

兼具柔性直流输电功能的移动式直流融冰装置的研制

罗文广¹, 张志学¹, 敬华兵², 黄志国²

(1. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 介绍了兼具背靠背柔性直流输电(VSC-HVDC)功能的移动式直流融冰装置的设计和试验情况, 讨论了该装置的主电路结构, 设计了多重化VSC的载波移相控制、PWM整流控制和恒流斩波控制, 分析了串联型背靠背VSC-HVDC的控制方法, 并介绍了装置的保护策略和试验方案。试验结果表明, 所设计的控制方法是正确、有效的, 装置完全能满足电网融冰抗灾的要求, 并可进行中小功率的柔性直流输电。

关键词: 直流融冰; VSC-HVDC; PWM整流; 恒流斩波

中图分类号: TM721.1; TM755

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)06-0036-05

Development of Movable DC Deicing Device with VSC-HVDC Function

LUO Wen-guang¹, ZHANG Zhi-xue¹, JING Hua-bing², HUANG Zhi-guo²

(1. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The design and test of movable DC deicing device with back-to-back VSC-HVDC function are introduced. Main circuit structure of the device is discussed. Carrier phase-shifting control, PWM rectifier control and chopping control for constant current of multiple voltage source converters are designed. Control method of series back-to-back VSC-HVDC is analyzed. The protection strategy and the test scheme of the device are introduced. Test results testify the feasibility and validity of the control method. The device is satisfied with the deicing request of power grid, and is capable of carrying out VSC-HVDC with medium and small power.

Key words: DC deicing; VSC-HVDC; PWM rectifier; chopping for constant current

0 引言

输电线路在冬季覆冰是电力系统的自然灾害之一, 特别是2008年初罕见的长时间冰冻灾害给全国电网造成了有史以来最严重的破坏, 许多地区出现杆塔倒塌、线路中断、变电站停运等情况, 令中国南方多省损失巨大。目前, 对于覆冰架空导线的融冰, 直流融冰是最直接、有效、可靠的方式之一^[1]。其基本原理是, 以覆冰线路作为负载, 施加直流电压, 提供短路电流加热导线, 从而使

覆冰融化。国外开展直流融冰研究较早, 在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^[2]。

随着采用IGBT、IGCT等可关断器件构成的电压源换流器(VSC)的广泛应用, 近年来以ABB为代表的国外公司发展了基于VSC的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术并实现了工程化应用, 而我国对柔性直流输电技术的研究和应用起步较晚^[3-4]。另一方面, 由于VSC可采用模块化设计, 相比于使用晶闸管等器件构成的装置来说, 不仅体积大大缩小, 可以方便装置的移动, 而且功率因数较高, 谐波含量较低, 因此用VSC来构成移动式直流融冰装置也是一个很好的方案。

本文介绍了株洲变流技术国家工程研究中心有限

收稿日期: 2010-09-02

作者简介: 罗文广(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力电子变换器控制系统的开发;

张志学(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力电子变换器、无功补偿、电力电子故障诊断等。

公司和中国电力科学研究院联合研制的世界首套基于 IGBT 的移动式直流融冰装置。该装置额定容量为 20 MW,既可满足电网融冰抗灾的要求,又可作为背靠背 VSC-HVDC 系统(不用融冰时)适用于小容量的风力发电并网等特殊场合的柔性直流输电,提高了性价比和利用率。

1 直流融冰装置整体设计

文献[5]给出了装置容量与各电压等级融冰线路长度之间的关系。对于 500 kV 输电线路,在融冰线路长度不低于 50 km 的要求下,直流融冰装置最大输出直流电

流需达到 4 000 A,容量设计为 20 MW 比较合适。

1.1 系统总体结构

为提高使用的灵活性,整个融冰装置采用单元化设计,由 4 套相同的单位容量为 5 MW 的装置组成,可单独或级联使用。每套装置采用集装箱式结构,装载于一辆半挂式平板拖车上,实现可移动化,以适应线路覆冰的不确定性。单台直流融冰电源车的结构框图如图 1 所示,输入电压为 35 kV,由进线合闸柜、输入变压器柜、直流融冰电源柜、出线开关柜、水冷却装置和上层控制器等部分组成。

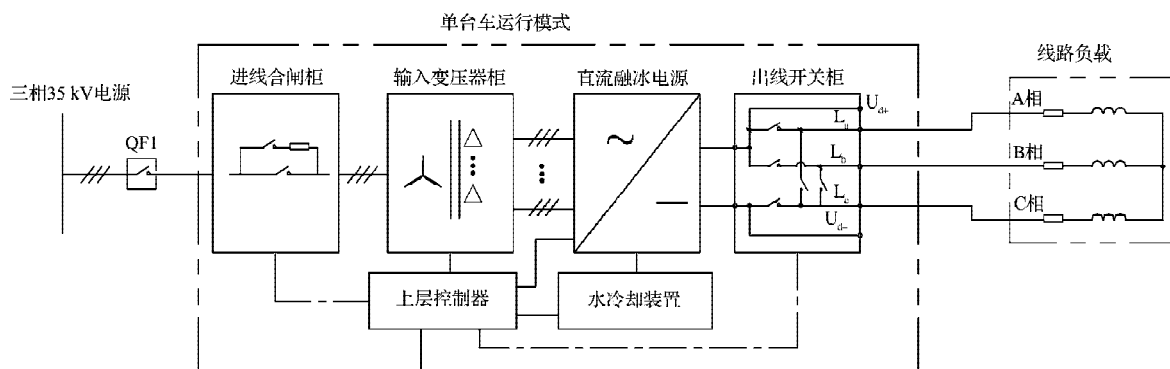


图 1 单台直流融冰装置系统结构框图

Fig. 1 System structure of a set of DC deicing device

1.2 主电路结构

直流融冰装置采用 VSC 模块构成系统主电路的基本单元,不仅能满足融冰应用时对较高功率因数的要求,而且可以很容易地改造成柔性直流输电系统。单个电压源变流器模块主电路拓扑如图 2 所示,每个 VSC 模块实际上就是一台带有斩波支路的三相四象限变流器。在融冰应用时斩波管 S_{di} 实现连续直流调压,从而有效控制融冰电流,各 VSC 模块通过斩波输出端 U_{chop} 串联,当斩波管未开通时二极管 D_1 起续流作用;在输电应用时斩波管 S_{di} 可用于过压保护,各 VSC 模块通过 U_{d+} 直接串联。

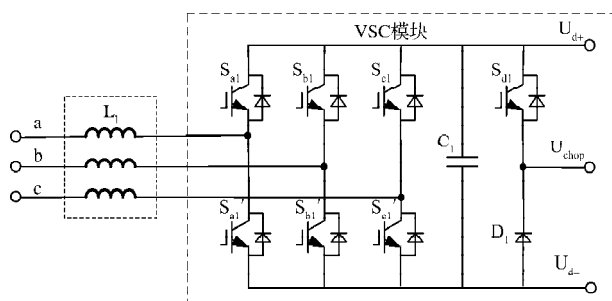


图 2 VSC 模块主电路拓扑

Fig. 2 Main circuit topology of VSC module

单台直流融冰车包括 6 个直流侧相互串联的 VSC 模块(图 3),变压器一次侧输入交流 35 kV,二次侧为 6 个

独立的 520 V 绕组,每个绕组通过一个电抗器连接到一个 VSC,由 VSC 实现四象限整流稳压至 900 V,因此单台车总的输出直流电压为 5 400 V,输出直流电流可达到 1 000 A。根据融冰应用的不同需要,可以实现 2 车、3 车、4 车等多台直流融冰电源车的并联运行,输出电流最大可达到 4 000 A。图 3 给出了 2 车并联融冰时的系统主电路连接图,图中的负载 R 、 L 为一定长度覆冰线路的等效阻抗, L_1 、 L_2 在融冰应用时不存在。多车并联融冰时,各车均作为直流电源,以覆冰线路为负载。为防止各车之间的能量传输,实现对负载的均流,可在各车的输出端加电感,从而使融冰电流更平稳。

图 3 同时也示出了 2 台融冰车作为柔性直流输电应用时的背靠背连接方式,此时图中融冰应用时的负载 R 、 L 不存在, L_1 、 L_2 为长距离直流输电线路的等效阻抗。2 车背靠背直流输电时,一车作为整流换流站,另一车作为逆变换流站,中间直流部分通过传输线缆直接相连,除此之外系统其他主回路及控制硬件都与融冰应用时一样,只需改变控制软件即可。2 车背靠背输电的传输功率只有 5 MW,为提高输电功率,可先将 2 台车串联,然后与另 2 台同样串联起来的车按背靠背的方式并联,实现 10 MW 的传输功率,此时直流侧总电压达到 10 kV 以上。

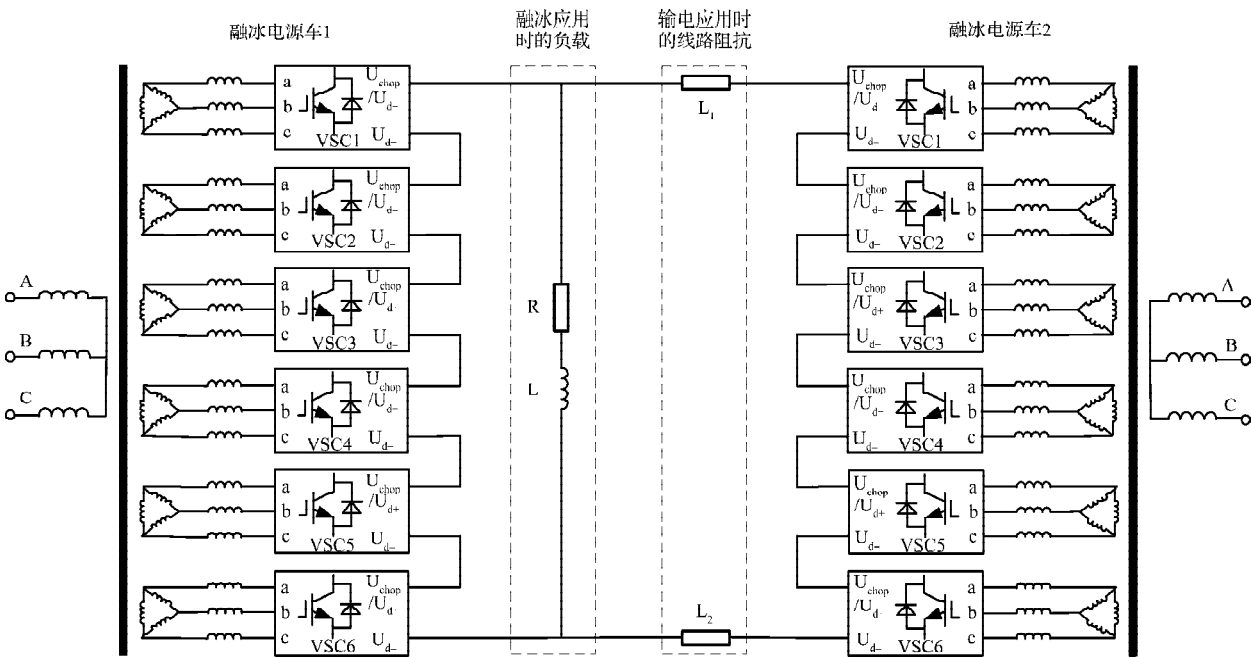


图3 2台直流融冰车并联的主电路图

Fig.3 Parallel main circuit of two sets of DC deicing device

另外,由于总直流电压很高,不同VSC有不同的对地电位,所以对整个系统的绝缘提出很高要求。在设计中对VSC的供电方式进行了处理,VSC所有输入输出信号也都采用光纤传输,实现光电隔离,同时也提高了抗干扰性。

2 控制与保护系统设计

为实施有效控制,每台直流融冰装置的控制系統由上层控制器工控机和底层控制器组成。上层控制器提供操作界面,主要实现命令和参数的设置,状态和数据的显示,以及通过RS485或Modbus协议实现各台融冰车之间的相互通信。底层控制器包括控制机箱、光电转换电路模块、IGBT驱动与保护单元,主要实现各VSC模块的控制、系统的保护以及与工控机的通信。

2.1 作融冰应用时的控制

用于融冰时,各VSC模块采用单位功率因数PWM整流稳压、恒流斩波的基本控制方式。由于每台融冰装置采用6重化结构,因此6个VSC的四象限整流和恒流斩波控制均可应用载波移相的方式,以达到在不提高单个VSC开关频率的前提下,使融冰装置的等效开关频率提高到6倍,这样不但能有效减小变压器一次侧输入电流谐波,而且使输出融冰电流更平稳。

恒流斩波控制框图如图4所示,将融冰电流(即斩波输出电流)实际值 i_{dc} 与指令值 i_{dc}^* 相比较,误差经PI调节器输出作为斩波控制量,将之与相应移相角度的三角载波比较,以得到斩波脉冲,再经光电转换后送入对

应的VSC模块。由于一台融冰装置的6个VSC采用串联结构,每个VSC实际斩波输出电流相等,因此6个VSC的斩波恒流控制只需使用一个PI调节器即可。图4所示为实际用于融冰时的闭环控制方式,但在调试过程中未接负载时也可使用简单的开环控制方式,即固定斩波占空比,以达到输出较高电压的目的。

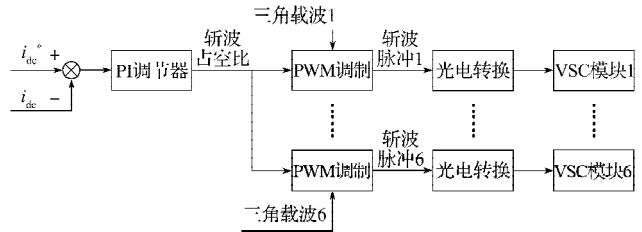


图4 恒流斩波控制框图

Fig. 4 Diagram of chopping control for constant current

融冰应用时,三相四象限均采用定直流电压控制方式,使各VSC模块稳压至900V,单个VSC的控制框图如图5所示。图中 U_{dc} 和 U_{dc}^* 分别为直流电压实际值和给定值; U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为VSC输入三相电压和三相电流, P^* 、 Q^* 分别为有功功率和无功功率给定值。作融冰应用时,VSC处于单位功率因数运行状态且不给定有功功率,故 P^* 、 Q^* 均为零。控制采用三相VSC常用的双闭环控制方式。电压外环控制直流电压,即通过比较 U_{dc}^* 和 U_{dc} ,将其误差经PI调节器得到输入电流有功分量参考值 i_d^* 。电流内环将实际输入电流经变换后得到的实际有功分量 i_d 与 i_d^* 相比较、无功分量 i_q 与 i_q^* 相比较,其误差分别经PI调节器输出,通过前馈解耦控制得到调制电压指令 V_d 和 V_q ,再经过反变换后得到三相调制电压

信号 V_{sa} 、 V_{sb} 和 V_{sc} 。最后利用 SPWM 调制方式 ,就得到了控制 VSC 三相桥臂 IGBT 通断的 PWM 信号^[6]。

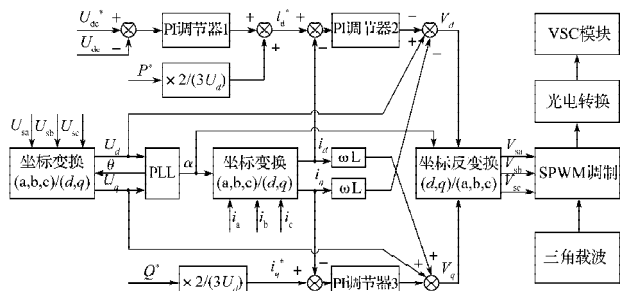


图5 三相四象限定直流电压控制框图

Fig. 5 Diagram of three-phase four-quadrant control for immobile DC voltage

另外 ,也可采用 IGBT 反并联二极管构成的三相不可控整流桥完成整流 ,仅利用斩波电路实现融冰电流的无级调节 ,这是最简单的一种融冰方式 ,但输出直流电压较低 ,会造成比较严重的谐波 ,功率因数也难以达到理想状态。

2.2 作 VSC-HVDC 应用时的控制

VSC-HVDC 可实现有功和无功的独立控制 ,能够对无源负载供电 ;潮流反转时 ,直流电流反向而直流电压极性不变 ,便于构成多端直流输电系统^[7]。表 1 列出了 VSC-HVDC 系统在不同应用情况下的基本控制方式。

表1 VSC-HVDC系统各种基本控制方式
Tab. 1 Basic control modes of VSC-HVDC system

控制方式	控制目标	适用换流站
直流电压控制	直流母线电压	发送端
直流电流控制	支路直流电流	接收端
有功功率控制	换流器有功功率	接收端
无功功率控制	交流侧无功功率	发送端、接收端
交流电压控制	交流侧电压	发送端、接收端

根据融冰车的主电路结构 ,这里只讨论 VSC-HVDC 连接有源系统的情况 ,以图 3 所示的 2 台融冰车背靠背连接方式为例。假定融冰车 1 作为整流换流站 ,融冰车 2 作为逆变换流站 ,可以认为 2 个换流站是并联的 ,因为它们具有相同的直流电压 ;也可以认为它们是串联的 ,因为它们通过相同的直流电流。融冰车 1 必须控制直流母线电压的稳定 ,因此 6 个 VSC 模块均采用定直流电压控制方式 ,其控制框图与图 5 相同 ,与作融冰应用时不同的是 ,功率给定值 P^* 、 Q^* 是上层控制器发送下来的指令 ,各 VSC 不一定运行在单位功率因数状态。

融冰车 2 作为接收端换流站 ,由于 6 个 VSC 通过电容直接串联 ,因此也都需要有稳定各自直流电压的负反馈调节方式 ,否则当一个 VSC 的输出功率变化时 ,其直流电压无法稳定 ,其他 VSC 的电压也将改变 ,从而导致

系统无法正常运行^[8]。在本设计中融冰车 2 的 6 个 VSC 也都采用定直流电压控制方式 ,由于线路阻抗 L_1 、 L_2 的压降 ,各 VSC 的直流电压参考值与融冰车 1 不同。设逆变换流站直流侧总电压实际值为 U_{dc_total} ,则电压参考值取 U_{dc_total} 的 1/6 ,直流电压外环控制公式为 :

$$\begin{cases} U_{dc}^* = U_{dc_total} / 6 \\ i_d^* = -\frac{2P^*}{3U_d} + (K_p + K_i/s)(U_{dc}^* - U_{dc}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 : K_p 、 K_i ——分别为直流电压 PI 调节器比例和积分系数 ; i_d^* ——内环电流有功分量参考值 ; P^* ——有功功率给定值(由于 VSC 为逆变状态 ,故取负值) ; s ——积分算子。

2.3 系统的保护

对于整个直流融冰装置的保护 ,根据不同层级的保护对象 ,将系统的保护分为 VSC 模块级、单台直流融冰装置级和系统级 3 个层级进行设计。系统主要保护项目如表 2 所示 ,其中装置级主要是对变压器、断路器、冷却系统以及各 VSC 单元的功率、电压、电流出现严重不平衡进行保护 ,系统级主要是对装置并联时直流侧的运行状态实施监控和保护。

表2 直流融冰装置的系统保护项目
Tab. 2 Protection items of DC deicing device

模块级保护	装置级保护	系统级保护
IGBT 元件故障保护	变压器一次侧过压保护	直流侧过压保护
VSC 过热保护	变压器一次侧欠压保护	直流侧过流保护
VSC 交流过流保护	变压器一次侧过流保护	直流母线接地保护
VSC 直流过压保护	变压器三相不平衡保护	斩波过流保护
VSC 直流欠压保护	冷却系统异常保护	通信故障保护
VSC 斩波过流保护	断路器异常保护	
	VSC 模块不平衡保护	

保护动作实施的一般原则为 :发现故障时 ,首先判断故障的轻重程度 ,轻故障报警或封锁 VSC 模块脉冲 ,重故障立即封锁 VSC 模块的脉冲并发出跳主断路器信号。作 VSC-HVDC 应用时 ,对保护动作要求更高 ,需要立即封锁所有 VSC 的脉冲 ,并同时跳开整流换流站和逆变换流站的主断路器 ,将背靠背系统脱离电网。

3 系统试验及其结果分析

3.1 试验内容

整个系统由 4 台移动式直流融冰电源车组成 ,可灵活地通过不同方式的主电路接线实现各种功能的调试与试验。除常规的低压逻辑与信号测试、各层级保护功能的检查、绝缘电阻与耐压测试之外 ,系统进行直流融冰或柔性直流输电试验时 ,应遵循由模块到单台车再到整个系统、控制由简单到复杂的试验步骤(表 3)。

表3 系统试验内容
Tab. 3 Experiment content of the system

试验功能	序号	试验项目
直流融冰试验	1	单个VSC模块四象限整流运行试验
	2	单车二极管整流开环斩波空载试验
	3	单车四象限整流开环斩波空载试验
	4	单车四象限整流恒流斩波带模拟负载试验
	5	2车/3车/4车并联恒流斩波带模拟负载试验
	6	4车并联恒流斩波带线路负载融冰试验
柔性直流输电试验	1	单车内部“一拖一”背靠背试验
	2	单车内部“三拖三”背靠背试验
	3	2车背靠背输电试验
	4	4车背靠背输电试验

3.2 直流融冰试验

图6是带模拟负载时,采用四象限整流、恒流移相斩波的输出电压波形。试验时模拟负载阻值为3.65 Ω,斩波IGBT开关频率为300 Hz,单个VSC稳压至900 V,闭环电流给定值为300 A。从示波图中的测量值可以看出,电压平均值为1 100 V左右,电压PWM波已叠加了一个“台阶”,其周期为555 μs,与1.8 kHz的等效开关频率吻合,说明各VSC斩波电压的移相比较准确。

图7是在江西梦山变电站,4台融冰车并联进行带线路负载直流融冰试验的现场情景。试验线路长度56 km,

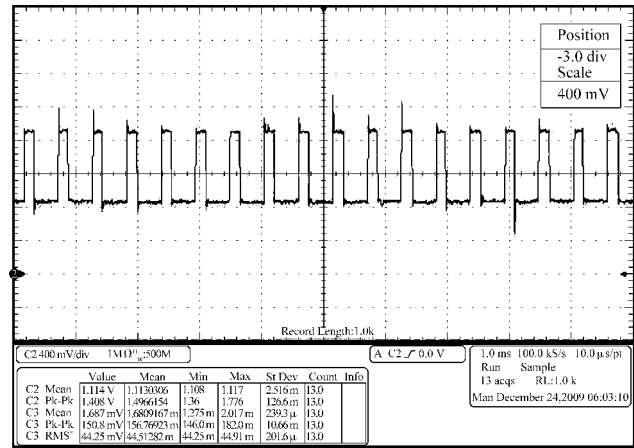


图6 斩波移相输出电压
Fig.6 Output voltage of chopping phase-shifting

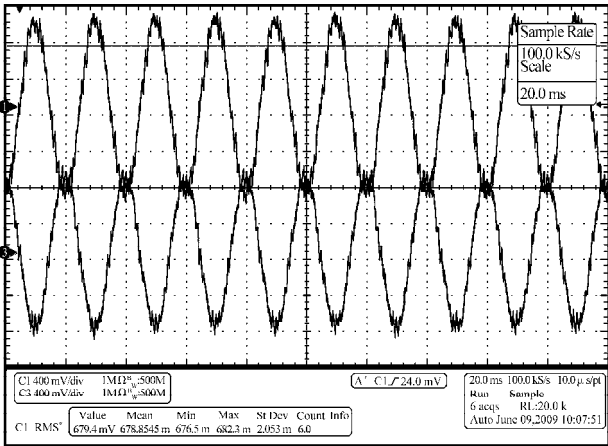


图7 直流融冰变电站试验现场
Fig.7 Experimental locale of transformer substation for DC deicing

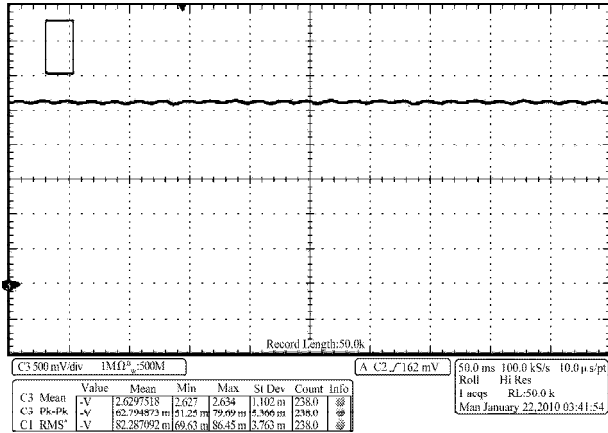
环境温度9℃,融冰通电时间1 h,线路温升17℃,达到了较理想的融冰效果。

3.3 背靠背 VSC-HVDC 试验

图8为2台融冰车进行背靠背VSC-HVDC试验时,上层控制器的有功功率指令为4 000 kW、无功功率指令为0时逆变换流站的试验波形。图8(a)是两个VSC模块的A相交流输出电流波形;图8(b)是直流侧总电压。从波形中可以看出,电流谐波含量小,近似正弦;直流电压为5 300 V左右(测量衰减率为1/2),且纹波较小,比较平稳,这也说明了作VSC-HVDC应用时的控制方法是正确有效的。



(a) VSC 输出电流波形
(a) Output current waveform of VSC module



(b) 直流侧总电压波形
(b) Total DC voltage waveform

图8 两车背靠背 VSC-HVDC 试验时的波形
Fig. 8 Waveforms of back-to-back VSC-HVDC experiment of two sets of DC deicing devices

4 结语

本文介绍了世界首套基于IGBT的移动式直流融冰装置。

(1)该装置总容量为20 MW,以VSC模块作为基本功率单元,

(下转第45页)

由于高压直流供电技术采用了PWM整流方式,具有工作电流小,接触网结构简单,无负序、谐波、过相等优点,对电网影响小。目前,在城市轨道交通中使用了直流供电方式,如我国香港地区的电气化轨道交通系统就是采用此方式。但要实现在高速铁路的应用,还必须突破直流输电容量和直流电压等级等瓶颈。

6 结语

高速铁路已经在全球掀起了建设高潮,特别是我们国家今后还将大力发展。然而高速铁路对供电系统造成的负序和谐波等不利影响,作为电网用户有责任和义务去治理,以共同维护电网的安全、可靠运行。因此,在发展高速铁路的同时必须采取措施进行综合治理:

- (1) 加快制定专门针对高速铁路的电能质量标准;
- (2) 在高速铁路设计和建设阶段,要对牵引变电站接入系统后的电能质量影响进行评估;
- (3) 坚持电能质量同步控制原则,综合采取多项治

理措施,并加强电能质量的监测;

(4) 应积极探索高速铁路电能质量治理的新思路,加快对同相供电、直流输电等新型供电技术的研究和投入。

参考文献:

- [1] 俞展猷. 日本新干线高速列车的发展历程[J]. 机车电传动, 2003(2): 1-7.
- [2] 仲川滋. 欧洲与日本高速铁路的发展动向[J]. 变流技术与电力牵引, 2000(3): 1-6.
- [3] 李群湛. 牵引变电所供电分析与综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [4] 秋天芳弘. 世界高速铁路的现状与前景[J]. 国外机车车辆工艺, 2004(6): 1-5.
- [5] 寿晓辉. 电气化铁道电能质量与控制及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [6] 万庆祝. 牵引供电系统负序问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [7] 吴传平, 罗安, 徐先勇, 等. 采用V/V变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 111-116.
- [8] 张雪原, 吴广宁, 边姗姗, 等. 一种新型牵引供电网构想[J]. 铁道学报, 2007, 29(3): 100-106.

(上接第40页) 可灵活方便地构成背靠背VSC-HVDC系统。既可满足电网融冰抗灾的要求, 当不需融冰时, 又可用于中小容量的风力发电并网等特殊场合的柔性直流输电。

(2) 该装置用于融冰时可采用简单的不可控整流直流融冰和具备较高电压输出能力的单位功率因数PWM整流直流融冰两种方式。不可控整流直流融冰的4车并联带线路负载融冰试验、PWM整流直流融冰和背靠背VSC-HVDC满功率试验均通过了验收, 并达到了预期效果。

(3) 文中较详细地讨论了系统主电路结构、融冰应用时单位功率因数PWM整流和恒流斩波的控制方法、输电应用时两端连接有源系统的串联型背靠背VSC-HVDC的控制方法。

但该装置若要作为VSC-HVDC的实际工程化应用还有待完善, 需要进一步研究其主电路连接形式、控制和保护策略等。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 杨秀, 郭晨吉, 金红核. 轻型高压直流输电综述[J]. 华东电力, 2009, 37(4): 606-609.
- [4] HORWILL C, DAVIDSON C, GRANGER M, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines[C]// 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas(USA), 2006.
- [5] 范瑞祥, 孙旻, 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): 67-70.
- [6] 罗文广, 张志学. 背靠背四象限变流器控制方法的研究[J]. 大功率变流技术, 2009(6): 14-17.
- [7] Lu Weixing. Control and application of multi-terminal HVDC based on voltage-source converter[D]. Montreal(Canada): McGill University, 2003.
- [8] 梁海峰. 柔性直流输电系统控制策略研究及其实验系统的实现[D]. 保定: 华北电力大学, 2009: 86-92.