

强风地区平单轴光伏电站稳定性分析与优化

STABILITY ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF HORIZONTAL SINGLE AXIS PHOTOVOLTAIC POWER STATION IN STRONG WIND AREA

吴立晴¹, 邵国栋¹, 刘钊¹, 王晓阳²

(1.中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司, 济南 250102; 2.山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

WU Liqing¹, SHAO Guodong¹, LIU Zhao¹, WANG Xiaoyang²

(1.China Electric Power Construction Group Shandong electric power construction No.1 Engineering Co., Ltd., Jinan 250102, China;

2.College of Civil Engineering and Water Conservancy, Shandong University, Jinan 250061, China)

【摘要】在新能源发电产业中,光伏发电在长期的能源战略中具有重要地位。为提高强风地区平单轴光伏电站建设的安全稳定性,文中通过结构承载力计算和有限元分析,研究了强风荷载下光伏发电系统的安全稳定性能,研发了减振装置对关键受力部位进行加强,并对平单轴安装施工工艺进行优化,为国内强风地区平单轴光伏电站建设提供指导。

【关键词】强风地区;平单轴;受风高危区;荷载组合

【中图分类号】TU311.3

【文献标志码】A

【文章编号】1001-6864(2021)11-0107-04

Abstract: In the new energy power generation industry, photovoltaic power generation plays an important role in the long-term energy strategy. To improve the safety and stability of flat uniaxial photovoltaic power station construction in strong wind area, this paper studies the safety and stability performance of photovoltaic power generation system under strong wind load through structural bearing capacity calculation and finite element analysis. The vibration damping device was developed to strengthen the key stress parts, and the flat uniaxial installation and construction technology were optimized, which provides guidance for the construction of flat single axis photovoltaic power stations in strong wind areas in China.

Key words: strong wind area; single axis; high risk wind area; load combination; construction technology

0 引言

随着全球性不可再生资源短缺、气候变化和环境污染等问题日益突出,新能源发电已成为全球化重要共识。在新能源发电产业中,光伏发电具有清洁性、安全性、资源充足性等优点,在长期的能源战略中具有重要地位^[1]。随着光伏发电技术不断提高,光伏发电产业越来越向着具有较强竞争力的高效能跟踪式光伏电站方向发展。

近年来,国内外学者对光伏电站在极端环境下的稳定性展开研究。Pfahl A^[2]和 Xiong Q^[3]研究了光伏发电系统的抗风能力和结构稳定性。Hasan O^[4]运用有限元分析法分析了光伏发电系统的受力影响和倾角误差计算。孙宁宁、蔚博琛等^[5,6]对固定式光伏支架在各运行工况下的力学性能进行数值分析,验证模型的有效性明杰等^[7]指出固定式光伏支架会使入射光线与光伏组件法线的夹角变化较大,造成光照资源的极大浪费。光伏电站多建在荒地、盐碱地、沙漠化土地等地区^[8],极易遭受强风影响,在强风荷载下光伏发电系统的薄弱部位受力更加复杂,而目前对光伏发电系统在强风荷载下的安全稳定性能研究较少。

文中为研究强风地区平单轴光伏电站建设的安全稳定性,建立光伏电站计算模型,研究了强风荷载下光伏发电系统的安全稳定性能,并对关键受力部位进行加强,对平单轴安装施工工艺进行优化,可为国内强风地区平单轴光伏电站建设提供指导。

1 光伏方阵受风高危区分析技术研究

1.1 光伏方阵建设特点

光伏电站建设地多位于荒地、盐碱地和沙漠化土地中,四周开阔无遮挡,是的电站建设易受强风影响。多排联动的平单轴支架为一个驱动方阵,光伏电站由多个驱动方阵有序排列组成见图 1。

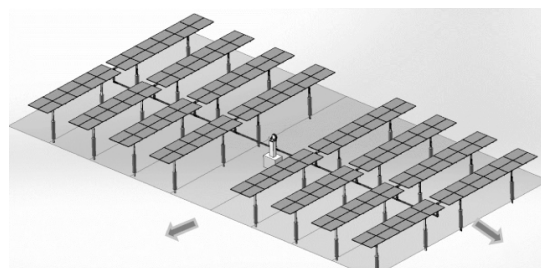


图 1 典型多排联动方阵示意图

1.2 搜集分析气象资料

联合当地气象部门,调研搜集光伏电站所在地区的风力数据,分析确定了光伏电站常年受风的主导风向、平均风速和有记录的最强风速。由图 2 可以看出,该地区盛行西北风和南风,为光伏电站建设提供气象了数据。

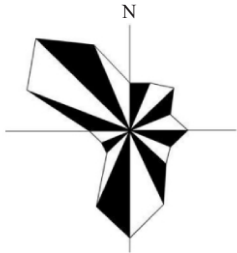


图 2 项目所在地风玫瑰图

1.3 受风高危区域研究

光伏组件所受风荷载(正、负压差值)在靠近风向上游处最大,方阵边缘处较大,向下游发展逐渐衰减^[9]。以平单轴驱动方阵为基本单元进行受风分析,根据光伏电站常年受风的主导风向、和最大风速,对电站方阵进行区域划分,对受风力影响较为严重的驱动方阵区域进行分类标识,提出了受风高危区概念,如图 3 所示。其中,由外到内的受风力影响分别为严重、适中和轻微。可以看出,光伏电站的外周受风力影响较大,而在光伏电站的内部区域受影响较小。

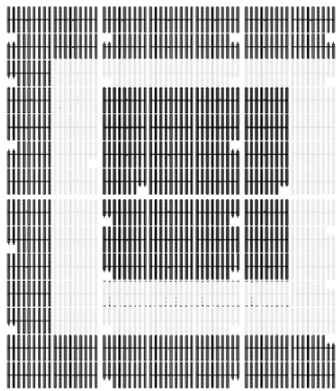


图 3 方阵受风高危区域标识

1.4 受风高危区二次设计优化

首先,增加高危区桩基础抗剪设计规格^[10]。PHC 管桩可采用抗剪能力高的 B 桩,灌注桩可增加纵向抗

剪钢筋,防止强风造成的桩基环向裂痕甚至断桩事故;同时,增加桩基入土深度,要求受风高危区桩基埋土深度:外露深度 $\geq 2:1$,以增大土层对桩基的侧向力和竖向抗拔力。为了节约成本和提高施工效率,对于受风力影响适中和较小的区域,采用抗剪能力良好的 PHC- AB 桩和 PHC- B 桩,如图 4 所示。

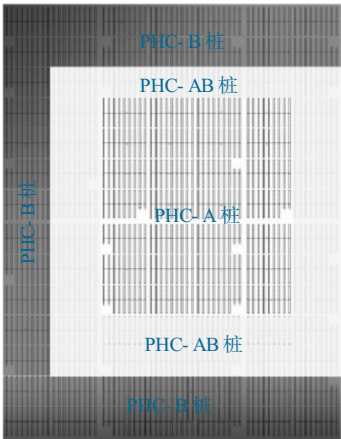


图 4 PHC 管桩分区图

其次,增加高危区立柱、横梁及驱动杆件的材料厚度,和焊缝高度等设计要求。高危区支架材料专材专用,确保该区域内支架具有更好的力学性能来抵御外部强风影响。

2 平单轴支架荷载计算和结构补强技术研究

2.1 基本研究思路

平单轴系统在运行过程中主要受到以下荷载作用:恒荷载 D 、风荷载 W 和雪荷载 $S^{[11]}$ 。通过进行不同的动静荷载组合,建立计算模型,对平单轴系统各结构构件进行极限荷载下变形值验算,找出结构薄弱环节,并进行加固处理。

2.2 采用有限元分析软件进行结构计算

2.2.1 基本荷载计算

计算恒荷载 D 时,考虑连接板、焊缝、螺栓等影响,结构自重增加 10%;同时将组件及支撑件的重量换算为均布线荷载,计算时取值为 0.42kN/m 。计算雪荷载时,基本雪压为 0.25kN/m^2 ,在组件旋转至 0° 时积雪分布系数为 1,旋转至 45° 时为 0.4。风荷载 W 计算参数如表 1 所示。

表 1 风荷载计算参数

基本风压 $/(kN \cdot m^{-2})$	工作风压 $/(kN \cdot m^{-2})$	体型系数		地面粗糙度 类别	风压高度变化 系数	风振系数
		组件旋转 0°	组件旋转 45°			
0.55	0.2	0.9	1.3	B 类	1.0	1.0

在进行荷载组合设计时,除基本组合和标准组合以外,对施工检修情况下的动静荷载组合进行研究,

共设置不同组合 18 种,如表 2 所示。

表 2 荷载组合

序号	荷载组合	备注
1	1.35D	基本组合
2	1.2D+1.4W	基本组合
3	D+1.4W	基本组合
4	1.2D+1.4S+1.4× 0.6W	基本组合
5	1.0D+1.4S+1.4× 0.6W	基本组合
6	1.2D+1.4× 0.7S+1.4W	基本组合
7	1.0D+1.4× 0.7S+1.4W	基本组合
8	D+W	标准组合
9	D+S	标准组合
10	D+W+0.7S	标准组合
11	D+0.6W+S	标准组合
12	1.2D+1.4W	施工检修工况 - 承载力验算组合
13	1.2D+1.4S+1.4× 0.6W	施工检修工况 - 承载力验算组合
14	1.2D+1.4× 0.7S+1.4W	施工检修工况 - 承载力验算组合
15	D+W	施工检修工况 - 位移验算组合
16	D+S	施工检修工况 - 位移验算组合
17	D+W+0.7S	施工检修工况 - 位移验算组合
18	D+0.6W+S	施工检修工况 - 位移验算组合

2.2.2 模拟分析

采用 Midas/gen 有限元分析软件做结构分析,按照组件旋转角 0°、10°和 45°建立计算模型,对结构在正常使用极限状态下的挠度进行分析,主梁以承受弯矩和扭矩的作用为主,立柱以受压和受弯为主,采用《钢结构设计规范》对结构进行验算。

根据有限元分析软件计算结果,支架设计满足正常使用和大风保护模式下力学性能要求;同时支架立柱底部承受支架系统较大的重力矩和水平力矩,受风力影响作用最大,为系统薄弱处。在支架系统突然遭受瞬时强风时,由工作状态调整为大风保护模式需要一定时间,支架整体易从支架系统结构薄弱处发生变形破坏。

研发了立柱底部补强结构,加强结构为一根补强用角钢连接板和四根补强用角钢,安装方式如图 5 所示,并通过了模拟计算验证,支架系统在实际补强焊接加固后,支架系统底部表现出了良好的抗风性能,支架系统薄弱区间得到有效加强。

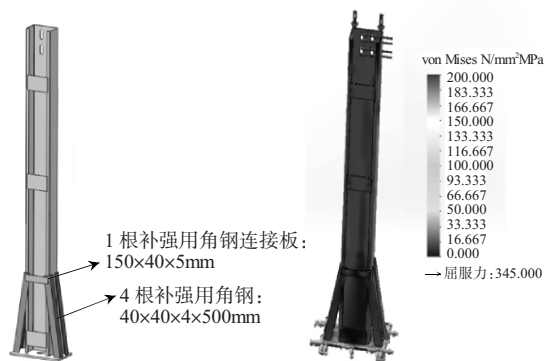


图 5 补强方案分析结果

3 平单轴支架安装施工工艺研究

3.1 基本研究思路

平单轴支架系统在建设安装过程中,系统转动部件约束度较低,欠缺整体性,结构抗风能力较差;在光伏组件安装后,系统承受风压力对组件倾角变化尤为敏感,若支架系统固定不牢固,极易发生整体倾覆折毁事故。

传统施工方法对平单轴支架转动部分的固定措施,多是以钢丝和地锚拉紧平单轴横梁方管,防止其随意转动;或将传动导杆固定在支架立柱之上。传统固定方法不仅工作量较大,而且固定效果不明显,在遭遇强风来袭时,振动摆幅较大,极易造成杆件损伤和光伏组件隐裂。

文中从加装减振装置、优化安装工序两种技术手段出发进行研究,在平单轴系统安装过程中,提前完善驱动部分和减振部分安装,利用回转减速机的自锁制动效果和加装减振器的阻尼减振效应,使系统从安装到运行过程中,始终具备良好的整体稳定性,有效抵抗强风等不利因素对系统的破坏。

3.2 加装减振装置

动载荷作用下的结构响应很大程度上取决于系统的阻尼特性,平单轴支架系统运行过程中始终存在来自驱动电机及外部不规则强风的动荷载影响,要求比较高的抗震性和动态安稳性。文中在横梁方管和立柱处设置方形抱箍,安装阻尼减振器,在遭到瞬时强风等不利荷载冲击时,阻尼减振器可以对外来能量进行阻尼耗散,避免对主体结构造成较大的非弹性变形,从而保证构造在遭受强风影响时,在极短的时间里康复到需求的安稳状态。同时,安装阻尼减振器,还可以有效地减小平单轴系统机械构造中呈现的共振振幅,进一步防止光伏组件因动应力到达极限形成隐裂破坏。

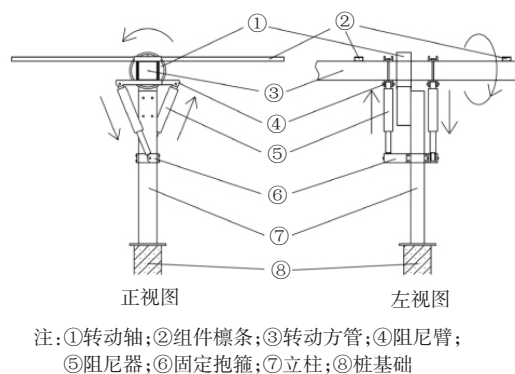


图 6 阻尼减振器安装图解

与现有技术相比,此技术的优点是装置简单轻巧、安装简便,仅 2 人即可操作施工。立柱两侧或两端

反方向安装阻尼器,系统阻尼特性均匀,装置抗风减振效果好。平单轴支架系统方管转动缓慢,安装阻尼器对系统的运行阻力作用较小,同时遭受瞬时强风荷载时,阻尼减震器可以对外来能量进行阻尼耗散,避免组件支架受损。提前安装阻尼减震器,还可以有效地减小平单轴系统机械构造中呈现的共振振幅,进一步防止光伏组件因振幅过大造成组件玻璃隐裂破坏,提高光伏组件安装效率。

3.3 优化安装工序

文中针对平单轴支架系统联动驱动的工作特点,进行了平单轴支架系统安装工序优化的技术研究。

平单轴跟踪系统的动力并不直接来自驱动电机,而是通过重要部件“回转减速机”进行传递,二者之间的本质是蜗轮蜗杆机构,具有较大的传动比,可以使平单轴系统从电机获得较大的驱动力,且缓慢转动。另外蜗杆蜗轮机构还具有反向自锁性,即从动蜗轮无法推动主动蜗杆反向转动,即回转减速机无法推动电机反向转动,此时机构产生自锁效应。

文中针对驱动电机和回转减速机之间的这种特性,提出了安装工序优化:安装单排支架与安装驱动支架同步进行,支架横梁吊装至立柱转动轴的同时,完善驱动连杆、驱动电机和回转减速机等杆件设备牢固连接。使得驱动方阵中的联动支架第一时间与驱动电机和回转减速机关联,达到支架整体锁定作用。同时,控制组件安装必须在驱动连接完成后以及阻尼减振器完善后进行。最终通过工序的合理调整优化,使系统从安装到运行过程中,始终具备良好的整体安稳性能。

4 结语

文中通过强风地区平单轴光伏电站建设关键技术研究,得到以下结论:

(1) 提出了光伏电站方阵分区分析方法,根据风向风力等气象资料,对光伏方阵不同方阵进行区域化分析,提出了受风高危区概念,并对高危区域内方阵建设采取防风措施。

(2) 采用 Midas/gen 有限元分析,建立光伏电站模型,进行荷载组合计算,分析支架系统薄弱环节。

并提出了一种立柱底部补强结构的加强措施,通过了模拟计算验证,表明补强后光伏电站具有良好的抗风性能。

(3) 优化平单轴安装施工工艺,利用回转减速机和阻尼减振器的自锁和减振作用,避免了安装运行过程中强风对平单轴支架系统造成的破坏。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏发电工程验收规范: GB/T50794-2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [2] PFAHL A, COVENTRY J, ROGER M, et al. Progress in heliostat development[J]. Solar energy, 2017, 152: 3-37.
- [3] XIONG Q, LI Z, LUO H, et al. Study of probability characteristics and peak value of heliostat support column base shear[J]. Renewable energy, 2021, 168:1058-1072.
- [4] HASAN O, ARIF A F M, SIDDIQUI M U. Finite element modeling and analysis of photovoltaic modules[C]//ASME International mechanical engineering congress and exposition. American society of mechanical engineers, 2012, 495-505.
- [5] 孙宁宁. 双主梁平单轴光伏支架系统设计[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [6] 蔚博琛, 张广平, 苗广威, 等. 支座沉降时固定式光伏支架的力学性能分析[J]. 太阳能, 2019(3):49-53.
- [7] 明杰, 刘志璋, 王平. 无地基状态下光伏支架的稳定性测试[J]. 太阳能学报, 2012, 33(12):2068-2073.
- [8] 窦伟, 许洪华, 李晶. 跟踪式光伏发电系统研究[J]. 太阳能学报, 2007(2):169-173.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 光伏电站施工规范: GB/T 50796-2012[S]. 北京:中国计划出版社, 2012.
- [10] 国家能源局. 光伏电站设备后评价规程: NB/T 32041-2018[S]. 北京:中国电力出版社, 2018.
- [11] 国家能源局. 光伏发电工程安全验收评价规程: NB/T 32038-2017[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2017.

[收稿日期] 2021-06-21

[作者简介] 吴立晴(1968-), 男, 河北省定州市人, 高级工程师, 研究方向: 电力工程、建筑工程施工。