

直流融冰技术的研究及应用

姚致清^{1,2}, 刘涛², 张爱玲², 张喜玲², 安宁³

(1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 厦门陆原建筑设计院, 福建 厦门 361000)

摘要: 通过对目前常用的一些融冰方法介绍分析可知, 直流融冰方法是最理想、有效的方法。分析了直流融冰技术的基本理论, 计算出不同类型线路的融冰电流和所需电源容量。设计出容量不同的固定式和移动式融冰装置用于不同电压等级的交流线路融冰。根据计算的南方电网典型高压直流输电系统的线路融冰保线电流, 提出了不改变主回路结构采用一极功率正送, 另一极功率反送的运行方式对直流线路进行保线的方法。借助实时数字仿真系统解决了高肇直流输电工程线路保线运行方式的关键技术。研究成果成功应用于高肇直流输电工程中, 保障了系统在冬季覆冰时的安全可靠运行。

关键词: 高压直流输电; 融冰; 实时数字仿真器; 直流线路; 换流器

Research & application on DC de-icing technology

YAO Zhi-qing^{1,2}, LIU Tao², ZHANG Ai-ling², ZHANG Xi-ling², AN Ning³

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. XJ Electric Co. Ltd, Xuchang 461000, China;
3. Xiamen Luyuan Architecture Designing Institute, Xiamen 361000, China)

Abstract: Through introducing and researching the commonly used methods of de-icing, the DC de-icing technology is considered the best and most effective method. The fundamental theory of DC de-icing technology is analyzed, and the de-icing current and required power capacity in different lines are calculated. The stationary and mobile de-icing equipments with different capacities are designed for different AC line de-icing at various voltage levels. According to the calculated critical de-icing current of typical HDVC of China Southern Power Grid, it proposes that the AC lines can be protected by keeping the original main circuit structure and adopting the operating mode in which one pole runs at a normal power transmission direction while the other pole runs at the reverse direction. The key technology of line protection in Guizhou-Guangdong HVDC project is solved with the help of real time digital simulator system. The research results are successfully applied to Guizhou-Guangdong HVDC project, and guarantee the safety and reliable operation of the system in winter when transmission lines are iced up.

Key words: HVDC; de-icing; RTDS; DC transmission line; converter

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0057-06

0 引言

2008年1月份我国南方大规模的雨雪冰冻灾害造成输电线路和杆塔大面积覆冰, 部分地区电网输变电设施受损, 相关电厂发电机组也因之跳闸停机。华中及华东地区在2008年1月26日之前就已经发生500 kV线路跳闸129条次、倒塔34基; 220 kV线路跳闸159条次、倒塔11基。此外三广直流输电线路湖南段倒塔9基被迫推迟送电; 宜华直流安徽大别山段6基铁塔遭受不同程度损坏。南方电网2008年1月25日前已累计停运10 kV及以上线路2314条, 累计停运变电站234个。给国民经济带来了巨大损失^[1-4]。交、直流输电线路在冬季覆冰是

电力系统的重大自然灾害之一。因覆冰引起的供电中断, 甚至电网解列等事故, 后果通常极为严重, 修复工作难度大、花费时间长。

因此, 分析各种融冰方法的应用环境, 针对不同的线路提出最理想经济的融冰方法, 对电网的稳定运行意义重大。

1 常用的融冰方法分析

架空电力线路防冰除冰的重点是导线。目前国内融冰方法有30余种, 大致可分为机械除冰法、自然除冰法和热力融冰法三大类, 主要有电磁脉冲除冰、人工除冰法、复合导线融冰、化学涂料防冰、可控硅整流融冰和短路融冰等等^[5]。

1.1 机械除冰法

机械除冰法主要利用输电线路导线的力学效应破坏覆冰的力学平衡使其脱落。以电磁脉冲除冰、滑动铲刮除冰和人工除冰为主。

电磁脉冲除冰是利用电容器冲击放电和电流通过线圈产生脉冲磁场，从而在导线中产生涡流，涡流的磁场与线圈磁场产生斥力使导线产生扩张，脉冲消失后导线收缩到原状态，反复的扩张和收缩使导线表面的覆冰胀裂掉落。

滑动铲刮除冰法是将电容器的冲击放电电流通过线圈产生的脉冲磁场转换为执行机构的脉冲力，通过执行机构将导线表面的覆冰击裂掉落。

机械除冰法中另一种常用人工除冰法存在的最大问题是效率极低，需要大量人力，一般仅适用于作业环境好、100 km 左右的输电线路的除冰。

还有一种由加拿大魁北克水电公司提出的电磁力除冰法，其原理是在线路额定电压下短路，短路电流产生的电磁力使导线相互撞击，使覆冰脱落。这种方法的应用会给系统带来稳定性问题，线路压降也比较大，不推荐使用。

1.2 自然除冰法

自然除冰法不能阻止冰的形成，但有助于限制冰灾。例如：Admirat、Yasui 等人使用的平衡锤技术可防止导线旋转；Goia 和 Chirita 采用的在给定过载条件下允许导线升降技术可减小倒杆塔的几率或防止倒杆塔事故发生，并有助于确保冰灾事故后线路迅速恢复送电。

在导线上安装阻雪环、平衡锤等装置的自然除冰法，可在导线上安装阻雪环，平衡锤使导线上的覆冰堆积到一定程度时，依靠风力、地球引力、辐射以及温度突变等作用自行脱落。该法简单易行，但可能因不均匀或不同期脱冰产生的导线跳跃的线路事故，不能保证可靠除冰，具有一定的偶然性。

利用憎水性和憎冰性涂料防冰是通过减少水和冰与导线的附着力来防止结冰，与其他方法相比在工程上简单易行，成本较低，是防止覆冰具有潜力的可行途径。但现有的防冰涂料并不能从根本上防止冰的形成，而只有在足够的辐射下才能生效，在气温低，水雾呈过冷却的情况下，防冰效果较差。

1.3 热力除冰法

热力除冰法的基本原理是在线路上通过高于正常电流密度的传输电流以获得焦耳热进行融冰。常见的几种热力除冰法^[6-7]：

1) 过电流防冰融冰法：调度通过改变潮流分布增大线路的负荷电流而使得导线发热达到防冰融冰目的。这种方法对截面较小的 110 kV 及以下线路可

行，对更高电压等级线路由于截面大，并受系统容量和运行方式限制，无明显作用。

2) 基于移相器的带负荷融冰法：随着输电网络 FACTS 设备的大量应用，电网在潮流控制方面更加灵活有效，通过改变潮流分布的融冰方法能够在应对冰灾方面发挥更大的作用。基于移相器的带负荷融冰法，即 ONDI(on-load network de-icer)法。带负荷融冰的方法最早在 1990 年提出，并在此后得到了发展。此方法利用移相变压器角度的变化改变平行双回线的潮流分布，通过增加其中一回线的电流来增加线路发热，达到融冰的目的。

3) 高频激励融冰：20 世纪末 Charles R Sullivan 等提出了用 8~200 kHz 高频激励融冰的方法，机理是高频时冰是一种有损耗电介质，能直接引起发热，且集肤效应导致电流只在导体表面很浅范围内流通，造成电阻损耗发热^[8]。

4) 交流短路电流融冰法：人为将融冰线路的一端两相或三相短路，而在另一端提供融冰交流电源，以较大短路电流(控制在导线最大允许电流范围之内)来加热导线，将附着的冰融化。

这种方法在国内外都达到了实用化的阶段，1993 年加拿大 Manitoba 水电局开始采用的短路电流融冰，俄罗斯巴什基尔电网以及我国湖南电网也大量应用了短路融冰技术。对于 500 kV 线路，多采用大截面和多分裂导线，很难做到在短路条件下以系统电源提供较大电流(大部分为无功电流)。而其直流电阻只有交流阻抗的 1/10，因此采用直流融冰需要的电源容量就小得多。

5) 直流电流融冰法：直流融冰技术的原理就是将覆冰线路作为负载，施加直流电源，用较低电压提供短路电流加热导线使覆冰融化。可采用发电机电源整流和采用系统电源的可控硅整流两种方案。前者虽可减少投资但却发电受机组容量与融冰所需容量的限制，大多情况都不满足需求。

因此采用系统电源的可控硅整流融冰是热力融冰法中的热点，其适用性更强，可根据不同情况调节直流融冰电压，使之满足不同应用环境的需要，是现有融冰方法中最理想的一种。

国内外一致认为，对于出现在局部范围内的输电线路覆冰问题，导线的机械除冰方法可做为一种辅助措施。对于发生在大范围的输电线路覆冰问题，导线热力融冰法中的直流融冰方法是最有效的。

2 直流融冰的基本理论

在应用直流电流进行融冰时，为确保不使导线过热损坏线路，需要对融冰电流的大小和融冰时间

进行计算。导线在融冰过程中包括两个热交换过程：一是导线和冰层的热传递；二是冰表面和空气之间的热交换。导线通电流后产生焦耳热，热量通过冰层传到冰的表面，使冰表面温度升高到 t_s ，冰表面再和空气以辐射散热和对流散热的形式进行热交换。当冰表面和空气交换的热量和导体产生的热量相等，且“导线-冰”交界面的温度为冰的熔点温度 (0°C) 时，冰将处于融和不融的临界状态^[9]。此时导线不覆冰时流过的最小电流称为防止导线覆冰的临界电流 I_c ，其计算公式为：

$$I_c = (D/\rho)[(t_s - t)(\pi h + \pi \sigma \varepsilon t^3 + 2EVWC_w) + 2EVW_E L_v] \quad (1)$$

式中： D 为导线外径(m)； ρ 为导线电阻率(Ω/m)； t_s 为导线表面温度(k)； h 为对流换热系数($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{k}$)； σ 为 Stefan-Boltzmann 常数($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{k}^4$)； ε 为导线黑度(新线取 0.23~0.43，旧线 0.9)， E 为导线对空气中过冷却水滴的捕获系数； V 、 W 和 t 分别为湿空气或过冷却水滴的移动均匀速度、含湿量和温度； C_w 为水的定压比热容($C_w = 4.18 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{k}$)； W_E 在导线表面蒸发的液体含量； L_v 为水的汽化潜热($L_v = 2.26 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{kg}$)。

式 (1) 表明， I_c 主要取决于外部气象条件和导线本身的物性参数。一般来说，线路一旦铺设好导线型号基本不会改变，只要知道覆冰时的气象条件，通过合理选择这些参数就可确定 I_c 。

融冰所需时间的计算公式为：

$$T = \frac{[c_i(273.15 - T_a) + L_F] - \rho_i R_i (2R_0 - \pi R_i / 2)}{I^2 R_c} \quad (2)$$

式中： c_i 为冰的比热； T_a 为气温； ρ_i 为冰的密度； R_0 为覆冰后导线平均半径； R_i 为不覆冰时导线半径； I 为融冰电流； R_c 为单位长导线在零度时的电阻^[6]。根据公式 (1)、(2) 可以得出表 1 结果。

表 1 不同输电线路融冰电流/时间及所需电源容量

Tab.1 DC De-icing calculation results in different lines

线路电压等级	导线型号	线路长度/km	最小融冰电流/A	融冰时间/min	融冰电源容量/MW
10 kV 交流线路	LGI-150/35	5	440	128	0.4
110 kV 交流线路	LGI-300/50	20	715	115	2.0
220 kV 交流线路	LGI-2×240/40	20	1 168	119	17.9
500 kV 交流线路	LGI-4×400	100	3 350	89	43.3
500 kV 直流线路	LGI-4×720/50	850	5 254	126	484

注：最小融冰电流和融冰时间的计算条件是：温度 -5°C ，风速 5 m/s ，覆冰厚度 10 mm 。

由表1数据可知对于交流线路的融冰由于其融冰电流和所需电源容量大小适中，可以较容易地设计出合适的可控硅融冰装置。而长距离直流输电线路融冰所需电流和电源容量很大，需要根据直流输电系统的特点研究可行的特殊方式下的保线方案。

3 交流线路的直流融冰技术

交流线路的直流融冰技术的关键是高电压、大功率直流功率源的研制开发及合理利用。根据表 1 的计算结果可以设计开发两种融冰装置。

3.1 固定式融冰装置

针对 500 kV 交流输电线路的融冰可以在辐射面积较大的中心变电站设计安装由交流 35 kV 供电，容量为 60 MW 的大容量固定式直流融冰装置。原理图如图 1 所示。

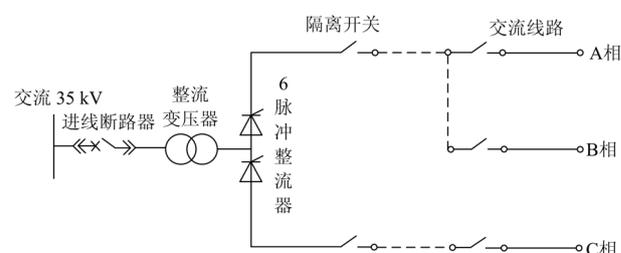


图 1 交流线路的直流融冰电路接线示意图

Fig.1 Transmission line connection configuration of DC de-icing

大容量固定式直流融冰系统的设备主要包括变压器、交流滤波器、换流阀、刀闸、导线及控制保护设备等，投资较大，而融冰装置工作时间很短，单一用于融冰，将导致设备资源的闲置浪费。设计建设时就要考虑其作为静止式动态无功补偿装置的可行性，在平时抑制暂态过电压、改善电能质量。

3.2 移动式融冰装置

对于 220 kV 电压等级以下的输电线路融冰，可以配置由交流 10 kV 供电，容量为 25 MW 的站间移动式直流融冰装置。

站间移动式直流融冰系统设计为 6 脉动整流器接 10 kV 站用变出线，不带整流变压器，采用集装箱方式安装，结构紧凑，可方便在各个变电站移动，通过倒换接线的方式对目标线路进行融冰。

以上两种融冰装置可以满足不同线路长度、导线参数融冰需要，输出的电流调节范围较宽，其换流器可以大角度长期运行。装置操作简便，维护量少，已经有了成功的运行经验。

4 直流线路的直流融冰技术

直流输电系统通常应用于远距离、大容量输电。常规直流输电系统额定输送电流 3 000 A。当处于大电流运行时，电流在导线上产生的热量可以缓解线路覆冰，达到一定的融冰效果。但冰雪灾害易发时期多是水电枯水季，输电系统难以安排足够功率使直流输电系统运行大电流工况，因此线路输送电力相对减少，线损和发热相应减少，一旦遭遇超设计标准的冰冻灾害，容易发生覆冰倒塔。

表 2 为南方电网的几条直流线路保线/融冰电流及融冰所需电源容量计算表。

表 2 不同直流线路融冰和保线电流参数

Tab.2 DC de-icing and anti-icing parameters of different HVDC transmission lines

直流工程	导线型号	线路长度/ km	最小融冰电流/ A	保线电流/ A	融冰电源容量/ MW
天广直流线路	LGJ-4×400/50	960	3 040	2 225	430
高肇直流线路	LGJ-4×720/50	900	4 602	3 302	405
兴安直流线路	LGJ-4×720/50	1 194	4 602	3 302	550
云广直流线路	LGJ-6×630/45	1 418	6 186	4 466	574

注：最小融冰电流和融冰时间的计算条件是：温度-3℃，风速 3 m/s，覆冰厚度 10 mm。

由表 2 可知对于常规直流研究合适的运行方式，运用其过负荷能力，可以达到融冰保线的目的。对于特高压直流线路，必须考虑双阀组并联提高运行电流来达到融冰保线的目的。

4.1 直流线路的融冰保线方案

由于直流输电工程主接线的特点、换流器的交直流变换特性及高度可控性使直流输电线路的融冰方法选择更加灵活，而且更具可操作性，通常可用的融冰保线方法主要有三种^[10-11]。

1) 直接使用直流输电工程的正常运行方式融冰。可采用双极平衡大电流运行或者单极金属回线大电流运行进行线路融冰。其优点是系统主接线不需要做任何改动；控制保护的软件也不需要改动；调度、运行人员对整个操作过程非常熟悉。其缺点是冬季结冰时送端常处于枯小时段，较小的输送功率有可能使线路电流起不到融冰保线效果。此方案不再适用。

2) 更改主接线，将构成双极的两组换流器通过相应的刀闸、引线改造成相并联的系统。这种方式可以将电流提升至正常值的两倍，可以达到融冰电流要求而不仅是保线，是直流线路融冰最彻底的方法。

案。但是需要改变主接线，增加设备投资，直流控制保护系统也要根据这种特殊的运行方式做很多修改，并且需要整流侧提供较多的功率，增加功率调度的难度，遇到方案 1 同样的问题。

3) 双极运行时，一极功率正送运行，另一极功率反送运行。这种融冰方法不需要对主接线进行改动，不增加新的设备投资，只需要对控制保护软件进行相关调整，容易实施。换流功率主要用于直流线路的功率损耗，在具有良好融冰保线效果的情况下与交流系统交换的功率较小，并且可以通过改变相应极的电压参考值在融冰的同时对较弱电网系统进行功率支援。符合冬季功率调度要求，推荐采用此方法。高肇直流工程双极异向传输融冰保线方案如图 2 所示，通过调整贵州高坡站电压参考值使得直流系统与贵州电网交换的功率为零。所有的融冰保线消耗功率由广东电网提供，当然也可以灵活调整双极电压参考值，由两端电网均摊融冰功率。

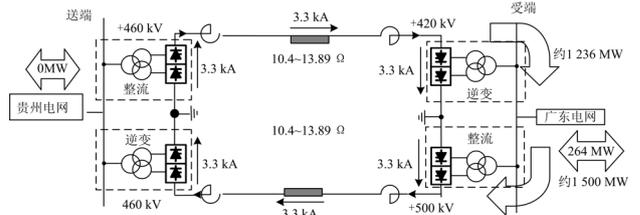


图 2 双极功率异向传输融冰保线运行示意图

Fig.2 Bipoles run at different power transmission direction mode for anti-icing

4.2 高肇直流功率异向传输融冰保线的仿真

高肇直流工程起点贵州高坡换流站，终点广东肇庆站，额定电压±500 kV，额定电流 3 000 A，双极输送功率 3000 MW，线路全长 900 km，是南方电网的一条远距离、大功率、超高压直流输电工程。直流线路距离长而且线路走廊经过地区地理及气候复杂，属于线路易结冰区域。对其控制保护系统实施融冰运行方式的改造，具有重要意义。

4.2.1 高肇直流仿真系统介绍

借助实时数字仿真器 (Real Time Digital Simulator, RTDS)与直流控制保护仿真试验系统仿真高肇直流工程融冰运行方式下的功能性能试验。

RTDS 仿真一次设备，其参数与实际系统一致。直流控制保护系统采用实际控制保护系统的仿真设备，共 5 面标准屏柜。该控制保护仿真系统与实际控制保护系统具有相同的硬件结构、软件配置等，但简化了 I/O 接口、冗余系统，整个仿真系统结构如图 3 所示。

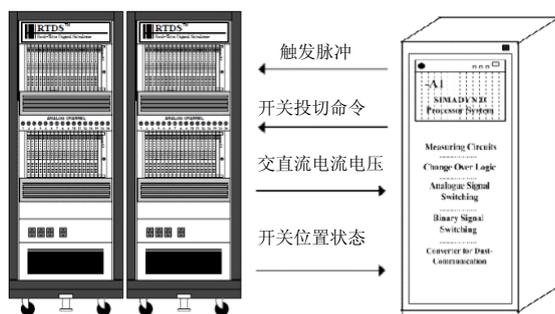


图3 高肇直流 RTDS 仿真系统

Fig.3 RTDS simulation system of Guizhou-guangdong HVDC project

4.2.2 仿真试验重点解决的问题

双极功率异向传输的融冰保线运行方式不同于正常的功率传输,在调整控制保护系统软件时,需要重点关注以下问题。

1) 针对双极功率异向传输大电流运行时,某一极故障跳闸后,健全极大功率传输对两端交流系统的冲击问题,需要提出切实可行的双极联动跳闸逻辑。

2) 直流保护系统的线路故障重启、降电流以及平衡双极等非跳闸逻辑,可能会导致双极传输的功率相差太大,对交流系统的冲击问题。

3) 双极线路同极性运行,若双极线路间特别是线路中点发生短路故障,电压差较小,各电气量变化不大,如何处理的问题。

4) 送端交流弱系统,对无功功率控制的特殊要求问题。

4.2.3 仿真试验成果及小结

直流系统融冰模式运行时,一旦故障造成一极停运,直流系统会转入单极大地回线运行,系统将会出现大功率传输的运行工况,给两侧交流系统造成冲击。为避免这种情况,在控制系统中为这种融冰方案配置了特殊的保护功能,判断对极故障停运时,立即将本极的电流阶跃到最小值并闭锁。通过模拟某一极的各种故障跳闸,均可保证在 100 ms 内停运另一极。图 4 为极 1 阀短路故障跳闸后,55 ms 左右极 2 电流阶跃至最小值并闭锁的波形图。

通过仿真研究了双极功率异向传输融冰的特殊运行方式对两侧交流系统的影响,整理了双极功率异向传输融冰的可行性研究报告。提出了控制保护软件修改方案。研究了融冰运行方式下的单极直流系统故障跳闸对交流系统的冲击特别是对交流线路保护的影响,研究结果表明并不会带来保护的误动。对无功功率控制策略及方法提出了改进建议。

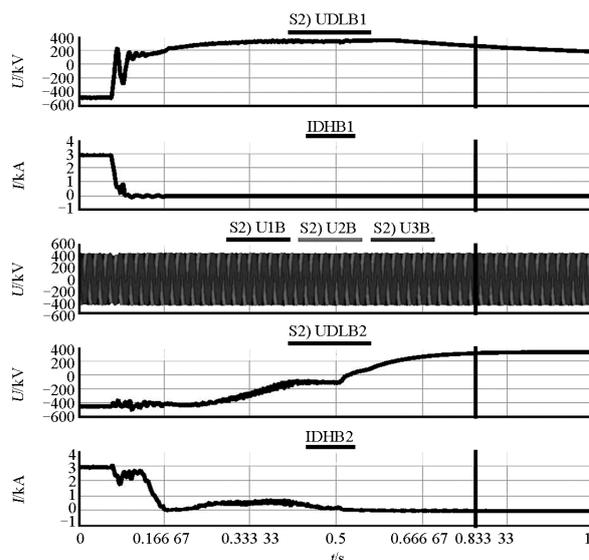


图4 极1跳闸极2电流阶跃至最小后闭锁

Fig.4 Poel 2 DC current go to minimum value and blocked after pole 1 trip

4.3 高肇直流融冰保线的现场实施

2010年2月在高肇直流停电检修期间成功完成融冰运行方式的改造及试验,先后进行了融冰方式启动、模拟单极故障停运、一极降压一极全压不对称运行、双极降压运行等试验,各项性能指标正常。试验结果表明,高肇直流输电系统可以安全应用新融冰方式,电源侧仅需提供9万~11万kW的融冰功率,即可实现原先需要满功率运行才能达到的效果。直流线路测温结果表明,额定电流运行可以有效提高线路温升,在环境温度10~15℃的情况下,导线平均温升为4~6℃。

高肇直流融冰保线功能的实施要点主要有:保护的所有动作结果均调整为跳闸出口,且一极跳闸后另一极也要立即将电流阶跃至最小值后闭锁。易发覆冰的冬季,送端常处于枯小时段,系统较弱,融冰运行模式下最好将无功控制方式由功率模式转换为电压模式,以稳定送端电压。双极以最小电流解锁成功后,最好以相同的速率上升至融冰保线电流,以保证在电流上升的过程中接地极电流最小,并防止送端提供较大的功率。由于直流输电系统负极性运行时对周围无线电的干扰较小,并且云层多带负电荷,负极性运行的极受雷电击中的概率更小,因此建议最好选择极1功率反送,极2功率正送的融冰方式,以保证双极均为负电压运行。

5 结论

1) 通过对常用的机械除冰法、自然除冰法和热

力融冰法的分析总结, 可知在目前的技术水平下, 热力融冰法是最为成熟、经济的方法。

2) 通过对热力融冰法的研究分析, 运用覆冰临界电流理论得出针对交流线路融冰的固定式和移动式可控硅直流融冰装置的设计依据。

3) 大容量固定式直流融冰装置, 投资较大, 如果只用于融冰运行, 很不经济。建议将其作为静止式动态无功补偿装置运行, 在平时抑制暂态过电压、改善电能质量。

4) 提出了针对直流输电系统的融冰保线技术方案。利用直流输电系统可灵活控制功率方向及潮流的特点, 实现常规±500 kV 直流输电系统的融冰方式运行。双极功率异向传输的融冰方式已顺利完成了理论研究、仿真试验和现场试验, 在不增加、不改动任何一次设备的情况下, 适当修改实际直流输电系统控制保护软件, 创新运行方式, 并在高肇直流输电工程中得到成功应用。

参考文献

- [1] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 215-219.
HU Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 215-219.
- [2] 张红先, 陆佳政, 方针, 等. 2008—2009 年湖南电网覆冰统计分析 [J]. 湖南电力, 2009, 29 (5): 32-35.
ZHANG Hong-xian, LU Jia-zheng, FANG Zhen, et al. Statistical analysis of Hunan power grid ice-covering condition in 2008—2009 winter[J]. Hunan Electric Power, 2009, 29 (5): 32-35.
- [3] 蒋兴良, 马俊, 王少华, 等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力, 2005, 38(11): 27-30.
JIANG Xing-liang, MA Jun, WANG Shao-hua, et al. Transmission lines'ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 27-30.
- [4] 李培国, 高继法, 李永军, 等. 输电线路除冰技术与装置[J]. 电力设备, 2002, 3(2): 85-87.
- [5] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19.
LU Jia-zheng, JIANG Zheng-long, LEI Hong-cai, et al. Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [6] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 126.
CHANG Hao, SHI Yan, YIN Wei-yang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 126.
- [7] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 7-13.
LI Zai-hua, BAI Xiao-min, ZHOU Zi-guan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13.
- [8] 许树楷, 赵杰. 电网冰灾案例及抗冰融冰技术综述[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 1-6.
XU Shu-kai, ZHAO Jie. Review of ice storm cases impacted seriously on power systems and de-icing technology[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 1-6.
- [9] 于洋, 杨嘉祥. 基于临界电流的架空线路防冰技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] 张庆武, 田杰, 傅闯, 等. 特高压直流控制系统融冰工作方式研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2276-2282.
ZHANG Qing-wu, TIAN Jie, FU Chuang, et al. Research on de-icing operation mode of the control and protection system for UHVDC[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2276-2282.
- [11] 马玉龙, 徐玲玲, 石岩, 等. 三广直流工程融冰运行方式仿真试验[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 26-29.
MA Yu-long, XU Ling-ling, SHI Yan, et al. Simulation test of ice-melting operation mode for HVDC power transmission project from the Three Gorges hydropower station to Guangdong[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 26-29.

收稿日期: 2010-01-02; 修回日期: 2010-05-25

作者简介:

姚致清 (1960-), 男, 博士研究生, 教授级高工, 从事控制保护和电力电子研究;

刘涛 (1978-), 男, 本科, 工程师, 从事高压直流输电软件设计;

张爱玲 (1968-), 女, 本科, 高级工程师, 从事高压直流输电研究及工程管理工作。