

文章编号:1671-6833(2013)01-0103-05

# 微地形和小气候区线路覆冰影响因素分析及工程实例

康基伟

(河南电网建设管理公司,河南 郑州 450000)

**摘要:**微地形和小气候参数对电网建设及安全具有重要意义.阐述了覆冰特点及成因,分析了微地形和小气候区线路覆冰事故的特征,提出了防治同类冰灾事故重演的措施,以期对我国远距高电压等级输电线路覆冰事故的预防及电力系统稳定、坚强运行提供参考依据.

**关键词:**微地形;小气候;海拔;温度;输电线路;覆冰

**中图分类号:** TM75

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.025

## 0 引言

2008年初,全国各地尤其是南方数省遭遇了罕见雨雪冰冻灾害,给电力系统的安全运行带来了重大灾难.此次冰灾中,华中、华东、华南、西南均出现了输电线路倒塔、断线、断股、金具损坏等严重事故,尤其是220 kV及500 kV线路由于输电距离远,沿线周围环境复杂多样,输电走廊跨经河流、峡谷、高山林区等微地形和小气候区,受损情况尤为严重.国家西电东送战略深层推进,届时会有更多电力线路跨越河流、峡谷、高山林区等微地形和小气候区,这些区域往往存在诱发覆冰的因素,在必要的地段若不采取加强措施,实际覆冰厚度将超出设计标准,造成电网安全隐患.因此,在线路规划、设计、建设、运行、维护中需重点考虑微地形和小气候区的特殊性,在这方面进行分析研究也是十分必要的,期望为提升电网御冰能力提供理论依据,减少恶劣气象条件下重大冰灾事故的发生.

## 1 覆冰的成因及分类

输电线路的覆冰受诸多因素的影响<sup>[1]</sup>,比如:温度、湿度、风速及风向、冷暖空气对流、环流、海拔高程、线路直径、电场及负荷电流等气象因素、地形因素以及导地线自身因素.当大气中的过冷水滴在下落或随风漂移的过程中与低于0℃的输电线路表面碰触并被捕获时将迅速凝结成冰,这就是输电线路的覆冰.

我国地处东南亚季风区,气候现象复杂多样,气温、降雨、风速及风向等随地区变化大.在华中、西南及西北地区由于受大气环流的影响,每年来自西伯利亚地区的大规模冷湿气流会大范围扑袭这些地区并造成复杂且严重的冰情.当冷锋过境时,风速加剧,温度猛降,冲入我国华中及西南地区的暖湿环境后,冷暖气团相互碰撞推挤,较轻的暖湿气团被迫上升,较重的冷气团沉降,覆盖近地面物体,外层高空大气呈低温环境,水以冰晶态存在.当冰晶由高空大气进入暖气团时融化为水,再进入近地面过冷环境时迅速释放热量成过冷却水滴,与低于0℃的线路碰触时凝结成冰,形成覆冰.气象资料显示我国南方冬季寒冷且风力强、雾气重、雨滴大,总会出现短时的雾凇或雨凇天气,平均持续3~15 d.时间虽短,但其突发性给整个电力网带来的危害却不容忽视<sup>[2-4]</sup>.

覆冰按形成条件及性质可分为雨凇、雾凇、混合冻结三类,如表1<sup>[5-9]</sup>所示.

## 2 微地形和小气候因素对覆冰的作用机理及典型实例

### 2.1 微地形对覆冰的影响及典型实例

微地形特征<sup>[10]</sup>: (1)地形突出,比周围地形明显更高(特别是相对于迎风面); (2)迎风面一侧较大范围的地域内,海拔高程处于相比较低的范围内.常见因素有山脉走向、垭口、中山台地、山脊以及水汽含量等.

收稿日期:2012-10-03;修订日期:2012-12-06

作者简介:康基伟(1984-),男,河南郑州人,硕士,主要从事高压输电线路在线监测,E-mail:jiwei821@163.com.

表 1 不同类型覆冰的性质  
Tab.1 The features of different types of ice

类型	外观	黏附力	密度/(g·m <sup>-3</sup> )	环境温度/℃	导线温度/℃	危害
雨淞	透明	很强	0.6~0.9,坚硬	-6~2	-3~2	严重
粒状雾淞	暗白色不透明	弱	0.1~0.5,较脆	-7~2	-3~2	较轻
晶状雾淞	白色结晶	较弱	0.01~0.05,脆软	-7~2	-3~2	较轻
湿雪	乳白或灰白色	较弱	0.2~0.4,质软	-13~2	-7~2	较重
混合淞	乳白色	强	0.2~0.6,气隙多	-13~2	-7~2	较重

注:0℃以上仍有覆冰是之前导线覆冰的残存,该正温度由之前冰厚及实时气象参数决定.

在高山大岭中,线路覆冰受地形影响较大.如:贵州 220 kV 鸡江Ⅱ回线路,东有海拔 1 500 m 以上的大山,西临水源,冬季来自北方的冷空气在此受阻,又有充足水汽,自投运以来,重覆冰事故多有发生;湖北 500 kV 葛双Ⅱ回线路的#231~#237 段地形抬升,跨越海拔近 500 m 的山顶,在 1993 年 11 月、1994 年 11 月连续两次发生覆冰倒塔断线事故,也受其特殊地形条件影响.2008 年

冰灾事故中,云南 500 kV 宣威曲靖线#178~#179 附近 800 m 范围内有多个水库,冬季雾大、风大、空气潮湿,#169~#185 位于大德基东北至西南风槽垭口带,气温低于 0℃时,在冷气流作用下覆冰也多次发生<sup>[11-13]</sup>.

我国输电线路覆冰伴随有显著的微地形特征,如表 2<sup>[2,11]</sup>所示.

表 2 典型微地形分类及地貌特征  
Tab.2 Sorts and topographic features of typical micro-terrain

类型	特点	典型实例
垭口型	在绵延的山脉形成	贵州 110 kV 羊盘线的黑山垭口、纸厂垭口、凉山垭口,江西井冈山盐山垭口等
高山分水岭型	线路翻越分水岭处,地形空旷开阔	湖南 110 kV 拓乡线羊古岭段,陕西秦岭,河南南阳伏牛山老界岭等
水气增大型	线路临近较大的江湖水体,水汽大	江西梅岭(鄱阳湖),云南昆明太华山(滇池)等
地形抬升型	在平原或丘陵中拔地而起的突峰或盆地中一侧较低另一侧较高的台地及陡崖	贵州 220 kV 鸡江 I、II 回苗岭段,110 kV 久新线苗岭段等
峡谷风道型	线路横跨峡谷	云南 110 kV 六平线#36 杆南盘江峡谷,湖北 220 kV 荆~双 I 回汉江峡谷等

2.1.1 山脉走向及坡向因素

受季风气候影响,我国冬季风向多为北风或西北风,当山脉呈东西走向,与风向大致垂直时,在迎风坡形成强势阻挡,使冷气团移动缓慢,局部出现冷湿环境,加重覆冰程度,如贵州 220 kV 鸡江 I、II 回,110 kV 久新线以及多条 35 kV 线路经过苗岭山脉南坡,地处迎风段,冬季覆冰严重<sup>[11]</sup>.

2.1.2 山体结构(风道、山脊、垭口)因素

山脊、垭口地段易形成严重覆冰,此情况多集中在两湖、四川和云贵山区,如湖北荆门汉江风道,东西两侧分别为大别山尾脉和秦岭尾脉,每到冬季北方寒冷气流都持续强力地涌向这里,迫使该地区的暖气团持续抬升,形成重覆冰;云南 220 kV 者昭Ⅱ回,位于西南向东北走向山脉段,#97~#99 耐张段地处垭口,气温低,湿度大,易覆冰<sup>[12-13]</sup>.

2.1.3 地表水体因素

临近江河、湖泊和水库的地方,空气水分充足,线路覆冰严重,如江西梅岭比邻鄱阳湖;安徽黄山南靠长江;云南梁山两面临湖;湖南雪峰山北对洞庭湖.这些区域水汽充足,浓雾覆盖,冬季覆冰极易形成<sup>[2]</sup>.

2.1.4 海拔高度因素

某范围内,覆冰厚度与海拔高度大致呈正比关系.海拔愈高,覆冰愈易,冰愈厚,且多为雾淞;反之,则不易结冰,冰厚薄,且多为雨淞或混合淞.这是由于随海拔的升高,风速及水雾密度均随之增大所致.某一环境下开始结冰的海拔高度称为凝结高度.在我国,线路覆冰凝结高度的地域特点是西高东低,北高南低.在凝结高度点以上,覆冰随海拔的升高而增厚<sup>[6]</sup>.

前苏联学者布琴斯基提出了顿巴斯地区覆冰

平均直径和海拔高度的经验关系<sup>[11]</sup>:

$$D = a_i e^{b_i h} \tag{1}$$

式中: $D$  是覆冰直径 mm; $h$  是海拔高度 m; $e$  是自然对数底; $a_i$ 、 $b_i$  是随覆冰类型和地区而变化的系数. 该地区雾凇覆冰时  $a_i = 7.76$ ,  $b_i = 0.32$ ; 雨凇覆冰时  $a_i = 4.47$ ,  $b_i = 0.0037$ .

前苏联顿巴斯地区与我国恩施地区海拔高度与覆冰厚度的关系<sup>[11]</sup>见图 1 与图 2.

传统认为,我国线路重覆冰区集中在西南海拔 1 000 ~ 1 500 m、华东海拔 700 m 及以上、湖南海拔 600 m 及以上地区. 但湖南洞庭湖平原海拔 150 ~ 600 m 处也发生了严重覆冰,这启发我们对海拔与覆冰的关系需要重新认识和研究<sup>[14]</sup>.

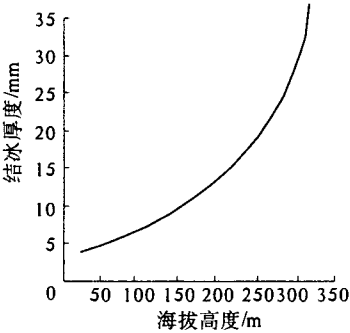


图 1 顿巴斯地区覆冰厚度与海拔高度的关系  
Fig.1 The relationship between ice thickness and elevation in Donets

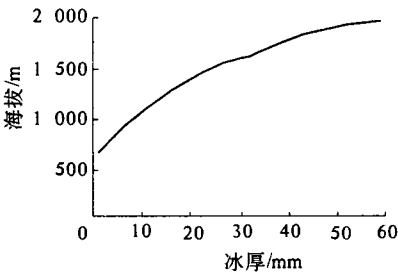


图 2 恩施地区覆冰厚度与海拔高度的关系  
Fig.2 The relationship between ice thickness and elevation in Enshi

2.1.5 全封闭或半封闭的盆地、水库坝区的冷湖效应

由于盆地和坝区地形的封闭性,冷湿气流一旦入侵,没有消散通道,会长期回环滞留,后续冷湿气流也会继续不断的补充进来,造成该区域的持续低温、潮湿,形成局部范围的“冷湖”. 输电线路跨越“冷湖”,会产生较严重的雨凇、雾凇覆冰,如四川夹金山尾脉的二郎山区域、云贵高原向湘西丘陵过渡的三穗县、云南西北部横断山脉的德钦县、整个湖南省地区(从东南西三面向北倾斜

开口的马蹄形状)<sup>[4,11]</sup>.

2.1.6 人工营造的微地形因素

通过改变局部地表的状况,可形成人工微地形. 防护林以连片林地、林带或林网形式营造,利于防风阻风,改道风向,使水气的移动速度大大降低,输送距离明显缩短,从而使输电线覆冰形成条件减弱,覆冰发生几率降低及厚度减小. 经研究,林木种类、高度、面积、密度、排列方式及营造方法等决定着防护林的防护效应. 有资料<sup>[2]</sup>显示,林带对覆冰有着良好的防护效应,如表 3 所示.

结合三北防护林有关资料<sup>[15]</sup>分析得,当林带偏角 0°时,防风效应最好,偏角越大,效果越差;偏角 30°以内效能降低不显著,但超过 30° ~ 45°时效能降低很快.

表 3 林带对覆冰的防护效应				
Tab.3 The effect of tree belt on preventing icing				
覆冰类型	偏角/(°)	冰重/(g · m <sup>-1</sup> )		防风效应/ %
		未防护段	防护段	
雨凇	0	40	20	50
	30	130	90	31
	80	17	15	12
雾凇	0	120	30	75
	45	100	60	40
	90	57	55	4

注:风与林带交角的余角称为林带的偏角.

2.2 小气候对覆冰的影响及典型实例

影响线路覆冰的气象因素主要有 4 种,即环境温度、环境湿度、风速及风向、过冷却水滴直径等<sup>[2]</sup>. 它们的综合作用决定了线路的覆冰状况. 覆冰的形成因素虽然众多,但以下条件<sup>[5]</sup>必须具备:①低温(气温及导线温度必须低于 0℃);②强湿度(相对湿度 > 88%);③风速 0 ~ 7.5 m/s;④风向与线路方向垂直偏约 ± 50°范围.

另外,水滴直径也是覆冰程度的重要制约因素. 理论上,导线有一个最大覆冰直径,当导线超过该直径值后,导线将不会覆冰. 导线最大覆冰直径与  $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$  之积成正比,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为过冷却水滴与导线接触时的碰撞率、捕获率及冻结系数. 其中,碰撞率与导线直径成反比,与水滴半径的平方及风速成正比,因此较大直径的水滴易在导线上形成覆冰<sup>[16]</sup>. 所以,过冷水滴直径对线路覆冰的影响是必须考虑的.

英国气象局对覆冰与气象因素的关联性进行了研究<sup>[17]</sup>,根据试验数据,经过相关性的数学拟合,分别推导出了导线覆冰厚度与温度、湿度及风

速中的某一单一因子数学关系式.

覆冰厚度  $T$  与环境温度  $t$  的关系如公式(2)

所示:  $T = -2.191\ 9t - 7.118$ ;

相关系数  $R = 0.562\ 8$ . (2)

覆冰厚度  $T$  与环境湿度  $h$  的关系如公式(3)

所示:  $T = -0.844\ 9h + 77.616$ ;

相关系数  $R = 0.435\ 0$ . (3)

覆冰厚度  $T$  与环境风速  $w$  的关系如公式(4)

所示:  $T = -0.288\ 8w + 9.487\ 1$ ;

相关系数  $R = 0.257\ 9$ . (4)

鄂西地区线路覆冰速度与温度的曲线关系<sup>[2]</sup>如图 3 所示.

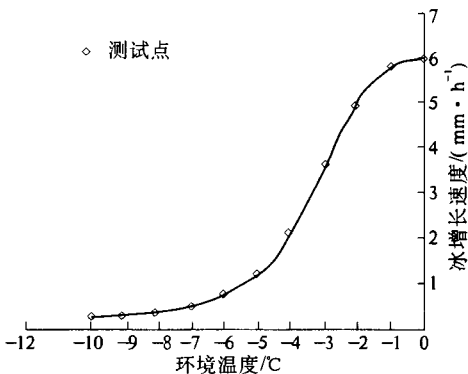


图 3 覆冰增长速度与温度关系  
Fig.3 The relationship between temperature and growth rate of ice

由于覆冰是受多种因素共同作用的,从单一因子去拟合求解是不准确的,相关性较差,无法用于实际的分析计算.因此需要建立一个包含温度、湿度、风速等多气象参数在内的数学模型,以提高各个气象因素与覆冰的相关系数,进而能够对覆冰厚度做出正确的分析和判断.根据湘西地区历年覆冰记录,提出覆冰厚度与风速、温度间的经验关系<sup>[11]</sup>,如公式(5)所示.

$$T = 0.785\ 87n(tv)^{1.679\ 24}. \tag{5}$$

式中:  $T$  是覆冰厚度, mm;  $n$  是持续冰冻天数;  $t$  是环境温度, ℃;  $v$  是风速, m/s.

湘西地区线路覆冰与环境温度、风速的数据统计如表 4 所示.

特别指出,传统认为:覆冰成长快慢与导线表面的水汽接收率有关,即覆冰速度与风速成正系数相关.现场观测表明<sup>[2]</sup>,导线覆冰成长速度并不与风速完全成正比,如图 4 所示.

输电线路覆冰除受前述各微地形、小气候因素约束外,还受季节因素和线路自身导线的影响<sup>[5]</sup>.如:(1)导线刚度;(2)导线直径;(3)导线

载流及周围电场强度.

表 4 不同综合条件下的覆冰情况

Tab.4 Icing status in various conditions

覆冰均厚/mm	环境温度/℃	平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )
14.68	-6.00	8.31
6.90	-5.00	6.60
3.54	-4.11	6.49
4.13	-3.00	6.27
3.98	-2.00	4.69
3.07	-1.05	5.18
2.70	0.00	5.06

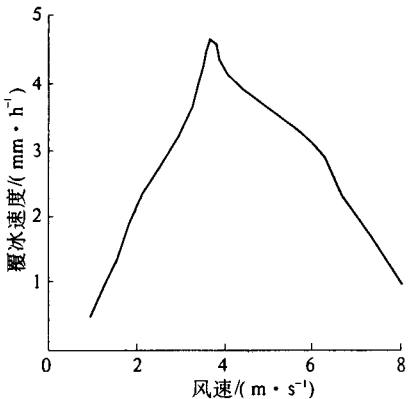


图 4 湖北西部近 40 a 数据统计  
Fig.4 Nearly 40 years' statistics in western Hubei

3 防治措施

3.1 逐步完善微地形和小气候区覆冰原始资料的积累及整理

有关微环境的历史资料还很匮乏,不同微环境下覆冰的成长形状和密度各不相同,全国范围内微地形和小气候区的划分以及相关基础数据的收集问题亟待解决.基础数据的收集对线路冰灾原因的分析、防冰措施的选择、除冰技术的研究、抗冰方案的设计都是不可或缺的.因此,典型微环境区应设立观冰哨,收集和整理输电线路微地形、小气候特征覆冰的原始数据,逐步建立完善的基础数据库,并加强测量人员的技术培训和数据采集设备的改进,以提高原始数据的可信性,为新建线路规划及已投运线路改造提供可靠的气象依据.

3.2 规划微环境下的特殊抗冰方案

2008 年,华中、华东、华南以及西南大范围内出现覆冰倒塔、断线事故.通过具体分析,发现云南、贵州、湖南等多地区的输电线路覆冰事故具有微地形、小气候的显著特征,比如云南曲靖 8 个县市<sup>[13]</sup>,后据现场勘查,该地区输电线路受灾地段线路覆冰厚度均超过设计值,部分地段甚至超过

设计值两倍之多,充分带有微地形、小气候特征。若全面提高线路设计标准,则可能造成不必要的资源浪费。鉴于此,今后线路规划及设计时应充分考虑该因素的影响,在总体设计标准的基础上重点加强高海拔、大湿度、低气温、大档距、强风口等微环境下的局部抗冰设计。

### 3.3 加强微地形和小气候区气象参数的动态监测

在因微环境引起覆冰事故的多发地段,应加强气象条件的实时监测,从而快速准确的掌握线路异常情况,合理有效的采取抗冰措施,防止冰灾隐患于未然。

### 3.4 进一步开展导线覆冰与各地形参数、气象参数的关联性研究

现有对覆冰机理的解释均建立在既有经验公式和数学模型上,各地形参数、气象参数并没有得到很好的拟合,这些理论模型推演结果与运行实际还存在较大差距。可在这方面做进一步的研究,以期在制定防冰、抗冰方案时具有指导意义。

## 4 结论

我国是个幅员辽阔、地形复杂、气候多样的国家,这决定了我国微地形区、微气象点广泛分布,历年来的冰灾事故分析表明微地形、小气候因素对输电线覆冰均有不同程度的不利影响,随着我国特高压电网持续建设,输电线路将跨度更远,走廊将分布更多的微气象点、途径更多微地形区,笔者对微地形、小气候区特征的有关分析,将为规避线路覆冰事故提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] 欧阳丽莎,黄新波,李俊峰,等. 1000kV 特高压输电线路覆冰区的研究与划分[J]. 高压电器,2010,46(5):4-8.
- [2] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [3] 李庆峰,范峥,吴穹,等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术,2008,32(9):33-36.
- [4] 黄志洲. 区域覆冰气候背景[C]//2008年自然灾害对电力设施的影响与应对研讨会论文集. 北京:中国国家委员会,2008:340-345.
- [5] 阳林,郝艳捧,黎为国,等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术,2010,36(3):775-781.
- [6] 赵芳良,马芳. 输电线路覆冰原因分析及对策研究[J]. 电力安全技术,2010,12(6):31-35.
- [7] 廖祥林. 导线覆冰性质分类和密度浅析[J]. 电力建设,1994,15(9):17-25.
- [8] 苑吉河,蒋兴良,易辉,等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术,2004,30(1):6-9.
- [9] FARZANEH M, BAKER T. Insulator icing test methods and procedures[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003,18(4):1503-1515.
- [10] 黎新吉. 简析“微地形”对送电线路覆冰的影响[J]. 农村电气化,1998(01):12.
- [11] 何永达. 导线覆冰与温度、风速之间的关系初探[C]//第五届输配电技术国际会议论文集. 北京:中国电力企业联合会,2005:221-229.
- [12] 方国和,沈杰. 荆门微气象区域输电线路设计覆冰研究[J]. 湖北电力,2005,29(增):20-24.
- [13] 云南电网公司曲靖供电局. 曲靖电网2008年冰灾受损输电线路分析[M]. 云南:云南科技出版社,2009.
- [14] 易辉. 湖南电网冰害事故天气成因分析[J]. 电力设备,2005,6(7):37-39.
- [15] 代力民,王宪礼. 三北防护林生态效益评价要素分析[J]. 世界林业研究,2000,13(2):47-50.
- [16] 蒋兴良,张丽华. 导线覆冰碰冻率及最大覆冰直径分析[J]. 中国电机工程学报,1999,19(9):1-12.
- [17] 黄新波,孙钦东. 线路覆冰与局部气象因素的关系[J]. 高压电器,2008,44(4):289-294.

## Analysis of Ice-covering Transmission Line in Micro-terrain and Micro-climate Region

KANG Ji-wei

(Henan Power Grid Construction Management Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The parameters of microtopography and micro-climate are of great significance for the construction and safety of the power grid. This paper sets forth the characteristic and cause of formation icing, analyzes the characteristic of accidents concerning covering ice on the lines in the microtopography and microclimate District, and gives the measure that prevents and cures the similar disaster accident of formation icing replays. The research results will provide the reference for the transmission line covers ice taking precautions against accident to distant span of our country high voltage grade for the stability of the electric system.

**Key words:** micro-terrain; micro-climate; elevation; temperature; transmission line; icing