

南方电网输电线路融冰措施综述

覃晖¹, 邓帅², 黄伟¹, 张婧¹

(1. 广西电力工业勘察设计研究院, 广西 南宁 530023; 2. 安徽芜湖供电公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 详细论证了交流短路融冰法、直流电流融冰法以及过电流融冰法的技术原理、特点、规划设计原则, 以及适用范围。通过对不同电压等级短路电源电压、在不同长度时可提供的短路电流及需要的无功容量的论证得出, 交流融冰法中的发电机零起升流法适合融冰电流较小的输电线路, 而全电压冲击合闸法适用于无功备用充足的输电线路。直流融冰法具有接线方便, 无功需求不大、适用任何线路的优点。由于通过调度转移潮流的程度有限, 过电流融冰法只适用于小面积的输电线路融冰。

关键词: 交流融冰; 直流融冰; 过电流融冰; 融冰措施; 融冰设计原则

Summary of power transmission line thawing measures

QIN Hui¹, DENG Shuai², HUANG Wei¹, ZHANG Jing¹

(1. Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China;
2. Anhui Wuhu Power Supply Bureau, Wuhu 241000, China)

Abstract: The technical theory, characteristics, planning and design principles and the application scope of three kinds of thawing methods including AC short circuit thawing, DC current thawing, and over-current thawing are discussed in detail. After discussing the available short-circuit current and reactive power capacity at different voltage levels on different length lines, the paper concludes that as for AC thawing method, generator zero-flow method is suitable for lines of small current, but full voltage impact closing method is applied to lines of adequate reactive power; as for DC thawing method, it has the advantages of convenient wiring, small reactive power demand and wide application scope; as for over-current thawing method, due to the limit transfer flow in dispatching, it can only be applicable to lines with small area.

Key words: AC short circuit thawing; DC current thawing; over-current thawing; thawing measures; thawing design principles

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0231-05

1 概述

2008年我国南方地区出现了持续的大范围严重的低温、雨雪冰冻灾害, 冰灾(覆冰)俨然成为电力行业所面临的重大威胁之一。面对灾害, 以科技手段推进电网防灾减灾是目前电力行业专家公认行之有效的思路。冰灾初期, 电力设备覆冰相对较轻时对电网的主要危害体现为覆冰闪络、导线舞动和脱冰跳跃等。随着灾情的发展和覆冰的加剧, 其作用在杆塔上的荷载(垂直荷载、水平荷载、纵向荷载等)大大超过设计值, 从而导致铁塔倾覆, 引起输电线路事故。覆冰受损类型中, 倒塔和断线对电网造成的危害最大, 严重的可造成电网解列甚至全系统瓦解。

本文充分吸收以往国内外输电线路覆冰灾害改造经验, 从提高电网应对冰雪灾害能力的角度, 针

对目前较为成熟的几种主要融冰技术进行论证, 深入探讨不同电压等级的输电线路适用的融冰方案, 为提高南方电网冰灾区域线路的抗冰融冰能力提供参考依据。

2 输电线路融冰实用技术探讨

面对越来越频繁的冰灾对电力系统基础设施的严重威胁, 电力工业界与学术界发展了多种融冰技术。其中, 将电能转化为热能融冰是目前电力系统融冰的基本思路。较为常用且取得成功应用的有交流短路融冰法、直流电流融冰法, 以及过电流融冰法^[1]。本文从技术原理、特点及规划设计原则三个方面论证上述几种应对冰冻灾害的实用措施, 并对几种当前推行的措施进行比较, 针对不同电压等级输电线路的特点, 给出适用的融冰办法^[2]。

2.1 交流三相短路融冰法

交流短路融冰法^[3]，通过合理地安排交流三相短路方式，将融冰线路的一端三相短路，而在另一端提供融冰电源，以较大短路电流（控制在导线最大容许电流范围以内）来加热导线，使依附在导线上的冰融化。在实际融冰工作中采用两种方案，如图 1。第一种方案（图 1（a））为发电机零起升流方法。先将线路短路，由发电机带融冰线路零起升流。第二种方案（图 1（b））为全电压冲击合闸法。先将融冰线路短路，控制断路器对三相短路线路进行全电压冲击合闸^[4]。

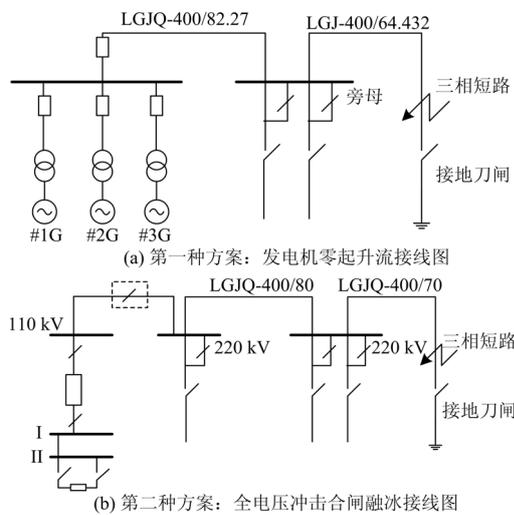


图 1 交流三相短路融冰法
Fig.1 AC short circuit thawing ice

交流短路融冰方案的选择需要结合系统条件来综合考虑：

采用第一种方案，可以选择由发电机采用变压器带线路零起升流，或者由发电机直接带线路零起升流。前者因为折算到发电机侧的电流较大，需要的发电机容量大，很难操作；后者的短路电流较小，可能低于融冰电流，因此第一种方法只适合于融冰电流

较小的输电线路，500 kV 线路不适合采用该方法。

第二种方案需要根据融冰电流及短路电流大小来选取合适的短路回路阻抗，由于这种方法的使用对系统冲击较大，在无备用不足的情况下，可能引起系统稳定问题，因此维持正常运行电压水平是重要环节。表 1~3 给出了 500 kV、220 kV 以及 110 kV 线路选用不同电压等级短路电源电压、在不同长度时可提供的短路电流及需要的无功容量估算结果（计算时忽略系统内阻抗，下同）。

采用第二种方案，需要同时满足两个条件，系统所能提供的短路电流大小（高于融冰电流），与电网电压及稳定维持能力（无功储备的大小）。由表 1~3 可知，通常采用低一级的电压对高一级的线路实施短路融冰。其中可行的交流短路融冰方案为单分裂导线的 220 kV 线路采用 110 kV 作为短路电源方案，以及 110 kV 线路采用 35 kV 作为短路电源方案。而对于 500 kV 以及采用大截面分裂导线的 220 kV 输电线路，需要融冰电流很大，同时需要系统提供大量无功，因此存在系统无法提供融冰所需的无功功率问题，均不适用该方法^[5]。

采用交流短路融冰方案的设计原则：

(a) 需要考虑的内容包括可行的电气路径、电网电压及稳定维持能力（无功储备）、电源/变压器容量等。

(b) 要选择合适的电气距离和提高足够的无功补偿，使得系统电源在可以承受的范围內。

(c) 防止融冰电源处的主变穿越功率过载。

(d) 尽量不改变或者少改变电网的正常运行方式，减少运行维护人员对开关、刀闸等元件的操作次数。

(e) 融冰短路电源点尽量选择在主变容量较大、低压侧有无功电容器、附近有较多无功电源、负荷比较容易转移到其他地方、110 kV 侧和 220 kV 侧均有旁路母线的变电站较为合适。

表 1 500 kV 线路估算结果（交流短路融冰）

Tab.1 Results of 500 kV line melting (AC)

融冰电源的电压等级 / kV	需融冰的 500 kV 线路长度 / km						是否具备可行性
	100		150		200		
	短路电流 / A	容量 / MVA	短路电流 / A	容量 / MVA	短路电流 / A	容量 / MVA	
35	722	44	481	29	361	22	×
110	2 268	432	1 512	288	1 134	216	×
220	4 536	1 729	3 024	1 152	2 268	864	×
500	10 310	8 929	6 873	5 953	5 155	4 465	×

表 2 220 kV 线路估算结果 (交流短路融冰)

Tab.2 Results of 220 kV line melting (AC)

融冰电源的电压等级 / kV	需融冰的 220 kV 线路长度 / km						是否具备可行性
	50		100		150		
	短路电流/A	容量/MVA	短路电流/A	容量/MVA	短路电流/A	容量/MVA	
单分裂导线							
35	972	59	486	29	324	20	×
110	3 053	582	1 527	291	1 018	194	√
220	6 107	2 327	3 053	1 164	2 036	776	×
双分裂导线							
35	1 343	81	671	41	448	27	×
110	4 220	804	2 110	402	1 407	268	×
220	8 440	3 216	4 220	1 608	2 813	1 072	×

表 3 110 kV 线路估算结果 (交流短路融冰)

Tab.3 Results of 110 kV line melting (AC)

融冰电源的电压等级 / kV	需融冰的 110 kV 线路长度 / km						是否具备可行性
	40		60		100		
	短路电流/A	容量/MVA	短路电流/A	容量/MVA	短路电流/A	容量/MVA	
35	722	44	481	29	361	22	√
110	2 268	432	1 512	288	1 134	216	×

2.2 利用直流加热线路融冰

直流电流产生的热量必须大于导线散热和融冰热量之和, 覆冰才能融化。这要求: 线路所通融冰电流 (I) 需要达到一定的数值; 融冰电流确定以后, 融冰装置的电源容量 ($P1$) 对应一定长度的线路 (R), 并且装置的电压也受到 $I \times R$ 的限制。

直流融冰方案依据电源提供不同分为两种, 如图 2、图 3。一种采用发电机电源整流 (图 2)。发电机主要为大功率柴油发电机组 (也可以是系统存在的发电机), 主接线改造后, 通过旁路接到整流器, 带线路实施融冰。另一种由系统提供电源 (图 3), 经整流变压器, 在经整流器带线路实施融冰。常用的直流融冰电源有固定式直流电源、站间移动式直流电源和发电车移动式直流电源。上述直流融冰电源具有接线不需经过任何站内原有正常运行的设备, 装置在融冰工作时所产生的直流电流对站内原有设备不会造成影响; 接线方便; 无功容量需求不大的优点, 同时也存在引起 35 kV 侧谐波电压和电压畸变率的不足。

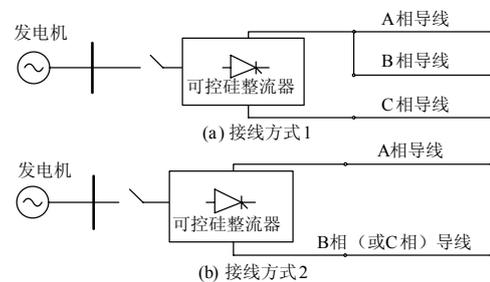


图 2 发电机提供电源融冰方案

Fig.2 Power provided by generator

此外, 依据接线方式不同也分为两种。接线方式 1 (图 2 (a), 图 3 (a)) 是分三次完成三相导线

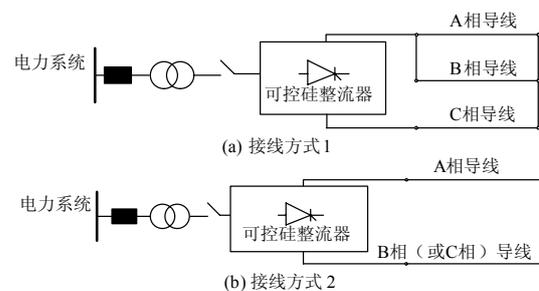


图 3 系统提供电源融冰方案

Fig.3 Power provided by system

融冰，第一次将 A、B 两相导线并接后与 C 相导线短接，将 A、B 两相导线并接后接入直流融冰电源的一个输出端，将 C 相导线接入直流融冰电源的另一个输出端；第二次将 A、C 相并接与 B 相短接；第三次将 B、C 相并接与 A 相短接。接线方式 2（图 2（b），图 3（b））是分两次完成 A、B、C 三相融冰，第一次将 A、B 两相导线短接，将 A、B 两相导线接入直流融冰电源的两个输出端，进行 A、B 相导线融冰，第二次在 A、C 相导线融冰。前者与后者相比，直流压降可以降低 25%，容量也可降低 25%。

采用直流融冰的设计原则^[6]：

在一定的环境条件下，直流融冰所需要的整流器容量决定于需要融冰线路的导线截面及导线长度。直流融冰方案从技术上可适应于各级电压等级的不同导线截面的线路。根据不同的应用条件可以采用不同形式、不同容量的直流融冰装置。

(a) 对于 500 kV 交流线路，在中心变电站安装固定式直流融冰装置以进行所连接 500 kV 交流线路的融冰。

(b) 对于 220 kV 和 110 kV 交流线路，根据各区域交流线路长度和导线截面的统计情况优化后配置几种型号的站间移动式融冰装置。

(c) 2 MW 发电车移动直流融冰装置由于重量太重，体积太大，适用性不强，但特殊情况下，可以考虑在 35 kV 及以下交流线路中使用。

2.3 过电流融冰法

过电流融冰法，是在不停运线路/母线、系统正常运行下增加覆冰线路电流，增大线路发热，以实现保线路融冰的目的，可分为几类：

(a) 通过调度改变潮流分布。为防止导线覆冰，对 220 kV 及以上轻载线路，主要依靠科学的调度，提前改变电网潮流分配，使线路电流达到保线电流以上；110 kV 及以下变电所间的联络线，可通过调度让其带负荷运行，并达到保线电流以上。由于正常运行方式下通过调度转移潮流的程度是有限的，所以此种方法无法应对大面积的严重冰灾。

(b) 利用自耦变压器对特殊结构的多分裂导线进行融冰。将重覆冰线路改造为装有绝缘间隔棒的二分裂导线，并将每相的两根导线用三片绝缘子隔离，自断开点两侧用悬空 T 型接线引入融冰变电所。当需要导线带负荷融冰时，通过专门的融冰自耦变压器的电压差在二分裂导线产生强迫的融冰环流，使得导线发热融冰。该方法在宝鸡电业局的 110 kV 马向 I、II 线应用多年，在解决小范围覆冰问题时已有成功经验。

2.4 几种实用融冰方法比较

表 4 是上述几种融冰方法的比较^[7-8]。

由表 4 可知，以目前技术水平，“交流短路融冰法”与“直流电流融冰法”是面向大型电网的最为成熟可行的两种融冰手段。

表 4 几种实用融冰措施的比较

Tab.4 Several practical measures of ice melting

分类		适用范围	可能存在的问题	应用现状	
交流三相短路融冰法	发电机零起升流	220 kV、110 kV 线路	发电机操控量大，倒闸操作多	湖南电网、宁夏固原供电局等单位有成功应用	
	系统冲击合闸短路	220 kV、110 kV、35 kV 线路	需要转移负荷，操作比较多；直接短路，对系统电压有一定冲击，需核算稳定；可能导致变压器过载；融冰电流决定于系统条件，可控性较差		
直流融冰法	固定式（大容量）	500 kV 线路	平时融冰设备不运行，如何确保能在需要时快速开出	湖南中试融冰试验成功	
	移动式	站间移动式	220 kV、110 kV 线路	站间移动可能受到路况、车况限制；临时接线可能出现问题	试验阶段
		发电车移动式	35 kV、10 kV 线路	移动可能受到路况、车况限制；野外接线困难，不定因素较多	试验阶段
过电流融冰法	通过优化调度	110 kV 线路	无法应对大面积的严重冰灾	小范围应用	
	自耦变压器	110 kV 线路	局限于小范围覆冰问题	宝鸡电业局成功应用	

3 结论及建议

这次冰灾给我们的启示除了要完善设计标准，

提高输电线路设计气象条件重现期之外，更重要的是要坚持以科技手段推进电网防灾减灾。因此通过本文对输电线路应对冰冻灾害天气的各种措施详细

的对比探讨, 得出以下结论:

(1) 推行电网差异化设计原则, 提高重要线路的抗灾能力。为确保供电设施的安全可靠, 对重要线路和特殊区段采取差异化设计, 提高安全设防水平。

(2) 以目前的技术水平而言, 架空地线、绝缘子以及杆塔尚无有效的融冰方法。针对架空输电线路, 交流短路融冰法与直流融冰法是两种最有可能供大电网普遍有效应用的融冰方法。

(3) 受容量限制, 目前 500 kV 交流线路只能用 500 kV 变电站固定式直流融冰装置融冰; 220 kV、110 kV、35 kV 交流线路既可用交流短路融冰法, 也可用站间移动式直流融冰装置融冰; 一般情况下选择低一电压等级作为交流短路电源点进行 220 kV、110 kV、35 kV 交流线路交流短路融冰可操作性相对较强。10 kV 线路宜用移动式发电车带直流融冰器融冰。

(4) 考虑经济等因素, 500 kV 直流线路整线直流融冰不太现实, 只可能通过移动式大容量直流融冰装置实现分段融冰; 同时建议凝冻天气时, 在系统安全许可情况下令 500 kV 直流线路满载或过载以尽量使之达到或接近保线电流。

(5) 建议设计单位针对重灾区线路开展交流短路融冰方案研究, 明确交流短路融冰电源点和短路点。

(6) 建议设计单位开展固定式、站间移动式、发电车移动式直流融冰装置样机开发和深入的设计研究工作。

(7) 考虑建立输电线路覆冰预警系统, 对覆冰地区的重要线路考虑安装线路覆冰在线监测装置, 并采取防冰措施。相关变电站应考虑装设除冰、融冰设施^[9-10]。

参考文献

- [1] 陈雪林, 周志龙. 电流融冰法在郴州市电网的应用[J]. 湖南水利水电, 2007, 6: 56-58.
CHEN Xue-lin, ZHOU Zhi-long. Current ice melting in Chenzhou[J]. Hunan Hydro & Power, 2007, 6: 56-58.
- [2] 周飞. 高压输电线路防止覆冰灾害的预防[J]. 科技咨询导报, 2007: 30-35.
ZHOU Fei. Ice disaster prevention of high-voltage transmission lines[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2007: 30-35.
- [3] 刘纯, 陆佳政, 陈红冬. 电流融冰法在郴州市电网的应用[J]. 湖南电力, 2005, 5: 25.
LIU Chun, LU Jia-zheng, CHEN Hong-dong. Current

- thawing method in Chenzhou power grid[J]. Hunan Electric Power, 2005, 5: 25.
- [4] 吴文辉. 湖南电网覆冰输电线路跳闸事故分析及措施[J]. 高电压技术, 2006 (2): 32.
WU Wen-hui. Trip accident analysis and prevention of icing line in Hunan power grid[J]. High Voltage Engineering, 2006 (2): 32.
- [5] 罗兵, 金小明, 等. 南方电网抗冰融冰技术及应用研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2: 27-40.
LUO Bing, JIN Xiao-ming, et al. The technology and application of ice melting in Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2: 27-40.
- [6] 电网规划应对低温雨雪冰冻等重大自然灾害的措施及实施方案研究报告[J]. 南方电网技术, 2008, 2: 18.
The study measures and implementation plan on snow, ice storms and other natural disasters of power grid planning[R]. Southern Power System Technology, 2008, 2: 18.
- [7] 西南电力设计院, 贵州电力设计研究院. 南方电网线路病害分析及提高抗冰能力措施的报告[R]. 2008, 2: 37-42.
Southwest Electric Power Design Institute, Guizhou Electric Power Design Institute. The analysis of line defect and measures of anti-ice improvement in Southern power[R]. 2008, 2: 37-42.
- [8] 唐海军. 短线路融冰新方法试验及测试分析[J]. 华中电力, 2006, 6: 8-12.
TANG Hai-jun. The testing on new methods of short line thawing[J]. Central China Electric Power, 2006, 6: 8-12.
- [9] 蒋兴良, 马俊, 谢述教, 等. 覆冰污秽 XP-70 绝缘子(长)串最低交流闪络电压[J]. 高电压技术, 2006, 2: 32.
JIANG Xing-liang, MA Jun, XIE Shu-jiao, et al. The minimum AC flashover voltage of Icing filthy XP-70 insulator(L) Series[J]. High Voltage Engineering, 2006, 2: 32.
- [10] 李为, 张丽芳, 周景. 输电线路导线接头测温预警系统研究[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 9-12.
LI Wei, ZHANG Li-fang, ZHOU Jing. The study on temperature warning system of transmission line cable connectors[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 9-12.

收稿日期: 2010-01-05; 修回日期: 2010-08-19

作者简介:

覃 晖(1982-), 女, 硕士研究生, 工程师, 从事电力系统可视化分析与计算、电力系统运行与规划等方面的研究。E-mail: brave105@163.com