

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.015

海岛大跨越输电塔线体系风振响应及风振系数

朱云祥¹, 张若愚², 曹枚根², 屠 锋¹, 王 瑜¹, 郑 翀¹

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007; 2. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144)

摘要:以2020年“黑格比”台风中倒塔的海岛大跨越塔线体系为研究对象,分析了“黑格比”台风对洞头海岛电网的影响,采用Ansys建立了裸塔及塔线体系的有限元模型,分析了裸塔和塔线体系的动力特性。其次,结合现有规范开展了输电塔线体系风荷载静力加载及脉动风速时程拟合方法研究,分别开展了0°、90°等风向角下静力分析和动力时程分析,得到了裸塔、塔线体系中输电塔位移、主材应力静载响应和风振响应,不仅对比分析了裸塔、塔线体系输电塔的风荷载静载效应与考虑脉动风的风振响应,还对比了不同风向角对输电塔风载效应的影响。此外,还采用频域分析方法开展了输电塔风载效应的功率谱分析,进一步揭示了脉动风的荷载效应及导地线的耦合效应。最后,基于输电塔位移响应开展了裸塔、塔线体系输电塔的位移风振系数分析。研究及其相关结论对今后开展输电塔抗风设计、加固具有重要的参考价值。

关键词: 台风; 输电塔; 塔线耦合; 动力特性; 风振响应; 位移风振系数

Wind Induced Vibration Response and Coefficient of Large Crossing Transmission Tower Line System Between Islands

ZHU Yunxiang¹, ZHANG Ruoyu², CAO Meigen², TU Feng¹, WANG Yu¹, ZHENG Chong¹

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China; 2. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: With the collapsed large crossing tower line system of the island in typhoon “Hagupi” in 2020 as the research object, the influence of typhoon “Hagupi” on Dongtou island power grid is analyzed. The finite element model of free-standing tower and tower line system is set up by Ansys and the dynamic characteristics of them are analyzed firstly. Then, the static load and fluctuating wind speed time history fitting method of transmission tower line system are studied in combination with the existing specifications. The static analysis and dynamic time history analysis at wind direction angles of 0° and 90° are carried out respectively. The static load response of the displacement and main material stress as well as wind vibration response of transmission tower in free-standing tower and tower line system are obtained. Not only the static load of wind load and wind induced vibration response considering fluctuating wind of bare tower and tower line system are compared and analyzed, but also the influence of different wind direction angle on the wind load effect of transmission tower is compared. In addition, the frequency domain analysis method is adopted to perform power spectrum analysis of wind load effect of transmission tower, which further reveals the load effect of fluctuating wind and the coupling effect of grounding wire. Finally, the wind-induced vibration coefficient of displacement of free-standing tower and tower line system is analyzed on the basis of displacement response of transmission tower. The research and related conclusions have important reference value for the wind resistance design and reinforcement of transmission tower in the future.

Key words: typhoon; transmission tower; tower-line coupling; dynamic characteristics; wind-induced response; wind-induced coefficient of displacement

收稿日期:2021-09-08; 修回日期:2021-11-09

基金项目:国家电网有限公司总部指南科技项目(5200-201919121A-0-0-00)。

Project Supported by State Grid Science & Technology Project(5200-201919121A-0-0-00).

0 引言

众所周知,台风、强台风是对人类影响最为严重的自然灾害之一。中国东南沿海地区位于太平洋西岸,每年平均要遭遇不同强度的台风不少于10次,台风荷载所及之处,导致严重的结构倒塌、损毁等直接灾害及暴雨、洪水等次生灾害^[1-5]。架空输、配电线路是一类对风荷载异常敏感的生命线工程设施,尤其是台风、强台风作用下,输电线路、配电线路极易出现倒塔、掉(断)线、风偏跳闸等严重灾害^[6-12]。比如,2004年,强台风“云娜”重创浙江台州、温州电网^[13-17],造成大面积停电,在台风影响期间,220、110 kV及35 kV变电站全站失电分别有9座、45座和137座,其中一个重要原因就是有5条220 kV输电线路倒塔13基,7条110 kV输电线路倒杆8处;2006年,超强台风“桑美”严重破坏了温州南部电网^[18],其中220 kV线路倒塔3基、110 kV线路共倒塔(杆)98基、35 kV线路倒、斜杆106基,35 kV及以上线路损坏260 km。2014年,强台风“威马逊”严重冲击广西电网^[19],导致500 kV线路跳闸2条次,220 kV线路跳闸46条次,110 kV线路跳闸41条次,10 kV线路跳闸1 240条次,累计停电户数190.7万户,损失负荷149.3万kW,累计损失电量7758万kW·h。

针对台风、强台风作用下输电线路杆塔倒塔及损毁的原因,普遍认为是因为台风的风速远远超过了设计值。0414号强台风“云娜”是50年一遇罕见的特大台风,风力达到17级,海岛极值风速达58.7 m/s,陆地极值风速47 m/s,远远超过浙江第I气象区35 m/s和第II气象区30 m/s的设计风速。0608号超强台风“桑美”极值风速达68.0 m/s,经统计得到10 min平均最大风速42.1 m/s,已远超110~220 kV线路设计风速35 m/s,因此台风“桑美”所经之处,线路杆塔大多难以幸免地倒塔。基于这方面的认识,输电线路抗台的设计原则是采取提高设计风速,认为只要提高设计风速就可以解决输电线路抗台的问题。实际上,输电塔在台风作用下的倒塔、损毁原因除了设计风速取值较小的原因之外,还有杆塔所在位置的微地形、微气象,台风荷载特性(紊流特性、阵风效应等),输电线路塔线体系(塔线耦合效应、不等高差及前后档距不平衡作用)及杆塔杆件损伤、螺栓松动、杆塔设计等多个方面的可能因素^[20-21]。

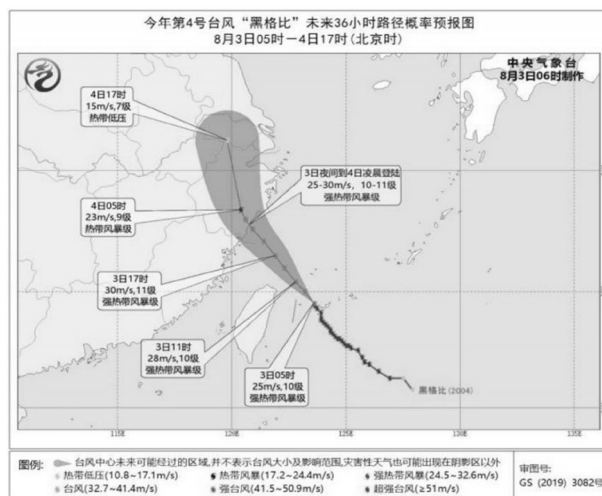
文中以温州洞头35 kV象门垵3631线58号—61号跨海段线路为研究对象,通过建立该耐张段的塔线耦合体系和动力特性分析,研究风荷载模拟及加载方法,对比研究塔线体系和裸塔在风荷载作用下输电塔的风振响应特点,通过铁塔位移响应和主材应力响应两个方面来认识强风作用下输电塔

响应机理。相关研究对评估输电塔的抗风能力,指导杆塔抗风设计及加固等具有很好地参考作用。

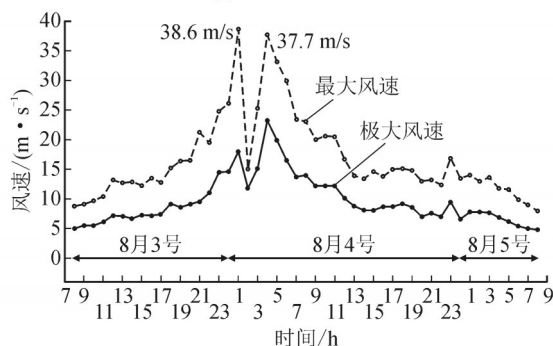
1 “黑格比”台风对洞头海岛电网的影响

2020年8月4日凌晨3时30分前后,“黑格比”以近巅峰强度在浙江省乐清市沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为13级(瞬时极大风速为38 m/s),中心最低气压为970百帕。受到浙江山地地形影响,“黑格比”的形态迅速崩溃,强度逐渐减弱。8月4日9时,“黑格比”在浙江省境内由台风级减弱为强热带风暴级,中心附近最大风力有11级(瞬时极大风速为30米/秒),中心最低气压为980百帕。

“黑格比”台风路径及风速图见图1。台风“黑格比”登陆前正面袭击洞头所辖本岛和各海岛,虽然“黑格比”的登陆海岛时的瞬时极大风速仅为38.6 m/s,10 min平均最大风速才23 m/s,但台风依然重创洞头海岛电网严重损失。洞头供电公司35 kV共6条故障停电6条,其中大洞3572线、象门垵3631线4基铁塔倒塔,10 kV线路共41条故障停电30条,涉及774个台区,4.9万用户,全社会最高负荷由8月3日的8.3万千瓦下降至4日的1.7万千瓦,下降程度接近80%。



(a) 台风路径图



(b) 洞头气象站风速逐时信息

图1 “黑格比”台风路径及风速图

Fig. 1 The path and wind speed map of typhoon Hagupit

35 kV 大洞 3 572 线、象门垵 3 631 线是 2007 年投运的架空输电线路,山区设计风速 $v_{15}=35$ m/s,折算到现行规范的 10 m 设计风速约为 33 m/s,跨海段设计风速 $v_{15}=40$ m/s,折算到现行规范的 10 m 设计风速约为 37 m/s。为提升输电线路对台风的抗击能力,台风到来之前运行单位对输电线路进行了全线隐患消缺,补充了缺失螺栓及加固松动螺栓,但在台风作用下仍然出现了倒塔,3572 线、3631 线是洞头海岛电网的骨干输电线路,本次台风倒塔事故导致洞头大门镇、鹿西乡全区完全失电。

台风中倒塌的铁塔及主要设计参数见表 1。3572 线 17 号塔(220_{DZ2})是一基呼称高为 23.7 m 的直线塔,塔身断面为矩形,塔底根开为 4 000 mm×3 000 mm,前后档距相差较大,塔腿主材为 $\angle 80\times 7$ 。象门垵 3631 线倒了 3 基铁塔,分别是 53 号、54 号和 59 号塔,53 号塔(110_{ZS4})是一基呼称高为 24 m 的直线塔,塔身断面为正方形,塔底根开为 2 800 mm×2 800 mm,前后档距相差较大,塔腿主材为 $\angle 75\times 6$;54 号塔(3560_{JJ3})是一基呼称高为 18 m 的转角塔,塔身断面为正方形,塔底根开为 3 832 mm×3 832 mm,前后档距接近,塔腿主材为 $\angle 90\times 8$;59 号塔(330_{ZM3})是一基呼称高为 40 m 的直线跨越塔,塔身断面为矩形,塔底根开为 6 618 mm×4 283 mm,跨海段档距 1 137 m,塔腿主材为 $\angle 140\times 10$ 。

表 1 台风中倒塌的铁塔及主要设计参数
Table 1 Collapsed tower in wind and its main design parameters

线路名称	塔名—呼高/全高/m	铁塔类型	铁塔根开/mm	设计塔重/kg	前/后档距/m	导/地线型号
357 2 线	220DZ2-	直线塔	4 000/3 000	3.0	276/683	LGJXX-185/30 K
	110ZS4-	直线塔	2 800/2 800	2.0	85/248	$K=2.5$
	24.0/30.80	塔	800	744.4	248	
363 1 线	3560JJ3-	转角塔	3 832/3 832	2.0	248/214	JLB1A-35
	18.0/23.70	塔	832	786.6	214	-35
	330ZM3-	跨越塔	6 618/4 283	10.0	225/1 137	$K=3.5$
	40.0/46.95	塔	283	211.6	1 137	

温州洞头象门垵 3631 线倒塌的三基铁塔现场见图 2。从图 2 中可看出三基铁塔折弯位置均在塔腿上部的塔身位置,53 号 110_{ZS4} 塔、59 号 330_{ZM3} 塔都是在台风荷载作用下,横线路方向弯曲破坏,54 号 3560_{JJ3} 塔由于受到 53 号横向倒塌时导线的拉拽作用,在风荷载共同作用下发生串倒。

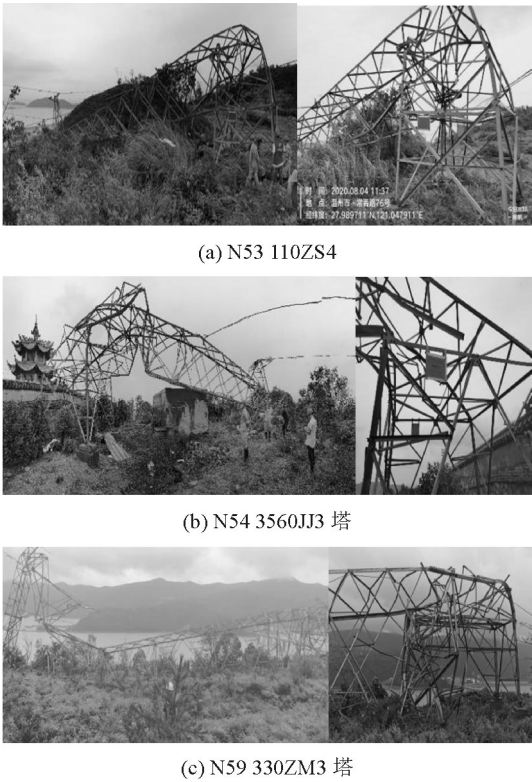


图 2 洞头象门垵 3631 线倒塔现场

Fig. 2 Site of tower collapse of 3631 transmission line of Dongtou

2 跨海段输电塔线体系动力特性

35 kV 象门垵 3631 线跨越小门港(洞头小门岛和大门岛之间,在小门大桥东侧)采用的是“耐一直一直耐”单回路塔架设跨越方案,跨越段全长 1 601.7 m,其中直线跨越段档距为 1 137.4 m,跨越段断面图见图 3。N58、N61 塔选用 3560 型终端直线塔,N59、N60 塔选用 330 型酒杯型跨越塔,呼称高 40.0 m,铁塔全高 46.95 m。跨越段导线型号为 LGJXX-185/30,单导线设计,安全系数 $K=2.5$,地线型号为铝包钢绞线,型号为 JLB1A-35,安全系数 $K=3.5$,双地线设计,N58、N61 耐张塔地线共用挂点。

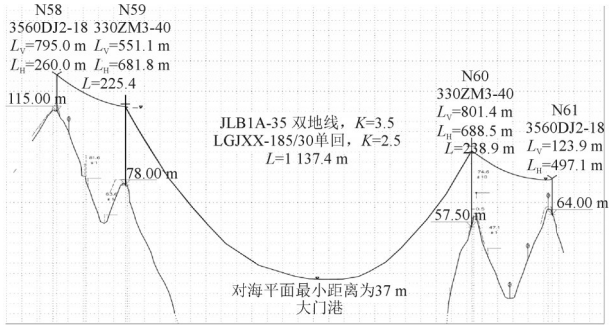


图 3 跨海段输电线路平断面图

Fig. 3 Plan and section of crossing sea transmission line
跨越塔 330ZM3-40 选用的是 1984 年原水利电

力部西北电力设计院设计的330 kV直线塔。原来的设计条件为正常运行工况最大风速为30 m/s,气温 -5° ,按照双分裂导线 $2\times\text{LGJQ300}$,双地线GJ-50设计,导、地线最大使用应力分别为100、340 N/mm²,在上述设计条件下设计使用档距 $L\leq 1\,000\text{ m}$,垂直档距 $L_v\leq 1\,200\text{ m}$,水平档距 $L_H\leq 600\text{ m}$ 。因小门岛跨越段选用的导地线截面规格小于330ZM3-40原设计使用条件,按照工程所在地风速 $v_{15}=40\text{ m/s}$ 复核选用。工程从2007年投运至今近15年,经历了多次强台风作用。本次“黑格比”台风虽然强度不大,但台风路径与铁塔距离不超过7 km,属于近距离正面袭击,导致59号跨越塔横线路向弯折屈曲破坏。

为进一步认识该跨越段塔线体系在台风作用下的响应特点和倒塌机理,文中建立了计算分析模型,模拟台风作用下输电塔线体系的风振效应。

2.1 计算模型的建立

采用大型有限元软件Ansys建立了N59、N60塔选用330型酒杯型跨越塔的有限元模型,其中塔高为46.95 m,呼称高为40 m,铁塔根开为6 680 mm $\times$ 4 283 mm。塔结构类型为角钢塔,是典型的空间杆系结构,采用Beam188三维梁单元模拟,梁单元方向与实际角钢布置方向一致。铁塔塔身主材为Q345钢,其余辅材等支撑杆件为Q235钢,考虑材料非线性,采用双线性模型,其中Q345钢屈服强度按照310 MPa计算。计算裸塔时考虑了导、点线的质量,为简化计算,导、地线简化为等效质量,将其添加到输电塔横担和顶部的导、地线挂点处。

导、地线刚度较小,且其两端挂点间距很大,几何非线性明显。在Ansys中可用三维杆单元Link10来模拟带预应力的悬索结构,导、地线参数见表2。

表2 导、地线参数一览表

Table 2 Parameters of conductor and ground wire

导地线参数	导线	地线
型号	LGJXX-185/30	JLB1A-35
截面积/mm ²	210.90	34.36
外径/mm	18.88	8.16
弹性模量/GPa	76	147
最大使用张力/kg	6 110	390
自重/(kg $\cdot$ km ⁻¹)	723.6	228.7

悬索结构在自重作用和张力作用下的初始状态呈斜抛物线状,可采用的理论解法主要有斜抛物线法和悬链线法。导、地线一般采用悬链线法,文中根据悬链线方程进行导地线找形建模,每隔1 m

划分一个单元,计算输电导线在自重和张力作用下的曲线位形。

塔线体系中的悬吊绝缘子的运动可视为刚性平动,可用二力杆单元Link8来模拟。在建模完毕后,在N58、N59两座塔导线挂点处施加固定约束,两端的导、地线视为铰接。跨海段大跨越输电塔线体系有的有限元模型见图4。

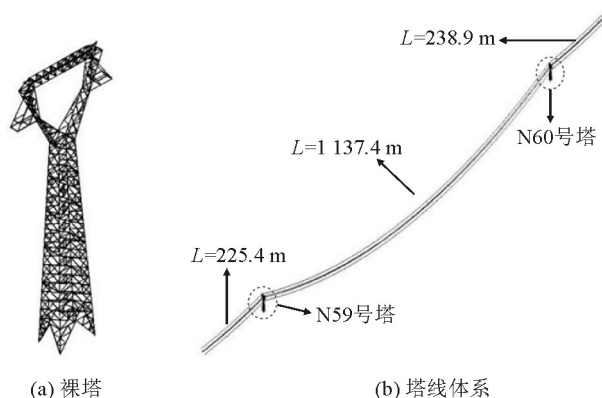


图4 跨海段塔线体系有限元模型

Fig. 4 Finite element model of tower line system in sea crossing section

2.2 动力特性分析

为了解输电塔动力特性及导线对输电塔动力特性的影响,用Ansys分别计算裸塔和塔线体系的动力特性,并分析了裸塔和塔线体系中N59塔的模式参数。

从前20阶模态可知,裸塔的主振型为顺线路方向振动、横线路方向振动和整体扭转。其中顺线路方向频率最小,第1阶频率为1.54 Hz,第2阶频率为6.37 Hz;横线路方向第1阶频率为2.12 Hz,第2阶频率为8.26 Hz;第1阶扭转频率为5.54 Hz。

由于悬挂的导、地线频率较小,塔线体系频率多为导地线的低频率,为了得到塔线体系中输电塔的振型,需要分析前数百阶模态。由于跨海段距离较大,文中分析了跨海段塔线体系的前500阶频率可知,导线第1阶平面内振动频率仅为0.067 Hz、平面外为0.079 Hz;地线第1阶平面内振动频率仅为0.113、平面外为0.129 Hz。由于塔线体系的耦合效应,整体291阶模态为输电塔顺线路方向及导、地线平面内振动,频率为1.78 Hz;整体434阶模态为输电塔横线路方向振动及导、地线平面外振动,频率为2.03 Hz,与裸塔自振频率有较大的区别,可见悬挂导地线对输电塔的动力特性有较大的影响。

塔线体系中N59输电塔的振型图见图5。由于导、地线与输电塔的耦合效应,塔线体系自振频率十分密集,集中在塔或导线各阶频率附近。其中塔

线体系与裸塔在顺线路方向的振型相差不大,且对动力响应贡献最大的第1阶振型基本一致^[22];而裸塔在横线路方向的振型受导、地线耦合效应影响明显,且第1阶、第2阶振型形状均在横担处发生突变。

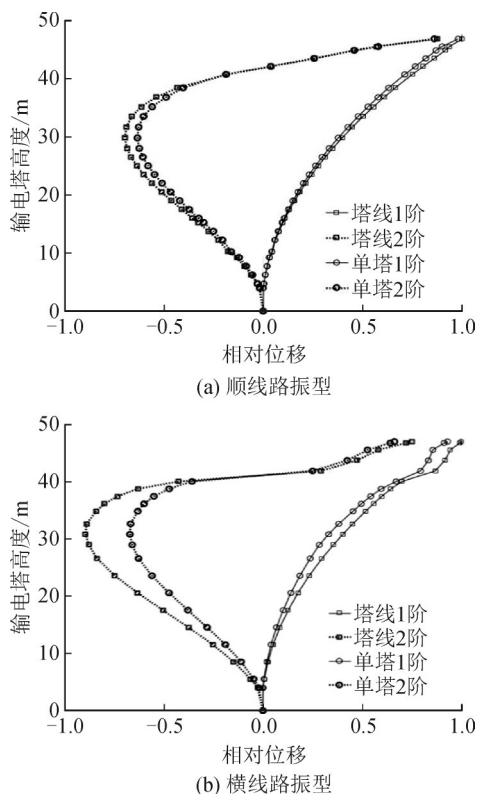


图5 N59塔振型图

Fig. 5 Vibration mode of N59 tower

3 风荷载模拟

在结构风工程中,无论是台风还是良态季风,一般可将自然风分解为平均风和脉动风2种成分^[23]。其中,平均风的自振周期大于10 min,远远高于一般建筑结构的自振周期,在模拟时可将它视为静载荷;而脉动风周期较短,且具有强随机性,一般将脉动风视为具有零均值的平稳高斯随机过程,考虑顺风向的脉动风速时程^[24-26]。此外,由于风速是随高度变化的,一般可将塔线体系离散化,并按照离散处的高度分别输入风荷载。

由于两输电塔的相对高程不同,在塔线体系中的两个塔的风荷载取值也不同风荷载模拟代表点示意图见图6。塔N60的高程比塔N59高16.4 m,则可将塔N59基础视为零高度,即 $h=0$ 。对于输电塔N59,选取高度 h 为10、16、22、28、33.5、40(呼称高)、47 m共7点作为代表点,生成高度所在处的风速时程,编号为1-7;对于塔N60,选取高度 h 为26.4、32.4、38.4、44.4、49.9、56.4(呼称高)、63.4 m共7点作为代表点,生成高度所在处的风速时程,编号为8-14。

导线和地线的挂点也不同,但是两者的相对高度较小,在文中,导、地线上风速时程代表点高度按两者高度之和的一半简化取值,即

$$h_c = \frac{h_{cc} + h_{cg}}{2} \quad (1)$$

式(1)中: h_{cc} 为导线挂点高度,中相导线也取两侧导线挂点高度; h_{cg} 为地线挂点高度。但是由于导线较长,无法忽略导线高度变化而导致风速时程的差异。为此,分别在左段、中段和右段导线上取2、9、2个点作为代表点,编号为 C_1 - C_{13} 。

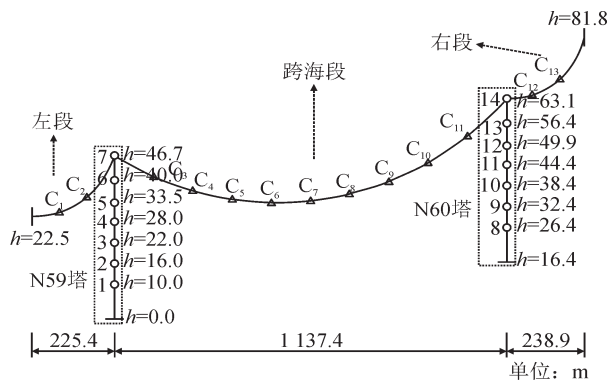


图6 风荷载模拟代表点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of representative points of wind load simulation

3.1 平均风模拟

文中以平均风速 v_{10} 为41 m/s进行分析。平均风速与高度之间的变化规律称为风剖面,风剖面可以用指数律模拟,即

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_{10}} = \left(\frac{h}{h_{10}} \right)^\alpha \quad (2)$$

式(2)中: $\bar{v}$ 、 h 为任代表点平均风速和高度; $\bar{v}_{10}$ 、 h_{10} 为10 m处基准平均风速; α 为地面粗糙度系数;A类地貌取为0.12。

3.2 脉动风模拟

脉动风是一个均值为零的高斯随机过程,A.G. Davenport根据世界上不同地点、不同高度测得到90多次的强风记录,并假定水平阵风谱中的湍流积分尺度 L 沿高度不变,取常数值1 200 m,并取脉动风速谱为不同离地高度实测值的平均值,建立了经验数学表达式Davenport谱,而中国《建筑结构荷载规范》中一般采用Davenport脉动风速谱,其表达式为:

$$S_v(n) = 4k\bar{v}_{10}^2 \frac{x^2}{n(1+x^2)^{4/3}} \quad (3)$$

$$x = \frac{1\,200\,n}{\bar{v}_{10}} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: $S_v(n)$ 为风速谱; n 为频率; k 为地面粗糙度的系数; $\bar{v}_{10}$ 为10 m处基准平均风速。

Davenport谱较其他谱偏大,而谱值偏大的频段

为风频率与结构物自振频率相近的范围。所以 Davenport 谱可能会放大结构的动力响应,但是在结构抗风的设计角度而言,却提高了结构的安全度。

当结构上一点 i 的脉动风压达到最大时,与 i 点距离为 r 的 j 点的脉动风压一般不会同时达到最大值,在一定的范围内,离开 i 点越远,脉动风压同时达到最大值的可能性越小,这种性质称为脉动风的空间相关性^[27-28]。空间不同两点风速的相关性可由互功率谱密度函数来描述。对于输电塔结构,一般考虑水平(x 、 y)和竖向(z)的相关, Davenport 提出了指数形式的经验公式:

$$r_{ij} = \text{Coh}(r, n) = R_{xyz}(x_i, x_j, y_i, y_j, z_i, z_j, n) = e^{-c} \quad (5)$$

$$c = \frac{-2n \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_y^2(y_i - y_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}}{\bar{v}(z) + \bar{v}(z')} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: C_x 、 C_y 、 C_z 分别是 x 、 y 、 z 3 个方向的空间衰减系数,建议取值为 $C_x=C_y=16$, $C_z=10$ 。采用 MATLAB 编程生成满足 Davenport 谱的随机风时程,风时程总时长为 100 s,时间间隔为 0.1 s。

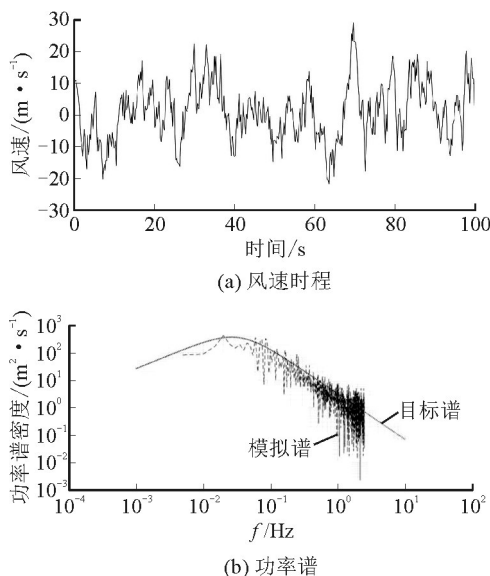


图7 脉动风速时程及功率谱

Fig. 7 Time history and power spectrum of speed of fluctuating wind

得到的风速值要换算成风压,再乘以结构的迎风面积得到风荷载,最后将风荷载等效到结构代表点高度处的模型上。参照相关规范要求^[29-30],输电塔和导、地线脉动瞬时风荷载按照式(7)、(8)计算,式(7)、(8)中风速 v 是根据 Davenport 谱拟合得到的风速时程,由于 Davenport 谱考虑了脉动风的空间相关性和地面粗糙度等因素的影响,因此式(7)、(8)中不需要再考虑风压不均匀系数、高度变化系数等,仅需将风速转化为风压后乘以风压面积和结构的体型系数,得到相应位置的风荷载。

$$F_t = \mu_s \cdot A_s \cdot v^2 / 1600 \quad (7)$$

$$F_c = \mu_{sc} \cdot d \cdot v^2 / 1600 \quad (8)$$

式(7)、(8)中: F_t 、 F_c 为输电塔风荷载和导、地线单位长度上的风荷载,其中导、地线 F_c 为导、地线单位长度上的荷载,文中导、地线按照 1 m 为单位长度划分单元,则可以直接作为实际荷载值计算; μ_s 为输电塔的体型系数,体型系数取值与风向、挡风系数等因素密切相关,参考相关规范^[29-31],为简化计算文中输电塔身和横担的体型系数偏于保守一律取 2.5; μ_{sc} 为导地线体型系数,根据导、地线的直径大小,文中导线取 1.1,地线为 1.2; A_s 为结构迎风面面积; d 为导、地线的直径; v 为风速时程各点的风速值。

4 风荷载作用下输电塔线体系风振响应

4.1 静力分析

为探究输电塔及塔线体系最不利风向角及静力响应特点,按照现行规范^[30-31]计算杆塔、导、地线及绝缘串的风荷载,分别按 0° 、 45° 、 60° 、 90° 4 种风向角进行荷载分配,开展了裸塔和塔线体系的静力分析,得到了风压作用下的静态位移和应力响应。需要说明的是,为了与后文的风振响应分析进行对比,静力分析时荷载输入没有考虑规范的风荷载调整系数(即风振系数)。

按照 $v_{10}=41$ m/s 风速分析得到的输电塔顶部静态位移和主材最大压应力见表 3,从表 3 中可知,风荷载作用下铁塔顶部的静态位移及主材应力响应随风向角的变化趋势基本一致,均随着风向角增大而增大。塔线体系响应较裸塔有所增大,但是增大幅度不明显,位移最大增幅为 14.3%,应力最大增幅为 6.44%,均为 90° 风向角下。

表3 静载作用下 N59 塔顶部位移和主材应力极值

Table 3 Maximum displacement and main material stress of N59 tower under static load

杆塔力学指标		0°	45°	60°	90°
输电塔最	裸塔	0.12	0.14	0.18	0.21
	大位移/m	0.14	0.16	0.21	0.24
主材应力	裸塔	55.63	78.33	89.71	95.34
	极值/MPa	59.45	82.56	93.45	101.80
塔线	裸塔				
	极值/MPa				

4.2 风振响应分析

为进一步分析脉动风对输电裸塔和塔线体系的塔顶位移及内力等的振动响应,文中分析了 0° 和 90° 风向角下输电塔的振动响应,输电塔、导地线及悬串等的风荷载采用平均风和脉动风叠加的方式加载,计算裸塔的风振效应时,将导地线及悬吊绝

缘子的风荷载作用在横担挂点上。

0°和90°风向角下裸塔和塔线体系输电塔的顶部位移响应分别见图8、9。在0°风向角下,塔线体系中N59塔顶位移均方根值为0.24 m,裸塔塔顶位移均方根值为0.09 m。由于塔线耦合效应,塔线体系塔顶风振位移响应较裸塔增大2.85倍;90°风向角下,塔线体系塔顶位移均方根值为0.47 m,裸塔塔顶位移均方根值为0.11 m。由于塔线耦合效应,90°风向角下塔线体系塔顶位移响应均方根值比裸塔增大4.63倍。

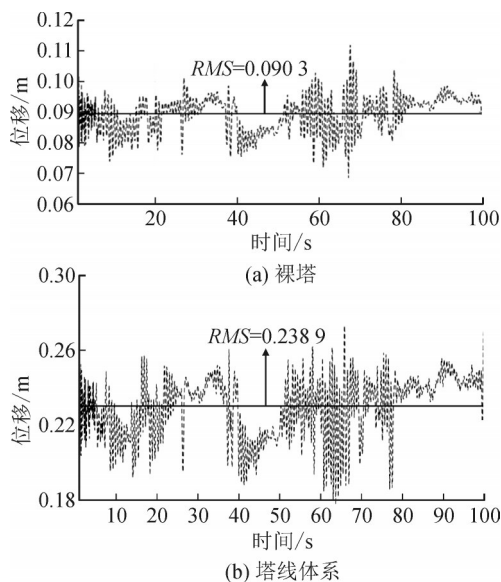


图8 0°风向角下N59塔顶部位移响应

Fig. 8 Top displacement response of N59 tower at 0° wind direction

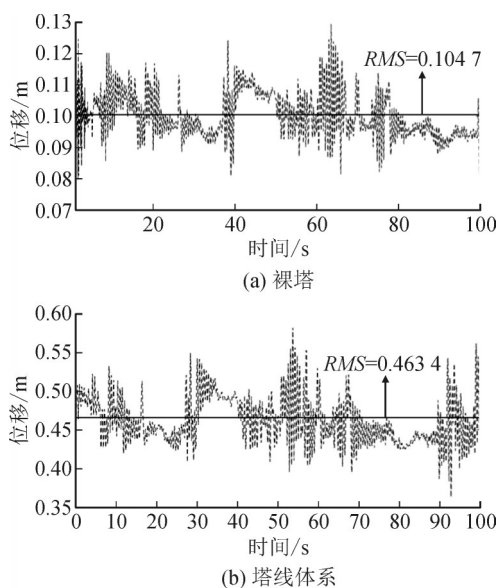


图9 90°风向角下N59塔顶部位移响应

Fig. 9 Top displacement response of N59 tower at 90° wind direction

除平均响应之外,脉动风的响应可以分为两部分,即背景响应和共振响应,文中主要关注低频处

响应和输电塔的结构共振响应。0°和90°风向角下裸塔和塔线体系输电塔的顶部位移响应的功率谱曲线见图10。杆塔的位移响应的低频成分贡献主要来自背景响应,而高频成分贡献主要来自共振响应。从图10中可以看出,无论是裸塔还是塔线体系的输电塔的位移响应在低频处有较高的能量分布。

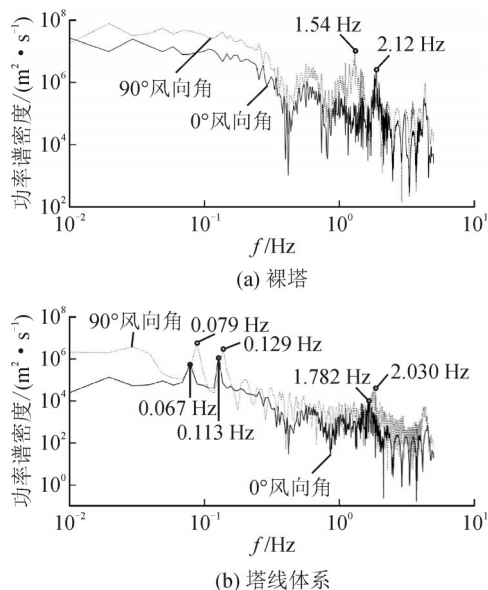


图10 N59塔顶部位移响应功率谱

Fig. 10 Power spectrum of the top displacement response of N59 tower

对于裸塔结构,0°风向角作用下,裸塔塔顶位移功率谱共振频率为1.54 Hz;90°风向角作用下,裸塔塔顶位移功率谱共振频率为2.12 Hz,分别对应裸塔顺线路方向和横线路方向的第1阶频率。对于塔线体系,0°风向角作用下,塔线体系中N59塔顶位移功率谱卓越频率在0.067和0.113附近,为导、地线顺线路的第1阶频率;90°风向角作用下,塔线体系中间塔塔顶位移功率谱卓越频率在0.079、0.129附近,为导、地线横线路的第1阶频率,且低频响应部分的能量被明显抬高。此外,从图10(b)也可以看到塔线体系中输电塔的顺线路和横线路方向第1阶频率分别为1.78 Hz和2.03 Hz。

裸塔除了有效控制风荷载作用下输电塔整体的位移及变形,有效控制输电塔主材内力对确保铁塔安全也尤为关键。顺风向风荷载作用时,输电塔迎风面受拉,背风面受压,且压应力大于拉应力。0°和90°风向角下裸塔和塔线体系输电塔的主材最大内力响应的功率谱曲线见图11。从图11中可以看出,由于塔线体系中导地线的低频段能量非常显著,无论是0°和90°风向角下,在低频响应中出现尖峰,为导、地线1阶振动,且在90°风向角作用下,导、地线影响最大,使得塔线体系中输电塔的主材应力

均方根值比裸塔大。

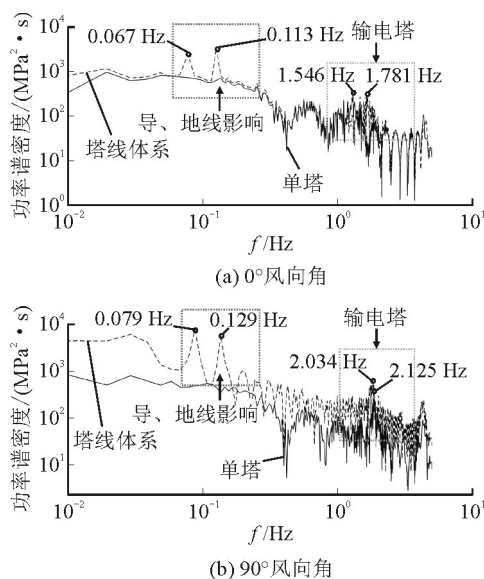


图11 N59塔主材最大应力响应功率谱

Fig. 11 Power spectrum of the maximum stress of main material response of N59 tower

N59塔位移及应力响应均方根值见图12。从图12(a)还可看出,裸塔在塔腿第二段主材达到最大值,此处为输电塔受风荷载作用倒塌破坏的危险部位。在90°风向角作用下,塔腿第二段主材压应力较上、下两层增大明显,铁塔的倒塌几率最大,这和2020年8号“黑格比”台风导致N59塔的倒塔位置是一致的。在塔线体系中110ZM3塔主材应力除了塔腿第二段位置出现明显的转折,均方根值为109 MPa,瞬时最大值达195 MPa,以上随着高度的增加主材最大风荷载引起的应力均方根值呈减小趋势;而图12(b)中的位移响应呈放大趋势,与图5中顺线路和横线路方向的振型一致,表明裸塔和塔线体系中输电塔的风振响应均以一阶振型为主。由于塔线体系输电塔受到导线和地线耦合效应影响,塔线体系铁塔各层位移均方根值均大于裸塔各层位移均方根值。

4.3 风振系数

工程上为了体现脉动风的作用效果,在计算风荷载的动力效应时常采用风振系数或风荷载调整系数的方法。风振系数 β 是指风荷载作用下结构总响应与平均风压引起的结构响应的比值,可以根据输电塔风振响应时程得到风振系数计算值为

$$\beta = 1 + \frac{R_d}{R_s} \quad (9)$$

式(9)中: R_s 为输电塔的平均风响应; R_d 为风振响应均方根值(RMS)。根据前文风振分析结果,可以得出0°和90°风向角下裸塔及塔线体系的位移风振系数,并与规范GB 50545—2010《110 kV~750 kV 架

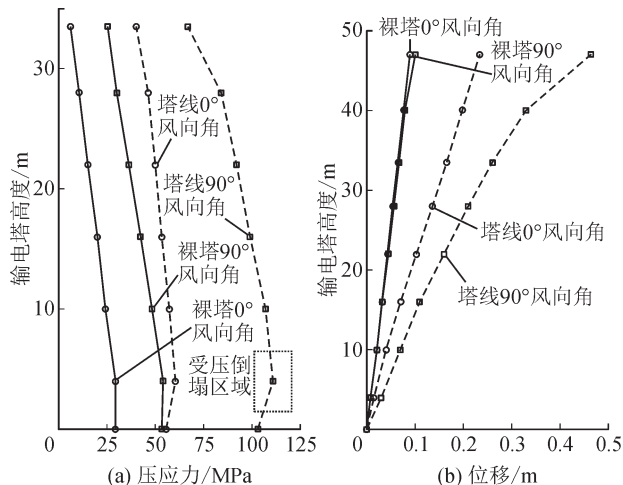


图12 N59塔位移及应力响应均方根值

Fig. 12 RMS of displacement and stress response of N59 tower

空输电线路设计规范》中考虑脉动风作用的风荷载调整系数进行对比,N59塔位移风振系数见图13。

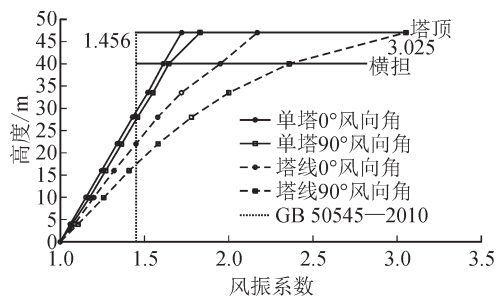


图13 N59塔位移风振系数

Fig. 13 Wind induced vibration coefficient of displacement of N59 tower

按照规范GB 50545—2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》,对于低于60 m的杆塔,杆塔全高可采用同一个系数,文中46.95 m的杆塔按照规范计算得到风荷载调整系数为1.456,按照此系数进行计算得到的各工况下的位移风振系数与1.456相差不大,说明裸塔和塔线体系在此系数计算下仍在线弹性范围内。按照风速 $v_{10}=41$ m/s脉动风开展动力时程分析时,裸塔结构在横担处的位移风振系数最大值为1.55,塔头处1.70,分别超出规范值6.4%、16.7%,但是在此范围内裸塔结构不会由于钢材强度或杆件压屈失稳导致倒塌;但是塔线体系在横担处的位移风振系数最大值达到为2.38,当风向角为90°时,塔头处达到3.025,远超规范值1.456。

单从风振分析得到的主材应力不会导致铁塔破坏,但是铁塔横担以上结构在横线路方向的较大水平位移会导致整体结构重心偏移,加快铁塔受压区杆件失稳。虽然规范提供风荷载调整系数能满足裸塔结构在脉动风作用的安全校核,但是对于风向角90°的大跨越塔线体系,由于考虑了导、地线的

影响,会使塔的非线性位移增大,导致塔的整体偏移,压应力会大于拉应力,此时强度校核准则会失效,应充分考虑由长细比主导的杆件压屈和铁塔受压区的塑性变形。

5 结论

1)脉动风作用下大跨越输电塔线体系中导、地线的低频耦合效应较大,输电塔的风振系数随铁塔高度呈显著放大趋势,在20 m以下其值小于现行规范值,随着高度的增加,无论是裸塔还是塔线体系的输电塔的风振系数远远大于设计规范值,90°风向角下塔线体系输电塔顶的位移风振系数达到3.025,远超规范推荐的1.456。因此对于跨度较大输电塔的抗风设计和安全校核时,在保证杆件强度的前提下,应充分考虑输电塔的非线性变形及其整体压弯稳定。

2)无论是输电塔线体系还是裸塔,90°风向角(横线路方向)较其他风向角输入下的风振响应大,在 $v_{10}=41$ m/s风速作用下虽然塔腿顶部位置的主材最大应力没有达到屈服极限,但330ZM3输电塔在2020年8号台风“黑格比”作用下(瞬时极大风速仅为38.6 m/s)发生了塔腿顶部的弯折屈曲倒塌,文中分析得到的塔腿顶部主材应力出现转折也表明在横线路方向大风塔腿顶部位置是薄弱环节,有必要加固。

3)提高设计风速虽然可以显著提升输电塔的抗风能力,但也会大幅增加塔重,技术经济性较差,今后在大风区输电塔的抗风设计中要进一步重视塔线体系中导地线的耦合效应分析,有效减小输电塔的位移风振效应,并采取有效的加固措施,提高输电塔的整体抗侧移刚度。

参考文献:

- [1] 谢强,李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报,2006(4):126-131.
XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and counter measures[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131.
- [2] HOLMES J D. Along-wind response of lattice towers: Part III-effective load distributions[J]. Engineering Structures, 1996, 18(7):489-494.
- [3] 姚志刚,秦永坚,汪楚锐,等. 输电线路塔一线耦联体覆冰不平衡张力特性分析[J]. 电瓷避雷器,2019(5):181-187.
YAO Zhigang, QIN Yongjian, WANG Chukun, et al. Analysis of unbalanced tension characteristics of transmission line tower line coupling icing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 181-187.
- [4] 念路鹏,阳林,郝艳捧,等. 均匀覆冰时重冰区110 kV直线塔关键构件的受力分析[J]. 智慧电力,2020,48(1):15-22.
NIAN Lupeng, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. Stress analysis of key components of 110 kV linear tower in heavy ice area under uniform icing[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 15-22.
- [5] 朱凌,陈涛威,周晨,等. 考虑风速风向联合分布的大风灾害下电力断线倒塔概率预测[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(2):115-122.
ZHU Ling, CHEN Taowei, ZHOU Chen, et al. Probability prediction of power outage and tower collapse under gale disaster considering joint distribution of wind speed and direction[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 115-122.
- [6] 孙子昌,邓迎君,陈昊,等. 同塔双回线路同名相跨线短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(4):154-159.
SUN Zichang, DENG Yingjun, CHEN Hao, et al. Short circuit fault analysis of double circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 154-159.
- [7] 琚泽立,朱跃,高子豪,等. 带有串联电容补偿装置的10 kV配电网线路短路故障暂态过程研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(2):1-7.
JU Zeli, ZHU Yue, GAO Zihao, et al. Study on transient process of short circuit fault in 10 kV distribution network with series capacitor compensation device[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 1-7.
- [8] 吴田,张超,方春华,等. 特高压输电线路塔线体系风振响应特性及对登塔人员影响分析[J]. 高压电器,2021,57(4):78-80.
WU Tian, ZHANG Chao, FANG Chunhua, et al. Analysis of wind-induced vibration response characteristics of UHV transmission line tower system and its impact on tower climbing personnel[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 78-80.
- [9] 何英静,李继红,但扬清,等. 柔性直流输电系统对多直流馈入系统运行性能的改善作用研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(3):106-111.
HE Yingjing, LI Jihong, DAN Yangqing, et al. Study on performance improvement of multiple DC infeed systems by MMC-HVDC system[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 106-111.
- [10] 厉天威,江巴彦,赵建华,等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析[J]. 高压电器,2016,52(6):23-28.
LI Tianwei, JIANG Siyan, ZHAO Jianhua, et al. Wind disaster analysis of transmission lines in coastal areas of China southern power grid[J]. High Voltage Apparatus,

- 2016,52(6): 23-28
- [11] 张振泉,张 东,李晓光,等.一起750 kV输电线路风偏跳闸原因分析及改造措施研究[J].电瓷避雷器,2017(2): 168-173.
ZHANG Zhenquan, ZHANG Dong, LI Xiaoguang. Cause analysis and improvement measures of a 750 kV transmission line wind bias trip[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(2): 168-173.
- [12] MELBOURNE W H. Predicting the cross-wind response of masts and structural members[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997(69-71):91-103.
- [13] 张 锋,吴秋晗,李继红.台风“云娜”对浙江电网造成的危害与防范措施[J].中国电力,2005(5):39-42.
ZHANG Feng, WU Qiuhan, LI Jihong. Harm of typhoon Yunna to Zhejiang power grid and preventive measures[J]. Electric Power, 2005(5): 39-42.
- [14] 张 豪,詹红霞,张 曦,等.基于多端故障电流匹配的配电网故障定位方法[J].智慧电力,2020,48(4):97-103.
ZHANG Hao, ZHAN Hongxia, ZHANG Xi, et al. Distribution network fault location method based on multi-terminal fault current matching[J]. Smart Power, 2020,48(4):97-103.
- [15] 陈 锴,钟 浩,李世春,等.考虑输电断面限制的风—光—梯级水电站长期优化调度[J].智慧电力,2020,48(5):27-33.
CHEN Kai, ZHONG Hao, LI Shichun, et al. Long-term optimal scheduling of wind-photovoltaic-cascade hydropower stations considering transmission section constraints[J]. Smart Power, 2020,48(5):27-33.
- [16] 李明明,王 建,熊小伏,等.高温天气下架空线路运行温度与弧垂超限预警方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(2):25-33.
LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(2):25-33.
- [17] 王 竞,夏加富,刘晓晖,等.牵引变电站直流断路器机械状态监测与故障诊断研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):33-40.
WANG Jing, XIA Jiafu, LIU Xiaohui, et al. Research on mechanical condition monitoring and fault diagnosis for DC circuit breaker in traction substation[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(1):33-40.
- [18] 吴明祥,包建强,叶 尹,等.超强台风“桑美”引起温州电网输电线路事故的分析[J].电力建设,2007(9):39-41.
WU Mingxiang, BAO Jianqiang, YE Yin, et al. Analysis of transmission line accident caused by super typhoon “Sangmei” in Wenzhou power grid[J]. Electric Power Construction, 2007(9): 39-41.
- [19] 孙吉波,辛 拓,王延纬.广东电网抗击超强台风“威马逊”的经验及反思[J].广东电力,2014,27(12):80-83.
SUN Jibo, XIN Tuo, WANG Yanwei. Experience and reflection of Guangdong power grid in fighting against super typhoon “weimasson”[J]. Guangdong Electric Power, 2014,27(12): 80-83
- [20] 谢 强,阎 启,李 杰.横隔面在高压输电塔抗风设计中的作用分析[J].高电压技术,2006(4):1-4.
XIE Qiang, YAN Qi, LI Jie. Effects of diaphragm on wind resistant design of power transmission tower[J]. High Voltage Engineering, 2006(4): 1-4.
- [21] 杨文刚,王璋奇,朱伯文,等.特高压单柱拉线塔塔线体系风振响应时程分析[J].中国电机工程学报,2015,35(12): 3182-3191.
YANG Wengang, WANG Zhangqi, ZHU Bowen, et al. Time history analysis on wind-induced response of UHV guyed single-mast transmission tower-line system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015,35(12): 3182-3191.
- [22] 曹枚根,徐忠根,刘智勇.大跨越输电钢管组合塔动力特性的理论分析[J].电力建设,2005(12):51-54.
CAO Meigen, XU Zhonggen, LIU Zhiyong. Dynamic characteristics analysis of combo steel tube tower for large crossing transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2005(12): 51-54.
- [23] 韩 枫,肖正直,李正良,等.1 000 kV汉江大跨越输电塔线体系三维脉动风场模拟[J].高电压技术,2009,35(5):999-1004.
HAN Feng, XIAO Zhengzhi, LI Zhengliang, et al. 3D stochastic wind field simulation of 1000 kV Hanjiang long span transmission line system[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(5): 999-1004.
- [24] 贺 博,修娅萍,赵 恒,等.强台风下高压输电线路塔—线耦联体系的力学行为仿真分析一:静力响应分析[J].高压电器,2016,52(4):36-41.
HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons Part I: Static response analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 36-41.
- [25] 贺 博,修娅萍,赵 恒,等.强台风下高压输电线路塔—线耦联体系的力学行为仿真分析二:动力响应分析[J].高压电器,2016,52(4):42-47.
HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analysis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons Part II: Dynamic response analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 42-47.
- [26] 贺 博,修娅萍,赵 恒,等.强台风下高压输电线路塔—线耦联体系的力学行为仿真分析三:动静力响应对比[J].高压电器,2016,52(4):48-53.
HE Bo, XIU Yaping, ZHAO Heng, et al. Simulation analy-

- sis of mechanical behavior of high voltage tower-line coupled system under strong typhoons Part III: Comparison of dynamic and static response[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 48-53.
- [27] 朱宽军, 徐 鸿. 考虑风速时空分布特性的高压输电塔—线体系风致响应分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2348-2356.
- ZHU Kuanjun, XU Hong. Study on wind-induced response of high-voltage transmission tower line system considering temporal and spatial distribution of wind speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2348-2356.
- [28] 庄文兵, 章 涵, 王 建, 等. 新疆 750 kV 特高压输电线路沿线地形及大风特征时空分析[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 190-196.
- ZHUANG Wenbing, ZHANG Han, WANG Jian, et al. Temporal and spatial analysis of terrain and gale characteristics along 750 kV UHV transmission line in Xinjiang[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 190-196.
- [29] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. 2012.
- [30] 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 2010.
- Code for the design of 110 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. 2010.
- [31] 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 2019.
- Load code for the design of overhead transmission line: DL/T 5551—2018[S]. 2019.
- 朱云祥(1967—), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电建设管理及防灾减灾技术(E-mail: zhu_yunxiang@zj.sgcc.com.cn)。
- 张若愚(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为输变电防灾减灾技术研究(E-mail: 445907882@qq.com)。
- 曹枚根(1975—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为输变电防灾减灾技术研究与应用(通信作者)(E-mail: 314613692@qq.com)。
- 屠 锋(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电建设管理及防灾减灾技术(E-mail: 479149328@qq.com)。
- 王 瑜(1970—), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电建设管理及防灾减灾技术(E-mail: fish66wang@sina.com)。
- 郑 翀(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为输变电建设管理及防灾减灾技术(E-mail: zhengchong@163.com)。