

基于高压输电线路实时观测的电线积冰条件

周悦, 牛生杰*, 吕晶晶, 赵丽娟

南京信息工程大学大气物理学院, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

* 联系人, E-mail: niusj@nuist.edu.cn

2011-05-03 收稿, 2011-09-27 接受

国家科技支撑计划(2008BAC48B01)、江苏省青蓝工程“云雾降水物理学与气溶胶研究”创新团队项目、江苏省普通高校研究生科研创新计划和江苏高校优势学科建设工程资助

摘要 利用 2008~2009 年冬季华中电网湖北地区 500 kV 高压输电线路覆冰状况的实时观测资料, 结合 2009 年 1~3 月恩施雷达站的积冰厚度、云雾微物理观测以及同期的自动气象站资料, 总结了 500 kV 高压输电线覆冰与模拟电线覆冰发生和脱落时气象条件的异同, 并对液水含量进行了计算. 结果表明: 通过恩施雷达站处的气温可以较好地推断出张恩#307 杆塔处的气温; 高压输电线表面温度比环境气温高 2~4 , 且二者呈正相关关系; 高压输电线积冰发生和脱落时的气温明显低于模拟电线积冰观测到的阈值, 其中发生时气温为-2 左右, 脱落时气温为-2~-1 ; 在积冰厚度较小时, 厚度受气温变化影响明显; 液水含量计算值与观测值的变化趋势基本一致, 但计算值偏大.

关键词

高压输电线路
电线积冰
导线表面温度
气象条件
液水含量

2008 年 1 月 10 日~2 月 2 日, 我国华南、西南、华中和华东地区先后 4 次遭受低温雨雪冰冻天气的袭击, 且冰雪灾害天气持续时间长, 影响范围广, 危害程度深, 全国有 20 个省市受到不同程度的影响. 各级电网的输电线路和杆塔在冰灾中遭受了严重损坏(500 kV 输电线路倒塔 506 基), 直接财产损失达 104.5 亿元, 灾后电网恢复重建和改造需要投入资金 309 亿元^[1]. 可见, 电线积冰会对经济发展和国民生活造成巨大影响.

湖北电网是三峡电站电力外送的起点, 同时又作为西电东送的通道和南北互供的枢纽, 对我国东南部的电力供应起着重要作用. 其与周边电网连接处多为高海拔山区, 且植物覆盖茂密, 极易发生积冰现象, 其中 2008 年冰雪灾害期间主要受损线路分布在鄂西南和鄂东南山区的张恩、咸梦等^[2].

国外对电线积冰的研究起步较早, 从 20 世纪 50 年代起, 积累了大量电线积冰过程的观测数据, 分析了气象要素与积冰发生发展之间的关系^[3-5], 进一步通过模式和算法对积冰过程进行模拟^[6-8], 并结合业

务预报模式 WRF 进行电线积冰的预报^[9]. 我国学者从 20 世纪 70 年代起对电线积冰过程进行了不断的研究, 得到了许多有意义的结果, 主要分析了电线积冰发生过程中的天气形势^[10], 高度的不同对积冰的影响^[11,12], 气象要素变化与积冰的联系^[13], 以及积冰发生时云雾微物理特征量的变化特征^[14,15]等. 蒋兴良等人^[16]结合理论模型、实验室模拟和外场观测, 分析了气象要素、电场、地形地势等与积冰之间的关系, 并给出了输电线路覆冰的模型.

以上的研究中主要是使用铁(钢)丝或不通电的输电线来进行模拟电线积冰观测, 然而这样无法准确地描述出实际高压输电线路积冰的全过程, 无法给电力部门提供准确的冰雪灾害天气预测预警信息. 本文通过分析 500 kV 高压输电线积冰过程中的气象要素特征, 结合导线表面温度与环境气温之间的关系, 与在恩施雷达站外场进行的模拟电线积冰观测结果进行对比, 总结了高压输电线积冰与模拟电线积冰发生和脱落时气象要素的异同, 最后讨论了液水含量计算值与观测值之间的关系, 并给出积冰过

程中云雾微物理特征量的变化特征.

1 资料

2008~2009 年冬季华中电网电线覆冰在线观测系统湖北地区 500 kV 高压输电线路张恩#303 和#307 杆塔(海拔高度为 1239 m)、孝渊#115 杆塔、咸梦#80 杆塔的分布情况如图 1 所示. 观测资料包括: 积冰厚度、综合拉力、高压输电线路处的环境气温、导线表面温度(咸梦#80 杆塔)、相对湿度、风速、风向等, 数据的时间分辨率为 1 h. 2009 年 1~3 月恩施雷达站(30°17'N, 109°16'E, 海拔 1722 m)观测得到的积冰厚度、雾滴谱和常规气象要素等资料, 其中积冰厚度观测中使用的导线为不通电的模拟电线, 雾滴谱仪的采样频率为 1 Hz, 粒径范围为 2~50 μm , 经过数据质量控制平均后, 取时间分辨率为 1 h 的云雾微物理特征量, 常规气象要素资料的时间分辨率为 1 h.

2 结果与讨论

2.1 不同高度气温对比分析

高压输电线路积冰能否发生, 气温和相对湿度起重要作用. 由于湖北电网与三峡和江西电网连接处的 500 kV 张恩线、咸梦线等高压输电线路多位于山区, 水汽充足, 当气温低于 0℃就容易发生积冰. 并且在 2008 年冰冻雨雪灾害期间, 山区的输电线路倒塔、断线要远多于平地^[7], 给电力抢修工作带来了很大困难. 所以, 若能通过气象部门自动气象站的数

据, 较准确地推断 500 kV 高压输电线高度的气温, 将为电力部门在冰灾中的抢险工作提供帮助.

对比分析了 2009 年 1~3 月恩施雷达站和张恩#307 的气温(图 2), 可以看出 2 个高度处的气温呈很好的正相关关系, 相关系数为 0.97, 显著性水平低于 0.0001. 说明 2 点通常受同一天气系统的影响, 且 2 点距离较近, 使得 2 处的气温具有较好的可比性, 因此通过恩施雷达站的气温资料可以较好地推断出张恩#307 处的气温.

2.2 导线表面温度与环境气温对比分析

500 kV 高压输电线与模拟电线的最显著区别是: 高压输电线在通电过程中会发热, 致使导线表面温度明显高于周围的环境气温. 而温度是影响输电线路积冰的主要气象要素^[8](因为在高海拔山区, 湿度经常能达到饱和), 因此分析导线表面温度与环境气温的关系非常重要.

通过对比分析 2009 年 11 月 17 日 12:00~2010 年 1 月 28 日 12:00 咸梦#80 导线处的环境气温和导线表面温度的特征(图 3)可以看出, 导线表面温度(t_{sur})与环境气温(t_{air})呈很好的正相关关系, 相关系数达 0.97, 显著性水平低于 0.0001. t_{sur} 明显高于 t_{air} , 两者的温度差主要集中在 2~4℃范围内(图 4), 说明当环境气温低于 0℃时, 高压输电线表面温度不一定低于 0℃, 即积冰无法产生. 进一步证实了在 500 kV 高压输电线路覆冰监测系统中经常出现的“气温低于 0℃, 相对湿度大于 95%, 但没有观测到积冰”的现象.



图 1 500 kV 高压输电线路分布图(<http://maps.google.com/>)

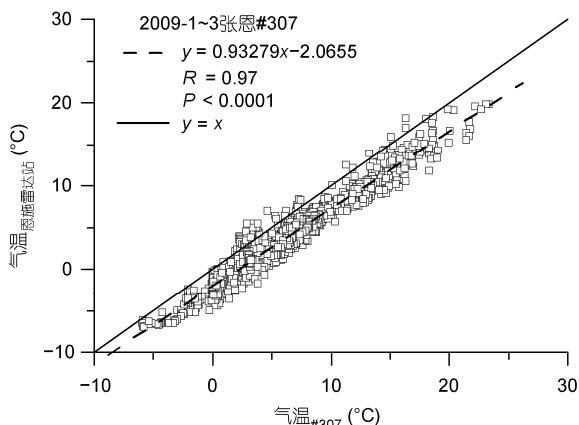


图2 2009年1~3月恩施雷达站和张恩#307气温的相关关系

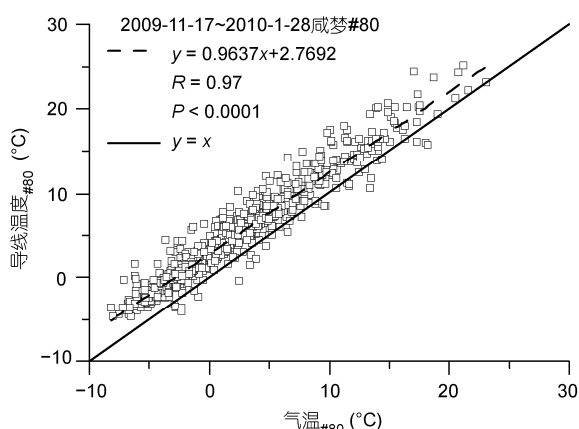


图3 咸梦#80处环境气温和导线表面温度的相关关系

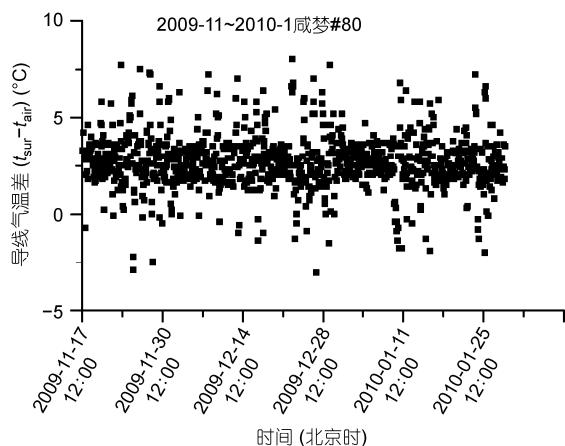


图4 咸梦#80导线表面温度与环境气温的差值

2.3 积冰期间气象要素的变化特征

许多学者在对模拟输电线进行积冰观测时(主要是雨雾凇型积冰)发现,当水汽条件充足(相对湿度大于95%),气温逐渐降低到0°C以下,积冰开始出现。

积冰发生时的气温一般为-1~0°C,且积冰脱落多出现在天气转好,气温上升到-1~0°C的情况下^[14,16,19]。在恩施雷达站进行电线积冰模拟观测时也得到了同样的结果^[20]。

高压输电线表面温度要比周围的环境气温略高,这导致实际500 kV高压输电线积冰过程中的气象要素变化特征与模拟电线积冰过程中的相比存在明显不同。综合分析500 kV孝源高压输电线#115杆塔处2次积冰厚度较大、持续时间较长、变化特征较明显的积冰过程中冰厚与气温的变化曲线(图5(a), (b)),以及张恩#303、张恩#307杆塔处发生的2次积冰过程(图5(c), (d)),得到高压输电线路积冰生消过程中的主要气象要素变化特征:4次积冰过程中,相对湿度都维持在95%以上且无显著变化(图略),为积冰过程提供了充足的水汽;当导线附近气温低于0°C时,没有出现积冰现象,只有当气温继续下降到-2°C左右时,空气中的过冷却水滴不断与导线碰撞,导线表面温度降至0°C以下,积冰开始出现;随着气温逐渐降低,积冰厚度也明显增长;之后气温变化相对平稳,积冰厚度也相对维持;最后,随着气温逐渐上升到-2~-1°C左右时,积冰出现融化、脱落等现象,积冰厚度显著减小。

图5(a)和(b)所示的2次积冰过程中冰厚较大、变化规律明显。积冰发生初期,冰厚增加明显,分别达到了12.6 mm/6 h和18 mm/8 h。之后在较低的气温下,冰厚长时间维持,略有增加,这可能是因为山区风力较大,而山区输电线路积冰多为雾凇或混合凇积冰,与空气接触的凇状积冰容易因强风而破碎,使得冰厚维持。图5(c)和(d)所示的2次积冰过程中冰厚较小、变化较剧烈。当积冰厚度较小时,积冰厚度受环境温度因子影响,变化明显。冰厚与导线周围的环境气温存在明显负相关,并且积冰厚度在气温出现极大值时显著减小。

2.4 积冰期间液水含量的计算

位于高海拔且植被茂密地区的气象站点和高压输电线路在冬季易受到云中积冰(In-cloud icing)过程的影响,液水含量(LWC)和水成物粒子的滴谱特征是影响积冰厚度的两个重要因素^[21]。由于雾滴谱仪价格较昂贵,且高压输电线多位于山区,周围环境较恶劣,无法对液水含量进行大范围布点观测,所以通过公式较准确地计算出液水含量,将会给输电线路

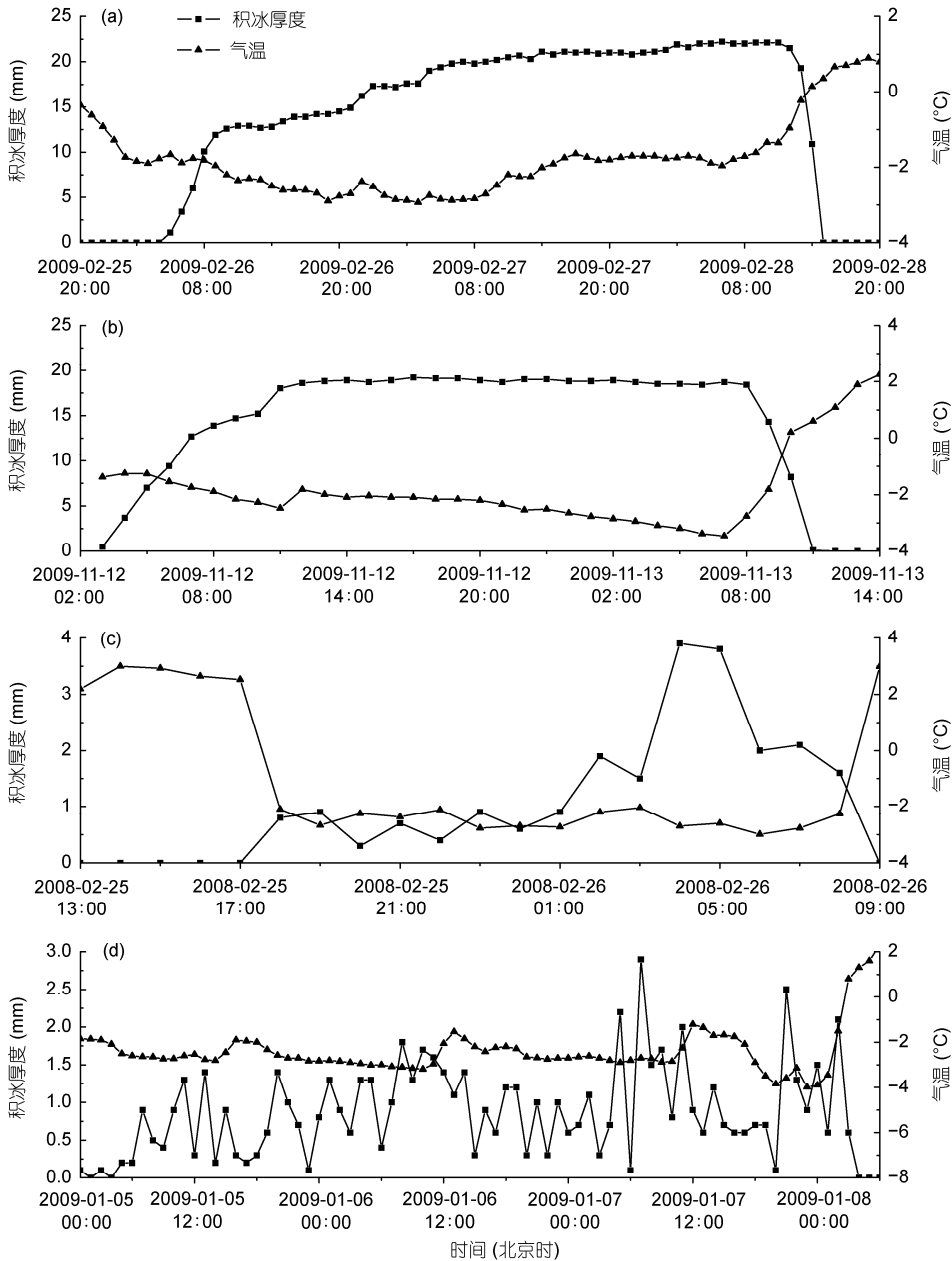


图 5 高压输电线积冰过程中冰厚与气温随时间的变化

(a) 2009 年 2 月孝渊#115; (b) 2009 年 11 月孝渊#115; (c) 2008 年 2 月张恩#303; (d) 2009 年 1 月张恩#307

积冰的研究提供一定帮助。

根据 Drage 等人^[22]和 Thorkildson 等人^[23]的方案, 利用张恩#307 和恩施雷达站的气温、气压等观测数据, 计算恩施雷达站 2009 年 2 月 24~27 日液水含量的变化特征(其中 25~27 日为积冰过程), 并将计算值与实测值进行对比分析。

首先, 使用 Bolton^[24]给出的应用于 0°C 以下水面饱和水汽压计算公式, 计算 2 个高度处的饱和水汽压。

$$e_s(t_{\text{radar}}) = 6.112e^{17.67t_{\text{radar}}/(t_{\text{radar}}+243.5)}, \quad (1)$$

$$e_s(t_{307}) = 6.112e^{17.67t_{307}/(t_{307}+243.5)}, \quad (2)$$

其中, $e_s(t_{\text{radar}})$ 和 $e_s(t_{307})$ 分别为恩施雷达站和张恩#307 处的饱和水汽压; t_{radar} 和 t_{307} 则分别为两处的气温。

假设气块从张恩#307 高度抬升到恩施雷达站高度的过程中凝结出的水滴不从气块中脱落, 并且张恩#307 处的气块刚达到饱和, 此处的混合比为

$$w(z_{307}) = \varepsilon \frac{e_s(t_{307})}{p(z_{307})}, \quad (3)$$

恩施雷达站处的混合比则为

$$w(z_{\text{radar}}) = \varepsilon \frac{e_s(t_{\text{radar}})}{p(z_{\text{radar}})}, \quad (4)$$

其中, ε 为水汽摩尔质量与干空气摩尔质量之比, 数值为 0.622; $p(z_{\text{radar}})$ 和 $p(z_{307})$ 分别为恩施雷达站和张恩#307 高度处的气压。

由于张恩#307 高度处无气压观测数据, 所以通过下式推算得到:

$$p(z_{\text{radar}}) = p(z_{307}) \left[1 - \frac{\gamma_e(z_{\text{radar}} - z_{307})}{t_{307} + 273.15} \right]^{g/(\gamma_e R)}, \quad (5)$$

其中, $g = 9.8 \text{ m s}^{-2}$, γ_e 为通常情况下气温的垂直递减率, 数值为 $0.0065 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$; z_{radar} 和 z_{307} 分别为恩施雷达站和张恩#307 处的海拔高度, 分别为 1722 和 1239 m; R 为干空气的摩尔气体常数, 数值为 $287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

z_{radar} 高度的空气密度则可以通过下式得到:

$$\rho(z_{\text{radar}}) = \frac{348 \times 10^3 p(z_{\text{radar}})}{t_{\text{radar}} + 273.15}. \quad (6)$$

之前假设了在张恩#307 高度气团刚达饱和, 随

着气团不断抬升, 气团中的水汽不断凝结成小水滴, 其混合比也不断下降. 因此, $w(z_{307})$ 与 $w(z_{\text{radar}})$ 之差则可以认为是在 z_{radar} 高度单位质量的空气中所含液态水的质量, 所以该高度处的液水含量为

$$W(z_{\text{radar}}) = [w(z_{307}) - w(z_{\text{radar}})] \rho(z_{\text{radar}}). \quad (7)$$

将计算得到的液水含量与 FM-100 型雾滴谱仪测得的液水含量进行了对比(图 6(a)), 发现两者的变化趋势基本一致, 当液水含量的观测值出现峰值或谷值时, 计算值也相应出现峰值或谷值, 但计算所得的液水含量在数值上约为观测值的 3 倍. 这主要是因为: 一方面, 雾滴谱仪观测的是粒径 $2\sim 50 \mu\text{m}$ 的雾滴, 而在实际观测中我们发现较强的积冰过程中, 多有毛毛雨发生, 推测有更多大于 $50 \mu\text{m}$ 的液滴悬浮在空中, 造成液水含量观测值比实际要偏小; 另一方面, 积冰的出现在一定程度上会减小此高度处的混合比, 加之实际情况中, 气团抬升凝结出的水滴会有部分脱落, 使得实际气团中的水汽凝结率要大于理想状态下的, 从而进一步减小了恩施雷达站处的混合比, 使得 $w(z_{307})$ 与 $w(z_{\text{radar}})$ 的差值增大, 最终造成计算所得的液水含量大于实际值. 同时, 还可能因为观测点

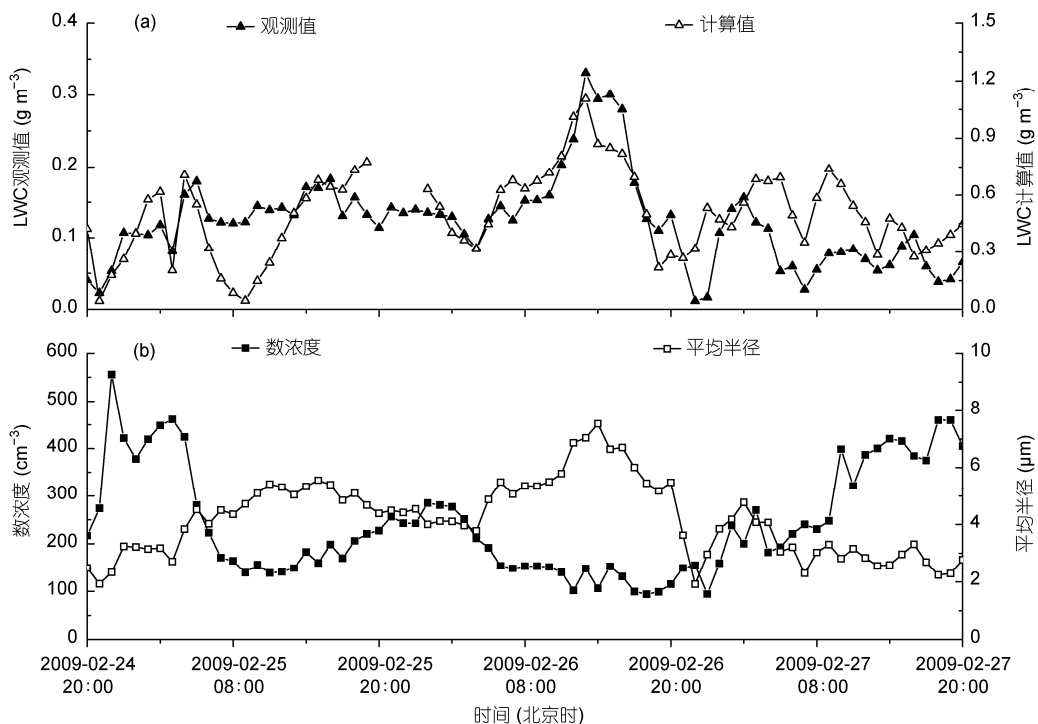


图 6 2009 年 2 月 24~27 日恩施雷达站液水含量观测值和计算值(a)及数浓度和平均半径(b)随时间的变化
25 日 20:00~23:00 张恩#307 气温缺失

受别处移动而来云的影响,使得抬升贡献减小,导致计算所得的液水含量大于实际值。

进一步分析该时间段雾滴数浓度和平均半径的变化特征(图 6(b))可以发现,液水含量与平均半径的变化趋势基本一致。2月26日13:00液水含量出现极大值时,平均半径达到了 $7.04 \mu\text{m}$,而数浓度仅为 148 cm^{-3} ,这说明大粒子对液水含量起主要贡献^[25]。

3 结论

(1) 恩施雷达站气温与张恩#307 处气温呈显著正相关关系,相关系数为 0.97,显著性水平低于 0.0001。

(2) 高压输电线表面温度与环境气温呈显著正

相关关系,相关系数为 0.97,显著性水平低于 0.0001,且输电线表面温度比环境气温高约 $2\sim 4^\circ\text{C}$,致使环境气温略低于 0°C 时,高压输电线不会出现积冰。

(3) 高压输电线出现积冰时的气象条件特征为相对湿度维持在 95%以上;气温低于 -2°C 时,积冰开始出现;随着气温降低,积冰厚度增长明显;气温回升到 $-2\sim -1^\circ\text{C}$ 时,积冰开始融化脱落。积冰发生和脱落时的气温都明显低于电线积冰模拟观测时的阈值。当积冰厚度较小时,积冰厚度其受气温变化的影响非常明显。

(4) 积冰过程中液水含量计算值与观测值的变化特征基本一致,但计算值约为观测值的 3 倍。液水含量的变化趋势与平均半径的变化基本一致。

参考文献

- 1 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008 年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析. 电网与水力发电进展, 2008, 24: 4-8
- 2 朱昌成, 阮羚, 汪涛, 等. 湖北电网输电线路冰害事故分析及应对措施. 湖北电力, 2008, 32(增刊): 82-84
- 3 McKay G A, Thompson H A. Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data. J Appl Meteorol, 1969, 8: 927-935
- 4 Ahti K, Makkonen L. Observation on rime formation in relation to routinely measured meteorological parameters. Geophysica, 1982, 19: 75-85
- 5 Sundin E, Makkonen L. Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data. J Appl Meteorol, 1998, 37: 523-529
- 6 Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires. J Appl Meteorol, 1984, 23: 929-939
- 7 Lu M L, Popplewell N, Shah A H. Freezing rain simulations for fixed, unheated conductor samples. J Appl Meteorol, 2000, 39: 2385-2396
- 8 Fu P, Farzaneh M, Bouchard G. Two-dimensional modelling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors. Cold Reg Sci Technol, 2006, 46: 132-146
- 9 Degaetano A T, Belcher B N, Spier P L. Short-term ice accretion forecasts for electric utilities using the weather research and forecasting model and a modified precipitation-type algorithm. Weather Forecast, 2008, 23: 838-853
- 10 Wen Z, Johnny C L Chan, Wen C, et al. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008. Mon Weather Rev, 2009, 137: 3978-3991
- 11 滕中林. 架空线路的结冰及冰厚计算. 中国电力, 1978, 3: 53-56
- 12 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨. 气象学报, 1982, 40: 13-23
- 13 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究. 科学通报, 1983, 15: 928-931
- 14 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究. 应用气象学报, 2008, 19: 91-95
- 15 贾然, 牛生杰, 李蕊. 鄂西电线积冰微物理特征的观测研究. 气象科学, 2010, 30: 481-486
- 16 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京: 中国电力出版社, 2002. 1-115
- 17 杨华. 输电线路冰区勘测方法. 电力建设, 2011, 32: 13-18
- 18 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析. 高电压技术, 2010, 36: 775-781
- 19 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系. 中国电力, 2005, 38: 35-39
- 20 Niu S J, Zhou Y, Jia R, et al. Preliminary study of the microphysics of ice accretion on wires: Observations and simulations. Sci China Earth Sci, 2012, 55, doi: 10.1007/s11430-011-4325-8
- 21 Farzaneh M. Atmospheric Icing of Power Networks. Quebec: Springer, 2008. 7-9
- 22 Drage M A, Hauge G. Atmospheric icing in a coastal mountainous terrain: Measurements and numerical simulations, a case study. Cold Reg Sci Technol, 2008, 53: 150-161
- 23 Thorkildson R M, Jones K F, Emery M K. In-cloud icing in the Columbia Basin. Mon Weather Rev, 2009, 137: 4369-4381
- 24 Bolton D. The computation of equivalent potential temperature. Mon Weather Rev, 1980, 108: 1046-1053
- 25 Niu S J, Lu C S, Liu Y G, et al. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: A case study. Adv Atmos Sci, 2010, 27: 1259-1275