

不同杆塔转角度数对输电线路电场的影响

转角杆塔具有调整输电线路走向的作用, 不仅承受风载荷和自重载荷, 而且还承受角度荷重以及不平衡张力。转角杆塔由于其杆塔的特殊性, 周围的电场分布也与普通杆塔有所不同, 所以分析转角杆塔周围的电场分布显得尤为重要。基于此, 根据铁塔实际结构建立转角杆塔附近三维电场计算模型, 对五种不同角度的转角杆塔进行Ansoft三维电场仿真分析, 分析总结转角杆塔转角度数对输电线路电场的影响, 并讨论了影响电场仿真结果的因素。

黄俊璞^{1, 3} 林 韩² 宋福根² 蔡金锭² / 1. 福建省电力有限公司电力科学研究院 2. 国网福建省电力有限公司 3. 福州大学电气工程与自动化学院

0 引言

为解决电网运行维护线路里程快速增长与电网运行维护人员数量相对不足之间的矛盾, 克服地形、交通等因素给人工巡检带来的困难, 促进电网运行维护由劳动密集型向技术密集型转变, 无人机巡检技术进入了大众的视野^[1]。无人机巡检技术不仅自动化程度高、巡视半径大, 并且具有更远的航程、更准确的故障识别技术和更安全的避障技术。无人机巡检时难免会遇到转角杆塔, 所以需要考虑无人机在巡检转角杆塔时采取怎样的避障策略。首先杆塔属于接地体, 在整个电场环境中属于零电位; 其次转角杆塔两段输电线路之间存在夹角, 周围的电场由于这些不确定的因素产生畸变。目前国内外对高压输电线路下工频电场强度的仿真计算作了大量的研究, 如采用能反映输电线路横截面分布的二维模型^[2-6], 也有采用考虑导线弧垂、可较好反映线路电场纵向分布和横向分布的三维模型^[7-15]; 但转角杆塔周围的输电线路工频电场仿真计算分析还少

有研究。为对无人机巡检转角杆塔时提出避障策略, 因此有必要对转角杆塔附近的电场分布进行研究。

本文对500 kV转角杆塔进行简化, 并建立三维仿真计算模型。基于Ansoft软件仿真计算转角杆塔周围的电场分布, 分析转角杆塔对附近电场的影响, 通过讨论影响仿真结果的因素, 以期对基于电场强度避障的无人机巡检技术提供依据。

1 铁塔附近电场计算模型

以导线成正三角形排列的500 kV转角杆塔为电场研究的计算模型, 在建立模型之前, 需要对其进行合理简化及处理:

- 1) 保留铁塔的主要金属构架, 忽略次要金属构件、绝缘子串和线路固定金具等, 输电线路近似成平行于地面的多根圆柱导体^[16]。
- 2) 地面为无穷大导体, 电位为零, 沿地面电阻率相同。
- 3) 认为电荷沿线路分布没有畸变, 不考虑线路上电位的变化。
- 4) 视工频交变电场为准静态场。
- 5) 忽略系统和负荷的不对称性及电压的波动, 将线路运行电压视为三相对称正弦电压。

根据简化建立的铁塔附近电场计算模型正视图与侧视图如图1所示。

通过简化, 分裂导线建模时采用等效半径计算式, 求出相导线的等效半径为

$$R_{eq} = \sqrt[m]{mr(R)^{m-1}} \quad (1)$$

式中, R 为分裂半径; m 为分裂数; r 为分



黄俊璞/硕士研究生

关键词/Keywords

输电线路·
转角杆塔·
转角度数·
Ansoft仿真·

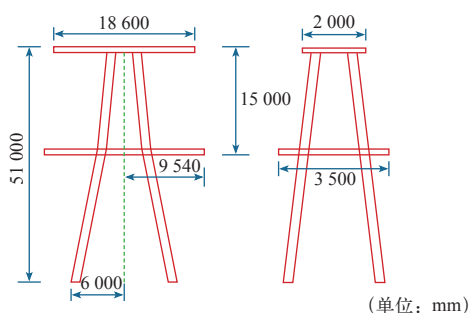


图1 铁塔计算模型的正视图及侧视图

裂子导线半径^[17]。

模型建立时，以输电线路走向为 x 轴，横向为 y 轴，竖直方向为 z 轴建立直角坐标系，坐标原点设在铁塔下方地面中心处，地面视为无限大平面。

电场计算时，取地面电位为零，三相电压为

$$\begin{aligned} U_A &= \frac{500}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ kV} \\ U_B &= \frac{500}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \text{ kV} \\ U_C &= \frac{500}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \text{ kV} \\ \omega &= 100\pi \end{aligned} \quad (2)$$

式中， ωt 为角速度。

2 电场计算原理

由于工频信号的波长为6 000 km，一般输电线路的长度比工频波长要小得多。在电磁环境计算中讨论的空间范围也要比输电线长度小得多，所以可以近似成准静态场。故可类比地采用静电电磁场的分析方法与结论进行相应的分析与计算。则可以得到准静态场所满足的麦克斯韦方程

$$\begin{aligned} E &= -\nabla\phi \\ \Delta\phi &= -\frac{\rho}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， E 为电场强度； ϕ 为标量电位； ρ 为体电荷密度； ε 为介质的介电常数。

狄里克莱边界条件

$$\phi|_{\Gamma} = g(\Gamma) \quad (4)$$

式中， Γ 为狄里克莱边界； $g(\Gamma)$ 为位置函数，可以为常数和零。

诺依曼边界条件

$$\frac{\partial\phi}{\partial n}\bigg|_{\Gamma} + f(\Gamma)\phi|_{\Gamma} = h(\Gamma) \quad (5)$$

式中， Γ 为诺依曼边界； n 为边界 Γ 的外法线矢量； $f(\Gamma)$ 和 $h(\Gamma)$ 为一般函数，可以为常数和零。

3 仿真结果及分析

转角杆塔的设计转角度数不是以实际线路的转角度数来界定的，为了安全和方便起见，转角杆塔一般界定为 5° 、 30° 、 60° 和 90° 四种，并同 0° 普通杆塔相对比。利用Ansoft软件仿真计算，取下两相导线中心点为 $(0, 0, 32\ 000)$ ，在 yz 平面画出等电场强度线，以中心为原点，以 5° 为分度值旋转画出下两相导线中心点上方的等电场强度线，如图2所示。

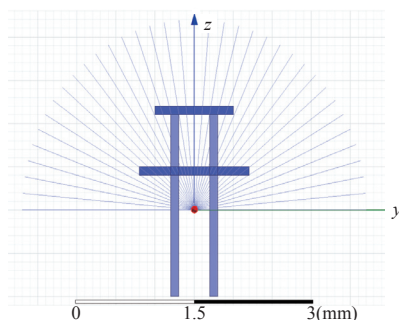


图2 仿真截面示意图

3.1 800 V/m等电场强度

仿真出一个周期中电场强度最大值为等电场强度800 V/m时与下两相导线中心点的距离，如图3所示。

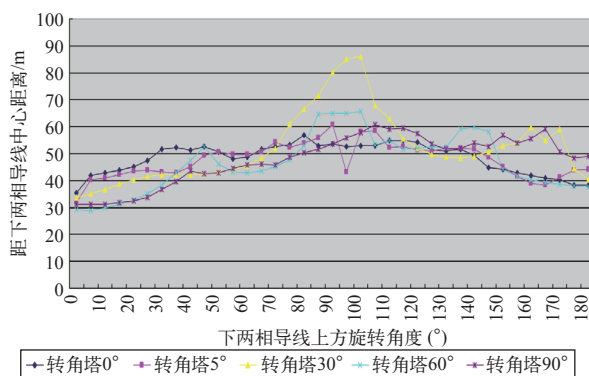


图3 不同转角度数800 V/m等电场强度线与下两相导线中心点距离

在下两相导线上旋转角度为 $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间时,转角塔度数为 60° 和 90° 与下两相导线中心点的距离越大,说明电场越小。因为其转角度数大,致使yz平面上左半部分的合成电场强度较小。下两相导线上旋转角度在 90° 时,电场比左右两边都要大,由于 800 V/m 的等电场线在 90° 时远离上方杆塔,尽管杆塔的电位为零,但杆塔的影响已经减弱,从而导致远离杆塔部分电场增大。在下两相导线上旋转角度为 $145^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 时,转角塔 30° 和 90° 的合成场强最大。

3.2 1 000 V/m等电场强度

仿真出一个周期中电场强度最大值为等电场强度 $1\,000 \text{ V/m}$ 时与下两相导线中心点的距离,如图4所示。

无转角杆塔的等电场强度线分布均匀,没有出现太大的畸变。基于电场强度的无人机巡检避障技术,很大一个技术障碍在于离输电线路越

远,电场强度值越小,电场强度传感器就越难测量到电场强度值。在下两相导线上旋转角度约为 45° 和 135° 时,等电场强度线距中心点距离大,由于场强值大,电场强度传感器能更容易、更准确地测量到电场强度值,适合无人机巡检飞行。

3.3 1 500 V/m等电场强度

仿真出一个周期中电场强度最大值为等电场强度 $1\,500 \text{ V/m}$ 时与下两相导线中心点的距离,如图5所示。

在下两相导线上旋转角度为 90° 左右时,无论有无转角度数,转角塔周围的电场强度都比 90° 以外的要小,这是因为靠近杆塔,杆塔的电位为零,使周围电场产生畸变,电场强度急剧减小。在yz平面的左半部分 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间,无转角杆塔的电场强度比有转角的杆塔要大,并且转角度数小的比转角度数大的合成电场强度要大。然而在右半部分的图中,转角度数大的比转角度数小的合成电场强度要小。

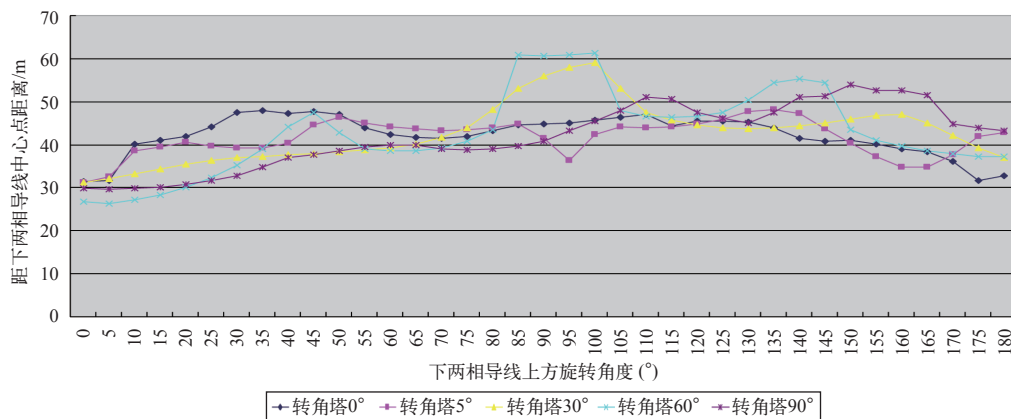


图4 不同转角度数1 000 V/m等电场强度线与下两相导线中心点距离

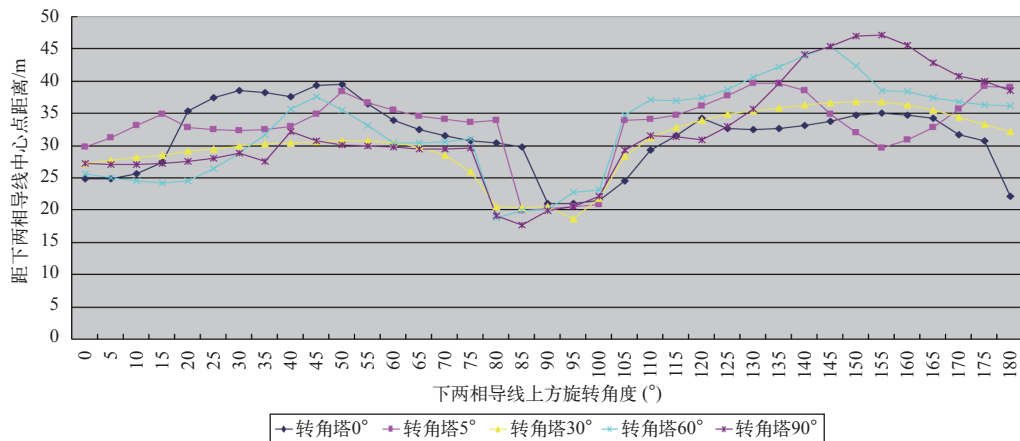


图5 不同转角度数1 500 V/m等电场强度线与下两相导线中心点距离

4 结束语

本文通过对500 kV干字型转角杆塔进行三维仿真分析,得出不同转角度数对输电线路电场的影响结论:

1) 由于转角塔的原因,使线路走向改变,周围的电场不再是单一的平行导线产生的电场,而是具有转角度数的合成电场。而且转角度数不同,合成电场场强值也不同。

2) 由于仿真中,线路走向从x轴正方向垂直向负方向,在 $x=0$ 时转角,向y轴正方向转向。所以在下两相导线上分为两个区域:左半部分为电场稀薄区;右半部分为电场丰富区。在电场稀薄区,无转角的杆塔合成电场强度比有转角的杆塔要大;在电场丰富区,转角度数小的比转角度数大的合成电场强度要大。

3) 下两相导线上旋转角度为 90° 左右,远离杆塔时,杆塔的零电位影响减弱,这个区域内的合成电场比周围的合成电场要大;在靠近杆塔时,零电位的杆塔是影响合成电场的主要因素,使合成电场产生畸变急剧减小。

参考文献

- [1] 林韩,林朝辉,汤明文,等.电力输电线路无人直升机巡视的应用[J].华东电力,2011,39(10):1657-1660.
- [2] 黄道春,阮江军,赵华,等.同塔并架4回输电线路相导线排列方式研究[J].高电压技术,2006,32(3):18-20.
- [3] 韦刚,李海峰.同杆并架多回线下方的电场强度和感应电压[J].中国电力,1999,32(3):37-40.
- [4] 张宇,郑伟,文武,等.架空线路分裂导线表面电位梯度的数值计算[J].高电压技术,2005,31(1):23-25.
- [5] 俞集辉,周超.复杂地势下超高压输电线路的工频电场[J].高电压技术,2006,32(1):18-20.
- [6] 封滢彦,俞集辉.超高压架空输电线路的工频电场及其影响[J].重庆大学学报,2004,27(4):10-14.
- [7] Lee B Y, Park J K, Min S W, et al. An effective

modeling method to analyze electric field around transmission lines and substation using a generalized finite line charge [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (3): 1143-1150.

- [8] 文武,彭磊,张小武,等.特高压大跨越架空线路三维工频电场计算[J].高电压技术,2008,34(9):1821-1825.
- [9] 彭迎,阮江军.模拟电荷法计算特高压架空线路3维工频电场[J].高电压技术,2006,32(12):69-73.
- [10] 卢铁兵,肖刊,张波,等.超高压输电线路铁塔附近的三维工频电场计算[J].高电压技术,2001,27(3):24-26.
- [11] 陈楠,文习山,刘波,等.高压输电导线三维工频电磁场计算与测量[J].电网技术,2011,35(3):159-164.
- [12] 陈楠,文习山,蓝磊.交叉跨越输电导线三维工频电磁场计算[J].高电压技术,2011,37(7):1752-1759.
- [13] Gomollon J A, Palau R. Steady state 3-D-field calculations in three in-phase system with surface charge method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 919-924.
- [14] Adel Z E D, Mohamed A A W. The effects of the span configurations and conductor sag on the electric-field distribution under overhead transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (4): 2891-2902.
- [15] Joao C S, Athanasio M, Joan I S. Comparative analysis of 2-and 3-D methods for computing electric magnetic fields generated by overhead transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (1): 338-344.
- [16] 李永明,范与周,徐禄文.超高压输电线路铁塔附近地面工频电场仿真分析[J].电网技术,2013,37(3):782-787.
- [17] 牛林,杜至刚,赵建国.1 000 kV级交流特高压输电线路导线做小对地距离研究[J].电力自动化设备,2008(1):17-22.

(收稿日期:2015-06-25) **EA**