

基于 IGBT 的移动式多用途直流电源及其融冰调试

范瑞祥¹, 贺之渊², 周细文³, 孙 旻¹

(1. 江西省电力科学研究所, 江西 南昌 330096;

2. 中国电力科学研究所, 北京 100085;

3. 变流技术国家工程研究中心, 湖南 株洲 412001)

摘要: 以 500 kV 输电线路直流融冰为目的, 提出一种基于 IGBT 的移动式多用途直流电源。整套装置由 4 台电源车构成, 容量 20 MW。单台电源变流部分由 6 个结合斩波回路的电压源型换流器 VSC 模块构成, 通过副边为 6 绕组的变压器接入 35 kV 系统。应用功率单元模块, 通过紧凑化设计将单台电源集成于半挂式平板拖车上, 实现了装置的整体移动。采用双层结构的 PWM 整流稳压结合恒流斩波的控制方式和基于系统级、装置级和单元变流器级的分层式保护设置方案实现现场应用。结合现场实施经验, 提出了完整的融冰试验方案。

关键词: IGBT; 直流融冰; 移动式; 多用途; 融冰试验

中图分类号: TM 726

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2010)03-0111-05

0 引言

2008 年初的冰冻灾害中我国部分省份的电网损失惨重。从目前国内技术发展水平看, 以增加覆冰线路电流, 通过线路发热达到保线融冰目的的方法是较为成熟可行的^[1-7]。增加线路电流融冰可通过交流和直流 2 种方式实现。然而对于 500 kV 输电线路而言, 由于大多采用大截面及多分裂导线, 所需融冰电流远高于 2000 A。相对而言 500 kV 输电线路的直流电阻只有交流阻抗的 10% 左右, 因此所需容量相对交流法将至少降低一个数量级, 从而具备更强的实用性。

国外开展直流融冰研究较早, 前苏联和加拿大都已基于晶闸管整流方式的相关装置得以应用。国内的直流融冰应用研究热潮在 2008 年冰灾后兴起^[8-13]。本文结合江西 500 kV 梦山变电站的融冰试验, 提出较为完整的 500 kV 线路直流融冰装置的设

计与调试方案, 其经验和结论有助于类似装置的进一步完善和推广应用。

1 直流融冰装置的整体设计

根据融冰计算公式^[14], 按一进两回接线方式, 以融冰线路长度不低于 50 km 为目标, 在外界温度 -5℃、风速 5 m/s、10 mm 覆冰的情况下, 所得线路融冰长度与装置容量对应表格如表 1 所示。在此要求下, 融冰装置 20 MW 的容量是比较合适的。

表 1 线路融冰长度与装置容量对应表

Tab.1 Length of transmission line deicing and corresponding equipment capacity

线路类型	单位阻抗 ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	融冰 电流/A	最大融冰 长度/km	融冰功 率/MW
4×LGJ-300	0.0234	3000	47.50	15.0
4×LGJ-400	0.0180	3500	51.44	17.5
4×LGJ-500	0.0155	4000	53.76	20.0

传统的直流融冰装置大都采用二极管或晶闸管整流桥构成, 虽技术成熟、结构简单, 但体积大、谐波含量高、低负载时产生的无功也大, 可控性较差、移

收稿日期: 2009-07-06; 修回日期: 2009-12-09

Multi-platform management system of digital fault recorders

ZHANG Haining, QI Zhong, DU Jun

(Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211111, China)

Abstract: The smart grid requires the fault recorder management system of excellent real-time performance, large capacity and powerful analysis function. By the comparison of real-time database performance, SQLite is selected as the data storage. Based on the excellent multi-platform performance of Qt and ACE (Adaptive Communication Environment), the modularization and component design is adopted. The multi-platform management system of digital fault recorders can operates in multiple modes by configuration, supports 103 network protocols and MMS (Manufacturing Message Specification)-based IEC61850 protocol, and accepts different types of wave file in COMTRADE format; transient, extracted and steady-state. The system runs well on site.

Key words: multi-platform; multi-mode; IEC61850; ACE; SQLite; fault record

动不方便。为此本装置采用基于 IGBT 构成的电压源型换流器(VSC)作为主体结构,不依赖单个功率器

件的串并联,通过模块化设计降低体积以利于实现移动化,其主电路结构如图 1 所示。

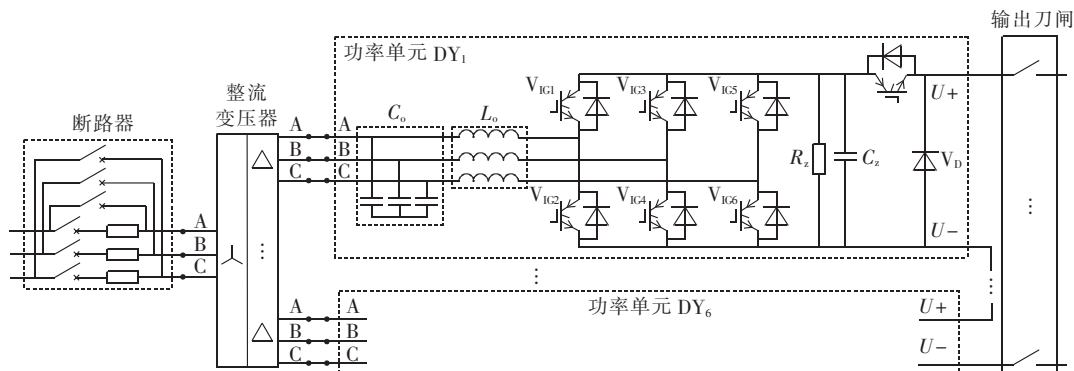


图 1 融冰电源主电路图

Fig.1 Main circuit of deicing power supply

从结构上看,融冰电源主要由进线断路器、整流变压器、由级联功率单元构成的变流器和输出刀闸组成。进线断路器由带限流电阻的断路器和普通断路器并联构成,接入 35 kV 电源,合闸时带限流电阻的断路器首先闭合,延时数秒后与其并联的普通断路器自动闭合,其后带限流电阻的断路器自动断开,以此抑制空载合闸时的励磁涌流。整流变压器用于给变流回路提供多脉波低压交流电源,隔离电网电源和变流器。变压器原边采用星形接法,35 kV 绕组,副边采用三角形接法,共有 6 个 500 V 绕组,每个绕组连接一个功率单元模块 DY。这种变压器接法可防止由调制模式引起的零序和直流分量向交流系统传递。变流器是融冰装置的核心部件,由 6 个相对独立的功率单元模块串接构成。单个功率单元模块采用 IGBT 脉冲整流+直流斩波调压电路,由滤波电容、滤波电感、6 个 IGBT 构成的三相桥式电路、直流支撑电容和电阻以及由 IGBT 和二极管构成的直流斩波调压电路组成。功率单元之间在输入部分用变压器交流隔离,输出端 U_- 与 U_+ 连接形成串联模式。为减少杂散损耗,IGBT 元件之间采用复合母排联接,散热采用水冷方式。进行融冰时,通过 IGBT 脉冲整流实现直流稳压,通过斩波电路实现连续直流调压,从而有效控制融冰电流。此种结构下由于没有 IGBT 的直接串并联,避免了均压和均流问题,同时额定工作时电压等级仅 500 V,因此器件价格也得以降低。

为提高使用的灵活性,融冰装置由 4 套采用图 1 结构的电源构成,每套单位容量 5 MW、最大输出电流 1000 A,可单独或并联使用。图 2 所示即为最大容量融冰运行时的接线图,此时 4 套装置并联使用,滤波电容无需接入。

由于功率单元采用的是 VSC 结构,既可整流又能逆变,因此装置可以很容易地改造成柔性直流输电系统,如图 3 所示。此时只需将同一电源内的所有功率单元之间采用串联模式形成一个换流站,2 组电源车采用背靠背模式,中间直流部分通过直流电缆相联,同时逆变端装置接入滤波电容,除此之外系

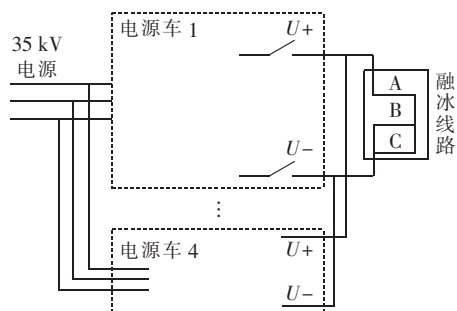


图 2 大容量融冰运行图

Fig.2 Wiring diagram of large capacity DC deicer

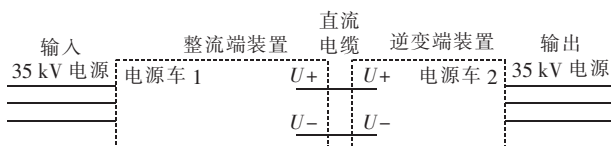


图 3 作为直流输电系统接线图

Fig.3 Wiring diagram of HVDC system

统其他主回路及控制硬件都是一样,只需改变控制软件即可。

为实现移动化应用,单套电源设计放置于一台半挂式平板拖车上,结构如图 4 所示,主要分为以下几个部分:功率单元柜、电抗器柜、控制柜、风机、进线开关柜、出线开关柜和变压器。其中为了减少杂散电感,降低干扰,方便散热和维护,将功率单元中的 IGBT、驱动部件、二极管、电容、连接母线、水冷散热器、单元控制器等元部件集中到一个模块内,形成模块化结构,6 个功率单元模块形成一个功率单元柜;滤波电感和滤波电容放在一起形成电抗器柜;冷却

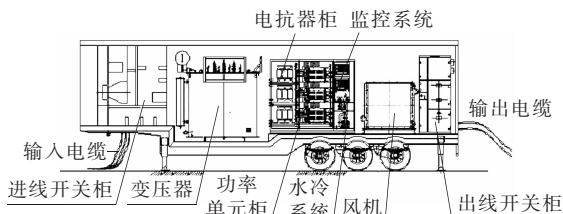


图 4 移动电源车布置图

Fig.4 Layout of power van

水系统和控制柜组装在一个柜体内形成控制柜;变压器直接置于集装箱体内。单台移动式电源包括箱体一起,总尺寸为 $14\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 3\text{ m}$,包括车体一起,装置总高度不超过 4.5 m 。

2 用于融冰时的控制与保护

为实施有效控制,融冰装置由上层系统控制器和各功率单元内部的单元控制器组成。采用三相四象限变流器稳压、恒流斩波的基本控制方式,利用多个变流器载波错相控制来降低交流侧输入电流谐波。其中下层功率单元控制器完成各变流单元单位功率因数稳压控制,上层控制器完成恒流斩波控制。

恒流斩波流程如图 5 所示。将融冰直流电流实际值 i_{dk} 与融冰电流指令值 i_{dk}^* 相比较,误差经 PI 控制器输出斩波占空比,将之对应的直流电压与三角载波比较后得到斩波脉冲,经光电转换后送入斩波 IGBT 元件。由于 IGBT 本身带有续流二极管,VSC 中即使桥臂上的 6 个 IGBT 均不导通,其续流二极管也可构成三相不可控整流桥完成稳压,对应斩波电路即可实现输出电流的调整,这是最为简单的一种控制方式,但将造成比较严重的谐波干扰,功率因数也难达到理想状态。

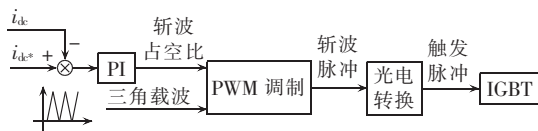


图 5 恒流斩波流程框图

Fig.5 Schematic diagram of constant current chopper

采用直流电流控制方式实现 PWM 整流,不仅可有效稳定变流器电压,还能消除谐波干扰,确保高功率因数运行,流程如图 6 所示。

控制采用三相 VSC 常用的电压外环和电流内环的双环控制。外环主要是控制直流侧电压,即通过比较直流电压给定值 U_{dk}^* 和实际值 U_{dk} ,误差经 PI 调节器得到交流输入电流中的有功分量参考值 i_{d^*} 。电流内环用于按照电压外环输出的电流参考值进行变

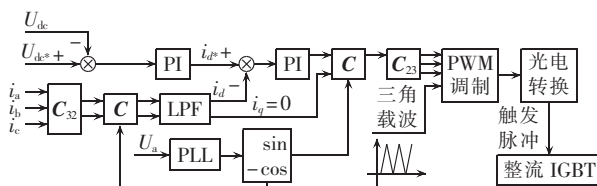


图 6 PWM 整流控制流程图

Fig.6 Flowchart of PWM rectifier control

流器输入电流控制,即应用瞬时无功功率理论^[15],将采样的实际输入电流进行 C_{32} 和 C 变换,通过低通滤波器 LPF 之后得到实际输入电流中的有功分量 i_d ,将之与 i_{d^*} 相比较,误差经 PI 调节器,在令无功分量为零的情况下进行 C 和 C_{23} 变换,得到 ABC 三相的调制信号,进行三角载波 PWM 调制,所得脉冲经光电转换触发桥臂上的 IGBT。

实际应用中每套装置由 2 个上层控制器(DCU)构成,每个 DCU 控制 3 个单元控制器,同时还设置有 1 个中央控制器(工控机),完成工作模式及控制方式的确定及关键状态参数的监控、计算等,当多套装置并联运行时任意一套装置中的工控机均可作为主控机。通信方式上工控机与 DCU 之间通过 RS-485 实现点对点半双工通信,DCU 与功率单元之间通过光纤实现点对点通信。

对于装置的保护,根据不同的保护对象,采用分层式结构,将系统的保护分为系统级、装置级和单元变流器级 3 个层级进行设计,如图 7 所示。

系统级保护主要侧重于对系统进出线两端的运行状态实施有效的监控保护,包括主断路器异常保护、斩波过流保护、直流过压保护、直流母线接地保护,另外还通过安装防雷击装置,实施防雷击保护,以避免出现雷电过电压时导致设备损坏。

装置级保护的对象主要是系统内部的变压器、冷却系统以及各变流器单元,包括变压器差动、过压、过流、不平衡保护,冷却系统异常保护,单元变流器异常和不平衡保护。其中单元变流器异常保护是综合各单元变流器发送而来的故障信号,发出报警信号或跳主断路器命令;单元变流器不平衡保护是判

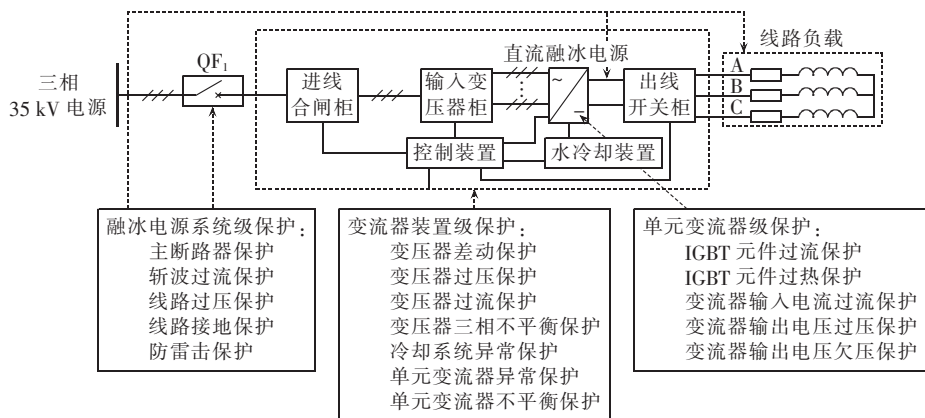


图 7 直流融冰电源保护方案

Fig.7 Protection scheme of DC deicer

断各个单元变流器的电压、电流、功率是否平衡,当出现严重不平衡时,发出跳主断路器信号。

单元变流器级保护的侧重点是对其内部电力电子器件的各种故障实施保护,包括 IGBT 元件过流、过热保护,变流器输入电流保护,输出过压和欠压保护。其保护实施的一般原则为,发现故障时首先封锁 IGBT 触发脉冲,而后发送故障信号给装置级保护系统,发出跳主断路器信号。

3 直流融冰装置调试与试验

最大容量运行时,整套融冰装置由 4 套基于 IGBT 的四象限整流桥的电源并联构成,其中四象限整流器为融冰模式运行的主要变流设备,通过改变其 IGBT 脉冲序列可调节输出直流电流。融冰调试的主要目的方面是验证装置作为恒流源运行时的可靠性、稳定性和负载能力,另一方面也是对线路直流融冰过程中的组织实施及其配合手段的一种模拟,尤其是在线路关键点的选择性监测方面。

依照实施顺序,直流融冰装置试验调试可分为以下几个项目:一般检查与低压带电试验、空载投切与调压试验、模拟负载试验、带线路融冰试验。

一般检查与低压试验首先需要检查运输过程对设备有无损伤及明显的外部问题。然后进行绝缘电阻测试,绝缘测试之前原边高压输入部分、次边输出部分、低压控制部分应分别在内部短接。绝缘测试采用 2500 V 兆欧表,分为 2 个测试部分,输入开关柜及整流变压器进线高压部分对车体绝缘电阻应大于 500 M Ω ;变压器次边高压输出线、电抗器、变流器及输出开关柜等的主回路部分对车体绝缘电阻也应大于 500 M Ω 。

在绝缘电阻检测合格的基础上,接入控制保护电源,进行低压带电试验。首先在空载条件下,从电抗处断开一个功率单元模块的变压器输入部分,在此处外接工频三相 AC 380 V 电源作为系统主电路输入电源(此时模块 DC 母线电压约 530 V),依次进行每个功率单元模块的低压触发试验,测试 IGBT 的触发脉冲及其通断状态,同时验证单个模块的调控逻辑及其器件级保护。

触发试验正常,则可进行采样精度以及保护定值的校验,即应用继保测试仪外加标准量或是模拟给定相应的故障信号,根据主控制器的反应状态,来确认各保护动作是否准确无误。

接入 35 kV 系统前的最后一项试验是对装置的冷却系统进行测试,包括运行水泵、风机,确认其启停逻辑、间隔时间满足设计要求;水冷系统运转过程中,检查水管各部分是否出现渗漏;确认水电导率,压力满足设定要求,控制器能正确采集其参数,并进行相应逻辑操作。

低压试验完成之后即进行空载投切与调压,主要目的是验证融冰电源在额定电压、无电流情况下的耐压能力及装置在空载模式下的控制系统功能特

性。一般而言空载投切 3 次,每次间隔 5~10 min,第 3 次投入之后进行空载零起调压试验。试验过程中应记录母线电压,检查融冰装置控制系统同步电压大小和相位,测试验证交流输入电压和直流输出电压,巡视晶闸管阀体、冷却系统、避雷器、电抗器等设备有无异常。

为在线路试验之前进一步确认装置的运行状态,应用阻感性负载模拟融冰线路进行模拟负载试验,此时直流输出电流应保持在 200 A 以上,持续时间不应低于 30 min,一方面确保装置输出电流的稳定性,同时对装置正常退出和紧急退出流程功能进行测试验证。考虑到本系统由 4 台相对独立的融冰电源车并联构成,因此此项试验还需分为单车、两车并联及四车并联这 3 种典型运行方式分别进行。多车并联运行时需特别注重各车直流输出电流的均衡性。同时由于融冰装置采用移动式结构,空间比较紧凑,对冷却系统的要求相对更高,因此在此项试验中要格外注意功率器件温升是否正常。本系统采用水冷方式,根据现场经验通常 10 min 左右即可达到热平衡。

调试试验的最后一步即是带线路升流试验,本装置选用 500 kV 梦山变梦永 II 线进行四车并联试验。

为稳妥起见,带线路融冰试验可分为 2 个阶段,第 1 阶段升流至额定值的约 50%,运行一段时间后再将输出电流降至零后退出,用以检验系统的开/闭环调节功能同时确保试验线路无异常情况。若一切正常,再进行额定值的升流试验,以 100 A 为一个阶梯逐级进行。升流试验时,主要应对各类压接管、金具进行红外测温,同时确保设备接头无发红、导线无松股,瓷瓶套管等设备外观无破损和放电闪络现象。另外对特殊点(10 m 以下)进行交叉跨越、弛度测量,检查弛度变化和导线与线下交叉跨越物是否满足安全距离要求。试验规定当线路温度超过 80 $^{\circ}\text{C}$,电缆或导引线接点温度超过 150 $^{\circ}\text{C}$ 时立即停止试验。作为典型的电力电子装置,融冰装置运行过程中不可避免地将产生谐波和无功,因此试验全程还必须实施有效的动态电能质量监控。

4 结论

a. 利用电力电子装置进行直流融冰,可方便实现零起升压和升流,所需容量小,特别适合于采用大截面及多分裂导线的高压输电线路。

b. 基于 IGBT 的电压源型换流器(VSC)主电路结构避免了功率器件的直接串并联,可靠性更高,同样的主拓扑还可应用于柔性直流输电,有利于实现多用途。通过模块化设计在平板车上实现了车载移动,可有效提高装置应用的灵活性。

c. 应用 PWM 整流稳压结合恒流斩波的控制策略使得输入谐波小,功率因数高,输出电流稳定;系统级、装置级和单元变流器级的分层式保护设计分工明确,可靠性更高。

d. 结合现场实施经验,本文提出较为完整的直

流融冰装置调试试验方案,可供类似装置的应用进行参考,其中升流试验中应特别注意线路特殊交叉跨越点的观测及重点接头处的测温,为确保线路安全,以线路温度 80 ℃、电缆或导引线接点温度 150 ℃ 为极限。

参考文献:

- [1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社,2002:3-9.
- [2] 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 Weiyang,et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology,2008,32(5):1-6.
- [3] 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 Zaihua,BAI Xiaomin,ZHOU Ziguan,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.
- [4] 张旭航,祝瑞金,周孔均,等. 移动融冰装置在 RTDS 上的仿真试验研究[J]. 华东电力,2008,36(10):48-51.
ZHANG Xuhang,ZHU Ruijin,ZHOU Kongjun,et al. Simulation of mobile ice-melting systems on RTDS[J]. East China Electric Power,2008,36(10):48-51.
- [5] 文闯成. 高压长线路短路法融冰可行性探讨[J]. 电网技术,2009,33(2):46-50.
WEN Kaicheng. Study on feasibility of ice-melting for long HV transmission lines by short-circuit method[J]. Power System Technology,2009,33(2):46-50.
- [6] 刘刚,赵学增,陈永辉,等. 电容补偿电感调负融冰方法[J]. 电网技术,2008,32(26):99-102.
LIU Gang,ZHAO Xuezheng,CHEN Yonghui,et al. An ice-melting method of adjusting electric load based on controllable inductor and capacitor compensation[J]. Power System Technology,2008,32(26):99-102.
- [7] 倪喜军,赵剑锋,杨铭,等. 基于高频谐振集肤电流法的线路除冰研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):6-8.
NI Xijun,ZHAO Jianfeng,YANG Ming,et al. Transmission line de-icing based on high-frequency resonance skin current[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):6-8.
- [8] 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):22-25.
MA Yulong,XU Lingling,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):22-25.
- [9] 李澍森,左文霞,石延辉,等. 直流融冰技术探讨[J]. 电力设备,2008,9(6):20-24.
LI Shusen,ZUO Wenxia,SHI Yanhui,et al. Discussion on the deicing technology using DC current[J]. Power System Technology,2008,9(6):20-24.
- [10] 饶宏,傅闯,朱功辉,等. 南方电网直流融冰技术的研究与应用[J]. 南方电网技术,2008,2(6):7-12.
RAO Hong,FU Chuang,ZHU Gonghui,et al. Research & application of DC-based deicing technology in CSG[J]. Southern Power System Technology,2008,2(6):7-12.
- [11] 许树楷,黎小林,饶宏,等. 南方电网 500 kW 直流融冰装置样机的研制和试验[J]. 南方电网技术,2008,2(4):32-36.
XU Shukai,LI Xiaolin,RAO Hong,et al. Development and test of 500 kW DC de-icer in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology,2008,2(4):32-36.
- [12] 张庆武,吕鹏飞,王德林. 特高压直流输电线路融冰方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):38-42.
ZHANG Qingwu,LÜ Pengfei,WANG Delin. De-icing scheme for UHVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(7):38-42.
- [13] 傅闯,饶宏,黎小林,等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):43-46.
FU Chuang,RAO Hong,LI Xiaolin,et al. Development and application of DC deicer[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(11):43-46.
- [14] 许树楷,杨煜,傅闯. 南方电网直流融冰方案仿真研究[J]. 南方电网技术,2008,2(2):31-36.
XU Shukai,YANG Yu,FU Chuang. Simulation study of DC de-icing scheme for China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology,2008,2(2):31-36.
- [15] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京:中国电力出版社,2006:52-58.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

范瑞祥(1977-),男,湖南湘潭人,工程师,博士,主要从事电力电子技术在电力系统中的应用研究工作(E-mail:ricefan117@126.com);

贺之渊(1977-),男,河南南阳人,高级工程师,博士,主要从事直流输电的研究与应用工作;

周细文(1973-),男,湖南邵阳人,高级工程师,硕士,主要从事电力电子技术的研究与应用工作;

孙 旻(1970-),男,江西南昌人,高级工程师,主要从事电力电子技术的研究与应用工作。

Displaceable multi-purpose DC source and deicing test

FAN Ruixiang¹, HE Zhiyuan², ZHOU Xiwen³, SUN Min¹

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

3. National Engineering Research Center of Converters, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: For 500 kV transmission line DC deicing, a displaceable multi-purpose DC deicer based on IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) is presented. The 20 MW DC deicer is composed of four power vans. Each van has six VSC (Voltage Sourced Converter) with chop circuit, which are connected to 35 kV system through the six secondary windings of transformer. Compact design is applied for fitting the power supply unit in the van. Double-deck structure is adopted for implementing the control mode of PWM (Pulse Width Modulation) rectifying voltage regulator combined with constant current chopper. The layered protection scheme is planned for site application: system layer, equipment layer and converter layer. The deicing test program is proposed based on site implementation experiences.

Key words: IGBT; DC deicing; displaceable; multi-purpose; deicing test