

低温雨雪冰冻灾害对我国电网损毁性影响概述

陈鹏云¹, 王羽², 文习山², 蓝磊², 王成智¹, 甘艳¹, 张露², 詹帆², 付平²

(1. 华中电网有限公司, 湖北省 武汉市 430077; 2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

Summary on the Damaging Effect of Cryogenic Freezing Rain and Snow Disaster on Power Grid in China

CHEN Pengyun¹, WANG Yu², WEN Xishan², LAN Lei²,

WANG Chengzhi¹, GAN Yan¹, ZHANG Lu², ZHAN Fan², FU Ping²

(1. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430077, Hubei Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: To improve the capacity of power grid to withstand the cryogenic freezing rain and snow disasters, the features especially the spatial and temporal distribution characteristic of major national historical events of cryogenic freezing rain and snow disasters and the relevant damages to power grid in China are summarized. The time corresponding relationship between ice disaster and La Nina events shows that the La Nina event can be used as an important factor to predict ice and snow disaster. Based on the statistical damaging effect of ice and snow disaster on power grid in the early 2008, the causes of damage to power grid and the anti-ice design standards are discussed, then anti-ice strategies and technical disaster-reduction measures for power grid of China are explored. Finally allaround measures, e.g. different design of skeleton grids, optimal adjustment of anti-ice design standards, icing survey and amendment of ice zone map, line corridor planning and on-site investigation, transformation of seriously icing lines, etc. are recommended to take to improve the anti-ice capacity of power grid in China.

KEY WORDS: cryogenic freezing rain and snow disaster; spatial and temporal distribution; anti-ice measures; design standard; disaster-reduction measures; power grid

摘要: 为提高电网抵御低温雨雪冰冻灾害的能力, 回顾我国发生低温雨雪冰冻灾害的主要历史事件, 总结了该型灾害的时空分布特点及对我国电网损毁的特点。对比分析冰灾和拉尼娜事件的时间对应关系, 认为拉尼娜事件可作为预测冰雪灾害的一个重要因素。结合 2008 年初冰灾对电网损毁影响的统计结果, 分析了电网受损的原因和电网防冰灾设计标准, 探讨了我国电网防冰灾策略和技术措施, 建议从多

方面采取措施以提高我国电网抗冰灾能力, 如骨干网架差异化设计、电网防冰灾设计标准优化调整、覆冰调查及冰区图修订完善、线路走廊规划及现场勘测、严重覆冰地段的线路改造等。

关键词: 低温雨雪冰冻灾害; 时空分布; 防冰措施; 设计标准; 减灾措施; 电网

0 引言

2008 年我国南方大范围的低温雨雪冰冻灾害对社会经济的实际影响已远超过人们的经验估计, 特别是电网在此次极端灾害天气条件下显得极为脆弱^[1-5], “城市停电, 电网解列, 地铁停运”等对经济和社会活动的直接/间接影响已经很难评估。

由于冰灾的影响范围和出现频次均不及雪害, 加之以往电力、公路等设施建设得没有现在的稠密, 冰灾造成的损失不如现在大, 因此人们对冰灾的关注度远不及雪害。但近几年出现的大面积冰灾对电力系统造成的危害却远超过雪害造成的危害。国家电网公司一如既往地关注低温雨雪冰冻灾害对电网影响的研究, 尤其是在 2005 年和 2008 年全国 2 次大面积冰灾后, 主持开展了多方面的研究。文献[6]探讨了我国电网在冰雪灾害条件下安全运行面临的问题及可能解决的方法。文献[7]研究了电网应对大面积冰灾的对策, 较为详尽地总结了国内外电网防冰灾的措施。本文除总结电网防冰灾策略和措施以外, 将我国电网冰灾历史事件和气象条件联系起来, 发现拉尼娜事件是冰灾发生的一个重要的影响因素, 为做好防灾工作提供了一种新的视角。

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGKJ2009-0609-51)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (SGKJ2009-0609-51).

1 2008 年初低温雨雪冰冻灾害对电网损毁影响统计分析

2008 年初中国发生的恶劣低温雨雪冰冻天气给电网带来了巨大的损毁和经济损失^[3-12]。大部分省区出现了冰闪跳闸，变电站停运，杆塔倒塌，导线舞动，变电站设备损坏等事故。国家电网公司和中国南方电网公司系统 500、220、110、35 及 10kV 线路杆塔、导/地线的受损情况统计结果分别见表 1 和表 2。

表 1 国家电网公司系统供电设施受损统计

Tab. 1 Statistics of damaged power supply facilities of State Grid Corporation of China

电压等级/kV	倒塌杆塔/基	受损杆塔/基	断线/处
500(交流)	462	142	799
500(直流)	44	—	—
220	821	239	1 330
110	1 788	421	1 876
35	2 305	1 041	3 783
10	166 371	10 503	121 600

表 2 南方电网公司系统供电设施受损统计

Tab. 2 Statistics of damaged power supply facilities of China Southern Power Grid Company Limited

电压等级/kV	倒塌杆塔/基	受损杆塔/基	断线/处
500	352	161	222
220	612	378	1 121
110	875	465	1 862

表 3 为部分省份 500kV 线路倒塔及受损情况统计。分析表 3 可知：轻冰区杆塔的受损程度明显较重冰区严重，主要是原有设计规程对重冰区荷载和计算工况考虑得严格许多，不仅其不平衡张力的取值较轻冰区的大，还考虑了导/地线同时承受不平衡张力及不均匀冰荷载等情况，设计的重冰区铁塔具有较高强度。

2 电力系统冰灾防范设计标准比较分析

20 世纪 80 年代我国建设第 1 条 500kV 线路，

表 3 500 kV 输电线路倒塔及受损情况统计

Tab. 3 Statistics of damaged tower of 500 kV transmission lines

地区	倒塌杆塔/基				小计	受损杆塔/基				小计
	直线塔		耐张塔			直线塔		耐张塔		
	轻冰区	重冰区	轻冰区	重冰区		轻冰区	重冰区	轻冰区	重冰区	
湖南	135	0	9	0	144	20	0	5	0	25
贵州	131	2	8	4	145	37	3	13	2	55
江西	88	0	12	0	100	8	0	2	0	10
浙江	130	0	8	0	138	19	0	6	0	25
广西	6	0	4	0	10	8	0	4	0	12
湖北	9	0	3	1	13	2	0	1	0	3
重庆	5	—	—	—	5	1	—	1	—	2
安徽	1	—	—	—	1	3	—	—	—	3

至 2008 年冰冻灾害期间，我国电网总体运行良好；但局部地区也曾发生过因覆冰断线、倒塔和舞动事故。2008 年严重的低温雨雪冰冻灾害造成各电压等级输电线路出现大量杆塔倒塌受损^[9-10]，罕见的恶劣天气固然是一个重要原因；但也显现出现行的线路覆冰标准偏低，经不起极端低温雨雪冰冻天气的考验。因此，有必要对原有的输电线路抗覆冰灾害能力以及规程规范的适应程度进行重新审视。

国家电网公司针对已有线路设计规程规范和技术规定进行认真梳理，对需要提高标准、修订完善的具体条款开展深入的对比分析与测算^[12]。表 4 归纳了国网新标准^[13]、差异化意见^[14]与原有标准^[15]的主要差异。与原有标准相比，新标准提高电网防覆冰规划设计标准，并综合考虑投资成本和覆冰严重程度等因素，形成差异化意见，对不同线路、同一线路的不同地段，要根据其重要性进行差异化设计，以确保在重大自然灾害下对重要负荷的安全供电。

3 中国低温雨雪冰冻灾害的时空分布

3.1 低温雨雪冰冻灾害的时间分布

综合考虑温度和降水的异常情况以及灾情的严重程度，并主要考虑长江以南地区发生的低温雨雪冰冻天气，1951 年以来中国比较典型的低温雨雪冰冻天气发生时段、强度和范围如表 5^[16]所示。表 6 为 1950—2009 年发生拉尼娜事件的统计结果。

对比表 5 和表 6 可知，发生低温雨雪冰冻灾害天气的大多数年份之前均发生了拉尼娜事件，这说明拉尼娜事件是发生低温雨雪冰冻灾害的一个重要影响因素。因此，有必要关注拉尼娜事件的出现时间，提前做好防御低温雨雪冰冻灾害的准备工作。

3.2 低温雨雪冰冻灾害的空间分布

我国年平均雨淞日数南北方分布特点为：南方多，北方少^[17-18]。雨淞主要分布于云、贵、川、湘、

表4 国网新标准、差异化意见与原有标准主要差异比较

Tab. 4 Comparison of the main differences among the new standards, differences of opinion and original standard

项目	原有行业标准 ^[15]	国网新标准 ^[13]	差异化意见 ^[14]	分析总结
设计风速	重现期分别按 15(35~330 kV)和 30 a(500 kV)统计	重现期分别按 30(35~330 kV)、50(500~750 kV)、100 a(1 000 kV)统计	与国网新标准一致	提高风速
	基准高度 15 m, 风速不低于 25 m/s(110~330 kV); 基准高度 10 m, 基本风速不低于 23.5 m/s(110~330 kV)和 27 m/s(500 kV)	330 kV)和 27 m/s(500~750kV)	与国网新标准一致	与建筑规范一致
基本冰厚	按冰区划分	重要线路增加 5 mm, 地线覆冰厚度比导线增加 5~10 mm	导线提高 5~15mm, 地线在导线提高基础上执行国网新标准	提高冰厚
地线截面	镀锌钢绞线与导线配合时选用的截面小	镀锌钢绞线与导线配合时选用的截面增大	与国网新标准一致	增大导线截面
	导、地线覆冰风荷载计算无增大系数	覆冰增大系数 1.2	与国网新标准一致	
杆塔抗覆冰能力设计	杆塔覆冰风荷载无增大系数	覆冰增大系数 1.5	与国网新标准一致	
	不考虑地线断线; 地线不平衡张力取最大使用张力的 50%	增加地线断线, 地线断线张力取值最大使用张力的 100%	与国网新标准一致	提高杆塔承载水平
结构重要性系数	双分裂以上导线纵向不平衡张力在不同地区分别取最大使用张力的 15%、20%、25%	双分裂以上导线纵向不平衡张力在不同地区分别取最大使用张力的 25%、35%、45%	与国网新标准一致	
	无不均匀覆冰工况	增加不均匀覆冰工况	与国网新标准一致	
结构重要性系数	1.0	1.1~1.2	1.1~1.2	提高杆塔承载水平

表5 1951年以来7次低温雨雪冰冻天气对比
Tab. 5 Comparison of cryogenic freezing rain and snow weather since 1951

事件发生起止时间	强度(7省(市)平均)			影响范围
	低温 日数/d	降雪量/ mm	冰冻 日数/d	
1954年12月上旬— 1955年1月中旬	16.7	27.7	8.5	河南、湖北、湖南 等22个省
1957年1月下旬— 2月上旬	10.8	25.5	5.5	陕西、湖北、安徽 等16个省
1964年2月	11.7	33.5	6.7	贵州、江西、湖南 等19个省
1969年1月下旬— 2月中旬	10.5	18.0	5.7	陕西、湖北、湖南 等16个省
1976年12月下旬— 1977年1月中旬	11.8	14.9	5.3	贵州、江西、湖南 等13个省
1984年1月中旬— 2月中旬	13.1	16.8	5.3	贵州、四川、甘肃 等7个省
2008年1月中旬— 2月上旬	18.7	42.4	9.9	贵州、湖南、江西 等20个省

表6 1950—2009年历史上发生的拉尼娜事件
Tab. 6 The La Nina events happened from 1950 to 2009

序号	起止年月	持续时间/月	强度
1	1950-01—1951-04	16	强
2	1954-04—1957-01	34	极强
3	1962-09—1963-02	6	极弱
4	1964-04—1965-02	11	弱
5	1967-12—1968-05	6	极弱
6	1970-07—1972-02	20	强
7	1973-05—1976-06	38	极强
8	1984-10—1985-10	12	弱
9	1988-05—1989-06	13	弱
10	1995-09—1996-04	8	极弱
11	1998-07—2000-07	24	强
12	2000-10—2001-03	6	极弱
13	2007-09—2008-06	10	弱

鄂、赣等省区^[17]。在凝冻高度以上, 一般最易覆冰的温度为-8~0℃。若气温太低, 例如在-20~-15℃或更低时, 过冷却水滴将变成雪花而不易形成覆冰。因此, 严寒的东北、西北和华北等地区, 其冰害较云、贵、川、湘、鄂、赣等地轻。

微地形是小尺度地域差异的最基本因素。根据地表高低起伏的趋势和形态的不同, 微地形多种多样, 针对导线覆冰受微地形/微气候影响的一般规律, 具有代表性的地形如垭口、风口、分水岭、迎风坡、山脊、山坳(鞍)部以及与陆地邻近的湖泊和水库等水体^[19]位置覆冰较为严重; 背风坡一般覆冰较少。

架空输电线路经过山脉时, 由于海拔的差异, 山顶和山底可能具有不同的气候特征, 因此, 还需要根据线路所处的海波差异化地设计架空线路覆冰量级。

4 提高电力系统抗冰灾能力措施研究

4.1 低温雨雪冰冻灾害对电网损毁情况

架空输电线路是低温雨雪冰冻灾害下受损最为严重的电网设备, 根据国内外的冰灾事故, 输电线路的覆冰危害可归纳为以下几类^[20]: 1) 过载; 2) 绝缘子闪络损坏; 3) 气动力失稳振动; 4) 不均匀覆冰或不同期脱冰。

为减少输电线路覆冰事故的发生, 有必要从规划、设计、运行、抗冰技术等各个环节开展全方位的研究, 以有效保障电力系统的安全运行^[2-8,21]。

4.2 绘制冰区图

目前我国已绘制出各省份的冰区图; 但由于观

测站数量的局限性，海拔的差异性及地形地势的复杂性等因素的影响，分布图精确度不高。只能定性反映某区域内大体的冻雨严重程度，可以作为规划线路走廊和设计线路的参考依据；但对于具体的输电变电工程，必须依靠现场勘测的原始资料，以保证各区段覆冰设计值的真实可信。

4.3 架空输电线路规划和设计

1) 选择路径时尽量避开覆冰频发和重覆冰的区域^[7]。对于通过微地形/微气候等特殊地形下的输电线路，如垭口、风口、山脊、山坳(鞍)部、通过大面积水体附近的输电线路应考虑增大覆冰量级；对于通过迎风坡、背风坡的输电线路，应结合该地区的主导风向，适当增大或减小覆冰量级。2) 针对最不利的覆冰气候条件采用加强型设计和改造，使其具有抵御最严重自然灾害的能力^[7]。

4.4 防止舞动措施

目前国内常用的防舞动措施^[22]主要有：大电流融冰、安装空气动力稳定器、安装吸收舞动能量的阻尼器和安装改变系统结构特性的抑舞动器等。

4.5 防止覆冰闪络措施

架空输电线路的覆冰闪络严重影响了输电线路的安全运行，可分别采取以下措施^[7,23-26]：1) 在塔头间隙尺寸允许时增加绝缘子片数和串长，提高绝缘子串的冰闪电压；2) 在雨雪冰冻天气发生前对线路污秽进行清扫；3) 对于一般覆冰地区，在横担侧加装一片大盘径绝缘子和采用大小盘径相间的插花串布置，对于覆冰严重地区，推荐绝缘子串采用 V 型串或耐张串布置；4) 双联串应增大串间距，防止覆冰严重时冰柱在双串间形成。

4.6 防冰技术措施

目前国内外防冰方法主要有 3 种^[7,27-28]：1) 在线路上附加热源；2) 在输电线路表面涂防冰涂料；3) 采用一种表面光滑的防覆冰导线。

线路防冰研究今后应结合新型材料及其他学科的新技术，针对南方地区线路的覆冰特点，研究防止、减缓导线覆冰的新材料及实用、有效的防冰方法及装置。

4.7 除冰和融冰技术措施

目前电力系统应用较多的除冰和融冰措施有滑轮刮铲法、大电流融冰法和被动法，除上述几种方法以外，还有利用电磁脉冲、气动脉冲、电晕放电、电子冻结、碰撞前颗粒加热和冻结等防冰/除冰方法，但很多还处于理想或试验阶段^[29-30]。

5 结论

1) 2008 年初的低温雨雪冰冻天气属于罕见极端灾害性天气，因范围广、强度大、持续时间长等综合原因导致我国电网大面积损毁、解列。从防灾策略来讲，防御大范围严重冰灾是我国电网防灾减灾的重点。

2) 拉尼娜事件与我国低温雨雪冰冻灾害之间的相关性比较明显，可作为预测冰雪灾害的一个重要因素。

3) 由于地理地貌的特点，冬季，来自海洋的暖湿空气与冷空气在黄河以南的云、贵、川、湘、鄂、赣等地区相遇的几率很高，有时甚至停滞少动，这将导致长时段的严重冻雨天气，将对电网构成严重的威胁。黄河以北地区很少出现长时段的冻雨，电网冰灾相对较轻。

4) 电网覆冰事故一般先发生在高电压等级的输电线路，城区配电线路相对较晚，主要原因是海拔较高、地理条件复杂的山区输电线路覆冰严重。

参考文献

- [1] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 18-23.
Wang Yangguang, Yin Xianggen, You Dahai, et al. A real-time monitoring and warning system for electric power facilities icing disaster based on wireless sensor network[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 18-23(in Chinese).
- [2] 黄道春, 胡毅, 万启发, 等. 绝缘子冰闪特性和提高冰闪电压措施研究综述[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 52-60.
Huang Daochun, Hu Yi, Wan Qifa, et al. Review on flashover characteristics and measures to improve flashover voltage of the ice-coated insulators[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 52-60(in Chinese).
- [3] 彭向阳, 周华敏, 潘春平. 2008 年广东电网输电线路冰灾受损情况及关键影响因素分析[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 112-116.
Peng Xiangyang, Zhou Huamin, Pan Chunping. Damage condition of overhead transmission lines in Guangdong power grid caused by icing disaster in 2008 and analysis on key impacting factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 112-116(in Chinese).
- [4] 邵德军, 尹项根, 陈庆前, 等. 2008 年冰雪灾害对我国南方地区电网的影响分析[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 42-47.
Shao Dejun, Yin Xianggen, Chen Qingqian, et al. Affects of icing and snow disaster occurred in 2008 on power grids in south China[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 42-47 (in Chinese).
- [5] 刘连光. 大规模电网应对空间灾害天气的问题[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 7-11.
Liu lianguang. Scientific issues on how to cope with damage in large-scale power grid caused by disastrous space weather[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 7-11(in Chinese).
- [6] 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).
- [7] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 215-219.
- Hu Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 215-219(in Chinese).
- [8] 胡毅, 胡建勋, 刘庭. 我国南方地区电网大范围覆冰灾害的特点分析与防治措施[J]. 电力设备, 2008, 9(6): 1-4.
- Hu Yi, Hu Jianxun, Liu Ting. Analysis and countermeasures for large area icing accident on power grid in northern China[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(6): 1-4(in Chinese).
- [9] 李正, 杨靖波, 韩军科, 等. 2008年输电线路冰灾倒塔原因分析[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 31-35.
- Li Zheng, Yang Jingbo, Han Junke, et al. Analysis on transmission tower toppling caused by icing disaster in 2008[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 31-35(in Chinese).
- [10] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网2008年冰灾事故分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19.
- Lu Jiazheng, Jiang Zhenglong, Lei Hongcai, et al. Analysis of Hunan Power Grid ice disaster accident in 2008[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19(in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 金晓华. 对覆冰区输电线路杆塔加固和设计标准修订的建议[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 44-48.
- Jin Xiaohua. Suggestions to reinforce transmission line towers in ice area and revise the design standard criterion[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 44-48(in Chinese).
- [13] 国家电网公司. Q/GDW 179—2008 110~750 kV 架空输电线路设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [14] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 5092—1999 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW 182—2008 中重冰区架空输电线路设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [16] 国家气候中心. 2008年初我国南方低温雨雪冰冻灾害及气候分析[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 61-78.
- [17] 刘和云. 架空导线覆冰防冰的理论与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001: 18-26.
- [18] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 9-15.
- [19] 金西平. 微地形微气候对电力线路覆冰的影响[J]. 供用电, 2008, 25(4): 17-20.
- Jin Xiping. The influence of micro landform and micro climate on icing of overhead power lines[J]. Distribution & Utilization, 2008, 25(4): 17-20(in Chinese).
- [20] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [21] 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.
- Li Zaihua, Bai Xiaomin, Zhou Ziguan, 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(in Chinese).
- [22] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14.
- Wang Shaohua, Jiang Xingliang, Sun Caixin. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 11-14(in Chinese).
- [23] 张志劲, 蒋兴良, 马俊, 等. 工作电压下110kV交流绝缘子串覆冰特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 140-143.
- Zhang Zhijin, Jiang Xingliang, Ma Jun, et al. Study on icing performance of 110kV insulator strings at AC service voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 140-143(in Chinese).
- [24] Farzaneh M, Admirat P, Chisholm W A, et al. Atmospheric icing of power networks[M]. Germany: Springer Netherlands, 2008: 269-325.
- [25] Kannus K, Lahti K. Laboratory investigations of the electrical performance of ice-covered insulators and a metal oxide surge arrester[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1357-1372.
- [26] 易辉. 500kV输电线路采用倒V型绝缘子串的试验研究[J]. 电力设备, 2006, 7(3): 37-40.
- Yi Hui. Test and study of backward V insulators for 500kV transmission line[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(3): 37-40(in Chinese).
- [27] 易辉, 查宜萍, 何慧雯. 防覆冰涂覆材料的应用分析与研究[J]. 电力设备, 2008, 9(6): 16-19.
- Yi Hui, Zha Yiping, He Huiwen. Application analysis and research on ice-over resistant coating[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(6): 16-19(in Chinese).
- [28] Liao Weiyan, Jia Zhidong, Guan Zhicheng, et al. Reducing ice accumulation on insulators by applying semi-conducting RTV silicone coating[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1446-1454.
- [29] Laforte J L, Allaire M A, Laflamme J. State-of-the-art on power line de-icing[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1-2): 143-158.
- [30] 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).



陈鹏云

收稿日期: 2010-08-06.

作者简介:

陈鹏云(1956), 男, 硕士, 从事高电压技术、电网防灾减灾等方面研究, E-mail: whcpy@163.com;

王羽(1983), 男, 博士研究生, 从事电力系统防雷、电网防灾减灾方面的研究, E-mail: wy_20002@163.com;

文云山(1962), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统防雷与接地、绝缘检测、纳米新技术、电网防灾减灾等研究工作, E-mail: xswen@whu.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)