

OPGW和导线覆冰厚度差值影响因素的实验研究

输电线路中OPGW和导线覆冰情况具有相似的特性,但目前覆冰在线监测系统多数仅覆盖导线。研究了导线工作电流、OPGW和导线直径差值以及环境温度等因素,在覆冰初期对OPGW和导线覆冰厚度差值的影响及其规律。并在实验的基础上,对实验数据进行回归分析,推导出覆冰初期OPGW和导线覆冰载荷差异规律。利用这种规律可以分析同路架设的OPGW和导线覆冰灾害情况之间的关系。

吕琛 陈希 雷煜卿/中国电力科学研究院

践验证,各种传感器监测所得输电导线覆冰情况较为准确。与此同时,光纤复合架空地线(OPGW)作为输电线路的重要组成部分和通信骨干,因其与输电导线间存在一定距离,所以未能受现有导线覆冰监控系统覆盖。若为OPGW单独架设覆冰监测装置,则会使覆冰监测成本增加一倍。利用实验研究OPGW和导线覆冰厚度差值受各种变量影响的规律,从而可为利用导线覆冰监控系统预测OPGW覆冰情况提供参考。

1 OPGW和导线覆冰影响因素分析及实验方法

1.1 覆冰机理

国内外研究者将OPGW和导线覆冰过程总结为各种不同模型,主要可分为干增长模型、湿增长模型、及时变模型。

1.1.1 干增长模型

典型干增长模型为^[6]

$$M=M_0 e^{kt} \quad (1)$$

式中, M 为每米导线覆冰重量, kg/m; M_0 为每米导线平均初始冰重, kg/m; t 为覆冰时长, h; k 为常数。

$$k=4 \times 10^{-2} EWV_m/(\rho_i D_0) \quad (2)$$

式中, V_m 为平均风速, m/s; D_0 为线缆直径, cm; ρ_i 为覆冰密度, kg/m³。由常数 k 的定义可知, 当环境条件相同时, 直径越小的线路 k 值越大。

依据该模型可推得覆冰干增长阶段导线的直径 D (cm) 与覆冰质量间关系为

$$D=(1.27 \times 10^{-4} M_0/\rho_i)^{1/2}=Ce^{kt/2} \quad (3)$$

0 引言

冻雨和覆冰对电力系统而言是一种危害性较强的自然现象^[1]。自1932年美国首次记录架空输电线路覆冰事故以来,国内外研究者对于输电线路覆冰问题进行了长期的研究探索,总结出多种覆冰预测模型^[2-4]。但多数模型中需要诸如空气含水量、过冷却水滴中值直径等微气象参数,而实际覆冰线路区域气象条件较为复杂且地理位置相对偏远,并不利于各种参数的监测。

2008年1月中旬~2月上旬,我国南方因持续性降雪冰冻天气发生冰灾,大部分地区电网受损甚至停运,电力系统蒙受巨大经济损失。此后国内研究者重点关注覆冰在线监测等课题,现已在覆冰多发区域架空输电线路路上装设多种覆冰监测装置,如拉力-倾角传感器、视频监控实时分析、光纤光栅传感器等^[5]。经实



吕琛/硕士研究生

关键词/Keywords

OPGW ·
输电导线 ·
覆冰厚度差 ·
回归分析 ·

式中, $C = (1.27 \times 10^{-4} M_0 / \rho_i)^{1/2}$, 为常数。

进而可知导线直径增长速度为

$$\frac{dD}{dt} = \frac{C}{2} k e^{kt/2} \quad (4)$$

可见相同环境条件下的干增长过程中, 导线半径越小, 覆冰质量和覆冰厚度增长速度越快。

1.1.2 湿增长模型

典型湿增长模型为^[7]

$$\frac{dM}{dt} = C_1 \sqrt{V_m D/2} (-T) \quad (5)$$

式中, C_1 为常数; D 为覆冰后导线直径。

对式(5)进行积分, 并假设雨淞覆冰密度为 0.9 kg/m^3 , 可得覆冰后导线半径为:

$$(D/2)^{3/2} = C_2 \sqrt{V_m} (-T) t \quad (6)$$

式中, C_2 为与传热过程相关的常数。

对式(6)求导, 可得湿增长情况下覆冰后导线半径增长速度为

$$\frac{dD}{dt} = \frac{C_3}{\sqrt{D/2}} \quad (7)$$

式中, $C_3 = \frac{2}{3} C_2 \sqrt{V_m} (-T)$, 为常数。

可见湿增长过程中, 导线直径越小, 覆冰质量增长速度越慢, 但覆冰厚度增长速度依然越快。

1.1.3 时变模型

因覆冰过程的复杂性, 研究者发现期间往往存在着干湿增长之间的转换。

在重庆大学肖丹华基于多相流理论的导线覆冰过程分析中, 将局部覆冰过程视为准静态过程, 利用水膜厚度和覆冰厚度的非线性方程组, 得出了覆冰时变模型^[8]。该模型指出, 输电线路覆冰干湿增长的转变可以通过临界厚度 B_w 来判定: 当 $B_w = 0$ 时, 导线表面不覆冰; 当 $B_w = \infty$ 时, 覆冰为干增长; 其他大部分情况均为自干增长向湿增长过渡的过程。

而在实际覆冰环境中, 往往经历着温度逐渐降低的过程, 现场观测和理论分析均表明: 导线覆冰开始为湿增长, 随着温度降低, 导线覆冰逐渐向干增长转变。

综合各种覆冰模型可知, 同一环境下, OPGW覆冰强度往往大于导线。

1.2 实验原理

基于以上理论背景, 可知在同一覆冰环境

条件下, 当导线工作电流小于保线电流时, 导线与OPGW同时覆冰: 初始阶段覆冰干增长阶段OPGW覆冰厚度和质量增速均大于导线, 二者直径差距缩小的同时, OPGW较导线承受了更大的覆冰重力载荷; 二者覆冰若同时转变为湿增长, 覆冰后直径较大的线路将承受更大的覆冰重力载荷, 可见覆冰初始阶段对于OPGW覆冰增长情况的监测意义重大。因此, 针对覆冰初期3 h内OPGW和导线覆冰厚度差异进行研究, 进而探究各外界因素对该差异的影响规律。

经长期探索, 研究者多将覆冰强度公式总结为^[9]

$$I = \frac{2}{\pi} E n U W \quad (8)$$

其中, I 为覆冰强度, 即单位时间单位面积上的覆冰量; E 为碰撞系数, 主要受导线直径、风速等因素影响; n 为冻结系数, 主要受环境温度、流经导线的电流强度等因素影响; W 为空气中液态水含量。

因此, 可知在同一环境条件下, 导线与OPGW覆冰厚度的差异, 主要来自直径和工作电流的差异, 同时此厚度差值可能受到环境温度、风速、空气含水量、过冷却水滴中值直径等环境因素的影响。由于空气含水量、过冷却水滴中值直径和风速等参数在电力系统生产一线难以取得, 为避免所得结论与生产实践脱节, 仅取导线电流、导线直径及环境温度这3项参数为变量, 其余参数均假设为覆冰工况常见取值(风速 3 m/s 、水滴中值直径 $25 \mu\text{m}$ 、空气中液态水含量为 0.8 g/m^3)。

1.3 实验环境

实验环境如图1所示。



图1 实验环境

先后取1.3 m长各种型号OPGW (OPGW125、OPGW150) 和导线 (LGJ300/40、LGJ400/35、LGJ400/50、LGJ630/45) 放置在高低温箱内同一位置, 调节温度至零下, 以相同降水量和风速进行覆冰, 每30 min量取3个测量点直径, 取平均值作为测量值。取实际应用中匹配使用的OPGW和导线型号 (LGJ300/40、LGJ400/35与OPGW125匹配; LGJ400/50、LGJ630/45与OPGW150匹配), 用地线覆冰厚度减去导线覆冰厚度, 得到OPGW和导线覆冰厚度差。

2 OPGW和导线覆冰试验数据分析

2.1 电流对OPGW和导线覆冰厚度差的影响

将导线流过不同工作电流时各组OPGW和导线覆冰厚度差随时间变化曲线绘制出来 (以环境温度 -5°C 为例), 如图2、图3所示。

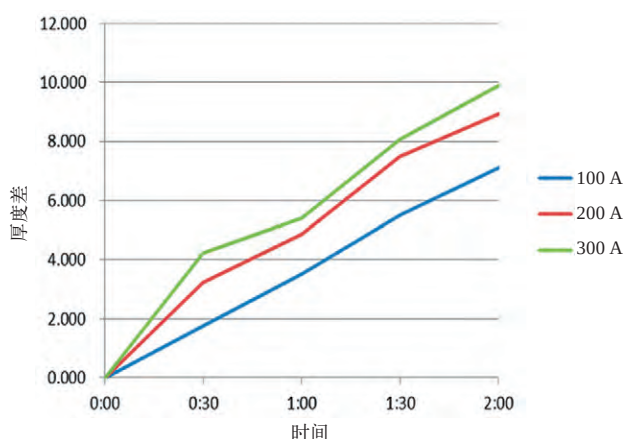


图2 OPGW125与LGJ300/40 (不同工作电流) 覆冰厚度差随时间变化图

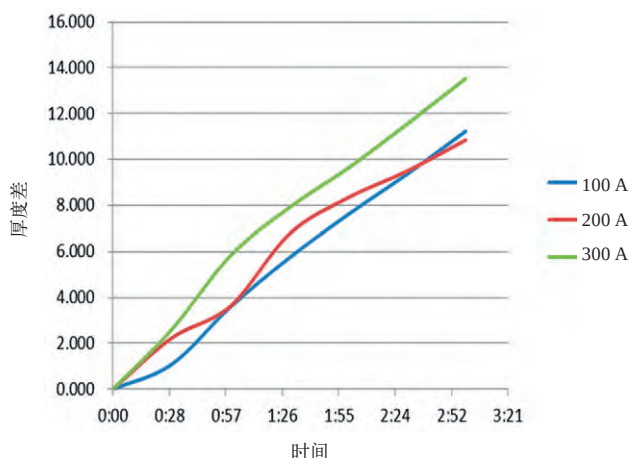


图3 OPGW150与LGJ400/50 (不同工作电流) 覆冰厚度差随时间变化图

可见OPGW和导线覆冰厚度差在导线工作电流较小时随时间呈线性增长, 主要是因为此时导线所产生的焦耳热较小, 对冻结系数的影响尚不明显, 因而OPGW和导线覆冰同时处于干增长阶段。与此同时OPGW和导线覆冰厚度差随导线工作电流增大而增大, 且载流面积较小的导线增大趋势更为明显, 主要是因为导线所产生的焦耳热随工作电流的增大而增加, 使导线此时的冻结系数明显减小, 因而OPGW和导线覆冰厚度差将显著增大。

2.2 直径差对OPGW和导线覆冰厚度差的影响

将不同直径差的各组OPGW和导线覆冰厚度差随时间变化曲线绘制出来 (以环境温度 -5°C 时OPGW150与LGJ400/50、LGJ630/45的组合为例)。如图4~图6所示。

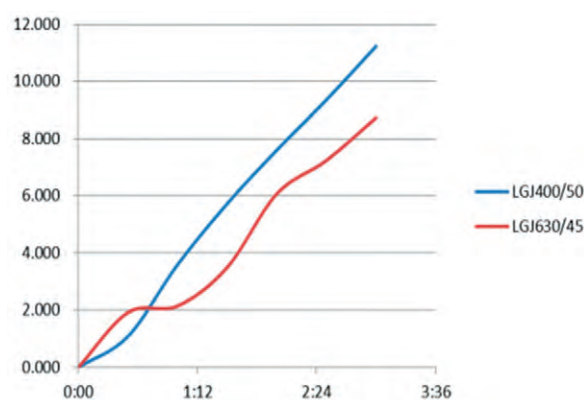


图4 导线电流为100 A时OPGW与不同型号导线覆冰厚度差随时间变化图

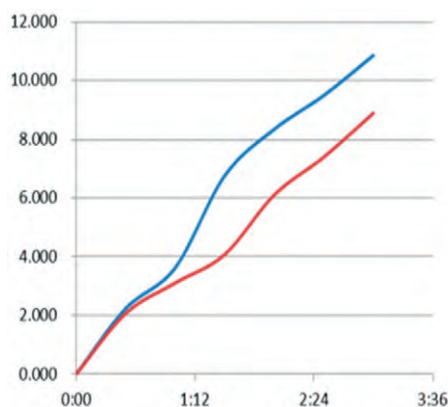


图5 导线电流为200 A时OPGW与不同型号导线覆冰厚度差随时间变化图

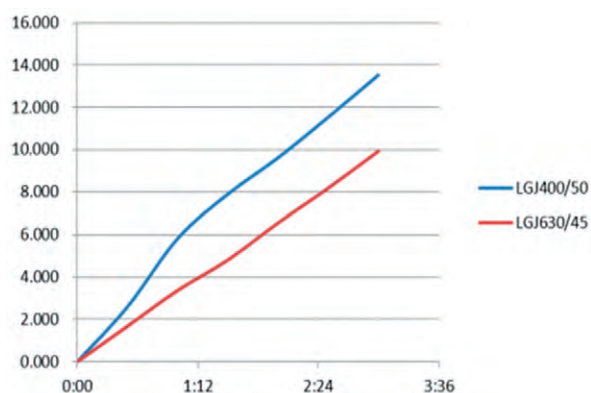


图6 导线电流为300 A时OPGW与不同型号导线覆冰厚度差随时间变化图

可见在相同环境条件下，OPGW与其匹配的导线覆冰厚度差随导线直径增大而减小，即随OPGW和导线的直径差增大而减小，该现象主要由于导线直径增大时，电阻减小，进而流过相同工作电流所产生的焦耳热减小，因此冻结系数增大。虽然与此同时碰撞系数会随导线直径增大而减小，但冻结系数的明显变化使得OPGW和导线的覆冰厚度差减小。

2.3 环境温度对OPGW和导线覆冰厚度差的影响

将不同环境温度下各组OPGW和导线覆冰厚度差随时间变化曲线绘制出来（以OPGW150与工作电流为300A的LGJ400/50为例）。如图7所示。

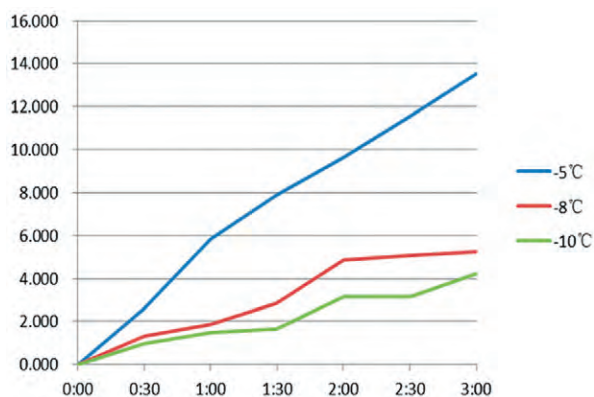


图7 不同环境温度下OPGW和导线覆冰厚度差随时间变化图

可见在 $-10 \sim -5$ ℃区间，OPGW和导线覆冰厚度差随温度的降低而减小，主要由于随环境温度降低，使得覆冰表面热损失增加，导线冻结系数增大，因此OPGW和导线的覆冰厚度差减小。

3 OPGW和导线的覆冰厚度差增长特性回归分析

3.1 回归分析简介

回归分析是应用极其广泛的数据分析方法之一。它基于观测数据建立变量间适当的依赖关系，以分析数据内在规律，并可用于预报、控制等问题^[10]。本文主要涉及回归分析中的两个概念：一元线性回归以及判定系数 R^2 。

3.1.1 一元线性回归

一元线性回归是指用回归直线拟合本实验各组数据的“厚度差—时间”散点图中各数据点，使得实测厚度差与回归直线之差的平方和达到最小值。此时回归直线方程为

$$y=a+bx \quad (8)$$

式中， y 为OPGW和导线覆冰厚度差； x 为时间； a 为截距； b 为回归直线斜率，也称回归系数，即该时段内覆冰厚度差的平均增长速度。

3.1.2 判定系数 R^2

回归分析中常用相关系数 r 来度量两个变量间的线性关系，其计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中， x_i 、 y_i 为第 i 个数据点处 x 、 y 的值； $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 为 x 、 y 的样本均值。

由公式可知， r 的取值在 $-1 \sim 1$ 之间，且 r 的绝对值越大， x 与 y 的相关性越强，反之相关性越弱。

而在判定一个线性回归直线的拟合优度的好坏时，相关系数的平方——判定系数 R^2 是一个重要判定指标，由于判定系数既在表述 x 、 y 相关性方面与相关系数作用相同，又小于相关系数的绝对值，因而它可以防止对相关系数所表示的相关做夸张的解释。判定系数体现了回归模型所能解释的因变量变异性的百分比。如果 $R^2=0.775$ ，则说明变量 y 的变异中有77.5%是由变量 x 引起的；当 $R^2=1$ 时，表示所有实测数据点全部落在回归直线上；当 $R^2=0$ 时，表示自变量与因变量无线性关系。

3.2 OPGW和导线的覆冰厚度差随时间变化曲线的回归分析

基于上述理论基础，对覆冰初期OPGW和导

线的覆冰厚度差随时间变化曲线进行一元线性回归（直线拟合），所得直线斜率即为OPGW和导线的覆冰厚度差增长速度。将不同条件下OPGW和导线的覆冰厚度增长速度差以及拟合过程的 R^2 值绘制成表格，如表1、表2所示。

表1 不同条件下OPGW和导线覆冰厚度差增长速度mm/30min

	OPGW125与 LGJ300/40		OPGW150与LGJ400/50			OPGW150与 LGJ630/45	
	-5℃	-10℃	-5℃	-8℃	-10℃	-5℃	-10℃
100 A	1.80	0.19	2.00	1.07	-0.26	1.49	-0.74
200 A	1.97	0.42	2.15	1.11	0.19	1.40	-0.48
300 A	2.27	0.47	2.10	1.15	0.65	1.64	0.20

表2 不同条件下OPGW和导线覆冰厚度增长厚度差线性拟合 R^2 值

	OPGW125与 LGJ300/40		OPGW150与LGJ400/50			OPGW150与 LGJ630/45	
	-5℃	-10℃	-5℃	-8℃	-10℃	-5℃	-10℃
100 A	1.00	0.03	1.00	0.88	0.09	0.96	0.92
200 A	0.99	0.39	0.98	0.86	0.28	0.99	0.55
300 A	1.00	0.78	0.99	0.93	0.94	1.00	0.68

综合表1、表2内容，可推得在环境温度较高、线路负载较重或OPGW和导线直径差值较小时，OPGW和导线覆冰厚度差值呈线性增长，此时OPGW覆冰载荷将明显大于导线覆冰载荷，应提前对OPGW进行融冰操作；而当环境温度较低、线路负载较轻且OPGW和导线直径差值较大时，OPGW和导线覆冰厚度相差不明显，可在导线融冰的同时再对OPGW进行融冰操作。

4 结束语

综上所述，可得在典型覆冰条件下，对于覆冰初期OPGW和导线覆冰厚度差值有如下结论。

- 1) 该差值随导线负载增大而增大。
- 2) 该差值随OPGW和导线直径差距的增大而减小。
- 3) 该差值随环境温度的降低而减小。

4) 在环境温度较高、线路负载较重或OPGW和导线直径差值较小时，OPGW覆冰载荷将明显大于导线覆冰载荷，应提前对OPGW进行融冰操作；其余情况下可在导线融冰的同时再对OPGW进行融冰操作。

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] 陈凌. 旋转圆柱体覆冰增长模型与线路覆冰参数预测方法研究[D]. 重庆大学, 2011.
- [3] Ping Fu, Masoud Farzaneh and Gilles Bouchard. Two-dimensional modeling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 46(2): 132-146.
- [4] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等. 输电导线的覆冰时变仿真模型[J]. 高电压技术, 40(2): 336-343.
- [5] 马国明. 基于光纤光栅传感器的架空输电线路覆冰在线监测系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [6] P. McComber and J. W. Covoni. An Analysis of Selected Ice Accretion Measurements on a Wire at Mount Washington[C]. Proceedings of the Forty-second Annual Eastern Snow Conference, Montreal, Canada, 1985.
- [7] Imai. Studies on Ice Accretion[J]. Researcher on Snow and Ice, 1953, 3(1): 35-44.
- [8] 肖丹华. 基于多相流理论的导线覆冰过程研究[D]. 重庆大学, 2011.
- [9] Cansdale, J. T. and I. I. McAughton. Calculation of Surface Temperature and Ice Accretion Rate in a Mixed Water Droplet/Ice Crystal Cloud[R]. Royal Aircraft Establishment Technique Report, 1977.
- [10] 邵淑彩, 孙毓玉, 何娟娟. 应用数理统计[M]. 湖北: 武汉大学出版社, 2005.

(收稿日期: 2015-05-15) EA

作者简介

吕琛 (1990-), 男, 硕士研究生, 从事电力物联网及电力光纤通信等方面的研究工作。

陈希 (1962-), 男, 教授级高级工程师, 从事电力通信专业领域技术研究、设备研制、系统设计、科研管理、经营管理工作。