

# 云广特高压直流输电工程换流阀过负荷能力分析与计算

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

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 中国南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

**摘要:** 云广±800 kV 直流输电工程是世界上第一条特高压直流输电工程。受端交流系统由于短路故障或负荷增加等原因, 需要直流系统提供紧急功率支援时, 将增加其输送容量, 甚至会使直流系统过负荷运行。主要对换流阀的过负荷能力进行了研究, 根据阀过负荷的机理, 从阀中晶闸管结温和冷却系统冷却容量两个方面得到了阀过负荷能力的计算方法。并根据楚穗直流的具体数据进行了工程计算, 计算结果表明该方法可以精确得到楚穗直流输电工程中阀的过负荷能力, 可为实际直流输电工程的设计和运行提供参考和指导。

**关键词:** 特高压直流输电; 换流阀; 过负荷能力; 结温; 冷却系统

## Analysis and calculation of converter valve overload capability in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission

HU Yong-yin<sup>1</sup>, LI Xing-yuan<sup>1</sup>, LI Kuan<sup>1</sup>, YANG Guang-yuan<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Yunnan-Guangdong ±800 kV DC transmission project is the first UHVDC transmission project in the world. The DC power transmission system must supply emergency power when the load increases or AC system malfunctions at the receiving end. It requires the DC power system to overload operating to increase its transmission capacity. This paper mainly studies the overload capability of the converter valve. It proposes a theory of calculating the overload capability based on the junction temperature and cooling capability of the valve cooling system. Moreover, with the specific data, it calculates and analyzes the overload capability of converter valve in Chuxiong-Suidong DC transmission project. The result indicates that this arithmetic can get the accurate overload capability of converter valve, which can provide reference and guidance to the design and operation of the practical HVDC transmission project.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51037003).

**Key words:** UHVDC; converter valve; overload capability; junction temperature; cooling system

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0102-05

## 0 引言

特定条件下, 高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输电系统的优点超过了交流输电系统。我国的高压直流输电工程起步比较晚, 但发展非常迅速, 电压等级也越来越高。特别是近几年来, 南方电网已形成了大规模的交直流互联电网<sup>[1]</sup>。

云广±800 kV 直流输电是世界上第一条特高压直流输电工程, 它西起云南省楚雄州的楚雄换流站, 东至广东省广州市增城的穗东换流站, 全长

1 373 km, 其额定输送功率可达 5 000 MW<sup>[2]</sup>。云广直流输电工程首次采用了双 12 脉动阀组串联一次主回路的连接方式, 并辅助以旁路开关、旁路刀闸等一次设备来增大系统运行的灵活性, 减少因局部故障所带来的经济损失<sup>[3]</sup>。

文献[4]对换流阀的直流耐压方法进行了研究, 得出一种可靠实用的实验方法。文献[5]提出一种换流阀屏蔽罩寄生电容的提取方法, 可建立精确的换流系统宽频等效电路模型。文献[6]建立了换流阀高频模型, 对换流阀干扰进行预测。从而保证换流阀安全可靠运行。文献[7]提出一种换流阀闭锁策略来保护直流输电系统。文献[8]对换流站水冷监测系统改进, 提高水冷系统的可靠运行。以上研究均

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(51037003); 南网超高压检修中心资助(K-GY2012-046)

从模型的精确性, 信号的检测及干扰来分析高压直流输电的可靠性。本文将从高压直流输电的输送容量出发, 分析计算换流阀的过负荷能力, 从而保证高压直流输电系统安全可靠地运行。从阀晶闸管结温和阀冷却系统冷却容量两方面出发提出一种阀过负荷能力的计算方法。最后用这种方法对云广直流输电工程换流阀的过负荷能力进行计算和分析。

## 1 云广直流换流阀的结构及特点

云广直流为双极直流输电工程, 第一极额定直流电压为+800 kV, 第二极额定直流电压为-800 kV, 其额定输送容量可达到 5 000 MW。两端换流站的换流阀均采用 5 英寸光直接触发晶闸管。阀的基本组成单位为可控硅, 15 个可控硅与两台阀电抗器串联后, 再与一均压电容器并联组成一个可控硅阀段。两个阀段串联后构成一个换流阀模块。两个阀模块串联构成一个换流阀(换流桥臂)。两个换流阀串联构成一个二重阀(一座阀塔)。每个阀组由六座阀塔组成。各模块可控硅元件数量如表 1 所示。

表 1 各模块可控硅元件数量

Table 1 Numbers of thyristors in each module

模块名	可控硅数量/块	模块名	可控硅数量/块
可控硅阀段	15	二重阀(阀塔)	60×2=120
换流阀模块	15×2=30	阀组(一个阀厅)	120×6=720
换流阀(桥臂)	30×2=60	全站	720×4=2 880

楚雄和穗东换流站均采用空气绝缘, 水冷却, 悬吊式二重阀的连接方式。一个换流站分两极, 每极由两个阀厅构成, 一个极由两个串联的阀厅所组成。由于各个阀厅的电压等级不同, 绝缘设备, 对地距离及其他外围设备都有所不同<sup>[9-10]</sup>。云广直流一极换流站阀组连接方式如图 1 所示。

云广特高压直流输电工程最大特点是, 电压等级高、输电距离长、输送容量大。这些特点决定了其线路和设备参数不能简单地按照±500 kV 直流输电的规范和要求来选取, 而要进行特殊的实验。

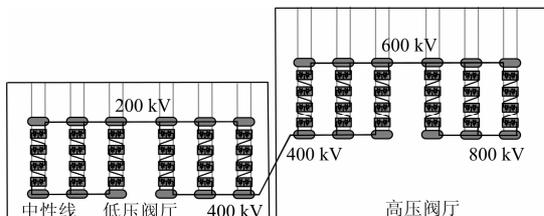


图 1 云广直流一极换流阀连接方式

Fig. 1 Connection of converter valve in one pole station of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission

## 2 阀过负荷理论分析

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三种: 1)连续过负荷额定值, 可以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 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, 指数秒钟内的过负荷能力<sup>[11]</sup>。

### 2.1 长期过负荷

晶闸管阀的长期过负荷能力, 即要求阀在高于额定负荷的情况下, 可以长期稳定运行的能力。由于负荷的增加, 阀内晶闸管的结温也会相应地增加, 但晶闸管的结温不能超过其最高允许值。除了晶闸管结温的限制以外, 还要考虑到阀冷却系统的散热能力, 即阀内的所有损耗不能超过冷却系统的最大散热能力。

长期过负荷下晶闸管的结温一般根据其散热路径的稳态热阻抗模型来计算。以单位时间内流过传热介质横截面积单位功率时在两个截面之间的温度差来表示热阻抗( $K/K_w$ )<sup>[12]</sup>。即

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

式中:  $P$  为晶闸管内单位时间产生的热量(功率损耗, kW);  $T_j$  为晶闸管的结温;  $T_0$  为外界环境温度;  $R_{th}$  为由晶闸管结到外界环境的所有传热路径的总的热阻。变换式(1)可以得到稳态时晶闸管结温表达式为

$$T_j = T_0 + R_{th} \cdot P \quad (2)$$

式中:  $P$  为一个晶闸管的总损耗, 主要包括通态损耗( $P_{T1}$ )和动态损耗( $P_{T2}$ )。通态损耗由晶闸管的参数和运行状态等因素确定, 表达式如式(3)所示<sup>[13]</sup>。

$$P_{T1} = I_{TAVM} U_{T0} + I_{TRMS}^2 r_T \quad (3)$$

式中:  $I_{TAVM}$  为晶闸管的通态平均电流;  $I_{TRMS}$  为晶闸管的有效电流;  $U_{T0}$  为门槛电压;  $r_T$  为斜率电阻。而动态损耗与很多因素相关, 如开通和关断时间, 开通和关断频率, 晶闸管的技术参数和运行情况等。一般根据各条直流输电工程的运行和控制方式来取一个经验值。

晶闸管散热的热时间常数比较小, 只有几秒钟到几分钟<sup>[11]</sup>。在升温 and 降温过程中, 结温在几秒到几分钟内就已稳定, 故对于小时级的过负荷能力的计算可以按照长期过负荷的计算方法来进行。

### 2.2 秒级过负荷

对没有达到稳态的传热过程, 不但要考虑热阻的影响还要考虑到热容的影响。晶闸管硅片层、合

金化层、钼片层与铜基座各个结构层的热阻热容都不相同,且会随着时间的变化而变化<sup>[14]</sup>。为了分析散热路径总的瞬态热阻抗随时间的变化,常以等效传热网络的方式建立模型。常用的网络模型有Cauer型和Foster型两种。其结构如图2所示。

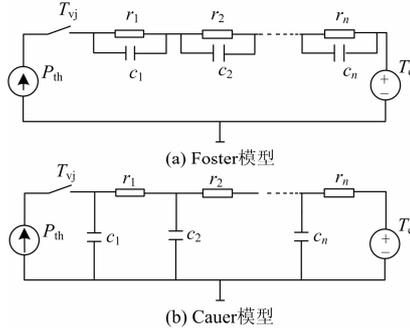


图2 晶闸管结壳热阻抗等效模型

Fig. 2 Thermal impedance network of thyristor junction to heatsink

图2中:  $R_{th}$  为晶闸管的功率损耗;  $r_i$ 、 $c_i$  为各阶环节等效热阻和热容,其乘积  $\tau_i$  表示各阶热时间常数;  $T_c$  为晶闸管外壳的温度;  $T_j$  为晶闸管的结温,接地端表示外界环境温度。当各阶的热阻和热容确定后,可得到在任意时刻结到壳的等效的热阻抗,表达式为

$$Z_{th}(t) = \sum_{i=1}^n r_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (4)$$

式中,  $n$  为模型的阶数。由式(4)求出晶闸管结到壳的瞬态热阻抗,可将式(2)中的稳态热阻换为瞬态热阻抗来计算晶闸管在暂态时的结温。

### 2.3 阀冷却系统

换流阀工作时将产生大量的热,在进行换流站设计时,会对阀配置冷却系统。水循环冷却系统通过循环水带走热量,防止阀设备因过热而损坏。云广直流输电使用的冷却系统即为水循环冷却方式,一套冷却系统可同时对六个阀塔进行冷却<sup>[15]</sup>。

冷却系统的控制装置可将入水口温度控制在一定范围内,冷却系统的冷却容量由出水口温度来限制,即出水口温度不能超过一个的限值。根据换流阀的技术参数和运行状态,可以求得阀内的总的功率损耗,再根据式(5)求得冷却水的最大温升。

$$\Delta\theta = P_{loss} \cdot \frac{k_T}{Q \cdot k_W} \quad (5)$$

式中:  $\Delta\theta$  为冷却水温升,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{loss}$  为冷却水单位时间内所带出的热量,  $\text{kW}$ ;  $Q$  为冷却水主管道的流量,

$\text{L}/\text{min}$ ;  $k_W$  为冷却水的比热容,  $\text{Ws}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ ;  $k_T$  为常数 60,表示 1 min 为 60 s。

整个阀内除了晶闸管元件会产生热量以外, 阻尼电阻和阀电抗器等也会产生热量,这部分热量同样是由冷却水带出。按经验可得阀中晶闸管的损耗占总损耗的 85%<sup>[11]</sup>, 而晶闸管损耗由通态损耗和动态损耗求得,故可求出冷却水最大所能散发出的功率损耗。表达式为

$$P_{loss} = n \cdot P_T / 0.85 \quad (6)$$

式中:  $P_{loss}$  为内冷却系统所带出的功率损耗;  $n$  为一套冷却系统所冷却的晶闸管个数(6个阀塔的晶闸管数量, 720个);  $P_T$  为一个晶闸管的损耗(包括通态和动态损耗)。出水口温度可以由入水口温度加上温升而得到。即

$$T_{wout} = T_{win} + \Delta\theta \quad (7)$$

式中:  $T_{wout}$  为冷却水出水口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{win}$  为冷却水入口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta\theta$  为内冷却水温升,  $^{\circ}\text{C}$ 。  $T_{wout}$  应小于冷却系统最高允许的出水口温度。

通过以上晶闸管结温和内冷却水出水口温度的计算方法,可求出两个最大直流电流的限制值。取其中较小者为整个换流站的过负荷能力。再分别对楚雄和穗东两个换流站进行计算,取其较小者作为整个云广直流输电工程中阀的过负荷运行能力。

### 3 阀过负荷能力计算与分析实例

通过收集楚雄和穗东换流站的技术参数。分别对晶闸管结温和冷却水出水口温度进行计算,并最终分析其过负荷能力。云广直流输电工程的晶闸管和冷却系统部分技术参数如表2、表3所示。

表2 阀中晶闸管参数

Table 2 Thyristor valve parameters	
参数	数值及单位
换流站	楚雄和穗东
型号	T2563 N80T-S34(8 kV 5" LTT)
阻尼电阻	36 $\Omega$
阻尼电容	1.6 $\mu\text{F}$
均压电容	4 nF
门槛电压	1.32 V
斜率电阻	0.29 m $\Omega$
额定电流	3 125 A

表 3 阀冷却系统参数

Table 3 Parameters of valve cooling system

参数	数值及单位	数值及单位
换流站	楚雄	穗东
最大环境温度	34 °C	38 °C
最小环境温度	-5.5 °C	-2 °C
入水口温度最小值	5 °C	5 °C
入水口温度报警值	47 °C	47 °C
出水口温度最大值	60.7 °C	60.7 °C
最小冷却水流量	3 530 L/min	3 530 L/min
最大冷却水流量	3 870 L/min	3 870 L/min

### 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的结温计算方法和 2.3 节中的阀冷却系统出水口温度计算方法可以分别计算出楚雄和穗东换流站在各个过负荷情况下的晶闸管结温和冷却系统出水口温度。计算结果如表 4 所示。

表 4 长期过负荷能力计算结果

Table 4 Long-term overload capacity calculation results

过负荷/ p.u.	楚雄站		穗东站	
	阀结温/ °C	内冷水出口 温度/°C	阀结温/ °C	内冷水出口 温度/°C
1.0	75.80	56.18	75.80	56.18
1.05	77.86	56.84	77.86	56.84
1.1	79.97	57.52	79.97	57.52
1.15	82.14	58.21	82.14	58.21
1.2	84.38	58.92	84.38	58.92
1.25	86.67	59.65	86.67	59.65
1.3	89.02	60.40	89.02	60.40
1.32	89.97	60.70	89.97	60.70

从楚穗直流输电工程的运行规程可知, 长期运行时的换流阀结温不得超过 80 °C, 暂态运行时的换流阀结温不得超过 95.8 °C, 内冷却水出水口最高允许温度为 60.7 °C。从表 4 可知, 两个换流站在 1.1 p.u. 过负荷运行情况时, 其结温为 79.97 °C, 小于 80 °C。而内冷却水出水口温度为 57.52 °C, 小于最高允许值。若再增加直流电流, 则阀的结温将超过 80 °C。故楚穗直流输电工程阀的长期过负荷能力 1.1 p.u., 而冷却系统还有冗余冷却容量。

由于晶闸管的热时间常数很小, 其结温在数秒或数分钟内就已稳定。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。即阀的小时级过负荷能力同样为 1.1 p.u.。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

秒级过负荷能力可以在持续过负荷的任何时刻发生, 楚穗直流输电可建立在最大持续过负荷条件下, 再根据 2.2 节所叙述的晶闸管暂态结温的计算方法计算出楚雄和穗东两个换流站的秒级过负荷运行能力。其计算结果如图 3 所示。

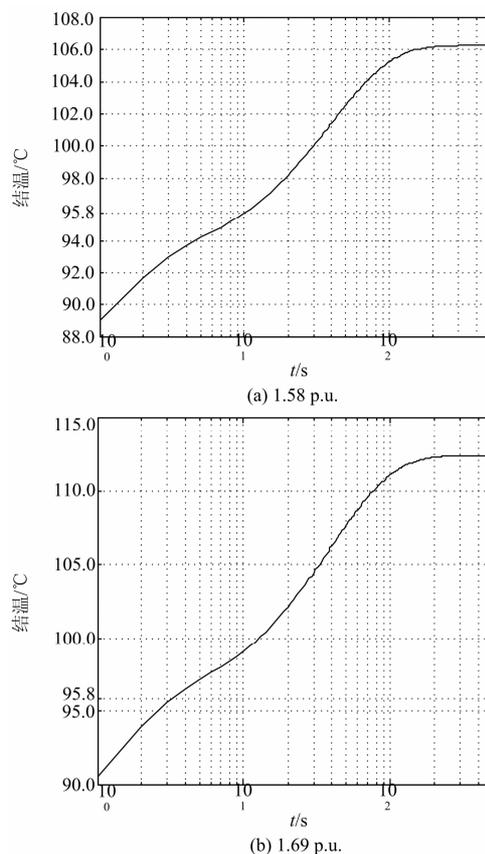


图 3 秒级过负荷计算结果

Fig. 3 Second-level overload results

从图 3(a)中计算结果可以看出, 1.58 p.u. 过负荷运行情况时, 可以运行 10 s, 使阀的结温不超过 95.8 °C, 该过负荷即楚穗直流输电工程阀的 10 s 过负荷能力。从图 3(b)中可以看出直流输电工程在 1.69 p.u. 过负荷运行时, 可运行 3 s 而使其结温不超过 95.8 °C, 即楚穗直流输电工程阀的 3 s 过负荷能力为 1.69 p.u.

## 4 结束语

本文先对楚穗直流输电工程的背景作了简要的概述, 再对该工程换流阀的结构及安装方式做了详细的介绍。对高压直流输电换流阀过负荷能力计算方法进行了研究, 提出一种可靠的过负荷能力计算方法, 最后对楚穗直流输电系统中阀的过负荷能力进行计算, 并得到了最终的结果。

以上仅为由换流阀确定的直流输电的过负荷能力。若要计算整个系统的过负荷能力, 还得考虑换流变压器、平波电抗器、直流滤波器等所确定的过负荷能力, 在这些过负荷能力基础上, 取最小过负荷能力值作为整个直流输电工程的过负荷运行能力。

### 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] 张志朝, 王海军. 云广工程阀组旁路开关控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 160-164.  
ZHANG Zhi-chao, WANG Hai-jun. Control strategy for valve group bypass switch in Yun-Guang project[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 160-164.
- [3] 田方, 黎小林, 黄莹, 等. 云广直流输电工程换流阀多重阀单元型式试验研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(6): 40-43.  
TIAN Fang, LI Xiao-lin, HUANG Ying, et al. Study on the multiple valve unit test of Yunnan-Guangdong UHVDC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(6): 40-43.
- [4] 查鲲鹏, 刘远, 王高勇, 等.  $\pm 1100$  kV 特高压换流阀直流耐压试验方法研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 87-93.  
ZHA Kun-peng, LIU Yuan, WANG Gao-yong, et al. Study of DC test method of  $\pm 1100$  kV UHVDC valve[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 87-93.
- [5] 刘士利, 王泽忠, 孙静. HVDC 换流系统屏蔽罩寄生电容提取[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 201-206.  
LIU Shi-li, WANG Ze-zhong, SUN Jing. Extraction of parasitic capacitance of shield in HVDC converter stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 201-206.
- [6] 孙海峰, 崔翔, 齐磊, 等. 高压直流换流阀器件高频建模[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 142-148.  
SUN Hai-feng, CUI Xiang, QI Lei, et al. High-frequency modeling of valve components in high voltage direct current converter stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 142-148.
- [7] 霍鹏飞, 王国功, 刘敏, 等. 向上 $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程的直流保护闭锁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 137-139.  
HUO Peng-fei, WANG Guo-gong, LIU Min, et al. The DC protection block strategy in Xiangjiaba-Shanghai  $\pm 800$  kV UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 137-139.
- [8] 李爱生, 朱韬析. 直流输电工程中阀水冷监控系统的改进建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 153-156.  
LI Ai-sheng, ZHU Tao-xi. The improving suggestions to the valve-cooling control and monitoring system in HVDC transmission projects[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 153-156.
- [9] 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].  
GB/Z 25843—2010 specifications for control and protection equipment of  $\pm 800$  kV ultra high voltage direct current transmission[S].
- [10] 陈锡磊, 周浩, 王东举, 等. g 参数修正法用于浙西 $\pm 800$  kV 换流站阀厅空气净距设计[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2185-2189.  
CHEN Xi-lei, ZHOU Hao, WANG Dong-ju, et al. Air clearance design for valve hall of Zhexi  $\pm 800$  kV UHVDC converter station using parameter g[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2185-2189.
- [11] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [12] 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 Yuan-liang, TANG Guang-fu, YIN Yong-hua, et al. Study on analysis methods of thyristor thermal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 1-6.
- [13] 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 Yuan-liang, TANG Guang-fu, WU Shou-yuan, et al. Electrical design and simulation of thyristor valves for thyristor controlled series compensation of 220 kV Chengbi transmission line[J]. Power System Technology, 2006, 30(4): 11-15.
- [14] 张春雨, 李成榕, 韩筱慧, 等. 基于晶闸管钼层实测温度计算结温的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 195-201.  
ZHANG Chun-yu, LI Cheng-rong, HAN Xiao-hui, et al. Thyristor junction temperature estimation based on measured temperature of molybdenum flat[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 195-201.
- [15] 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.

收稿日期: 2014-02-28; 修回日期: 2014-04-20

### 作者简介:

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; E-mail: hu\_yong\_yin@163.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、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。