

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.12.006

# 高压直流输电换流阀过负荷能力计算方法

杨光源<sup>1</sup>, 李兴源<sup>2</sup>, 胡永银<sup>3</sup>, 李宽<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 2. 四川大学电气信息学院, 成都 610065;  
3. 国网四川省电力公司技能培训中心, 成都 610072)

**摘要:** 作为高压直流输电系统的核心设备之一,换流阀的安全与否直接关系到整个系统的可靠性。由于某种原因需直流输电系统过负荷运行时,应保证各设备的安全可靠运行,由换流阀的安全极限所决定的过负荷限值即为换流阀的过负荷能力。文中先讨论了影响换流阀过负荷能力的主要因素,再根据晶闸管结温和阀冷却系统冷却容量两个方面对阀的过负荷能力计算方法进行了研究,并对南方电网所辖的高肇直流输电工程中阀的过负荷能力进行了计算。

**关键词:** 高压直流输电; 换流阀; 过负荷能力; 晶闸管结温

## Overload Capability Calculation Methods of HVDC Converter Valve

YANG Guangyuan<sup>1</sup>, LI Xingyuan<sup>2</sup>, HU Yongyin<sup>3</sup>, LI Kuan<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid EHV Maintenance & Test Center, Guangzhou 510663, China;  
2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Technical Training Center of State Grid Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** As one of the most important devices in the HVDC transmission system, the converter valve directly determines the reliability of the whole system. When the HVDC system has to operate in overload condition, the maximum current of the converter valve is defined as its overload capability to ensure the secure and reliable operation of the HVDC system. In this paper, the main factors affecting the overload capability of the converter valve are summarized, and a method for calculating overload capability of converter valve is proposed according to the thyristor junction temperature and the cooling capability of the valve cooling system. Moreover, the overload capability of the converter valve in the Anshun-Zhaoqing HVDC transmission project of the China Southern Power Grid is calculated with the proposed method.

**Key words:** HVDC transmission; converter valve; overload capability; thyristor junction temperature

## 0 引言

在特定条件下,高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电的优点超过交流输电,随着晶闸管的出现,高压直流输电的发展更加迅速<sup>[1]</sup>。高压直流输电具有传输功率大,线路造价低,控制性能好等优点,是目前发达国家作为高电压、大容量、长距离送电和异步联网的重要手段<sup>[2]</sup>。随着天广、贵广 I 和 II 回、云广等直流输电工程的相继投入运行,直流输电

在中国南方电网中发挥了越来越大的作用,也对中西电东送工程发挥着重大的作用。

由于直流输电系统能够快速控制输送的功率,在受端交流系统发生故障或负荷增加等紧急情况下,需要直流系统为交流系统提供紧急功率支援,将增加输送容量,即过负荷运行。过负荷能力可以使换流阀、平波电抗器、换流变压器、直流滤波器、套管等设备在各种工况下过负荷运行,且不会因承受过大的应力而遭受不必要的损坏<sup>[3]</sup>。换流站的过负荷能力由各种电力设备的过负荷能力共同决定,取整流站和逆变站中较小过负荷限值作为整个直流输电系

收稿日期:2015-05-22; 修回日期:2015-06-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51037003);国家电网公司科技重大专项(SGCC-MPLG027-2012)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51037003), Science and Technology Foundation of State Grid(SGCC-MPLG027-2012).

统的过负荷能力。

换流阀为高压直流输电系统的核心设备之一,其安全与否直接关系到整个直流系统的可靠性。文中先对高压直流输电系统中换流阀的过负荷能力影响因素进行了分析,并对阀过负荷能力的具体计算方法进行了研究。其次,结合南方电网所辖高肇直流输电工程的参数对其换流阀过负荷能力进行了计算。最后对全文进行总结。

## 1 阀过负荷能力及影响因素

### 1.1 阀过负荷能力

换流阀的过负荷能力应与高压直流输电系统的过负荷能力相匹配,根据系统要求,换流阀的过负荷能力分为 3 种:①连续过负荷额定值,可长期连续运行的过负荷能力;②短时过负荷额定值,一般是指 0.5 h 到数小时内可连续运行的过负荷能力;③暂态过负荷额定值,一般是指数秒钟内的过负荷能力<sup>[4]</sup>。

### 1.2 阀过负荷能力影响因素

换流阀是高压直流输电系统中的核心设备之一,除了能在额定负荷下长期稳定运行外,还要求其能在一定过负荷情况下运行一段时间。换流阀的主要组成部分为晶闸管,一个换流站内由无数个晶闸管及其附属元件组成,并置于阀厅内,且安装有冷却系统将阀内产生的热量带到外界环境中去。影响换流阀过负荷能力的主要因素有以下几点。

1)晶闸管结温限制。根据实际测量到的直流电流和水循环冷却系统入水口温度可以计算出晶闸管结核的温度。其结温不能超过一定的范围,否则会使阀误导通或是发生热击穿而永久性的损坏。当运行电流超过一定值,使得晶闸管结温超过了限定值时,则需要控制单元降低电流整定值,实行功率回降。若此时结温仍高于限值,则继续降低电流值,直到晶闸管结温降到限定值以下。使得结温不超过限值的最大直流电流,即为由晶闸管结温限制的过负荷能力。

2)阀冷却容量的限制。换流阀在工作时会产生大量的热,为了能有效地将热量排到外界环境中去,对换流阀配置有冷却系统,冷却方式一般分为风冷和水冷,其中水冷方式居多。水冷式冷却系统由内冷水系统和外冷水系统组成。内冷水系统为闭环系统,主要作用是将阀内部产生的热量传至内冷却水;外冷系统为开环系统,主要对内冷却水进行降温,将热量传到外界环境中<sup>[5-7]</sup>。

一套冷却系统有一个最大的冷却容量值,可以根据冷却系统所控制的入水口温度和出水口温度来计算冷却系统的最大冷却容量。冷却系统所散发出

的热量不能超过其冷却容量。当存在冗余冷却时,阀的过负荷能力会高于没有冗余冷却容量的情况。

3)阀厅温度的影响。阀厅温度的高低对晶闸管阀的散热也有一定的影响。阀厅温度越高其过负荷能力越低,阀厅温度越低,过负荷能力越高<sup>[3]</sup>。

以上为影响阀过负荷能力的主要因素。除此之外,环境温度也会影响外冷水系统而间接影响阀的过负荷能力。冷却系统的控制方式、保护方式、安装方式等都会对阀的过负荷能力有一定的影响<sup>[8]</sup>。

## 2 阀过负荷能力计算方法

根据以上影响晶闸管阀过负荷能力的主要因素,从晶闸管结温和冷却系统冷却容量两个方面分别计算出晶闸管换流阀的过负荷能力,再取两个计算值中较小者作为换流阀的过负荷能力。

### 2.1 晶闸管结温计算

可以通过测试和计算两种方法得到晶闸管结温。测试法主要有基于红外线测量温度的直接测试法和基于热敏参数的间接测试法<sup>[9]</sup>。算法主要有传热阻抗法、数学模型仿真法和电热耦模型法<sup>[10-13]</sup>。测试法的主要缺点是测试温度误差较大,算法一般具有较高的计算精度,但其算法复杂,运算速度一般较慢。权衡各方面的优缺点,基于热阻抗模型的晶闸管结温计算方法既计算精度高,运行速度又相对较快,故在工程计算中得到了较好的应用。

基于热阻抗模型的晶闸管结温计算方法,分稳态热阻抗模型法和暂态热阻抗法。热阻抗可定义为单位时间内流过传热介质横截面单位功率时在两个截面之间产生的温度差( $K/K_W$ ),表达式为

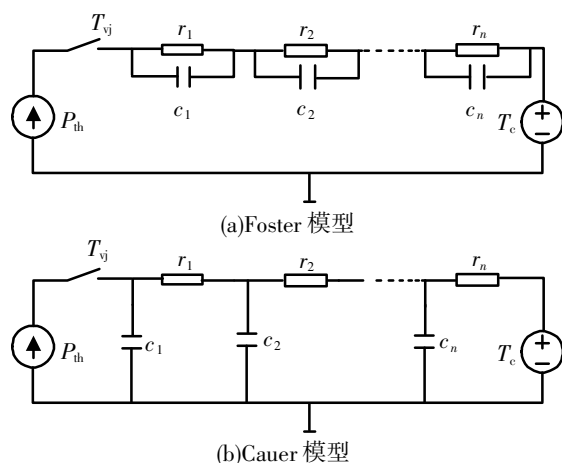
$$R_{th} = \frac{T_j - T_0}{P} \quad (1)$$

式(1)中: $P$ 为单位时间内从晶闸管结核内部向外散出的热量; $T_j$ 为晶闸管结核温度; $T_0$ 为晶闸管外壳温度。稳态热阻抗法中 $R_{th}$ 即为由晶闸管结核到外壳的整体热阻抗;暂态热阻抗法中用 $Z_{th}(t)$ 表示,其为时间的函数,且将整个散热路径分解成几个部分来表示。可建立等效模型来分析暂态热阻抗。常见有Cauer型和Foster型两种,其结构见图1。

随时间变化的暂态热阻抗可由模型中各阶热阻抗的叠加来表示。其表达式为

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n r_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (2)$$

式(2)中: $Z_{th}(t)$ 为晶闸管的暂态热阻抗; $r_i$ 各阶环节等效的热阻。从式(2)中可以看出,晶闸管的暂态热阻抗为一衰减的指数形式,且其时间常数很小,一



$r_i, c_i (i=1, \dots, n)$  分别为各阶环节等效的热阻和热容, 其乘积表示各阶的热时间常数。

图 1 晶闸管结壳热阻抗等效模型

Fig. 1 Thermal impedance network of thyristor junction to heatsink

般只有几秒钟到几分钟<sup>[4]</sup>。结温在几秒到几分钟内就已经稳定了, 故对于小时级过负荷能力的计算可按照长期过负荷能力的计算方法来进行。变换式(1)可得到晶闸管稳态结温的表达式为

$$T_j = T_0 + PR_{th0} \quad (3)$$

对于暂态时的晶闸管结温, 可将式(3)中的稳态热阻抗由式(2)中的暂态热阻抗来替换所求得。

## 2.2 冷却系统出水口温度计算

当一水循环冷却系统设计好以后, 其冷却容量、冷却水的入水口温度、出水口温度等都将控制在一定的范围内。即可根据冷却系统的入水口温度加上因散热造成的内冷却水温升来计算出内循环冷却水的出水口温度。内冷却水温升表达式为

$$\Delta T = P_{\text{loss}} \frac{60}{Qk_w} \quad (4)$$

式(4)中:  $\Delta T$  为内冷却水的温升,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{\text{loss}}$  为内冷却水单位时间内所吸收的热量,  $\text{kW}$ ;  $Q$  为内冷却水主管道的水流量,  $\text{L}/\text{min}$ ;  $k_w$  为冷却水的比热容,  $\text{Ws}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$P_{\text{loss}}$  为阀内所有的损耗功率, 可根据文[14]中所述方法进行求得。但是计算过程过于复杂, 且含有许多未知参数。由经验可得, 整个晶闸管阀的损耗中有 85% 左右为晶闸管的损耗<sup>[4]</sup>。而晶闸管的损耗比较容易求得, 故可以按式(5)求得阀内的所有损耗功率。

$$P_{\text{loss}} = n \cdot P_T / 0.85 \quad (5)$$

式(5)中:  $P_T$  为单个晶闸管的损耗功率, 主要包括通态损耗和动态损耗。  $n$  为阀内的晶闸管数量。一般整个换流阀由数套冷却系统进行冷却, 此时  $n$  则为一套冷却系统所冷却的晶闸管数目。内冷却水出水口温度为

$$T_{\text{wout}} = T_{\text{win}} + \Delta T \quad (6)$$

式(6)中:  $T_{\text{wout}}$  为内冷却水出水口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{win}}$  为内冷却水入口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta T$  为内冷却水的温升,  $^{\circ}\text{C}$ 。  $T_{\text{wout}}$  应小于冷却系统最高允许的出水口温度。

## 3 实例计算

运用以上所介绍的高压直流输电换流阀过负荷能力计算方法, 对南方电网所辖的高肇  $\pm 500 \text{ kV}$  直流输电工程中换流阀的过负荷能力进行计算与分析。

高肇直流输电工程包括贵州省安顺换流站和广东省高要市的肇庆换流站, 线路全长 891.49 km, 额定直流电压为  $\pm 500 \text{ kV}$ , 额定输送容量为 3 000 MW。阀中晶闸管和阀冷却系统部分参数见表 1、2, 表 1 中晶闸管型号为 T2563N75T-S34。

表 1 高肇直流输电工程换流阀晶闸管参数

Table 1 Thyristor valve parameters of Anshun-Zhaoqing HVDC transmission project

| 参数                    | 数值     | 参数                      | 数值       |
|-----------------------|--------|-------------------------|----------|
| 阻尼电阻/ $\Omega$        | 36.00  | 门槛电压/V                  | 1.58     |
| 阻尼电容/ $\mu\text{F}$   | 1.40   | 斜率电阻/ $\Omega/\text{m}$ | 0.29     |
| 均压电阻 $\text{k}\Omega$ | 500.00 | 额定电流/A                  | 3 000.00 |

表 2 高肇直流输电工程换流阀冷却系统参数

Table 2 Valve cooling system parameters of Anshun-Zhaoqing HVDC transmission project

| 参数                                          | 换流站     |         |
|---------------------------------------------|---------|---------|
|                                             | 安顺      | 肇庆      |
| 最大环境温度/ $^{\circ}\text{C}$                  | 35.0    | 40.0    |
| 最小环境温度/ $^{\circ}\text{C}$                  | -7.6    | -1.0    |
| 入水口温度最小值/ $^{\circ}\text{C}$                | 5.0     | 5.0     |
| 入水口温度报警值/ $^{\circ}\text{C}$                | 49.2    | 49.2    |
| 出水口温度最大值(额定)/ $^{\circ}\text{C}$            | 62.0    | 62.0    |
| 出水口温度最大值(过载)/ $^{\circ}\text{C}$            | 67.0    | 67.0    |
| 最小冷却水流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ | 4 110.0 | 4 110.0 |
| 最大冷却水流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ | 4 280.0 | 4 280.0 |

### 3.1 长期过负荷能力计算

根据 2.1 节所叙述的长期过负荷情况下晶闸管阀结温计算方法和 2.2 节所述阀冷却系统出水口温度计算方法可以分别计算出安顺和肇庆两个换流站各个过负荷情况下的晶闸管结温和内冷却系统出水口温度。计算结果见表 3。

换流站在设计时一般按照晶闸管长期运行时的结温不超过  $90^{\circ}\text{C}$ , 短时过载最高结温不超过  $96^{\circ}\text{C}$  为结温限值<sup>[15]</sup>。而从高肇直流输电工程阀冷却系统的设计规程可知, 内冷却水出水口温度限值为  $62^{\circ}\text{C}$ 。从表 3 中的数据得知高肇直流输电工程中换流阀长

表 3 长期过负荷能力计算结果

| Table 3 Results of long-term overload capacity calculations |       |               |       |               |
|-------------------------------------------------------------|-------|---------------|-------|---------------|
| 过负荷/<br>p.u.                                                | 安顺站   |               | 肇庆站   |               |
|                                                             | 阀结温/℃ | 内冷水出口<br>温度/℃ | 阀结温/℃ | 内冷水出口<br>温度/℃ |
| 1.00                                                        | 82.73 | 60.04         | 82.73 | 60.04         |
| 1.05                                                        | 85.03 | 60.78         | 85.03 | 60.78         |
| 1.10                                                        | 87.39 | 61.54         | 87.39 | 61.54         |
| 1.13                                                        | 88.84 | 62.00         | 88.84 | 62.00         |
| 1.15                                                        | 89.81 | 62.32         | 89.81 | 62.32         |
| 1.20                                                        | 92.29 | 63.12         | 92.29 | 63.12         |
| 1.25                                                        | 94.83 | 63.95         | 94.83 | 63.95         |
| 1.30                                                        | 97.43 | 64.79         | 97.43 | 64.79         |

期过负荷能力为 1.13 p.u.。过负荷能力是由内冷却水出水口温度所决定的。

由于晶闸管的热时间常数很小,其晶温在数秒或数分钟内就稳定了。故在小时级过负荷运行情况下,阀的结温计算结果和长期过负荷情况下相同。只是内冷却水出水口温度限值不同,从表 3 可知阀的小时级过负荷能力为 1.15 p.u.,由晶闸管结温限制。而整个输电系统的小时级过负荷能力一般由换流变压器的小时级过负荷能力来决定。

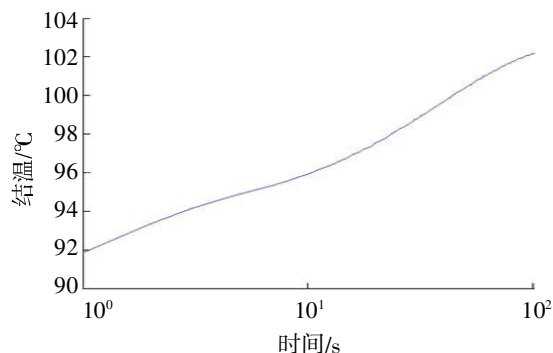
### 3.2 秒级过负荷能力计算

秒级过负荷能力可以在持续过负荷的任何时刻发生,即可以建立在最大持续过负荷条件下(1.13 p.u.),再根据 2.1 节所叙述的晶闸管暂态结温计算方法,计算出安顺和肇庆两个换流站的秒级过负荷能力。其计算结果见图 2。

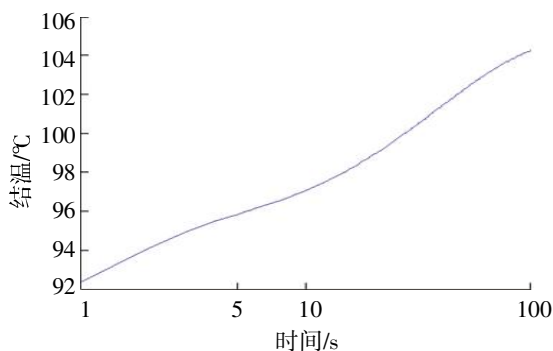
从图 2(a)中的计算结果可以看出,1.40 p.u.过负荷运行情况时,可以运行 10 s,使阀的结温不超过 96 ℃,该过负荷即为高肇直流输电工程阀的 10 s 过负荷能力。从图 2(b)中可以看出 1.44 p.u.过负荷运行时,可以运行 5 s 而使其结温不超过 96 ℃,即高肇直流输电工程的 5 s 过负荷能力为 1.44 p.u.。从图 2(c)中可以看出 1.50 p.u.过负荷运行时,可以运行 3 s 而使其结温不超过 96 ℃,即高肇直流输电工程的 3 s 过负荷能力为 1.50 p.u.。

## 4 结语

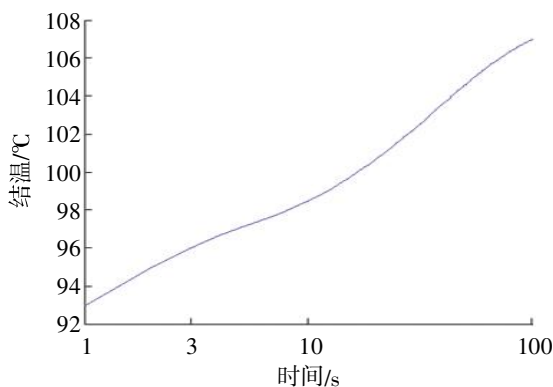
文中主要研究了高压直流输电工程中换流阀的过负荷能力计算方法。先对直流输电工程的过负荷能力进行了简要的说明,再详细分析了高压直流输电工程中影响换流阀过负荷能力的因素,分别从阀中晶闸管结温和内冷却水出水口温度两个方面研究了换流阀的过负荷能力计算方法。并对南方电网所



(a) 1.40 p.u. 过负荷运行时



(b) 1.44 p.u. 过负荷运行时



(c) 1.50 p.u. 过负荷运行时

图 2 秒级过负荷能力计算结果

Fig. 2 Second-level overload results

辖的高肇直流输电工程换流阀的过负荷能力进行了计算。

以上仅为由换流阀所确定的直流输电工程过负荷能力计算方法。若要计算整个系统的过负荷能力,还需综合考虑换流变压器、平波电抗器、直流滤波器等所确定的过负荷能力,在这些过负荷能力中,取最小过负荷限值作为整个直流输电工程的过负荷能力。

### 参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [3] 闫全全, 阴春晓. 高压直流输电系统中的过负荷限制分析[J]. 电力与能源, 2012, 33(6): 540-542.

- YAN Quanquan, YIN Chunxiao. Overload limiter analysis in the HVDC system[J]. Power & Energy, 2012, 33(6): 540-542.
- [4] 赵畹君. 高压直流输电工程技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统过负荷功能研究[J]. 广东电力, 2008, 21(2): 1-4.
- ZHU Taoxi, WANG Chao. Research on overload function in Tian-Guang HVDC system[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(2): 1-4.
- [6] 梁家豪, 林睿, 周翔胜. 天广和贵广直流工程中的阀冷控制系统[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 92-95.
- LIANG Jiahao, LIN Rui, ZHOU Xiangsheng. Valve-cooling control system applied in Tian-Guang & Gui-Guang DC transmission projects[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 92-95.
- [7] 李勇. 天广直流阀冷却内冷水系统运行情况及改进[J]. 广东输电与变电技术, 2009, 11(1): 25-26.
- LI Yong. Operating status and improvement of valve inner cooling water system in Tian-Guang HVDC[J]. Guangdong Power Transmission Technology, 2009, 11(1): 25-26.
- [8] 中国南方电网公司超高压输电公司.  $\pm 800$  kV 直流换流站运行技术(上册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 1-6.
- LAN Yuanliang, TANG Guangfu, YIN Yonghua, et al. Study on analysis methods of thyristor thermal model[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(19): 1-6.
- [10] 蓝元良, 汤广福, 武守远, 等. 220 kV 成碧线可控串补晶闸管阀电气设计及仿真[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 11-15.
- LAN Yuanliang, TANG Guangfu, WU Shouyuan, et al. Electrical design and simulation of thyristor valves for thyristor controlled series compensation of 220 kV cheng-bi transmission line[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 11-15.
- [11] 李庆民, 徐国政, 钱家骊, 等. 大功率 GTO 等效传热模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 19-22.
- LI Qingmin, XU Guozheng, QIAN Jiali, et al. Investigation on the equivalent heat transfer model of large capacity GTO[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2000, 20(1): 19-22.
- [12] 李侠, SACHS G, UDER M.  $\pm 800$  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, SACHS G, UDER M. 6 inch high power thyristor valves for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 1-5.
- [13] GB/Z 25843—2010  $\pm 800$  kV 特高压直流输电控制与保护设备技术导则[S]. 2010.
- GB/Z 25843—2010 Specifications for control and protection equipment of  $\pm 800$  kV ultra high voltage direct current transmission[S]. 2010.
- [14] IEC 61803—1999 Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations[S]. 2010.
- [15] 田邑安, 张雷, 李侠, 等.  $\pm 1$  100 kV/5 000 A 换流阀在交流系统故障时的运行能力分析[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 98-101.
- TIAN Yi'an, ZHANG Lei, LI Xia, et al. Operation capability study on  $\pm 1$  100 kV/5 000 A thyristor converter valve during AC system faults[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 98-101.

杨光源(1986—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电控制保护技术。

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

胡永银(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统高压直流输电。

李宽(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统高压直流输电。

(上接第 32 页)

- DENG Xing, MENG Shaoxin, YIN Xianggen, et al. Analysis on asymmetry of sequence parameters for parallel multi-circuit cables[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3119-3124.
- [19] 马西奎. 电磁场理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- MA Xikui. Electromagnetic field theory and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.
- [20] 马宏忠, 倪欣荣, 黎腊红, 等. 高压电力电缆护层感应电压的补偿研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 148-151.
- MA Hongzhong, NI Xinrong, LI Lahong, et al. Research on compensation of induced voltage in the metal shield of the high-voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 148-151.
- [21] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- CHEN Heng. Steady-state analysis of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- 刘渝根(1963—), 男, 硕士, 教授, 长期从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的教学和科研工作。
- 尚龙龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事接地技术与电力系统过电压研究。