

屋面分布式光伏电站支架及基础设计

刘兴佳^{1,2} 卢彩云¹ 耿胜杰^{1,2} 张峰^{1,2} 董云博^{1,2}

1.河北鲲能电力工程咨询有限公司, 河北 石家庄 050000

2.河北省分布式能源应用技术创新中心, 河北 石家庄 050000

[摘要]文中建立了屋面分布式光伏支撑体系的系统性设计方法。针对屋面特殊环境的结构安全问题,重点探讨了承载力评估技术、动态风荷载的精细化分析方法、雪荷载空间非均匀分布模型以及多工况荷载组合优化策略。研究了支架系统的材料腐蚀防护体系拓扑优化方法,特别关注了抗疲劳设计的专项要求与可调支架的核心技术。在基础设计部分,构建了基础-屋盖协同作用模型,提出穿透式基础的三层防水防护机制,完善了配重基础抗滑移设计理论,并给出金属屋面、瓦屋面等特殊屋面的针对性解决方案。

[关键词]屋顶光伏;支撑结构;地基设计;荷载计算;防腐处理

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17101

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Roof Distributed Photovoltaic Power Station Bracket and Foundation Design

LIU Xingjia^{1,2}, LU Caiyun¹, GENG Shengjie^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2}, DONG Yunbo^{1,2}

1. Hebei Kunneng Power Engineering Consulting Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. Hebei Province Distributed Energy Application Technology Innovation Center, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: This article establishes a systematic design method for a distributed photovoltaic support system on roofs. In response to the structural safety issues of the special environment of the roof, this paper focuses on the evaluation technology of bearing capacity, the refined analysis method of dynamic wind load, the non-uniform distribution model of snow load space, and the optimization strategy of multi condition load combination. We studied the topology optimization method of the material corrosion protection system for the support system, with a particular focus on the special requirements for anti fatigue design and the core technology of adjustable supports. In the basic design section, a foundation roof collaborative effect model was constructed, and a three-layer waterproof protection mechanism for penetrating foundations was proposed. The theory of anti slip design for counterweight foundations was improved, and targeted solutions for special roofs such as metal roofs and tile roofs were provided.

Keywords: rooftop photovoltaics; supporting structure; foundation design; load calculation; anti-corrosion treatment

在“双碳”战略的推动下,建筑屋顶安装分布式光伏电站的规模持续扩大。和地面电站完全不同,屋顶环境的空间局限性特别明显,荷载条件也更加复杂,这给支撑结构和基础的适应性带来巨大挑战。光伏支架这个连接组件和屋面的关键载体,它的稳定性好不好,使用寿命长不长,基础连接可靠不可靠,直接关系到电站能不能安全运行几十年。本文打算重点解决屋顶光伏系统的技术难题,围绕屋面特性怎么分析、荷载怎么精确计算、支架结构怎么优化设计以及基础关键技术这些方面开展系统研究,给出实用的设计方法。

1 屋面光伏系统的技术特点

1.1 屋顶环境特殊性分析

屋顶环境的复杂程度首先体现在空间局限性特别突出、微气候条件变化多端、既有屋面结构类型五花八门而且现状参差不齐。空间限制这个因素要求支架系统布局必须做到紧凑高效,同时还要避开那些设备基础、通风口之类的障碍物^[1]。屋面微环境面临太阳辐射更强的情况,昼夜温差更大的问题,腐蚀性介质更容易积聚的现象,还有防水层老化这种潜在风险,对材料选择和防护体系提出了

特别严峻的考验。既有屋面的结构形式多种多样,建造年代有早有晚,材料性能差别很大,当前状况也各不相同,这些不同情况都要求必须进行个性化评估其承载潜力和改造适应性才行的。

1.2 结构安全与荷载适应性要求

作为新增荷载施加于原有建筑结构之上的屋面光伏系统,首要任务是确保建筑主体安全不受损害。支架和基础设计必须严格满足结构强度要求、刚度要求、稳定性要求,并且要具备优秀的荷载适应能力。这种适应能力具体表现为抵抗复杂风荷载,包括吸力和压力的能力,承受不均匀雪荷载的能力,承担设备自重的本事,应对可能检修活荷载的水平,还有抵御地震作用的本领。同时需要充分考虑长期使用过程中可能发生的疲劳效应问题,材料逐渐退化的情况,以及超强台风、暴雪等极端气候事件带来的潜在影响,这样才能确保整个系统在几十年寿命周期内都有足够的安全裕度。

2 屋面特性分析与荷载计算

2.1 屋面结构承载力评估

承载力评估这个核心前置工作,需要详细收集原建筑

的结构图纸、如果有地质勘察报告也要、材料检测报告像强度指标碳化深度锈蚀程度这些数据以及历史维修记录。通过现场勘查来核实结构的实际状况怎么样,尺寸有没有偏差,连接节点是否完好,损伤情况严不严重。依据现行规范例如 GB 50010 和 GB 50017,采用理论计算方法考虑结构类型跨度大小构件尺寸与配筋截面特性这些因素或者结合现场荷载试验的实际操作,综合评估屋面在新增光伏荷载作用下还能承受多少重量。这里需要用到剩余承载力计算公式: $R_d = \phi R_n - D - L_{existing}$, 通过这个公式计算才能确定哪些区域可以安全施加荷载以及最大能加多少的限制值。

2.2 动态风荷载精细化分析

屋面风荷载具有特别显著的动态变化特性和空间分布不均匀的特点。需要基于建筑所在地的风压区划情况基本风压数值建筑体型系数特别是女儿墙高度屋顶设备这些影响因素,并且严格依据 GB 50009 荷载规范的规定进行计算。特别需要关注的是风致振动可能引发的共振效应风吸力在角区和边缘区会被放大的现象组件阵列之间相互干扰产生的额外作用力这些关键问题。风压计算采用基本公式: $W_k = \beta_z \mu_s \mu_z \cdot W_0$, 这里 W_k 是风荷载标准值, β_z 是风振系数, μ_s 是体型系数, μ_z 是风压高度变化系数, W_0 是基本风压。采用计算流体力学 CFD 模拟或者花大价钱做风洞试验可以得到更精确的局部风压分布情况。设计时必须考虑最不利的风向角度,确保支架系统在强风作用下不会发生整体破坏倾覆倒塌或者组件被掀飞起来的严重后果。

2.3 雪荷载不均匀分布模型

屋面雪荷载根本就不是均匀分布的,受屋面积雪漂移影响特别大。依据 GB 50009 规范计算出基本雪压数值之后,必须考虑坡度陡缓屋面形式单坡双坡还是多跨相邻建筑有没有遮挡女儿墙高度以及屋顶凸出物位置这些因素导致的积雪不均匀分布问题^[2]。重点需要分析屋脊位置高低屋面交接处女儿墙背风侧这些特别容易形成雪兜区域的超载风险有多高。采用非均匀分布模型比如梯形分布三角形分布这样的进行荷载布置,才能确保支架系统在局部雪荷载集中作用的地方仍然保持结构安全。

2.4 荷载组合工况优化

支架和基础设计需要考虑多种荷载同时作用的可能性以及它们最不利的组合方式。依据 GB 50068 结构可靠性设计原则,需要分析包含永久荷载自重这类可变荷载风荷载雪荷载活荷载温度作用这些以及偶然荷载地震作用在内的多种组合工况。基本组合可以采用 $S_d = \gamma_G G_k + \gamma_Q Q_k + \psi_c \gamma_W W_k$ 这个公式,其中 γ_G 是永久荷载分项系数取 1.3, γ_Q 是可变荷载分项系数取 1.5, ψ_c 是组合值系数。优化荷载组合的关键在于识别出主导荷载是什么以及它们发生的概率有多大,区分清楚基本组合持久设计状况短暂设计状况和偶然组合地震设计状况的不同要求。特别要关注风荷载与雪荷载不同时组合的规定要求,还有极端工况下的安全系数取值问题,这样才能确保结构在最严

苛条件下仍然满足强度要求和稳定性要求。

3 支架系统结构设计

3.1 材料腐蚀防护体系设计

针对屋面特别严苛的腐蚀环境,材料怎么选择和防护怎么做至关重要。比如 6063-T5 型号的铝合金,凭着优良的耐蚀性和轻质高强的特性成为主流选择。热浸镀锌钢经济性更好,镀层厚度至少要达到 80 μ m,并且必须保证切口位置以及焊缝地方的防护做到位。304 或者 316 这类不锈钢在强腐蚀环境像是沿海地区、化工区这些地方优势更明显。整个防护体系需要系统化设计:基材选什么很关键,表面处理要长效比如镀锌、阳极氧化、高性能涂层这些方式,关键部位比如连接点、切割面这些地方的密封处理怎么做,涂覆富锌漆或者密封胶都是办法,不同金属接触处要采取电偶腐蚀隔离措施,使用绝缘垫片才行。设计寿命必须和光伏系统 25 年以上的使用要求匹配才可以。

3.2 支架结构拓扑优化

拓扑优化的根本目的就是寻找最佳传力路径和材料分布方案。利用有限元分析软件,在满足强度要求、刚度要求特别是控制变形量、稳定性要求还有几何约束比如净空限制、组件尺寸限制这些前提条件下,对支架的主梁、次梁、斜撑以及连接节点的具体布局进行细致优化。优化目标主要包括:最小化用钢量或者用铝量来减轻整体重量和降低成本,最大化结构刚度从而减少变形对光伏组件发电效率可能产生的不良影响,优化构件截面尺寸和形状使其更合理。优化结果常常表现为更科学高效的桁架式结构、梁柱式结构或者悬索式结构,确保各种荷载能够高效传递到基础部位去。

3.3 抗疲劳设计专项

风致振动是造成支架疲劳破坏的最主要原因。进行抗疲劳设计时需要重点关注这么几个方面:高应力区域比如焊缝热影响区、螺栓孔周边区域、连接板边缘区域的应力集中现象怎么控制,采用圆滑过渡设计或者加大倒角尺寸都是有效方法;优先选择延性好、韧性高的优质材料;关键焊缝必须采用全熔透对接焊或者符合标准的角焊缝,并且确保没有焊接缺陷存在,焊趾位置需要打磨得光滑平整;螺栓连接推荐使用高强螺栓并且施加精确的预紧力,这样能有效减少微动磨损带来的损害;对于那些长期承受交变风荷载的关键节点位置,必须依据相关规范例如 Eurocode 3 或者 AISC 的规定进行疲劳寿命评估和严格校核,这个步骤绝对不能省略。

3.4 可调支架关键技术

采用可调支架技术能够有效提升系统发电量。关键技术涵盖好几个重要部分:旋转机构设计方面,无论是单轴还是双轴形式,都需要保证转动过程平稳顺畅、定位精度足够高、锁定机制绝对可靠;驱动方式选择上,电动推杆、液压驱动或者手动操作各有特点,需要平衡好成本投入和自动化需求之间的关系;支撑结构自身的强度和刚度必须满足光伏组件在极端倾斜角度下承受荷载的特殊要求;轴承和密封结构要足够可靠且耐候性好,这样才能防止雨水渗透或者沙尘侵入

导致机构卡死甚至发生锈蚀问题;如果配置智能跟踪控制系统,还需要考虑它如何与电站整体监控系统实现良好集成。整个设计过程中必须时刻想着怎么简化后期维护工作,确保系统能够长期运行可靠稳定,这是我们设计时不能忘记的。

4 基础设计关键技术

4.1 基础-结构相互作用力学模型

想要安全设计基础,前提条件是精确模拟基础和屋面结构之间复杂的相互作用关系。需要建立包含配重块这类基础部件、连接件、支架系统、屋面板或者梁柱这些构件的精细化有限元模型。分析内容主要涉及荷载是怎么传递的路径问题;屋面板在集中荷载作用下产生的局部弯曲应力以及变形情况;配重基础下面屋面板的受压分布规律和局部稳定性表现;穿透连接位置屋面板出现的应力集中现象;还有基础位移比如沉降多少、滑移距离、转动角度对支架内力分布的具体影响。模型必须考虑材料非线性特性比如混凝土开裂过程、钢材屈服行为,以及接触非线性问题像基础与屋面接触压力如何变化这些复杂因素,这样才能验证设计方案到底可行不可行,进而优化基础的具体尺寸大小、安装位置选择和连接方式怎么设计更合理。

4.2 穿透式基础防水三重防护

防水性能对穿透式基础来说就是生命线那么重要。三重防护体系具体包括:第一重物理隔水层,使用高品质柔性防水卷材例如 EPDM、PVC、TPO 这些材料或者专用金属防水盖板,通过预制成型方式或者现场焊接黏接工艺,紧密包裹穿透构件并且牢固黏结在原有屋面防水层上面,形成最主要的密封屏障^[3]。第二重化学密封层,在穿透构件根部位置以及第一重防护边缘区域,使用硅酮胶、聚氨酯密封胶或者 MS 胶这类高性能耐候密封材料进行多道环形密封处理,充分填充微小缝隙形成弹性密封体。第三重排水疏导层,设计专门的导水板或者泛水构件,把万一渗进来的少量水引导到屋面排水系统里去,避免出现积水问题。施工过程必须严格遵守工艺标准,确保各防护层之间可靠搭接并且能够长期耐久,这是施工质量控制的核心。

4.3 配重基础抗滑移设计

抗滑移能力是配重基础设计最核心的问题。设计要点有这么几个方面:首先要精确计算最不利荷载组合特别是风吸力作用下的滑移力大小;然后根据屋面实际类型是光滑表面还是粗糙表面来确定合理的摩擦系数数值;接着设计足够的基础压重比如混凝土块、钢制水箱这类配重物,确保抗滑移安全系数也就是抗滑力除以滑移力的比值满足规范要求通常不小于 1.5 这个标准;还要优化基础底面积大小和具体形状比如增加凸肋结构、选用摩擦系数高的橡胶垫层材料这些方法来增大摩擦力;必要时可以设置抗剪键或者限位装置直接嵌入屋面结构层里面去,这样能提供额外的机械抗滑移能力,不过需要仔细评估这么做对屋面防水可能造成的负面影响才行。

4.4 特殊屋面解决方案

遇到特殊屋面必须采用定制化的解决方案。对于轻型金属屋面像彩钢瓦、直立锁边屋面这种,优先采用专用夹具例如边缘夹、中缝夹来连接,完全避免穿透屋面。如果实在需要穿透,必须使用带 EPDM 密封垫的专用自攻螺钉或者特殊螺栓,并且严格进行打胶密封处理。瓦屋面包括陶瓦、沥青瓦这些类型,应该设计专用挂钩或者导轨系统,巧妙搭扣在瓦片下方或者固定龙骨上面,绝对不能破坏瓦片本身的防水功能这个重要特性。种植屋面比较麻烦,需要采用架空式支架系统,基础通常采用微型桩基这类形式穿透防水层和阻根层深入结构层内部,必须做好穿透节点的严密防水处理,同时确保支架高度足够满足植被生长需求和后期维护空间要求。至于 BIPV 一体化屋面,应该将支架和屋面围护结构比如光伏金属屋面、光伏瓦这些统一协调设计,让荷载传递和防水问题在系统层面就得到根本性解决,这是最理想的处理方式。

5 结束语

屋面分布式光伏电站的支架及基础设计实在是一项融合了结构工程技术、材料科学技术、风工程技术还有建筑防水技术多个领域的综合性挑战任务。本文系统探讨了从屋面特性怎么分析、荷载怎么精确计算,到支架系统结构优化方法以及基础关键技术怎么设计这些关键点。研究表明,想要设计成功的话,必须立足于对屋面特殊环境与荷载条件的深刻理解这个基础之上,采用精细化分析方法进行操作,并且针对性地解决防腐处理、抗疲劳设计、防水技术以及抗滑移措施这些核心问题才行。可调支架技术的合理应用确实能够进一步提升整个系统的发电效率水平。面对金属屋面、瓦屋面、种植屋面等特殊场景的时候,定制化解决方案绝对是必不可少的环节。未来研究需要持续关注新材料应用、新工艺开发、智能监测技术、运维管理技术,以及极端气候条件下结构性能的长期可靠性评估这些重点方向,这样才能推动屋面光伏系统朝着更安全的方向、更高效的目标、更耐久的品质以及更智能的层次不断发展进步,这是我们行业从业者必须坚持的技术路线。

基金项目:河北省分布式能源应用技术创新中心资助项目(SG20182050)。

[参考文献]

- [1]朱鸿涛.极寒高原农牧建筑与光伏储能系统优化设计研究[D].西安:西安建筑科技大学,2024.
 - [2]张发宽.分布式光伏发电在大型水利枢纽输水渠道上的应用分析[J].水利水电工程设计,2025,44(2):34-37.
 - [3]陈毅锋,石更生,陈旻芳,等.考虑复杂地势的斜单轴光伏跟踪支架逆跟踪控制策略[J].科技风,2025(14):1-4.
- 作者简介:刘兴佳(1984.12—),毕业于华北电力大学,工业与民用建筑专业,单位:河北鲲鹏电力工程咨询有限公司,电力设计,工程师。