

大档距/高差线路非均匀覆冰下的 脱冰跳跃特性研究

闫向龙, 郭裕钧, 黄桂灶, 张血琴, 吴广宁

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:冰区输电导线上的覆冰脱落会减小绝缘间隙,可能引发闪络跳闸,威胁线路安全运行。针对目前基于有限元法的非均匀覆冰下导线脱冰跳跃特性研究的不足,采用有限元方法建立3档四分裂导线计算模型,研究非均匀覆冰和均匀覆冰对导线脱冰跳跃特性的影响,分析非均匀覆冰导线在档距、高差、覆冰厚度等参数下对最大脱冰跳跃高度的影响规律,并对现有经验公式进行改进。结果表明,最大脱冰跳跃高度与非均匀覆冰密切相关,非均匀覆冰下导线的脱冰跳跃高度可能大于均匀覆冰下的脱冰跳跃高度,且最大脱冰跳跃高度所在位置可能不在档距中点,更容易引发闪络跳闸事故。因此,所提非均匀覆冰下导线的脱冰跳跃特性对重冰区线路绝缘设计具有重要工程价值。

关键词:输电线路; 非均匀覆冰; 脱冰跳跃; 脱冰跳跃高度

中图分类号: TM 753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0001-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220601

Research of Ice Shedding Jump Characteristics of Transmission Lines with Lager Span and High Elevation under Non-uniform Accreted Ice

YAN Xianglong, GUO Yujun, HUANG Guizao, ZHANG Xueqin, WU Guangning

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Ice shedding on transmission conductors in ice areas can reduce the insulation gap, which may trigger a flashover trip and threaten the safe operation of lines. At present, the research on ice shedding jump characteristics of conductor under non-uniform accreted ice based on finite element method is insufficient, so the calculation model of continuous three-span transmission line with quad bundle conductor is established by the finite element method. The effects of non-uniform accreted ice and uniform accreted ice on ice shedding jump characteristics of the conductor are studied, and the dynamic characteristics of transmission line conductors with non-uniform accreted ice after ice shedding under different parameters such as the span length, elevation difference and ice thickness are analyzed, and the existing empirical formula is improved. The results show that the maximum ice shedding jump height is closely related to non-uniform accreted ice, the ice shedding jump height of the conductor under non-uniform accreted ice may be larger than that under uniform accreted ice, and the position of the maximum jump height of transmission line conductors after ice shedding may not be at the mid-point of the span, more likely to cause flashover and trip accident. Therefore, the proposed ice shedding characteristics of conductor under non-uniform accreted ice have important engineering value for the insulation design of transmission line in heavy ice areas.

Key words: transmission line; non-uniform accreted ice; ice shedding; jump height

0 引言

输电线路覆冰事故一直是电力系统严重的自然灾害之一^[1-3]。远距离输电线路难免会跨越高山、峡谷/大河区。对于大高差爬山线路,由于海拔的影

响,线路档内的覆冰往往呈现覆冰厚度随海拔递增的趋势。对于跨越峡谷/大河的大档距线路,由于环境中风速、湿度和空气中液态水含量等环境因子分布不均匀,导致导线在覆冰时可能出现覆冰厚度沿档距分布不均的现象。据统计^[4-5],线路90%以上的断线和倒塔是由于微地形、微气象下引起非均匀

覆冰以及档距、高差过大等因素引起的纵向不平衡张力造成的。由于微地形、微气象因素的影响引起线路不均匀覆冰,2011年1月,国网四川省电力公司500 kV布城线4回线路全部跳闸停运。因此为保障重冰区输电线路的安全运行,亟需开展输电线路脱冰跳跃动力特性的研究。

国内外学者对覆冰导线脱冰跳跃特性已开展了广泛的研究^[6-8]。文献[9]最先将覆冰和冰脱落等效为集中载荷来模拟实现。文献[10]在国内最早利用均匀分布在导线上若干点处的集中载荷来模拟覆冰。文献[11]基于相似性理论,提出用于模拟导线脱冰跳跃的缩比模型试验方法,并与真型线路脱冰试验对比验证了方法的正确性,为输电线路的脱冰跳跃研究提供了新思路。文献[12]研究发现不均匀脱冰对绝缘子串张力影响显著,其瞬态值达导线初始张力2倍多。文献[13]建立了三自由度多档导线运动模型,结果表明随机非均匀脱冰跳跃幅值最大点并不一定在脱冰档中点。文献[14]利用有限元方法对均匀覆冰线路脱冰后的动力响应进行了参数研究,并提出了计算最大脱冰跳跃高度的简单公式。以上研究均只考虑均匀覆冰,即均假设冰载荷在一档内均匀分布,现有设计规范^[15]也只考虑均匀覆冰。下面采用有限元法建立线路脱冰跳跃模型,针对大档距和大高差线路两种典型的非均匀覆冰形式,研究档距、高差、覆冰厚度等因素对脱冰跳跃特性的影响。基于非均匀覆冰导线脱冰计算分析结果,对现有脱冰跳跃经验公式进行改进。

1 分裂导线有限元模型

1.1 有限元模型

采用3跨连续档四分裂导线作为研究对象,导线型号为LGJ-400/35,其参数如表1所示。由于输电线路杆塔的变形对导线脱冰跳跃的影响很小^[16],所建立的有限元模型忽略输电杆塔刚度的影响,有限元模型包含导线、绝缘子串、间隔棒和线夹等典型部件,如图1所示。其中:导线采用只能承受拉伸不能承受压缩的索单元模拟,在Abaqus软件中可以通过设置空间杆单元的材料性质来模拟索,导线单元长取0.5 m可以满足单元收敛性要求^[17];间隔棒和

线夹简化为框架,其密度根据实际间隔棒重量来计算确定,采用梁单元进行模拟;悬垂绝缘子串简化为直杆,与杆塔连接处释放转动自由度,仅约束3个平动自由度,以模拟脱冰跳跃过程中能量在不同档间的相互传递。

表1 LGJ-400/35 导线物理参数

导线有效截面积 S/mm^2	导线直径 D/mm	弹性模量 E/GPa
425.24	26.82	65
线密度 $\rho_{\text{str}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	初始张力 F_0/kN	泊松比 μ
1.349	26.673	0.3

阻尼是动力学特性的一个重要参数,但输电导线阻尼的精准确定十分困难。针对脱冰跳跃问题,已有研究表明阻尼会影响导线脱冰跳跃动力特性,但其对导线脱冰后第一个峰值(脱冰跳跃高度)影响很小^[14]。参照文献[18],采用瑞利阻尼模型,阻尼比取值2%。

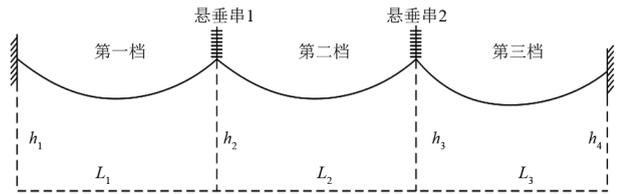


图1 计算模型

1.2 覆冰载荷的模拟

当导线上承受覆冰载荷作用时,导线上的载荷包括自重载荷和覆冰载荷。为了简化覆冰过程,提高计算效率,采用改变导线的重力加速度来模拟覆冰过程^[11]。导线覆冰后的等效密度可以通过式(1)计算。

$$\rho' = \frac{w_1 + w_2}{Ag} = \rho_1 + \rho_2 \quad (1)$$

式中: ρ_1 为导线单位长度密度, kg/m^3 ; w_1 为导线单位长度重量, N/m ; ρ_2 为导线单位长度覆冰密度, kg/m^3 ; w_2 为导线单位长度覆冰重量, N/m ; A 为导线截面积, m^2 ; g 为重力加速度。

为了模拟导线非均匀覆冰,将导线均匀分割成200小段,通过设置每段的覆冰载荷模拟非均匀覆冰形式。均匀覆冰如图2(a)所示,即档内覆冰厚度相同。针对线路大档距和连续爬坡线路区段设置了两种典型的非均匀覆冰方式,如图2(b)和图2(c)所示,其中小黑原点越大表示覆冰越厚。设非均匀覆冰档导线的长度为 L ,直径为 D ,则导线在非均匀覆冰时每段的覆冰质量 m_i 和总质量 M 可表示为:

$$m_i = \rho_{ice} \pi b_{ni} (b_{ni} + D) l_i \quad (2)$$

$$M = \sum_{i=1}^N m_i \quad (3)$$

式中: m_i 为第*i*段导线的覆冰质量,kg; b_{ni} 为第*i*段导线的覆冰厚度,mm; l_i 为第*i*段导线的长度,m; ρ_{ice} 为覆冰密度,kg/m³; D 为导线直径,m; M 为导线覆冰总质量,kg; N 为导线分段数。

为了对比均匀覆冰和非均匀覆冰下脱冰动力特性的差异,采用控制单一变量的方法。无论是均匀覆冰还是非均匀覆冰,假设控制档内的覆冰总重量相同。先计算非均匀覆冰形式下档内的覆冰总重量,然后可通过式(4)计算均匀覆冰形式的覆冰厚度 b_u 。

$$b_u = \frac{\sqrt{D^2 + \frac{4M}{\rho_{ice} \pi L}} - D}{2} \quad (4)$$

式中: b_u 为均匀覆冰时的覆冰厚度,mm; L 为导线长度,m。

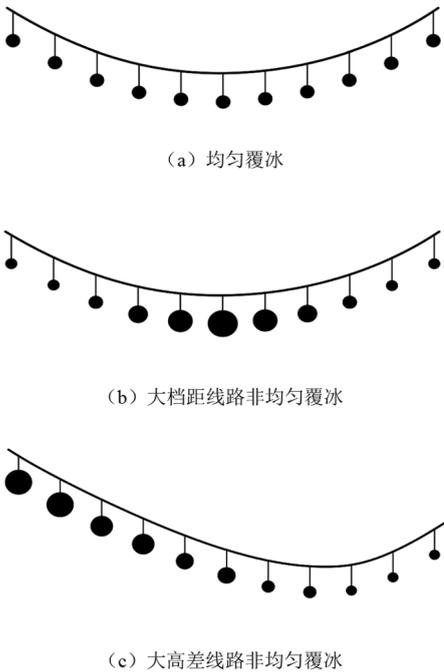


图2 导线覆冰

1.3 脱冰载荷的模拟

导线的密度保持不变,通过改变惯性加速度来实现脱冰过程的有限元模拟。此时脱冰档导线的惯性加速度可表示为

$$g_e = \frac{w_1 + w_2}{w_1 + w_2(1 - \mu)} g \quad (5)$$

式中: g_e 为脱冰档导线脱冰前的等效惯性加速度;

μ 为导线的脱冰率。当导线脱冰时,更改惯性加速度 g_e 即可实现导线部分覆冰的脱落。

1.4 数值模拟验证

为了验证所提数值模型的正确性,利用真型五档线路^[19]的结果进行验证,真型线路的档距为283 m、387 m、247 m、213 m和309 m,其高差分别为5 m、16 m、28 m、16 m和8 m。导线直径为19.6 mm,单位长度质量为0.85 kg/m,截面积为227.6 mm²,杨氏模量为91 800 MPa。分别开展真型线路在1.49 kg/m、2.98 kg/m、4.47 kg/m、5.96 kg/m不同覆冰载荷下的脱冰试验,并得到其最大脱冰跳跃高度。此外文献[20]也用有限元方法模拟了相应的脱冰过程,并得到其最大脱冰跳跃高度。将数值模拟结果与真型线路试验结果以及文献[20]的数据进行对比,结果如图3所示。可以看出,最大脱冰跳跃高度随着脱冰冰量的增加而增加,数值模拟结果与真型试验结果最大误差为7%。这可能是因为有限元模型中导线的阻尼比与实际导线的阻尼比存在一定的差异导致的。

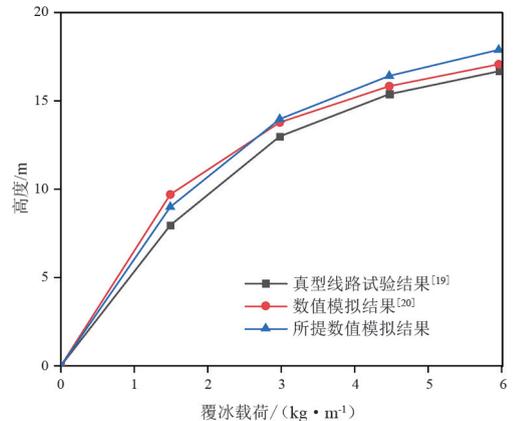


图3 真型试验线路和数值模型得到的最大脱冰跳跃高度

2 非均匀覆冰导线的脱冰跳跃计算

2.1 导线脱冰跳跃高度的精确定义

现有研究^[12-14]只考虑导线均匀覆冰,脱冰跳跃后档距中点反弹的脱冰跳跃高度最大,定义其为最大脱冰跳跃高度。当考虑非均匀覆冰时,覆冰厚度在档内存在差异,此时,导线脱冰跳跃最大高度不一定在档距中点。此外,由于导线和地线的弧垂存在差异,当研究脱冰跳跃导致的导线与地线的绝缘间隙裕度问题时,导线的最大脱冰跳跃高度及其在档

内所处的位置同等重要。

对此,分别提取脱冰档导线沿档各点的最大脱冰跳跃高度,构成脱冰跳跃高度曲线,如图 4 所示。该图可以直观反映脱冰档不同位置的最大脱冰跳跃高度的变化情况。其中,导线脱冰跳跃高度最大值所在档内的位置定义为 P_{\max} ,其表示为脱冰跳跃高度最大值的位置(到端部的距离)与档距的比值。

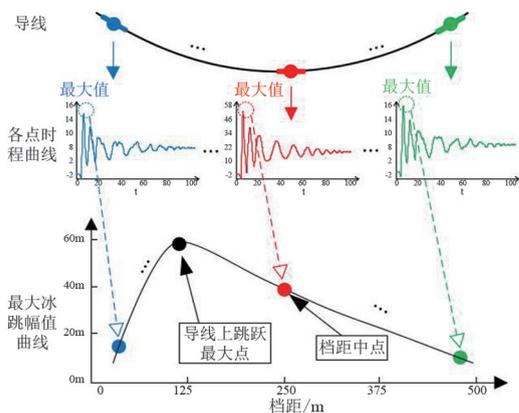


图 4 脱冰跳跃高度的定义示意

2.2 导线脱冰跳跃高度

基于上述有限元模型及覆冰和脱冰模拟方法,对输电线路脱冰跳跃高度进行分析。对于大高差、大档距线路,根据应力弧垂表确定导线初始张力。研究对象为 3 档四分裂导线,脱冰档位于第二档,如图 1 所示。这里主要针对导线非均匀覆冰与均匀覆冰下,数值模拟得到导线最大脱冰跳跃高度与各种参数之间的关系,参数有档距、高差、覆冰厚度、导线的初始张力等。

1) 档距的影响

采用单因素控制变量法,研究脱冰档的档距分别为 400 m、600 m、800 m、1000 m 时导线最大脱冰跳跃高度的变化规律。第一档和第二档的档距均为 100 m,无高差,脱冰率为 100%,则不同档距下的最大脱冰跳跃高度如图 5 所示。其中,不同档距下导线初始张力分别为 30.42 kN、29.89 kN、29.70 kN、29.62 kN。

由图 5(a)可见,随着档距的增加,最大脱冰跳跃高度呈现逐渐减小的趋势。最大脱冰跳跃高度与非均匀覆冰密切相关,随着档距的增加,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响越强烈。由图 5(b)可见,最大脱冰跳跃高度随着档距的增加先增大后减小,在档距为 600 m 时最大脱冰跳跃高度达到最大值,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响相对较

小,但对发生最大脱冰跳跃高度的位置影响较大;随着档距的增大,发生最大脱冰跳跃高度的位置逐渐向档距端部靠近,档距为 1000 m 时,发生最大脱冰跳跃高度位置 P_{\max} 为 0.26。

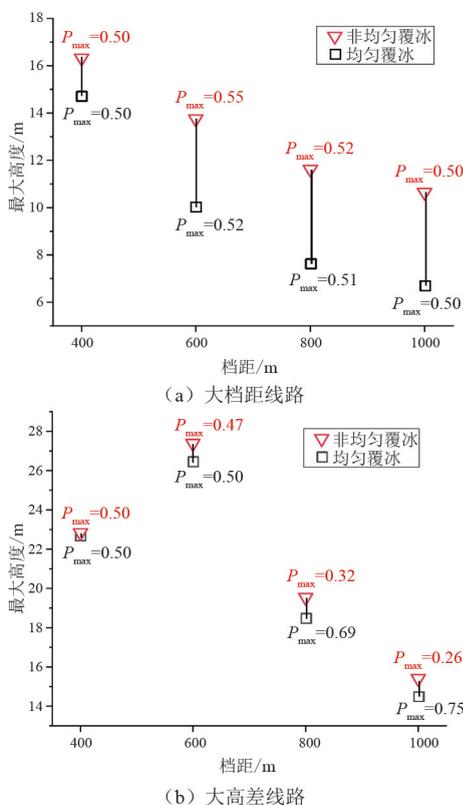


图 5 档距对最大脱冰跳跃高度的影响

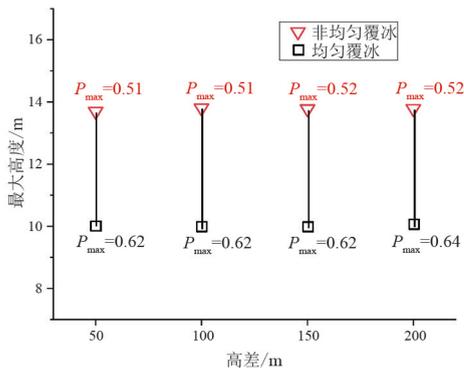
2) 高差的影响

基于 3 档四分裂线路模型(档距为 100 m—600 m—100 m),采用单因素控制变量法,研究脱冰档高差分别为 50 m、100 m、150 m、200 m 下导线的最大脱冰跳跃高度的变化规律。不同高差下导线最大脱冰跳跃高度如图 6 所示,其中导线的初始水平张力为 29.89 kN。

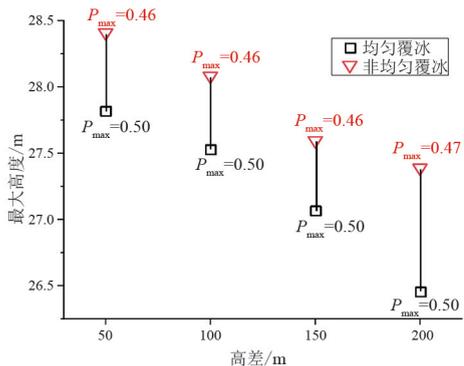
由图 6(a)可得,对于大档距线路,高差对最大脱冰跳跃高度的影响相对较小,非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度与均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度相差基本保持在 38%左右。由图 6(b)可得,最大脱冰跳跃高度随着高差的增大而减小,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响较大。

3) 覆冰厚度的影响

为了进一步研究覆冰厚度对最大脱冰跳跃高度的影响,根据 3 档四分裂线路模型(档距为 100 m—600 m—100 m),大档距线路无高差,大高差线路的高差为 200 m,采用单因素控制变量法,分析覆冰厚

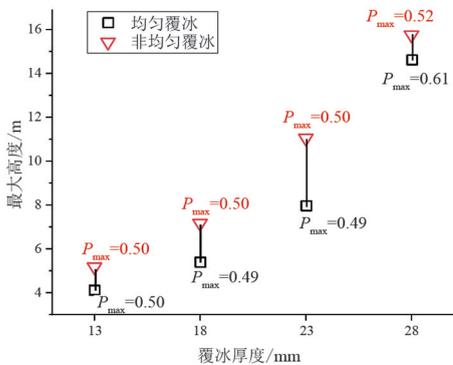


(a) 大档距线路

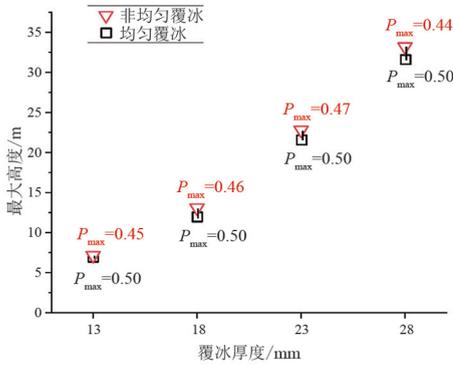


(b) 大高差线路

图 6 高差对最大脱冰跳跃高度的影响



(a) 大档距线路



(b) 大高差线路

图 7 覆冰厚度对最大脱冰跳跃高度的影响

度为 13 mm、18 mm、23 mm、28 mm 时导线的最大脱冰跳跃高度变化情况。不同覆冰厚度下导线最大脱冰跳跃高度如图 7 所示,其中不同冰区下导线的初始

张力分别为 56.72 kN、42.70 kN、32.74 kN、26.84 kN。

由图 7 可得,随着覆冰厚度的增加,最大脱冰跳跃高度也在逐渐增大,且非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度始终大于均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度。对于非均匀覆冰下的大高差线路,最大脱冰跳跃高度发生的位置并不在档距中点。综上,非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度更容易引发闪络事故,因此实际工程中进行线路校验时,应考虑导线非均匀覆冰的状况。

3 经验公式改进

进行有效预测导线脱冰跳跃高度可对线路设计提供可靠的依据。研究者们根据实验和数值模拟结果进行了总结并得出了计算脱冰跳跃高度的经验公式。下面以非均匀覆冰的模拟结果作为依据,对常见的经验公式进行误差分析并加以改进。

3.1 经验公式误差分析

目前常用的经验公式为中国输电线路设计规程^[15]利用前苏联的计算公式。

$$H = (2 - l/1000) \Delta f \tag{6}$$

式中: H 为导线最大脱冰跳跃高度, m; l 为档距, m; Δf 为导线脱冰前后静止状态的弧垂之差, m。

文献[14]对式(6)进行了简化,为

$$H = 1.82 \Delta f \tag{7}$$

以上各经验公式均能预测导线脱冰跳跃高度,但没有考虑非均匀覆冰对脱冰跳跃高度的影响,因此提出以非均匀覆冰导线脱冰跳跃的有限元结果作为依据,对以上经验公式进行误差分析,其分析结果如图 8 所示。

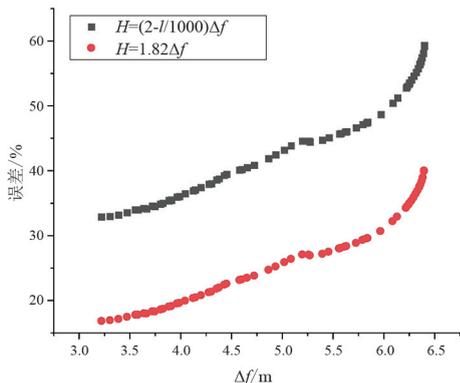


图 8 式(6)、式(7)与仿真结果相对误差

由图 8 可得,中国输电线路设计规程所用公式

的误差可达 55% 以上。文献[14]提出的经验公式误差在 35% 以下,比中国输电线路设计规程所用的公式略有提高。

3.2 经验公式改进

由于上述公式都没有考虑非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响,为进一步提高经验公式的泛化能力,引入非均匀覆冰影响系数对其进行适当改进。

由第 2.2 节分析可得,非均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度比均匀覆冰下的最大脱冰跳跃高度更大。因此,可以通过在式(6)中引入非均匀覆冰影响系数 μ 来提高其准确性,如式(8)所示。然后,基于非均匀覆冰下的脱冰跳跃结果采用最小二乘法进行拟合,得到改进后的公式如式(9)所示。

$$H = \mu(2 - l/1000)\Delta f \quad (8)$$

$$H = 1.6(2 - l/1000)\Delta f \quad (9)$$

针对档距 600 m,覆冰厚度最大值分别为 13 mm、18 mm、23 mm、28 mm 的最大脱冰跳跃高度计算结果进行改进后的公式误差分析,如图 9 所示,可见最大相对误差在 9% 以内。非均匀覆冰更加严重时,式(9)具有更精确的预测效果。因此,大档距、大高差输电线路发生非均匀覆冰时,所提改进公式具有较好的预测能力,为输电线路设计提供参考。

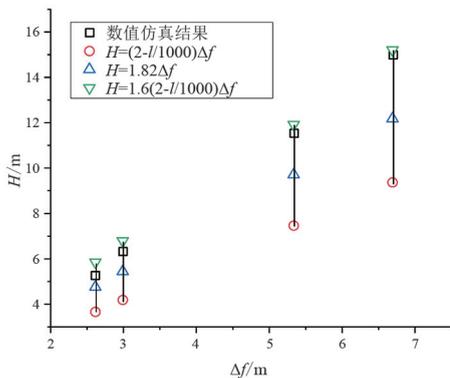


图 9 公式得到的脱冰跳跃高度

4 结论

上面采用有限元方法探讨了非均匀覆冰导线的脱冰跳跃特性,分析了档距、高差、覆冰厚度等参数对最大脱冰跳跃高度的影响规律,基于数值模拟结果,考虑非均匀覆冰影响系数,对经验公式进行改进。其结论如下:

1) 对比均匀覆冰,非均匀覆冰下发生脱冰跳跃后导线的最大脱冰跳跃高度更大。且最大脱冰跳跃

高度所在位置可能不在档距中点,更容易引发闪络事故。工程设计应考虑非均匀覆冰对脱冰跳跃的影响。

2) 大档距线路发生非均匀覆冰时,最大脱冰跳跃高度与非均匀覆冰密切相关,随着档距的增加,非均匀覆冰对最大脱冰跳跃高度的影响越强烈。大高差线路发生非均匀覆冰时,随着档距的增大,发生最大脱冰跳跃高度的位置逐渐向档距端部移动。

3) 通过在脱冰跳跃高度经验公式中引入非均匀覆冰影响系数对公式进行改进,提高了经验公式的预测准确性,且其使用范围也更加广泛。

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] 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):14-17.
- [3] 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.
- [4] 钱之银,耿翠英,李颖.超高压输电线路覆冰倒塔机理分析[J].高电压技术,2008,34(11):2495-2497.
- [5] 蒋兴良,马俊,王少华,等.输电线路冰害事故及原因分析[J].中国电力,2005,38(11):27-30.
- [6] MCCLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers and Structures, 2003, 81(8): 825-834.
- [7] 楼文娟,张跃龙,徐海巍.考虑冰风耦合作用的输电导线脱冰动张力及参数影响分析[J].高电压技术,2022, 48(3): 1052-1059.
- [8] HUANG Guizao, YAN Bo, GUO Yujun, et al. Experimental study on dynamic response characteristics of isolated-span transmission lines after ice-shedding [J]. High Voltage, 2022: 1-14.
- [9] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead line conductors after the sudden release of ice loads [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 2010, 111(10): 1736-1746.
- [10] 陈勇,胡伟,王黎明,等.覆冰导线脱冰跳跃特性研究[J].中国电机工程学报,2009,29(28):115-121.
- [11] HUANG Guizao, YAN Bo, WEN Nan, et al. Study on jump height of transmission lines after ice-shedding by reduced-scale modeling test [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019: 165.

(下转第 30 页)

- and machine learning [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 103031.
- [42] 褚双伟,熊小伏,刘善峰,等.计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J].电力系统保护与控制, 2018,46(9):86-93.
- [43] 廖峥,熊小伏,李新,等.基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J].电力系统保护与控制, 2017, 45(19):154-161.
- [44] 汉京善,吕海平,李丹煜,等.基于 GA-BP 神经网络算法的输电线路舞动预警方法[J].电网与清洁能源, 2021,37(4):1-7.
- [45] 蒋明,赵汉棣,马小强.高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J].电力安全技术, 2020, 22(4):26-32.
- [46] 王勇,苗虹,莫思特,等.高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J].电力系统保护与控制, 2020,48(18):178-187.
- [47] 李刚,邵毅.电力系统较为常用的线路融冰方法[J].科技与企业, 2013(5):275.
- [48] 覃晖,邓帅,黄伟,等.南方电网输电线路融冰措施综述[J].电力系统保护与控制, 2010,38(24):231-235.
- [49] 陆佳政,张红先,方针,等.湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J].电力系统保护与控制, 2009,37(12):99-105.
- [50] 赵国帅,李兴源,傅闯,等.线路交直流融冰技术综述[J].电力系统保护与控制, 2011,39(14):148-154.
- [51] 钟科,罗桑.沥青路面融冰化雪技术研究综述[J].公路交通科技(应用技术版), 2013,9(5):268-270.
- [52] 江宇轩.输电线路车载直流融冰装置设计与控制研究[D].扬州:扬州大学, 2019.
- [53] 姚致清,刘涛,张爱玲,等.直流融冰技术的研究及应用[J].电力系统保护与控制, 2010, 38(21):57-62.
- [54] 肖良成,李新民,江俊,等.典型覆冰导线气动绕流计算及动态特性分析[J].中国科学:结构和系统动力学与控制专刊, 2013,43(4):500-510.
- [55] 李梦丽,米俊,张博,等.相间间隔棒对特高压八分裂导线的静态张力影响分析[J].河南科技, 2017(1):123-125.
- [56] 向玲,唐亮,卢明,等.三相特高压输电线路相间间隔棒防舞仿真分析[J].中国工程机械学报, 2017, 15(4):298-304.
- 作者简介:**
赵彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;
刘彬(1978),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电网防灾减灾;
朱宽军(1969),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电网防灾减灾。(收稿日期:2022-07-20)
- *****
- (上接第 6 页)
- [12] 鲁元兵,楼文娟,李焕龙.输电导线不均匀脱冰的全过程模拟分析[J].振动与冲击, 2010,29(9):47-50.
- [13] 王黎明,曹露,高亚云,等.输电线路非均匀脱冰严重工况的规律[J].高电压技术, 2018, 44(8):2442-2449.
- [14] YAN Bo, CHEN Kequan, GUO Yueming, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):216-225.
- [15] 张殿生.电力工程高压送电线路设计手册[M].北京:中国电力出版社, 2003.
- [16] 杨风利,杨靖波,付东杰,等.塔线系统脱冰跳跃动力响应分析[J].振动工程学报, 2010, 23(1):86-93.
- [17] HUANG Guizao, YAN Bo, LIU Jiaqiong, et al. Experimental study on torsional behavior of twin bundle conductor lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1423-1431.
- [18] ROSHAN F M, MCCLURE G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46:1-11.
- [19] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1964, 111(10):1736-1746.
- [20] KOLLAR L E, FARZANEH M. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):604-611.
- 作者简介:**
闫向龙(1996),男,硕士研究生,研究方向为输电线路脱冰跳跃动力特性;
郭裕钧(1989),男,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术;
黄桂灶(1993),男,博士,助理研究员,研究方向为输电线路脱冰、舞动动力学;
张血琴(1979),女,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术;
吴广宁(1969),男,博士,教授,研究方向为高电压与绝缘技术。(收稿日期:2022-08-29)