

湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析

张文亮¹, 于永清¹, 宿志一¹, 范建斌¹, 李鹏¹, 袁大陆¹, 武守远¹,
宋杲¹, 邓占锋¹, 赵东来¹, 左松林², 傅志扬³, 屈强³

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 湖南省电力公司, 湖南省 长沙市 410007;
3. 湖南省超高压管理局, 湖南省 长沙市 410007)

Investigation and Analysis of Icing and Snowing Disaster Happened in Hunan Power Grid in 2008

ZHANG Wen-liang¹, YU Yong-qing¹, SU Zhi-yi¹, FAN Jian-bin¹, LI Peng¹, YUAN Da-lu¹, WU Shou-yuan¹,
SONG Gao¹, DENG Zhan-feng¹, ZHAO Dong-lai¹, ZUO Song-lin², FU Zhi-yang³, QU Qiang³

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, Hunan Province, China; 3. Hunan Extra High Voltage Company, Changsha 410007, Hunan Province, China)

ABSTRACT: In January 2008, major disaster caused by icing and snowing happened in some regions of Central China and South China, and in this severe icing and snowing disaster Hunan power grid is particularly suffered. For this reason, an expert group of China Electric Power Research Institute (CEPRI) is organized and went to Hunan province for field investigation. As a summary of this investigation, in this paper the failure conditions such as flashover caused by icing, collapse of towers, conductor breakage and damage of transformation equipments are described, and the countermeasures adopted in this icing and snowing disaster are summarized. The analysis on the reason causing the damage in Hunan power grid shows that the rare meteorological condition is the principal cause of large-area damage of Hunan power grid. During this icing disaster of Hunan power grid, the ice-coating extent greatly exceeds the permissible limit considered in design, thus it is necessary to reasonably fortify the standard against ice-coating of transmission lines, meanwhile, the design of external insulation and the de-icing technology for substations are to be enhanced.

KEY WORDS: Hunan power grid; icing disaster; ice-coating; collapse of tower; de-icing

摘要: 2008年1月,我国华中、华南等地区遭受了严重的冰雪灾害,湖南省电网在此次冰冻事故中受灾尤为严重。为此,中国电力科学研究院组织了专家考察组赴湖南省进行了实地调研。作为此次调研的总结,文章论述了湖南电网覆冰闪络、倒塔、断线、变电设备受灾等情况,并总结了冰灾中采取的措施。对湖南电网受灾原因的分析表明,罕见气象条件是本次电网大面积受灾的主要原因。在湖南电网冰灾事故

中,覆冰程度大大超出设计容许范围,需要合理提高输电线路防覆冰设防标准,同时防冰闪的外绝缘设计以及变电站的防冰技术也有待加强。

关键词: 湖南电网; 冰灾; 覆冰; 倒塔; 抗冰

0 引言

2008年1月10日以来,我国先后出现4次大范围雨雪冰冻天气,输变电设施覆冰覆雪严重,遭受了不同程度的损害,线路跳闸和倒塔断线现象普遍,严重威胁电网安全稳定运行^[1-5]。电网受损范围之大、数量之多、后果之严重实属罕见,其中尤以湖南电网受灾最为严重^[6]。

为了深入了解湖南电网冰灾情况,总结经验,为今后防冰抗灾提供依据,中国电力科学研究院于2008年2月4日—9日对湖南电网遭受冰雪灾害的情况进行了实地调研,调查组考察了多个500kV、220kV变电站和输电线路,并同湖南省电力公司科技部、生技部、超高压管理局、调通局、基建部、电力试研院等多家单位进行了座谈和交流,对湖南电网冰雪灾害事故进行了初步总结和分析。

调查表明,湖南电网输电线路冰灾情况基本上可分为2个阶段,第一阶段以线路覆冰闪络事故为主,主要发生在冰害初期和中期;随后进入第二阶段,以线路断线、倒塔为主。在本次冰灾事故中,湖南电网变电站设备受灾情况主要表现为隔离开关故障及设备外绝缘放电严重等^[6]。

1 湖南电网受灾情况

1.1 线路覆冰闪络跳闸

初步统计表明, 发生冰闪的 500 kV 线路有 28 条, 占 500kV 线路总数的 87.5%, 220kV 和 110kV 线路覆冰闪络超过百条。1 月 13 日—22 日, 覆冰闪络以 220kV 和 110kV 线路为主, 1 月 23 日 500kV 线路开始发生冰闪。大面积覆冰闪络主要发生在 1 月 28 日以前。

1.2 输电线路倒塔、断线统计

根据湖南电网公司资料, 2 月 5 日以前, 全省 33 条 500 kV 线路跳闸 89 条次, 倒塔断线 14 条、174 基, 断地线停运 3 条; 全省 246 条 220kV 线路中, 倒塔断线 42 条、185 基, 断线或受损停运 32 条; 110kV 线路跳闸 2000 多条次, 倒塔 61 条、247 基, 见表 1。冰灾给电网造成的直接经济损失超过 16 亿元。线路倒塔典型情况如图 1 所示。

表 1 湖南电网线路受损情况统计

Tab. 1 The statistics of damaged lines in Hunan power grid

电压等级/kV	线路条数	冰闪条数	跳闸条次	断线条数	倒塔基数
500	33	28	89	14	174
220	246	>100	—	42	185
110	—	>100	>2000	61	247



图 1 输电线路由于覆冰严重发生倒塔
Fig. 1 Tower collapsed caused by severe ice-coating of transmission line

1.3 变电站受灾情况

在本次冰害事故中, 湖南电网变电站受灾严重, 发生多起变电站母线停运或全站停运事故, 表 2 为 2 月 5 日前全省电网变电站在此次冰害中的事故情况统计, 可以看出, 500kV 变电站在此次冰害事故中受灾最为严重。

表 2 湖南电网停运变电站统计

Tab. 2 The statistics of outage transformer substations in Hunan power grid

电压等级/kV	变电站数	停运变电站数	停运变电站所占百分比/%
500	12	6	50
220	85	32	37.6
110	389	87	22.4
35	433	181	41.8

湖南电网变电站设备受灾情况主要表现为: 隔离开关故障、设备外绝缘放电严重。

(1) 隔离开关故障。

在此次事故中, 几乎所有变电站的隔离开关动静触头以及传动系统均被冰冻卡死, 无法进行正常的分合闸操作, 见图 2。在线路倒塔或断线的故障情况下, 隔离开关故障造成线路维修施工延迟或无法进行。

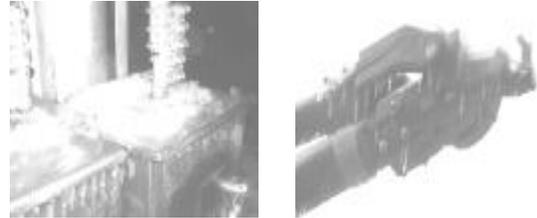


图 2 隔离开关冰冻卡死

Fig. 2 Inactive disconnecting switch caused by ice

(2) 设备外绝缘放电严重。

变电站设备外绝缘覆冰放电严重, 据不完全统计, 由覆冰导致的闪络事故就有 9 起, 见图 3。



图 3 设备覆冰造成放电严重

Fig. 3 Equipment discharged severely caused by ice-coating

1 月 21 日, 云田变 4 台 500 kV SF₆ 电流互感器发生冰闪爆炸, 见图 4。1 月 23 日, 该站 500kV 避雷器也发生冰闪。郴州局朝阳变 220 kV 母线支柱瓷瓶覆冰闪络, 同时由于母线冰柱脱落造成了 3 次站内相间短路事故。此外, 郴州局 4 个 220 kV 变电站由于终端塔架和站内门型塔倒塌造成站内设备损坏。



图 4 SF₆ 电流互感器冰闪爆炸

Fig. 4 SF₆ current transformer blasted caused by icing flashover

2 抗冰措施

湖南省这次凝冻天气持续时间长、强度大、范围广,正好吻合了导线覆冰所需的气温、湿度、风速、逆温层等条件。此次覆冰主要有以下4个特点:

(1) 覆冰过程气温为 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$, 降小雨或毛毛雨, 浓雾, 相对湿度大于95%, 风速 $5\sim 10\text{m/s}$, 风向大多为北风和西北风。

(2) 覆冰体半透明, 坚硬光滑且密实, 密度约 0.9g/cm^3 , 导、地线覆冰体近似椭圆形, 其长短轴相差较小, 附着力强。

(3) 与2005年冰灾不同, 今年结冰没有高低海拔的区别, 地面及水面普遍有覆冰, 梯形覆冰不明显, 但随海拔增高覆冰也略严重。

(4) 同一地段高程越高覆冰越严重。在海拔 $50\sim 250\text{m}$ 的山地及丘陵区, 地形相对高耸和突出的地方覆冰较重, 标准冰厚达 $30\sim 50\text{mm}$ 。

针对这次突发性冰雪灾害, 湖南电网采取了一系列有力的技术措施, 确保长沙、株洲、湘潭等中心城市和重要用户的供电, 在几度分片运行的情况下湖南电网主体没有崩溃。主要措施有:

(1) 人工除冰。

在灾情初期, 及时对6条500kV线路进行了人工除冰, 保证了西电东送通道的畅通。

(2) 交流融冰。

在灾情发展的一定阶段, 对具备条件线路采用交流融冰技术, 保证了部分220kV线路安全运行。

(3) 优化调度, 控制负荷。

优化电力调度, 控制负荷, 保证了重要中心城市、重要用户以及众多城市居民的用电, 并在贵州东部电网发生全停事故后, 紧急实施电力支援, 确保贵州电网的黑启动。

(4) 加强防冰监测。

发挥了防冰监测系统的作用, 根据该系统发回的覆冰信息, 指导各地除冰、融冰工作。

(5) 统一协调, 多方支援。

国家电网公司组织河南、陕西、山东、河北、吉林等电力公司技术人员赴湖南加入抗冰保电的工作。同时, 军队和地方社会各界也都大力支持抗冰工作。通过努力, 湖南电网受灾情况得到了较好的控制, 防止了事故的进一步扩大。

3 湖南电网受灾原因分析

3.1 造成此次事故的气象条件极其罕见

从2008年1月12日开始, 湖南南部地区遭遇

冰冻, 持续时间长达22d, 48个县市经历了当地有气象记录以来最长的连续冰冻灾害。湖南省气象中心对此次冰冻雨雪天气过程的综合评估为: 此次雨雪冰冻天气过程, 综合强度指标堪称新中国成立以来最强。

(1) 地面温度长时间低于 0°C , 易产生强冰冻现象。至1月28日, 长沙已连续半个多月日平均气温接近或低于 0°C , 创历史同期最低。

(2) 降水条件有利, 相对湿度高。今年西南暖湿气流超强, 与东北气流长时间在上空交汇, 湖南降水日数为1951年以来历史同期最多值, 具备持续性雨淞天气产生的降水条件。

(3) 近地面形成了有利于雨淞形成的逆温层。西南和华中地区处在“华南静止锋”及“昆明准静止锋”锋面覆盖下。本次大气层自上而下形成了冰晶层、暖层和冷层。从冰晶层掉下来的雪花通过暖层时融化成雨滴, 进入靠近地面的冷气层时雨滴又迅速冷却, 成为过冷却雨滴, 与导线碰撞时冻结, 形成雨淞。

3.2 覆冰程度大大超出设计容许范围

根据现场调查和分析, 出现倒塔断线事故的原因是输电线路发生超过设计标准的覆冰、舞动。

我国中东部地区输电线路覆冰设计标准大多为 10mm , 局部提高标准后为 15mm 。这次电网受损严重的地区, 覆冰厚度普遍超过 30mm , 很多地区达到 50mm 以上, 使得铁塔、导线的荷载和承受的应力大大超过设计标准, 导致倒塔断线。同时, 由于导线表面覆冰, 使其具有了较适合的空气动力, 容易在大风中发生大幅度舞动, 最终造成塔材脱落、导线断线、铁塔解体。因此, 事故的主要原因在于历史罕见的极端天气使线路覆冰值大大超过了设计标准值。

以复兴—沙坪I回500kV线路为例, 线路位于湘中地区, 全线属丘陵地貌, 海拔高度均在 350m 以下。该线全长 85km , 采用 $4\times\text{LGJ-300/40}$ 导线, GJ-80地线, 全线设计覆冰取 15mm 。1月12日开始, 由于严重覆冰造成4基倒塔、1基铁塔损坏。根据气象台站资料及沿线走访当地居民, 线路所经区域在1954年前后曾发生过较严重覆冰, 电力覆冰均在 $20\sim 27\text{mm}$, 但以后再没有出现过类似的冰冻。根据倒塔现场导线覆冰取样数据, 159号杆塔处覆冰达 50.17mm , 远大于设计覆冰值 15mm , 超过了导地线和铁塔的设计承受能力, 造成导地

线断线和铁塔压垮或自倒。LGJ-300/40 导线覆冰 15 mm 时重量为 27.31 N/m, 覆冰 30 mm 时重量为 559.8 N/m, 覆冰 60 mm 时为 1 136.2 N/m, 也就是说杆塔所承受的导线垂直力大大超过了设计值, 已达到设计值的 4.2 倍。

3.3 输变电设备覆冰闪络分析

输变电设备覆冰闪络^[7-9]可能发生在覆冰期, 也可能发生在融冰期。覆冰闪络电压和覆冰类型、覆冰厚度、表面污秽度以及融冰水电导率、绝缘子串悬挂方式等因素有关。

(1) 不同覆冰类型对冰闪特性的影响。

覆冰有 3 种类型: 雾凇、雨凇和混合凇。已有的试验结果和运行经验表明, 在其它条件基本相同的情况下, 覆冰类型为雨凇时对线路的危害最大, 绝缘子串的闪络电压也最低。从国内线路的冰闪调查情况看, 发生冰闪的线路覆冰类型绝大部分为雨凇和混合凇。因此, 为工程需要, 同时也考虑到线路最恶劣的情况, 覆冰试验研究一般都以雨凇覆冰类型为对象。而由本次覆冰外形和密度等参数可以看出, 本次事故的覆冰类型即为雨凇。

(2) 覆冰量(覆冰厚度)对冰闪特性的影响。

各个研究机构的试验结果表明, 覆冰量影响冰闪电压。覆冰量越大, 覆冰越厚, 冰闪电压越低。当绝缘子串表面被冰柱完全桥接时, 冰闪电压最低。在本次事故中, 绝缘子串覆冰大多呈现冰柱桥接状态, 因此很容易发生覆冰闪络。

(3) 覆冰绝缘子表面污秽度与冰水电导率对冰闪电压的影响。

绝缘子覆冰试验中, 绝缘子表面污秽度与冰水电导率对试验结果影响很大。加拿大、美国、中国等国的试验数据表明, 随绝缘子表面污秽度和冰水电导率的增加, 覆冰闪络电压明显下降。根据现场少量取样测量, 线路覆冰水电导率小于 $50 \mu\text{S}/\text{cm}$, 但现场绝缘子污秽很重。图 5 为 500 kV 湘云线玻璃绝缘子的表面积污情况, 显然大量冰闪与绝缘子表面污秽密切相关。

(4) 绝缘子串悬挂型式对冰闪电压的影响。

在相同覆冰条件下, 不同悬挂类型的绝缘子串其冰闪电压也不同。在同样试验条件下, “V”型串和耐张串的冰闪电压要高于“T”型串。这是由于前 2 种悬挂方式使得绝缘子结冰后很难沿面形成冰桥, 爬电距离受覆冰影响较小, 同时融冰时也很难形成贯通性水膜。因此, 防止冰闪首先要防止绝缘子串冰桥短接, 这主要从串型上来考虑。对于我国



图 5 绝缘子积污情况

Fig. 5 Contamination of insulators

架空输电线路, 推荐在线路覆冰区设计时采用“V”型和耐张串, 以防止冰桥在绝缘子串表面形成短接。迄今为止, 高压线路“V”型和耐张串还没有冰闪事故的报道。

(5) 绝缘子串覆冰闪络实例分析。

交流输电线路发生了大面积覆冰闪络事故, 例如湖南 500 kV 牌长 I 线在 1 月 20 日—23 日发生了 5 次冰闪事故。该段线路绝缘子配置为 28 片(绝缘子结构高度 155 mm), 冰闪区域属于中等污秽区, 绝缘子串覆冰严重, 片间完全被覆冰桥接。根据中国电力科学研究院研究结果, 500 kV 交流 I 型悬垂绝缘子串在重冰区串长应大于 5.13 m, 即需要同类型绝缘子 33 片。现有配置远不能满足要求, 因此发生了覆冰闪络。

3.4 小水电难以保障负荷中心和重要用户的供电

此次冰害暴露出局部区域配电系统分散管理而无法集中化运作的矛盾, 遭遇紧急状况时地方小水电不能保障负荷中心和重要用户的供电。

以冰害严重的郴州地区为例, 该区域与外网相联系 5 回线——城烟线/蓉桐线/龙塘龙线/朝大线/朝线——均有倒塔事故发生。郴州主网装机有东江电厂 500 MW, 鲤鱼江电厂 130 MW, 小水电装机约 300 MW。正常情况下郴州地区负荷约为 400 MW。

在这次冰害事故中, 与外网相连的线路全部倒塔跳闸。而内部电源如鲤鱼江电厂无法自启动, 东江电厂等水电出线全部倒塔, 无法送出, 使得这一地区供电恢复极其困难。这充分说明了小水电难以保障负荷中心和重要用户的供电, 需要进一步加强区域电网的集中化运作管理。

4 结论及建议

(1) 罕见冰雪天气导致湖南电网受灾严重。湖南电网在灾害初期线路冰闪频发, 后转为倒塔、断线, 出现局部电网解列、大面积停电事故。此次

冰害范围广、持续时间长、强度大,造成的后果与社会影响巨大,远远超过2005年局部电网微地形形成的冰害事故。

(2) 需要合理提高输电线路防覆冰设防标准。现有电网防冰设防标准不适应近年来湖南电网抗冰要求,建议在合理划分冰区的基础上有区别地提高骨干线路、跨重要交通线及重要交叉跨越杆塔的防冰等级。

(3) 防冰闪的外绝缘设计有待加强。此次冰害事故前期和中期线路发生了大量绝缘子串冰闪跳闸,需要加强平原与丘陵地区局部污区与重要线路的防冰闪外绝缘配置。

(4) 加强变电站的防冰措施。此次冰害事故危及到变电站,中、重冰区应考虑变电设备的防冰措施,特别是外绝缘与隔离开关的操作。事故后应对站内频繁操作的隔离开关等频繁切合和遭受强送短路冲击的设备加强检查和试验。

(5) 加强区域配电网的集中化运作管理。

(6) 加强对易发冰灾区域的监控,尤其是重点区域的实时监控。

(7) 加强相关技术研究。开展枢纽变电站和重要线路的交直流融冰技术研究,及其它有效防止或减小覆冰的新技术研究,如研发可移动500kV输电线路融冰装置等。此外,还需开展电网大面积冰灾等紧急情况下的调度方式、输变电设备覆冰闪络特性等方面的研究。结合覆冰试验、事故调研、现场监测、系统分析和仿真,全面系统地开展覆冰相关技术研究,提高电网应对突发性恶劣天气的能力。

致 谢

本次冰害调查得到了湖南省电力公司领导 and 科技部、生技部、超高压管理局、调通局、基建部、电力试研院等多个部门和单位的大力支持和帮助,特此致谢!

参考文献

- [1] 李成榕, 吕玉珍, 崔翔, 等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 14-22.
Li Chengrong, Lü Yuzhen, Cui Xiang, et al. Research issues for safe operation of power grid in China under ice-snow disasters[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 14-22(in Chinese).

- [2] 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): 7-13,22.
Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguang, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 7-13,22(in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] 邓健, 肖顺良, 姚璞, 等. 220kV线路融冰方案的改进[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 29-30,45.
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): 29-30,45(in Chinese).
- [6] 中国电力科学研究院. 湖南电网2008年冰雪灾害初步调查报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [7] Li Peng, Fan Jianbin, Li Wufeng, et al. Flashover performance of HVDC iced insulator strings[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1334-1338.
- [8] 李鹏, 范建斌, 李武峰, 等. 高压直流输电线路的覆冰闪络特性[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 74-78.
Li Peng, Fan Jianbin, Li Wufeng, et al. Icing flashover performance of HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 74-78(in Chinese).
- [9] 李鹏, 范建斌, 宿志一, 等. 750kV交流输电线路覆冰区绝缘设计[J]. 电力设备, 2007, 8(3): 24-27.
Li Peng, Fan Jianbin, Su Zhiyi, et al. Insulation design in icing areas for 750kV transmission lines[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(3): 24-27(in Chinese).

收稿日期: 2008-03-24。

作者简介:

张文亮(1954—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和电磁兼容方面的研究, E-mail: wzhang@epri.ac.cn;

于永清(1956—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和电磁兼容方面的研究, E-mail: yuyq@epri.ac.cn;

宿志一(1946—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和输变电设备外绝缘与运行特性方面的研究, E-mail: shuzy@epri.ac.cn;

范建斌(1967—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事高电压技术和输变电设备外绝缘与运行特性方面的研究, E-mail: fanjb@epri.ac.cn;

李鹏(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压技术和输变电设备运行技术研究, E-mail: lipeng@epri.ac.cn。

(责任编辑 沈杰)