

DOI: 10.7667/PSPC160265

柔性直流输电系统交流母线差动保护研究

吴庆范¹, 付艳¹, 张克辉¹, 阮思烨², 黄金海¹, 李泰¹, 郝俊芳¹, 范雪峰¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要: 梳理了国内已建和在建柔性直流输电工程各种接地方式的拓扑结构, 介绍了典型的保护功能配置策略。针对联结变阀侧采用星型电抗经电阻接地方式及其测点配置特点, 提出了一种交流母线差动保护方法。该方法通过已有测点计算出虚拟测点的电流值, 实现差动保护判据方法的完整和有效。基于工程实际参数, 建立了 RT_LAB 和控制保护系统的闭环仿真试验系统。提出的新方法通过了各种工况下的仿真试验, 验证了其可行性和可靠性。
关键词: 柔性直流输电; 拓扑结构; 保护方法; 仿真试验; 可靠性

Research on AC bus differential protection of flexible DC transmission system

WU Qingfan¹, FU Yan¹, ZHANG Kehui¹, RUAN Siye², HUANG Jinhai¹, LI Tai¹, HAO Junfang¹, FAN Xuefeng¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China)

Abstract: A comprehensive overview about the topology structure of grounding mode in project which have been built and are building in China, the typical protection configuration strategy is described. Then a new AC bus differential protection is proposed against the topological structure and measuring point of delta reactance via resistance grounding mode on valve side of converter transformer. The current of the virtual measuring point is measured based on other measuring point, so the judgement method of AC bus differential protection is complete and effective. The closed-loop simulation test system of RT_LAB and control and protection system is established based on parameters of project. The new judge method proposed have passed comprehensive tests, which verifies its feasibility and reliability.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Key Techniques Research on ± 500 kV Flexible DC Power Grid Ultra High-speed Protection”.

Key words: flexible DC transmission; topological structure; protection method; simulation test; reliability

0 引言

随着能源形势的日益严峻, 风能、太阳能等可再生能源将得到大力开发和利用, 但是由于这些可再生能源固有的分散性、间歇性和不确定性等特点, 使得采用交流输电技术或传统的基于电流源换流器的直流输电技术并网并不经济, 而基于电压源换流器的直流输电技术能很好地解决该问题。另外, 多端直流输电可以将分布在不同地区的风电场进行联网, 共同向受端交流系统供电, 与传统的两端直流输电相比, 多端直流输电技术能够实现多电源供电、多落点受电, 运行方式更加灵活、便捷, 是未来直

流输电的发展方向^[1-3]。

国内已建柔性直流输电工程有 3 个, 上海南汇柔性直流输电示范工程为我国首个柔性直流输电工程, 于 2011 年 5 月在上海南汇风电厂挂网运行; 南澳多端柔性直流输电示范工程是世界上第一个 VSC-MTDC 工程, 于 2013 年 12 月 25 日正式投入运行; 舟山多端柔性直流输电工程为世界上第一个基于 MMC 型的五端柔性直流输电工程, 于 2014 年 7 月 7 日正式投入运行。国内在建柔性直流输电工程有 2 个, 鲁西背靠背柔性直流输电工程为世界最高电压、最大容量的柔性直流背靠背工程, 计划于 2016 年 6 月投运; 厦门柔性直流工程是世界上第一个采用真双极接线、电压和容量双双达到国际之最的柔性直流输电工程, 计划于 2015 年 12 月投产。

国内外对柔性直流输电系统控制保护整体策

基金项目: 国家电网公司科技项目“ ± 500 kV 柔性直流电网超高速保护关键技术研究”

略的研究较多, 已有文献在柔性直流输电系统的控制器算法、参数设计、电容电压平衡控制、调制策略、环流抑制策略等方面进行了深入研究^[4-10]。对联结变阀侧交流母线区域故障机理和特征也有文献进行了研究^[11-12]。但对具体工程的该保护功能实现方法介绍不多, 国内已建和在建的 5 个柔性直流输电工程, 其系统接地方式多达 4 种, 本文首次全面总结了目前国内已建和在建工程的拓扑结构, 针对联结变阀侧采用星型电抗经电阻接地方式及其测点配置特点, 提出了一种新的交流母线差动保护方法, 该方法通过计算虚拟测点的电流值, 实现准确的故障识别功能。基于工程实际参数, 建立了 RT_LAB 和控制保护系统的闭环仿真试验系统。经过全面的试验验证, 所提出的交流母线差动保护方法具有可行性和可靠性。

1 柔性直流输电系统的拓扑结构及保护功能配置策略

国内已建和在建的 5 个柔性直流输电工程的拓扑结构差异较大, 主要接地方式有: 联结变阀侧采用星型电抗经接地电阻接地方式、星星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式、角星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式, 详细介绍如下。

1.1 联结变阀侧采用星型电抗经电阻接地方式

联结变阀侧采用星型电抗经电阻接地方式主要应用于已建的舟山多端柔性直流输电工程, 其拓扑结构如图 1 所示。主要测点包含: 联结变原边电压 U_{VY} 、联结变副边电压 U_{VD} 、联结变副边电流 I_{VD} 、启动电阻回路电流 I_{VC} 、接地电流 I_{GND} 、上桥臂电流 I_{bp} 、下桥臂电流 I_{bn} 、正极直流电流 I_{dp} 、负极直流电流 I_{dn} 、正极直流电压 U_{dp} 、负极直流电压 U_{dn} 等。

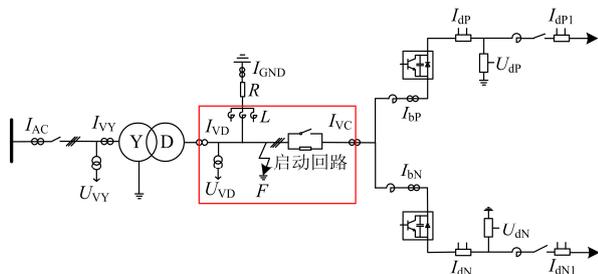


图 1 星角联结变阀侧采用星型电抗经电阻接地方式拓扑结构及主要测点

Fig. 1 Topological structure and main measuring point of delta/wye converter transformer

1.2 星星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式

星星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式主要应用于在建的罗平背靠背柔性直流输电工程, 其拓扑结构如图 2 所示。

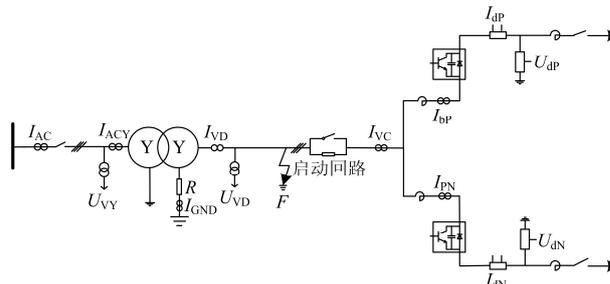


图 2 星星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式拓扑结构及主要测点

Fig. 2 Topological structure and main measuring point of winding neutral point via resistance grounding mode on valve side of wye/wye converter transformer

1.3 角星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式

角星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式主要应用于已建的南澳多端柔性直流输电示范工程和山海南汇柔性直流输电示范工程中, 其拓扑结构如图 3 所示。

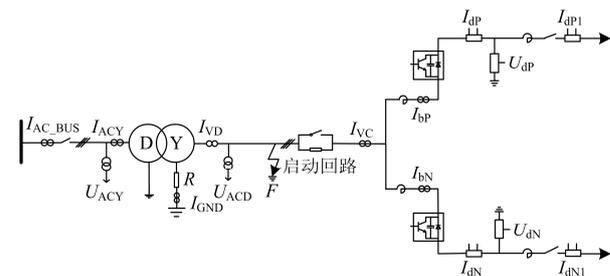


图 3 角星联结变阀侧绕组的中性点经电阻接地方式拓扑结构及主要测点

Fig. 3 Topological structure and main measuring point of winding neutral point via resistance grounding mode on valve side of delta/wye converter transformer

在建的厦门柔性直流工程接地方式与传统直流一致, 由独立的接地极实现接地, 本文不作详细介绍。以上三种接地方式的拓扑结构及测点配置, 导致在进行保护功能配置、保护功能的保护区域、保护判据等方面均有差异, 典型的保护功能配置策略如下节保护功能配置策略所述。

1.4 保护功能配置策略

柔性直流输电系统单端换流站的保护区域一般划分为交流母线保护区、联结变保护区、阀侧交

流母线保护区、换流器保护区和直流极保护区。不同区域配置不同的保护功能，典型的各保护区保护功能配置如表 1 所示。

表 1 各保护区保护功能配置

Table 1 Protection function distribution of protection zones

交流母线保护区	联结变保护区	阀侧交流母线保护区	换流器保护区	极保护区
网侧交流母线差动保护	联接变引线差动保护	交流母线差动保护	桥臂电抗器差动保护	直流低压过流保护
网侧交流过压保护	联接变引线过流保护	交流母线过流保护	启动回路过流保护	直流过压保护
网侧交流欠压保护	联接变引线和联接变压器差动保护	接地过流保护	换流器差动保护	直流低电压保护
网侧频率异常保护	联接变压器差动保护	交流母线接地保护	换流器过流保护	电压不平衡保护
	联接变压器过流保护	零序过流保护		直流线路纵差保护
	联接变引线过压保护			直流母线差动保护
	热过负荷保护			
	联接变绕组差动保护			
	零序电流保护			
	联接变压器过励磁保护			
	阻抗保护			

2 交流母线差动保护方法

交流母线差动保护是联结变阀侧交流母线区域的重要保护功能，为交流母线接地及短路故障的主保护。防止故障对直流设备和系统造成的危害。

一般交流母线差动的保护判据原理为：各相分别采集联结变副边电流 I_{VD} 和启动电阻回路电流 I_{VC} 进行作差，然后对其差值取绝对值，当差值的绝对值大于定值并经一定的延时后保护动作出口，动作策略为闭锁直流输电系统、跳开交流断路器等。以上保护方法可适用于图 2、图 3 所示的拓扑结构和测点配置。

分析图 1 所示的拓扑结构及测点配置特点，星型电抗器及其与阀侧母线连接区域属于交流母线差动保护范围，但各相电抗器支路上并未配置测点，无法直接采用原交流母线差动保护方法。针对此问题，本文提出了一种新的交流母线差动保护判断方法，该方法通过计算电抗器上虚拟测点的电流值，实现准确的故障识别功能，主要步骤如下所述。

首先采集联结变副边电压 U_{VD} 和接地电流 I_{GND} ，根据接地电阻 R 和电抗器 L 的实际参数，可

计算出接地电抗器各相的电流 I_L ，如式(1)所示。

$$I_L = \frac{U_{VD} - R \times I_{GND}}{\omega \times L} \quad (1)$$

式中： ω 为角频率，其值可等效为 $2\pi f$ ；频率 f 为工频 50 Hz。

然后根据采集到的联结变副边电流 I_{VD} 、启动电阻回路电流 I_{VC} 和式(1)计算中的接地电抗器电流计算出差流，并对差值取绝对值后与定值比较，保护判断逻辑如式(2)所示。

$$|I_{VD} - I_{VC} - I_L| > \Delta \quad (2)$$

式(2)中 Δ 为定值。满足定值并经一定延时后，保护动作出口，输出闭锁直流输电系统、跳开交流断路器信号。

本文提出的交流母线差动保护方法可在不增配测点的情况下，可靠正确的动作，实现对保护区内所有接地短路等故障的有效保护，下面通过仿真试验进行全面的验证。

3 RT_LAB 仿真试验验证

3.1 RT_LAB 仿真试验系统建立

RT_LAB 为一套工业级的系统实时仿真平台，经过长时间的验证，其在柔性直流输电仿真方面具有高效性和可靠性^[13-15]。RT_LAB 仿真装置通过硬接线和光纤等接口设备与直流控制保护系统的主要设备连接，构成闭环的测试系统，可以全面测试直流控制保护系统的整体功能和性能。

通过 RT_LAB 搭建的仿真试验模型包括交流系统等值系统、联结变变压器、启动回路、桥臂电抗器、MMC 模块、平波电抗器、直流线路、接地电抗、电阻等元件。RT_LAB 模型的输出信号经 D/A 转换后，弱信号直接输出至控制保护设备，部分信号通过光纤以 IEC60044-8 协议输出模拟量至控制保护设备，控制系统通过光纤将调制波等信号传输给阀控系统，阀控系统各子模块的开、关等命令信号通过光纤以 Aurora 协议传输给 RT_LAB，控制保护系统输出控制信号或保护动作信号至 RT_LAB，构成一个闭环系统，能够真实地反映柔性直流输电系统的特性，图 4 为 RTDS 仿真模型的结构示意图。

RT_LAB 构建了如图 1 所示的联结变阀侧采用星型电抗电阻接地方式拓扑结构和如图 4 所示的仿真模型。基于建立的仿真试验系统，可以对柔性直流输电控制保护功能进行全面的验证和研究，在搭建的平台上共进行了 400 余项控制保护功能试验，全面验证了控制保护系统的各项性能完全满足工程应用^[16-19]，限于篇幅限制，本文不作详细介绍，下面重点介绍交流母线差动保护的相关试验。

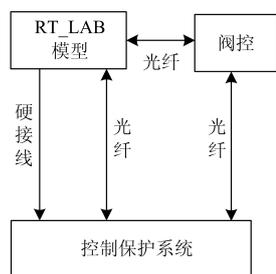


图 4 RT_LAB 仿真模型结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RT_LAB simulation model

3.2 仿真试验

为了验证本文提出的交流母线差动保护判断方法, 在建立的RT_LAB与控制保护装置构成的仿真系统中进行了全面的验证。基于构建的两端柔性直流输电系统, 其系统运行模式和控制模式主要为以下五种工况: 功率输送运行模式且站A电压控制站B正功率控制模式、功率输送运行模式且站A电压控制站B负功率控制模式、功率输送运行模式且站A正功率控制模式站B电压控制模式、功率输送运行模式且站A负功率控制模式站B电压控制模式和单站STATCOM模式。

在以上五种运行工况下, 分别模拟了区内以下故障类型: 单相接地故障F1、两相短路故障F2、三相短路接地故障F3和两相短路接地故障F4, 试验结果表明: 区内发生各类故障时, 所提出的保护均能可靠正确动作; 除了进行区内测试, 在模拟区外各处故障时, 该保护均未发生误动现象, 有良好的防误动性。区内故障结果如表2所示。

表 2 交流母线差动保护试验结果

Table 2 Test results of AC bus differential protection

系统运行模式和控制模式	F1 故障	F2 故障	F3 故障	F4 故障
站 A 电压控制 400 kV-站 B 功率控制 300 MW 控制模式	✓	✓	✓	✓
站 A 电压控制 400 kV-站 B 功率控制负 300 MW 控制模式	✓	✓	✓	✓
站 A 功率控制 300 MW -站 B 电压控制 400 kV 控制模式	✓	✓	✓	✓
站 A 功率控制负 300 MW -站 B 电压控制 400 kV 控制模式	✓	✓	✓	✓
STATCOM 运行模式, 直流电压控制 400 kV-交流电压 230 kV 控制模式	✓	✓	✓	✓

以站A电压控制400 kV, 站B功率控制300 MW, 模拟站B阀侧单相接地200 ms为例, 仿真试验波形如图5所示。图中: $U_{VDA}, U_{VDB}, U_{VDC}$ 分别为站B联结变副边三相电压; $I_{VDA}, I_{VDB}, I_{VDC}$ 分别为站B联结变副边三相电流; $I_{VCA}, I_{VCB}, I_{VCC}$ 分别为站B启动电阻回路三相电流; I_{GND} 为站B接地电流; BLOCK为保护动作状态信号。

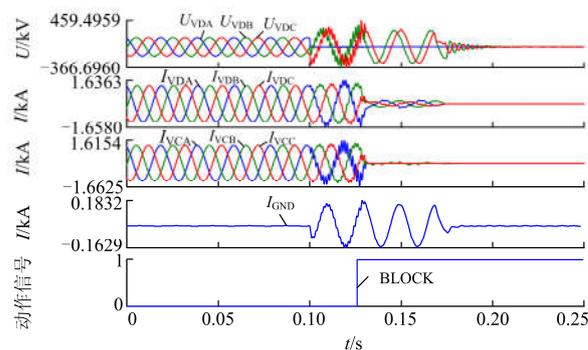


图 5 RT_LAB 仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of RT_LAB

4 总结

1) 首次全面梳理了国内已建和在建柔性直流输电工程的拓扑结构, 介绍了典型的直流保护功能配置。

2) 针对联结变阀侧采用星型电抗经接地电阻接地方式及其测点配置特点, 提出了一种新的交流母线差动保护判断方法, 该方法通过计算虚拟测点的电流值, 以实现准确的故障识别功能。

3) 基于工程实际参数, 建立了RT_LAB仿真模型, 介绍了仿真模型和控制保护系统整体结构和信号传输方式。经过全面的仿真试验表明, 所提出的交流母线差动保护方法具有良好的可行性和可靠性。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [5] 郭静丽, 王秀丽, 侯雨伸, 等. 基于改进 FD 法的柔性直流输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 8-13.
GUO Jingli, WANG Xiuli, HOU Yushen, et al. Reliability assessment of the VSC-HVDC transmission system based on a modified FD method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 8-13.
- [6] 杨煜, 孙大卫, 谢小荣, 等. 模块化多电平换流器型柔性直流系统的等效仿真方法比较[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 43-48.
YANG Yu, SUN Dawei, XIE Xiaorong, et al. Comparative

- study on the accelerated models of MMC-based VSC-HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 43-48.
- [7] 涂小刚, 罗海云, 程晓绚, 等. 多端柔性直流输电工程控保系统接口设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 124-128.
TU Xiaogang, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Control and protection system interface design for multi-terminal HVDC flexible project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 124-128.
- [8] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [9] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140-145.
ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multi-terminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 140-145.
- [10] 顾益磊, 唐庚, 黄晓明, 等. 含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 27-34.
GU Yilei, TANG Geng, HUANG Xiaoming, et al. Dynamic characteristic analysis hybrid AC/DC power grid with mul-ti-terminal HVDC based on modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 27-34.
- [11] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相 HVDC 站内交流母线故障特征及保护配合[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 6-11.
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Internal AC bus fault characteristics of VSC-HVDC system and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 6-11.
- [12] 裘鹏, 章妹俊, 黄晓明, 等. MMC-HVDC 系统中阀侧交流母线故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 150-154.
QIU Peng, ZHANG Shujun, HUANG Xiaoming, et al. Research on the protection strategies of internal AC bus fault based on MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 150-154.
- [13] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.
- [14] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二逻辑装置及配置策略在高岭背背靠扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 121-126.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. A new device with "selecting 2 from 3" logic and its configuration strategy applied in Gaoling back-to-back II project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 121-126.
- [15] 张群, 赵倩, 陈朋. 基于 RT-LAB 的柔性直流输电系统仿真平台设计[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 123-128.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, CHEN Peng. Design of real time simulation platform based on RT-LAB for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 123-128.
- [16] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.
- [17] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.
- [18] 吴庆范, 黄金海, 吴彦维, 等. 特高压直流输电系统并联融冰运行方式的控制保护策略研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 69-75.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, WU Yanwei, et al. Control and protection strategies of parallel de-icing operating mode for UHVDC power transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 69-75.
- [19] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The integrated system design scheme of Nan'ao VSC-MTDC Demonstration Project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67.

收稿日期: 2016-03-03; 修回日期: 2016-05-11

作者简介:

吴庆范(1982-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事高压直流及柔性直流输电控制保护系统研究及软件设计;

E-mail: 423059034@qq.com

付艳(1987-), 女, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流及柔性直流输电控制保护系统研究及软件设计;

张克辉(1984-), 男, 本科, 工程师, 从事继电保护工程相关工作。

(编辑 张爱琴)