

基于蒙特卡洛方法的覆冰导线舞动 跳闸概率计算

马增泰¹, 罗萍萍¹, 孙天杰¹, 林济铿², 刘 辉³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804;
3. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022)

摘要:架空导线的覆冰舞动是导致线路跳闸的重要因素, 严重威胁着电力系统运行的安全性与稳定性, 如何科学合理地根据气象信息来计算架空导线的覆冰舞动跳闸概率成为亟待解决的问题。为计算输电线路在冰冻气象下发生舞动所致的短路跳闸概率, 首先收集冰冻气象区域的风速、冻雨量、温度及湿度等信息, 采用 Weibull 分布拟合风速的概率密度分布函数并计算导线覆冰厚度; 其次, 基于牛顿法建立覆冰导线单自由度舞动模型, 采用里茨-伽辽金法求得幅值解析表达式, 使用该表达式结合风速的概率分布与覆冰厚度求得舞动幅值越限的概率分布函数; 然后, 通过分析三相导线发生非同步舞动时的相位关系, 得到了某一舞动幅值下发生跳闸的概率; 最后, 利用蒙特卡洛方法模拟覆冰导线舞动跳闸的过程, 得到了舞动越限跳闸概率的统计值。算例结果表明, 该方法能由气象预报获得的气象信息对未来时段的舞动跳闸概率做出准确计算。

关键词:覆冰导线; 舞动; 跳闸; 概率; 蒙特卡洛

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.03.017 中图分类号:TM615 文章编号:1673-9140(2022)03-0140-09

The tripping probability calculation of iced conductor galloping based on Monte Carlo method

MA Zengtai¹, LUO Pingping¹, SUN Tianjie¹, LIN Jikeng², LIU Hui³

(1. Electrical Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: The ice galloping of overhead conductors is an essential factor leading to line trips, which seriously threatens the safety and stability of power system operation. How to calculate the tripping probability of the ice galloping of overhead conductors scientifically and rationally according to meteorological information has become an urgent problem to be solved. To calculate the short-circuit tripping probability of transmission line caused by galloping under the freezing weather, the information of wind speed, frozen rainfall, temperature, and humidity in the freezing weather area were first collected. Weibull distribution was used to fit the probability density distribution function of the wind speed and calculate the icing thickness of the conductor. Secondly, based on Newton's method, the single-degree-of-freedom galloping model of iced conductors was built. The Ritz-Galerkin method was used to obtain the analytical

收稿日期:2020-07-03; 修回日期:2021-03-10

基金项目:国家自然科学基金(51177107); 国网安徽省电力有限公司科技项目(52120018004Q)

通信作者:罗萍萍(1969-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统可靠性、配电网规划研究; E-mail:luopingpin@shiep.edu.cn

expression of amplitude. The probability distribution function of the over-limit of galloping amplitude was obtained by combining the probability distribution of wind speed and the icing thickness. Then, the tripping probability is obtained by analyzing the phase relation of the three-phase conductor during the non-synchronous galloping. Finally, the Monte Carlo method is used to simulate the process of galloping tripping of an iced conductor, and the statistical value of galloping over-limit tripping probability is obtained. The results of an example show that the method can accurately calculate the probability of galloping tripping from the meteorological information obtained from the weather forecast.

Key words: iced conductor; galloping; tripping; probability; Monte Carlo

架空导线的舞动是导线覆冰后,在横向风的作用下形成的低频率、大振幅的自激振动,其对电力系统的安全运行构成严重的威胁^[1-4]。安徽、浙江、河南等省份在多次遭受冰冻天气时,均出现了覆冰导线舞动导致的大范围线路跳闸等恶性事件^[5]。由于架空输电线路的舞动受气象条件影响较大,如何科学合理地根据气象信息来计算架空线路的覆冰舞动跳闸概率,并对跳闸概率大的线路采取预防措施,对于提升电网应对灾害天气的能力,具有非常积极的理论和实际工程意义。

目前对覆冰架空导线舞动的研究主要集中在 2 个方面:舞动机理与模型的研究和基于线性化思想的舞动跳闸概率研究。舞动机理与模型的研究包括垂直方向舞动机理^[6]、扭转方向舞动机理^[7]等。覆冰导线的舞动模型主要有单自由度舞动模型、双自由度舞动模型及三自由度舞动模型^[8],并采用包括增量谐波法^[9]、矩阵摄动法^[10]、有限单元法^[11]、牛顿法^[12]等方法推导覆冰导线的舞动运动方程。文献^[12]使用牛顿法建立了单自由度舞动模型,并使用慢变参数法获得舞动幅值的解析解,然而覆冰导线舞动是大几何非线性运动,慢变参数法只适用于弱非线性运动方程;文献^[13]采用有限元的思想,使用索单元来建立覆冰导线的舞动模型,并使用振型叠加法求解该模型,得到了导线舞动的幅值;文献^[14]利用 D'Alembert 原理建立了覆冰导线的单自由度与双自由度舞动模型,算例验证了方法的正确性;文献^[15]使用 Hamilton 原理建立覆冰导线的三自由度舞动模型,并实现了对舞动形态的数值模拟,然而三自由度舞动模型不能得到舞动幅值的解析解。

基于线性化思想的舞动跳闸概率研究,其基本思想是先计算出覆冰导线舞动的幅值,然后与相间距离比较,进而得到以导线舞动幅值为自变量的线性化的跳闸概率。文献^[16]提出了一种基于支持向

量机(support vector machine, SVM)和自适应增强(adaptive boosting, AdaBoost)分类器的覆冰架空线路舞动跳闸预警方法,通过挖掘易舞动区域的气象数据来构建基于 SVM 分类器的易舞气象预报模型,从而得到舞动幅值的预测结果以及相应的跳闸概率;文献^[17]使用拉力传感器及覆冰导线实时水平荷载估算出导线舞动幅值,然后与导线相间距离比较得到舞动跳闸概率;文献^[18]基于现场舞动观测点的温度和湿度的信息对舞动幅值进行实时预测;文献^[19]基于拉力与角度传感器所得到的覆冰导线张力与风攻角,推出覆冰导线舞动的幅值,并得到跳闸概率。基于线性化思想的舞动跳闸概率研究不足之处在于仅以舞动幅值与导线相间距离来计算跳闸概率,未考虑两相导线的非同步舞动。

本文提出基于蒙特卡洛方法的导线舞动跳闸概率计算方法。由风速与冻雨量等气象信息,计算导线覆冰厚度并建立风速的 Weibull 分布函数,然后根据牛顿定律建立覆冰导线单自由度舞动模型;使用 Fluent 软件对不同冰厚的半椭圆型覆冰导线进行气动力仿真,得到气动系数与覆冰厚度的关系式,进而采用里茨—伽辽金方法求解舞动模型,获得以风速为自变量的舞动幅值解析表达式,并由风速的分布函数获得舞动幅值的概率分布函数;为了解决舞动跳闸数据收集过程的繁琐且效率低下的问题,本文通过分析三相导线发生非同步舞动时的相位关系,得到某一舞动幅值下线路固有的跳闸概率计算模型;最后,使用蒙特卡洛方法模拟覆冰导线舞动跳闸的过程,获得覆冰导线舞动越限跳闸概率的统计值。

1 舞动跳闸故障的概率模型

1.1 舞动幅值的概率模型的建立

导线的舞动是在覆冰的基础上发生的,本文以

极端天气下冻雨时间里的风速与冻雨量信息计算导线的覆冰厚度^[20],覆冰厚度为

$$r_{\text{ice}} = \frac{1}{\rho_{\text{ice}} \pi} \sqrt{(l\rho_w)^2 + t^{0.308} (0.241 2\bar{v}l^{0.806})^2} \left(\frac{H}{H_0}\right)^q \quad (1)$$

式中 ρ_w 为冻雨密度; ρ_{ice} 为冰密度; l 为冻雨量; t 为平均冻雨降雨小时数; \bar{v} 为冻雨过程的平均风速; H 为导线海拔高度; H_0 为距离气象观测点 10 m 高度处的海拔高度; q 为冰厚修正系数。

式(1)中的 r_{ice} 为圆形覆冰冰厚,而实际导线的覆冰常是不规则的半椭圆型或新月型。本文结合实际情况^[21],将冰厚为 r_{ice} 的圆形覆冰截面等效为参数为 r_H 、 r_y 的半椭圆形覆冰截面,其中 r_H 为横向增长冰厚, r_y 为竖向增长冰厚,如图 1 所示。假设 2 种覆冰形状的覆冰截面面积相等和半椭圆形覆与冰横竖向覆冰增长成比例,则 r_H 、 r_y 以及 r_{ice} 的关系为

$$\begin{cases} r + r_y = 0.5(r + r_H) \\ 2rr_{\text{ice}} + r_{\text{ice}}^2 = rr_H + 0.5r_H^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 r 为裸导线导线半径。对于新月形覆冰,可将导线 r_y 方向的冰厚与 r_H 方向的冰厚取相等值 r_a ,令 $r_a = 2r_{\text{ice}}$ 。

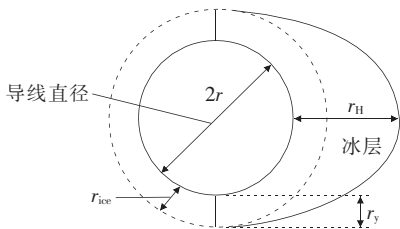


图 1 覆冰导线截面

Figure 1 Section of iced wire

研究覆冰导线舞动的幅值与稳定性的问题时,常用到单自由度舞动模型,即导线垂直舞动模型。采用多项式拟合覆冰截面的气动系数后,单档覆冰导线的单自由度舞动运动方程^[12]可以表示为

$$m\ddot{y} + 2m\zeta\omega\dot{y} + ky = \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2D \left[c_1 \frac{\dot{y}}{v} - c_2 \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^3 \right] \quad (3)$$

式中 m 为覆冰导线质量, $m = \pi r^2 \rho_L + 0.5\pi\rho_{\text{ice}}(r_H r_y - r^2)$; ζ 为阻尼比; ω 为覆冰导线体系自振频率; k 为覆冰导线体系的刚度; ρ_{air} 为空气

密度; D 为覆冰导线直径; y 为覆冰导线在垂直方向的位移; c_1 、 c_2 均为气动参数。

由于覆冰导线舞动是小应变、大位移的强几何非线性运动,本文使用里茨-伽辽金法求解式(3)。设覆冰导线舞动在垂直方向的位移响应为

$$y = c \cos(\omega t + \varphi) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中 c 、 φ 分别为舞动的幅值与相位。由辅助角公式可知, $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。设导线舞动系统产生任意一个虚位移 δy ,由虚位移原理可得:

$$\left\{ m\ddot{y} + 2m\zeta\omega\dot{y} + ky - \frac{1}{2}\rho_{\text{air}}v^2D \left[c_1 \frac{\dot{y}}{v} - c_2 \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^3 \right] \right\} \delta y = 0 \quad (5)$$

同时,对式(4)变分得:

$$\delta y = \cos(\omega t)\delta a + \sin(\omega t)\delta b \quad (6)$$

根据 δa 与 δb 的任意性,结合式(5)、(6),在一个周期内积分,整理可得覆冰导线舞动幅值为

$$c = m \sqrt{\frac{1.24c_1v^2}{c_2k^2} + \frac{(k - 2\zeta k - m)\pi v}{1.175\rho_{\text{air}}Dc_2k^2}} \quad (7)$$

由于覆冰导线覆冰厚度不同,其气动系数也不同。本文使用 Fluent 仿真软件对覆盖不同冰厚的导线进行气动力仿真,获取气动系数三次多项式表达式,然后对该多项式的系数与冰厚 r_H 建立函数关系式,从而得到式(7)中参数 c_1 、 c_2 的表达式,即

$$\begin{cases} c_1 = f_1(r_H) \\ c_2 = f_2(r_H) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)改写为

$$c = \sqrt{k_1v^2 + k_2v} \quad (9)$$

式中 k_1 、 k_2 为关于式(7)的系数。

由式(9)可知,在获取导线覆冰厚度及相关线路参数后,覆冰导线舞动的幅值主要取决风速。由于气象观测点与输电线路地理位置、地形地貌以及海拔高度均不相同,故观测站风速需要经过修正,即

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\lg H - \lg \alpha}{\lg H_0 - \lg \alpha} \quad (10)$$

式中 α 为导线所处位置地面粗糙度因子,取值在 0.1~0.5。

根据文献[22]可知,Weibull 分布能够较好地描述风速的分布,假设风速序列 (v_1, v_2, \dots, v_n) 服从 Weibull 分布,其概率分布函数为

$$F(v) = 1 - \exp\left[1 - \left(\frac{v}{\sigma}\right)^\xi\right] \quad (11)$$

式中 σ 为尺度参数; ξ 为形状参数; v 为风速。通过极大似然估计法等方法来确定式(11)中的参数 σ 、 ξ ,构造对数似然函数为

$$L(\xi, \sigma) =$$

$$\sum_{i=1}^n \left[\ln \xi + (\xi - 1) \ln v_i - \xi \ln \sigma - \left(\frac{v_i}{\sigma}\right)^\xi \right] \quad (12)$$

令 $F_1 = \frac{\partial L(\xi, \sigma)}{\partial \xi} = 0$, $F_2 = \frac{\partial L(\xi, \sigma)}{\partial \sigma} = 0$ 可得:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{\xi} + \ln v_i - \ln \sigma - \left(\frac{v_i}{\sigma}\right)^\xi \ln \frac{v_i}{\sigma} \right] = 0 \\ F_2 = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{\xi}{\sigma} + \frac{\xi (v_i)^\xi}{\sigma^2} \right] = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、(13)较为复杂,采用牛顿-拉夫逊迭代法求解其中参数,由式(13)可得:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \xi} & \frac{\partial F_1}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \xi} & \frac{\partial F_2}{\partial \sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \xi \\ \Delta \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中,雅可比元素为

$$\begin{cases} \frac{\partial F_1}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^n \left[-\frac{1}{\xi^2} - \left(\frac{v_i}{\sigma}\right)^\xi \ln^2 \frac{v_i}{\sigma} \right] \\ \frac{\partial F_1}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\xi}{\sigma} \ln \frac{v_i}{\sigma} + \frac{1}{\sigma}\right) \left(\frac{v_i}{\sigma}\right)^\xi - \frac{1}{\sigma} \right] \\ \frac{\partial F_2}{\partial \xi} = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\xi}{\sigma} \ln \frac{v_i}{\sigma} + \frac{1}{\sigma}\right) \left(\frac{v_i}{\sigma}\right)^\xi - \frac{1}{\sigma} \right] \\ \frac{\partial F_2}{\partial \sigma} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\xi}{\sigma^2} - \frac{\xi(\xi+1)}{\sigma^2} \left(\frac{v_i}{\sigma}\right)^\xi \right] \end{cases} \quad (15)$$

为求解式(14),选取合适的初值,经过反复迭代直到满足 $\max(\Delta \sigma, \Delta \xi) < \epsilon$ 后,获得 Weibull 分布的尺度参数 σ 与形状参数 ξ 。获取两参数 σ 与 ξ 后,可以建立风速的 Weibull 概率分布。由式(9)可知,舞动的幅值与风速有关,经过式(9)、(11)及概率论知识可将风速的概率分布变换为舞动幅值 c 的概率分布,其表示为

$$F(c) = 1 - \exp\left[1 - \left(\frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 + 4k_1 c^2}}{2k_1 \sigma}\right)^\xi\right] \quad (16)$$

由式(16)可知,设舞动幅值超过安全间距的概率为

$$P_o = 1 - F(c_{se}) \quad (17)$$

式中 c_{se} 为覆冰导线舞动至相间最小安全间距的幅值,垂直方向上 $c_{se} = L_x - L_{x\min}$; P_o 为当前风速及覆冰条件下线路舞动幅值超过 c_{se} 的概率。

1.2 覆冰导线非同步舞动单一幅值固有跳闸概率模型的建立

覆冰导线在某一综合条件下的舞动幅值超过相间电气安全限度时,存在发生相间闪络跳闸故障的可能。由于目前缺少导线相间非同步舞动的跳闸模型,本文以垂直布线的三相导线为例,建立导线非同步舞动的某一幅值的固有跳闸概率模型,如图 2 所示。

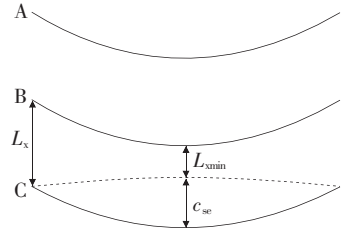


图 2 导线垂直布线

Figure 2 Schematic diagram of vertical arrangement of wires

假设覆冰导线的 A 相与 C 相发生舞动,将舞动时的两相导线中点位置分别为

$$\begin{cases} y_A = c \sin(\omega t + \varphi) + L_x \\ y_C = c \sin(\omega t) \end{cases} \quad (18)$$

式中 ω 为 y_A 导线舞动时的角速度; φ 为以 C 相导线为参照,A 相导线舞动的相位; L_x 为导线静态时的垂直相间距离。其中 φ 为随机值,体现了 A 相导线相对 C 相发生舞动的随机性。

当 φ 为 0 时,A 相与 C 相导线同向舞动,由于两相导线始终保持安全间距 L_x ,因而不会发生跳闸事故^[23];当 φ 为 π 时,A 相与 C 相导线反向运动,如果舞动幅值超过一定限度,两相导线将因电气间距过小或碰线而导致闪络跳闸。

基于以上分析,当导线舞动幅值越限后,A 相导线在相位 $\varphi = \pi$ 左右舞动时存在相间闪络跳闸区域,如图 3 所示。

由图 3 可知,如果两相导线舞动的幅值超过安全间距且其值为 c ,当 A 相导线舞动的相位 $\varphi =$

$\varphi_x + \pi$ 在区间 $[\varphi_1 + \pi, \varphi_2 + \pi]$ 内时, A、C 两相导线将发生相间跳闸, 此时 φ_x 满足:

$$c \sin(\omega t + \varphi_x + \pi) + L_x - c \sin(\omega t) \leq L_{x\min} \quad (19)$$

取 $\omega t = \pi/2$, 并将式(19)取等号可得边界跳闸相位, 其表示为

$$\varphi_x = \frac{3}{2}\pi - \arcsin\left(\frac{L_{x\min} - L_x}{c} + 1\right) \quad (20)$$

由于相位为 $\varphi_1 + \pi$ 与 $\varphi_2 + \pi$ 的舞动波形关于 $\omega t = \pi/2$ 对称, 所以在舞动幅值 c 超过安全间距的条件下, 发生跳闸的相位区间的大小为 $|2\varphi_1|$ 。因此, 舞动幅值为 c 时的固有跳闸概率为

$$P_c = \frac{|2\varphi_x|}{2\pi} = \frac{3}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{L_{x\min} - L_x}{c} + 1\right) \quad (21)$$

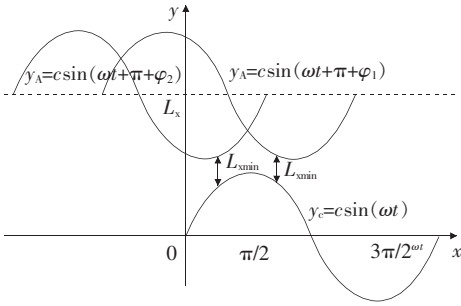


图3 导线跳闸

Figure 3 Schematic diagram of line trip

2 舞动跳闸故障过程的蒙特卡洛模拟

覆冰导线舞动的闪络跳闸故障的模拟可以认为是多个可能性的抽样^[24], 其中包括确定导线舞动幅值是否超限、舞动的超限幅值及是否跳闸。以舞动的幅值是否超限为例, 将舞动幅值超过安全间距的概率 P 。置于 $[0, 1]$ 区间内, 并产生一个在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数 R , R 的位置表明舞动幅值是否超限, 如图4所示; 风速抽样与舞动是否跳闸抽样分别如图5、6所示。



图4 舞动幅值是否超限

Figure 4 Galloping amplitude over limit or not

图5中, v_{\max} 为通过气象观测获取的最大风速, v_0 为导线刚好舞动至相间电气安全间距时的幅值 c_0 为所对应的风速, 由式(9)可得:

$$v_0 = \frac{-k_2 + \sqrt{k_2^2 + 4k_1 c_0^2}}{2k_1} \quad (22)$$

使用蒙特卡洛方法可以计算一条线路第 i 档导线的舞动幅值超限跳闸概率 P_i 的统计值, 根据该方法, 第 j 次模拟过程如图7所示。



图5 风速抽样

Figure 5 Sampling wind speed



图6 舞动是否跳闸抽样

Figure 6 Galloping trip or not

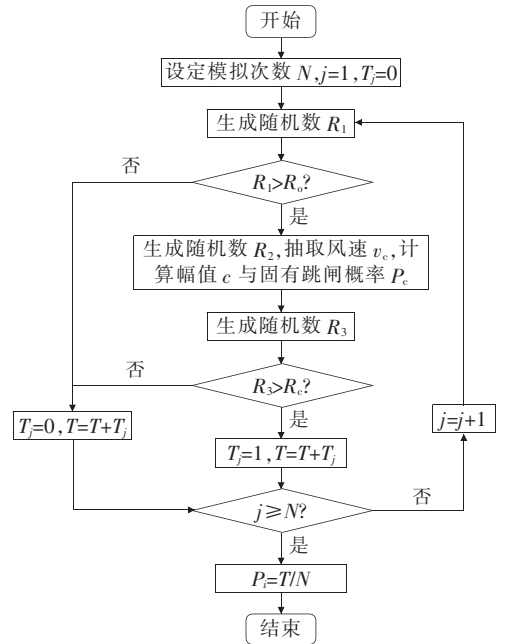


图7 蒙特卡洛方法计算舞动跳闸概率

Figure 7 Flow chart of the calculation of the galloping tripping probability using Monte Carlo method

如果设置模拟次数为 N , 则每次模拟都会产生一个值为 0 或 1 的 T_j 。由于大数法则保证在模拟次数足够多即获得的样本足够多之后, 蒙特卡洛法获取的估计值将收敛于真值, 则第 i 档覆冰导线舞

动越限跳闸概率的统计值为

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^N T_j}{N} \quad (23)$$

对于整条输电线路,其整体舞动跳闸概率由各档导线舞动跳闸概率逻辑串联进行计算,即

$$P_L = 1 - \prod_{i=1}^{w_s} (1 - P_i) \quad (24)$$

式中 w_s 为第 s 条线路档数。

3 求解步骤

依据线路所跨区域的大小划分气象分区,收集各分区的风速及风向、冻雨量、温度、相对湿度等信息后,基于蒙特卡洛方法的覆冰输电线路的舞动跳闸概率计算步骤如下:

- 1) 计算各气象分区覆冰厚度,利用 Fluent 软件获取各冰厚条件下的气动参数;
- 2) 利用最大似然方法估计式(16)中风速 Weibull 分布的参数 σ 与 ξ ;
- 3) 依据覆冰导线舞动条件^[21],如表 1 所示,判断当前线路第 i 档导线是否发生舞动;
- 4) 如果发生舞动,则转向步骤 4,否则 $P_i = 0, i = i + 1$,返回步骤 3;
- 5) 获取线路各档导线参数,由式(16)、(17)计算舞动幅值越限概率 P_o ;
- 6) 设置蒙特卡洛模拟次数为 N ,获取每次模拟所得的 T_j 并进模拟,由式(23)计算当前线路的第 i 档舞动跳闸概率 P_i ;
- 7) 判断当前线路档数 i 是否小于 w_s ,如果是,则 $i = i + 1$,返回步骤 3,否则转到步骤 8;
- 8) 由式(24)计算当前整条输电线路的舞动跳闸概率 P_L 。

本文方法计算流程如图 8 所示。

表 1 导线起舞判断因素

Table 1 Conductor galloping judgment factors

不同因素的起舞条件			
气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度	风速/(m/s)	风线夹角/ $^{\circ}$
<0	>70	>4	>45

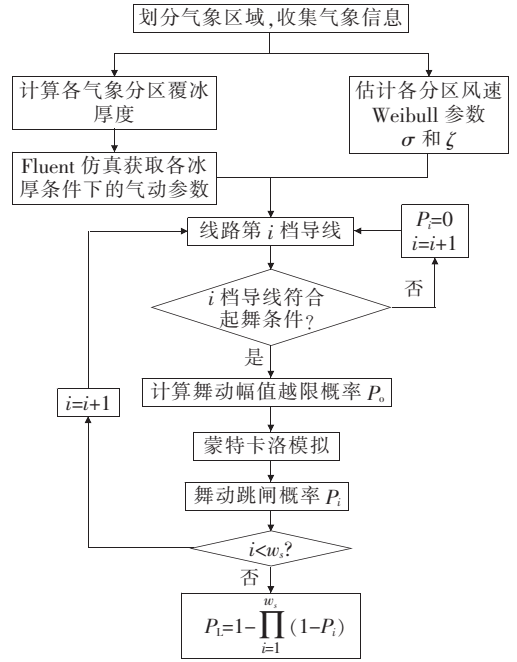


图 8 计算舞动跳闸概率流程

Figure 8 Flow chart of the calculation of the galloping tripping probability

4 算例分析

本文使用 Fluent 软件对 2~25 mm 冰厚的半椭圆形覆冰导线进行气动系数模拟。Fluent 软件通常用来模拟可压缩或不可压缩气体的流动,由于 Fluent 已经集合在 ANSYS 软件中,所以本文直接使用 ANSYS 软件中的 Geometry 模块建立半椭圆形覆冰导线截面模型,并使用 ICEM CFD 模块对覆冰导线截面进行网格划分,如图 9 所示。

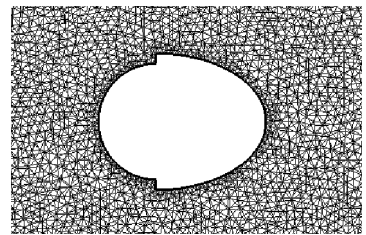


图 9 覆冰导线截面网格

Figure 9 Gridding of iced wire cross section

设置图 9 中的右边界为气体速度入口的边界条件,左边界为气体流出的边界条件。完成导线覆冰截面的网格划分后,将网格文件导入 Fluent 模块中,使用适用于圆柱体绕流的 $K-\omega$ 湍流模型,并在

导线的垂直方向上设置升力监测器以获取当前覆冰厚度与风攻角的截面升力系数。

通过旋转覆冰导线截面可改变迎面风攻角,本文对导线在不同覆冰厚度时的风攻角取值范围均设定为 $[-60^\circ, +60^\circ]$,且以 10° 为增量。在完成全部覆冰厚度及风攻角的升力系数的测定后,先建立的各覆冰厚度时的风攻角与升力系数的函数关系式,部分覆冰厚度的气动系数曲线如图 10 所示。

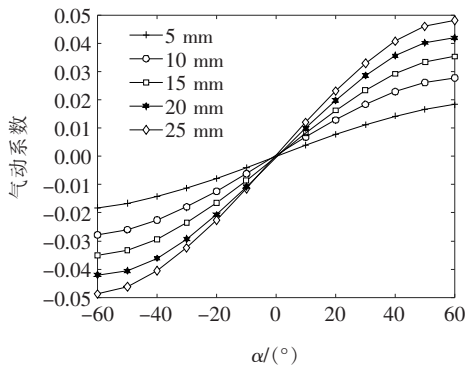


图 10 不同覆冰厚度下的气动系数曲线

Figure 10 Aerodynamic coefficient curves under different icing thicknesses

然后,使用三次多项式曲线拟合方法建立气动参数 c_1 与气动参数 c_2 关于 r_H 的表达式,即

$$\begin{cases} c_1 = 5.327 \times 10^{-4} r_H^3 - 0.02215 r_H^2 + 0.4752 r_H + 0.03731 \\ c_2 = 5.174 \times 10^{-8} r_H^3 - 1.949 \times 10^{-6} r_H^2 + 0.6041 \times 10^{-4} r_H + 4.193 \times 10^{-6} \end{cases} \quad (25)$$

式(25)可代入到式(7)中以代替气动参数。

本文对 2019 年 2 月遭受冰冻天气影响的安徽宣城地区的 500 kV 输电线路覆冰舞动短路跳闸概率进行了计算。由于输电线路所跨区域较大,将线路所经区域划分为 4 个气象分区,分别获取各分区的风速、冻雨量、温度以及湿度等信息并对风速的 Weibull 分布进行拟合,分布函数如图 11 所示。

2 月 10 日到 12 日,冻雨持续时间 6 h,结合各分区气象信息判定输电线路发生舞动。根据本文方法,获取各档导线的参数及其气象分区下的 Weibull 分布函数,然后使用蒙特卡罗方法由式(23)计算得各线路及各档舞动跳闸概率,其中山沥线单档导线舞动跳闸率如表 2 所示。

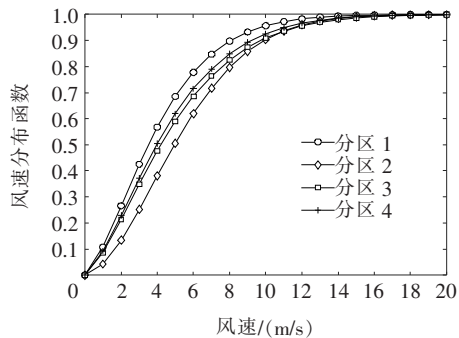


图 11 风速的 Weibull 概率分布函数

Figure 11 Weibull probability distribution function of wind speed

表 2 山沥线单档导线舞动跳闸率

Table 2 Single-speed wire galloping trip rate of Shanli line

档号	P_i
225 # ~ 226 #	0.634 2
226 # ~ 227 #	0.627 4
227 # ~ 228 #	0.711 3
228 # ~ 229 #	0.649 5
229 # ~ 230 #	0.761 2
230 # ~ 231 #	0.752 7
231 # ~ 232 #	0.751 6
232 # ~ 233 #	0.506 8
233 # ~ 234 #	0.642 4
234 # ~ 235 #	0.542 5
235 # ~ 236 #	0.773 5
236 # ~ 237 #	0.729 4

对于不同线路,在各气象分区下,经式(23)计算得到各档线路 P_i ,由式(24)计算得到整条线路舞动越限跳闸概率 P_L 。各条线路的舞动越限跳闸率与实际跳闸记录的对比如表 3 所示。

表 3 线路舞动跳闸率

Table 3 Line galloping trip rate

线路	舞动跳闸概率	实际跳闸记录
山沥 5366 线	0.721 4	229 # ~ 237 #
官沥 5365 线	0.672 3	209 # ~ 238 #
官涓 5387 线	0.587 7	116 # ~ 122 #
官桥 5388 线	0.677 6	112 # ~ 117 #
永官 5337 线	0.745 1	105 # ~ 107 #
山桥 5379 线	0.142 5	未跳闸
永山 5337 线	0.657 3	49 # ~ 89 #

由表 3 可知,线路舞动跳闸率超过 0.6 的一些线路均发生舞动跳闸事件。计算获得的山桥线舞动跳闸概率值较小,实际中也没有发生舞动跳闸事件,分析认为山桥线处于覆冰区域边缘,且部分档导线与风向较为一致,从而破坏了起舞条件。由此可知由本文方法所获得覆冰导线舞动跳闸概率与实际故障存在关联性。从表 3 还可以看到舞动跳闸事件多集中发生在连续档上,考虑到连续档导线线路参数及覆冰、风速状况等较为一致,由此可知导线的舞动及其相应的跳闸事件往往集中发生在易舞动的同一气象条件下(包括风速、降雨、温度等)。

5 结语

结合安徽的舞动跳闸概率分析,本文方法具有以下特点:

- 1)对气动系数与覆冰厚度的函数拟合解决了覆冰舞动时冰厚的不确定性对气动系数的影响;
- 2)基于风速威布尔分布、里茨—伽辽金法幅值表达式而获得的舞动幅值概率分布函数能够描述舞动越限概率;
- 3)通过分析三相导线舞动时的相位关系,提出舞动幅值固有跳闸概率计算公式,该公式解决了三相覆冰导线舞动跳闸概率因非同期舞动的随机性而缺少理论计算方法的问题;
- 4)基于蒙特卡洛方法获得的覆冰导线舞动越限跳闸概率结果准确可靠。

参考文献:

- [1] 彭志勇,周羽生,何洋,等. 输电导线高频激励融冰的临界电流分析[J]. 高压电器,2021,57(5):108-114.
PENG Zhiyong,ZHOU Yusheng,HE Yang,et al. Analysis of critical current for high-frequency excitation de-icing transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2021,57(05):108-114.
- [2] 朱金涛,辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力,2021,49(3):1-11.
ZHU Jintao,XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power,2021,49(3):1-11.
- [3] 刘辉,马增泰,林济铿,等. 覆冰架空导线舞动跳闸概率计算新方法[J]. 中国电力,2022,55(3):125-132.
LIU Hui,MA Zengtai,LIN Jikeng,et al. A new method for calculation of transmission line tripping probability caused by galloping of iced overhead conductor[J]. Electric Power,2022,55(3):125-132.
- [4] 甘艳,杜志叶,周文峰,等. 基于覆冰拉力监测系统的耐张塔线路等值冰厚计算模型[J]. 电测与仪表,2021,58(5):39-45.
GAN Yan,DU Zhiye,ZHOU Wenfeng,et al. Equivalent ice thickness calculation model of strain tower based on iced tensile monitoring system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(5):39-45.
- [5] 邸悦伦,陆佳政,徐勋建,等. 2016 年"超级寒潮"条件下湖南电网覆冰过程的分析[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(2):187-194.
DI Yuelun,LU Jiazheng,XU Xunjian,et al. An analysis of icing process of Hunan power grid in the condition of 2016 "Super Cold Wave"[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(2):187-194.
- [6] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. AIEE Transaction,1932,4(51):1074-1076.
- [7] NIGOL O, BUCHAN P. Conductor galloping-part II Torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1981,100(2):708-720.
- [8] YU P, SHAH A H, POPPLEWELL N. Inertially coupled galloping of iced conductors[J]. Journal of Applied Mechanics,1992,59(1):140-145.
- [9] 莫海枢. 覆冰导线舞动分析的增量谐波平衡法应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [10] 邸悦伦,蔡泽林,李丽,等. 环渤海地区大范围输电线路舞动风场特征分析[J]. 电网与清洁能源,2021,37(7):121-129.
DI Yuelun,CAI Zelin,LI Li,et al. Analysis of wind characteristics of wide range transmission line galloping in Bohai rim[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(7):121-129.
- [11] 孙珍茂,楼文娟. 覆冰输电导线舞动非线性有限元分析[J]. 电网技术,2010,34(12):214-218.
SUN Zhenmao,LOU Wenjuan. Nonlinear finite element analysis on galloping of ice-coated transmission line[J]. Power System Technology,2010,34(12):214-218.
- [12] 刘亚坤,李林锐,李世龙,等. 架空输电线路的舞动幅值分析与试验研究[J]. 上海交通大学学报,2016,50(6):

- 825-830.
- LIU Yakun, LI Linrui, LI Shilong, et al. Analysis and experiment on galloping amplitude of transmission lines[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(6):825-830.
- [13] DESAI Y M, YU P, POPPLEWELL N, et al. Finite element modelling of transmission line galloping [J]. Computer & Structure, 1995, 57(3):407-420.
- [14] 张海峰. 输电线路舞动有限元分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [15] 刘小会, 严波, 张宏雁, 等. 覆冰导线非线性数值模拟方法[J]. 应用数学和力学, 2009, 30(4):457-468.
- LIU Xiaohui, YAN Bo, ZHANG Hongyan, et al. Non-linear numerical simulation method for galloping of iced conductor[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2009, 30(4):457-468.
- [16] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [17] 杨林. 一种架空输电线路舞动预警方法[P]. 中国专利: 201010527167. 5, 2011-06-15.
- [18] 陆佳政. 一种电网线路舞动发生预测方法和系统[P]. 中国专利: 201710640834. 2, 2017-12-05.
- [19] 安康. 一种架空输电线路舞动的监测方法[P]. 中国专利: 201710253562. 0, 2017-08-15.
- [20] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4):44-47.
- LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4):44-47.
- [21] 夏令志, 程洋, 严波, 等. 2018年1月安徽电网输电线路覆冰舞动故障规律分析[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2019, 24(1):73-77.
- XIA Lingzhi, CHENG Yang, YAN Bo, et al. Analysis of faults of icing and galloping of transmission lines in Anhui power grid in January of 2018[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2019, 24(1):73-77.
- [22] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10):107-110.
- DING Ming, WU Yichun, ZHANG Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms. [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10):107-110.
- [23] 孙求国, 聂一雄, 王星华. 输电线路舞动在线监测预警判据的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(2):52-56.
- SUN Qiuguo, NIE Yixiong, WANG Xinghua. Research on the warning criterions of transmission line galloping on-line monitoring system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(2):52-56.
- [24] 杨芳, 唐小亮, 尹文阔, 等. 基于多参量分布式光纤传感的架空输电线路风振监测分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11):169-177.
- YANG Fang, TANG Xiaoliang, YIN wenkuo, et al. Analysis of transmission line wind vibration monitoring based on a multi parameter distributed optical fiber sensor[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11):169-177.