

输电线路故障对附近电场分布的影响

黄新波, 马一迪, 朱永灿, 曹雯
(西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安)

摘要: 为了研究输电线路故障对附近电场以及物体顶部附近电场分布的影响,基于 Ansoft 电磁仿真软件,建立具有弧垂的高压交流输电线路模型。对比分析了单相接地故障、两相接地短路故障、两相短路故障、三相短路故障等不同故障类型引起的高压交流输电线路附近电场的畸变。在此基础上构建了含有树木、建筑物的模型,分析各类故障发生后树木、建筑物附近电场强度的变化。结果表明:输电线路不同的故障所产生的电场特征有着明显的差异,故障后线路附近的最大电场强度不会超过故障前的最大电场强度,且不同类型故障对线路周围的最大电场强度和电场幅值有不同程度的影响,有的故障类型甚至会出现“零点”,验证了利用电场变化诊断高压输电线路运行状态中故障类型的可行性。另外,故障发生后大幅提高了周围树木和建筑物顶部的电场强度,尤其是两相短路故障发生时,树木顶端的最大电场强度接近正常时的 3.81 倍,建筑物顶部附近的最大电场强度接近正常时的 7.15 倍,更容易造成电晕放电。研究结果可为今后输电线路的设计、故障诊断以及推进电网绿色发展提供参考。

关键词: 输电线路故障;有限元法;电场分布;电场强度;绿色电网

中图分类号: TM75 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202104014 **文章编号:** 0253-987X(2021)04-0126-09



OSID 码

Effects of Transmission Line Faults on Electric Field Distribution Nearby

HUANG Xinbo, MA Yidi, ZHU Yongcan, CAO Wen

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the electromagnetic simulation software Ansoft, a high-voltage AC transmission line model with sag is established to investigate the effects of transmission line faults on the nearby electric field and the electric field distribution near the top of objects. Through the changes of various faults, the distortions of electric field near the high-voltage AC transmission line caused by single-phase grounding fault, two-phase grounding short-circuit fault, two-phase short-circuit fault, and three-phase short-circuit fault are compared and analyzed. On this basis, a model containing trees and buildings is constructed to analyze the changes of electric field intensity around trees and buildings after various faults occur. The results show that the electric field characteristics generated by different faults on the transmission line are obviously different. The maximum electric field intensity near the line after the faults does not exceed the maximum electric field intensity before the faults; different faults have different degrees of influence on the maximum intensity and amplitude of electric field around the line, and some faults even have “zero points”. The feasibility of using the change of the electric field to diagnose operating state of the high-voltage transmission line is verified. In addition, after faults, the electric field

intensity surrounding the tops of trees and buildings greatly increases, especially when a two-phase short-circuit fault occurs, the maximum intensity at the top of trees is close to 3.81 times of the normal value, and the maximum intensity near the top of the buildings is close to 7.15 times of the normal one, which is more likely to cause corona discharge. This study may provide reference for transmission line design, fault diagnosis, and green development of power grid in the future.

Keywords: transmission line faults; finite element method; electric field distribution; electric field intensity; green grid

输电线路作为电力系统中最庞大的组成部分,是连接不同地区的发电站、变电站、负荷点并进行电能输送的关键设备,其正常运行不仅关系到整个电力系统的安全,而且对国民经济发展起着重要作用^[1]。然而,输电线路长期暴露在自然环境中,在承受正常机械载荷和电力负荷内部压力的同时,还要经受污秽、雷击、冰雪和树木等外界因素的侵害,极易发生各类故障,影响电力系统的稳定运行,甚至破坏生态环境^[2-4]。随着输电线路建设的迅速发展,人们对高压输变电工程周围的电磁环境^[5-7]以及智能电网的设计^[8]愈发关注。

电场强度能够精确地反映电力设备周围空间电场及变化,对电力设备的设计制造和安全运行具有重要意义^[9]。为此,研究者大多通过电磁场分析仪^[10]、微型电场传感器^[11]对高压输电线路正常运行下附近的电场分布进行测量,而对线路故障后附近电场变化的研究尚较少。另外,直接在输电线路进行测试不仅成本高,且易受环境因素的影响,因此通过数值方法建立模型研究输电线路附近的电场分布十分必要^[12-16]。汪泉弟等综合考虑档距、弧垂等因素,利用模拟电荷法分析了高压输电线路附近的电场分布情况^[13]。但当场域中存在3种及以上介质时,使用模拟电荷法就需要分别考虑场量的计算,使得计算工程非常复杂。汪茹等通过有限元法(FEM)建立输电线路弧垂方程的三维模型,分析了相导线布置方式、分裂导线尺寸等因素对空间电场强度和分布特征的影响^[14]。宋福根等利用具有直观化用户界面和强大高效仿真功能的Ansoft仿真软件建立高压输电线路计算模型,在简化设计和分析的同时,精确描述了输电线路附近工频电场的变化特征^[15-16]。刘怀东等研究表明,输电走廊内部的树木过高会导致导线与树木之间形成的电场强度不断增大,是引发线路发生闪络的根本原因^[17]。线路一旦发生故障,其附近的电场不仅因故障发生畸变,且受到附近物体的影响,易造成电力系统的

不稳定运行,影响线路供电的可靠性,甚至损伤邻近生态结构^[18-19]。目前针对输电线路故障以及故障和树木、建筑物等物体同时存在这一实际情况下电场变化规律的深入研究少有报道。为了避免在工频电场计算时受输电线路周围环境和空间电磁的干扰,本文通过建立具有弧垂的高压交流输电线路模型,利用有限元法计算输电线路发生故障后附近的电场,研究单相接地故障、两相接地短路故障、两相短路故障、三相短路故障等不同故障类型对高压交流输电线路附近电场畸变的影响;另外,分析各类故障发生后,树木、建筑物顶部附近电场强度的变化。

1 输电线路三维模型的建立

1.1 工频电场的计算

在静电场中,其电位及电场强度的求解可以归结为求泊松方程或拉普拉斯方程的定界问题。若空间分区充满各向同性、线性、均匀的介质,则从静电场强与电势梯度的关系式(1)^[20]和高斯定理微分式(2)^[20]

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2)$$

可导出静电场的泊松方程

$$\nabla^2\varphi = \frac{-(\rho_+ - \rho_-)}{\epsilon_0} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度; φ 为所研究区域的电势; ∇ 是散度符号; ρ 为电荷体密度; ϵ_0 为真空介电常数,取 $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$; ρ_+ 为正空间电荷密度; ρ_- 为负空间电荷密度; ∇^2 为拉普拉斯算子。若所研究的区域模拟域内没有自由电荷的影响,即不考虑电流和磁场的存在,则公式(3)中 $\rho=0$,上述泊松方程就等效于拉普拉斯方程^[20],即

$$\nabla^2\varphi = 0 \quad (4)$$

将上述等效后的拉普拉斯方程写在直角坐标系中,其表达式为式(5)^[14],即

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \tag{5}$$

最后,利用网格对空间场域进行划分,把电场连续域内的问题变为离散系统的问题来求解,离散系统的解即为空间电场分布的近似解。本文主要研究输电线路故障以及故障对树木、建筑物顶部附近的电场畸变的效应。由于有限元模型中的建筑物以及树木均等效于规则的介质,因此可利用有限元法对此类工频电场的问题进行求解。

1.2 三维模型的建立

1.2.1 线路基本模型 本文选取 110 kV 三相交流输电线路进行计算和分析。该三相交流输电线路呈单回顺序水平排列,从左至右依次为 A 相、B 相和 C 相,相导线采用 LGJ-240/30 型钢芯铝绞线,导线半径 R 为 0.021 6 m。考虑到输电线路电压的有效值,该输电线路各相相电压峰值为 94.3 kV,杆塔之间档距 200 m,相间距 3.6 m,各相线路距离地面 20 m,具体参数如图 1 所示。

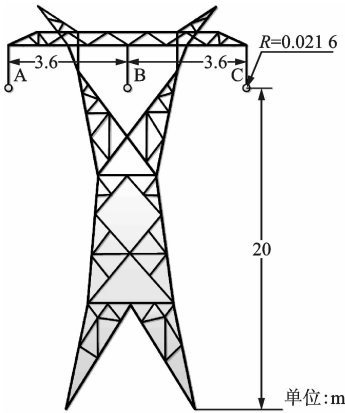


图 1 110 kV 三相交流输电线路杆塔示意图
Fig. 1 Diagram of tower of 110 kV three-phase AC transmission line

1.2.2 输电线路弧垂计算 因高压输电线路跨度大,输电线自重导致线路存在一定的弧垂。为了方便计算,将输电线路看作是理想的柔性索链,线路的弧垂可通过悬链线方程计算。图 2 为考虑弧垂的 110 kV 三相交流输电线路三维模型。

根据架空输电线路的悬链线弧垂计算公式,可求得输电线路中点处的弧垂^[21],即

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{gL^2}{8\sigma} \\ g &= \frac{9.807 \times 10^{-3}G}{S} \\ \sigma &= \frac{T_0}{2.5S} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

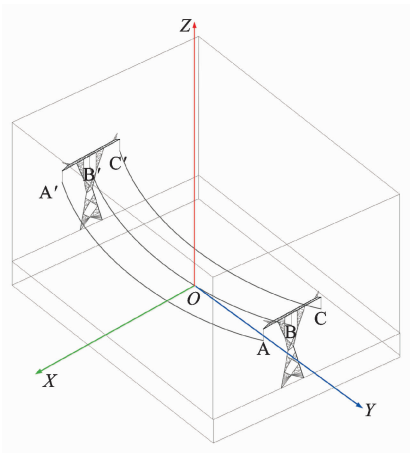


图 2 考虑弧垂的三维输电线路模型
Fig. 2 Three-dimensional transmission line model with sag

式中: f 为观测弧垂; m ; g 为导线的自重载比, $N/(m \cdot mm^2)$; L 为架空线路的档距, m ; σ 为架空线的水平应力, N/mm^2 ; T 为导线的计算拉断力, N ; G 为单位长度导线质量, kg/km ; S 为导线横截面积, mm^2 。

为了便于计算,文中将模型进行简化处理:①在进行三维工频电场计算时,取大地为零电位,并将地面视为良导体;②只考虑输电线路形成的电磁场,忽略杆塔、金具、绝缘子串等附近物体的影响;③输电线路两端高度一致,导线用等高悬链线代替且彼此平行。

1.2.3 树木和建筑物简化模型 由于树木种类繁多,形态各异,但树木的介电性和导电性处于绝缘体和导体之间^[22],所以将树冠和树干相对介电常数分别设置为 150、5 000^[23],电磁波传导速度分别取 0.001、0.1 m/s。将树木的树冠部分近似看作是半径为 2.5 m 的球体,树干部分是高度 5 m、半径 0.25 m 的圆柱体。将建筑物简化为长×宽×高为 10 m×9 m×10 m 的物体,建筑物通常采用混凝土材料,其相对介电常数为 6.4,电磁波传导速度 0.12 m/s^[24]。

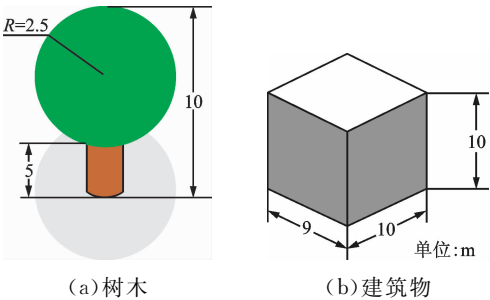


图 3 物体三维简化仿真模型
Fig. 3 Simplified 3D simulation models of objects

在基于弧垂的三维输电线路模型中,导线并不是与大地完全平行,而是呈现弧形,那么弧垂最低点处的剖面上导线距离地面最近,原则上在这个剖面上的电场强度也是最大的。因此,本文将树木、建筑物分别放置在导线最低点对应的 X 轴坐标上。

2 电场计算结果与分析

2.1 工频电场的变化

在理想的电力系统中,正常情况下输电线路 A、B、C 三相瞬时电压 U_A 、 U_B 、 U_C 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_m \cos \theta \\ U_B &= U_m \cos (\theta - 120^\circ) \\ U_C &= U_m \cos (\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: U_m 为交流相电压峰值; θ 为相位角。

基于公式(7)设置有限元模型中的激励电压,取导线中点处分别位于相位 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 时刻,计算 XZ 截面的电场分布,结果如图 4 所示。

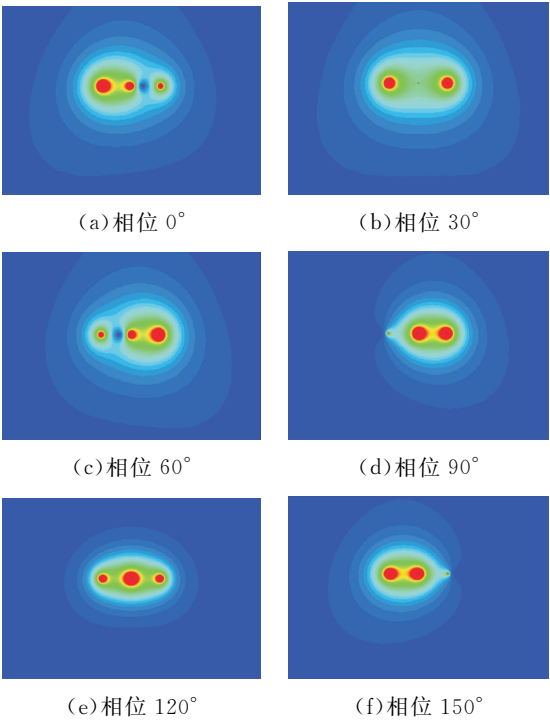


图 4 不同相位的 XZ 截面电场分布

Fig. 4 Electric field distributions of XZ cross section at different phases

由图 4 可知,三相交流输电线的 XZ 截面电场分布随着电压相位的变化而变化,并且随相位变化呈规律性变化。即交流高压输电线路中的正弦稳态电压在导线周围激发的电场属于交变电场,与朱军等的理论分析^[25]一致。

2.2 测量点的选取

取中间相导线电压的相位 120° 进行仿真分析,此时两边相导线上的电压相等,有利于观察输电线路下方的电场分布。图 5 为导线距离地面不同高度时的水平电场分布。横坐标 X 为左右测量点到 B 相输电线路垂线的距离,左侧为负,右侧为正。

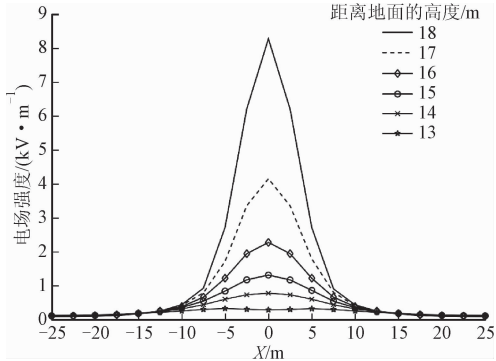


图 5 导线距离地面不同高度时的水平电场分布

Fig. 5 Horizontal electric field distributions at different heights from the ground

由图 5 可知,输电线路下方的电场强度整体呈负二次幂函数关系对称分布。当导线对地高度一定时,工频电场的测量值随高度下降而下降。由于电场强度随着导线距离地面高度的减小,其衰减速度较快,加之《高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术》规定,居民区设立的供电设施的工频电场强度不超过 4 kV/m ,因此,本文通过模拟输电线路 B 相正下方距离地面高度 16 m 处的电场分布(该处最大电场强度 $E_{\max} = 3.6 \text{ kV/m}$),分析各类故障发生瞬间对输电线路周围电场的影响。

2.3 各类故障对输电线路附近电场的影响

按照故障点发生的外部条件,分析单相接地故障、两相接地短路故障、两相短路故障和三相短路故障对输电线路附近电场的影响。

2.3.1 单相接地故障 以 B 相线路正下方距离地面 16 m 处的坐标点为测量点,通过有限元方法模拟分析单相接地故障分别发生在 A 相、B 相和 C 相时输电线路周围的电场变化规律。将各相线路发生单相接地故障后瞬间时刻电场的畸变和故障前正常运行情况下电场规律进行对比,结果如图 6 所示。

110 kV 三相交流输电线路发生单相接地故障时,故障相的电压也变为 0 V ,从而引起输电线路附近的合成电场发生变化。同时,A、B 和 C 相导线上的单相接地故障也会导致输电线路附近的电场发生不同程度的畸变。单相接地故障发生后,其测量点

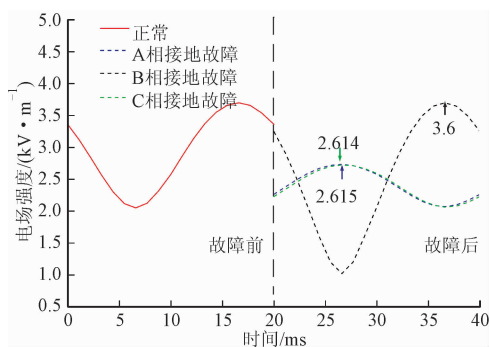


图6 单相接地故障不同故障相的电场强度变化

Fig. 6 Changes of electric field intensity with single-phase grounding fault in different fault phases

处的最大电场强度分别为 2.615、3.6、2.614 kV/m。可以看到,三相中任何一相出现故障,测量点电场强度幅值曲线均出现明显变化,但其最大值均不超过正常运行时的最大电场强度。当故障发生在中间相上时,测量点处获得的电场强度幅值从 1.64 kV/m 增大到 2.67 kV/m,而故障发生在边相上时,测量点处获得的电场强度幅值从 1.64 kV/m 降低到 0.65 kV/m,即单相接地故障发生在中间相上对线路附近电场强度幅度的波动最剧烈。

2.3.2 两相接地短路故障 结合不同时刻的电场强度,将两相接地短路故障后瞬间时刻的附近电场畸变和正常运行情况下电场规律进行对比,结果如图 7 所示。

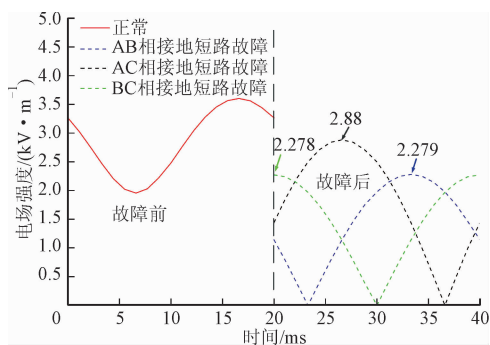


图7 两相接地短路故障不同故障相的电场强度变化

Fig. 7 Changes of electric field intensity with two-phase grounding fault in different fault phases

两相接地短路故障发生后,输电线路附近的电场会产生一定程度的变化,并且不同导线上也会产生不同程度的电场变化。一旦发生两相接地短路故障,故障相的相电压均变为零,导致在某个时刻出现各相线路的电压均为 0 V 的情况,此时,其电场强度也会变为 0 kV/m,即电场变化曲线中有“零点”的出现。根据模拟结果,两相接地短路故障分别发生

在 AB 相、AC 相和 BC 相后,测量点测得最大电场强度分别为 2.279、2.88、2.278 kV/m。对比故障前的电场变化曲线,可以明显看出故障后的最大电场强度均小于故障前的最大电场强度。观测得到最大电场信号的幅度发生在 AC 相接地短路故障时,为 2.88 kV/m,AB 相、BC 相次之,分别为 2.279、2.278 kV/m。即两相接地短路故障发生在 AC 相后,附近电场幅度变化最为剧烈。

2.3.3 两相短路故障 结合不同时刻的电场强度,将两相短路故障后瞬间时刻的附近电场畸变和正常运行情况下电场规律进行对比,结果如图 8 所示。

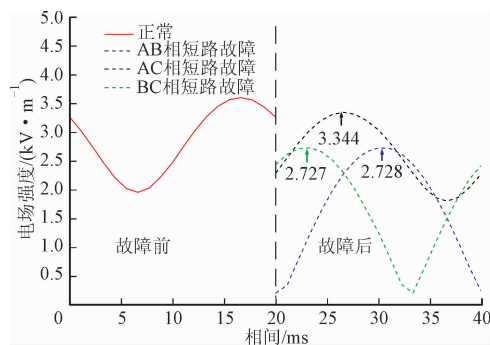


图8 两相短路故障时不同故障相的电场强度变化

Fig. 8 Changes of electric field intensity with two-phase short-circuit fault in different fault phases

两相短路故障发生后,因故障相电压的改变,导致输电线路附近的电场强度也发生明显畸变。两相短路故障发生在 AB 相、BC 相和 AC 相后,其测量点处的最大电场强度分别为 2.728、3.344 和 2.727 kV/m,均小于故障前的最大电场强度。同时,故障发生后的电场强度幅值也发生明显的改变,观测点得到最大电场信号的幅值发生在 AB 相、BC 相短路故障时,为 2.52 kV/m,AC 相次之,为 1.54 kV/m。即两相短路故障发生在 AB 相、BC 相时,附近电场幅度变化最为剧烈,而故障发生在 AC 相,附近电场幅度变化却不明显。

2.3.4 三相短路故障 线路发生三相短路故障,则短路点的电压无限下降直至为零,而短路回路中的电流值却大大增加,导致用电设备不能正常工作。通过有限元模型,结合不同时刻的电场强度,将三相短路故障后瞬间时刻的附近电场畸变和正常运行情况下电场规律进行对比,结果见图 9。

当 110 kV 输电线路发生三相短路故障后,输电线路各相的电压变为 0 V。因各相线路中电荷不发生运动,输电线路附近的电场测量数据始终保持为 0 kV/m,即输电线路附近的电场消失。相比于

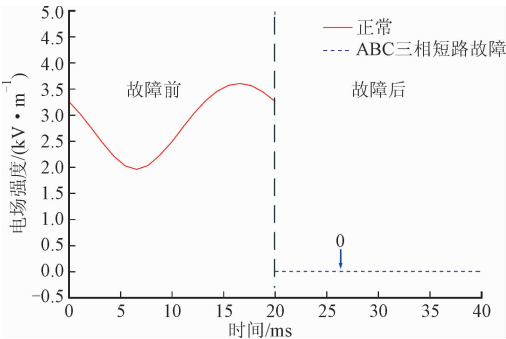


图 9 三相短路故障的电场强度变化

Fig. 9 Changes of electric field intensity with three-phase short-circuit fault

其他故障,该故障一旦发生,输电线路附近的电场强度变化非常显著,易于发现。由于三相短路故障发生后线路和大地之间的电势差为 0 V,树木和建筑物或其他障碍物的存在并不会改变线路附近的电场,因此,本文将不再分析三相短路故障和障碍物同时存在时对输电线路附近电场分布的影响。

2.4 各类故障变化对比

为能够清晰地对比各类故障在观测点的变化,在分析各种故障类型的基础上,归纳其故障特征,结果如表 1 所示。

表 1 各类故障对应的电场变化情况

Table 1 Electric field changes with various faults

故障类型	最大电场强度/ (kV·m ⁻¹)	电场幅度/ (kV·m ⁻¹)	零 点
无故障	3.60	1.64	无
A 相接地故障	2.62	0.65	无
B 相接地故障	3.60	2.67	无
C 相接地故障	2.63	0.65	无
AB 两相接地短路故障	2.27	2.27	有
AC 两相接地短路故障	2.88	2.88	有
BC 两相接地短路故障	2.27	2.27	有
AB 两相短路故障	2.72	2.52	无
AC 两相短路故障	3.34	1.54	无
BC 两相短路故障	2.72	2.52	无
ABC 三相短路故障	0	0	有

由表 1 可以看出,当高压输电线路发生不同故障类型时,其周围的电场强度和电场幅度有一定的规律可循。因此,可根据输电线路附近的电场变化特征,判断输电线路故障类型。

3 障碍物周围的电场分布

若输电线路发生故障,可能引起附近障碍物顶

端电场发生畸变,导致电晕灼伤甚至闪络,产生较大的隐患。本文基于有限元法的 Ansoft 仿真软件分别建立树木、建筑物和不同线路故障类型的模型,研究线路故障和树木、建筑物同时存在时,物体顶部周围电场的分布。

3.1 树木周围的电场分布变化

为了研究各类线路故障对树木顶部周围电场分布的影响,将故障相设置在靠近树木的一侧,通过调节三维输电线路有限元模型中的激励电压,模拟单相接地故障发生在 C 相、两相接地故障发生在 BC 相和两相短路故障发生在 BC 相时,其电场分布变化情况。因树木的模型高度为 10 m,所以模拟分析输电线路故障对树木顶部附近电场的影响。当平面 X=0、Y=0、Z=10 m 时,水平电场强度分布结果见图 10。

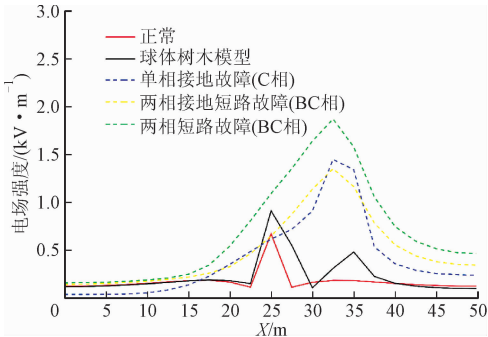


图 10 不同情况的水平电场强度分布(树木)

Fig. 10 Horizontal electric field intensity distributions around top of trees in different situations

在输电线路正常运行时,由于各相线路产生的电场相互叠加,导致输电线路附近的电场峰值出现在水平距离 25 m 处。然而输电线路发生各类故障后,树木顶端的电场强度明显增大,甚至超过输电线路正下方的电场强度,此时输电线路附近的电场峰值出现在水平距离 35 m 处,即树木的顶端处。为能够清晰地对比各类故障发生时,树木顶部附近的电场强度畸变程度,以电场强度畸变倍数来表征其畸变程度,结果如表 2 所示。

表 2 故障对树木顶部电场的影响

Table 2 Effect of faults on electric field around top of trees

故障类型	最大电场强度/ (kV·m ⁻¹)	电场强度 畸变倍数
单相接地故障(C 相)	1.447	3.01
两相接地短路故障(BC 相)	1.350	2.75
两相短路故障(BC 相)	1.869	3.81

由表 2 可以看出,高压交流输电线路发生故障后,树木顶部附近的电场强度将会成倍地增长。当单相接地故障(C 相)发生后,最大电场强度 $E_{\max}=1.447\text{ kV/m}$,是正常时的 3.01 倍;当两相接地短路故障(BC 相)发生后, $E_{\max}=1.350\text{ kV/m}$,是正常时的 2.75 倍;当两相短路故障(BC 相)发生后, $E_{\max}=1.869\text{ kV/m}$,是正常时的 3.81 倍。考虑到树木的高度随时间不断上升,树木顶端位置处的电场强度也会随高度的上升而不断增大,因此一旦输电线路发生故障会导致树木放电隐患的概率再次增加,意味着输电线路故障会对附近的树木造成潜在的威胁。

3.2 建筑物周围的电场分布变化

为了研究各类故障发生后对建筑物顶部附近的电场的影响,取平面 $X=0,Y=0,Z=10\text{ m}$,模拟分析输电线路正常运行以及建筑物和不同故障类型同时存在时的水平电场强度分布,结果见图 11。

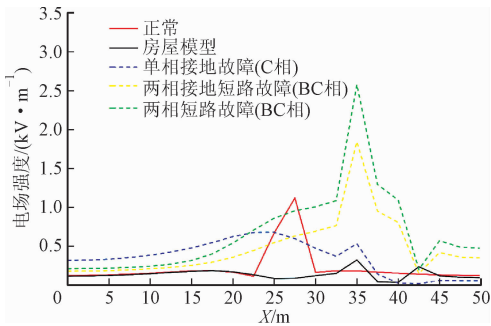


图 11 不同状态下的水平电场强度分布(建筑物)
Fig. 11 Horizontal electric field intensity distributions around buildings in different situations

当建筑物存在于被测场域中时,建筑物会影响电场的均匀度和电力线的分布。由于输电线路在建筑物上会感应出电荷,且电荷大量集聚在建筑物与输电线延伸方向平行的棱边上,因此会造成棱边附近的电场强度大于周围的电场,尤其是建筑物两侧棱角处的电场强度。为能够清晰地对比各类故障对建筑物顶部附近的电场强度的影响,以畸变倍数表征其畸变程度,结果如表 3 所示。

表 3 故障对建筑物顶部电场的影响
Table 3 Effect of faults on electric field around top of buildings

故障类型	最大电场强度/ ($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	电场强度 畸变倍数
单相接地故障(C 相)	0.677	1.88
两相接地短路故障(BC 相)	1.843	5.11
两相短路故障(BC 相)	2.577	7.15

由表 3 可以看出,高压交流输电线路发生故障后,建筑物顶部棱边附近的电场强度同样会成倍地畸变。对比故障前后建筑物顶部附近的最大电场强度,当单相接地故障(C 相)发生后, $E_{\max}=0.677\text{ kV/m}$,是正常时的 1.88 倍;当两相接地短路故障(BC 相)发生后, $E_{\max}=1.843\text{ kV/m}$,是正常时的 5.11 倍;而两相短路故障(BC 相)发生后, $E_{\max}=2.577\text{ kV/m}$,是正常时的 7.15 倍。

4 结 论

本文针对高压交流输电线路在发生各类故障时会影响电场分布以及附近环境的问题,建立具有弧垂的高压交流三相输电线路模型。通过有限元方法对输电线路模型附近的电场强度进行求解,分析高压输电线路不同故障对应的特征变化量,以及不同故障对树木、建筑物附近电场的影响,得到如下结论。

(1)高压交流输电线路发生各类故障后的电场波形之间有着明显的差异,最大电场强度和电场强度幅值的变化也不相同。故障后线路附近的最大电场强度不会超过故障前的最大电场强度,且不同故障对线路周围的最大电场强度和电场幅值有不同程度的改变,但有的故障类型会出现“零点”。该结果为基于高压输电线周围的电场变化对高压输电线运行状态进行故障诊断提供了模拟计算的数据经验和可行性分析。

(2)当线路发生故障时,其附近的电场畸变都会出现不同程度的加剧。尤其是两相短路故障发生时,树木顶端以及建筑物棱角周围的电场强度明显增大,树木顶端的最大电场强度接近正常时的 3.81 倍,建筑物顶部附近的最大电场强度接近正常时的 7.15 倍。因此,在输电线设计阶段,应综合考虑故障和树木、建筑物等同时存在时对输电线路周围电场的影响,实现输电线路的安全运行和电网系统的环保要求。

参考文献:

[1] 黄新波,曹雯. 输电线路灾害机理研究进展 [J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(5): 589-605.
HUANG Xinbo, CAO Wen. Review of the disaster mechanism of transmission lines [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(5): 589-605.
[2] LI Xiaolan, CHEN Jiahong, ZHAO Chun, et al. Study of lightning damage risk assessment method for power grid [J]. Energy and Power Engineering,

- 2013, 5(4): 1478-1483.
- [3] MINNAAR U J, GAUNT C T, NICOLLS F. Characterisation of power system events on South African transmission power lines [J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 88: 25-32.
 - [4] 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等. 输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 120-125.
ZHU Yongcan, HUANG Xinbo, JIA Jianyuan, et al. Numerical simulation for icing and influence on transmission line [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 120-125.
 - [5] LEE J M, CLARK C F. Ecological effects of EHV and UHV transmission lines current issues [C]// *Proceedings of the CIGRE Symposium on Transmission Lines and the Environment*. Stockholm, Sweden: CIGRE, 1981: 233-237.
 - [6] HE Jinliang, CHEN Shuiming, GUO Jian, et al. Electromagnetic environment analysis of a software park near transmission lines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(4): 995-1002.
 - [7] DI Guoqing, GU Xiaoyu, LIN Qin hao, et al. A comparative study on effects of static electric field and power frequency electric field on hematology in mice [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166: 109-115.
 - [8] 田毅, 黄新波, 袁正康, 等. 输电线路在线监测通信网络的设计与改进 [J]. *西安工程大学学报*, 2020, 34(4): 72-79.
TIAN Yi, HUANG Xinbo, YUAN Zheng kang, et al. Design and improvement of on-line monitoring communication network for transmission lines [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2020, 34(4): 72-79.
 - [9] OTAKE Y, UMEMOTO T, KONDO R, et al. Electric field measurement at partial discharge occurrence in oil/pressboard insulation system [J]. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, 2020, 140(6): 325-330.
 - [10] 许丹, 马星河, 王晨辉, 等. 500 kV 输电线路电场强度测量与计算分析 [J]. *高压电器*, 2013, 49(7): 25-28, 34.
XU Dan, MA Xinghe, WANG Chenhui, et al. Electric field measurement and computational analysis on 500 kV transmission lines [J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(7): 25-28, 34.
 - [11] 全杰, 雷煜卿, 刘国华, 等. 微型电场传感器在工频电场测量中的应用研究 [J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(12): 3036-3041.
 - TONG Jie, LEI Yuqing, LIU Guohua, et al. Power-frequency electric field measurement using a micromachined electric field sensor [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 3036-3041.
 - [12] CLEBER DA SILVA R, KUOKAWA S. Model of three-phase transmission line with the theory of modal decomposition implied [J]. *Energy and Power Engineering*, 2013, 5(4): 1139-1146.
 - [13] 汪泉弟, 罗扬, 杨帆, 等. 超高压输电线下建筑物临近区域三维电场仿真 [J]. *高压电器*, 2013, 49(10): 1-6.
WANG Quandi, LUO Yang, YANG Fan, et al. Three-dimensional simulation of electric field around building under EHV transmission lines [J]. *High Voltage Apparatus*, 2013, 49(10): 1-6.
 - [14] 汪茹, 田瑾, 吴飞, 等. 一种基于有限元法的超高压输电线路三维电场计算方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(4): 103-110.
WANG Ru, TIAN Jin, WU Fei, et al. Three-dimensional electric field calculation method for EHV transmission line based on finite element method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(4): 103-110.
 - [15] 宋福根, 林韩, 兰生. 利用无人机对特高压线路上方电场强度实测 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(12): 2836-2843.
SONG Fugen, LIN Han, LAN Sheng. Test research of the electric field intensity in the upper space of UHV AC transmission line using UAV [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(12): 2836-2843.
 - [16] WANG Jingang, LI Xiang, OU Shucheng, et al. Research on transmission line voltage measurement method based on improved Gaussian integral [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 73711-73718.
 - [17] 刘怀东, 陈伟, 高晓辉, 等. 从大停电观点分析一类输电线路树闪故障 [J]. *电网技术*, 2007, 31(S1): 67-69.
LIU Huaidong, CHEN Wei, GAO Xiaohui, et al. Analysis of vegetation-related failures on transmission lines from the viewpoint of blackouts [J]. *Power System Technology*, 2007, 31(S1): 67-69.
 - [18] 刘雯静, 张童飞, 胡志珍, 等. 基于超声和无线组网的超高树障在线监测装置 [J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(10): 98-103, 107.
LIU Wenjing, ZHANG Tongfei, HU Zhizhen, et al. A transmission line monitoring device based on ultra-

- sonic and wireless networking technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 98-103, 107.
- [19] 张广洲, 邬雄, 万保权, 等. 邻近民房的输电线路电磁环境 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 884-888.
ZHANG Guangzhou, WU Xiong, WAN Baoquan, et al. EM environment of the transmission lines adjacent to residential buildings [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 884-888.
- [20] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 6-9.
- [21] 兰生, 张振兴, 原永滨. 考虑弧垂的交流特高压输电线路三维电磁场 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(12): 42-46, 53.
LAN Sheng, ZHANG Zhenxing, YUAN Yongbin. The 3D electromagnetic field of AC EHV transmission lines with sag [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(12): 42-46, 53.
- [22] 王东来, 卢铁兵, 陈博, 等. $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ 特高压直流输电线路邻近树木时合成电场建模计算与特性研究 [J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3441-3447.
WANG Donglai, LU Tiebing, CHEN Bo, et al. Modeling and characteristic research of total electric field around trees near $\pm 1\ 100\ \text{kV}$ UHVDC transmission lines [J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3441-3447.
- [23] 周宏威. 树木电磁参数测量与其对输电线路电场影响的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017: 87-89.
- [24] 周道传, 朱海堂. 电磁波在混凝土材料表面的透射率研究 [J]. 功能材料, 2011, 42(S4): 635-638, 643.
ZHOU Daochuan, ZHU Haitang. Transmission rate of electromagnetic wave in concrete material surface [J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(S4): 635-638, 643.
- [25] 朱军, 吴广宁, 石超群, 等. 交、直流共用超/特高压输电走廊下地面工频电场及最优相序排列方式分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2797-2805.
ZHU Jun, WU Guangning, SHI Chaoqun, et al. Analysis on power frequency electric field at ground surface and optimal phase sequence arrangement of EHV/UHV transmission lines in common AC/DC transmission corridor [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2797-2805.

(编辑 亢列梅)