

2005年湖南电网冰灾事故分析及其应对措施

黄 强¹, 王家红¹, 欧名勇²

(1. 湖南省电力公司, 湖南省 长沙市 410007; 2. 湖南省电力勘测设计院, 湖南省 长沙市 410007)

Analysis on Accidents Caused by Icing Damage in Hunan Power Grid in 2005 and Its Countermeasures

HUANG Qiang¹, WANG Jia-hong¹, OU Ming-yong²

(1. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, Hunan Province, China;

2. Hunan Electric Power Design Institute, Changsha 410007, Hunan Province, China)

ABSTRACT: The situation of icing damage appeared in Hunan power grid around the Chinese Spring Festival in the year of 2005 and its on-site sampling data are presented. On the basis of topographic features of Hunan Province, the reason why the rain and snow mixed meteorological condition and ice-coating phenomena of transmission lines often appear in Hunan Province and the characteristics of this meteorological condition are analyzed. The statistical analysis on the micro-topographic features for the sectors where the tower failure and broken lines in 220kV and 500kV transmission lines occurred is conducted and the cause of tower failure is researched. According to the comprehensive technical measures to avoid and prevent the icing damage, the countermeasures against the icing damage for both existing and new-built transmission lines are proposed, meanwhile the authors point out that to master the ice-coating situation of transmission lines it is necessary to research the infra-red observation system and remote information transmission system actively.

KEY WORDS: Power system; Hunan power grid; Icing damage; Ice flash; Hard rime; Inequable ice-coating; Longitudinal unbalanced tension

摘要: 介绍了2005年春节前后湖南电网的冰灾情况及现场取样数据,结合湖南的地形特点分析了湖南易形成雨雪冰冻天气的原因及其特点,对220kV、500kV线路发生倒塔断线的区段(点)进行了微地形特征统计分析和倒塔原因分析,根据“避、抗、融、改、防”五字综合技术措施提出了已建线路和新建线路防冰灾事故的应对措施,同时指出为及时掌握电线的结冰情况应积极开展红外仪观测系统和远程信息传输系统的研究。

关键词: 电力系统; 湖南电网; 冰灾; 冰闪; 雨淞; 不均匀覆冰; 纵向不平衡张力

1 引言

2005年2月7日至17日春节前后,一场历史上罕见的雨雪冰冻灾害天气突袭湖南,持续的大强度冰冻使湖南电网遭受了有史以来最严峻的考验,先后发生了电力线路冰闪跳闸、倒塔断线事故。因不堪重负3条500kV线路倒塔24基、变形3基;6条220kV线路倒塔18基、变形9基;其它电压等级线路也遭到了严重破坏。面对恶劣的自然灾害,湖南省电力公司及时启动应急预案,积极采取有效措施组织抢修,同时国家电网公司也迅速组织有关专家亲赴事故现场调查情况,研究对策。在各方的共同努力下,事故得到了有效控制,没有引起电网瓦解。

本文主要结合湖南的气候特点分析此次冰灾事故的原因,并提出电网预防冰灾应采取的措施,以供电网建设运行部门参考。

2 湖南省的气候特点

湖南省的地形似马蹄形,东面是罗霄山脉,南面是南岭山脉,西面是雪峰山脉,唯独北面是开阔的平地 and 洞庭湖,因此寒流可以毫无阻挡地从北面入侵南下,受南岭阻挡,与华南的暖空气交汇易形成静止锋。随着华南静止锋的不断加强,湖南很容易形成阴雨连绵、气温持续偏低的天气,因此电力线路等裸露在室外的物体上极易覆冰。

电力线路上的覆冰通常分为白霜、雾凇、混合凇、雨凇等四类,后两类严重时易引起电力线路冰闪和倒塔断线事故,尤其是雨凇。雨凇是0℃左右或0℃以下的过冷却雨滴落在0℃左右或0℃以下的裸露物体表面时冻结而成的,理论上是透明的清澈

冰，其密度接近纯冰的密度^[1-3]。

湖南的地形特征导致冬季电力线路上的覆冰多为雨淞，从历史统计数据来看，湖南雨淞过程的年际分布为平均每年2.7次，雨淞年占89.3%，每年最多有5~6次雨淞过程，多集中在1、2、12月。根据各事故现场的调查结果和湖南省电力试验研究院的现场取样测算结果可知，此次覆冰属纯冰雨淞，其冰密度均在0.9g/cm³左右。

3 现场取样数据和气象要素

3.1 现场取样实测数据

湖南省电力试验研究院在冰灾现场进行了冰样观测^[1,4]，并将观测数据换算成密度为0.9g/cm³的标准冰厚和实测冰密度，如表1所示。

表 1 现场实测覆冰数据
Tab. 1 The measured field ice-coating data of transmission lines

取样点	测试日期	导线标准		地线标准		海拔高程 m
		冰厚 mm	冰厚 mm	冰密度 g/cm ³	冰密度 g/cm ³	
岗云线175 [#] ~176 [#]	2月13日	25.8	28.0	0.91	250.0	
复沙一回21 [#] ~22 [#]	2月14日	27.5	29.9	0.91	230.0	
五民线325 [#] ~326 [#]	2月15日	24.0	25.2	0.91	380.0	
五民线353 [#]	2月16日	42.4	43.7	0.90	620.0	
柘民线193 [#] ~194 [#]	2月19日	21.5	24.7	0.91	476.3	
柘民线201 [#] ~202 [#]	2月19日	41.4	—	0.90	579.9	
柘民线202 [#] ~203 [#]	2月19日	—	41.2	0.90	579.9	
黄桃线150 [#]	2月20日	67.8	—	0.90	554.0	
平阳线278 [#]	2月18日	—	—	0.88	561.2	
田上线222 [#] ~223 [#]	2月18日	—	—	0.81	472.4	

3.2 气象要素

根据桃江与益阳气象站的资料，冰灾期间的相关气象要素如表2所示。

表 2 2005年2月冰灾过程中的气象要素
Tab. 2 The meteorological factors during the icing damage in February, 2005

日期	桃江(海拔高程42m)				益阳(海拔高程45m)				海拔 200m	海拔 600m
	平均 气温 ℃	相对 湿度 %	平均 降水量 mm	平均 风速 m/s	平均 气温 ℃	相对 湿度 %	平均 降水量 mm	平均 风速 m/s		
2月6日	1.1	95.5	0.7	2.0	0.8	98.1	2.0	2.0	-0.1	-1.9
2月7日	0.4	93.2	4.6	2.0	0.3	96.0	4.7	0.7	-0.6	-2.4
2月8日	0.9	92.2	1.8	1.0	0.8	93.5	2.2	0.0	-0.1	-1.9
2月9日	1.3	94.2	15.2	2.3	1.1	97.4	16.0	2.0	0.2	-1.6
2月10日	0.6	93.3	0.0	1.0	0.9	94.8	0.0	1.0	0	-1.8
2月11日	1.0	96.0	10.7	1.7	0.8	97.8	10.6	0.7	-0.1	-1.9
2月12日	0.2	95.0	19.8	1.3	0.3	95.7	19.8	0.7	-0.6	-2.4
2月13日	0.5	96.0	24.0	0.3	0.6	96.4	27.6	0.0	-0.3	-2.1
2月14日	1.2	96.7	23.1	1.3	1.4	98.6	56.3	0.0	0.5	-1.3
合计			99.8				139.2			

由表2可见，在冰害线路所在区域尤其是在海拔200m以上的地区，气温在-2℃~0℃，相对湿度在90%以上，风速约为2m/s，具备了雨淞形成与发展的理想条件。

4 冰灾段微地形特征统计分析

湖南省电力勘测设计院对发生倒塔、变形的220kV、500kV线路的18个区段(点)的微地形特征按路径走向、杆塔位置、地形特征、高程分布进行了分类统计，如表3所示。

表 3 冰害线路微地形特征分类统计表

Tab. 3 The categorized statistics of micro-topographic features for transmission lines which are damaged by ice

序号	环境特征	数量	比例/%
1	西→东	6	33.3
	西北→东南	9	50.0
	北→南	3	16.7
	与主导风向交角大于45°	14	77.8
2	山顶	4	22.2
	北坡	6	33.4
	南坡	4	22.2
	其它	4	22.2
3	连续上下山	18	100
	300m及以下	16基	7.4
	300~400m	5基	7.4
4	400~500m	9基	18.5
	500~600m	11基	29.6
	600m及以上	10基	37.1

根据表3的分类统计结果和现场情况可以发现线路倒塔、变形区段的一些微地形特征的共同点：

- (1) 多数线路路径的走向与冬季主导风向的夹角大于45°。
- (2) 北坡线路覆冰较南坡严重。
- (3) 相对高耸的山顶处的线路覆冰较严重。
- (4) 倒塔、变形的线路所在的地形均为连续上下山，高程集中在200~650m之间，高程越高覆冰越严重。
- (5) 靠近河流、湖泊、风口的线路覆冰较严重。

5 冰灾原因分析

以往湖南的110kV~500kV电力线路根据气象台(站)的历史统计资料和工程运行经验设计覆冰取值一般为15mm，个别地段设计覆冰取值为20mm。根据《110kV~500kV架空送电线路设计技术规程》^[5]，按设计覆冰15mm设计的杆塔可不考虑不均匀覆冰时的纵向不平衡张力。而从本次线路冰害区段(点)的现场情况和附近气象台(站)(海拔高程在80m以下)当时的冰情观测资料来

看，在平地田垄中无明显结冰，而在山丘上有明显的覆冰分界线，在分界线以上高程越高覆冰越严重，因此电力线路在连续上下山时杆塔两侧存在严重的不均匀覆冰。事故地段的倒塔多数是塔头顺线路方向倾倒也证明了这一点。

为分析引起线路倒塔、断线的原因^[6-9]，湖南省电力勘测设计院对事故杆塔进行了模拟强度的理论计算^[10-12]，若不考虑纵向不平衡张力的影响，即使电线上的覆冰厚度比设计覆冰厚15~30mm，理论计算结果也是杆塔不会发生倾覆；但计及纵向不平衡张力（电线最大使用张力的5%~20%）时，杆塔承受冰荷载的能力迅速下降。因此，笔者根据现场实测冰样数据和目测冰厚随高程变化的情况对不均匀覆冰的纵向张力差进行了模拟计算。

以岗云线173[#]~180[#]为例，对线路各档电线均匀覆冰（15mm覆冰）和不均匀覆冰情况下所产生的不平衡张力差进行模拟计算，计算结果如表4和表5所示。其中，高差是指相邻杆塔地面高程差；档距是指相邻杆塔间的距离；张力差是指杆塔两侧电线张力的差值；百分比是指电线张力差与电线最大允许使用张力的比值百分数；串偏移是指绝缘子串的偏移值；偏移角度是指绝缘子串偏移后与垂线的夹角。

由表4和表5的模拟计算结果可见，均匀覆冰时电力线路因连续上下山产生的纵向不平衡张力差小于5%；但发生不均匀覆冰时电力线路的纵向不平衡张力差可以达到20%左右。

因此，发生本次冰灾的主要原因是电线上的覆冰厚度远超过设计冰厚，并且存在随高程变化的严重梯级覆冰产生的纵向不平衡张力远超过杆塔设计荷载的情况。

表4 均匀覆冰情况下电线纵向不平衡张力计算结果
Tab. 4 Calculation results of longitudinal unbalanced tension of transmission lines with equable ice-coating

线路运行号	高差 m	档距 m	冰厚 mm	张力差 N	百分比 %	串偏移 mm	偏移角度 (°)
173	49.3	548	15	—	—	—	—
174	76.9	355	15	-1331.9	-1.0	-200	-2.21
175	35.3	334	15	-341.2	-0.2	-33	-0.36
176	-20.8	231	15	1418.7	1.0	127	1.40
177	0.7	571	15	2068.7	1.5	326	3.60
178	-46.4	755	15	2950.8	2.1	186	2.05
179	24.9	247	15	-1586.3	-1.1	-243	-2.68
180	—	—	—	—	—	—	—

表5 不均匀覆冰情况下电线纵向不平衡张力计算结果
Tab. 5 Calculation results of longitudinal unbalanced tension of transmission lines with inequable ice-coating

线路运行号	高差 m	档距 m	冰厚 mm	张力差 N	百分比 %	串偏移 mm	偏移角度 (°)
173	49.3	548	5	—	—	—	—
174	76.9	355	15	10818.5	7.7	2396	27.43
175	35.3	334	30	35850.1	25.7	2407	27.57
176	-20.8	231	30	14870.8	10.6	784	8.67
177	0.7	571	25	7297.4	5.2	603	6.66
178	-46.4	755	15	-32750.8	-23.4	-1571	-17.58
179	24.9	247	15	-784.3	-0.6	-114	-1.26
180	—	—	—	—	—	—	—

6 应对措施

为防止冰害冰灾的发生，1976年我国就制订了“避”、“抗”、“融”、“改”、“防”五字综合技术措施^[1,13,14]，笔者结合本次冰灾的特点又提出了以下几点建议。

(1) 防冰闪措施

湖南电网以往多采取在悬垂绝缘子串中每隔3~4片绝缘子插入一片大盘径空气动力型绝缘子的“插花”措施来预防冰闪，但这次冰灾事故证明这种措施有一定的局限性。因为同样采取这一措施的岗云线和五民线的防冰闪效果不同，岗云线处于丘陵地区，山上观测风速为4~5m/s，发生了冰闪；而五民线处于山区，覆冰更严重，山上观测风速为12m/s，却没有发生冰闪。因此，可初步确定这种防冰闪措施的效果与风速有关，有待进一步研究。

根据多年运行经验可知，电力线路冰闪多发生在冰凌融化时，为防止冰凌融化时的冰水顺绝缘子串下流引起冰闪，有效的解决方法是将绝缘子串斜挂，即采用“倒V”串或V串。

因此，笔者建议已建线路可进行“插花”或根据地形进行“倒V”串改造，新建线路可采用三相V串来预防冰闪。

(2) 防冰灾措施

1) 已建线路防冰灾措施

对本次事故中发生倒塔、断线的地段应优先采取改道方案，避开覆冰严重的地段，不能改道的提高一级冰厚设计以提高抗冰能力。对没有发生倒塔、断线但覆冰严重的地段，采取增设耐张塔、缩

短耐张段长度和将连续上下山的变坡位置的直线塔改造成能承受纵向不平衡张力的直线塔等措施,从而提高线路的抗冰能力和限制事故发生的范围。

2) 新建线路防冰灾措施

新建电力线路在选择路径时应优先避开易发生严重覆冰的微地形地段,如无法避让则采取措施提高线路的抗冰能力,如采用方形塔身的铁塔;根据地形特点采用能承受纵向不平衡张力的直线铁塔(一般冰区导线纵向不平衡张力取最大使用张力的10%~20%,地线纵向不平衡张力在导线纵向不平衡张力的基础上适当提高)、缩短耐张段长度等措施。

3) 融冰措施

对220kV及以下电压等级的电力线路可优先考虑采取融冰措施,加强对电力线路的冰情观测。对500kV电力线路应加强对融冰方案和措施的研究。

4) 建立观冰哨

由于这次冰灾区域的气象台(站)一般设在城郊,海拔高程较低(一般低于80m),而冰情观测点又设在海拔1000m以上的高山上,导致海拔高程为150~650m的区域属气象观测的盲点,几乎没有可供电力线路设计参考的资料。因此,为保证电力线路的安全可靠、经济实用和运行维护方便以及制定措施及时准确,湖南省电力试验研究院正在对全省范围内已投运的电力线路设置有代表性的观冰哨,收集不同海拔高度、不同地形条件下的冰情观测资料,为将来的科学决策奠定基础。

5) 新技术手段

为了及时准确地了解现场情况,湖南省电力公司正在组织开展利用红外外观测电线、杆塔上的冰情和远程信息传输系统的研究,以便掌握电力线路上的冰情发展情况,及时采取预防措施。

7 结论

(1) 湖南省的地形特点决定了北方寒流容易侵入湖南,形成冰冻天气,导致电力线路极易覆冰。

(2) 湖南电网电力线路的覆冰多为雨淞,密度高。

(3) 此次冰灾主要发生在益阳、娄底、怀化地区,海拔高程在150m以上且相对突出和高耸的地段覆冰较严重,且梯级覆冰明显。

(4) 根据线路所在区域的地形特点,可采取“插花”、“倒V”串、V串等措施来防止冰闪。

(5) 为提高线路的抗冰能力,可采用方形塔

代替矩形塔,在连续上下山的变坡位置设置能承受纵向不平衡张力的铁塔。

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.
- [2] 王守礼, 李家恒. 电力气候[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [3] 王守礼. 影响电线覆冰因素的研究与分析[J]. 电网技术, 1994, 18(4): 18-24.
Wang Shouli. Study and analysis of the factors affecting wire ice coating[J]. Power System Technology, 1994, 18(4): 18-24.
- [4] Teucher K F. Development of field measurement techniques and data analysis for transmission line icing[C]. Proceedings of 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Japan, 1990: A1-4.
- [5] DL/T 5092-1999, 110kV~500kV架空送电线路设计技术规程[S].
- [6] 胡毅. 输电线路大范围冰害事故分析及对策[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 14-15.
Hu Yi. Analysis and countermeasures for large area accident caused by icing on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 14-15.
- [7] 黎湘康, 魏长喜. 500kV二普三线不均匀覆冰的影响及对策[J]. 四川电力技术, 2002, (2): 21-22.
- [8] 刘亚新, 贾雷亮. 山西220kV赵七线倒塔事故分析[J]. 电力设备, 2005, 6(8): 55-57.
Liu Yaxin, Jia Leiliang. Accident analysis of tower failure in 220kV Zhaoqi line in Shanxi[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(8): 55-57.
- [9] 姚茂生. 葛双II回覆冰断线倒塔事故的原因分析[J]. 华中电力, 1995, 8(4): 60-63.
- [10] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [12] Farzaneh M, Drapeau J F. AC flashover performance of insulators covered with artificial ice[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 1038-1051.
- [13] 许源, 刘人玮, 李军. 湖南电网防冻融冰体系改革之探讨[J]. 湖南电力, 2003, 23(5): 24-27.
Xu Yuan, Liu Renwei, Li Jun. Discussion of the freezing preventing and ice melting system for Hunan electric grid[J]. Hunan Electric Power, 2003, 23(5): 24-27.
- [14] 张晓东. 输电线路重冰区抗冰设计探讨[J]. 湖南水利水电, 2001, (1): 39-40.

收稿日期: 2005-11-24.

作者简介:

黄强(1962-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网规划、电力系统自动化等方面的研究;

王家红(1959-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力规划、电网工程技术等方面的研究;

欧名勇(1965-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事高压送电线路的设计和研, E-mail:oumy@hepdi.com.