

±800 kV 特高压直流保护优化研究

李豹, 马业林, 熊双成, 李果明, 赖桂森

(中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

摘要: ±800 kV 特高压直流输电系统在电网中起到重要的资源调配作用。介绍了特高压直流保护的特点和保护分区, 在对比分析云广和糯扎渡工程直流保护配置和保护功能逻辑基础上, 研究特高压直流保护的优化。重点介绍了糯扎渡工程中极差动保护、金属回线差动保护和直流滤波器 C1 不平衡保护的配置、逻辑及其优化情况。优化后的直流保护配置和保护逻辑能够提高保护系统的速动性和可靠性, 增强了特高压直流系统的稳定水平, 对其他直流系统运行维护和后续工程设计也有一定的参考意义。

关键词: 特高压; 直流保护; 配置; 逻辑; 优化

Research on optimization of ±800 kV UHVDC protection

LI Bao, MA Ye-lin, XIONG Shuang-cheng, LI Guo-ming, LAI Gui-sen

(Guangzhou Bureau, EHV Power Transmission Company of CSG, Guangzhou 510405, China)

Abstract: ±800 kV UHVDC system plays an important role in resource allocation. The characteristics and configuration of UHVDC protection are introduced, and on the basis of contrast analysis in DC protection configuration and function logic of Yun-Guang project and Nuozhadu project, the optimization of UHVDC protection is researched. It emphatically introduces the configuration principle, logic, and optimization of converter DC differential protection (87DCM), metallic return line longitudinal differential protection (87MLL), DC filter C1 capacitor unbalance protection (60/61DF) in Nuozhadu project. The optimized configuration and logic of the DC protection can improve its speed and reliability, enhance the UHVDC system stability, also have certain reference value on the operation and maintenance in the other HVDC system and the design of the subsequent project.

Key words: UHV; DC protection; configuration; logic; optimization

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0071-05

0 引言

±800 kV 特高压直流输电系统是世界上电压等级最高的直流输电系统, 承担着大容量、远距离输电任务, 云广特高压直流工程作为世界上第一个 ±800 kV 直流输电工程, 自 2009 年投运以来, 极大地增强了南方电网西电东送资源优化配置的能力^[1-2], 2012 年全年的送电量 211 亿 kWh, 2013 年全年送电量预计达到 260 亿 kWh, 送电量占云南送出电量的 50%, 很好地消纳了云南富余水电。继云广工程之后, 南方电网于 2011 年底开工建设 ±800 kV 糯扎渡直流工程, 预计 2014 年实现两极投产。

±800 kV 特高压直流采用双 12 脉动换流器串联的接线方式, 与常规 ±500 kV 高压直流相比, 由于接线方式的改变, 以及更高的可靠性及停运率,

对特高压直流保护系统提出了更高的要求^[3-4]。糯扎渡直流作为南方电网第二个特高压直流工程, 在直流保护系统设计上结合了云广直流的运行维护经验, 对保护配置和功能进行了进一步优化。本文将对对比分析云广和糯扎渡特高压直流工程直流保护配置及保护功能, 研究保护优化对保护运行的影响。

1 特高压直流保护的构成

±800 kV 特高压直流输电系统每极有两个阀组, 有多种运行方式可供选择, 提高了整个系统运行的灵活性和可用率。然而保护的配置将更为复杂且考虑的因素也更多, 如运行方式改变时保护判据的调整、保护测点的配置、双阀组的相互配合等^[5-8], 因此, 特高压直流保护要比常规直流复杂得多。

特高压直流保护系统按照分层、分区和独立配置的原则, 保护分区的原则是: ①影响单 12 脉动换

流器正常运行的故障退出故障换流器；②影响单极正常运行的故障退出故障极；③双极保护区的故障退出双极，但要采取措施尽量避免双极故障退出运行，保证运行的可靠性^[9-11]。基于这些原则，特高

压直流输电系统的保护分区如图 1 所示，保护区域分位换流器保护区、直流母线保护区、双极接地极线路保护区、直流滤波器保护区、直流线路保护区，各区域内所有设备均配置完整的主后备保护。

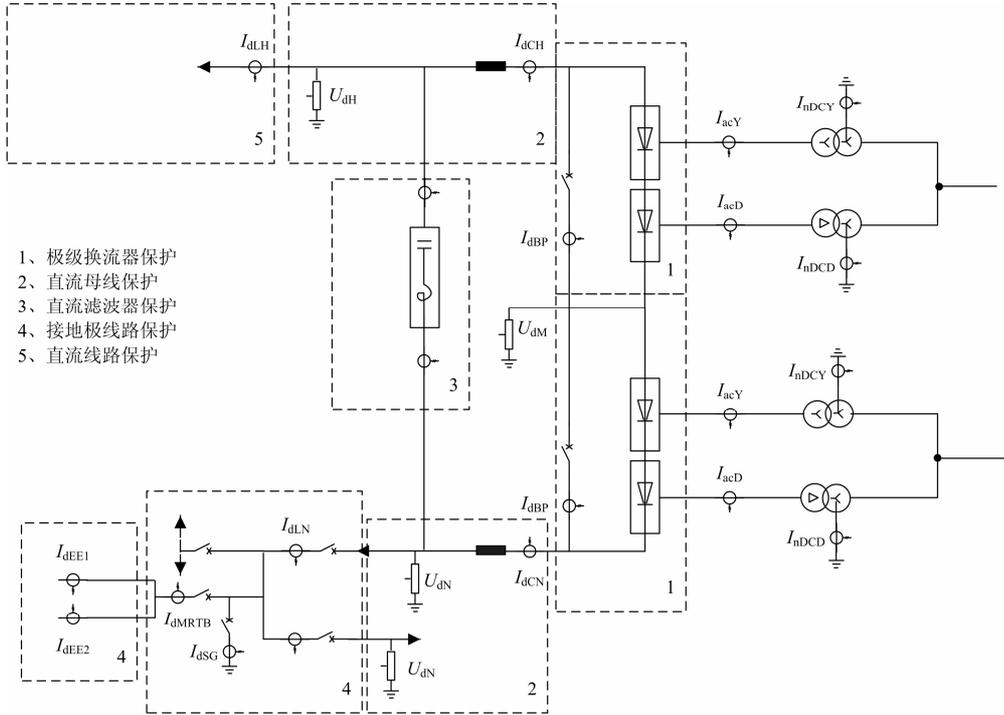


图 1 直流保护分区配置图

Fig. 1 Schematic of DC protection configuration

特高压直流保护采用完全双重化配置，每套保护功能不依赖于其他套保护，使设备之间关系简单，易维护。保护硬件采用了 Siemens 最新的工业控制平台 SIMATIC TDC，与传统 SIMADYN D 平台相比，SIMATIC TDC 集成度更高，数据处理能力更强大，运行速度更快。同时，区别于传统直流输电系统，保护所用的交、直流测量量均由直流测量系统采集，经过预处理后上传至 TDM 光纤总线，直流测量系统与保护系统之间采用交叉冗余的 TDM 光纤总线连接，所需交、直流测量量直接从总线读取。

不平衡 CT 配置更能精确反映电容器个别元件故障，同时，为了满足差动保护的要求，在高压侧配置有 T1，而云广工程高压侧电流用 T11 和 T12 的和值来替代，存在一定的保护死区^[12]。

2 特高压直流保护配置优化

糯扎渡直流保护配置同云广基本相同，主要由极保护屏、阀组保护屏、阀组保护接口屏构成，糯扎渡工程设有单独的直流滤波器保护屏，但直流滤波器的保护功能还是由极保护来实现，直流滤波器保护屏出口功能退出。

糯扎渡工程直流滤波器保护用 CT 配置不同于云广工程，如图 2 所示。高压电容器塔 C1 不平衡电流由 T2 直接获取，而云广工程 C1 不平衡由 T11 和 T12 的差值来体现，相比而言，糯扎渡的电容桥

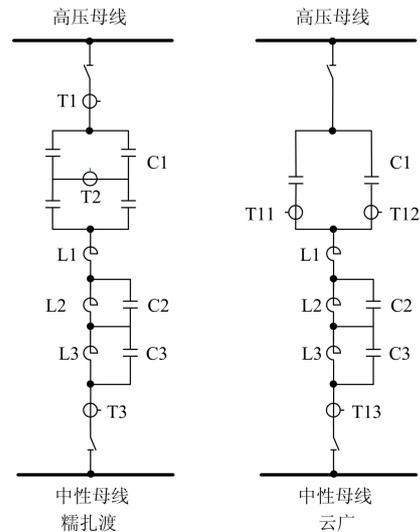


图 2 直流滤波器保护 CT 配置对比

Fig. 2 Schematic of the configuration comparison of CT in DC filter protection

在糯扎渡直流保护系统中, 直流滤波器保护设有独立的出口压板, 在直流滤波器退出运行时, 可以单独退出保护出口压板, 相比退出直流滤波器保护功能具有更高的可靠性, 避免滤波器单独检修时保护误出口跳闸。

3 特高压直流保护功能优化

结合云广直流的运行经验, 特高压直流保护功能得到了一定的优化, 部分优化措施已经得到应用, 或是在糯扎渡工程中得到了改进。

3.1 极差动保护 (87DCM)

极差动保护负责保护极换流器区域, 取极高压侧电流 I_{dCH} 和中性侧电流 I_{dCN} 作为保护判断量, 其保护逻辑如图 3 所示, 保护判据为

$$\text{Abs}(I_{dCH}-I_{dCN})>I_{set}\times\max(I_{dH}, I_{dN})$$

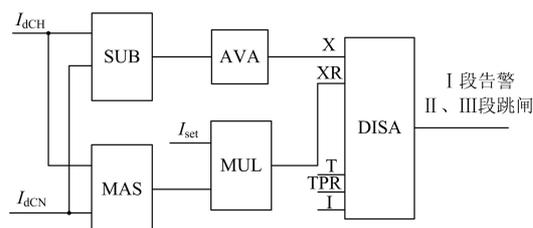


图3 极差动保护动作逻辑

Fig. 3 Schematic of the action logic of converter DC differential protection

极差动保护(87DCM)采用 DISA 积分模块, 其内部设有计数器, T 为计数时间, TPR 为预告警时间, I 为积分模式, 电流差值($I_{dCH}-I_{dCN}$)超过浮动门槛 $\max(I_{dH}, I_{dN})$ 时进行加计数, 电流差值低于浮动门槛时进行减计数($I=1$)或复归计数器($I=0$), 当计数值达到计数时间定值时保护动作。

云广直流采用单段式保护逻辑, 保护使用制动特性, 制动系数 0.15, 积分模式 I 设为 1, 保护最低启动定值为 0.2 p.u (625 A), 延时 5 ms 跳闸。在云广直流某次交流线路单相接地故障过程中, 极 1 差动保护 (87DCM) 动作导致极 1 停运, 如图 4 为故障期间的录波图, 可以看出在 $T1$ 时刻, 电流差值超过浮动门槛值, $T2$ 时刻计数值达到计数时间定值, 保护出口跳闸。保护动作原因在于 DISA 模块积分模式 I 设为 1, 当电流差值低于浮动门槛时保护不能自动复归, 加之保护出口延时较短, 无法有效地防止小电流扰动造成的保护动作。

将 DISA 模块积分模式 I 设为 0, 则在 $T2$ 时间前, 电流差值低于浮动门槛时计数器将自动复归, 保护不会出口动作, 只有当电流差值超过浮动门槛并持续到出口时间时, 保护才会动作。

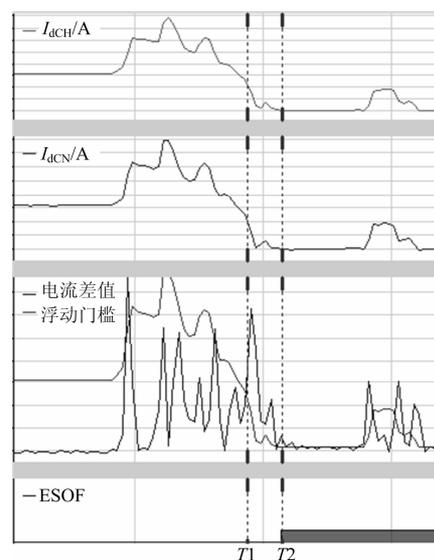


图4 保护录波图

Fig. 4 Waveform record of the protection

同时, 将保护出口分为三段, I 段为告警段, 保护定值 0.03 p.u, 最低启动定值为 0.03 p.u (94 A), 延时 100 ms 发信号; II 段为速动段, 保护定值 0.2 p.u, 最低启动定值为 0.2 p.u (625 A), 延时 5 ms 跳闸; III 段为灵敏段, 保护定值 0.05 p.u, 最低启动定值为 0.05 p.u (156 A), 延时 150 ms 跳闸。

应用波形回放对以上优化措施进行仿真验证, 多次试验两套直流保护均不动作, 直流保护的可靠性得到了增强。

3.2 金属回线差动保护 (87MLL)

在云广及之前高压直流工程中, 直流系统在单极金属回线方式运行时, 金属回线线路没有配置主保护, 当出现线路故障时保护不能及时动作, 增加了直流系统的运行风险^[13-15]。在糯扎渡工程中, 单独配置了金属回线差动保护 (87MLL), 其保护原理类似与直流线路纵差保护 (87DCLL), 其保护逻辑如图 5 所示, 保护判据为

$$|I_{dL_op}-I_{dL_op_os}|>\max(I_{dL_op}-I_{dL_op_os})\times 0.2$$

金属回线差动保护取另外一极直流线路电流 I_{dLH_op} 及相对应的对站直流线路电流 $I_{dL_op_os}$, 本站线路电路采样经过 19 ms 的延时, 以消除站间通信时差。保护同样采用 DISA 积分模块, 门槛系数为 0.2, 延时为 600 ms, 积分模式为 0, 保护动作后果为强制移相, 并设置有监视窗, 时间窗长度为 1 000 ms, 在监视期内保护再次动作, 则直接闭锁双阀组。

当直流线路行波保护 (WFPDL) 动作、直流线路低电压保护 (27du/dt) 动作、大地回线方式、双极运行方式任一条件满足时, 输入闭锁信号 BL 至

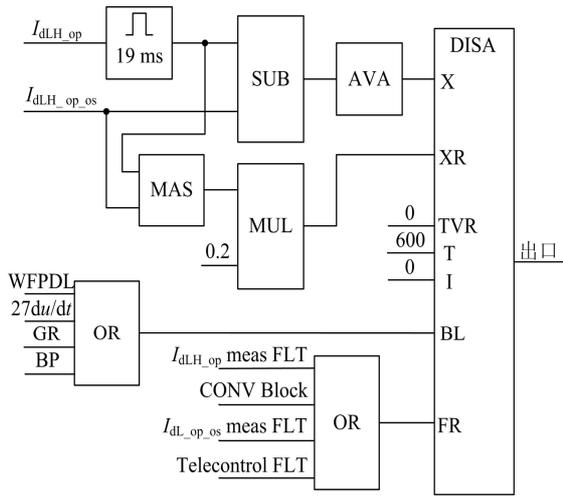


图 5 金属回线纵差保护动作逻辑

Fig. 5 Schematic of the action logic of metallic return line longitudinal differential protection

保护模块，所有计数器清零，保护闭锁；当本站另外一极直流线路电流测量故障 ($I_{dLH_op\ meas\ FLT}$)、对站另外一极直流线路电流测量故障 ($I_{dLH_op_os\ meas\ FLT}$)、换流器闭锁状态 (CONV Block)、站间通信故障 (Telecontrol FLT) 任一条件满足时，输入冻结信号至保护模块，所有计数器保持，冻结信号清除后继续执行计数逻辑。

金属回线差动保护作为金属回线线路的主保护，可以快速切除各种线路故障，防止后备保护延时过长造成故障范围的扩大，提高了直流保护的速动性^[16-18]。

3.3 直流滤波器 C1 不平衡保护 (60/61DF)

直流滤波器 C1 不平衡保护使高压电容器免受由于故障电容器单元对完好电容器组造成的过应力而使电容器单元雪崩损坏，是高压电容器的主保护。糯扎渡工程直流滤波器 C1 不平衡保护相比云广改变较大，如表 1 所示为保护配置对比。

表 1 C1 不平衡保护配置对比

Table 1 Configuration comparison of the C1 capacitor unbalance protection

保护名称	云广		糯扎渡	
	出口	保护定值	出口	保护定值
60/61DF	1 段	Num=1	1 段	$I_{FHD}/I_{FL}>0.22$
	2 段	Num=2	2 段	$I_{FHD}/I_{FL}>0.67$
	3 段	Num=11 或 $I_{FHS}>0.06$ & $(I_{FHD}/I_{FHS}) > 1.38$	3 段	$I_{FHD}/I_{FL}>1.0$

糯扎渡工程 C1 不平衡保护取消了积分程序和

不平衡计数逻辑，只配置了不平衡比值出口，大大简化了保护逻辑。保护采用不平衡电流 I_{FHD} 和低压侧电流 I_{FL} 比值作为保护判据，保护动作逻辑如图 6 所示，其中低压侧电流 I_{FL} 不得小于 0.01 pu，否则其电流用 0.01 p.u 替代，比值送入比较逻辑模块 NCM，达到不同定值 value 时，选择不同的延时出口，I 段延时 120 s 发告警信号，II 段延时 2 h 出口，当高压侧电流 $I_{FHS}<100\ A$ 时拉开直流滤波器高压侧隔离刀闸， $I_{FHS}>100\ A$ 时启动极 ESOF。

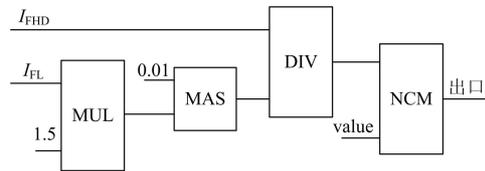


图 6 C1 不平衡保护动作逻辑

Fig. 6 Schematic of the action logic of DC filter capacitor unbalance protection

直流滤波器 C1 不平衡动作可能导致单极停运，通过简化保护逻辑，提高了保护的可靠性和稳定性。

4 结语

通过对比分析云广和糯扎渡工程直流保护配置和逻辑功能，研究了保护配置和逻辑功能的优化措施，通过对特高压直流保护的优化，可以提高保护系统的速动性和可靠性，增强了直流系统的稳定水平。同时，特高压直流保护的优化措施也可以作为 ±500 kV 高压直流保护改进或后续工程设计的参考。

参考文献

- 王骥. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58. WANG Yao. Study on the control and protection system of ultra high voltage direct current transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 53-58.
- 石岩, 韩伟, 张民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15. SHI Yan, HAN Wei, ZHANG Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15.
- 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 10-14. TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 10-14.
- 谢开贵, 吴韬, 黄莹, 等. 基于二分法的高压直流输电

- 系统可靠性最优分解[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 149-154.
- XIE Kai-gui, WU Tao, HUANG Ying, et al. Reliability optimal distribution for HVDC systems using bisection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 149-154.
- [5] 张望, 黄利军, 郝俊芳, 等. 高压直流输电控制保护系统的冗余设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 88-91.
- ZHANG Wang, HUANG Li-jun, HAO Jun-fang, et al. Redundant design of control and protection system for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 88-91.
- [6] 李延龙, 杨亚璞, 李楠. 高压直流输电控制保护系统的冗余可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 59-62.
- LI Yan-long, YANG Ya-pu, LI Nan. Reliability research for HVDC transmission control and protection system redundancy[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 59-62.
- [7] 王俊生, 李海英, 曹冬明. 800 kV 特高压直流保护阀组区测量点配置的探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 81-84.
- WANG Jun-sheng, LI Hai-ying, CAO Dong-ming. ±800 kV ultra HVDC system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 81-84.
- [8] 孙士云, 束洪春, 于继来. 单相重合时序对特高压交流直流并联系统暂稳影响的机理分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 106-113.
- SUN Shi-yun, SHU Hong-chun, YU Ji-lai. Mechanism analysis of single-phase reclosure sequence's influence on ultra-high voltage AC/DC parallel system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 106-113.
- [9] 鲁文军, 林湘宁, 黄小波, 等. 一种采用浮动门槛的自适应突变量距离保护方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 160-165.
- LU Wen-jun, LIN Xiang-ning, HUANG Xiao-bo, et al. A scheme of adaptive fault component distance protection using float threshold[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 160-165.
- [10] 朱艺颖, 蒋卫平, 吴雅妮. 特高压直流输电控制保护特性对内过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 6-9.
- ZHU Yi-ying, JIANG Wei-ping, WU Ya-ni. Influence of UHVDC control and protection characteristics on inner overvoltage[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 6-9.
- [11] 王俊生, 沈国民, 李海英, 等. ±800 kV 特高压直流输电双极区保护的若干问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 85-88.
- WANG Jun-sheng, SHEN Guo-min, LI Hai-ying, et al. Discussion on some problems in bi-pole area of ±800 kV ultra HVDC system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 85-88.
- [12] 程江平, 周全. 直流滤波器保护的研究和改进[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 105-109.
- CHENG Jiang-ping, ZHOU Quan. Study and improvement of DC filter protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 105-109.
- [13] 艾琳, 陈为化. 高压直流输电线路行波保护判据的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 41-44.
- AI Lin, CHEN Wei-hua. Research on traveling wave protection criterion on HVDC transmission line[J]. Relay, 2003, 31(10): 41-44.
- [14] 陈锡磊, 周浩. 向家坝-上海 ±800 kV 特高压直流保护功能研究[J]. 华东电力, 2011, 39(4): 600-603.
- CHEN Xi-lei, ZHOU Hao. DC protection of ±800 kV UHV DC project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4): 600-603.
- [15] 朱韬析. 提高南方电网直流保护动作可靠性的建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 64-67.
- ZHU Tao-xi. Suggestions to improve the reliability of HVDC protection in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 64-67.
- [16] 张民, 石岩, 韩伟. 特高压直流保护动作策略的研究[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 10-16.
- ZHANG Min, SHI Yan, HAN Wei. Research on action strategy of UHVDC protection[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 10-16.
- [17] 梁旭明, 吴巾克, 冀肖彤. 国家电网公司直流输电工程控制保护系统运行情况分析[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 7-10.
- LIANG Xu-ming, WU Jin-ke, JI Xiao-tong. Operating performance analysis on control and protection system of SGCC's HVDC projects[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 7-10.
- [18] 周静, 马为民, 石岩, 等. ±800 kV 直流输电系统的可靠性及其提高措施[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 7-12.
- ZHOU Jing, MA Wei-min, SHI Yan, et al. Study on reliability of ±800 kV UHVDC power transmission and its improvement measures[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 7-12.

收稿日期: 2013-11-07; 修回日期: 2014-01-16

作者简介:

李豹 (1983-), 男, 工程师, 从事高压直流输电系统设备运行与维护方面的研究和工。E-mail: libao@ehv.csg.cn