

# 南方地区电网覆冰事故分析及应对措施研究

赵永生, 王富荣, 赵德奎, 张鹏远

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**根据 2008 年初中国南方地区电网遭受冰害事故统计和调研情况,从覆冰机理、电网设施本身出发,分析了造成这次大面积冰害事故的原因。将国内外有关输电线高度订正系数的算法进行了比较分析,并对高度、线径系数进行了细化以便实现较好的经济技术效应。结合本次电网冰害事故所反映出的问题,提出了输电线路覆冰事故防治措施。

**关键词:**电网;输电线路;覆冰计算;防冰

**Abstract:** According to the statistics and investigation of the icing accident afflicted South China in the beginning of 2008, the causes of the icing in large area are analyzed as viewed from the mechanism of ice coating and the facilities of power grid. The algorithms about the revised coefficient of the height of transmission lines are compared, and the coefficients of height and wire diameter are refined for getting a better economic-technological effect. In combination with the problem reflected from the icing accident, some anti-icing measures are presented for transmission lines.

**Key words:** power grid; transmission line; ice coating calculation; anti-icing

**中图分类号:** TM731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)05-0013-04

## 0 引言

2008 年 1—2 月的持续低温、雨雪冰冻天气对中国南方地区电网造成极其严重的破坏,给国民经济造成极大的损失。这次冰灾持续时间之长、影响范围之广、覆冰强度之大、危害程度之深实属历史罕见。这次冰灾的直接原因是罕见的大范围长时间低温、雨雪冰冻天气,同时也暴露出电网抵御恶劣天气能力的不足。应对这次覆冰事故进行总结和分析,在正确认识电网覆冰灾害特点和深入分析其形成原因的基础上,积极采取措施,预防和治理电网覆冰,把灾害造成的损失降低到最低限度。

## 1 输电线路覆冰的物理过程

导线覆冰首先是由气象条件决定的,是受温度、湿度、冷暖空气对流、环流以及风等因素决定的综合物理现象。导线覆冰的必要气象条件是:①具有足可冻结的气温,即  $0^{\circ}\text{C}$  以下;②具有较高的湿度,即空气相对湿度一般在 85% 以上;③具有可使空气中水滴运动之风速,即大于  $1\text{ m/s}$  的风速<sup>[1]</sup>。

当具备了以上气象条件,导线覆冰的基本物理过

程是:严冬或初春季节,当气温下降至  $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,风速为  $3\sim 15\text{ m/s}$  时,如遇大雾或毛毛雨,首先将在导线上形成雨淞;如气温升高,例如天气转晴,雨淞则开始融化;如天气继续转晴,则覆冰过程终止;如天气骤然变冷,气温下降,出现雨雪天气,冻雨和雪则在粘结强度很高的雨淞冰面上迅速增长,形成密度大于  $0.6\text{ g/cm}^3$  的较厚的冰层;如温度继续下降至  $-15\sim -8^{\circ}\text{C}$ ,原有冰层外则积覆雾凇。这种过程将导致导线表面形成雨淞—混合淞—雾凇的复合冰层。如在这种过程中,天气变化,出现多次晴—冷天气,则融化加强了冰的密度,如此往复发展将形成雾凇和雨淞交替重叠的混合冻结物,即混合淞。

在这次冰害事故中,受大气环流异常的影响,来自北方的冷气团与南方的暖气团交汇,在南方地区形成准静止锋,在  $1\ 500\text{ m}$  至  $3\ 000\text{ m}$  上空形成一个温度高于  $0^{\circ}\text{C}$  的暖空气层(逆温层),再往上  $3\ 000\text{ m}$  以上温度又低于  $0^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>。如此,从高空冰晶层掉下来的雪花通过暖层融化成雨滴,接着进入靠近地面的冷气层时,雨滴便迅速冷却,虽还没有来得及结成冰,但温度已降至  $0^{\circ}\text{C}$  以下,便形成了冻雨。当冻雨落在地面及树枝、电线等物体上时,便集聚起来布满物体表面,由于物体温度都低于零度,所以立即冻结成冰凌,冻结在电线上,并不断积累,超出输电线路的设计抗

冰厚, 电线最终断裂。高压线的杆塔都也是这样被厚厚的冰块严严实实地包裹起来, 严重时造成杆塔倒塌。这种情况主要就发生在湿度极高、温度较低的南岭山脚下, 造成郴州、衡阳一线的 70 多座高压线铁塔有近  $1/3$  都被压垮。

北方地区气团寒冷干燥, 降雪不易结冰, 所以电线上虽然有落雪, 但一旦积累到体积过大、无法保持平衡时, 就会自动从电线上落到地面上, 所以电线表面只会留有少部分积雪, 对电线的强度影响并不大。

## 2 输电线路覆冰事故统计分析

覆冰造成大量线路跳闸、杆塔变形、倒塌、断线、金具和绝缘子损坏、导线舞动等。通过观测和调研分析, 此次由覆冰引起的电网冰害事故主要有 4 种形式。

### 2.1 严重覆冰引起过荷载

由于冰厚设计值与线路实际覆冰厚度相差较大, 机械荷载超过了铁塔、导地线的结构、材料的屈服强度, 导致铁塔倒塌、变形、导地线断线; 塔间跨度不同, 加大了铁塔两侧水平不平衡张力, 造成铁塔扭曲、折倒; 导地线融冰时间不一致, 导致架空地线弧垂下降后与导线之间发生放电, 造成多条 500 kV、220 kV 线路跳闸和架空地线断线。据统计, 国家电网公司系统因覆冰造成的高压线路杆塔倒塌 17.2 万基, 受损 1.2 万基, 低压线路倒塔断杆 51.9 万基, 受损 15.3 万公里, 变电站停运 884 座; 南方电网公司系统杆塔损毁 12 万基, 受损线路 7 000 多条, 变电站停运 859 座。在发生倒塌的杆塔中, 有 90% 以上的杆塔覆冰设计值在 15 mm 及以下, 而据现场实测许多线路的覆冰厚度折算到标准厚度已超过 30 mm, 远远超过了线路设计标准。

此次事故中倒塔主要是由覆冰时两侧不平衡张力造成, 因此常常出现多基塔连环顺线倒塌的情况。在一些地形起伏较大的地区, 线路上相邻杆塔高差较大, 未覆冰时就形成了较大的两侧不平衡张力。当导、地线上覆有大量密度较大的雨淞覆冰时, 杆塔两侧的不平衡张力加剧或不同期脱冰, 当杆塔不能承受此荷载时, 杆塔的薄弱部件开始损坏变形, 最终导致导、地线掉落或杆塔倒塌。另外, 对于一些转角塔, 同样由于不平衡张力会使得导线在严重覆冰时发生倒塌。因此, 在线路设计和改造时, 应尽量避免大高差

和大转角, 对覆冰严重地区应多加几基耐张塔, 增大杆塔的过载能力。

### 2.2 绝缘子串覆冰闪络

绝缘子覆冰或被冰凌桥接后, 绝缘强度下降, 泄漏距离缩短; 融冰过程中冰体表面的水膜会溶解污秽物中的电解质, 提高融冰水或冰面水膜的导电率, 引起绝缘子串电压分布的畸变, 从而降低覆冰绝缘子串的闪络电压, 形成闪络事故。据统计在此次冰灾中, 仅湖南电网从 2008 年 1 月 20 日至 29 日, 500 kV 线路共发生跳闸 73 条次, 220 kV 线路发生跳闸 408 条次, 这些跳闸均是冰闪造成的。

冰闪的发生与绝缘子串型有很大关系。统计表明, 冰闪基本上发生在悬垂串, 很少发现耐张和 V 型串绝缘子发生冰闪。其原因是: ①耐张串和 V 型串上冰凌不容易桥接伞间间隙; ②该串型本身自清洗效果好, 串上积污量少; ③融冰时该串型上难以形成对冰闪发生至关重要的贯通性水膜。另外, 冰闪还具有明显的阶段性, 一般都发生在融冰期。

### 2.3 覆冰导线舞动

不均匀覆冰会使导线产生自激振荡和舞动, 而造成金具损坏、导线断股及杆塔倾斜或倒塌等现象。此次冰灾发生的导线舞动是由于不均匀覆冰在风的激励下, 导线产生低频率 (0.1~3 Hz)、大振幅自激振动。长时间的舞动导致导线、绝缘子、金具和铁塔受到异常不平衡冲击而疲劳损伤, 以及造成导线相间和相对地闪络, 严重威胁电网的安全运行。

### 2.4 变电站设备损坏

在变电站设备表面产生不均匀覆冰, 会在设备局部产生不均匀电场, 显著降低设备沿面的闪络电压。此次冰灾对变电站设备也造成严重影响, 耦合电容器、母线支撑绝缘子、刀闸支柱绝缘子等设备均有冰闪发生。

## 3 对覆冰计算设计的研究

鉴于此次冰灾中线路设备受损严重, 有必要对线路的抗冰设计进行深入研究, 包括确定合理的覆冰计算参数, 在设计环节提高线路本体抵御自然灾害的能力。

中国《电力规程气象勘测技术规程》(DL/T 5158—2002)(下称《规程》)6.3.4 给出不具备实测覆冰资料的地区, 设计冰厚可选用式 (1) 计算。

$$B = K_h K_T K_\Phi B_0 \quad (1)$$

B——设计冰厚, mm;

$K_h$ ——高度订正系数;

$K_T$ ——重现期换算系数;

$K_\Phi$ ——线径订正系数;

$B_0$ ——标准冰厚, mm。

式(1)中各订正系数应按实测覆冰资料计算分析确定,无实测覆冰资料的地区,《规程》规定了确定  $K_h$  和计算方法  $K_\Phi$ 。

(1)高度修订系数

$$K_h = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^b \quad (2)$$

式中, Z——设计导线离地高度, m;

$Z_0$ ——实测或调查覆冰附着物高度,气象台实测电线离地高度为 2 m;

b——指数,应由实测覆冰资料计算分析确定,无资料地区可采用 0.22。

中国建立的专门为解决输电线路覆冰问题的观测站不多,较缺乏覆冰观测数据。参考了国外一些观测站的数据,进行分析和比较。

捷克建立特殊的观测站,以观测冰重与导线高度的联系<sup>[6]</sup>。对多年观测的结果进行处理,绘制了冰重垂直梯度式中与幂函数的概率分布,如图 1。

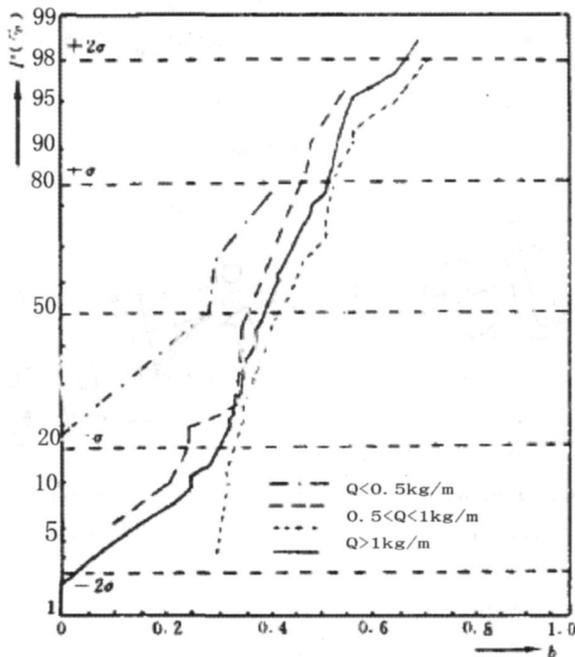


图 1 幂函数 b 的概率分布

由图 1 可知,在不同的覆冰周期,幂指数 b 的平均值其实是不同的,随冰重的增大而增大,且相差比

较明显。设单位长度导线上的冰重为 Q,则有

$$\begin{aligned} Q < 0.5 \text{ kg/m} & \quad b = 0.2 \\ 0.5 \leq Q \leq 1 \text{ kg/m} & \quad b = 0.37 \\ Q > 1 \text{ kg/m} & \quad b = 0.45 \end{aligned}$$

幂指数 b 的平均值为 0.41,与之相比较,《规程》中规定的 0.22 要小的多。

(2)线径订正系数

$$K_\Phi = 1 - 0.1261 n \left(\frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (3)$$

式中,  $\Phi$ ——设计导线直径, mm,  $\Phi \leq 30$  mm;

$\Phi_0$ ——覆冰导线直径, mm。

现场观测结果表明:在常见的小于或等于 8 m/s 的风速下,对于直径小于或等于 4 cm 的不太粗的导线,相对较粗的导线的单位长度覆冰量比相对较细的导线重,对于直径大于 4 cm 的较大导线,单位长度导线覆冰重量反比较细的导线轻;在大于 8 m/s 的较大风速时,对于任何直径的导线,导线越粗覆冰越重,但覆冰厚度是随导线直径的增加而减小的。

实际工程中,输电线路经过山谷、垭口时,风速与气象站的观测值有很大不同。因此在订正线径系数时,应考虑风速的影响,以及公式使用的线径范围。

根据中国电力系统多年观测资料<sup>[1,7,8]</sup>,考虑温度范围、不同线径和风速的影响,利用冰重与冰厚的换算关系<sup>[5]</sup>,把线径订正系数细化如表 1。覆冰厚度线径订正系数随风速的增大和气温的升高而增加,随导线直径的增大而减小。

表 1 不同气温、导线直径下覆冰厚度的直径订正系数

气温 $t_i$ / °C	$-2 < t_i < -1$		$t_i < -2$	
风速 $v$ / (m/s)	<10	>10	<10	>10
直径 $\Phi$ / mm	5	1.0	1.1	1.0
	20	0.9	1.1	1.0
	30	0.8	1.1	0.9
	50	0.5	0.8	0.7

在覆冰计算设计时,选取合适的计算系数,保证电网能抵御恶劣气候的同时,降低工程造价,以达到较好的技术经济效应。

## 4 输电线路覆冰的防治

由于近年电网覆冰灾害不断加剧,覆冰影响范围日益扩大,造成的危害越来越严重,而导致电网覆冰的原因又是多种多样,电网企业和社会各方面,应该在正确认识电网覆冰灾害特点和深入分析其形成原因的基础上,积极采取措施,预防和治理电网覆冰灾

害,把灾害造成的损失降低到最低限度。

(1)加快完成全国各地覆冰的概率分布统计以及进行冰区划分。中国目前尚缺乏对输电线路覆冰概率分布进行必要的统计和分析。冰区划分直接关系到线路设计参数的合理取值。应在冰害多发生地区建立冰情监测站,冰灾杆塔设置覆冰监测点,对不同天气、电压等级、线径以及不同类型绝缘子下的覆冰状况进行长期监测,结合气象资料和数据,为划分冰区提供第一手资料。

(2) 设计规划阶段,认真调查气象条件,避开不利的地形,加强重冰区输电线路抗冰设计。防止输电线路冰害事故的最重要方法是在设计阶段采取有效措施。对重冰区输电线路采取加强抗病设计的措施,往往比融冰以及其他后期措施更为合理和有效。

当线路通过重覆冰区成为不可避免时,应力求“避重就轻”。即进行路径选择时,应尽量做到避开最严重的覆冰地段,线路宜沿起伏不大的地形走线,尽量避免横跨垭口、风道和通过湖泊、水库等容易覆冰的地带;翻越山岭时应避免大档距、大高差,沿山岭通过时,宜沿覆冰季节背风或向阳面走线,应避免使转角点架设在开阔的山脊上,且转角角度不宜过大,如遇台地宽窄不一、不连续时,则注意选取云雾不连续地段,达到减少覆冰概率和减轻覆冰程度的目的。

(3)合理采用防冰、除冰措施。在设计阶段无法做到有效抗冰时,考虑采用防冰和除冰技术措施。

① 热力除冰法。利用附加热源或导线自身发热,使冰雪在导线上无法积覆,或是使已经积覆的冰雪融化。不带负荷短路加热导线融冰方法最为完善,在中国应用较为广泛。

② 机械除冰法。中国最常用的是人工除冰方法。用木棍、竹竿等最原始的工具对最严重的覆冰线路进行敲击,除去线路上的覆冰。另一种方法是利用起重机、绝缘作业工具车或带电直接作业方式除冰。由人力在地面操作拉动滑轮在线路上滑动来铲除线路覆冰的方法,在中国并不经常采用。

③ 被动法。依靠风、地球引力、随机散射和温度变化等脱冰。现已经在输电线路得到应用的有线夹、除冰环、阻雪环、憎水憎冰涂料、风力锤等来减少输电线路的覆冰。

④ 其他方法。除上述几种方法外,还有利用电磁脉冲、气动脉冲、电晕放电、电子冻结、碰撞前颗粒加热等防冰除冰方法,但很多还处于理想或试验阶

段。

(4) 绝缘子串冰闪防治。冰闪频发线段宜采用 V 型串、倒 V 串等合适的绝缘子串型布置;覆冰不太严重的区段也可采用大小盘径相间的插花串布置;双联串应增大串间距。重覆冰区线路不宜采用玻璃绝缘子串,以减少或防止因玻璃绝缘子覆冰后长时间的局部电弧使其烧伤或引起炸裂等情况。

(5)输电线路舞动防治。在多次发生舞动的区段,合理安装防舞装置,包括使用防舞者、偏心重锤、失谐摆、相间隔棒等来达到防舞目的。

(6) 建立电网覆冰灾害应急处理体系。在冬季来临之前,加强导线、绝缘子、杆塔的清扫工作;确定线路巡检制度;制定发生电网覆冰事故时可能采用的多套应急处理预案,其中包括多套电网运行方式预案、可能发生的拉闸限电序列案、电厂发电机组开停预案、抢修救灾预案等。多年的实践证明,灾害发生时临时搞新的运行方式计算往往会延误抢修时机。

## 5 结 语

(1)重新考量覆冰计算参数,并针对不同的应用范围进行计算系数的细化。

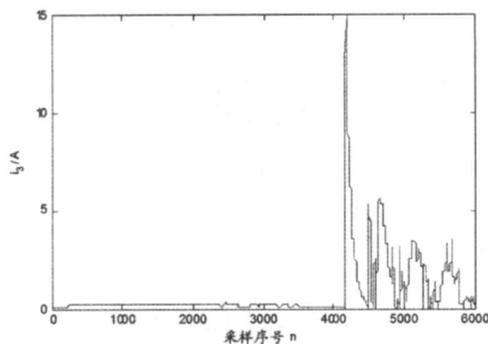
(2)从规划、设计、运行、防冰、除冰等各个环节采取相应对策,构筑电网抵御冰害的多道防线。

(3)建立科学的电网覆冰灾害应急处理预案机制。

## 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] 中国南方特大冻雨雪灾成因的多学科研讨会——第 24 次天地生人学术会议《汇编》[C].北京:2008
- [3] Daisuke Kuroiwa. Icing and snow accretion [R]. Monograph series of the research institute of applied electricity 1958.
- [4] Lahti K, Lahtinen M, et al. Transmission line corona losses under hoar frost conditions [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (2): 928—933.
- [5] 西南电力设计院. 电力工程气象勘测技术规程 [S]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [6] International conference on Large High Voltage Electric Systems 1992, 22—35.

(下转第 57 页)



(c) 3端故障波形变换后结果

图 4 三端故障波形经综合数学形态梯度变换后结果

由图 4 可见,经综合形态梯度变换能够准确检测出故障行波波头到达时刻。故障发生时,测得采样序号  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$  分别为 5 000、4 339、4 173,带入式 (11) 中,求得故障距离为 100.341 4 km,相对误差为 0.34%。不同故障距离仿真结果见表 1,不同故障类型仿真结果见表 2,不同接地电阻仿真结果见表 3。

表 1 A相接地不同故障距离时仿真结果

故障点位置 /km	测距结果 /km	相对误差 /%
20	19.955 5	0.22
40	39.888 9	0.27
80	79.748 8	0.31
100	100.341 4	0.34
120	119.592 6	0.33

表 2 100 km处不同故障类型时仿真结果

短路类型	测距结果 /km	相对误差 /%
AG	100.341 4	0.34
BC	99.962 2	0.03
ABG	99.962 2	0.03
ABCG	99.962 2	0.03

表 3 100 km处不同接地电阻时仿真结果

接地电阻	测距结果 /km	相对误差 /%
20	100.341 4	0.34
50	100.341 4	0.34
100	100.341 4	0.34
200	100.341 4	0.34

通过表 1~3 可以看出,运用提出的故障测距方案可以准确检测出故障点,且不受故障距离、故障类型和接地电阻的影响。

## 7 结 论

所提出的基于数学形态学的三端电气量行波测距方案,可以有效分离故障信号与噪声和脉冲信号,快速准确找出故障点,适用于复杂环境下故障测距。这种故障测距方案与结构元素的选取密切相关,为了得到更准确的检测精度,如何选择一种更有效的结构元素,有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 林湘宁,刘沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学——小波综合滤波算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19—24.
- [2] 全玉生,李学鹏,杨俊伟,等. 数学形态学算子在电力系统突变信号检测中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 1—4.
- [3] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45—49.
- [4] 崔屹. 图形处理与分析——数学形态学方法及应用 [M]. 北京:北京科学出版社, 2000.
- [5] Heijmans H J A M. Morphological Image Operators [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [6] 束洪春,李义,宣映霞,等. 对不受波速影响的输电线路单端行波法故障测距的探讨 [J]. 继电器, 2006, 34(8): 1—6.
- [7] 张峰,梁军,张利,等. 基于三端行波测量数据的输电线路故障测距新方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8).
- [8] 艾斌,吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别 [J]. 电网技术, 2003, (5): 55—57.
- [9] 欧阳森,王建华,宋政湘,等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61—65.

## 作者简介:

焦征南 (1985—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究;

吕飞鹏 (1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

(收稿日期: 2009—06—10)

(上接第 16 页)

- [7] 电力工业局,贵州省气象科研所编著. 覆冰文集 [C]. 贵州电力技术, 1992.
- [8] 云南省气象科学研究所编著. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究 [C]. 云南:云南科技出版社, 1993.
- [9] 戚大安,刘星灿. 多措并举,积极防治电网覆冰灾害 [J]. 国家电网, 2007, (1): 53—55.

- [10] 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, (1): 6—9.

## 作者简介:

赵永生 (1982—),男,硕士,从事高电压技术、输电技术的研究。

王富荣 (1952—),男,副教授,长期从事高电压技术、输电线路运行维护的研究。

(收稿日期: 2009—10—29)