

The Design and Analysis of Wind Load on Ultra-high Voltage Substation Frame

Hao Tang¹ Zhibo Zhang¹ Benjun Xiang¹ Yuji Zhang² Cheng Wang² Jie Zhang²

1. School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, 150086, China

2. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, 150086, China

Abstract

In order to clarify the natural vibration and static characteristics of the UHV substation frame under wind load, this paper uses 3D3S 14.0 software to calculate the wind load of the UHV substation frame, and investigates the frame's modal, support reaction, nodes and rods. The displacement and stress of the parts. The research results show that the mass participation coefficients of the first 8 modes of the structure in the X, Y and Z directions are 84.27%, 80.46% and 30.80%, respectively; the first 10 units with the largest and smallest axial forces of the structure are mainly distributed in the tower support and The middle position of the beam; the maximum positive displacement of the top of the substation tower is 185.5mm, and the maximum negative displacement of the middle of the beam is -34.6mm; the maximum support reaction force of the structure is 5947.3N, the maximum bending moment is 301.5N·m; the maximum structural stress ratio is 0.79, which satisfies the calculation requirements of bearing capacity.

Keywords

UHV substation frame; wind load; 3D3S; natural vibration characteristics; static characteristics

特高压变电构架风荷载设计分析

唐浩¹ 张智博¹ 向本军¹ 张裕己² 王程² 张杰²

1. 黑龙江大学建筑工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150086

2. 黑龙江大学水利电力学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150086

摘要

为了明确特高压变电构架在风荷载作用下的动力特性和静力特性, 论文利用3D3S 14.0软件对特高压变电构架进行风荷载计算, 考察构架的模态、支座反力、节点和杆件的位移及应力情况。研究表明: 结构前8阶X、Y和Z向振型质量参与系数分别为84.27%、80.46%和30.80%; 结构轴力最大和最小的前5个单元主要分布在塔架支座部分和横梁中间位置; 变电构架塔顶出现最大正位移185.5mm, 横梁中间出现最大负位移-34.6mm; 结构最大支座反力为5947.3N, 最大弯矩为301.5N·m; 结构应力比最大值为0.79, 满足承载力计算要求。

关键词

特高压变电构架; 风荷载; 3D3S; 自振特性; 静力特性

1 引言

特高压变电构架高效、安全运行可促进电力资源有效分配, 但此类结构对风荷载十分敏感, 强风作用下会导致构件或整体结构破坏, 其风荷载动力特性及力学特点的研究具有十分重要的工程实践意义。

基于此, 专家学者对特高压变电构架结构风荷载进行了

一系列研究。在中国, 王炎铭、路焕军和原迁^[1-3]采用谐波叠加法获得风荷载时程, 并将其加载到输电塔有限元模型进行风振响应分析, 得到了位移时程曲线。李方慧、王昊阳和赵杰^[4-6]通过风洞试验对1000kV特高压变电构架气动力系数、体型系数等风荷载特性进行研究。王振华^[7]将中国和其他国家相关规范与风洞试验结果进行对比, 分析体型系数和角度风荷载系数的差异。在国际上, He Bo^[8]考虑特高压塔线耦合体系整体和动态荷载, 分析塔线体系稳定性和风致响应。Kouchami-Sardo^[9]利用现场性分析和风洞试验制定输电塔风蚀的风险顺序和漏洞风险评估标准函数。Fengli Yang^[10]对500kV钢管角钢输电塔进行风洞试验, 计算结构的阻力系

【作者简介】唐浩(1995-), 男, 中国湖南邵阳人, 硕士, 从事结构风工程研究。

【基金项目】黑龙江大学校级研究生创新科研项目(YJSCX2020-199HLJU)。

数, 横风向和顺风向风振系数, 并通过非线性拟合分析确定偏风荷载系数。

上述研究对特高压变电构架的静力分析涉及较少, 论文为了考察风荷载作用下 1000kV 特高压变电构架的自振特性及静力特性, 采用 3D3S 软件计算风荷载作用下结构自振频率、自振周期、最不利杆件内力、最大节点位移及最不利支座反力, 并根据相关规范对结构构件的强度、整体稳定性、抗剪性能及长细比进行验算, 以此提高结构安全性。

2 工程概况

论文基于中国潍坊某特高压变电站项目分析特高压变电构架结构的风荷载。变电构架为圆钢管格构式塔, 宽 49m, 高 70m, 图 1 为结构简图。结构设计安全等级为一级, 设计使用年限为 50 年, 结构重要性系数为 1.1, 圆钢管均采用 Q345 钢材, 弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, 泊松比为 0.30, 线膨胀系数为 1.20×10^{-5} , 质量密度为 7850kg/m^3 。

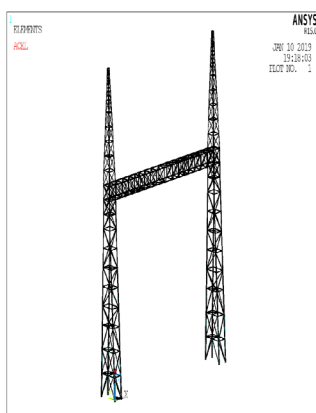


图 1 特高压变电构架简图

3 动力特性分析

论文采用 3D3S 软件分析结构自振特性, 分别从自振周期、振型以及各振型质量参与系数等方面展开研究。图 2 为结构的前 4 阶振型图, 分析可知, 第 1 阶振型为纵向平动, 第 2 阶振型为横向平动, 第 3 阶振型为纵向前后摆动, 第 4 阶振型为横向弯曲摆动。

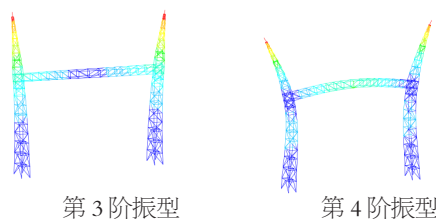
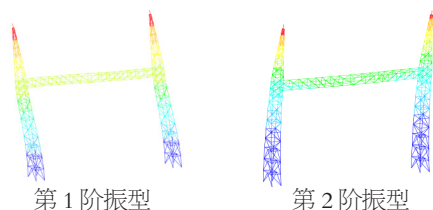


图 2 特高压变电构架前 4 阶振型

结构的前 8 阶自振特性如表 1 所示, 结构前 4 阶振型自振周期分别为 1.03s、0.86s、0.68s 和 0.35s, 前 8 阶振型中, X 方向的质量参与系数为 84.27%, Y 方向为 80.46%, Z 方向为 30.80%, X 和 Y 向质量参与系数分别为 Z 向的 2.71 倍和 2.61 倍, 在设计时应注意 X 和 Y 方向的振动特性。

表 1 特高压变电构架前 8 阶自振特性

振型	周期(秒)	各振型质量参与系数		
		X 方向	Y 方向	Z 方向
1	1.03	79.18%	0.04%	0.00%
2	0.86	0.04%	66.82%	0.00%
3	0.68	0.00%	0.01%	0.00%
4	0.35	0.00%	0.09%	13.53%
5	0.33	0.00%	1.44%	1.33%
6	0.25	5.04%	0.00%	0.01%
7	0.22	0.01%	12.10%	0.01%
8	0.21	0.00%	0.00%	15.92%

4. 静力分析

4.1 荷载施加

论文对结构仅施加结构自重(恒载)及风荷载, 考察结构在风荷载作用下的静力位移、支反力及内力。结构自重荷载由钢材密度与结构尺寸获得, 风荷载基于荷载规范体型系数和风振系数施加, 其中, 基本风压取 0.55N/m^2 , 地貌粗糙度为 B 类, 风压高度变化修正系数取 1.0, 计算阻尼比为 0.02。荷载组合如表 2 所示, 导荷方式为双向导荷到节点。

表 2 荷载组合

荷载组合 1	1.35 恒载 + 1.40 × 0.60 风载
荷载组合 2	1.30 恒载 + 1.50 风载
荷载组合 3	1.00 恒载 + 1.50 风载

4.2 内力分析

由于构架为格构式塔架结构, 本节重点分析轴力最大和最小前 5 个杆件内力情况。图 3 和图 4 分别为构架杆件按最大和最小轴力分布, 两类杆件均分布在塔架支座部分和横梁中间位置, 但由于塔架在风荷载作用下一侧受拉一侧受压, 最大和最小轴力杆件关于 Z 向对称, 这符合特高压变电结构的力学特点。

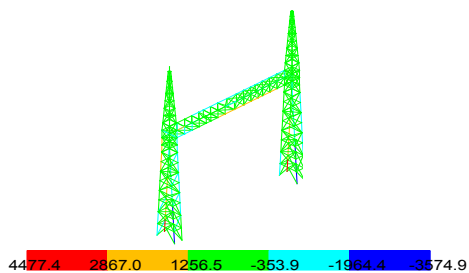


图3 杆件单元按最大轴力分布 (N)

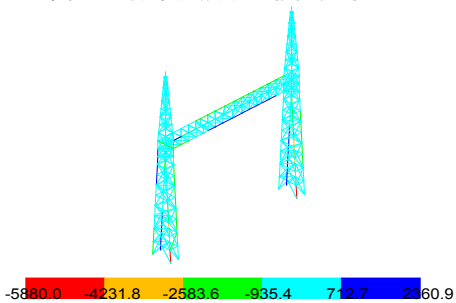


图4 杆件单元按最小轴力分布 (N)

轴力最大(受拉)前5个轴力最大杆件轴力范围为2713.5~4477.4N,杆件内力跨度较大,变化较快。轴力最小(受压)的前5个单元的内力如表3所示,前5个杆件的轴力范围为-5880.1~3717.7N,受压杆件内力较大设计时需增加截面尺寸。最大和最小轴力5个杆件分别在荷载组合3和荷载组合2工况出现。由上述分析可知,对特高压变电构架结构而言,受压杆件的安全性相对受拉杆件更重要。

4.3 位移分析

基于构架结构节点位移考察结构在风荷载下的变形情况,图5为结构最大正位移分布,最大正位移185.5mm在塔顶位置,表4为结构前5个Uxyz最大节点位移表,位移范围为178.5~185.5mm,最大位移节点均在塔顶部分。结构最大负位移如图6所示,最大负位移即为节点受压最大变形,发生在结构横梁中间部分,分析可知结构最大负位移为-34.6mm。

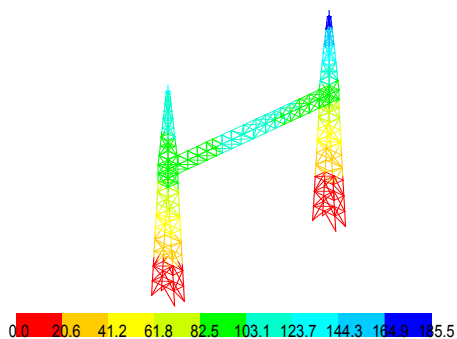


图5 结构最大正位移 Uxyz (mm)

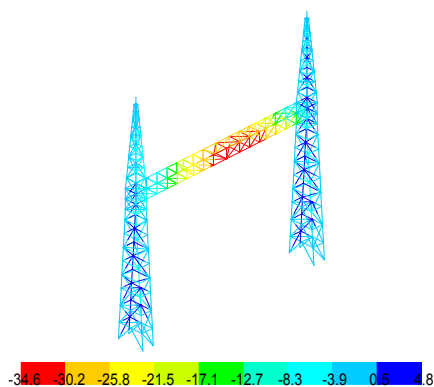


图6 结构最大负位移 Uxyz (mm)

4.4 支座反力分析

风荷载下结构支反力分析为构架结构基础及节点设计提供依据,支座节点均为刚接节点,支座节点号依次为61、78、94、98、207、224、238和242。表5为各效应组合下最大支反力设计值,最大支反力为5947.3N,最大弯矩为301.5N·m,分析可知,支反力以轴力为主且Z轴最大,弯矩以Y轴弯矩最大。

5 结果检验

通过计算结构规范验算判断构件安全及识别结构危险位置,并能对结构进行优化。本节按照《空间网格结构技术规程》^[11]标准对构件强度、稳定性、及长细比等进行验算。结果表明,结构满足承载力计算要求,最大应力比为0.79,图7为结构应力比分布。

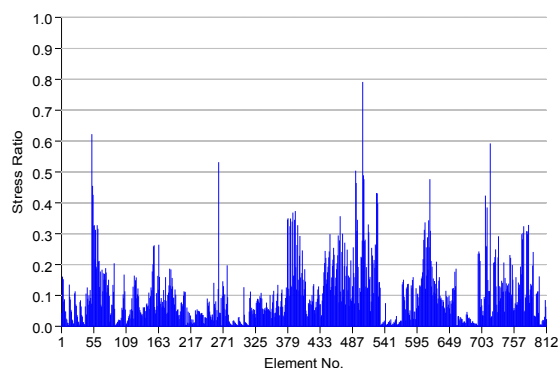


图7 杆件应力比分布图

图8为按强度应力比验算结果,强度应力比前5个最大杆件如表6所示,最大杆件为505号,应力比为0.774,绕3轴整体稳定系数为0.789,绕2轴和3轴长细比均为30。按强度应力比验算最大的4个杆件应力比分别为0.774、0.600、0.590和0.529,均小于0.8,强度富余较大。图9为绕3轴整体稳

表3 轴力最小的前5个单元的内力 [N/(N·m)]

序号	单元号	组合号	轴力 N	剪力 Q2	剪力 Q3	扭矩 M	弯矩 M2	弯矩 M3
1	505	2	-5880.1	-10.4	72.2	7.8	268.7	13.3
2	52	2	-4752.4	-4.6	52.6	-3.5	184.8	-4.3
3	506	2	-3989.1	-4.2	-30.6	5.4	50.3	-27.5
4	507	2	-3842.3	-4.4	36.7	9.2	105.9	-4.1
5	53	2	-3717.7	-1.4	-29.9	-6.2	52.8	-22.3

表4 结构前5个 Uxyz 最大的节点位移表 (mm)

序号	节点号	组合号	Ux	Uy	Uz	Uxyz
1	100	2	-154.1	-103.3	-2.0	185.5
2	28	2	-148.6	-99.8	-2.3	179.0
3	18	2	-148.6	-99.1	-0.8	178.7
4	99	2	-148.3	-99.4	-2.0	178.6
5	38	2	-148.0	-99.8	-3.2	178.5

表5 各效应组合下最大支座反力设计值 [N/(N·m)]

节点号	组合号	N1	N2	N3	M1	M2	M3
61	2	59.2	346.0	4886.3	-2.5	201.3	-22.2
78	1	94.8	69.7	511.7	-1.4	120.6	-12.8
94	2	370.9	18.5	1003.3	-12.2	209.2	14.9
98	3	54.3	281.8	-4113.9	-3.0	202.0	14.1
207	2	80.7	351.7	5947.3	16.1	292.5	-18.5
224	3	504.2	89.7	-548.2	-19.4	301.5	-20.3
238	2	487.4	-86.7	2005.7	2.9	244.2	31.0
242	3	58.0	368.1	-4637.2	-18.9	229.1	29.0

定验算结果，结构绕3轴整体稳定系数最大的杆件也是505号，说明此杆件为结构最危险杆件，结合所有验算结果可知，结构危险杆件还有52号、493号、506号。另外需要注意617号杆件长细比达到58。

6 结论

论文通过3D3S软件获得风荷载作用下结构自振频率、自振周期、最不利杆件内力、最大节点位移及最不利支座反力，并根据规范标准对构件的强度、稳定性及长细比进行验算，获得如下结论：

①特高压变电构架结构前8阶振型中，X方向的质量参与系数为84.27%，Y方向为80.46%，Z方向为30.80%，且前2阶振型分别为结构纵向平动和横向平动。

②构架结构最大和最小轴力前5个单元主要分布在塔架支座部分和横梁中间位置。轴力最大和最小的前5个杆件分别出现在荷载组合3和荷载组合2工况。

③在变电构架塔顶位置出现结构最大正位移185.5mm，横梁中间部分，结构出现最大负位移-34.6mm。

④构架结构最大支座反力为5947.3N，最大弯矩为301.5N·m，各支座节点反力主要以Z向轴力为主，弯矩主要以Y轴弯矩为主。

⑤结构验算满足承载力计算要求，最大应力比为0.79，结构较危险杆件为52号、493号、505号、506号及617号杆件。

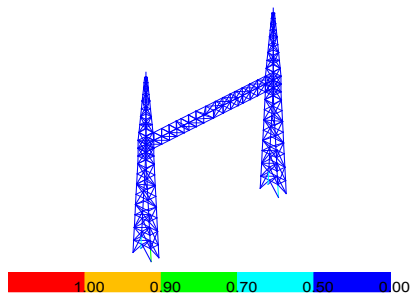


图8 按强度应力比验算结果

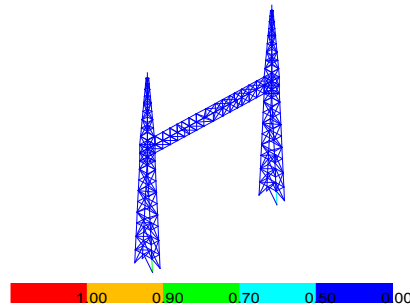


图9 按绕3轴应力比验算结果

表6 强度应力比最大的前5个单元的验算结果

序号	单元号	强度	绕2轴整体 稳定	绕3轴整体 稳定	绕2轴 长细比	绕3轴 长细比	结果
1	505	0.774	0.000	0.789	30	30	满足
2	52	0.600	0.000	0.621	30	30	满足
3	718	0.590	0.000	0.000	30	30	满足
4	264	0.529	0.000	0.000	30	30	满足
5	493	0.502	0.000	0.488	21	21	满足

参考文献

- [1] 王炎铭. 宁波地区输电塔风致动力响应分析[J]. 安徽建筑, 2021, 28(3): 66-67.
- [2] 路焕军. 风振响应下塔-线体系的动力特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 39-44.
- [3] 原迁, 张德凯. 大跨越输电塔线体系风振响应及风振系数分析[J]. 山西建筑, 2021, 47(6): 34-38.
- [4] 李方慧, 唐浩, 支旭东. 1000kV 特高压变电构架风荷载特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 129-135.
- [5] 王昊阳. 1000kV 特高压变电构架风洞测力试验及风振响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 赵杰. 1000kV 特高压变电站塔架抗风性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2019.
- [7] 王振华. 输电塔体型系数与角度风荷载系数对比研究[J]. 电力勘测设计, 2021(2): 17-23.
- [8] He Bo, Zhao Mingxi, Feng Wentao, et al. A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds[J]. Advances in Engineering Software, 2019, (127): 1-7.
- [9] I. Kouchami-Sardoo, H. Shirani, I. Esfandiarpour-Boroujeni, H. Bashari. Application of a Bayesian belief network model for assessing the risk of wind erosion: A test with data from wind tunnel experiments[J]. Aeolian Research, 2019, (41): 100543.
- [10] Fengli Yang, Jingbo Yang, Huawei Niu, Hongjie Zhang. Design wind loads for tubular-angle steel cross-arms of transmission towers under skewed wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015(140): 10-18.
- [11] 部门中华人民共和国住房和城乡建设部发布. 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.