

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.176

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 输电塔-线体系断线冲击分析

张思祥<sup>1</sup>, 马芳<sup>1</sup>, 陈鹏<sup>1</sup>, 刘凯铭<sup>2</sup>, 田利<sup>2</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 济南 250013; 2. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

**摘要:**输电线路工程是重要的能源传输工程,但由于输电线路大多架设于乡间野外,长年累月受到环境荷载的作用,极有可能发生导线断裂事故。为了探究断线对输电塔-线体系的冲击作用,运用 ABAQUS 有限元软件建立“四塔三线”模型,模拟不同输电线路断线工况下的动态过程,开展了断线后输电塔的受力分析。基于定义的冲击系数,分析了断线前后输电塔主材杆件的受力变化情况,明确了输电塔受冲击最严重的位置。通过模拟结果与规范的对比,指出了现有规范的不足。结果表明:断线对输电塔产生的破坏主要为弯曲破坏和扭转破坏,且弯曲破坏更为严重。单根导线断裂时,上部导线断裂所造成的冲击最严重,受冲击最大的部位为断裂导线所连横担与其下方相邻横担之间的一段塔身。随着断线根数增多,扭转破坏所占比例有所增加,各横担之间的塔身为破坏最严重的部位。按规范取值并通过静力方法计算断线对输电塔的影响不能确保结构在断线动力冲击下的安全,有必要采用动力分析对输电塔进行验算。

**关键词:**输电塔-线体系;断线冲击;冲击系数;瞬态动力分析;有限元模拟

**中图分类号:** TU352 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0142-07

## Finite element analysis of the impact on the transmission tower caused by wire breakage

ZHANG Sixiang<sup>1</sup>, MA Fang<sup>1</sup>, CHEN Peng<sup>1</sup>, LIU Kaiming<sup>2</sup>, TIAN Li<sup>2</sup>

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute, Jinan 250013, P. R. China, 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China)

**Abstract:** The transmission tower-line systems play a vital role in power transmission. However, since most of the transmission tower-line systems are situated in rural areas subjected to various extreme weather conditions, transmission conductors are prone to be broken. In order to investigate the dynamic impact of conductor breakage on the transmission tower, a finite element model is established in ABAQUS, and the global state of the transmission tower is determined according to the base reaction. By calculating the impact coefficient of the main members in different parts of the tower under different working conditions, the changes of axial forces of the main members in different positions are shown, and the most severely impacted parts of the tower are identified. Finally, the simulation results are compared with the current norm, and the shortcomings of the criteria are pointed out. The results show that the main failure modes of

**收稿日期:** 2020-07-24

**基金项目:** 山东大学青年学者未来计划(2017WLJH33)

**作者简介:** 张思祥(1980-),男,高级工程师,主要从事高压输电线路的设计和研发, E-mail: zhangsixiang@sdepci.com。  
田利(通信作者),男,教授,博士生导师, E-mail: tianli@sdu.edu.cn。

**Received:** 2020-07-24

**Foundation item:** Future Plan for Young Scholars of Shandong University (No. 2017WLJH33)

**Author brief:** ZHANG Sixiang (1980-), senior engineer, main research interest: transmission tower-line system, E-mail: zhangsixiang@sdepci.com.  
TIAN Li (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: tianli@sdu.edu.cn.

transmission tower caused by wire breakage are bending failure and torsion failure, and the bending failure is more serious. When a single wire is broken, the impact caused by the rupture of the upper wire is the most serious, and the place suffering the greatest impact is the section between the crossarm connected with the broken wire and the adjacent crossarm. With the increase of the number of broken wires, the proportion of torsion failure increases, and the sections between two adjacent crossarms are damaged seriously. In addition, it is necessary to use dynamic methods to analyze structures, because using current codes and static methods to calculate the influence of wire rupture on structures cannot ensure that structures are still safe under the dynamic impact of wire rupture.

**Keywords:** transmission tower-line system; dynamic effect of rupture line; impact coefficient; transient dynamic analysis; finite element simulation

架空输电线路是能源传输系统的重要组成部分。但是,由于线路设备长期裸露在自然环境中,容易受到各种气象条件的侵袭、化学气体的腐蚀以及外力的破坏,出现故障的几率较高。在众多输电线路故障中,导(地)线断裂便是危害最为严重的事故之一。2004年在湖南省、2008年在江西省、2011年在贵州省和2019年在湖北省都因发生冰雪灾害而造成输电线路多处发生断线。除了冰雪天气使输电线路覆冰从而导致断线事故外,雷击和外力破坏也是引起断线事故发生的重要原因。此外,大风、振动以及压接管抽签等也有可能导致架空输电线路断线。导(地)线的断裂会在断裂瞬间对输电塔造成一定的冲击作用,在严重的情况下,还有可能导致沿线输电塔的连续倒塌,从而对工农业生产和人民生活产生十分严重的影响。因此,研究断线对铁塔的冲击作用,对保证输电线路安全和保障居民生活用电具有重大意义。

断线事故对输电塔造成的影响主要为纵向不平衡张力。为了探究断线不平衡张力的大小,Cambell等<sup>[1]</sup>通过推导输电塔-线体系断线时的静力方程得出了断线后的平衡位置和导线的残余应力;Mozer<sup>[2]</sup>以简化物理模型为基础,建立了断线荷载下峰值应力的半解析公式。除了理论分析外,一些学者针对断线工况设计了相关实验来进一步探究断线事故对输电塔的影响。默增禄等<sup>[3]</sup>以特高压直线塔为原型进行了导线断裂的实验研究,并根据实验结果指出断线冲击荷载的传递特点。刘春城等<sup>[4]</sup>建立了输电塔-线体系缩尺模型,通过实验得出了酒杯塔的最不利断线工况和破坏最严重的部位。随着有限元分析技术的发展,许多学者利用有限元软件建立连续多档输电线-绝缘子模型,来探究断线后断线张力的大小和输电线的动力响应。杨风利<sup>[5]</sup>研究了覆冰工况下分裂导线断线张力的大小。欧阳克俭

等<sup>[6]</sup>利用有限元软件 ANSYS 探究了断线冲击效应,并从时域和频域的角度分别分析了导线振动的动力特性。为了使模拟结果更加符合实际,一些学者建立了输电塔-线体系模型来进行断线分析。Vincent 等<sup>[7]</sup>使用 ADINA 软件建立了输电塔-线体系并进行断线模拟,通过将模拟结果与实验对比,证明了有限元模拟的可靠性。沈国辉等<sup>[8]</sup>在有限元软件 ABAQUS 中建立了塔-线体系模型并对导线断裂和断线后导线与地面的撞击进行模拟,阐述了断线后输电塔的破坏情况。曹丹京等<sup>[9]</sup>采用 SAP2000 建立了“三塔四线”模型并模拟了导线断裂事故,研究了不同工况下断线对输电塔的冲击作用并进行了安全度的评定。Li 等<sup>[10]</sup>探究了覆冰情况下导线断裂后输电塔的动力响应并进行了参数分析,指出档距、绝缘子长度和初始张力对断线冲击的影响。宋欣欣等<sup>[11]</sup>对转角塔在断线工况下的性能进行了分析。Carlos 等<sup>[12]</sup>针对拉线塔进行了断线模拟并分析了其在断线后的动力响应。Alminhana 等<sup>[13]</sup>对比了拉线塔和自立式输电塔断线后的状态,并指出拉线塔具有更好的抗断线性能。杨繁等<sup>[14]</sup>不仅探究了断线对输电塔的影响,还针对断线工况提出了合理的减振措施。除了上述确定性分析外,Kaminski 等<sup>[15]</sup>对导线断裂进行了不确定性分析,研究了建模方法不确定性对分析结果的影响。

综上所述,目前已经开展了一些断线破坏的研究,但对输电塔的断线动力响应分析时多以塔顶位移和个别杆件的轴力变化情况作为评价断线冲击的指标,并不能全面反映断线后输电塔的性能状态。为了对断线后输电塔的动力响应进行更加全面系统的分析,笔者采用 ABAQUS 有限元软件建立了“四塔三线”有限元模型并开展不同导线断裂动态模拟。通过输电塔基底反力合力和合力矩的变化状态,总结了输电塔在断线后的整体受力状况。总结了不同

导线断裂下输电塔冲击系数随主材所在位置的变化情况,以反映输电塔局部受力状况,并指出受断线影响最大的部位。最后,将模拟结果与规范进行对比,指出了现有规范的不足。

## 1 有限元模型与模拟

### 1.1 输电塔-线体系有限元模型的建立

基于实际工程,利用 ABAQUS 有限元软件建立输电塔线体系有限元模型。根据某地区双回 500 kV 输电线路工程建立“四塔三线”塔-线体系模型,研究“耐-直-直-耐”体系的耐张段。此段线路长 1 164 m,每档档距 388 m。

工程线路采用钢芯铝绞线,每相 4 分裂。线路架设 1 根铝包钢绞线作为地线。输电线参数如表 1 所示。绝缘子串选用瓷绝缘子单联 I 型上扛式悬垂串。每个绝缘子上有 31 个绝缘子片,共长 4 805 mm。该耐张段直线塔高 56.9 m,呼高 33 m,根开 11.595 m;耐张塔形高 51.5 m,呼高 21 m,根开 12.78 m。

表 1 输电线规格及性能指标

Table 1 Specifications and performance indexes of transmission lines

类型	型号	计算外径/mm	横截面面积/mm <sup>2</sup>	弹性模量/GPa
导线	JL/G1A-400/35	26.82	425.24	65.00
地线	JLB40-150	15.75	148.07	103.60
	计算质量/(kg·m <sup>-1</sup> )	计算拉力/N	最大使用张力/N	年平均运行张力/MPa
	1.349 0	98 487	39 395	57.90
	0.696 7	90 620	25 676	126.15

研究的输电塔所有杆件均为角钢,各杆件之间通过螺栓进行连接。在 ABAQUS 中,采用一阶剪切变形梁单元 B31 进行角钢杆件的模拟。钢材使用理想弹塑性模型进行模拟。绝缘子串由于一端与输电塔横担末端杆件铰接且另一端与导线铰接,可将其视为桁架单元,因而使用三维杆单元 T3D2 模拟。由于导(地)线不能受弯和受压,仅能承受拉力,所以,也采用三维杆单元 T3D2 模拟并将四分裂导线简化为单导线进行建模。同时,因其刚度较小,而跨度和挠度较大,具有非线性,所以,将每一根导(地)线分为 100 个单元,以保证计算精度。导(地)线的弧垂根据式(1)计算。建立的有限元模型如图 1 所示。

$$f_m = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0} \quad (1)$$

式中: $f_m$  为电线弧垂,m; $\sigma_0$  为电线各点的水平应力,MPa; $\gamma$  为电线比载,N/m·mm<sup>2</sup>; $l$  为档距,m。

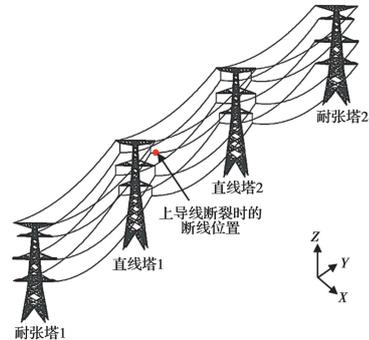


图 1 塔线体系模型图

Fig. 1 FE model of the transmission tower-line system

### 1.2 断线工况模拟

断线工况的模拟通过生死单元法实现。利用 ABAQUS 软件“接触”模块中的移除(REMOVE)单元命令来模拟导线断裂。由于断线在瞬间发生,所以,将移除指定单元的时间设为  $10^{-8}$  s。

研究过程中,首先对模型施加重力,重力施加完毕后维持 6 s,以获得正常工作状态下输电塔线体系的受力情况,然后再移除指定导线单元来模拟输电线的断裂,并对断线后 30 s 内塔线体系的动力响应进行时程分析。

## 2 输电线断线对输电塔的冲击分析

利用上述有限元模型和断线模拟方法,对输电线断裂后输电塔所受的冲击作用进行分析。为了准确地描述断线工况,将输电线进行编号,具体情况如图 2 所示。

### 2.1 单根导线断裂后输电塔的受力分析

葛绪章<sup>[16]</sup>的研究结果表明,单根导线断裂时,上导线断裂对输电塔最为不利,因此,首先以上导线(导线 1)断裂作为基本工况进行断线动力响应的研究。断裂位置靠近直线塔 1,具体位置如图 1 所示。为了准确地反映输电塔断线后的受力状况,现将基底平面上沿 3 个坐标轴方向上的支反力合力和其在基底中心绕 3 个坐标轴的合力矩变化情况列于表 2 中,其中,Y 轴正方向为顺塔线方向,X 轴正方向为垂直于塔线方向,Z 轴正方向为竖直方向。

从表 2 可以得出断线后输电塔的受力状况。从基底支反力合力可以看出,断线后沿 Y 轴方向的合

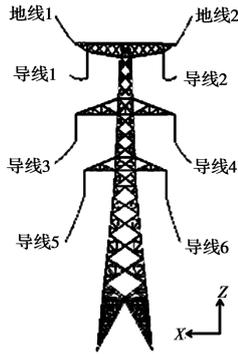


图 2 导(地)线位置示意图

Fig. 2 Positions and serial numbers of the transmission lines

力变化最为明显,所以,断线后的不平衡张力主要影响其顺导线方向的受力状态;断线对沿 Z 轴方向的合力影响较弱,主要是由所承受的导线重量减轻所致;而导线断裂对沿 X 轴方向合力基本不产生作用。

从合力矩的变化情况中可以看出,断线主要使输电塔绕 X 轴弯曲。输电塔绕 Z 轴的扭转与其弯曲破坏相比较小。绕 Y 轴的力矩变化最小,导致其变化的原因主要是,导线断裂后,两侧横担受力不再相等(断线一侧横担承受的导线重力较小)。对支反力的分析说明断线后输电塔在不平衡张力作用下发生弯曲和扭转,并且弯曲破坏比扭转破坏更为严重。

表 2 基底支反力变化情况

Table 2 Reaction at tower base

类型	基底支反力 合力/kN			基底支反力 合力矩/(kN·m)		
	X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴	Z 轴
初始状态	0	0	465.913	0	0	0
断线后峰值	8.774	103.532	435.281	-5.694	0.583	0.808
恢复平稳后状态	0	32.381	455.378	-1.812	0.085	0.290

为了进一步研究不同工况下单根输电线断裂对输电塔的影响,分别使地线 1、导线 1、导线 2、导线 3 断裂,得到各工况下输电塔的动力响应。由于断线造成的影响主要为纵向不平衡张力,且上述研究表明 Y 向支反力合力的变化最为显著,所以,将其设为评价输电塔整体受力状态的指标。此外,用塔顶顺导线方向最大位移和断裂导线所连横担末端顺导线方向最大位移作为衡量输电塔变形情况的指标来全面综合地反映断线后输电塔的反应状况,所得结果如表 3 所示。

通过对比得出,导线断裂对输电塔造成的冲击比地线断裂大得多,主要是由于地线的质量与导线相比太小。导线在不同位置断裂对基底支反力的影响不大,但对横担末端及塔顶位移的影响十分显著。通过横担末端及塔顶的位移可以看出,上部导线断裂对输电塔的冲击影响最大,下部导线断裂的冲击作用最小。

表 3 断线冲击效果

Table 3 Effect of cable rupture

工况	塔顶位 移/m	横担末端 位移/m	顺塔线方向支 反力合力/kN
地线断裂 (地线 1)	-0.029	-0.071	17.582
上部导线断裂 (导线 1)	-0.172	-0.355	103.532
中部导线断裂 (导线 3)	-0.088	-0.185	107.974
下部导线断裂 (导线 5)	-0.038	-0.065	108.751

2.2 多根导线断裂后输电塔的受力分析

葛绪章<sup>[6]</sup>曾对多根输电线断裂的最不利工况进行过研究,现将其成果列于表 4,并作为研究工况。根据上文对断线后输电塔受力状态的研究,接下来使用支反力在基底中心处绕 X 轴的合力矩来衡量塔身弯曲的程度;采用支反力在基底中心处绕 Z 轴的合力矩来衡量塔身扭转的程度,并用两者之比来反映断线后两种破坏模式的比例。与上文相同,依旧使用塔顶顺导线方向最大位移和横担末端顺导线方向最大位移来反映输电塔断线后的变形情况。将不同工况下的计算结果列于表 5 和表 6 中。

表 4 断线工况表

Table 4 Cases of cable rupture

工况	断裂的导线
断裂 1 根导线	导线 1
断裂 2 根导线	导线 1、导线 3
断裂 3 根导线	导线 1、导线 3、导线 5
断裂 4 根导(地)线	导线 1、导线 3、导线 5、地线 1

通过对比可以看出,随着断线根数的增多,塔体所受的冲击作用越来越强。各工况下,塔身所受的破坏均以弯曲破坏为主。随着断线根数的增加,扭转破坏的比重有所增加,尤其当断裂导线的根数由

1 根变为 2 根时,扭转破坏程度增加十分明显。当断裂导线根数为 2 根及 2 根以上时,基底中心绕 X 轴合力矩与绕 Z 轴合力矩之比稳定在 5:1 左右。

表 5 位移表

Table 5 Maximum displacements at tower top and ends of crossarms

工况	塔顶位	上部横担末	中部横担末	下部横担末
	移/m	端位移/m	端位移/m	端位移/m
断 1 根导线	-0.172	-0.355	-0.152	-0.062
断 2 根导线	-0.243	-0.508	-0.320	-0.121
断 3 根导线	-0.272	-0.565	-0.379	-0.180
断 4 根导(地)线	-0.303	-0.642	-0.407	-0.189

表 6 基底反力合力及合力矩

Table 6 Resultant force and moment at base

工况	顺导线方	基底中心绕	基底中心绕	基底中心绕
	向支反力	X 轴合力矩/	Z 轴合力矩/	X 轴合力矩与绕
	合力/kN	(kN·m)	(kN·m)	Z 轴合力矩之比
断 1 根导线	103.532	-5.694	0.808	0.14
断 2 根导线	198.523	-9.753	1.812	0.19
断 3 根导线	297.380	-12.945	2.678	0.21
断 4 根导(地)线	308.936	-13.663	2.817	0.21

### 3 冲击系数分析

为探究不同工况下塔身各部分杆件在输电线断裂后的受力变化情况,将单导线断裂和多根导线断裂后塔身不同位置的冲击系数分别绘于图 3 和图 4 中。其中,冲击系数的计算公式如式(2)所示。

$$\eta = \left| \frac{N_m - N_0}{N_0} \right| \quad (2)$$

式中:  $N_m$  为断线后杆件轴力的最大值(其中,压力为负,拉力为正);  $N_0$  为正常运行时杆件轴力(其中,压力为负,拉力为正)。

由图 3 可以看出,单根导线断裂时,断裂导线所连横担上方的塔身受到的冲击作用较小,下方塔身受到的冲击作用较大,这说明断线后断裂导线所连横担以上的塔身随横担转动,而其下方的塔身则因其运动产生阻碍作用而受到较大的冲击。受到冲击最大的杆件一般位于断裂导线所连横担与其下方相邻横担之间的一段塔身的底部。横担处的塔身主材与其相邻的两根主材相比所受冲击明显较小。在各工况中,地线断裂造成的冲击最小,上方导线断裂

造成的冲击最大,断裂导线距地面越近,对输电塔造成的冲击越小,该结论与上一节中由塔顶位移得出的结论一致。

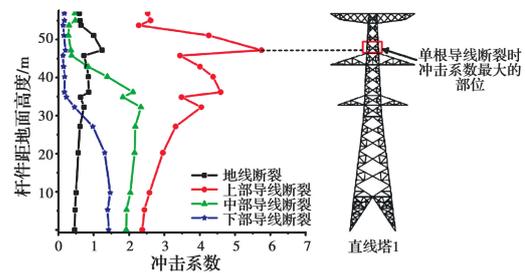


图 3 单根输电线断裂的冲击系数

Fig. 3 Impulse coefficients of main members under cable rupture

多根导线断裂后塔身不同位置主材的冲击系数如图 4 所示。可以看出,随着断裂导线根数增加,塔身受到的冲击越来越严重。同时,不同工况下塔身损伤最严重的部位也有所改变。当仅 1 根导线断裂时,上横担和中间横担之间的塔身所受冲击最为严重;当 2 根及以上导线断裂时,塔身的破坏情况比较相似,受到的冲击比较严重部位均为腰部以上的塔身。其中,中间横担和下横担之间的塔身所受冲击最严重。相邻两个横担之间的塔身下部主材比上部主材受到的破坏严重,因此,在设计时应加强对这些部位的保护。

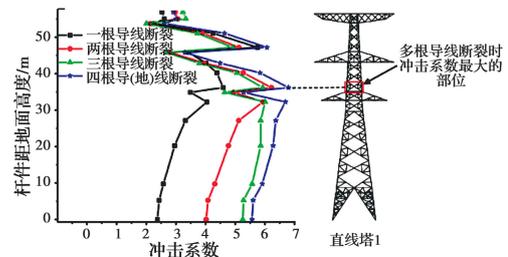


图 4 多根输电线断裂的冲击系数

Fig. 4 Impulse coefficients of main members under cable rupture

### 4 与规范对比分析

《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》<sup>[17]</sup> 给出绝缘子机械强度的安全系数  $K_1$  在断线情况下应不小于 1.8。其中,断线时的气象条件是无风、有冰、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且应按式(3)计算。

$$K_1 = \frac{T_R}{T} \quad (3)$$

式中:  $T_R$  为绝缘子的额定机械破坏负荷, kN;  $T$  为

绝缘子承受的断线荷载, kN。导线的断线张力是指架空线路断线后的残余张力。规范规定, 10 mm 及以下冰区单导线断线张力应取导线最大使用张力的 50%。计算时, 垂直冰荷载取 100% 设计覆冰荷载, 且各类杆塔在断线情况下的断线张力应按静态荷载计算。

在有限元模型中, 由于将四分裂导线简化为单导线, 所以, 将模拟结果与规范中对单导线断线张力的规定进行对比。实际工程的覆冰厚度为 10 mm, 通过增加导线密度模拟了覆冰荷载, 其断线后的结果如表 7 和表 8 所示。

表 7 覆冰断线情况下的断线张力

Table 7 Unbalanced tension of iced cables after conductor breakage

位置	断线后最大 张力/kN	断线 张力/kN	最大使用 张力/kN	断线张力与最大 使用张力比值/%
跨中导线单元	38.92	15.19	31.97	47.51
悬挂点导线单元	40.20	15.97	31.97	49.97

表 8 覆冰断线情况下绝缘子安全系数

Table 8 Safety coefficient of the insulator under cable rupture

断线后最大拉力/kN	断线荷载/kN	机械强度/kN	安全系数
181.74	66.71	120.00	1.80

由表 7 和表 8 可以看出, 模拟出的结果与规范的规定值十分接近。但是按规范进行取值并按静荷载计算断线对结构的影响只能保证断线情况下塔-线体系平稳后结构安全, 并不能确保结构在断线动力冲击下依然安全。断线后, 导线的最大张力超过了其最大使用张力, 绝缘子串的拉力也超过其机械强度。因此, 断线的冲击作用会导致绝缘子串断裂, 引起线路断电等事故。

由此可见, 按照现行规范进行设计不够安全。设计中需要进一步通过动态模拟进行分析和验算, 以确保塔-线体系可以承受断线带来的冲击作用。

## 5 结论

通过 ABAQUS 有限元软件建立了“四塔三线”塔线体系模型, 并对不同断线工况进行模拟。通过分析基底支反力合力和合力矩, 总结了断线后输电塔受力状态, 并结合塔顶位移和横担末端位移来反映输电塔断线后的变形情况, 评估了断线后输电塔的动力响应。同时, 通过引入冲击系数, 反映了断线后塔身主材的受力变化情况, 得到了塔身不同位置

处杆件的冲击系数, 总结了断线后塔身各部分所受的冲击。最后, 通过将模拟结果与规范对比, 指出现有规范的不足。结论如下:

1) 断线对输电塔产生的破坏主要为弯曲破坏和扭转破坏, 且顺塔线方向的弯曲破坏程度大于扭转破坏程度。

2) 上部导线断裂所造成的冲击最为严重。断裂导线距离地面越近, 对输电塔造成的冲击越小。单根导线断裂后, 所受冲击最大的部位为断裂导线所连横担与其下方相邻横担之间的一段塔身, 且该段塔身的底部主材受损最为严重。

3) 断线根数越多, 断线产生的冲击作用越大。虽然不同断线根数下弯曲破坏占主导地位, 但随着断线根数增多, 扭转破坏所占比例有所增加。多根导线发生断裂时, 各横担之间的塔身为破坏最严重的部位, 且各段塔身下部主材所受冲击最大。

4) 覆冰断线模拟结果与规范十分接近, 但按规范取值并通过静力方法计算断线对结构的影响并不能确保结构在断线动力冲击下依然安全。应开展动态模拟分析, 以保证结构的可靠度。

## 参考文献:

- [1] CAMPBELL D B. Unbalanced tension in transmission lines [J]. Journal of the Structural Division, Proceeding of American Society of Civil Engineering, 1970, 96(ST10): 2189-2207.
- [2] MOZER J D, POHLMAN J C, FLEMING J F. Longitudinal load analysis of transmission line systems [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1657-1665.
- [3] 默增禄, 张子富, 胡光亚.  $\pm 800\text{kV}$  直流特高压直线塔模型的导线断线试验分析[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 30-33.  
MO Z L, ZHANG Z F, HU G Y. Experimental research for broken conductor wire of  $\pm 800\text{ kV}$  DC EHV suspension tower model [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 30-33. (in Chinese)
- [4] 刘春城, 毛绪坤, 刘法栋, 等. 大跨越输电塔-线体系覆冰断线模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(24): 41-47.  
LIU C C, MAO X K, LIU F D, et al. Model test for icing line disconnection on a long-span transmission tower-line system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(24): 41-47. (in Chinese)

- [5] 杨风利. 重冰区导线断线响应及荷载取值分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 169-173, 186.  
YANG F L. Dynamic responses and tensions of broken conductors for suspension towers in heavy icing area [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 169-173, 186. (in Chinese)
- [6] 欧阳克俭, 胡波涛, 陈军君, 等. 特高压输电导线断线冲击效应研究[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 52-56.  
OUYANG K J, HU B T, CHEN J J, et al. Impact effect research of UHV transmission conductor break [J]. Electric Power, 2013, 46(7): 52-56. (in Chinese)
- [7] VINCENT P, HUET C, CHARBONNEAU M, et al. Testing and numerical simulation of overhead transmission lines dynamics under component failure conditions [C]//Proc. 40th General Session of CIGRÉ, 2004.
- [8] 沈国辉, 默增禄, 孙炳楠, 等. 突然断线对输电塔线体系的冲击作用研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 4-8, 198.  
SHEN G H, MO Z L, SUN B N, et al. Research of impact effect on transmission line system due to sudden breakage of conductor [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 4-8, 198. (in Chinese)
- [9] 曹丹京, 田利, 马瑞升. 输电线断线对高压输电塔—线体系的冲击作用分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(3): 365-369.  
CAO D J, TIAN L, MA R S. Analysis of impact effect of power transmission tower-line system subjected to broken wire of transmission line [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(3): 365-369. (in Chinese)
- [10] LI J X, LI H N, FU X. Stability and dynamic analyses of transmission tower-line systems subjected to conductor breaking [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2017, 17(6): 1771013.
- [11] 宋欣欣, 陈波, 杨登, 等. 转角输电塔线体系的断线效应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(3): 66-70.  
SONG X X, CHEN B, YANG D, et al. Research on wire-breaking effects of transmission angle tower-line systems [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(3): 66-70. (in Chinese)
- [12] CARLOS T B, KAMINSKI J JR. Dynamic response due to cable rupture in a transmission lines guyed towers [J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 116-121.
- [13] ALMINHANA F, ALBERMANI F, MASON M. Comparison of responses of guyed and freestanding transmission line towers under conductor breakage loading [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 15(8): 1540023.
- [14] 杨繁, 陈波, 欧阳怡勤, 等. 输电塔线体系冲击断线安全评估及减振控制研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(3): 126-131.  
YANG F, CHEN B, OUYANG Y Q, et al. Safety evaluation and vibration control of transmission tower-line system subjected to cable rupture [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(3): 126-131. (in Chinese)
- [15] KAMINSKI J JR, RIERA J D, DE MENEZES R C R, et al. Model uncertainty in the assessment of transmission line towers subjected to cable rupture [J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2935-2944.
- [16] 葛绪章. 基于断线作用的输电塔—线体系连续倒塌动力效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
GE X Z. Study on progressive collapse and dynamic effect of transmission tower-line system that based on the effect of ruptured lines' loads [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [17] 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2002 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154-2002 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)

(编辑 章润红)