

四川电网移动直流融冰装置设计及现场融冰

杨琳¹, 刘凡¹, 马小敏¹, 邓元实¹, 梁一桥², 宋墩坊³, 李龙江³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 浙江桂容谐平科技股份有限公司 浙江 杭州 310000; 3. 国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

摘要:给出了四川电网 220 kV 及以下覆冰输电线路移动直流融冰装置设计、建设、现场融冰技术方案。移动直流融冰装置采用 6 脉动可控硅整流、强制风冷技术,经紧凑设计后整体尺寸为 3.6 m × 1.6 m × 2.4 m,可满足四川电网多条 220 kV 及以下、100 km 以内覆冰输电线路融冰需求。融冰装置设计考虑了谐波对公网及一、二次设备的影响,提出融冰现场安全控制策略。该装置在 110 kV 线路完成了大电流调试试验,并成功对 220 kV 线路进行现场融冰,取得了较好的工程应用效果,可为类似的融冰工作提供参考。

关键词:直流融冰装置;谐波;现场调试;融冰电流;可控硅整流装置

Abstract: The schemes for the design, construction and field test technology of movable DC de-icer for 220 kV and below ice-coating transmission lines in Sichuan Power Grid are proposed. The movable DC de-icer adopts 6-pulse thyristor rectifier and the forced air-cooling technology, its overall size is 3.6 m × 1.6 m × 2.4 m after the compact design, so it can meet the requirements of several ice-coating transmission lines of 220 kV and below within 100 km in Sichuan Power Grid. The influence of harmonic on the public network and the primary/secondary equipment is considered in the design of de-icer, and the security control strategy in the field is proposed. The high-current commissioning test in 110 kV transmission line and the field ice-melting in 220 kV transmission line are completed with good application effects, which can provide a reference for the similar ice-melting project.

Key words: DC de-icer; harmonic; field test; ice-melting current; thyristor rectifier

中图分类号: TM422 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0064-05

0 引言

受全球气候变化影响,极寒冰雪天气已成为严重威胁和影响电网安全可靠运行的主要因素之一^[1-3]。冰灾造成输电线路出现导线与地线断股、分裂导线扭绞、间隔棒变形、断裂、弧垂对地距离不足跳闸、脱冰舞动跳闸等情况时有发生,部分受微地形、微气象影响严重的局部线路区段甚至出现断线、倒塔等危急情况,造成线路强迫停运,给电网安全运行造成重大影响。

为应对冰雪灾害对电网的侵袭,国内各科研院所相继开展了输电线路融冰装置的研究,众多研究成果已在工程中得到应用,其中固定融冰装置技术已相对成熟,并在电网抗冰减灾中发挥着重要的作用,如湖南 500 kV 复兴变电站、四川 500 kV 东坡变电站、金华 500 kV 双龙变电站的固定融冰装置都已

在工程中得到良好的应用^[4-5]。而移动融冰装置受现有技术条件制约,难以将其体积小量化,因而移动融冰装置工程应用成功的案例较少。湖南省电力公司电科院采用二极管整流技术设计了分体式移动融冰装置,该装置将长、中、短距离融冰单元集中布置在两台平板车上(长 16 m,宽约 3 m),并为其配置一台随车吊,在湖南 220 kV 及以下输电线路融冰方面取得了较好的应用效果。浙江电网设计了一套可控硅水冷整流移动融冰装置,其尺寸为 14 m × 2.2 m × 2.5 m,由于体积过于庞大,移动融冰装置实际上被作为固定融冰装置进行线路融冰。文献[6]提出了一套输入电压为 10 kV,最大输出电流为 1.5 kA 的移动直流融冰装置方案,所有设备放置于标准集装箱中实行整体吊装,并在 220 kV 线路完成了调试^[7-9]。以上可见报道的移动直流融冰装置体积均较为庞大,不利于类似四川电网变电站间道路崎岖条件下运输,尤其是冬季道路覆冰,运输难度更大,

因此现有移动直流融冰装置在四川电网均难以应用^[10-14]。因此设计一套重量轻、体积小、便于运输、性能优良可满足多目标线路融冰需求的移动直流融冰装置,对电网抗冰减灾工作具有重要意义。

1 移动直流融冰装置原理与设计

移动直流融冰装置设计原则有以下4点:①需满足四川电网220 kV及以下100 km以内输电线路(2×LGJ400导线及以下)融冰需求;②装置体积小、重量轻,便于在各变电站间崎岖山路运输;③装置维护方便,融冰方式灵活;④装置接入电网融冰时谐波电流对电源变压器及系统安全运行无影响。

四川电力科学研究院(以下简称四川电科院)根据四川电网实际情况设计了目前国内同容量下体积最小的两套移动直流融冰装置,功率较小的一套(体积3.5 m×1.5 m×2 m,额定容量12.5 MVA,额定直流输出1 000 A)放置于川南地区,可完成泸州、宜宾等川南地区220 kV(LGJ400)及以下输电线路融冰需求。功率较大的一套(体积3.6 m×1.6 m×2.4 m,额定容量25 MVA,额定直流输出2 000 A)放置于川中,可满足川中乐山、雅安等地区220 kV(2×LGJ400)及以下输电线路融冰需求。

1.1 移动融冰装置工作原理

直流融冰装置是将10 kV交流电经可控硅6脉波整流,通过调整可控硅触发角输出幅值可调的直流电流。电流流经待融冰线路产生焦耳热,从而融化线路覆冰。融冰装置原理如图1所示。

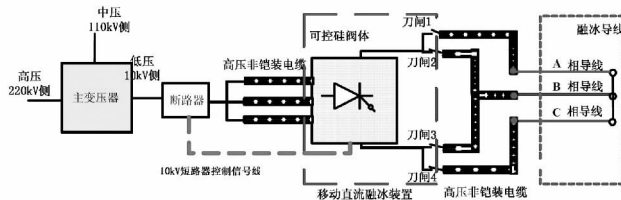


图1 融冰装置原理图

1.2 移动融冰装置轻型化设计

现有移动直流融冰装置在保证大功率(提高额定直流输出电流)时,装置自身发热严重,必须采用大尺寸内部空间提供散热气流通道,从而使得装置整体体积及重量大,不便于移动。主要在融冰装置设计时重点设备材料选型、可控硅阀、控制系统及装置内部结构等方面进行了优化设计,实现了大功率融

冰装置的小型化。

1.2.1 可控硅阀桥设计

根据融冰装置输出直流额定电流,可以计算出每相桥臂平均电流和有效值电流分别为

$$\text{平均电流: } I_{av} = I_{dc} / 3 \approx 666 \text{ A} \quad (1)$$

$$\text{有效值电流: } I_{rms} = I_{dc} / 1.732 \approx 1\ 155 \text{ A} \quad (2)$$

根据不同尺寸可控硅管通流能力,选用TEG公司生产的4寸可控硅(KPC_2800_65)。每个可控硅所承受最高过电压按1.3倍额定值考虑,则每桥臂峰值电压是10 kV×1.3×1.414=18.4 kV;再考虑1.9倍可控硅关断过冲电压,则关断时刻桥臂可能承受的最高电压为18.4 kV×1.9=34.96 kV。当可控硅强制触发(过电压保护触发)电压设置为6 kV,则每相桥臂串联可控硅个数为34.96 kV/6 kV=5.8个,取6只。为提高桥臂工作稳定性,使用“N+2冗余”设计原则,则每桥臂可控硅只数为6+2=8只,如图2所示。

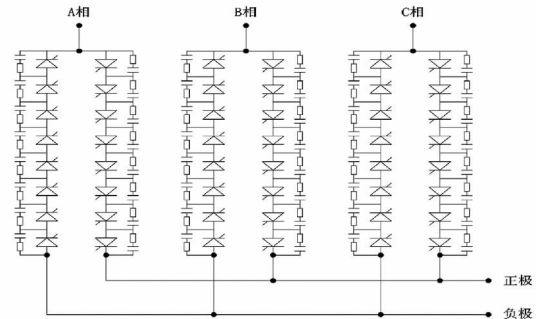


图2 可控硅阀桥电路设计图

1.2.2 触发电路设计

由于移动融冰装置每相桥臂需要8个可控硅串联使用,这对触发电路设计提出了更高要求。传统触发电路设计采用磁做媒介进行隔离,实现触发电路与主电路之间的隔离,但是电磁干扰和融冰装置所需较高隔离电压等问题使得这种方式不再适合该融冰装置。为了解决这一问题,该融冰装置采用光纤触发可控硅方式。该方式不仅安全可靠地实现了触发电路与主电路之间电气隔离,同时确保每相可控硅开通关断的同一性,避免了因为可控硅导通时刻不一致出现的桥臂短路等电路故障,提升了装置工作稳定性。

1.2.3 控制系统设计

移动直流融冰设备控制系统由实时控制系统、输入输出模块、FPGA模块和人机界面模块组成。该控制系统采用双冗余系统设计,具有高可靠性、高

响应速度和界面友好等特点,其控制系统框图如图3所示。具体功能如下。

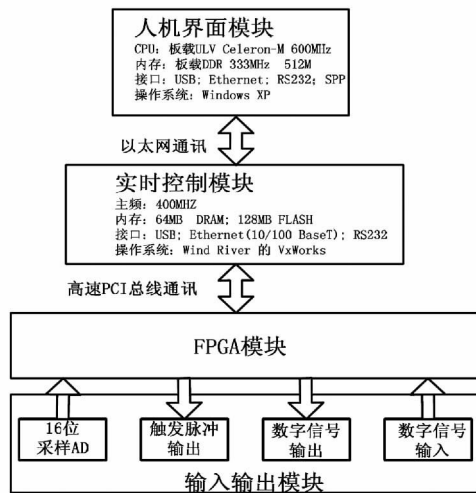


图3 直流融冰设备控制系统框图

实时控制模块: 该模块实现了算法控制、故障暂态录波以及部分保护功能。具有400 MHz处理器、128 MB非易失性存储介质、64 MB内存组成。并配有一套实时操作系统(Wind River的VxWorks)。

输入输出模块: 由一系列高可靠性的输入输出子模块组成。所有子模块均可热插拔,可根据系统的需要进行适当扩展。子模块包括模拟输入子模块、数字输入子模块、数字输出子模块等。模拟输入子模块的采样分辨率位为16位,可实现同时采样以避免因采样延迟引起的相位误差。可控硅触发信号、保护信号、继电器信号通过数字输出子模块进行控制,断路器信号通过数字输入模块采集。

FPGA模块: 该模块是一个基于FPGA电路的特高速运算单元,该模块与各输入输出模块相连,以获取各输入模块采集到的数字量与模拟量,完成相应运算功能。并将触发信号通过数字输出模块输出。该模块响应时间小于10 ms,满足融冰整体的相应速度要求。

人机界面模块: 设计了基于LabView的触摸界面。该模块通过工控机为用户提供操作界面,并完成存储、读取历史数据等功能。

1.3 结构设计

移动融冰装置结构设计主要以内部结构紧凑、坚固,散热风道简单高效,外部接线简易,工作人员便于操控为主,主要体现在以下几个方面。

装置整体操控系统由12英寸触摸屏电脑进行

集成,操作人员于装置外进行操控。

装置交流进线及直流出线绝缘子由侧面抽头,顶部采用全封闭结构,以便于进出线电缆接线,同时提高防雨、防潮能力。

可控硅阀采用立式串联结构安装,并设计串联可控硅阀冷却风道,阀体风道采用“透明PC耐力板”材料,极大降低移动融冰设备体积,并在方便观察阀体器件工作状态的同时减轻了装置重量。

强弱电室分离设计,保证了操作人员与设备安全的同时,也减小了高压回路对控制系统的干扰,提高设备工作稳定性。

三接头直流出线方式设计,如图1所示,通过直流出线刀闸的分合组合,可以自动实现线路换相融冰而无需人工重新接线更改待融冰线路,提高了设备融冰工作效率,节约了人力。

2 移动直流融冰现场融冰

2.1 融冰时对10 kV侧电网影响

移动直流融冰装置融冰时整流装置交流侧电流波形为一个6脉冲的阶梯波。存在的谐波电流次数由 $6k \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots, n$)决定,基波电流和直流电流的关系如 $I_1 = I_d \sqrt{6} / \pi$ 所示。

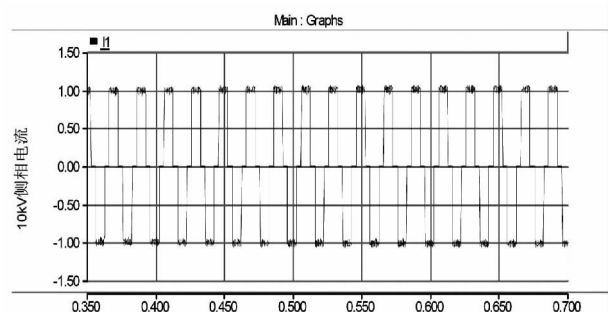


图4 10 kV交流侧电流波形

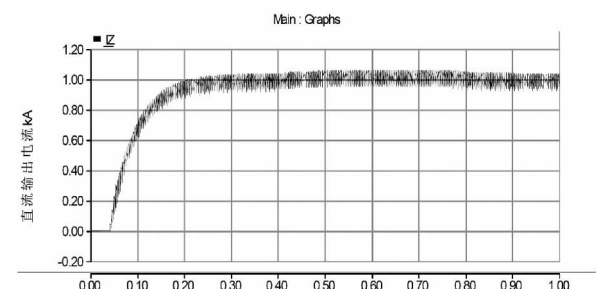


图5 直流输出电流波形

根据融冰的实际情况,对融冰装置输出1 000 A

直流电流的工况进行了 PSCAD 仿真。10 kV 交流侧电流波形如图 4 所示, 1 000 A 直流输出电流如图 5 所示, 图 6 显示为 10 kV 交流侧电流谐波分析图。

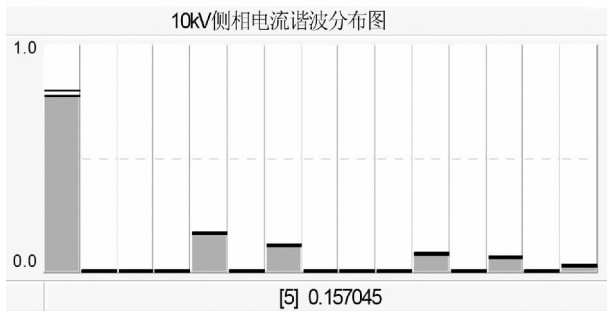


图 6 10 kV 交流侧相电流谐波分析

表 1 220 kV 侧谐波电流

10 mm 冰的最小 融冰电流/A	220 kV 侧谐波电流/A			
	5 次	7 次	11 次	13 次
1 000	7.80	4.96	3.19	2.66
谐波电流国标允许值(A)				
——短路容量为 2 427.2 MVA (电源变压器) 时	11.65	8.25	5.22	4.49
谐波电流国标允许值 (A) ——短路容量为 2 000 MVA 时				
	9.60	6.80	4.30	3.70

从图 6 可得输出直流电流基波幅值 800 A, 奇次谐波幅值占基波幅值百分比。计算知 10 kV 侧 5、7、11、13 次谐波电流含量分别为 125.6 A、87.2 A、53.6 A、44 A, 谐波电流值均超过了电网规定的要求。若增加滤波装置, 融冰装置整体的体积将会成倍增加, 使融冰装置的应用性将显著降低。在实际工程中 220 kV 变电站 10 kV 侧主要用于投切无功补偿装置, 而不直接对用户进行供电, 因此在实际融冰时只需考虑站内一、二次设备(主变压器、电容器、TV、TA 及二次保护装置)的安全。四川电网中融冰电源 220 kV 主变压器 10 kV 侧最小容量为 75 MVA, 而融冰装置的容量最大为 25 MVA, 只占 10 kV 侧容量的 33.3%, 因而融冰时在主变压器 10 kV 侧产生的谐波对变压器影响较小。10 kV 侧电容器主要起无功补偿作用, 若融冰时退出 10 kV 侧所有无功补偿电容器组和载波通讯用耦合电容器, 可对其起到保护作用。10 kV 侧电压、电流的监测采用融冰装置自带传感器进行实时监控, 故母线中 TV、TA 亦可退出运行。综合考虑, 融冰装置接入电网, 是安全可行的。220 kV 侧谐波电流如表 1 所示, 不滤波的情况下 220 kV 侧谐波电流合格, 110 kV 侧

谐波参照 220 kV 侧, 亦满足国标要求。

2.2 移动直流融冰接入电网方式

融冰装置外观如图 7 所示。



图 7 移动直流融冰装置外观图



图 8 10 kV 电容器刀闸下端头与直流融冰装置电缆连接点

融冰装置接入电网时, 主接线图如图 1 所示。经过主变压器低压 10 kV 侧出线接至 10 kV 母线, 10 kV 母线经断路器到高压非铠装电缆, 电缆采用 6 根单芯电缆, 每相两根, 截面积为 120 mm²。为方便融冰现场接线, 为融冰装置尽快启动争取时间, 采用重量较小、较轻便的非铠装高压电缆, 如图 8 所示为 10 kV 电容器刀闸下端头与直流融冰装置电缆连接点, 图 9 为出线电缆与带融冰线路连接点。



图 9 220 kV 汉音一线 263 出线侧与直流融冰输出电缆连接点

2.3 融冰装置融冰前的调试

在移动式融冰装置运抵现场并安装完毕后,需对移动式融冰装置带电后的设备性能和控制保护功能进行现场调试,以确保移动式融冰装置在冰灾来临时能够正常投入运行。

试验前应具备以下条件:①对需要融冰导线一端的变电站接入系统进行改造并通过交接验收;②移动式融冰装置一、二次设备现场安装调试工作已完成并通过验收;③融冰相关设备已经按照调度命名进行标识;④二次设备定值已经正式下达,并整定核实完毕;⑤计算需要融冰线路最大、最小融冰电流及导线允许温升;⑥为保证融冰装置正常工作,退出站内所有无功补偿电容器组和载波通讯耦合电容器;⑦为防止谐波导致铁磁共振,从而导致电压互感器爆炸,需要将变电站内的所有电容耦合式电压互感器退出系统;⑧相关单位准备好现场试验方案和设备,做好异常情况的应急预案;⑨移动式融冰装置试验申请已经批复;⑩移动式融冰装置试验方案已经通过审核批准;⑪相关单位已做好移动式融冰装置试验期间运行方式变更的工作。

现场调试试验内容有:①开关和刀闸不带电操作试验;②不带电保护试验;③低电压小电流试验及抗干扰试验;④移动式融冰装置10 kV充电试验;⑤带融冰线路小电流试验;⑥带融冰线路大电流试验及温升试验。

2011年11月22日,对泸州110 kV震走线(线型LGJ-185/30,线路长度62 km)进行融冰装置现场调试试验。为保证整个调试过程安全进行,对线路实行阶梯增流。电流从0升至200 A,持续10 min;200 A升至400 A,持续10 min;400 A升至600 A,持续半个小时,最后输出直流电流811 A。可控硅触发角 29.8° ,装置冷却出风口 50°C ,持续运行1 h,全过程变压器运行稳定,噪声及电流波形正常,导线温度由 -1°C 升至 65°C ,融冰装置运行状况正常。

2.4 融冰装置现场融冰

220 kV汉音一线(线型LGJ-400/50,线路长度112 km)是连接乐山与雅安的重要通道。从2011年12月20日以来,该线因雨雪冰冻灾害故障频发,发生多次跳闸事故,线路覆冰已严重影响到电网的安全稳定运行。2012年1月11日,移动直流融冰装置运抵乐山清音变电站,拟对汉音一线实施融冰。



图10 融冰现场效果图

融冰方式采用A相去、C相回的方式(A、C为两个边相),装置向线路输出直流电流400 A,10 min后,直接升至800 A,持续运行1 h,A、C两相覆冰全部脱落。而后对B相进行融冰,融冰电流直接升至900 A,导线温度升高至 23°C ,全线导线弧垂最大下降3 m,装置可控硅触发角为 28.3° ,B相覆冰40 min内全部脱落,图10为覆冰现场脱冰图。汉音一线融冰完毕后,导线弧垂恢复正常,并于当日18:00恢复送电。

2.5 现场融冰安全监测及控制

由于融冰线路汉音一线为运行30余年的老线路,为了确保融冰线路安全,融冰过程中对融冰线路的交叉跨越区、重覆冰区、大档距、高落差区段设立了17个融冰观测点,如图11所示。每个观测点均派技术员对导线弧垂、导线覆冰厚度、环境温度、风速等进行实时监测,并及时将检测信息反馈到融冰指挥控制中心,供融冰决策判断。

同时,融冰时还对变压器、电流波形、融冰线路、移动直流融冰装置进行实时监测。一旦监测到变压器异常噪音或者融冰装置等异常工作状态,应采取停止融冰、减小融冰装置输出电压电流值等应对措施,确保融冰装置与线路安全。

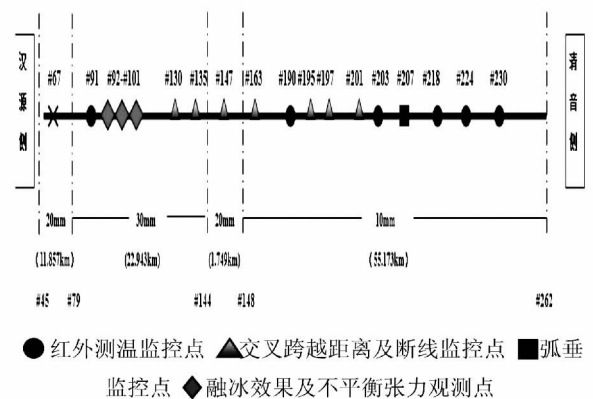


图11 融冰现场观测点

(下转第94页)

[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[4] 王守礼, 李家垣编著. 电力气候[M]. 北京: 气象出版社, 1994.

[5] 王道洪, 郗秀书, 郭昌明编著. 雷电于人工引雷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

[6] 蒋兴良, 易辉著. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中

国电力出版社 2001.

[7] 周淑贞著. 气象学与气候学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.

[8] 豪根(美)主编, 季兴生等译. 微气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

(收稿日期: 2013-06-24)

(上接第68页)

融冰安全控制策略如图12所示。

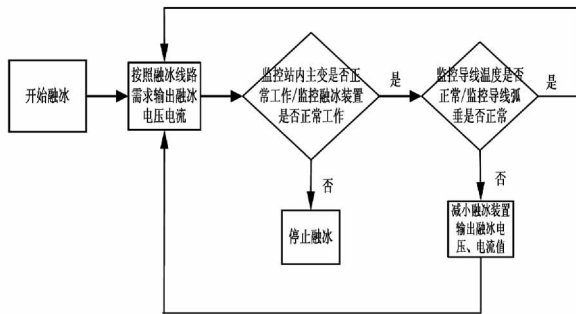


图12 融冰安全控制策略

3 结论

移动直流融冰装置的设计选型应充分调研电网融冰线路需求,选择合适的参数及尺寸,确保装置的可移动性及对融冰线路的全面覆盖。

可控硅移动直流融冰装置适宜于220 kV及以下、100 km以内输电线路的导线融冰,具有融冰方式灵活、适用范围广、经济性高的特点,经实际线路融冰,取得了良好的工程应用价值。实际融冰工程应视为一项系统工程,需要现场安全监控、通信、调度、后勤保障等诸多部门联合协作,才能确保融冰工作取得成功。

参考文献

[1] 傅闯, 饶宏, 黎小林. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 53-57.

[2] 彭向阳, 周华敏, 杨楚明. 广东电网直流融冰装置安装调试及实冰演练[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 98-105.

[3] 孙棚, 王明新. 交流输电线路大容量固定式直流融冰装置的设计方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 102-105.

[4] 谢彬, 洪文国, 熊志荣. 500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.

[5] 申屠刚, 程极盛. 500 kV 直流融冰兼动态无功补偿系统研发与工程试点[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 75-79.

[6] 范瑞祥, 孙旻, 贺之渊. 江西电网移动式直流融冰装置设计及其系统试验[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 67-71.

[7] 陈亦平, 刘文涛, 和识之. 直流融冰装置在南方电网的应用分析[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 74-77.

[8] 马晓红, 赵立进, 李巍. 直流融冰技术在贵州电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.

[9] 姚致清, 刘涛, 张爱玲. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.

[10] 阮启运, 顾雪平, 陆佳政. 湖南电网220 kV线路直流融冰问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 131-136.

[11] 陈智. 江西省电网直流融冰计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 72-74.

[12] 卢志良, 刘涛, 赵青春. 直流融冰运行模式下直流故障对交流保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 172-175.

[13] 张帆, 徐桂芝, 荆平. 直流融冰系统保护配置与操作策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 169-173.

[14] 陆佳政, 李波, 张红先. 新型交直流融冰装置在湖南电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(4): 77-79.

作者简介:

杨琳(1983),男,博士,研究方向为线路与防雷、线路专业生产技术管理;

刘凡(1978),男,博士,高级工程师,研究方向为在线监测与故障诊断、线路专业生产技术管理;

马小敏(1988),男,硕士,工程师,研究方向为线路及过电压。

(收稿日期: 2013-06-10)