

# 直流融冰装置拓扑结构的比较研究

陆佳政, 吴传平, 李波, 张红先, 朱思国, 谭艳军

(国网湖南省电力公司电力科学研究院, 国家电网公司输变电设备防冰减灾技术实验室, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 对直流融冰装置的三种典型拓扑结构(二极管不可控整流、晶闸管全控整流和基于IGBT的全控整流)的性能和经济实用性进行了综合比较研究。在分析三种结构的工作原理基础上,建立了三种融冰结构的整流模型,从整流调压性能、谐波及无功特性、装置功耗、经济成本特性、功能扩展等方面进行了对比研究,并结合某线路融冰需求对上述三种结构性能进行了仿真验证。对比后得出结论:不可控整流结构成本低、大容量装置易实现,可应用于中长距离线路融冰;晶闸管全控整流结构具有输出直流电压平滑调节、可扩展为SVC的特点,可应用于有无功补偿需求的线路融冰;基于IGBT的全控整流结构输出电压调节能力强、电能质量优越,但成本高、系统复杂,在短距离线路、小容量融冰应用中占有优势。比较研究结论将为直流融冰工程装置结构的选择和设计提供有益参考。

**关键词:** 直流融冰; 拓扑结构; 整流电压; 线路覆冰; 特性分析

## Comparative research on topology of DC de-icing equipment

LU Jia-zheng, WU Chuan-ping, LI Bo, ZHANG Hong-xian, ZHU Si-guo, TAN Yan-jun

(Department of Power Scientific Research of Hunan Province Power Company of State Grid, Power Transmission and Distribution Equipment Anti-Ice & Reducing-Disaster Technology Laboratory of State Grid Corporation, Changsha 410007, China)

**Abstract:** This paper focuses on integrated comparative research on performance and economic usefulness of three typical topologies for DC de-icing equipment, including uncontrolled diode rectification integrated with adjustable rectifier, thyristor-based half controlled rectifier, and insulated gate bipolar transistor (IGBT)-based full controlled rectifier. The operation principles of three topologies for DC de-icing are analyzed, and the rectifier models of the three topologies are established, then the comparative research on the performances for three topologies, including rectifier performance, characteristics of harmonic and reactive power, power loss, economic cost, and extended function, is carried out. Furthermore, the simulations for three topologies to realize DC de-icing for a transmission line are done to verify the contrastive analysis results. Some conclusions are obtained. First, uncontrolled diode rectification has advantages on simple structure, low cost, easy to realize, and simply maintenance, so this topology is appropriate to be applied to DC de-icing of large capacity and long distance transmission line. Second, thyristor-based half controlled rectifier can smoothly regulate the output DC melting-icing voltage, and it can be expanded to Static Var Compensator (SVC), so it can be applied to DC de-icing of transmission line with the demand of reactive power compensation. IGBT-based full controlled rectifier has advantages on strong regulation ability of output voltage, and it can be used as power quality regulator when no icing. But it has the weakness of high cost, complicated control, and relatively low reliability. So it is preponderant for DC-icing of low capacity and short distance transmission line. Research conclusions are very significant to provide references for selection and design of DC de-icing engineering equipments.

**Key words:** DC de-icing; topology; rectified voltage; ice covering line; characteristics analysis

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0083-06

## 0 引言

电网输电线路覆冰导致倒塔、断线,甚至使电网解列运行和陷入瘫痪,对电网安全稳定运行构成严重危害。2008年我国南方遭遇罕见特大冰灾,湖南、贵州、江西等省电网受损严重,造成大面积停

电<sup>[1-8]</sup>。近五年来,南方省份冬季多次遭遇冰灾,线路融冰技术已引起愈来愈广泛的关注和研究。

交流短路融冰技术已有多年的应用历史和经验,但交流短路融冰存在融冰电源所需无功功率大、线路阻抗难以匹配等难题<sup>[9-10]</sup>。相比交流短路融冰,直流短路融冰具有融冰电源所需功率小、直流电压

可调无须线路阻抗匹配等优点<sup>[11-12]</sup>。直流短路融冰技术的核心是直流融冰电源的研制。目前文献中涉及的直流融冰电源整流拓扑主要有二极管不可控整流<sup>[13-15]</sup>、基于晶闸管的全控整流<sup>[16-17]</sup>、基于绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的全控整流<sup>[18-19]</sup>三种, 并且这三种拓扑结构在工程中均有应用。当前文献还鲜有涉及三种融冰拓扑的综合比较。因此, 非常有必要对这三种拓扑结构的性能和特征进行分析和对比研究, 得出三种拓扑结构的特点和适用范围, 为工程人员设计装置拓扑结构提供参考。

本文对上述三种典型拓扑结构的性能和经济实用性进行综合比较。分析三种结构的结构原理, 建立其整流模型, 从整流调压性能、谐波及无功特性、装置功率损耗、经济成本特性、扩展功能等方面进行对比研究, 并结合某线路融冰需求对上述三种结构进行仿真验证, 最后得出研究结论。

### 1 拓扑结构

二极管不可控整流融冰装置拓扑结构(下文简称结构一)、晶闸管全控整流融冰装置拓扑结构(下文简称结构二)和基于 IGBT 的全控整流的融冰装置拓扑结构(下文简称结构三)分别如图 1(a)、图 1(b)、图 1(c)所示。三种融冰结构中, 整流变压器起调压和隔离作用, 整流变压器的变比可设计为多档可调方式;  $L_r$  为整流电抗器, 因变压器含有内抗, 也可省略。电容  $C$  为直流侧储能元件, 具有稳压功能。三种整流器的主要区别是整流器采用的开关器件和控制方式不同。

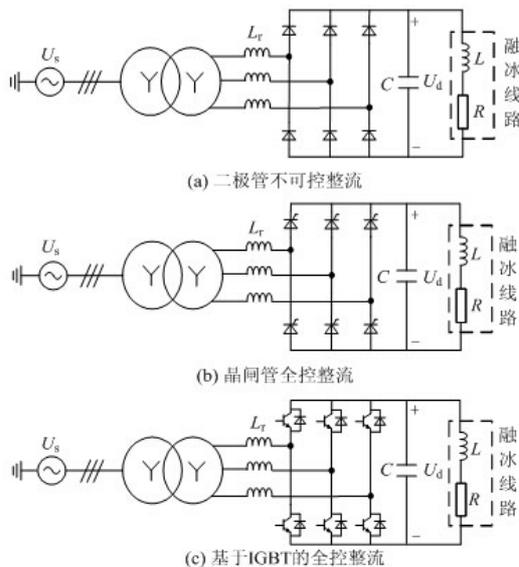


图 1 三种典型融冰装置拓扑结构图

Fig. 1 Topologies of three typical de-icing devices

### 2 整流模型

三种融冰装置拓扑结构等效到变压器二次侧的简化电路如图 2 所示, 其中  $U_{sc}$  为等效到二次侧的电源,  $Z_r$  为电网等效阻抗、变压器等效阻抗和整流电感阻抗之和的整流等效阻抗。

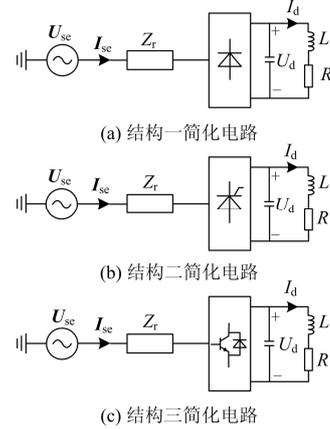


图 2 三种融冰装置的简化电路

Fig. 2 Simplified circuits of three de-icing devices

设三相源电压对称,  $a$  相电压  $U_{sa} = \sqrt{2}U\angle 0^\circ$ , 则  $U_{sea} = \frac{\sqrt{2}U}{k}\angle 0^\circ$ , 其中  $U$  为单相电压有效值,  $k$  为调压器变比。为简化分析, 不计整流等效阻抗  $Z_r$  上的压降。

结构一输出的平均直流电压为

$$U_d = 2.34 \frac{U}{k} \quad (1)$$

结构二输出的平均直流电压为(忽略换相角)

$$U_d = \begin{cases} 2.34 \frac{U}{k} \cos \alpha, & \alpha \leq \frac{\pi}{3} \\ 2.34 \frac{U}{k} (1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)), & \frac{\pi}{3} < \alpha < \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为晶闸管触发延迟角。

基于 IGBT 的全控整流器采用脉宽调制控制(Pulse Wide Modulation, PWM)可以实现直流侧升压并稳定。直流侧电压范围可平滑连续调节, 但其值应高于交流侧电压峰值。故直流侧电压的调节范围下限为

$$U_d > \frac{\sqrt{6}U}{k} \quad (3)$$

理论上, PWM 整流器空载时, 直流侧电压可升到无穷大。但 PWM 整流器带负载时, 考虑到交流侧充电能力与直流侧功率消耗的平衡, 以及交流

侧电感的耐流能力, PWM 整流器的直流侧电压上限为一定值  $U_{dmax}$ 。故结构三输出的直流侧电压范围为

$$\frac{\sqrt{6}U}{k} < U_d < U_{dmax} \quad (4)$$

### 3 三种拓扑结构的比较

#### 3.1 整流调压范围

调压范围即决定了融冰装置适用线路长短的灵活性。因待融冰线路长度不一, 在融冰电流一定时, 所需的直流融冰电压不同。调压范围大的装置适用的线路范围更广, 更适用于设计为移动式融冰装置。

设变压器变比  $k$  有 10:10、10:7.5、10:5、10:2.5 四档, 令  $2.34 \frac{U}{2} = 1 \text{ pu}$ , 则三种拓扑结构的电压调节范围如图 3 所示。

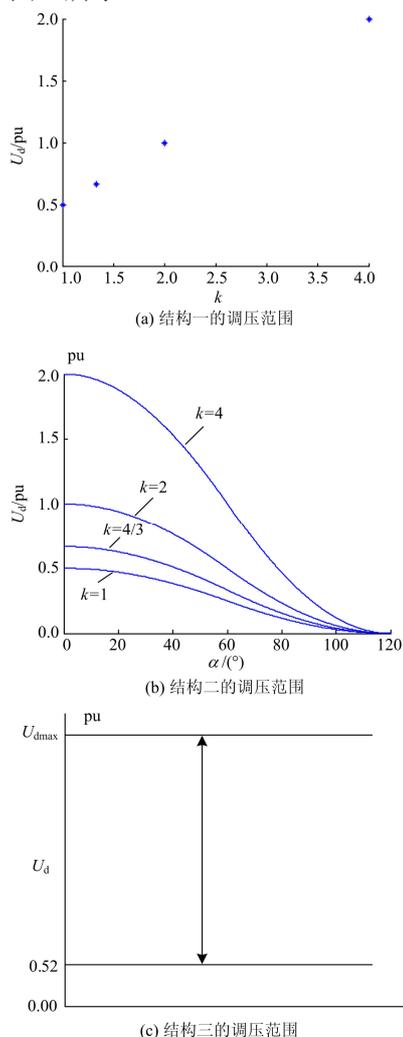


图 3 三种拓扑结构的调压范围

Fig. 3 Voltage regulation ranges of three topologies

可以看出, 结构一的直流输出电压的调节范围为几个固定值, 仅在几个离散的数值间可调; 结构二的输出直流电压与晶闸管触发延迟角有关, 随着  $\alpha$  的增大, 输出直流电压  $U_d$  减小, 输出直流电压连续可调, 范围较大; 结构三的输出直流电压的范围大, 且连续调节。

#### 3.2 谐波及无功特性

采用结构一时, 由于 6 脉波二极管整流器网侧电流畸变率较高, 谐波电流畸变率一般高达 22% 以上, 谐波成分为  $6K \pm 1$  次 ( $K$  为整数)。若采用移相变压器形成 12 脉波整流, 由于电网侧源电流基波电流增大 (两六脉波电流相加),  $3K \pm 1$  次谐波基本抵消, 谐波电流畸变率可明显降低。结构一因二极管整流器自然换相, 功率因数高。

结构二的网侧谐波电流畸变率与触发角有关, 电流畸变率随触发角的增大而增大, 电流畸变率可高达 100% 以上。晶闸管换流器的功率因数与触发角大小有关, 与交流侧电源存在较大的无功功率交换。因此, 一般另采用无源滤波器组与结构二组合使用, 以进行谐波抑制与无功补偿。

结构三采用脉宽调制 (Pulse Wide Modulation, PWM) 控制方式, 可实现网侧正弦波整流, 谐波电流畸变率很小, 仅含有整流的少量高次谐波。由于采用 PWM 控制, 可实现四象限整流, 功率因数近似为 1。

#### 3.3 装置损耗

装置损耗主要体现在两方面: 整流器损耗和变压器损耗。

整流器损耗主要是开关器件功率损耗<sup>[20]</sup>。忽略阻态功耗, 开关器件的功率损耗主要由通态损耗和开关损耗组成。

$$P_s = P_{ss} + P_{sw} \quad (5)$$

式中:  $P_s$  为开关器件总损耗;  $P_{ss}$  为通态损耗;  $P_{sw}$  为开关损耗。

在通态损耗方面, 二极管和晶闸管相当, IGBT 略高。开关损耗方面, 二极管因是自然换相, 开关损耗最小, 晶闸管的开关频率为工频, 其开关损耗与通态损耗大致相当。因此, 同类型结构的二极管整流器损耗约为晶闸管整流器损耗的一半以下。IGBT 开关频率高, 故 IGBT 开关损耗在三者中最大。

变压器损耗方面, 输出同样大小融冰电流, 除开基波有功电流引起的变压器损耗, 采用二极管融冰装置的变压器额外损耗主要体现在无功电流引起的损耗; 晶闸管的功率因数较低, 谐波较大, 引起的变压器额外损耗较大; 基于 IGBT 的直流融冰装

置因功率因数高，谐波低，变压器额外功率损耗在三者中最小。

综合整流器和变压器二者损耗之和，采用二极管的结构一损耗较小，结构二和结构三的损耗较大。因此，在工程装置中，采用结构一的装置整流器部分可采用自然风冷却方式。

### 3.4 经济成本特性

三种装置的成本差别主要体现在整流器方面。结构一因二极管价格便宜，且无须另加控制装置，因此其成本较低；结构二中晶闸管的价格较二极管高，且需要相应的控制装置，整流器价格较二极管不可控整流器高；结构三中 IGBT 的价格较昂贵，且需要复杂、实时性高的控制系统，整体价格在三者中最高。

### 3.5 功能扩展

结构一只能与交流电网进行大量有功功率的交流，而且功率是单向流动，即从电网吸收有功功率。因此，结构一除了融冰功能外，其可能的应用或是直流充电机，例如，电动汽车的充电等，但目前还没有这方面的应用。

结构二既能与交流电网进行有功功率交换，也能进行无功功率交换。因此，除线路覆冰的冬季外，通过对其装置接线调整，可运行为经典的静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC)，支撑电网电压<sup>[16-17]</sup>。

结构三在线路未覆冰时，可运行为电能质量调节器<sup>[18-19]</sup>。由于基于 IGBT 的变换器具有较好的实时控制能力，作为电能质量调节器运行时调节电能质量的动态响应速度快。

## 4 仿真实例

以某 220 kV 覆冰线路为仿真对象。该线路为双分裂，型号为 LGJ-300，长 52.06 km，单相阻抗为  $2.446+j16.62 \Omega$ ，假设覆冰厚度为 10 mm，经计算和试验得出合适的导线融冰电流为 1 800 A。融冰装置外接电源线电压为 10 kV，整流变压器采用理想变压器，Y/Y 接线形式，变比有 10:10、10:7.5、10:5、10:2.5 四档可调。融冰线路接线方式为两并一串，采用三种融冰装置拓扑结构进行直流融冰。不可控整流融冰装置和晶闸管全控整流融冰装置的整流电抗电感均为 0.5 mH，内阻均为 0.1  $\Omega$ ；基于 IGBT 的全控整流器整流电抗电感为 0.1 mH，内阻为 0.02  $\Omega$ 。

采用结构一时，根据式 (1) 及融冰电流需求，可计算出接近的变压比档位为 10:5；采用结构二时，变压器变比选择 10:7.5，晶闸管整流器采用整流电

压 PI 闭环控制方式；采用结构三时，变压器变比选择 10:2.5，IGBT 整流器采用整流电压 PI 和整流侧输入电流 PI 双闭环控制方式。三种结构的仿真结果分别如图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)和表 1 所示。图 4 中， $U_d$ 、 $I_d$ 、 $i_{sa}$ 、THD、PF 分别表示融冰直流电压、融冰直流电流，电源侧网侧电流、网侧电流的总电流畸变率和电源功率因数， $\alpha$  为晶闸管触发延迟角。

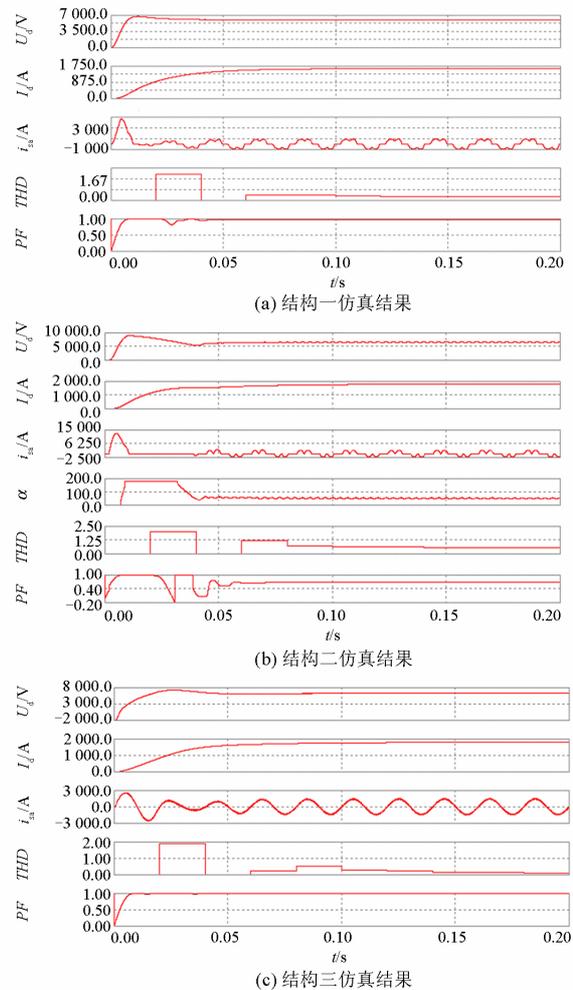


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

表 1 三种融冰装置结构仿真结果

Table 1 Simulation results of three de-icing devices

结构类别	变压器档位	融冰电流/A	谐波电流畸变率/%	功率因数
结构一	10:5	1 622	27.45	0.966
结构二	10:7.5	1 797	59.07	0.705
结构三	10:2.5	1 798	7.66	0.999

图 4(a)为结构一的仿真结果, 测得稳态时装置输出直流电压  $U_d$  平均值为 5 952 V, 直流电流  $I_d$  平均值为 1 622 A, 与式 (1) 存在偏差的原因是整流电抗压降。融冰电源侧电流有畸变, 总电流畸变率  $THD$  为 27.45%, 功率因数  $PF$  为 0.966。

图 4(b)为结构二的仿真结果, 测得稳态时直流电压  $U_d$  平均值为 6 600 V, 直流电流  $I_d$  平均值为 1 797 A, 触发角  $\alpha$  平均值为  $56.57^\circ$ 。融冰电源侧有畸变, 总电流畸变率  $THD$  为 59.07%, 功率因数  $PF$  为 0.705。

图 4(c)为结构三的仿真结果, 测得稳态时直流电压  $U_d$  平均值为 6 603.6 V, 直流电流  $I_d$  平均值为 1798 A。融冰电源侧电流总电流畸变率  $THD$  为 7.66%, 功率因数  $PF$  为 0.999。

仿真结果表明, 因二极管不可控整流融冰装置整流输出电流值为几个固定值, 其输出电压不能精确调节到预设值, 源电流有一定畸变, 但功率因数较高; 晶闸管全控整流融冰装置通过调节触发延迟角可实现输出直流侧电压的精确调节, 但触发角较大时, 电流畸变率较高, 功率因数较低; 基于 IGBT 的全控整流融冰装置输出直流电压能实现平滑精确调节, 源电流总畸变率低, 功率因数高。

## 5 结论

(1) 二极管不可控整流融冰装置虽然输出电压不能连续调节, 但成本较低, 功率因数高, 大容量的融冰装置的研制和制造相对容易, 适用于中长距离输电线路的融冰应用。

(2) 晶闸管控制整流融冰装置具备输出电压调节能力, 又能扩展为 SVC, 有利于融冰装置的重复利用, 在有无功补偿需求的线路占有优势。

(3) 从整流性能和电能质量控制上看, 基于 IGBT 的全控整流融冰装置占据优势, 且调压范围大, 功能扩展能力强, 应用前景大; 但基于 IGBT 的全控整流融冰装置成本较高, 大容量装置研制难度较大。因此在当前技术条件下, 这种结构在小容量场合, 即较短输电线路的融冰应用场合具有优势。

## 参考文献

[1] 张勇军, 许亮, 吴成文. 计及多因素的电网冰灾风险评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 12-17.  
ZHANG Yong-jun, XU Liang, WU Cheng-wen. Research on ice risk evaluation model of power system considering multi-factors[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 12-17.

[2] 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.  
CHEN Zhi. The research of DC anti-icing for Jiangxi grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 72-74.

[3] 阮启运, 顾雪平, 陆佳政, 等. 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.  
RUAN Qi-yun, GU Xue-ping, LU Jia-zheng, et al. Study of problem of DC ice-melting of the Hunan 220 kV power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 131-136.

[4] 陆佳政, 张红先, 彭继文, 等. 基于皮尔逊 III 型概率分布的湖南电网覆冰重现期计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 80-86.  
LU Jia-zheng, ZHANG Hong-xian, PENG Ji-wen, et al. Calculation of Hunan power grid icing recurrence interval based on Pearson III type probability distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 80-86.

[5] 舒立春, 罗保松, 蒋兴良, 等. 智能循环电流融冰方法及其临界融冰电流研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 26-34.  
SHU Li-chun, LUO Bao-song, JIANG Xing-liang, et al. Intelligent cycled current ice melting method and its critical ice-melting current study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 26-34.

[6] 潘力强, 张文磊, 汤吉鸿, 等. 2008 年湖南电网特大冰灾事故综述[J]. 电网技术, 2008, 32(26): 20-25.  
PAN Li-qiang, ZHANG Wen-lei, TANG Ji-hong, et al. Overview of the extraordinarily serious ice calamity to Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(26): 20-25.

[7] 侯慧, 尹项根, 陈庆前, 等. 南方部分 500 kV 主网架 2008 年冰雪灾害中受损分析与思考[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 12-15.  
HOU Hui, YIN Xiang-gen, CHEN Qing-qian, et al. Review on the wide area blackout of 500 kV main power grid in some areas of South China in 2008 snow disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 12-15.

[8] 李庆峰, 范峥, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 33-36.  
LI Qing-feng, FAN Zheng, WU Qiong, et al.

- Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36.
- [9] 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.
- [10] 焦重庆, 齐磊, 崔翔, 等. 输电线路外施中频电源融冰技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 159-164.  
JIAO Chong-qing, QI Lei, CUI Xiang, et al. Power line de-icing using medium frequency power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 159-164.
- [11] 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): 1-6.  
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):1-6.
- [12] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 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.  
YAO Zhi-qing, LIU Tao, ZHANG Ai-ling, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [13] 谭艳军, 陆佳政, 方针, 等. 基于不可控整流移动式直流融冰装置的研究[J]. 华中电力, 2011, 24(1): 31-34.  
TAN Yan-jun, LU Jia-zheng, FANG Zhen, et al. Study of mobile DC de-icing equipment based on uncontrolled rectification[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(1): 31-34.
- [14] 陆佳政, 张允. 基于12脉动整流技术的500 kV输电线路融冰装置实现[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3041-3047.  
LU Jia-zheng, ZHANG Yun. Realization of de-icing device based on 12-pulse rectification for 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3041-3047.
- [15] 冯炜, 吕宏水, 吴维宁, 等. 500 kV线路可移动直流融冰装置的研制和实现[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 19-21.  
FENG Wei, Lü Hong-shui, WU Wei-ning, et al. Development and manufacture of movable ice-melting equipment for 500 kV transmission line[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 19-21.
- [16] 谢彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 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.  
XIE Bin, HONG Wen-guo, XIONG Zhi-rong, et al. Pilot project design of concurrent fixed DC ice-melting and SVC for 500 kV Fuxing substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 182-185.
- [17] 郭捷, 江道灼, 李海翔. 可控整流器型直流融冰兼SVC装置在SVC模式下控制域解析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 93-97.  
GUO Jie, JIANG Dao-zhuo, LI Hai-xiang. Control domain analysis of controlled rectifier type SVC/DC-deicer on SVC mode[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 93-97.
- [18] 范瑞祥, 孙曼, 贺之渊, 等. 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.  
FAN Rui-xiang, SUN Min, HE Zhi-yuan, et al. Design and system test of movable DC de-icer for Jiangxi Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 67-71.
- [19] 刘栋, 贺之渊, 范瑞祥, 等. 可关断器件移动式直流融冰装置研究[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 228-233.  
LIU Dong, HE Zhi-yuan, FAN Rui-xiang, et al. Research on relocatable DC ice-melting equipment based on switchable device[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 228-233.
- [20] 杨有涛, 刘姣宏, 杨荣, 等. 低压大容量逆变器功率损耗的一种估算方法[J]. 电气传动自动化, 2009, 31(3): 54-56, 61.  
YANG You-tao, LIU Jiao-hong, YANG Rong, et al. An estimation method of power loss in low-voltage large-capacitance inverter[J]. Electric Drive Automation, 2009, 31(3): 54-56, 61.

收稿日期: 2013-09-11

作者简介:

陆佳政(1969-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高电压技术、电网防灾减灾技术研究;

吴传平(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事输变电设备防冰减灾技术、电能质量控制方面的研究。E-mail: jandom@126.com