

光伏柔性支架技术在大型光伏项目的应用探索

邓 伟

国家电投集团湖北电力有限公司光伏分公司 湖北武汉 430062

摘 要: 湖北浠水县一期 500MW 农(渔)光互补光伏发电项目大范围使用光伏柔性支架,利用其大跨度、高净空的优点实现上部发电,下部渔业养殖的空间复合利用。本文对项目设计难点、光伏柔性支架技术原理、工程技术要求及关键点、及本工程应用实践等方面进行了阐述。

关键词: 光伏柔性支架; 预应力钢绞线; 挠跨比

1. 综述

1.1 项目概况

湖北省黄冈市浠水县一期 500MW 农(渔)光互补光伏发电项目坐落于该县。该项目采用渔光互补模式,选址区域土地性质为普通农用地,平均海拔高度为 18 米,地形平坦且视野开阔。项目用地范围内不存在基本农田、矿产覆盖、水资源、河道及湖面保护等限制因素。

该项目占地面积达到 12000 亩,其中坑塘水面占据 85% 的面积,预计可安装约 300MW 的光伏柔性支架。通过渔光互补模式进行开发,结合“固定式安装+光伏柔性支架”的运行方式,项目竣工后,将跻身国内使用光伏柔性支架规模最大的农(渔)光互补太阳能发电项目之列。此举将对光伏柔性支架技术在其他鱼塘、复杂山坡地、近海滩涂、污水处理厂等特殊地形的大规模推广和应用产生积极的示范效应。

1.2 项目设计难点

1.2.1 兼顾农(渔)业发展

依据 2022 年 1 月 5 日湖北省能源局与湖北省自然资源厅联合发布的《关于规范光伏发电项目用地管理有关事项的通知》,规定了采用支架式渔光互补项目的行间距(即一个阵列光伏组件的最高点与相邻阵列光伏组件最低点的投影净间距)不得小于 3 米,同时光伏组件的最低点应高于最高水位至少 0.6 米。此外,项目所在地的人民政府进一步提出,为便于当地农民进行后续的渔业养殖活动,并尽量减少光伏项目对渔业产量的潜在影响,要求光伏支架桩基础的的东西向间距必须超过 15 米,前后排间距则需大于 7 米。这些要求对光伏组件的布局以及柔性支架设计方案的安全性和经济

性产生了显著影响。

1.2.2 没有相应的行业设计规范和标准

自光伏柔性支架技术问世以来,已历经三次迭代,产品不断演进与更新。目前,光伏柔性支架系统的性能已接近固定式支架,其结构稳定性日益增强,对不同场地的适应性亦不断提升。然而,迄今为止,尚未见国家层面出台针对光伏柔性支架的行业设计规范或技术标准。设计人员可借鉴的规范主要限于《光伏支架结构设计规程》、《索结构技术规范》以及《桥梁用热镀锌铝合金钢绞线》等与桥梁相关行业的技术标准。至于光伏柔性支架的结构变形、荷载计算、索结构气弹效应等性能标准,目前仍处于研究与探索阶段。

2. 光伏柔性支架调研分析

2.1 光伏柔性支架方案

2.1.1 光伏柔性支架介绍

在光伏柔性支架的部署过程中,太阳能光伏板组件被固定于一系列钢索之上,这些钢索的两端则通过刚性支撑结构进行固定。为了减轻两端顶部支撑所承受的弯矩,支撑结构的设计融合了外部张拉斜拉索与内部刚性斜支撑的双重机制。钢索材料通常选用热镀锌钢绞线或环氧填充预应力钢绞线。钢索作为主要的承重元素,其具备的柔性大、质量轻、强度高的特点使其成为理想的承重构件。预应力技术的应用确保了钢索具有足够的强度。

光伏柔性支架技术历经三次技术革新,当前市场主导的第三代光伏柔性支架普遍采纳了“上承式悬带桥”设计理念。该理念的灵感源自于 1972 年竣工的哥斯达黎加里奥·科罗拉多大桥,其为世界上首座上承式悬带桥。该桥以钢制结构为主体,桥身长度为 108 米。主索悬带作为主要承力构件,

承担了桥梁的全部垂直荷载，从而充分利用了钢材的抗拉性能。主索悬带与预应力索之间的立柱排架作为辅助结构，旨在减小跨度，整个结构通过自身锚固实现平衡。

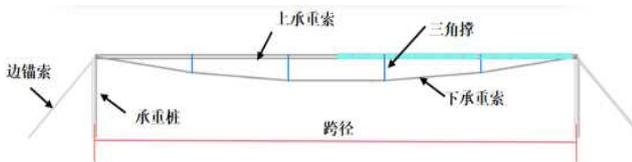


图1 第三代光伏柔性支架结构原理

第三代光伏柔性支架的结构原理基于三角撑系统（类似于悬带桥的主柱排架），通过上承重索（类似于悬带桥的预应力索）与下承重索（类似于悬带桥的主索悬带）的结合，形成一个统一的结构体系。该体系通过施加预应力于上承重索，以消除结构的不利弯曲效应。此外，通过两端边锚索的设置，实现对上、下承重索预应力的平衡。最终，承重桩将荷载有效地传递至地面，确保结构的稳定性和承载能力。

相较于前一代光伏柔性支架，第三代产品通过引入下承重索、三角撑以及稳定索等结构，实现了技术上的优化。其在完成光伏组件安装后，展现出更低的静荷载弯曲度和更为平整的外观。在强风环境下，其抗风稳定性亦表现出显著的提升。一项发表于国际风工程协会会刊的风洞测试研究揭示，在同等风速条件下，第三代光伏柔性支架相较于第二代产品，其抗振性能具有显著优势。

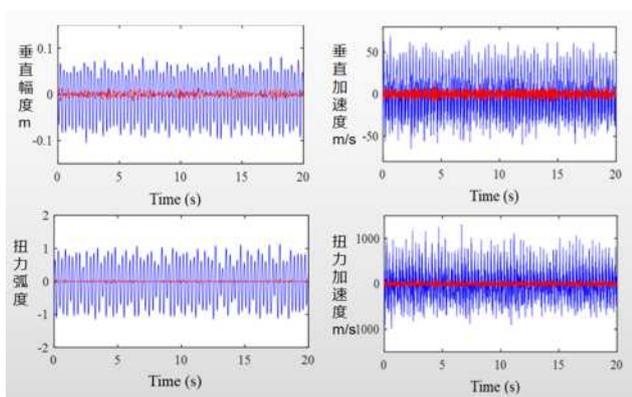


图2 风洞测试结果（蓝色为第二代光伏柔性支架，红色为第三代光伏柔性支架）^[1]

国内众多制造商与设计院正专注于光伏柔性支架结构的优化工作。在确保支架结构的经济性与抗风稳定性的同时，他们不断开发适用于不同工况的产品方案。通过运用各自的技术专利，例如平面桁架结合地锚技术、阻尼装置、三角锥、四角锥以及纵向稳定索等原理，为光伏柔性支架结构

提供必要的垂直荷载，从而增强支架系统的承载能力。

2.1.2 应用案例

相较于传统固定支架技术方案，光伏柔性支架技术在普通地面光伏发电项目和光伏复合发电项目中显示出更广泛的地形地貌适应性。它能够适应多种环境，并在利用组件下部空间方面具有显著优势。例如，在污水处理厂进行光伏项目建设时，由于水处理设备的运行，大面积水处理池内无法安装固定支架基础，而光伏柔性支架凭借其大跨度特性，能够适应这种特殊场地的建设需求。在复杂地形场景下，土地平整成本高昂，安装施工受到地形及植被的显著影响，光伏柔性支架则利用其基础少、跨度大的特点，适应特殊场地的建设需求。在农（渔）光场景进行光伏项目建设时，农光互补、渔光互补需要较高的净空和空旷空间以适应农业机械生产，固定支架建设成本受到水深、土地情况的影响较大，而光伏柔性支架则利用其大跨度、高净空的特性满足农业生产需求，并通过基础少的特性降低受水深、土地情况的影响。

目前，国内众多厂商如通威、山东丰汇、安泰科、曦日、汇耀品尚、天之杰等均拥有相关建设业绩。例如，通威专注于降低系统成本和提高土地复合利用率，自主研发了基于“大跨度、零扰度光伏柔性支架技术”的渔光一体结构与电气综合解决方案。该方案实现了组件阵列下方净空较传统固定支架高出3米多，东西桩间距不少于40米，占地面积较传统支架减少20%以上，大大提高了土地利用效率，并减少了钢材和桩基的使用量^[2]。此外，中南电力设计院、山东电力工程咨询院、长江勘测设计院等新能源设计单位也在积极推广光伏柔性支架方案相关的工程应用。

2.2 工程技术要求及关键点

本研究项目中，光伏柔性支架光伏阵列的布局采用垂直方向的单排或双排布置方式。具体而言，设计拟采用单块容量540W_p光伏组件，其尺寸为2384mm×1096mm×35mm，单块重量为32kg。该组件以36块为一串，按照2×18块的布局排列，跨度为20.4m，南北向中心间距为8.4m。光伏柔性支架通过预应力钢绞线对组件进行固定，而中支端支座则采用刚构架进行稳固。

鉴于国内尚未制定光伏柔性支架相关的行业设计规范与标准，本项目多次举办技术交流与咨询活动，深入探讨了光伏柔性支架在本项目中的适用性。同时，从技术角度对光伏柔性支架的挠跨比、索拉断力取值等关键问题进行了详细分

析,并针对光伏柔性支架的工程设计提出了若干项设计建议:

(1) 在设计光伏柔性支架时,必须全面考量结构安全性与使用性能的控制参数,依据相关规范,结合工程特性,进行设计参数的设定。

(2) 光伏柔性支架的设计应参照现行的国家及行业标准,明确载荷组合系数。

(3) 在机械状态下,索力与索破断力的比值通常建议为0.5。

(4) 光伏柔性支架组件的倾角选择应综合考量经济效益与结构安全性,不必局限于发电量最大化的最佳倾角。

(5) 对于光伏柔性支架结构安全性至关重要的力学性能参数,建议通过风洞气弹试验进行测定。

(6) 光伏柔性支架的预期使用寿命需确保至少25年,因此在材料选择时必须考虑钢绞线的防腐耐久性以及钢绞线与光伏组件的固定问题。

3. 本工程应用情况

为检验前述设计建议的实用性,本研究在特定区域实施了三家厂商光伏柔性支架的应用实践。项目执行期间,我们严格依据先前提出的设计建议进行设计选型。

首先,依据工程特性及相应规范,在采购技术规范中明确柔性支架设计参数,恒载设定为组件自重 $35.3\text{kg}/\text{块}$,基本风压 W_0 取值为50年一遇的 $0.35\text{kN}/\text{m}^2$,基本雪压取值为50年一遇的 $S_0=0.35\text{kN}/\text{m}^2$,风振系数取值1.5,温差作用范围取值 $+38^\circ\text{C}$ 至 -3°C 之间,挠跨比取值 $1/100$ 。锚具的材料与性能满足国标标准,并采用铸造成形工艺,锚具及其组装件的极限承载力不低于拉索极限断力的95%。

其次,在柔性支架载荷计算分析中,分别按承载能力极限状态和正常使用极限状态考虑荷载组合,明确了载荷组合系数。并且在安装过程中,严格遵循设计参数,并对支架的挠跨比、索拉断力等关键指标进行了持续监测。

同时,特别关注了光伏柔性支架组件的倾角选择,综合考虑经济效益与结构安全性,单排布置倾角为 16° 、双排布置倾角为 21° ,避免盲目追求发电量最大化而选择的

最佳倾角。此外,为确保光伏柔性支架的预期使用寿命至少为25年,我们在材料选择上严格把控,柔性支架结构预应力钢拉索选用高强度低松弛预应力钢绞线,要求钢绞线的拆股钢丝镀层铝含量不低于4.2%,限抗拉强度不低于 1860MPa ,钢绞线弹性模量为 $195 \pm 5\text{Gpa}$,钢丝锌铝稀土合金镀层重量不低于 $278\text{g}/\text{m}^2$,确保了钢绞线的防腐耐久性以及钢绞线与光伏组件的固定问题得到妥善解决。

在项目投入运行并经过一段时间的测试后,光伏柔性支架表现出卓越的稳定性和承载能力。特别是在2024年1月,湖北省遭遇了罕见的雨雪冰冻极端天气,柔性支架依然保持了结构的稳定性,确保了光伏组件的安全运行。此外,柔性支架不仅满足了光伏发电的基本需求,还成功地与渔业养殖相结合。这一实践的成功,进一步证实了光伏柔性支架技术在大规模光伏项目中的应用潜力和价值。

4. 结束语

本研究项目选址于坑塘水面区域,旨在确保项目投资回报率的同时,便于农民进行后续的渔业养殖活动。通过采用光伏柔性支架技术方案,本项目展现了显著的技术优势。具体而言,项目实施了三种成熟的光伏柔性支架设计方案,有效地满足了光伏发电与农业生产双重需求。在国家对新能源光伏发电项目用地管理的规范日趋严格的形势下,光伏柔性支架技术凭借其卓越的投资经济性和对复杂地形的适应性,预示着将迎来技术革新和广泛应用的黄金发展时期。

参考文献:

[1] Xu-Hui He, Hai-Quan Jing, Fang Zhang, Xiao-Ping Wu, Xiao-Jun weng. Wing-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2020.(206)

[2] 王晓辉,刘航,张珂欣,等.高寒地区“渔光一体”项目技术设计和工程建设的研究,2022.(3)

作者简介:邓伟,1981年8月,男,汉族,陕西富平人,大学本科,工程师,研究方向:火电、新能源工程建设与发电技术管理等