

500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计

谢彬, 洪文国, 熊志荣, 吕夷

(湖南省电力勘测设计院, 湖南省长沙市 410007)

Pilot Project Design of Concurrent Fixed DC Ice-Melting and SVC for 500 kV Fuxing Substation

XIE Bin, HONG Wen-guo, XIONG Zhi-rong, LÜ Yi

(Hunan Electric Power Design Institute, Changsha 410007, Hunan Province, China)

ABSTRACT: The device for concurrent fixed DC ice melting and static reactive power compensation is successfully applied to 500kV Fuxing substation of Hunan power grid. This device sets new world records of such kind of devices in the highest capacity, heaviest current and longest ice-melting distance. In this paper the technical scheme and basic principle of concurrent fixed DC ice-melting and static reactive power compensation are presented. According to actual condition of the project, in the design plan of this device a brand new ice-melting approach of transmission line, various rational and optimized schemes for leading out, connection and artificial short-circuit of lines as well as the arrangement mode relatively reasonable in both technology and economy are adopted.

KEY WORDS: substation; DC ice-melting; static var compensation (SVC)

摘要: 固定直流融冰兼静止无功补偿(static var compensation, SVC)装置已成功应用于湖南电网复兴 500 kV 变电站, 该装置创造了容量最大、额定电流最大、融冰距离最长的世界记录。文章介绍了固定直流融冰兼 SVC 装置的技术方案与基本原理。根据工程实际情况, 该装置的设计方案中采用了创新的线路融冰方式, 多种合理优化的线路引接与短接方案以及技术经济相对合理的布置方式。

关键词: 变电站; 直流融冰; 静止无功补偿(SVC)

0 引言

2008年初, 我国南方发生了严重的雨雪冰冻灾害, 给当地电网造成巨大损失^[1-3]。其中湖南电网 500 kV 输电线路跳闸 64 次, 倒塔 16 基, 主网架结构遭到较大破坏, 局部地区电网甚至遭受毁灭性打击。为避免电网事故的重演, 开展超高压输电线路及配网线路的除冰技术研究势在必行。在各种融冰/除冰技术中, 热融冰技术是最有效的措施, 其中直

流融冰对于覆冰架空导线是最直接、有效、可靠的融冰方式之一^[4-7]。由湖南省电力勘测设计院设计的 500 kV 复兴变电站直流融冰兼静止无功补偿(static var compensation, SVC)装置是国家电网公司针对 2008 年初的特大雨雪冰冻天气对湖南电网造成的巨大损失而实施的重要科技减灾项目。

本文将结合该项目, 介绍直流融冰兼 SVC 装置的基本技术原理和结构。并给出该装置的设计参数、接线特点及布置方式等, 旨在为今后直流融冰技术的推广应用提供参考。

1 500kV 固定式直流融冰兼 SVC 装置技术方案

超高压交流输电线路的交流阻抗较大, 直流电阻一般只有交流阻抗的 10%左右。采用交流短路融冰时需要无功功率较高, 基本上无法实现^[8-11]。采用直流融冰方案时, 达到同样融冰效果所需要的电源容量小得多, 只需考虑整流装置自身消耗的无功功率。500kV 线路的安全电流为 2kA, 而最小保线电流接近 2kA, 线路热稳定限制要求线路运行电流不能超过线路安全电流。因此, 目前 500kV 线路不能考虑通过调整运行方式、改变线路潮流的方法实现预防结冰。根据国内外相关研究, 超高压输电线路采用直流电流融冰是一种可行的技术方案^[12-13]。

直流方式融冰的优点^[14]是: 1) 可实现零起升压和升流, 且快捷方便。2) 通过控制晶闸管阀组触发角, 结合现场线路类型、覆冰状况、气象条件等因素控制直流融冰电流, 以达到线路稳定的最佳融冰温度, 对不同长度、不同类型线路适应性较好。

融冰电流与线路类型、气象状况、覆冰厚度密

切相关。湖南省 2009 年初线路覆冰厚度在 20~60mm 之间。现有研究成果表明，在无风情况和环境温度为-18℃时，500 kV 线路使用 LGJ-300、LGJ-400、LGJ-500 导线所需的最小融冰电流大约分别为 700 A、800 A、1000 A；在有风(风速在 3.5 m/s 左右)和环境温度为-18℃左右时，LGJ-300、LGJ-400、LGJ-500 导线所需的最小融冰电流大约分别为 900 A、1050 A、1200 A。考虑到复兴变 500kV 线路采用四分裂的 LGJ-4×300 和 LGJ-6×300 架空线，线路长度在 11.7~251 km，融冰装置参数依据该数据进行确定。

由于冰灾持续时间短、发生频度小，若直流融冰设备仅作为融冰装置使用，其经济性较差。经过调研，结合国外直流融冰装置的状况，该装置在输电线路没有融冰需求时，作为动态无功补偿装置使用，其功能相当于常规的 SVC 装置，可以为系统提供动态无功支撑，阻尼系统低频振荡，提高系统稳定极限和输送能力^[15-17]。而当输电线路需要融冰时，经过简单的主接线重构，可以较方便地改为直流融冰装置，为输电线路提供必要的直流融冰电流。采用这种可重构型直流融冰/无功补偿装置可以极大地提高设备的利用率，维持设备的健康状况。

2 500 kV 固定式直流融冰兼 SVC 装置原理

2.1 融冰原理

500 kV 固定式融冰装置原理是利用主变 35 kV 电源，通过整流变压器进行适当的电压变换，利用晶闸管整流器进行整流获得直流电压，将覆冰线路末端短接，利用其中两相或三相同同时作为负载，提供直流电流加热导线，使覆冰融化^[13,18]。装置一次设备主要由换流变压器、晶闸管整流器、电抗器、交直流滤波器及各类开关组成。通过改变主接线连接方式在直流融冰方式与 SVC 方式之间进行切换。

2.2 融冰模式

2 组晶闸管阀连接为 2 个 6 脉动整流桥，通过 2 台容量 63 MVA 的换流变压器、断路器、隔离开关、CT 及额定电流 3 kA 的全绝缘铜管母线连接到 1 号主变低压侧 35 kV 母线。由 3 台电抗器并联组成的 2 组平波电抗器通过电抗器母线分别与 2 套整流阀的直流正极输出串联连接，电抗器末端连接输出直流正极汇流母线，2 套整流阀负极输出并接后成为负极汇流母线。直流母线出口侧并联加装 1 组直流滤波装置。正负直流母线最大融冰电流 6 kA，额定电压为 20 kV。其中晶闸管整流器作为融冰装

置的主要变流设备，为覆冰线路提供直流融冰电流。晶闸管阀组控制系统在线路融冰过程中通过改变晶闸管阀的触发角来调节线路直流电流。见图 1。

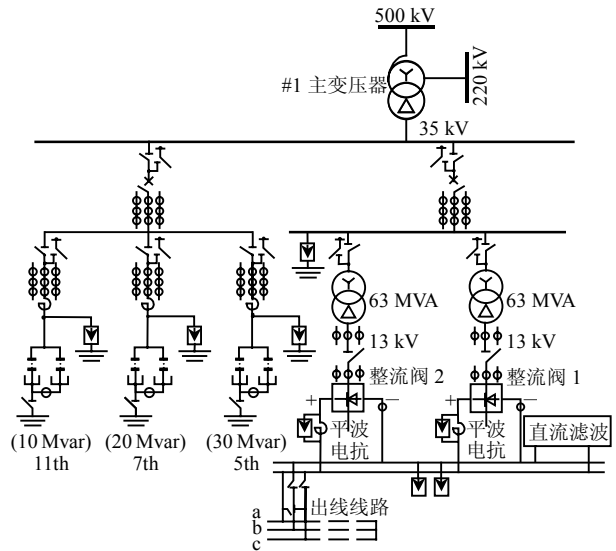


图 1 融冰模式原理接线

Fig. 1 The principle wiring diagram of de-icing

2.3 SVC 模式

装置作为 SVC 运行时，由融冰模式的 2 组平波电抗器通过刀闸操作改接为 1 组相控电抗器，相控电抗器和由整流阀改接的阀组串联后组成 1 组角接的晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)回路；该 TCR 回路顶点直接连接 35 kV 母线，容量 120 Mvar，与装设的 5、7、11 次共 3 组滤波装置共同组成一套 SVC 装置，换流变退出运行。该 SVC 容量范围为容性 60 Mvar~感性 60 Mvar。见图 2。可见该装置可根据需要在直流融冰模式和 SVC 模式间转换：在融冰模式下可输出±20kV、0~6kA 直流电流对变电站出线线路进行融冰，根据最佳温度设定目

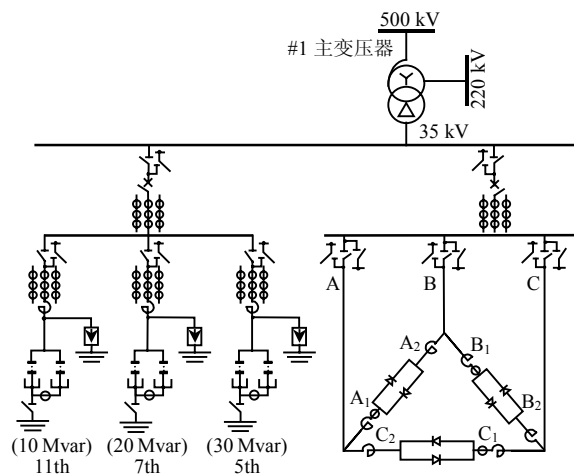


图 2 SVC 模式原理接线

Fig. 2 The principle wiring diagram of SVC

标电流以适应不同线路; 在 SVC 模式下可平滑输出容性 60 Mvar~感性 60 Mvar 的无功, 对系统进行动态无功补偿。这样有效提高了装置的利用率。

3 线路融冰规模与方式

本期固定式直流融冰装置融冰范围为至沙坪变 2 回、至江陵变 2 回、至艾家冲 2 回, 至岗市 1 回, 共 7 回 500kV 线路。至艾家冲 2 回线路所需融冰电流为 6kA, 其余线路所需融冰电流均为 4kA。目前复兴 500kV 变电站 500kV 出线情况见表 1。

表 1 复兴 500 kV 变电站 500 kV 出线情况

Tab. 1 The 500 kV outgoing line of Fuxing 500 kV substation

线路	导线型号	线路长度/km
复兴—江陵 I	LGJ-4×300	251.553
复兴—江陵 II	LGJ-4×300	251.479
复兴—沙坪 I	LGJ-4×300	85.89
复兴—沙坪 II	LGJ-4×300	81.607
复兴—艾家冲 I	LGJ-6×300	64.496
复兴—艾家冲 II	LGJ-6×300	63.31
复兴—益阳电厂二期 I	LGJ-4×300	11.689
复兴—益阳电厂二期 II	LGJ-4×300	11.689
复兴—岗市	LGJ-4×300	96.535

由于装置输出为正、负 2 极直流母线, 融冰线路为交流 A、B、C 三相。为满足在融冰过程中, 每相线路只通过 1 次融冰大电流, 需要在装置出口加装 3 台单极操作的倒闸用隔离开关。直流母线经过这 3 台隔离开关, 单根正极直流母线分成双根正极直流母线, 见图 3。3 根直流母线通过临时接线或隔离开关分别与出线侧线路 A、B、C 三相相连。

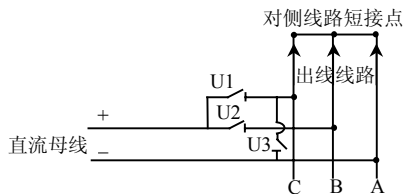


图 3 线路融冰原理

Fig. 3 The principle wiring diagram of de-icing on lines

融冰时, 先用临时接线或隔离开关将直流母线与融冰线路 A、B、C 三相连接, 再合上隔离开关 U1, 线路 C 相与直流母线正极相连, 线路 A 相与直流母线负极相连, 形成“一去一回”回路, 线路 A、C 两相分别通过全额融冰电流, 可将 A、C 两相线路上的冰融掉。再打开 U1, 合上 U2、U3, 线路 A、C 两相与直流母线负极相连, 线路 B 相与直流母线正极相连, 形成“一去两回”回路, 线路 B 相通过全额融冰电流, A、C 两相分别通过半额融冰电流, 可将 B 相线路上的冰融掉。各刀闸拉合逻辑表见表 2。表中“1”表示合上, “0”表示断开。

表 2 隔离开关逻辑表

Tab. 2 The logic of disconnectors

实现功能	U1	U2	U3
融 A、C 相	1	0	0
融 B 相	0	1	1

4 线路引接与短接

4.1 线路引接

线路引接根据场地具体条件采取 3 种方式相结合的方法。

1) 复沙 I 回线路与至江陵变 2 回线路。将直流母线采用电缆沟布置方式敷设至出线侧 PT 与避雷器之间的管型母线下, 再将全绝缘铜管母线引接并固定在立在电缆沟旁的支柱上。融冰时, 用软导线将 PT 与避雷器之间的管型母线与铜管母线连接, 完成直流母线与融冰线路的连接。

2) 复沙 II 回、复艾 I 回与至岗市线路。在出线下分别安装 3 个 500 kV 支柱绝缘子, 用软导线将 A、B、C 三相线路引接至 3 个绝缘子上。融冰时, 再用软导线或管母线将支柱式直流母线与绝缘子连接, 完成直流母线与融冰线路的连接。

3) 复艾 II 回线路。在出线下安装 3 台 500 kV 三柱式水平旋转隔离开关, 用软导线将 A、B、C 三相线路分别引接至 3 台隔离开关的一侧静触头上, 另一侧静触头用软导线或管母线接至支柱式直流母线。融冰时, 合上隔离开关, 完成直流母线与融冰线路的连接。

4.2 对侧短接方案

1) 复沙 I、II 回线路, 复艾 I、II 回线路, 至岗市线路。在对侧变电站对应间隔 A、B、C 三相出线侧 PT 与避雷器之间的管型母线中部安装相应金具, 融冰时, 采用铝合金管母线将线路三相短接。

2) 江复 I、II 回线路。在复兴变与江陵变之间距复兴变 150 km 左右的线路位置将线路 A、B、C 三相短接。

5 装置布置方案

在满足装置正常运行的条件下, 结合整个变电站运行、管理及维护的要求, 尽可能保持变电站的整体性与美观。本工程将核心装置布置在现变电站围墙外西南面(500 kV 配电装置南侧), 避开了站址南侧的水塘与 500kV 出线终端塔。

装置核心部分由东向西分别布置 35 kV 进出线构架装置区、换流变装置区、晶闸管阀室(含控制保护小室和水冷室)、直流出线构架及平波电抗器装置区。

35 kV 交流滤波装置采用常规户外布置方案, 布置于变电站一期预留的电容器场地, 减少了外扩围墙的尺寸。

直流母线布置在变电站环形道与融冰装置之间, 直流母线采用支柱式铝合金管母线与全绝缘铜管母线电缆沟组合布置方式。本期工程还需外扩变电站北向围墙用来布置北侧直流母线, 在穿越500kV 配电装置时采用电缆沟敷设方式布置。

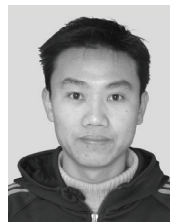
6 结语

通过该项目的研究和实际应用, 成功完成了直流融冰装置基础理论研究, 为装置的推广应用提供了坚实的理论基础和实践基础。项目实施中取得的创新经验包括: 1) 解决了两极直流在三相交流线路上融冰的技术难题; 2) 提出了多种技术经济合理的直流母线与出线线路引接以及短接的方式; 3) 结合整个变电站具体情况, 采用了最为合理的布置方式; 4) 整个工程全部选用国产化设备, 对提高中国电网抵御冰灾的能力具有重大意义。

该固定式直流融冰装置顺利通过试验并成功应用, 标志着我国利用科技手段防灾减灾方面取得的重大突破。但电网融冰涉及广泛, 需不断深入研究, 并积极推动相关理论研究成果的工程化进程。

参考文献

- [1] 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 Liqiang, Zhang Wenlei, Tang Jihong, et al. Overview of the extraordinarily serious ice calamity to Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(26): 20-25(in Chinese).
- [2] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网2008年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 1-5.
Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Su Zhiyi, et al. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 1-5(in Chinese).
- [3] 邵德军, 尹项根, 陈庆前, 等. 2008年冰雪灾害对我国南方地区电网的影响分析[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 38-43.
Shao Dejun, Yin Xianggen, Chen Qingqian, et al. Affects of icing and snow disaster occurred in 2008 on power grids in South China[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 38-43(in Chinese).
- [4] Laforte J L, Allaire M A, Laflamme J. State-of-the-art on power line de-icing[J]. Atmospheric Research, 1998, 46: 143-158.
- [5] 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 Shukai, 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(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 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): 20-23.
Li Shusen, Zuo Wenxia, Shi Yanhui, et al. Discussion on the deicing technology using DC current[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(6): 20-23(in Chinese).
- [8] 蒋兴良, 张丽华. 输电线路除冰防冰技术综述[J]. 高电压技术, 1997, 23(1): 73-76.
Jiang Xingliang, Zhang Lihua. Deicing and anti-icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(1): 73-76(in Chinese).
- [9] 邓健, 肖顺良, 姚璞, 等. 220 kV 线路融冰方案的改进[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29-30.
Deng Jian, Xiao Shunliang, Yao Pu, et al. Improvement on ice-melting scheme for 220 kV transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 29-30(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.
Huang Xinbo, Liu Jiabing, Cai Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 23-28(in Chinese).
- [12] 李宁, 周羽生, 邝江华, 等. 输电线路除冰技术的研究[J]. 防灾科技学院学报, 2008, 10(3): 33-37.
Li Ning, Zhou Yusheng, Kuang Jianghua, et al. Research on de-icing methods for transmission lines[J]. Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology, 2008, 10(3): 33-37(in Chinese).
- [13] Granger M, Dutil A, Nantel A. Performance aspects of Levis substation de-icing project using DC technology[C]. 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, 2005.
- [14] 忻俊慧. 500 kV 输电线路短路融冰可行性研究[J]. 湖北电力, 2005, 29(12): 8-10.
Xin Junhui. A feasibility study of short-circuit current ice-melting method of 500 kV transmission lines[J]. Hubei Electric Power, 2005, 29(12): 8-10(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] Horwill C, Davidson C C, Dery A, et al. An application of HVDC to the de-icing of transmission lines[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES Dallas, USA.
- [17] Dery A, Gingras J. Hydro Quebec de-icing projects[C]. 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, 2005.
- [18] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 26-27.



谢彬

收稿日期: 2009-04-03。

作者简介:

谢彬(1982—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统设计工作, E-mail: xiebin@hepd.com; 洪文国(1964—), 男, 高级工程师, 从事电力系统工程设计与技术管理工作。

(责任编辑 李兰欣)