

风荷载下输电塔绝缘子断裂对塔体性能的影响

何敏娟, 刘慧群

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 选用 Davenport 风速谱, 利用谐波叠加法, 模拟动风荷载, 以常见 500 kV 酒杯型直线塔为分析对象, 应用有限元软件 Ansys, 建立 3 塔 4 跨模型, 考虑几何非线性, 分析 10 级风下悬垂型绝缘子断裂后对塔体结构性能产生的影响. 分析表明, 绝缘子断裂使断后仍与导线相连的塔体的塔柱等主要受力构件应力增大 10%~32%, 支座反力增大 6%~21%. 因此, 风荷载与绝缘子断裂的组合作用在输电塔的设计中不容忽视.

关键词: 输电塔; 绝缘子断裂; 非线性有限元; 瞬态

中图分类号: TU 366.2; TU 759; TM 75 **文献标识码:** A

Influence of Insulator Rupture on Structural Behavior of Power Transmission Tower Under Wind Load

HE Minjuan, LIU Huiqun

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on Davenport wind speed spectrum, harmonic superposition method was available to simulate the dynamic wind load. Commercial FEM software ANSYS was employed to analyze the three towers and four-span straight-cup-transmission lines model. Geometric nonlinearity was taken into account in FEM model, structural behavior of the transmission tower was investigated when insulator rupture and wind force 10 loading case happened simultaneously. Analytical results show that after insulator rupture, the stress of the main structural members such as the columns remaining connected with the lines increases by 10%~32%, and the base reaction force increases by 6%~21%. The combined action of wind-load and insulator-rupture can not be neglected in design.

Key words: Power transmission tower; insulator rupture; nonlinear finite element; transient response

高压输电塔是应用极广的一类高耸结构, 作为一项重要的生命线电力工程设施, 确保其结构在各种工况下的安全可靠具有重要的意义. 线路绝缘子是输变电设备的重要组成部分, 主要用于高压输变电线路中, 起绝缘和支撑作用. 硅橡胶复合绝缘子在我国挂网运行 10 多年来, 以耐污性能强、质量轻、易安装、无须测零和维护量少等优点, 得到运行部门认可. 但使用到 500 kV 线路上后, 已发生数十起芯棒脆断或掉串事故. 绝缘子断裂会使电网瘫痪, 大面积停电, 给国民经济带来重大损失, 给人民生活带来不便.

国际大电网会议(CIGRE)曾对 300 多万串运行的复合绝缘子进行调查统计, 发现约有 300 串芯棒脆断, 故障率为 1/100 00^[1]. 国内已发生多起掉串事故, 如 2006 年和 2007 年, 河南 I 左龙线和 I 首常线 220 kV 输电线路, 塔中及右侧绝缘子断裂, I 左龙线导线落于塔中, I 首常线右侧导线落地, 塔上其他绝缘子均完好^[2]. 2006 年 6 月, 常州 220 kV 金湾线复合绝缘子断裂, 导致金湾线跳闸, 重合不成^[3].

国外学者自 20 世纪 80 年代开始使用计算机软件研究导线断裂. Siddiqui 提出了采用能量守恒原理估算断线所产生的纵向最大冲击荷载的模型^[4]. McClure 针对导线断裂做了大量研究, 比如用数学方法模拟导线断裂对塔的动力作用^[5], 利用软件 Adina 建立二维、三维模型模拟导线断裂等^[6].

目前, 我国规范^[7]规定, 在设计输电塔时, 需考虑输电线断线情况下的荷载组合, 即考虑断线时对钢塔施加一个不平衡张力, 但尚未要求考虑绝缘子断裂对钢塔受力性能的影响. 何运祥采用有限元方法, 研究了绝缘子突然断裂而导线不断时, 导线自由跌落与地面碰撞和不碰撞两种情况下对输电塔的内力影响, 着重于导线跌落过程的分析及绝缘子断裂

收稿日期: 2008-09-12

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50638010)

作者简介: 何敏娟(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构与木结构. E-mail: hemj@tongji.edu.cn

产生的冲击力对钢塔的影响^[8]. 笔者在前人工作的基础上,着重研究动风荷载下绝缘子断裂对钢塔受力性能的影响. 因为绝缘子在动风荷载作用下振动较大,断裂可能性更大,而此时钢塔的风振也较大,钢塔风振与绝缘子断裂对钢塔的共同冲击,将对钢塔产生更严重的影响. 因此,研究动风荷载与绝缘子断裂对输电塔的综合动力作用具有更为重要的现实意义.

1 计算模型及方法

现以河北衡水 500 kV 酒杯型高压输电线路直线段为分析对象进行研究. 该线路塔为角钢塔,塔柱等主要受力构件采用 Q345 钢,横膈等次要受力构件为 Q235 钢;呼高 30.0 m,总高 48.5 m. 单塔立面见图 1. 悬垂型绝缘子长度为 5.221 m.

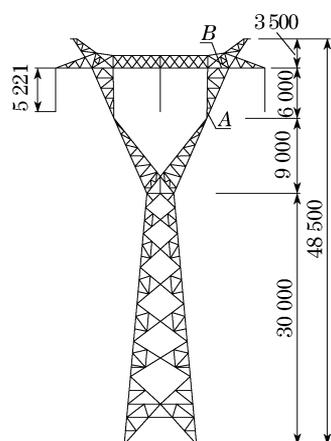


图1 单塔立面(单位:mm)

Fig.1 Single tower elevation(unit:mm)

取直线段上 3 塔 4 跨为分析对象,相邻塔间导、地线跨度为 400 m,导、地线参数见表 1. 采用 Ansys 程序建立计算模型(见图 2),生成的模型共有空间节点 3734 个,单元 6131 个. 三维坐标系 x 轴垂直于导线方向, y 轴平行于导线方向, z 轴为竖直方向,以向上为正. 格构式塔架属于典型的空杆件系统,可采用空杆单元或梁单元进行模拟. 该模型塔柱和斜杆等主要受力构件采用梁单元 (beam 4),次杆、横膈等构件采用 link 8(杆单元),绝缘子采用 link 8,导、地线 4 m 一段采用 link 10 抛物线只拉单元^[9]模拟. 塔底、两端导地线约束为三向平动位移约束.

表 1 导、地线基本参数

Tab.1 Basic parameters of cables

类别	综合直径/mm	跨中垂度/m	水平张力/kN	初应变
导线	46.54	14.87	94.06	8.51×10^{-4}
地线	11.99	14.87	7.62	5.63×10^{-4}

分析时考虑 10 级风,方向垂直于导线,沿 x 轴正向. 塔体简化为“糖葫芦串”模型,考虑脉动风的竖向相关性,选用 Davenport 风速谱推导脉动风荷载功率谱密度函数,从而采用谐波叠加法模拟动风荷载^[10]. 导、地线处的风速近似取与其同高度处塔体风速. 塔体 30 m 处总动风荷载见图 3. 将塔体各高度动风荷载相应施加于同高度处塔柱各节点上,导、地线上风荷载以 4 m 为一段,分别施加于该段端节点上. 绝缘子风荷载施加于上下两节点处.

塔线体系的结构阻尼假定为比例阻尼,输电塔基频的阻尼比取为 0.01^[11],线的结构阻尼由于远小于气动阻尼,因此未计入阻尼阵中^[12]. 计算时,考虑导、地线的几何非线性,在 Ansys 的隐式动力时程分析模块中,采用直接积分的 N-R 方法(牛顿-拉普森方法),时间步长取 0.02 s.

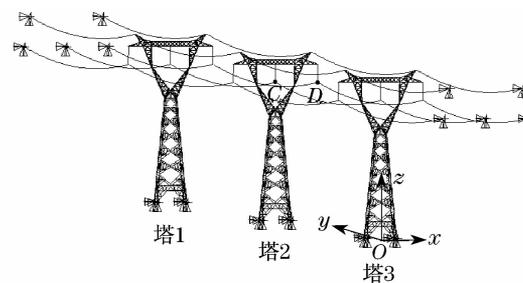


图2 3塔4跨计算模型

Fig.2 Three towers and four-span model

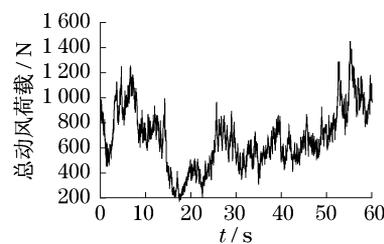


图3 塔体 30 m 处总动风荷载时程曲线

Fig.3 Time-history line of wind load in 30 m

2 动风荷载与绝缘子断裂对塔线耦合体系的动力响应

分析时,首先对导、地线施加初张力,并对其在

重力下进行初始找形.其次,在结构上施加动力风荷载,假定图2中塔2上的绝缘子分别在点C,D处断裂,断裂后,导线完好且跌落后未触地.C,D点分别为中间点和边缘点的绝缘子.塔上、导线、地线及绝缘子上均施加水平动风荷载,方向垂直于导线长度方向.针对完善结构(无绝缘子断裂)、中间1根绝缘子断裂(C点断裂)、边缘1根绝缘子断裂(D点断裂)三种工况进行结构分析.

2.1 位移

总计算时间为60 s,绝缘子在第30 s时断裂,C,D点断裂时,导线上断裂点的竖向位移时程曲线见图4.当绝缘子在C点断裂时,导线会落入塔中,但由于不知导线具体下落的位置,Ansys软件难以模拟此过程,未考虑此时塔与导线的接触过程,因此,C点、D点断裂后导线运动过程相同.30 s时,绝缘子断裂,导线急剧下跌;在33.48 s时,第一次跌至低谷,位移为36.56 m.此后反弹至23 m左右,往复运动.由于绝缘子上下端点处均施加了水平风荷载,因此其断裂点在断裂前后均小幅摆动.

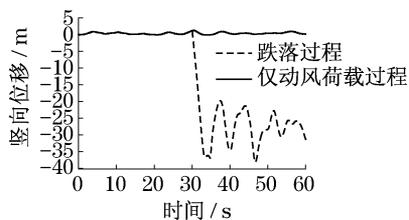


图4 绝缘子断裂时断裂点导线的竖向位移时程曲线
Fig.4 Vertical-displacement time-history line of electric conductor point couple with the rupture point

绝缘子断裂后,塔体受到导线突然掉落的冲击作用,同时塔上还受到较大风荷载的作用,两者共同的作用使塔身各点位移增加.图5为3塔4跨中边缘塔(塔1或塔3)、中间塔(塔2)沿高度方向上各点在3种不同工况下的后30 s的最大位移.从图5可以看出,绝缘子断裂对塔1、塔3产生不利影响,C,D点绝缘子断裂后塔身变形增大,而塔2变形则减小.由图可知,绝缘子断裂位置对塔1、塔3位移影响较大,而塔2上各点位移在两种工况下相差不大.

48.5 m处点的位移为地线与塔连接点的位移,该处位移较大,变动幅度也较大.对塔1、塔3来讲,当中间一根绝缘子断裂时,该处位移峰值增大了18 mm,为完善结构的7%,同一时刻位移比值(与完善结构相比)高达1.37;当边缘一根绝缘子断裂时,位移峰值增大了42 mm,为完善结构的16%,比值高达

1.84.塔1,3点完善结构与断边缘一根绝缘子两种工况下的位移时程曲线见图6.塔2上的该点,当中间一根绝缘子断裂时,位移峰值减小了28 mm,为完善结构的11%;当边缘一根绝缘子断裂时,位移峰值减小了39 mm,为完善结构的15%.

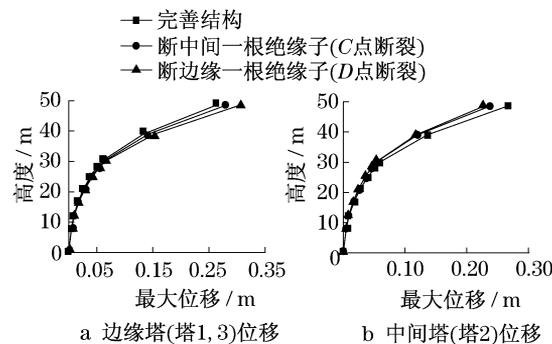


图5 三种工况下塔体各高度处后30 s最大位移
Fig.5 Maximum displacement of towers at the last 30 s of 3 cases

可见,边缘绝缘子断裂对断后仍与之相连的塔的位移影响较大,这主要是由于边缘绝缘子断裂使塔体产生扭转效应.

2.2 支座反力

各工况下30~60 s时,各方向某一支座所受力的最大值见表2(与坐标轴同向为正).可见,绝缘子断裂后,塔1、塔3支座反力峰值约增大6%~21%,塔2则减小了4%~11%.各种工况下,塔1、塔3支座反力动力系数为1.3~1.7.以竖向支座反力为例(向上为正,反之为负),与完善结构相比,当中间一根绝缘子断裂时,同一时刻支座反力比值最大为1.42;当边缘一根绝缘子断裂时为1.54.该点完善结构与断边缘一根绝缘子两种工况下的支座反力时程曲线见图7.对该结构,绝缘子断裂的位置对塔1、塔3支座反力影响较大,而对塔2的影响较小.

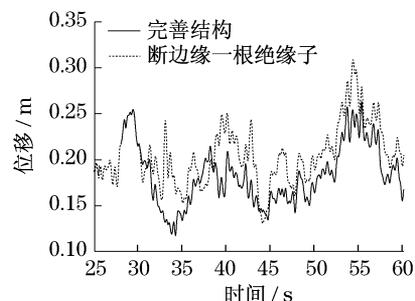


图6 地线与塔连接点位移时程曲线
Fig.6 Displacement time-history line of the point joint the lighting conductor and the tower

表2 塔体支座反力及比例

Tab.2 Tower support reaction and ratio

方向	塔 1,3					塔 2				
	完善结构	中间 C 点断裂		边缘 D 点断裂		完善结构	中间 C 点断裂		边缘 D 点断裂	
	支座反力/kN	支座反力/kN	变化比例/%	支座反力/kN	变化比例/%	支座反力/kN	支座反力/kN	变化比例/%	支座反力/kN	变化比例/%
z	+415.7	+465.6	+12.0	+478.4	+15.1	+422.5	+378.7	-10.4	+377.1	-10.7
x	-47.2	-53.1	+12.5	-50.0	+5.9	-47.5	-43.6	-8.2	-45.7	-3.8
y	-34.8	-38.6	+10.9	-42.1	+21.0	-35.3	-31.7	-10.2	-31.6	-10.5

注:变化比例“+”为增大,“-”为减小。

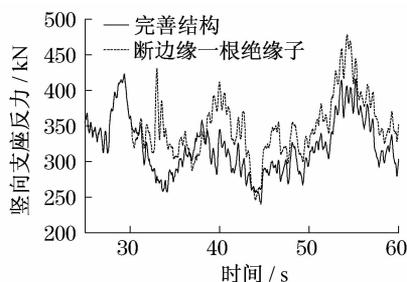


图7 竖向支座反力

Fig.7 Reaction force on vertical direction

2.3 塔体构件应力

绝缘子断裂后,塔 1,3 部分塔柱应力增大 10~40 MPa,为完善结构的 10%~32%;塔 2 上部分塔柱应力减小约 20MPa,为完善结构的 16%.各工况

下绝缘子断裂后部分塔柱压应力最大值见表 3.

39 m 处的杆件位于上下曲臂交界处(图 1 的 A).当中间一根绝缘子断裂时,塔 1,3 上该杆应力增大 39 MPa,为完善结构的 32%;当边缘一根绝缘子断裂时,应力增大 32 MPa,为完善结构的 27%.而塔 2 上的该杆,在两种断裂工况下,应力仅差 3 MPa.

48.5 m 处的杆件为地线支杆.当中间一根绝缘子断裂时,塔 1、塔 3 上该杆应力增大 4 MPa,为完善结构的 2%;而当边缘一根绝缘子断裂时,该杆应力增大 35 MPa,为完善结构的 21%.塔 2 上该杆,在两种断裂工况下,应力仅差 1 MPa.

由此可以看出,绝缘子断裂位置对塔 2 上的塔柱应力影响较小,而对塔 1、塔 3 上的应力影响高达 32%,且边缘一根绝缘子断裂(D 点断裂)较为不利.

表3 各种工况下部分塔柱压应力最大值

Tab.3 Maximum compressive stress at critical columns

高度/m	塔 1,3 的压应力/MPa			塔 2 的压应力/MPa		
	完善结构	中间一根	边缘一根	完善结构	中间一根	边缘一根
8.1	121.1	135.7	140.9	123.2	109.8	108.8
12.3	109.1	122.9	127.9	111.0	98.8	97.9
16.8	110.7	124.8	130.9	112.7	99.7	98.9
21.1	102.6	116.1	123.2	104.5	92.3	91.4
25.2	112.5	127.4	136.5	114.8	100.6	99.3
28.3	126.8	143.2	155.1	129.4	113.5	111.2
30.0	107.2	121.7	140.0	109.5	96.2	92.6
39.0	121.9	161.1	154.2	124.5	105.5	108.1
48.5	164.9	169.0	199.9	157.5	154.9	155.6

绝缘子断裂对塔 1、塔 3 的动力冲击作用显著.以 30 m 高处塔柱为例,与完善结构相比,当中间一根绝缘子断裂时,应力比值最大为 1.58;当边缘一根绝缘子断裂时为 2.15.该点完善结构与断边缘一根绝缘子两种工况下的压应力时程曲线见图 8.

横担与地支交界处部分杆件(图 1B 处)受力较大,绝缘子断裂对其影响大.当中间一根绝缘子断裂时,塔 1、塔 3 上该处应力增大 13 MPa,为完善结构的 8%,应力比最大为 1.44;当边缘一根绝缘子断裂

时,应力增大 34 MPa,为完善结构的 22%,应力比最大为 1.88.该杆完善结构与断边缘一根绝缘子两种工况下的应力时程曲线见图 9.当中间一根绝缘子断裂时,塔 2 上该杆应力减小 14 MPa,为完善结构的 9%;而当边缘一根绝缘子断裂时,应力减小 34 MPa,为完善结构的 21%.由于该交界处距绝缘子较近,因此,断裂位置对 3 个塔该处杆件应力影响均较大.

塔体 30 m 以下斜杆、横杆受力较小,在动风荷

载下,应力往往仅有 30 MPa 左右;绝缘子断裂后,塔 1、塔 3 小部分杆件应力增大到 60 MPa,不起控制作用;而塔 2,斜杆、横杆应力变动较小。

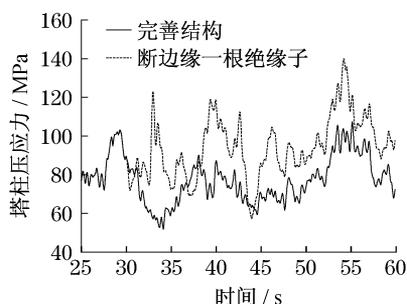


图 8 30.0 m 处塔柱压应力时程曲线

Fig. 8 Compressive stress time-history line of 30 m-height column

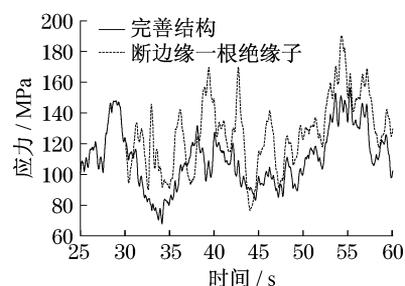


图 9 46.5 m 处横担与地支交界处横杆拉应力时程曲线

Fig. 9 Tensile stress time-history line of the critical member

3 结论

(1) 绝缘子断裂对断后仍与导线相连的塔体的冲击作用不可忽视。如文中塔 1,3,响应的最大增幅达 32%;对断后与导线脱开的塔(如塔 2),响应减小。

(2) 边缘绝缘子断裂(文中 D 点)比中间点(C 点)绝缘子断裂对塔体的响应更大,主要原因是边缘断裂的冲击作用使塔体产生扭转效应。

(3) 从计算结果来看,绝缘子断裂使塔体响应增量的最大值达 32%,动力响应与完善结构的比值高达 2.15。因此,对本结构而言,为避免动力风荷载下输电塔绝缘子断裂对塔体产生不利影响,设计时应应对风荷载放大 1.37 倍。

参考文献:

[1] 程极盛. 超高压线路用复合绝缘子芯棒脆断原因及防范措施[J]. 电力设备, 2007, 8(7): 66.

- CHENG Jisheng. Reasons and countermeasures of brittle fracture for composite insulator core rod on EHV transmission Line[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(7): 66.
- [2] 卢明, 马晓久, 阎东, 等. 复合绝缘子芯棒脆断原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2007(4): 1.
LU Ming, MA Xiaojie, YAN Dong, et al. Analysis on causes of brittle fracture of composite insulator cores[J]. Insulators and Surge Arrester, 2007(4): 1.
- [3] 刘贞瑶, 梁家鹏. 江苏电网 2006 年复合绝缘子运行及故障情况分析[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(3): 50.
LIU Zhenyao, LIANG Jiapeng. Analysis of composite insulator operation and fault situation in 2006 for Jiangsu power grid. Jiangsu[J]. Electrical Engineering, 2007, 26(3): 50.
- [4] Siddiqui F M A. Dynamic analysis and behavior of electric transmission line systems subjected to broken wires [D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh. Architecture, 1981.
- [5] McClure G, Tinawi R. Mathematical modeling of the transient response of electric transmission lines due to conductor breakage[J]. Computers and Structures, 1987, 26: 41.
- [6] McClure G, Lapointe M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines [J]. Computers and Structures, 2003, 81: 825.
- [7] 西南电力设计院. DL/T 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
South West Electric Power Design Institute. DL/T 5154—2002 Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [8] 何运祥. 大跨越输电塔的抗震及绝缘子断裂分析[D]. 杭州: 浙江大学土木工程学院, 2006.
He Yunxiang. Study of seismic behaviour and insulator ruptures on transmission tower [D]. Hangzhou: Zhejiang University. Civil Engineering, 2006.
- [9] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣, 等. 悬索结构设计[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
SHEN Shizhao, XU Chongbao, ZHAO Chen, et al. Design of cable structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [10] 刘锡良, 周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81.
LIU Xiliang, ZHOU Ying. Numerical simulation methods of wind load [J]. Industrial Construction, 2005, 35(5): 81.
- [11] 王肇民, 马人乐, 何敏娟, 等. 塔式结构[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
WANG Zhaomin, MA Renle, HE Minjuan, et al. Tower structure [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] 郭勇, 孙炳楠, 叶尹. 大跨越输电塔线体系风振响应的时域分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 13.
GUO Yong, SUN Bingnan, YE Yin. Time-domain analysis on wind-induced dynamic response of long span power transmission line systems [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 13.