

广东沿海输电线路台风倒塔事故的分析探讨

江巴彦, 潘春平, 庄志伟, 李敏生

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 以“彩虹”台风线路倒塔事故为背景, 探讨输电线路事故复核标准及计算方法, 对发生受损的220 kV输电线路进行台风风速工况下的铁塔受力计算, 分析导致架空输电线路在台风吹袭时发生倒塔事故的要因, 给出相关结论及建议。

关键词: 输电线路; 台风受损; 复核标准及方法; 倒塔分析

中图分类号: TM755

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)S1-0082-06

Analysis of Collapse Accident of Transmission Line Tower Causing by Typhoon Attacking in the Coastal District of Guangdong Province

JIANG Siyan, PAN Chunping, ZHUANG Zhiwei, LI Minsheng

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: This paper is based on the background of towers collapsing accidents of overhead transmission lines during “CaiHong” typhoon. The criterion on design reviewing of existing towers is discussed, and the wind load acting on the damage towers of the 220 kV overhead transmission line from typhoon attacking is calculated, as well as the reason for the tower collapsing was analyzed. Finally, some conclusions and suggestions are proposed to enhance design standards and tower strength on the coastal zones where typhoons landing always recur.

Key words: overhead transmission line; typhoon damage; criterion and method for review; tower collapse analysis

2015年10月4日,“彩虹”台风在广东省湛江市坡头区沿海登陆,造成该地区架空输电线路发生大面积倒塔事故,其中220 kV线路倒塔45基,110 kV线路倒塔36基。本文以“彩虹”台风事故为例,对发生倒塔的部分220 kV线路杆塔进行受力分析计算,探讨倒塔事故原因及影响因素,给出相关结论及建议,研究成果有助于指导沿海强风区域的线路设计。

1 “彩虹”台风特征及风速评估

1.1 “彩虹”台风结构特征

“彩虹”台风于2015年10月4日14时10分前后在广东省湛江市坡头区沿海登陆,登陆时中心附

近最大风力达15级(50 m/s),如图1所示。中心最低气压为940 hPa,导致湛江市出现超17级阵风(67.2 m/s),创历史纪录,是1949年以来10月份登陆我国陆地的最强台风。



图1 沿海附近10 m高10 min平均风速分布

Fig. 1 10 m height 10 min maximum average wind speed distribution in the coastal area

收稿日期: 2016-04-18

作者简介: 江巴彦(1982),男,广东韶关人,高级工程师,学士,主要从事高压架空输电线路工程设计的工作(e-mail)jiangsiyan@gedi.com.cn。

1.2 “彩虹”台风风速评估

本文收集了“彩虹”台风登陆区域附近气象站点及自观测点录得的台风吹袭期间完整的风速观测数据, 统计结果详见表 1。

从表 1 中的站点风速资料推断, “彩虹”台风吹袭期间, 湛江地区距海岸线 20 km 范围内 10 m 高 10 min 平均风速值约为 35 ~ 45 m/s。

表 1 标准状态下各站点 10 m 高 10 min 平均最大风速

Tab. 1 10 m height 10 min maximum average wind speed of the station in the standard status

站(点)名	风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
湛江(台站)	35.8
遂溪(台站)	32.8
吴川(台站)	28.6
雷州(台站)	22.2
廉江(台站)	28.0
麻章区湖光镇(观测点)	45.1
麻章区麻章镇(观测点)	39.6
电白县放鸡岛(观测点)	45.0
湛江东海岛(观测点)	39.9
湛江硇洲岛(观测点)	35.3

注: 风速为离地 10 m, 高 10 min 的平均最大风速。

2 受损 220 kV 线路复核标准及计算方法

2.1 受损 220 kV 线路复核的计算原则

在“彩虹”强台风吹袭期间, 湛江电网蒙受巨大损失, 各电压等级的线路设备均发生不同程度的事故或损毁, 包含有 6 条 220 kV 线路共计 45 基铁塔发生倒塔事故, 如表 2 所示。事故现场情况如图 2 所示。

表 2 受损线路运行名称及倒塔数量

Tab. 2 The name of the damaged transmission line and the number of the collapsed tower

线路	设计风速值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 10 m 高 10 min 平均风速	倒杆数量/个
220 kV 港榭甲乙线	32.8	11
220 kV 霞迈甲乙线	32.8	15
220 kV 湛尼线	32.8	2
220 kV 湛赤甲乙线	32.8	7
220 kV 湛霞甲乙线	32.8	8
220 kV 赤榭线	32.8	2

铁塔的受力计算是事故分析的重要依据。本文拟结合表 1 的风速样本, 对线路受损的铁塔进行复核计算, 根据铁塔受力分析的计算结果, 可以与气

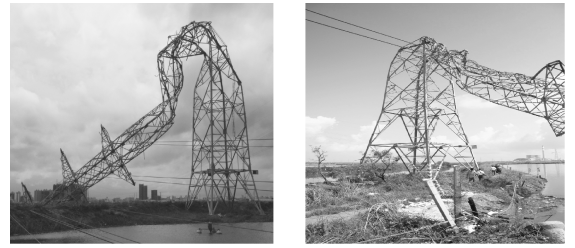


图 2 倒塔事故现场照片

Fig. 2 The photo for the tower collapse accident

象台站的实测风速资料进行对比验证, 客观地还原大风吹袭时的风力强度, 从而探求导致大规模风灾倒塔事故的实际原因。

本文将从以下两方面对线路的受损铁塔进行受力分析计算:

1) 根据最大设计风速及实际荷载条件, 校验受损铁塔的杆塔设计是否满足线路在设计年份时所应采用的国家和行业相关规程、标准的规定及审定的工程设计条件。

2) 根据台风吹袭期间的最大实测风速, 计算受损铁塔的过载情况, 还原当时的风力强度。

2.2 受损 220 kV 线路复核的标准

根据受损线路的相关工程信息, 确定了本次铁塔受力分析所执行的标准, 如表 3 所示。

表 3 受损线路铁塔复核计算执行的标准

Tab. 3 The criterion for review calculation of the damaged tower

线路名称	受损杆塔	初设时间	验算执行标准
220 kV 霞迈线	ZY2	1997.3	文献[5]
220 kV 港榭线	SZ631 SZ632	2004.10	文献[3]
	ZY2	1987.10	文献[1]
220 kV 湛霞线	GUT4	1991.7	文献[5]
	KGU		
	ZY2(#26)	1999.1	
220 kV 湛赤线	ZY2	1990.2	文献[5]
	GUT4 KGU ZK		
220 kV 湛尼线	Z3	1987.10	文献[1]
220 kV 赤榭线	Z8	2011.11	文献[5]

2.3 杆塔风荷载计算方法说明

在台风吹袭过程中, 对于输电线路杆塔的安全性而言, 起决定因素的是作用在铁塔上风荷载的大小。当风力强度大幅超出设计标准、铁塔承受过大的风荷载时, 塔身各种材料的利用率将超出限制值, 发生屈服破坏, 导致倒塔事故。

铁塔承受的风荷载由三部分组成,分别为电线风荷载、绝缘子串风荷载及杆塔风荷载。一般而言,220 kV 及以下线路的金具串构造简单,迎风面积较小,当档距较大时,在整个铁塔的风荷载中,其所占比重较小,为此本文对其不作展开讨论。

1)根据相关文献[2]规定,导地线风荷载可按以下公式进行计算:

$$W_x = \alpha \cdot W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_{sc} \cdot \beta_c \cdot d \cdot L_p \cdot \sin^2 \theta \quad (1)$$

$$W_0 = V^2 / 1\ 600 \quad (2)$$

式中: W_x 为垂直于导线及地线方向的水平风荷载标准值, kN; α 为风压不均匀系数,应根据设计基准风速确定; β_c 为 500 kV 线路导线及地线风荷载调整系数,仅用于计算作用于杆塔上的导线及地线风荷载(不含导线及地线张力弧垂计算和风偏角计算),其他电压级的线路 β_c 取 1.0; μ_z 为风压高度变化系数,按现行国家规范《建筑结构荷载规范》的规定确定,当基准高度不是 10 m 时,应作相应换算; μ_{sc} 为导线或地线的体型系数,线径小于 17 mm 或覆冰时(不论线径大小)应取 $\mu_{sc} = 1.2$; 线径大于或等于 17 mm 时, μ_{sc} 取 1.1; d 为导线或地线的外径或覆冰时的计算外径; 分裂导线取所有子导线外径的总和, m; L_p 为杆塔的水平档距, m; θ 为风向与导线或地线方向之间的夹角,度; W_0 为基准风压标准值, kN/m²; V 为基准高度的风速值, m/s。

2)根据文献^[3-5]规定,杆塔垂直风向时的风荷载可按以下公式进行计算:

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot \beta_z \cdot A_s \quad (3)$$

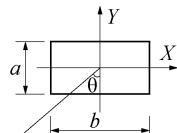
$$W_0 = V^2 / 1\ 600 \quad (4)$$

式中: W_s 为杆塔风荷载标准值, kN; μ_s 为构件的体型系数,按现行国家规范文献[4]确定; A_s 为构件承受风压面积计算值, m²; β_z 为杆塔风荷载调整系数。文献[1]规定,对杆塔本身,当杆塔全高不超过 60 m 时,取 1.0,当杆塔全高超过 60 m 时,取 1.5; 文献[3]和文献[5]规定,当杆塔全高不超过 60 m 时,应该按照相关的要求对全高采用一个系数; 当杆塔全高超过 60 m 时,应按现行文献[4]的规定,采用由下到上逐段增大的数值,但其加权平均值不应小于 1.6; μ_z 为风压高度变化系数,按现行国家规范《建筑结构荷载规范》的规定确定,当基准高度不是 10 m 时,应作相应换算; W_0 为基准风压标准值, kN/m²; V 为基准高度的风速值, m/s。

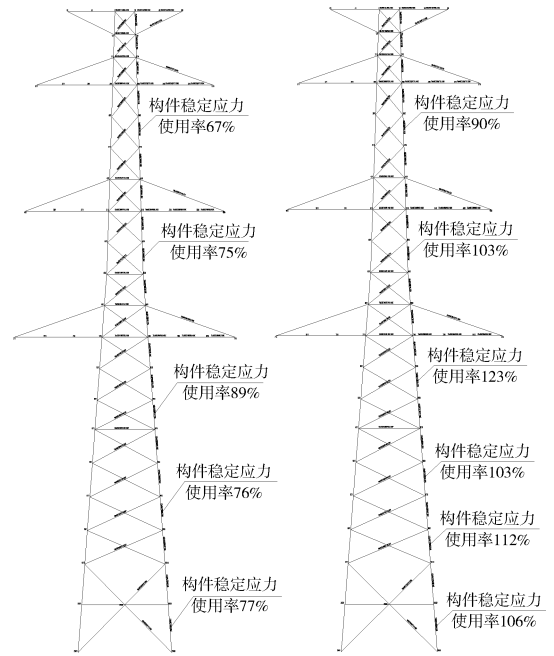
当风向发生改变时,由于塔上各杆件的轴向方向与风向之间的夹角无一定规律,因此难以精确计算其风荷载。根据文献[3]和文献[5],可按照表 4 的规定计算杆塔各方向的风荷载分量。

表 4 斜向风时塔身风荷载计算

Tab. 4 The calculation of the wind power load on the tower under the diagonal wind

风向与线路方向夹角 θ / (°)	塔身风荷载		备注
	X	Y	
0	0	W_b	
45	$K \times 0.424 \times (W_a + W_b)$	$K \times 0.424 \times (W_a + W_b)$	
60	$K \times (0.747 W_a K \times 0.431 W_a \times + 0.249 W_b)$	$K \times (0.431 W_a \times + 0.144 W_b)$	
90	W_a	0	

注: (1) W_a 、 W_b 分别为垂直于 a 、 b 面的塔身风荷载; (2) K 为塔身风荷载截面形状系数,对单角钢或圆断面杆件组成的塔架取 1.0,对组合角钢断面取 1.1。



(a) ZY2正常大风利用率 (b) ZY2台风工况利用率

图 4 线路与气象台站、风速图相对位置分布关系
Fig. 4 The relational position among the transmission line, weather station and the wind speed distribution

根据上述的导地线及杆塔风荷载计算公式可知,当导地线及铁塔分别架设、组立完毕后,除风速及夹角外,其他决定风荷载大小的参数均为常量。杆塔承受的风荷载仅随基准风速 V 及风向与线路之间的夹角 θ 的改变而发生变化。意味着在台风

期间, 每基铁塔承受的风荷载会随着其所处位置的风力强度、矢量方向的不同而存在着差异。

3 铁塔受损分析

3.1 事故段台风风速取值

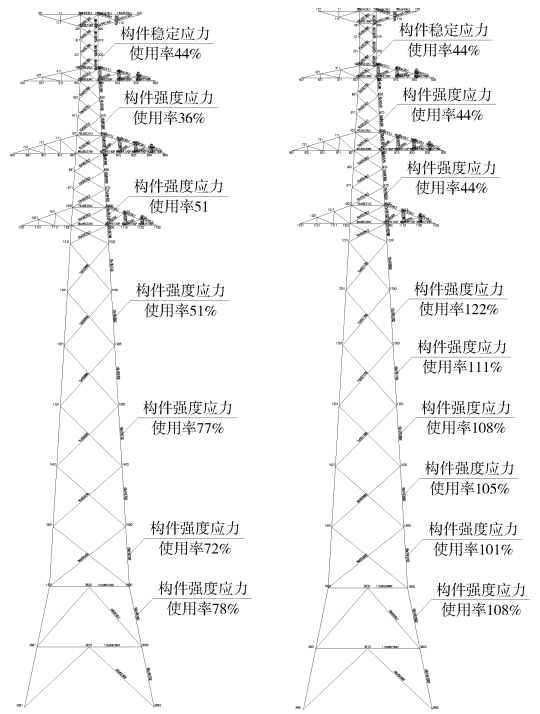
本次受损线路中, 220 kV 湛霞线、220 kV 湛赤线受损塔型较多, 为此本文拟对 220 kV 湛霞线、220 kV 湛赤线的部分受损塔型进行受力计算, 分析倒塔事故的原因。

事故段现场周边环境空旷, 地形平缓, 植被稀疏, 对台风风力减弱作用有限。线路事故段附近有气象部门的麻章镇自动气象站。根据表 1, 该站点测得的 10 m 高 10 min 平均最大风速为 39.6 m/s。可以推断线路事故段附近台风期间 10 m 高的实际风速应在 39 m/s 左右。

3.2 受损铁塔受力分析计算

3.2.1 铁塔受力计算

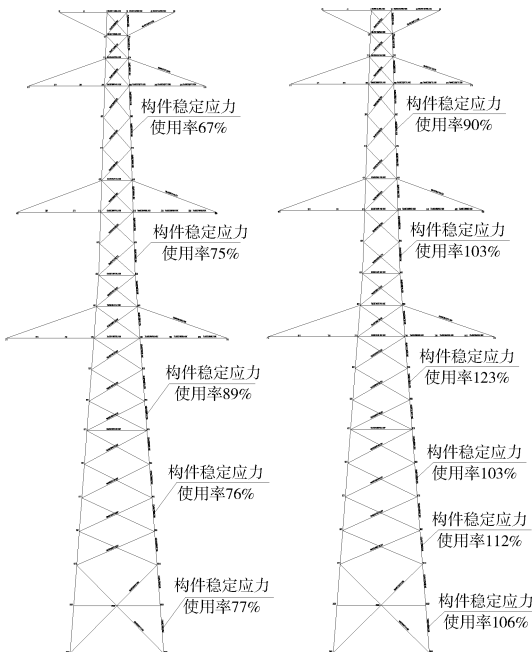
根据上文所述, 本文对 ZY2 塔型(220 kV 湛霞线#99 塔)、KGU 塔型(220 kV 湛霞线#塔)及 ZK 塔型(220 kV 湛赤线#7 塔)进行正常大风(基本风速 32.8 m/s)及台风(10 m 高最大风速 39 m/s)工况进行受力分析计算, 杆塔主材构件利用率如图 5 ~ 图 7 所示。



(a) KGU正常大风利用率 (b) KGU台风工况利用率

图 6 KGU 正常大风和台风工况利用率

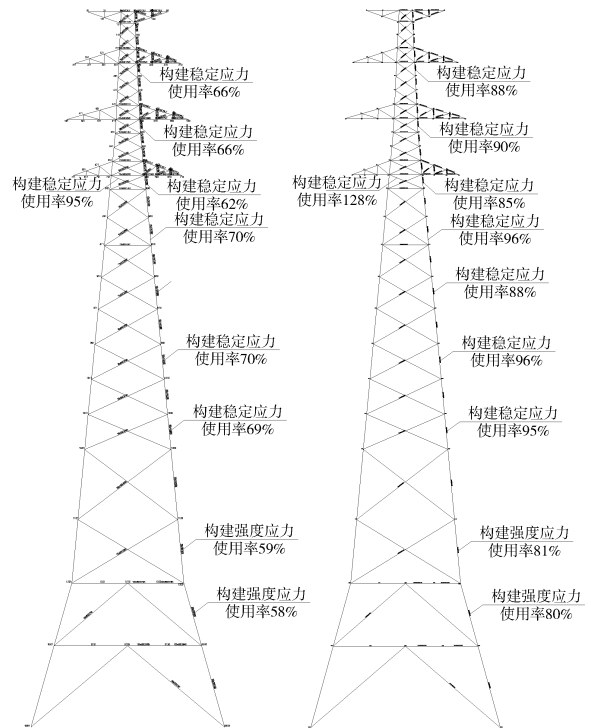
Fig. 7 The utilization of the component under design wind power and typhoon wind power for KGU



(a) ZY2正常大风利用率 (b) ZY2台风工况利用率

图 5 ZY2 正常大风和台风工况利用率

Fig. 5 The utilization of the component under design wind power and typhoon wind power for ZY2



(a) ZK正常大风利用率 (b) ZK台风工况利用率

图 7 ZK 正常大风和台风工况利用率

Fig. 7 The utilization of the component under design wind power and typhoon wind power for ZK

3.2.2 计算结果分析

根据上述计算结果, ZY2 塔型(220 kV 湛霞线#99)塔身下横担的第二段主材在台风验算工况中的强度利用率达到了 123%, 大幅超出了设计强度利用率限制, 主材出现整体性压弯失稳破坏; KGU 塔型(220 kV 湛霞线#6)塔身下横担的第二段主材在台风验算工况中的强度利用率达到了 122%, 大幅超出了设计强度利用率限制, 主材出现整体性压弯失稳破坏; ZK 塔型(220 kV 湛赤线#7)在台风验算工况中, 下横担下侧的交叉斜材超载 128%, 塔身主材未过载。推断在台风吹袭下部分斜材发生破坏, 杆塔结构受损后导致更多杆件超载, 发生失稳破坏。

强台风的 10 m 高最大平均风速为 39 m/s, 是线路事故段的基本风速 32.8 m/s 的 1.2 倍, 在此风速下杆塔所受荷载达到设计所能承受荷载的 1.44 倍。由倒塔分析计算结果可知, 由于现场风速远超设计风速, 风荷载大幅超出设计承载力, 最终导致铁塔倾倒。

4 事故段临近杆塔未受损原因分析

对于输电线路的某基杆塔而言, 其是否在大风吹袭期间发生损坏事故, 主要受塔位所在位置的风力强度、风力与线路的夹角、水平档距利用率等几个因素的影响。

4.1 风力强度影响

杆塔承受的风荷载与风力强度(风速值)成平方正比关系, 风力越强, 其承受的风荷载越大, 在大风吹袭中发生损坏的概率也相应变大。

由于输电线路沿线途经范围广, 使得每基塔位周边的地形、植被及建筑物存在较大差异, 从气象角度分析, 塔位周边不同的微地形、构筑物对风力的影响是不一致的。譬如山垭、水面、迎风坡对风力有明显的放大作用, 而低洼地、防风林木、高耸建筑物的背面对风力则存在屏蔽作用。

为此不同塔位的风力强度往往存在明显的差异, 即每基杆塔实际承受的风荷载并不一致, 这也意味着每基铁塔在大风吹袭中发生损坏的概率是不同的。

4.2 风力与线路夹角的影响

杆塔承受的风荷载与风力和线路的夹角有关, 当风力与线路平行时, 杆塔承受的风荷载最小, 当风力与线路夹角逐渐增大时, 杆塔承受的风荷载会

发生明显的变化。为了更加清晰地进行说明, 本文分别计算风力与线路夹角在 0° 、 45° 、 60° 、 90° 的台风风速下 ZY2(220 kV 湛霞甲乙线#99)的强度利用率如图 8 所示。

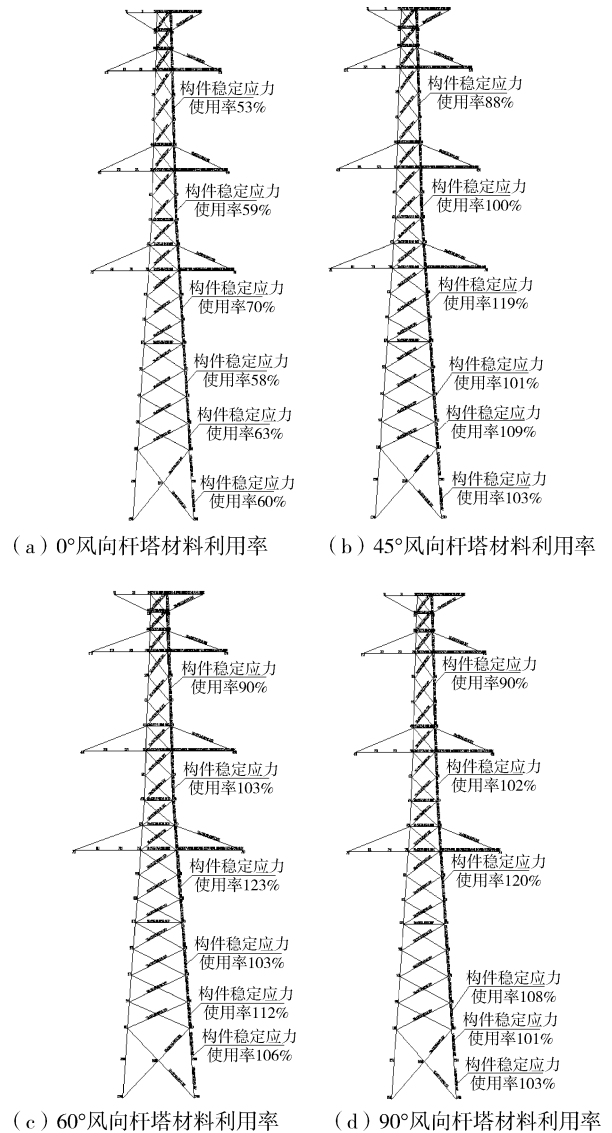


图 8 不同角度风向杆塔材料利用率

Fig. 8 The utilization of the component under the wind with different angles

由计算结果可知, 当夹角远低于 45° 时, 杆塔承受的风荷载较小, 杆塔构件利用率较低, 杆塔不损坏; 当夹角为 45° 及以上时, 杆塔承受的风荷载大幅增加, 杆塔构件利用率已经超过使用限制值, 将发生屈服破坏。

4.3 杆塔水平档距利用率的影响

杆塔的水平档距利用率越低, 意味着杆塔的安

全裕度越大, 大风过载能力越强, 发生倒塔事故的概率越低。同样以 ZY2(220 kV 湛霞线#99) 进行分析, 计算该塔在 70% 水平档距利用率、台风风速情况下的杆塔受力, 计算结果如图 9 所示。

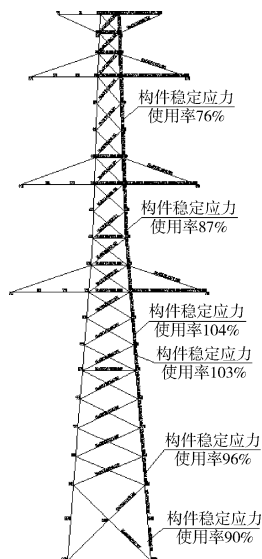


图 9 杆塔材料利用率

Fig. 9 The utilization of the component

根据计算结果, 当水平档距利用率较低时, 杆塔的安全裕度较大, 过载能力强, 在台风吹袭且最严重风力入射角时, 杆塔构件过载率不超过 105%, 可大幅减低杆塔发生损坏的概率。

5 结论

本文以“彩虹”台风线路倒塔事故为背景, 探讨了输电线路事故复核标准及计算方法, 对发生受损的 220 kV 输电线路进行台风风速工况下的铁塔受力计算, 分析导致架空输电线路在台风吹袭时发生倒塔事故的要因, 给出相关结论如下:

1) “彩虹”台风登陆时中心附近最大风力有 15 级, 其强劲的风力强度是导致湛江地区多条输电线路发生损毁、倒塔事故的主要原因。

2) 风灾中受损线路设计气象条件重现期为 15 年, 最大设计风速为 32.8 m/s(10 m 高), 执行的

设计标准相对较低, 导致抗风能力偏弱, 从而在大风吹袭下发生倒塔事故。

3) 早期输电线路在设计时, 受当时国家的经济实力的限制, 为了节省工程投资, 线路杆塔材料利用率较高, 过载能力相对较低。

4) 输电线路所经范围广、跨度大, 不同的线路走向造成在台风期间每档线路的风力入射角不同, 同时每基杆塔的使用条件及档内地形地貌也有差异, 即使同一种塔型在台风影响区域内其实际承受的荷载也会因塔位的不同而存在较大差别。这是采用相同设计标准的线路在台风中出现部分铁塔倒塌、部分未受损的原因。

根据研究成果, 对输电线路的设计建议如下:

1) 由于受损线路设计标准偏低, 为降低倒塔事故发生概率, 避免大面积停电, 建议采用差异化设计, 根据系统论证, 选择部分重要线路按新设计标准进行重建, 以提高其抵御自然灾害的能力。

2) 沿海地区新建及改造线路应充分运用《南方电网输电线路防风综合措施研究》成果, 认真执行南网《输电线路防风设计技术规范》(试行)及《沿海地区设计基本风速分布图(2014 版)》, 从根本上提升输电线路的抗风能力。

参考文献:

- [1] 水利电力部. 架空线路设计技术规程: SDJ3—79 [S]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程: DL/T 5092—1999 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 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.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: SDGJ94—90 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1990.

(责任编辑 黄肇和)