

# 柔性直流换流变压器保护配置方案及试验技术研究

柔性直流输电具有灵活变换运行方式、独立控制有功功率和无功功率等诸多优点。换流变压器作为柔性直流输电工程的核心功率器件，其可靠运行是柔性直流输电系统稳定、安全且高效运行的基础。首先介绍了厦门柔性直流输电工程换流变压器的一次接线方式、换流变压器保护配置方案和“三取二”逻辑的实现方案并总结了该实现方案的优点，接着研究了换流变压器保护的整个现场校验方案及试验技术。研究成果对其他柔直换流变压器的试验方案及试验技术具有借鉴作用。

郭健生 唐志军 石吉银 邹焕雄 胡文旺/国网福建省电力有限公司电力科学研究院

## 0 引言

厦门 $\pm 320$  kV/1 000 MW柔性直流输电工程是世界首例采用真双极接线方式的柔性直流输电工程，也是目前已投运的世界电压等级最高和输送容量最大的柔性直流输电工程<sup>[1-2]</sup>，具有灵活变换运行方式、独立控制有功功率和无功功率等诸多优点<sup>[3-9]</sup>。

换流变压器作为柔性直流输电工程的核心功率器件，其可靠运行是柔性直流输电系统稳定、安全且高效运行的基础<sup>[10-11]</sup>。因此，对换流变压器保护的逻辑及二次回路的正确性进行充分的现场校验就显得尤为重要。目前有关换流变压器保护的现场校验研究文献主要集中在常规直流领域，针对柔性直流换流变压器保护的现场校验研究少有报道。其中文献[12]和文献[13]说明了换流变压器差动保护的原理及现场校验方法，但未

说明换流变压器保护与其他保护装置的联调试验方法。文献[14]系统地说明了常规直流输电系统的换流变压器改造方法及其调试方案。文献[15]只分析了“三取二”逻辑在直流保护系统中的应用情况，并未详细说明“三取二”逻辑的现场校验方法，鲜有文献能对柔性直流换流变压器保护配置方案及试验技术进行详尽、系统的研究。

本文对柔性直流换流变压器保护配置方案及试验技术进行了详细研究，包括换流变压器保护配置方案、“三取二”逻辑的实现方案及现场试验方案和试验技术。相关试验方案及试验技术以期为其其他类似工程换流变压器的调试提供经验借鉴。

## 1 换流变压器一次接线

如图1所示，换流变压器星形侧通过旁路开关 $QF_2$ 和起动电阻 $R$ 与交流系统相连，三角形侧与换流阀相连。其中换流变压器额定容量是530 MV·A，额定电压比230 kV/166.57 kV。换流变压器保护用TA配置情况如下：TA<sub>1</sub>为换流变压器网侧套管首端电流互感器；TA<sub>2</sub>为换流变压器网侧套管末端电流互感器；TA<sub>3</sub>为换流变压器阀侧套管电流互感器；TA<sub>4</sub>为换流变压器网侧中性点零序电流互感器；TA<sub>5</sub>为换流变压器网侧电流互感器。

## 2 换流变压器保护配置方案

厦门 $\pm 320$  kV柔性直流输电工程的换流变压器电量保护、非电量保护均采



郭健生/工程师

### 关键词/Keywords

柔性直流输电 ·  
“三取二”逻辑 ·  
换流变压器保护 ·

国家电网公司科技项目（52130415000U）。

用三重化配置。为了提高保护动作的准确性和可靠性，换流变压器电量保护、换流变压器非电量保护的出口跳闸采用“三取二”逻辑判别，即三套保护装置分别与两套PCS-9552A“三取二”保护装置及两套极控制装置（Pole Control and Protection, PCP）进行配合，以“三取二”原理运行，当“三取二”装置或者值班的PCP接收到三套保护系统中的至少两套保护系统的同一保护动作跳闸的信号，“三取二”装置即出口跳交流侧开关而PCP即发出阀闭锁命令同时出口跳交流侧开关。

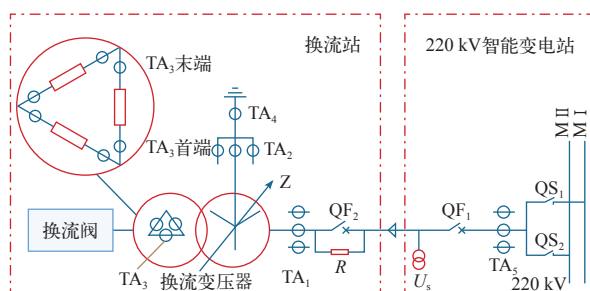


图1 换流变压器一次接线图

换流变压器电量保护主要包括大差差动保护、小差差动保护、网侧引线差动保护、网侧绕组差动保护、阀侧绕组差动保护、过励磁保护及网侧后备保护等，其应用配置如图2所示，通过图2可知各保护的的保护范围。非电量保护主要包括本

体重瓦斯、开关压力继电器。

### 3 “三取二”功能实现方案简介

#### 3.1 “三取二”功能实现方案

厦门柔性直流输电工程的“三取二”功能不仅单独部署在独立的“三取二主机”中，同时还在PCP中集成了“三取二”逻辑（部署在专用板卡上）。“三取二”功能的配置如图3所示。厦门柔性直流换流站为换流变压器配置了三套换流变压器电量保护和三套非电量保护，每套保护均采用两路光纤直连的方式与双重化配置的“三取二”装置进行通信。每套“三取二”装置均以电缆连接的方式出口实现跳换流变压器网侧断路器、起动断路器失灵保护等功能。同时每套保护也以光纤方式连接到双重化配置的交换机与两套极控制主机进行通信，传输经过校验的数字量信号。各极控制主机同样以电缆连接的方式，出口实现跳换流变压器网侧断路器、起动断路器失灵保护等功能，并以光纤方式与阀控系统进行通信，实现换流阀闭锁功能。

#### 3.2 “三取二”逻辑实现原理

“三取二”逻辑原理如图4所示。三套保护

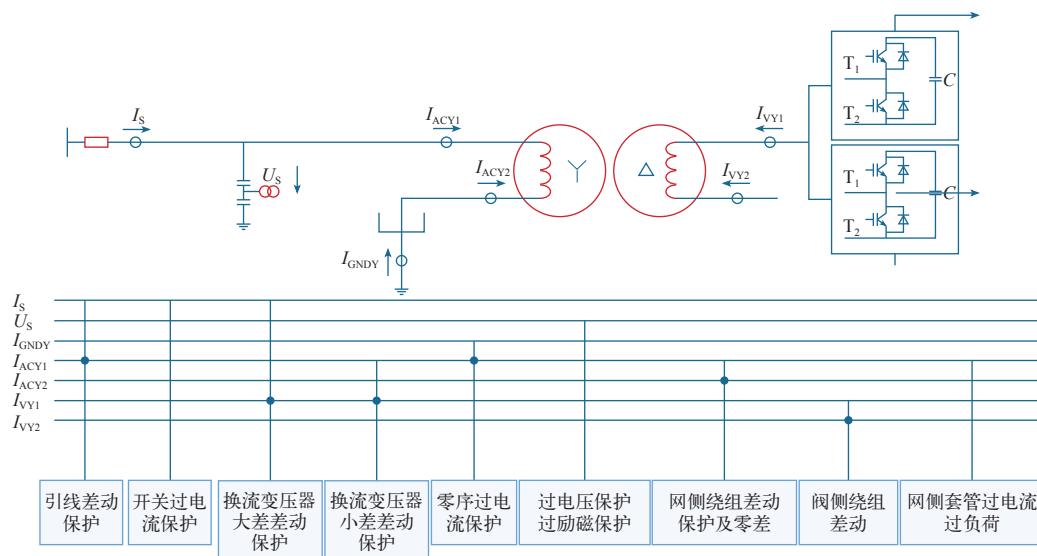


图2 换流变电量保护的典型应用配置

$I_S$ —对应图1中交流断路器（QF<sub>1</sub>）的电流（TA<sub>3</sub>）  $U_S$ —对应图1中交流线路出线的电压  $I_{ACY1}$ —对应图1中网侧套管首端（TA<sub>1</sub>）电流  
 $I_{ACY2}$ —对应图1中网侧套管末端（TA<sub>2</sub>）电流  $I_{VY1}$ —对应图1中阀侧套管（TA<sub>3</sub>）的首端电流  $I_{VY2}$ —对应图1中阀侧套管（TA<sub>3</sub>）的末端电流  
 $I_{GNDY}$ —对应图1中网侧中性点零序（TA<sub>4</sub>）电流

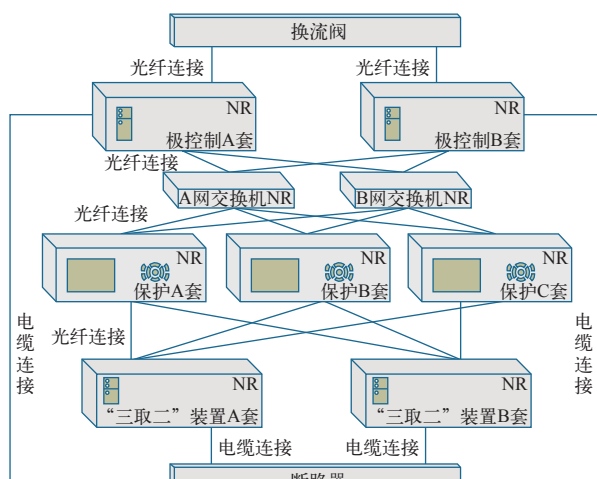


图3 “三取二”功能配置结构图

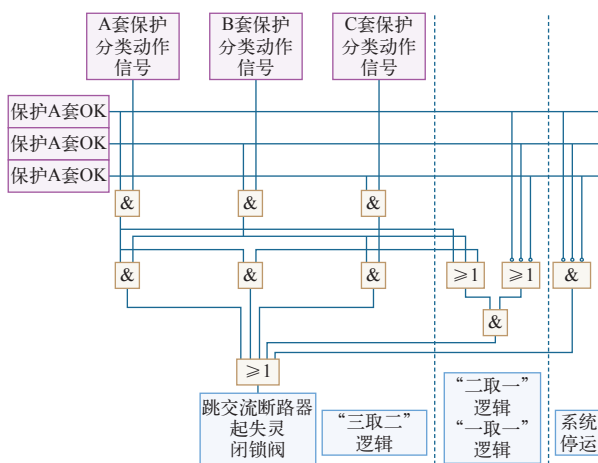


图4 “三取二”逻辑原理框图

与“三取二”逻辑构成一个整体，独立的“三取二”主机分别接收三套保护装置的分类动作信息，三套保护主机中至少两套保护有相同类型保护动作，才会被判定为正确的保护动作行为，允许出口实现跳换流变压器网侧断路器、起动断路器失灵保护等功能。各极控制主机同样独立接收三套保护装置的分类动作信息，并经“三取二”逻辑判别后，出口实现阀闭锁、跳换流变压器网侧断路器及起动断路器失灵保护等功能。当三套保护系统中有一套保护因故退出运行后，采取“二取一”保护动作逻辑；当三套保护系统中有两套保护因故退出运行后，采取“一取一”保护动作逻辑；当三套保护系统全部因故退出运行后，极控制系统闭锁阀，直流系统停运。

### 3.3 “三取二”方案优点

1) 将“三取二逻辑”分别部署在两套双重化配置的“三取二装置”中,并在两套冗余配置的极控制主机中集成了“三取二”功能。当保护动作后,即使双重化配置的“三取二”装置未能出口跳开换流变压器网侧断路器,极控制主机也将完成闭锁阀并跳开换流变压器网侧断路器的工作,确保柔性直流输电系统的安全。

2) 保护主机与“三取二”主机、极控制主机通过光纤连接,传输经校验的数字量信号,提高了信号传输的可靠性和抗干扰能力。

3) “三取二”功能按保护分类实现,当两套或两套以上保护有同一类型的保护动作时,“三取二”逻辑才会出口跳闸。由于根据具体的保护动作类型判别,而非简单取跳闸接点相“或”,提高了保护动作的准确性和可靠性。

#### 4 换流变压器保护现场调试

#### 4.1 电量保护调试

厦门柔性直流换流站换流变压器保护装置采用了南瑞继保PCS-977D,以差动保护作为主保护,过励磁保护、过电流保护和过电压保护作为后备保护。根据差动保护被保护对象及保护所采用电流不同,差动保护又分为:大差差动保护、小差差动保护、网侧引线差动保护、网侧绕组差动保护、零序差动保护及阀侧绕组差动保护等。

差动保护的调试可以参考文献[14],而后备保护的基本原理及调试方法与常规的变压器保护区别不大,在此不再赘述。

## 4.2 非电量保护调试

厦门柔性直流换流站的非电量保护的单体调试与常规的非电量保护的单体调试类似,即通过短接端子的方法,验证保护非电量开入及保护逻辑的正确性,为后面的与“三取二”装置及与PCP装置的联调创造条件。本站需要验证的非电量开入主要包括本体重瓦斯、开关压力继电器。

### 4.3 换流变电量保护与“三取二”装置联调

换流变电量保护与“三取二”装置联调回路,如图5所示。

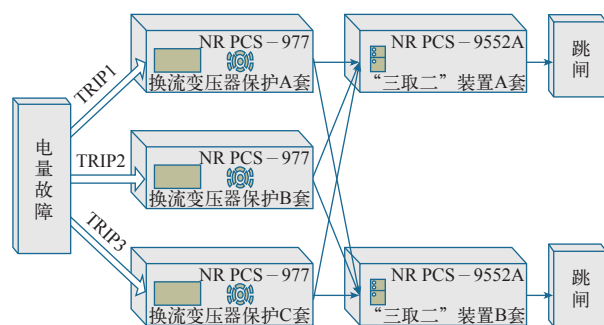


图5 换流变电量保护与“三取二”装置联调回路图

根据“三取二”装置实现方案可知,联调试验的主要试验项目应包括:“一取一”逻辑检查、“二取一”逻辑检查、“三取二”逻辑检查、“三取三”逻辑检查及不同保护动作的“三取二”逻辑检查。在对应试验项目下,主要考虑三套保护中有保护因故退出时,保护范围内出现故障,“三取二”装置是否能够正确动作出口以及三套保护中有两套保护的不同保护动作时,“三取二”装置是否不动作。由于本文篇幅有限,仅举例说明试验方案,如下表所示。下表中第1行说明在进行“一取一”逻辑检查试验时,将电量保护A、B套断电后,对电量保护C套施加

表 电量保护与“三取二”装置联调方案

| 序号 | 试验项目      | 电量保护A套状态 | 电量保护B套状态 | 电量保护C套状态 | 三取二装置A套 | 三取二装置B套 |
|----|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|
| 1  | “一取一”逻辑检查 | 断电       | 断电       | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 2  |           | 检修       | 检修       | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 3  |           | 光纤断链     | 光纤断链     | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 4  |           | 装置闭锁     | 装置闭锁     | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 5  | “二取一”逻辑检查 | 断电       | 保护不动作    | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 6  |           | 检修       | 保护不动作    | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 7  |           | 光纤断链     | 保护不动作    | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 8  |           | 装置闭锁     | 保护不动作    | 保护动作     | 正确出口    | 正确出口    |
| 9  | “三取三”逻辑检查 | 大差比率差动动作 | 大差比率差动动作 | 大差比率差动动作 | 正确出口    | 正确出口    |
| 10 | “三取二”逻辑检查 | 大差比率差动动作 | 大差比率差动动作 | 保护不动作    | 正确出口    | 正确出口    |
| 11 |           | 保护不动作    | 保护不动作    | 大差比率差动动作 | 不出口     | 不出口     |
| 12 | 不同保护动作的   | 大差比率差动动作 | 引线差分差动作  | 保护不动作    | 不出口     | 不出口     |
| 13 | “三取二”逻辑检查 | 大差比率差动动作 | 大差比率差动动作 | 引线差分差动作  | 正确出口    | 正确出口    |

故障量,使得保护动作后,用万用表分别测量两套“三取二”装置的出口接点是否闭合,以判断“三取二”逻辑是否正确,并记录。

### 4.4 换流变压器非电量保护与“三取二”装置联调

换流变压器非电量保护与“三取二”装置联调回路,如图6所示。

根据“三取二”装置实现方案可知,联调试验的主要试验项目与4.3节类似。只是通过短接端子的方法,模拟非电量保护动作,以验证“三取二”动作逻辑的正确性。例如,在“不同保护动作的‘三取二’逻辑检查项目”中,应模拟两套非电量保护出现不同的非电量开入,如A套保护的

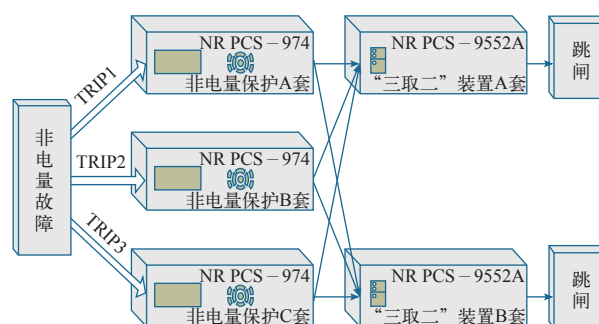


图6 换流变非电量保护与“三取二”装置联调回路图

A相本体重瓦斯跳闸,同时B套保护的A相开关压力继电器跳闸,C套保护不动作,此时两套“三取二”装置均不出口跳闸。其他试验项目的试验过

程与此类似，在此不再赘述。

#### 4.5 换流变电量保护及非电量保护与PCP装置联调

换流变电量保护及非电量保护与PCP装置联调试验的原理及试验方案与4.3节和4.4节所讲的基本一致。仅在试验时，除了要测量出口接点是否闭合外，还应注意值班PCP装置的动作报文，即PCP应同时发阀闭锁的命令和网侧断路器跳闸命令。

#### 4.6 “三取二”装置跳闸矩阵检验

“三取二”装置跳闸矩阵检验包括换流变压器电量保护跳闸矩阵检验和非电量保护跳闸矩阵的检验。

下面以大差动速断保护为例，说明跳闸矩阵检验过程。大差动速断保护在运行时，需投入“换流变压器跳闸”和“触发录波”功能。检验过程如下。

1) 将换流变压器电量保护B、C套投检修，在换流变压器电量保护A套上模拟大差动速断保护动作，此时检查“三取二”装置是否正确动作出口跳闸并触发录波。

2) 退出“三取二”装置跳闸矩阵中大差动速断保护的“换流变压器跳闸”功能，模拟大差动速断保护动作，此时检查“三取二”装置是否只触发录波，但不出口跳闸。

3) 投入“三取二”装置跳闸矩阵中大差动速断保护的“换流变跳闸”功能，退出“三取二”装置跳闸矩阵中大差动速断保护的“触发录波”功能，模拟大差动速断保护动作，此时检查“三取二”装置是否只出口跳闸，但不触发录波。

4) 重复1)、2)和3)步，校验完跳闸矩阵中的所有保护。

#### 4.7 换流变压器保护整组传动试验

换流变压器保护整组传动试验主要目的在于：检查保护装置带开关的跳闸回路的正确性；检查换流变压器保护装置与其他保护装置配合的二次回路，如起失了解复压回路的正确性；检查换流变压器保护装置与直流控制保护系统的配合是否满足设计要求；检查换流变压器保护的动

作信号是否正确上送并显示；检查换流变压器保护、“三取二”装置及直流控制装置的出口压板的唯一性与对应性。

整组传动的方法与常规交流保护类似，在此不再赘述。试验项目应分为：电量保护与“三取二”装置A套整组传动、电量保护与“三取二”装置B套整组传动、电量保护与PCP A套整组传动、电量保护与PCP B套整组传动、非电量保护与“三取二”装置A套整组传动、非电量保护与“三取二”装置B套整组传动、非电量保护与PCP A套整组传动和非电量保护与PCP B套整组传动。

## 5 结束语

厦门±320 kV/1 000 MW柔性直流输电工程是世界首例采用真双极接线方式的柔性直流输电工程，与高压直流输电系统在保护配置及二次接线方式上存在不同之处。本文介绍了厦门柔性直流换流变压器一次接线方式，说明了换流变压器保护的配置方案、“三取二”逻辑的实现方案并对现场试验方案及试验技术进行研究，研究成果对其他柔直换流变压器的试验方案及试验技术具有借鉴作用。

#### 参考文献

- [1] 贺之渊，赵岩，汤广福. ±320 kV/1 000 MW柔性直流输电核心技术研发及应用[J]. 智能电网，2016，4(2)：124-132.
- [2] 阳岳希，贺之渊，周杨，等. 厦门±320 kV柔性直流输电工程的控制方式和运行性能[J]. 智能电网，2016，4(3)：229-234.
- [3] 白雪松，袁绍军，王轶，等. 柔性直流输电技术综述[J]. 电气应用，2015，34(21)：78-83.
- [4] 胡文旺，唐志军，林国栋，等. 柔性直流控制保护系统方案及其工程应用[J]. 电力系统自动化，2016，40(21)：27-33，46.
- [5] 石吉银，唐志军，林国栋，等. 厦门柔性直流输电工程系统调试及关键技术[J]. 南方电网技术，2017，11(1)：1-6.

(下转第83页)

- [ 10 ] Tammy Gammon, John Matthews. IEEE 1584-2002 arc modeling debate [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2008, 14 (4) : 61-69.
- [ 11 ] Khakpour A, Franke S, Uhrlandt D, et al. Electrical arc model based on physical parameters and power calculation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43 (8) : 2721-2729
- [ 12 ] 陈奎, 刘长江. 小电流接地系统单相电弧接地故障特征的研究 [J]. 电气应用, 2006, 25 (8) : 1-4.
- [ 13 ] 王倩, 叶赞, 谭王景, 等. 精确击穿电弧模型仿真及分析 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31 (10) : 4-15.
- [ 14 ] Idarraga Ospina G, Cubillos D, Ibanez L. Analysis of arcing fault models [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2008: 1-5.
- [ 15 ] Kizilcay M, Pniok T. Digital simulation of fault arcs in power systems [J]. European Transactions on Electrical Power, 1991, 1 (1) : 55-60.
- [ 16 ] Koch B, Christophe P. Arc voltage for arcing faults on 25 (28) kV cables and splices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3) : 779-788.
- [ 17 ] Kulkarni S, Allen A J, Chopra S, et al. Waveform characteristics of underground cable failures [C]. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-8.
- [ 18 ] Kulkarni S, Santoso S, Short T A. Incipient fault location algorithm for underground cables [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (3) : 1165-1174.
- [ 19 ] Elkalashy N I, Lehtonen M, Darwish H A, et al. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14 (2) : 375-383.
- [ 20 ] Michalik M, Rebizant W, Lukowicz M, et al. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4) : 1793-1802.
- [ 21 ] Kizilcay M, K-H Koch. Numerical fault arc simulation based on power arc tests [J]. European Transactions on Electrical Power, 1994 (4) : 177-185.

(收稿日期: 2017-02-08) **EA**

(上接第76页)

- [ 6 ] 李超, 唐志军, 林国栋, 等. MMC静态直流充电时电容均压特性研究和保护定值整定 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (21) : 34-39.
- [ 7 ] 刁冠勋, 李传毅, 毛颖科. 柔性直流输电工程启停流程探讨 [J]. 电气应用, 2013 (增刊) : 612-616.
- [ 8 ] 王存平. 柔性直流输电系统技术优势及仿真研究 [J]. 电气应用, 2015 (增刊) : 224-227.
- [ 9 ] 毛新红. 适应于孤岛供电柔性直流输电系统控制器研究设计 [J]. 电气应用, 2015, 34 (14) : 136-139.
- [ 10 ] 翁汉琨, 林湘宁. 换流变压器差动保护异常动作行为分析及对策 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (31) : 87-94.
- [ 11 ] 许加柱, 白俊锋, 罗隆福, 等. FCC-HVDC换流变压器三相差动保护仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (20) : 115-119.
- [ 12 ] 胡敏, 瞿纲举. 换流变差动保护现场校验 [J]. 湖南电力, 2011, 31 (1) : 52-54.
- [ 13 ] 刘光誉, 潘俊锐. 浅析换流变压器比率差动保护 [J]. 科技创新与应用, 2014 (26) : 19-20.
- [ 14 ] 张佳敏, 蒋琛, 李鹏, 等. 换流变压器保护改造分析及试验技术研究 [J]. 江苏电机工程, 2013, 32 (2) : 24-27.
- [ 15 ] 雷兵. “三取二”逻辑在南方电网直流输电工程中的应用 [J]. 继电器, 2008, 36 (7) : 88-91.

(收稿日期: 2017-02-24) **EA**