿命。此时，过剩自由电荷 $Q(t_q)$ 若接近热平衡水平，则晶闸管恢复阻断能力，关断成功；反之，若 $Q(t_q)$ 仍处于较高水平，则关断失败。

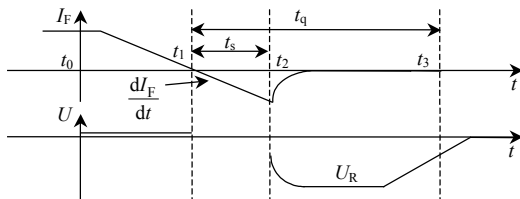


图 8 换流阀关断过程电流、电压波形

Fig. 8 Valve voltage and current waveforms at extinction

从 $Q(t_q)$ 的表达式中可以得到，当 t_2 时刻残存剩余电荷 Q_1 越大，载流子寿命越长，关断时间 t_q 越长， $Q(t_q)$ 越大关断越困难。而 Q_1 与正向导通电流 I_F 、电流熄灭时刻 t_1 电流的变化率 dI_F/dt 以及关断电压 U_R 相关，正向导通电流越大 dI_F/dt 越大，关断电压 U_R 越小，则 Q_1 越大；载流子寿命 τ 与晶闸管结温密切相关，在实际工程中晶闸管的运行温度范围内，载流子寿命随着结温 T_j 的升高而增大。

综上所述，在最小关断角运行工况中，存在着关断电压低、恢复时间短等对晶闸管关断不利的诸多条件^[15-19]。在最小关断角运行试验中，为复现最不利的关断条件，试验装置应提供不小于实际运行的最大通态电流、不大于实际运行的关断电压、不

长于实际运行的关断时间、较大的电流过零时刻变化率 dI_F/dt 以及最大运行结温 T_j 。

3 关键应力的试验实现

早期直流换流阀运行试验在背靠背全载试验回路^[20]中完成，如图 9 所示。试验回路为 1 个 6 脉动背靠背换流器，试品阀为换流器的 1 个桥臂，电源为发电机或者电网。实现最小触发角运行试验时，试品阀所在的换流器整流运行，通过调整该换流器的触发角可以调节试品阀的开通电压，得到所需要的值；实现最小关断角试验时，试品阀所在的 6 脉动桥逆变运行，通过调节其关断角可以得到所需要的关断电压及关断时间，通过调节另外 1 个 6 脉动桥的触发角来调整通过试品阀的电流。

背靠背全载试验回路能够实现最小交流电压运行试验所需的关键应力，且试验波形与运行波形一致，试验等效性好。但其由单一电源供电，试验设备电压电流等级高、容量大、造价昂贵。随着直流换流阀自身容量的不断提升，全载试验方法越来越不经济。

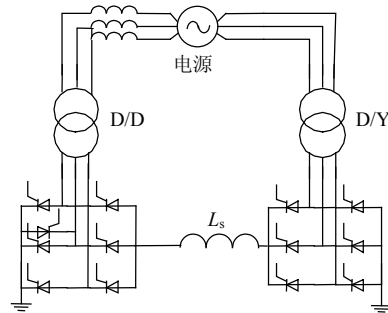


图 9 背靠背全载试验回路

Fig. 9 Back to back full-load test circuit

合成方法是针对全载试验回路的上述缺点而提出的。合成方法的基本思想是由 2 个独立的电源分别提供试品阀的电压应力和电流应力，试品阀的温度则由水系统配合电流源调节，如图 10 所示。为试品阀提供阻断期间电压应力的是高电压源，为试品阀提供导通期间电流应力的为大电流源。通过精确的控制辅助阀 V_1 、 V_2 的导通可以实现将电压、

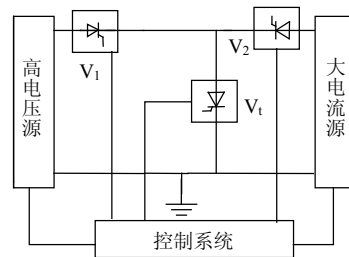


图 10 合成装置原理

Fig. 10 Diagram for synthetic test circuit

电流交替施加于试品阀上。这样试验设备不必同时具有高电压、电流等级, 大大减少设备容量。

合成试验装置实现最小交流电压运行试验时, 由于各公司的试品阀在设计上存在差别, 试验装置自身构造、工作方式也各有特色, 施加于试品阀的波形具有明显差别。但是试品阀所承受的关键应力必须满足要求。最小触发角试验触发电压不得高于实际运行中的触发电压, 取能条件要比实际运行中更苛刻; 最小关断角试验关断电压不得高于实际运行中的关断电压, 关断时间不得长于实际运行中的关断时间, 试品导通期间电流不得低于实际运行中的最大持续运行电流。

宁东—山东 ± 660 kV 直流输电换流阀最小交流电压运行试验波形如图 11、12 所示。试验中合成试验装置提供了比实际运行中更为苛刻的触发、关断条件, 试验结果表明, 换流阀能够在此极端条件下长期运行, 正确考核了换流阀在最小交流电压下的运行特性, 验证了阀设计的正确性和可靠性。

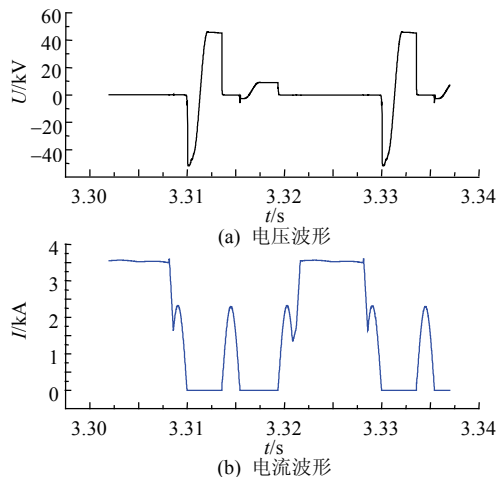


图 11 最小触发角试验试品阀电压、电流波形
Fig. 11 Waveforms of minimum firing angle test

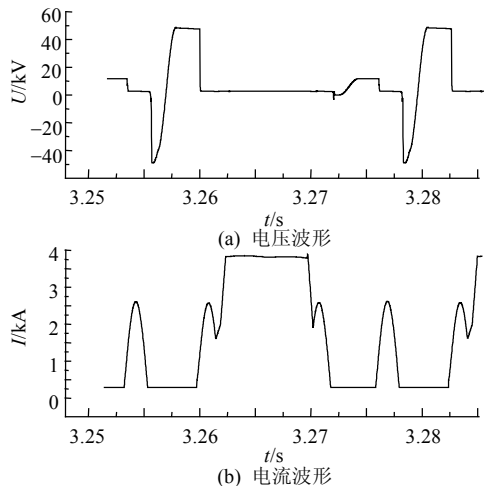


图 12 最小关断角试验试品阀电压、电流波形
Fig. 12 Waveforms of minimum extinction angle test

4 结论

直流换流阀最小交流电压运行试验的目的在于考核直流换流阀在系统交流电压降低时稳态运行的可靠性。合成试验方法作为一种等效方法, 通过复现换流阀在运行中的关键应力以考核换流阀在此工况下的开通、关断、取能等特性, 经济实用、能够实现考核目的。采用合成试验方法进行直流换流阀最小交流电压运行试验时, 需要复现如下关键应力:

1) 开通电压、电压上升幅度(最小触发角运行试验)。

2) 关断电压、关断时间、通态电流、电流熄灭时刻变化率(最小关断角运行试验)。

参考文献

- [1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3(in Chinese).
- [2] 范建斌, 于永清, 刘泽洪, 等. 800 kV 特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 13-18.
Fan Jianbin, Yu Yongqing, Liu Zehong, et al. Introduction of ± 800 kV HVDC transmission standards system[J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 13-18(in Chinese).
- [3] 常浩, 樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及其国产化[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 5-9.
Chang Hao, Fan Jichao. System design and its localization of UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 5-9(in Chinese).
- [4] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
Liu Zhenya, Shu Yinbiao, Zhang Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 28(10): 1-8(in Chinese).
- [5] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道: 高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 125.
Tang Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 125(in Chinese).
- [6] IEC 60700—1(1998) Thyristor valves for high voltage direct current(HVDC) power transmission, Part 1: electrical testing[S].
- [7] IEEE Std 857—1990 IEEE guide for test procedures for hvdc thyristor valves[S].
- [8] 查鲲鹏, 汤广福, 温家良, 等. 灵活用于 SVC 和 HVDC 阀运行试验的新型联合试验装置[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 72-75.
Zha Kumpeng, Tang Guangfu, Wen Jialiang, et al. New synthetic test equipment for the operational test of SVC and HVDC valves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 72-75(in Chinese).
- [9] 温家良, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 高压晶闸管阀运行试验方法与试验装置的研究与开发[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 26-31.
Wen Jialiang, Tang Guangfu, Zha Kumpeng, et al. Operational test method of high voltage thyristor valves and development of its

- synthetic test equipment[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 26-31(in Chinese).
- [10] 周会高, 许钊, 黄超, 等. 特高压直流输电换流阀运行试验合成回路研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 158-163.
Zhou Huigao, Xu Fan, Huang Chao, et al. Research of synthetic test circuit for operational test of UHVDC thyristor valves[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 32(12): 158-163(in Chinese).
- [11] 盛宝良, Jansson E, Blomberg A, 等. 用于HVDC晶闸管模块运行试验的新合成试验回路[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 1-4.
Sheng Baoliang, Jansson E, Blomberg A, et al. A new synthetic test circuit for the operational test of hvdc thyristor modules[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(5): 1-4(in Chinese).
- [12] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 301-303.
- [13] 格尔赫拉 W. 晶闸管[M]. 北京: 机械工程出版社. 1984: 6-27.
- [14] Woodhouse M L. Voltage and current stresses on HVDC valves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1): 199-206.
- [15] 高冲, 温家良, 于坤山. 反向恢复电荷分散性对直流换流阀的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 1-5.
Gao Chong, Wen Jialiang, Yu Kunshan. Influence of thyristor reverse recovery charge dispersity on HVDC valves[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 1-5(in Chinese).
- [16] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 串联晶闸管反向恢复状态的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 15-19.
Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Yin Yonghua, et al. Study on transient of reverse recovery of series thyristors[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 15-19(in Chinese).
- [17] 刘国友, 黄建伟, 舒丽辉, 等. 六英寸高压晶闸管的研制[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 90-92.
Liu Guoyou, Huang Jianwei, Shu Lihui, et al. Study on developing 6 inch high voltage thyristor[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 90-92(in Chinese).
- [18] Lips H P, Pauli M. Gating system for high voltage thyristor valves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 3(3): 978-983.
- [19] Chang W L, Song B P. Design of a thyristor snubber circuit by considering the reverse recovery process[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(4): 440-446.
- [20] 贺恒鑫, 何俊佳. 用于高压直流输电的晶闸管阀运行试验回路等价性比较[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 201-204.
He Hengxin, He Junjia. Equivalence evaluation of operational test circuit of HVDC thyristor valves[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 201-204(in Chinese).



杨俊

收稿日期: 2011-06-13。

作者简介:

杨俊(1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流换流阀试验技术, E-mail: yangjun@epri.sgcc.com.cn;

高冲(1982), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流换流阀及其试验技术;

查鲲鹏(1977), 男, 高级工程师, 主要从事大功率电力电子装置及其试验技术的研究工作;

邱宇峰(1961), 男, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统与电力电子技术研究工作。

(责任编辑 褚晓杰)