

光伏支架结构整体性能的研究

郭彦昱

宁夏汇丰祥分布式光伏发电有限公司 宁夏 银川 750000

【摘要】随着光伏产业的不断发展，光伏支架作为光伏发电系统的重要支撑结构，其整体性能的优劣直接关系到系统的安全、稳定与发电效率。本文针对光伏支架结构进行研究，分析不同结构类型的特征，探究影响整体性能的重要因素，建立合理的性能评价指标体系，提出结构优化设计的方法与性能提升的技术路线。根据研究结果可知，合理的结构设计、合适的材料选择、准确的参数设置可以有效提高光伏支架的承载能力、抗风抗震能力、耐久性。本文的研究可以给光伏支架结构的优化设计与工程应用提供理论参考，对光伏产业高质量发展具有重要意义。

【关键词】光伏支架；整体性能；结构设计；优化策略

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.031

在全球能源转型以及“双碳”目标的驱动下，光伏发电作为清洁可再生能源的重要形态，已经实现规模化应用并迅速推广。光伏支架是光伏发电系统的基础支撑部件，起着固定光伏组件、抵抗外界环境荷载的作用，光伏支架的整体性能直接影响到光伏系统运行的安全和寿命。目前光伏支架结构在复杂的气候条件下、不同的应用场景下，传统的结构在承载、稳定、耐久等方面出现不足。因此，深入研究光伏支架结构的整体性能，寻找优化设计的方案，对提高光伏系统的可靠性有着十分重要的现实意义。

1 光伏支架结构类型及特点

1.1 固定式光伏支架结构

固定式光伏支架结构目前应用最广，结构简单，主要由立柱、横梁、斜撑等组成，用螺栓连接成稳定的框架。此种支架不需要动力驱动装置，制造成本低，安装、维护方便，适合于地形平坦、光照条件稳定的地区。固定式支架的角度一般根据安装区域的纬度固定设计，可以保证组件获得较好的太阳辐照接收效率。但由于角度固定，无法随太阳高度角的变化而变化，在光照条件复杂或者纬度较高的地区，发电效率的提高空间较小。同时固定式支架的结构刚度、承载能力是由构件截面尺寸和材料强度决定的，对材料的选择和加工有一定的要求。

1.2 跟踪式光伏支架结构

跟踪式光伏支架结构依靠驱动装置推动光伏组件绕某一轴线转动，随时跟上太阳的行进路线，这样就能最大程度地提升组件所接收到的太阳辐照量。按跟踪轴数不同可分为单轴跟踪式和双轴跟踪式两种。单轴跟踪式支架只绕水平轴或倾斜轴转动，结构简单，成本适中，发电效率比固定式支架提高15%—25%。双轴跟踪式支架可以绕水平轴和垂直轴双向转动，能准确跟踪太阳，发电效率高，但结构复杂，制造成本高，对控制系统和维护技术要求高。跟踪式支架的总体性能依靠驱动系统可靠、结构稳定，大风、暴雨等恶劣天气下要有较好的抗风载能力、自我保护能力。

2 影响光伏支架整体性能的关键因素

2.1 材料性能

材料决定光伏支架的性能，不同的材料力学性能、耐腐蚀性、耐久性影响支架的承载能力、使用寿命。光伏支架常用材料有钢材、铝合金、复合材料等。钢材强度高、刚度大，承载能力强，适合于大跨度、重荷载的支架，但是钢材耐腐蚀性差，需要进行镀锌、涂漆等防腐处理以提高使用寿命，制造成本高，维护工作量大。铝合金材料具有轻质、耐腐蚀的优点，加工性能好，能降低支架自重，方便运输和安装，但铝合金强度、刚度比钢材低，大跨度结构中应用受限。复合材料具有高强度、轻质、耐腐蚀等综合优势，但是其制造成本高，加工工艺复杂，目前还没有大规模的应用。材料的选择要根据支架的应用场合、受力状况以及经济性要求来综合考虑。

2.2 结构设计参数

结构设计参数对光伏支架整体性能有较大影响，结构设计参数主要是指支架几何尺寸、节点连接方式、支撑间距等。支架的几何尺寸直接影响到结构的刚度和承载能力，立柱高度、横梁跨度、斜撑角度等的合理设计，可以改善结构的受力状况，削减应力集中现象。节点连接方式也是影响支架结构整体性、稳定性的因素之一，不同的节点连接方式其力学性能也有所不同，螺栓连接拆装方便、可更换，但是连接刚度较低。焊接连接可以保证节点的整体性、刚度，但是施工工艺要求高，存在焊接缺陷的风险。支撑间距设计既要考虑结构稳定，也要考虑经济性，间距过大，结构变形过大，光伏组件安装精度和发电效率受影响，间距过小，构件用量和制造成本增加。

2.3 外界环境荷载

光伏支架在服役过程中要承受风荷载、雪荷载、地震荷载和温度应力等多种外力。风荷载是光伏支架的主要荷载之一，风荷载的大小与风速、支架高度、组件的布置方式等有关，强风会造成支架结构产生变形、失稳甚至破坏。雪荷载主要是对冬季多雪地区支架结构的影响，积雪的重量会增大支架的竖向

荷载,造成构件弯曲、断裂。地震荷载对于地震多发区的支架结构的安全性十分关键,地震产生的水平和竖向振动会冲击支架结构,需要通过合理的结构设计来提高支架的抗震能力。温度应力是由于环境温度的变化,使支架构件受热胀冷缩作用而产生的内力,长期反复的温度应力会引起构件的疲劳损伤和节点的松动,影响支架的耐久性。

3 光伏支架整体性能评价指标体系

3.1 承载能力

承载能力是光伏支架整体性能的核心评价指标,指支架结构在承受设计荷载时不会发生破坏、失稳或者过大变形的能力。承载能力的评价主要是竖向承载能力、水平承载能力、抗拔承载能力等。竖向承载能力主要是抵抗光伏组件自重、积雪重量等竖向荷载。水平承载能力主要是抵抗风荷载、地震荷载等水平作用力。抗拔承载能力主要是针对立柱基础,抵抗风荷载产生的向上拔力,防止基础失稳。承载能力的评定需采用结构力学计算和试验测试相融合的方法,保证支架结构在设计使用年限内能安全承受所有预期的荷载。

3.2 稳定性

稳定性是指光伏支架结构在荷载作用下保持原有平衡状态、不发生突然失稳的能力,分为整体稳定性和局部稳定性。整体稳定性即支架结构在荷载作用下不出现整体失稳,如立柱压屈、支架框架侧移失稳等。局部稳定性即支架构件在荷载作用下不出现局部失稳,如横梁翼缘屈曲、腹板局部凹陷等。稳定性的评价要顾及结构的几何形状,构件截面尺寸,支撑情况等要素,经由合理的结构设计并实施参数优化,从而改善支架结构的稳定性,防止出现失稳破坏。

3.3 耐久性

耐久性就是指光伏支架结构在长期使用过程中抵抗外界环境因素侵蚀、保持原有性能的能力,直接影响支架的使用寿命和运维成本。耐久性评价包括耐腐蚀性、抗疲劳性、抗老化性等。耐腐蚀性主要评价钢材、铝合金等金属材料在大气、雨水、土壤等环境下的抗腐蚀能力。抗疲劳性能主要评价支架结构在风荷载等周期性作用下的抗疲劳能力。抗老化性能主要评价复合材料、防腐涂层等在光照、温度变化等环境条件下的抗老化能力。耐久性评价要通过长期暴露试验、加速老化试验等方式来完成,给支架使用寿命的预测提供依据。

3.4 经济性

经济性是光伏支架结构设计与应用的重要评价指标,主要是指制造成本、安装成本和运维成本等。制造成本与材料选择、结构复杂度、加工工艺等有关,合理的材料选型和结构优化可以在保证性能的同时降低制造成本。安装成本与支架自重、结构形式、安装工艺有关,轻质化、模块化的支架结构可以简化安装流程,降低安装成本。运维成本包括防腐维护、部件更换

等费用,耐久性好的支架结构可以减少运维工作量和费用。经济性评价要综合支架的整个生命周期成本,做到性能和成本的统一。

4 光伏支架结构优化设计方法

4.1 拓扑优化设计

拓扑优化设计是利用结构力学原理来优化设计的一种方法,在给定的设计空间、荷载条件及约束条件下调整材料分布,从而达到结构性能最优的目的。光伏支架结构设计当中,拓扑优化设计可以用来确定立柱、横梁、斜撑等构件的最优布置形式,减少材料用量,降低结构自重,保证结构的承载能力与稳定性。拓扑优化设计一般采用有限元分析软件进行模拟计算,经过多次迭代后得到最优的结构拓扑形式,为支架结构的详细设计提供基础。利用拓扑优化来优化支架框架的节点连接形式可以减小应力集中,提高结构整体的性能。

4.2 参数优化设计

参数优化设计就是通过改变结构设计参数,比如构件截面尺寸、支撑间距、连接螺栓型号等来达到结构性能的优化。光伏支架结构设计时,参数优化设计可联系有限元分析和试验测试,创建结构性能和设计参数的数学模型,利用优化算法求得最好的设计参数组合。以柱子截面尺寸为例,在满足承载能力的条件下,选择最合适的截面形状及尺寸,从而节约材料。以支撑间距为例,分析不同间距下结构变形与应力分布情况,找到最合适的支撑间距,实现结构稳定性与经济性的统一。参数优化设计能很好地改善支架结构的性能,削减成本,具备较强的工程实用性。

4.3 材料优化选择

材料优化选择是光伏支架结构优化设计的一部分,综合考虑材料的力学性能、耐腐蚀性、耐久性以及经济性等各方面因素来选择合适的材料。在材料的选择过程中要根据支架的应用场合以及性能要求来进行选择。大跨度、重荷载的支架结构可以选用高强度钢材来保证结构的承载能力。在沿海、潮湿等腐蚀性较强的环境下,可以选用铝合金或者耐腐蚀钢材,并且配合有效的防腐处理。对于重量敏感的应用场合,例如屋顶光伏支架,可以选用轻质的铝合金或者复合材料,减少结构自重。同时可以通过使用新型材料、改进材料加工工艺等手段来提高材料的性能,给支架结构优化设计提供更多的选择。

5 光伏支架整体性能提升的技术路径

5.1 新型结构形式研发

研发新型结构形式为提高光伏支架整体性能的重要技术手段,是适应光伏电站规模化、场景多元化发展的主要支撑。创新结构设计能改善结构受力情况,大幅增强承载能力,改善稳定性和耐久性,契合山地、屋顶、海上等多样化的安装环境。

模块化支架将整体拆分成标准化模块，有利于批量生产、高效运输、快速安装，能削减定制化成本，按照使用环境灵活拼接组合。折叠式支架在运输、储存时可以折叠收纳，适合偏远地区运输，占用空间小，运费低，安装时迅速展开，大大提高施工效率。仿生结构模仿蜂巢、树干等自然界最优受力形态，高效利用材料，达到材料用量与结构强度、刚度精确匹配的目的。新型结构的研发要融合结构力学、材料科学等多学科的知识，依靠理论分析、模拟计算、试验测试、工程案例验证来保证技术落地的可行性、实用性。

5.2 防腐技术升级

防腐技术升级是提高光伏支架耐久性的主要方式，对于沿海高盐雾、工业污染区等复杂腐蚀环境，既要考虑防护效果，又要考虑环保和经济性。根据不同的材料腐蚀特性，采用先进的防腐技术及工艺，能有效延长支架使用寿命，降低后期更换维护的成本。钢材支架可以采用热镀锌、冷镀锌、涂漆、喷涂氟碳或聚脲涂层等方式进行处理，热镀锌的防腐效果好、寿命长，但成本高，环保型热镀锌工艺正在逐步推广以减少污染，冷镀锌成本低，但防腐效果和寿命相对较短。铝合金支架用阳极氧化、电泳涂漆等方法，可以根据膜厚的不同来适应不同的腐蚀等级，提高表面硬度以及在极端环境下的耐腐蚀性。另外，通过改善支架结构设计防止积水、减小缝隙腐蚀，配合定期防腐检测，可进一步减少腐蚀风险，形成全生命周期防护体系。

参考文献：

- [1] 焦健.光伏支架结构优化设计研究[J].光源与照明,2024,(12):129-131.
- [2] 姜东.光伏支架结构风参数取值研究[J].特种结构,2024,41(06):43-48+56.
- [3] 李伟豪,刘伟,马涛,刘岩,刘涛,李凯宏,陈雪辉.光伏跟踪支架梁结构轻量化设计及风致疲劳分析[J].重庆科技大学学报(自然科学版),2024,26(06):105-114.
- [4] 王键,王志瑜,王玉红,王佳佳.近岸海上柔性光伏支架结构研究[J].港口航道与近海工程,2024,61(06):62-67.
- [5] 林建北.索布置与梁布置支撑的柔性光伏支架结构的应用研究[J].中国信息界,2024,(08):195-197.

5.3 智能监测与维护技术应用

在光伏电站规模化发展、运维需求越来越复杂的情况下，智能监测和维护技术的使用成为提高支架可靠性的主要手段，可以实时掌握运行状况、及时发现故障、降低运维成本。在支架关键受力点装设应变、位移、加速度等传感器，实时监测应力、变形、振动等参数，数据经由5G网络高速传输并加以分析，从而判定运行状态是否正常。监测数据大于预警阈值时，系统就会发出预警信号，并且将预警信号推送至移动端，让工作人员尽快去检修维护。利用大数据、人工智能技术来整合历史运维数据，构建故障诊断与寿命预测模型，不断改进模型的准确率，以达到精准诊断故障、科学预测寿命的目的，给运维决策提供数据支持。该技术的应用实现了光伏支架精细化运维，减少了盲目运维资源的浪费，从而提高了整个光伏系统光伏支架的性能稳定性和运行效益。

6 结语

新形势下我国能源紧缺问题日渐显现出来，要想有效缓解我国能源紧张问题，就必须在现有基础上加大新能源开发利用力度，随着科学技术水平的不断提高，太阳能光伏发电应用范围日渐广泛，光伏支架在整个光伏电站的投资建设中占了很大一部分，基于此，对光伏支架结构优化设计具有迫切性，也只有这样后续工作才能顺利进行，以此解决我国能源紧缺问题。