

新能源电站建筑结构与优化研究

石鑫¹ 赵光明²

1. 华电郑州机械设计研究院有限公司, 河南 郑州 450046

2. 华电科工股份有限公司, 北京 100070

[摘要]在世界能源结构变化加快的同时, 新能源电站建设规模逐渐增大, 其建筑设计所面临的载荷种类繁多, 对环境要求高、使用寿命长的成本敏感等问题也逐渐凸显出来。本文综述了光伏电站、风电场及储能电站三大主要类型的新能源电站建筑设计的关键技术问题, 在此基础上着重介绍了基础结构的设计方法、钢结构的应用以及设备支承系统还有耐久性的防腐、防火等问题。另外还就结构的选择优化、材料优化和节约能源减少耗损、安全性和经济性的综合平衡优化、智能化数字化优化等方面进行了进一步的研究。研究发现, 在整个生命周期中把 BIM 技术和全生命周期管理理念应用到结构设计以及维护保养方面可以提高火电厂结构的安全性和经济性, 从而为新能源电站的大规模建设奠定基础。

[关键词]新能源电站; 建筑结构设计; 结构优化

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19591

中图分类号: TM615

文献标识码: A

Research on Structural Design and Optimization of New Energy Power Station Buildings

SHI Xin¹, ZHAO Guangming²

1. Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450046, China

2. Huadian Heavy Industries Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract: With the accelerated changes in the world's energy structure, the construction scale of new energy power stations is gradually increasing. The various types of loads faced by their building designs, as well as cost sensitivity issues such as high environmental requirements and long service life, are also becoming increasingly prominent. This article summarizes the key technical issues in the design of building structures for three main types of new energy power plants: photovoltaic power plants, wind farms, and energy storage power plants. Based on this, it focuses on the design methods of basic structures, the application of steel structures, equipment support systems, and durability issues such as corrosion and fire prevention. In addition, further research has been conducted on structural selection optimization, material optimization, energy conservation and consumption reduction, comprehensive balance optimization of safety and economy, intelligent and digital optimization, and other aspects. Research has found that applying BIM technology and full lifecycle management concepts to structural design and maintenance throughout the full lifecycle can improve the safety and economy of thermal power plant structures, laying the foundation for large-scale construction of new energy power plants.

Keywords: new energy power station; architectural structural design; structural optimization

引言

新能源电站是新能源电力生产和供应的基础设施之一, 随着装机容量以及投资比例不断提高, 光伏电站、风电场以及各种新型储能电站的建筑物更是要起到设备承载与保护的基础作用, 同时也要影响到整个电站运行期间的安全水平、经济效益及维护保养等方面的工作。但是现阶段新能源电站建筑设计还存在着一些不足之处, 在设

计标准方面还不能做到统一化; 不同类型电站结构的选择也不能做到有针对性地设计; 耐久性的设计也忽视了所处特殊环境的影响; 施工过程与后期维护之间的衔接也不够紧密等等。以上这些不足也在一定程度上阻碍了整个新能源工程效益的实现。本文的研究主要围绕着新能源电站建筑物结构设计的关键技术和改进措施展开, 在此基础上形成一套完整的从设计、建造直至运行的完整设计方案, 对

工程建设有指导意义。

1 新能源电站建筑结构设计概述

新能源电站按能源转换方式主要分为光伏电站、风电场以及储能电站三类。光伏电站可分为地面集中式、屋顶分布式两类，其中大规模光伏电站有着光伏支架个数多、支架上受力较小的特点；屋顶光伏电站对原建筑承载力验算以及防水措施提出了特定要求。而风力发电场除包含发电机组基础、升压站、换流站等设施外还有大型风电场柔直户内换流站，由于其布置紧凑、荷载分布复杂，是结构设计中的重点及难点所在。近年来发展迅猛的储能电站主要有电化学储能站、氢储能站等类型，对其结构方案与散热通风一体化的设计也提出了新的挑战。新能源电站建筑设计的原则可以归纳为“安全适用、技术先进、经济合理、绿色环保”的十六字方针。相比于传统的工业建筑而言，新能源电站结构的设计受的影响因素较多：一是荷载组合的特点，不仅要考虑设备荷载、风荷载，还要考虑温度荷载和地震作用；二是地理环境的差异性，电站可能会在高寒、高海拔、沿海盐碱、地质不良的地方；三是工期紧迫的要求，新能源工程项目一般工期都比较紧张，对结构方案的统一性和简便性有很高的诉求。纵观未来，新能源电站的建筑设计将会向着结构系统化、设计方案标准化的方向发展、运维智能化、寿命全程低碳化。全生命周期理论认为应把火电厂工程建设从规划设计开始到最终退役，作为一个完整的体系，通过对各个阶段进行综合管控来达到质量、进度和环保效益最优化的目的。

2 新能源电站建筑结构设计关键技术

2.1 基础结构设计技术

新能源电站的基础设计应结合地质状况、上部荷载以及周围环境等因素来确定，在光伏电站支架基础方面主要有混凝土独立基础、预应力管桩基础、螺旋钢桩基础等多种方式，在淤泥质土等地耐力很低的地方或者农业复合使用地方，预应力管桩因具有施工速度快、少扰动的优点而广泛使用；风力发电机基础受到很大的倾覆力矩和周期性的荷载作用，一般选择大体积混凝土重力基础或者灌注桩筏型基础，但是基础设计主要解决的就是大体积混凝土温度裂缝控制和抗疲劳性能的问题。对于固定式单桩基础海上光伏结构来说，由于其经济、方便、标准化好等原因使得目前普遍使用此类型方案。

2.2 钢结构设计与应用

钢结构具有强度大、重量轻、安装方便等特点，在新能源发电站建筑物中应用较多，在光伏支架系统中广泛使用的是冷弯薄壁型钢，经过改进截面形状及连接方式可使

结构在保证一定承载力情况下大幅度减少耗钢量。不同组合的光伏支架方案差异很大，表 1 对单柱、双柱两种光伏支架方案进行经济技术比较。

表 1 单柱与双柱光伏支架方案技术经济对比

比较项目	单柱支架方案	双柱支架方案
用钢量 (kg/组)	516.97	450.08
基础桩径 (m)	0.35	0.30
地形适应性	较好，适合复杂地形	一般，要求地形较平坦
施工便捷性	桩数减半，工期明显缩短	桩数较多，施工周期长
结构稳定性	对地质条件变化敏感	结构稳固，受力性能好
整体美观性	较好	一般
综合造价	较高	较低

单柱式光伏支架结构便于施工安装，适应能力强，整体美观大方，比较适用于地势起伏较大的地区或是工期紧张的情况，但是其使用的钢材量相比双柱式方案高出约 14.9%，因此整体造价也会相对较高，在风电场升压站以及换流站上部结构建设中同样以钢结构为主。钢结构混凝土组合桁架适用于大规模海上光伏电站上部建筑，利用混合体系可以很好地发挥出混凝土材料耐腐蚀寿命长、刚性强、造价低、钢结构安装方便的特点。

2.3 混凝土结构设计技术

混凝土主要用于新能发电站的基础、设备平台、电缆沟道以及少量多层建筑。大体积混凝土浇筑过程中必须对水泥水化热加以限制，避免温度裂缝的发生。而处在侵蚀环境的混凝土结构，则应采取提升混凝土等级、增大保护层厚度、添加阻锈剂或者使用环氧涂层钢筋等综合防护手段。风力发电混凝土塔筒近几年来被广泛应用，它利用了混凝土优良的抗压性和钢筋优越的抗拉性二者结合的优势，并且由于混凝土本身对于盐雾等腐蚀因素有一定的抵抗力，所以全寿命周期内维护费用大大低于钢管塔筒。

2.4 电站设备支撑结构设计

装置支撑框架是将建筑主体与制造装置相联系的重要桥梁，装置支撑框架的设计水平决定着整个装置工作的稳定性，光伏组件支撑框架要对支架倾斜角度以及方向进行精细计算，使发电量达到最大值；在储能站内电池框架支撑架的设计还要兼顾承载力、排热、防火阻隔等功能性指标。氢能储能站中质子交换膜燃料电池的结构设计要在微小尺寸级别的流道布置上做到细致精确，此结构的设计需要考虑到气体扩散层厚度、电极高度和肋片宽度这三大因素。

2.5 防腐、防火及耐久性设计技术

新能源场站大多在室外环境，钢结构防锈尤为重要。热浸镀锌为现阶段最为成熟有效的防锈方式，针对 C4 级

及其以上腐蚀环境可以适当加大锌层厚度或是使用重防腐涂料系统。防火设计上,变电站的主变与储能柜区都是高危火灾隐患区段,其结构件应该符合相应的耐火等级规定。从实际情况来看,对于屋顶光伏电站的防水也十分关键,支架穿过屋面板处要加装防水套管或者密封圈等可靠的做法以防由于安装不合理造成雨水灌入的现象。

2.6 BIM 技术在结构设计中的应用

BIM 技术已经成为新能源电站建筑设计不可或缺的技术手段,在设计过程中,通过 BIM 模型可以进行结构、建筑、电气、水暖等各专业的综合设计,并能够很好地处理管线碰撞及预留预埋点等问题;从整个项目生命周期出发, BIM 技术支持构建运维数据库,将设计环节中的混凝土配合比等指标与实际运行期内结构状态变化趋势联系起来,做到对质量问题及时预警并预防为主。另外, BIM 模型还为后期进行结构监测及维护保养工作提供必要的信息依据。

3 新能源电站建筑结构优化方法研究

3.1 结构选型优化分析

结构选型是优化设计的第一步,在方案阶段就需要比较选取。例如光伏支架有固定支架结构简洁,维护费用少,但是发电量低于跟踪支架,平单轴跟踪支架可以提高发电量 15%~25%,但是其结构复杂、故障几率升高;选择哪种类型需要针对项目所在地的太阳辐射强度以及土地的投入价格、发电上网的价格来进行全生命周期的经济效益分析。固定式的海上光伏支架结构主要有钢砼组合桁架结构、大跨度空间钢结构桁架结构、空间网架结构和传统的钢结构支架。通过分析发现空间结构在各方面综合比较来看最好,经济性和施工便利性与标准化程度都较高。对于塔式太阳能光热电站,为解决发电区呈圆形布局导致局部存在大量空地的问题,以“割一刀”的方式加以改进可以有效地提高土地利用率;而对于风电塔筒的选择上,采用钢结构或者混凝土结构或者两者相结合皆有其相应的适用场合,钢结构塔筒制造工艺成熟、建设周期快适用于 100m 以下的轮毂高度需求,而混凝土塔筒由于自身的强度高、耐疲劳性好等优势更适应大型机和超高层的要求,相比之下混钢结构塔筒则具有更强的整体性和稳定性,在 140m 以上的超高层塔应用下更加具备经济效益的优势,在具体选择时还要结合实际的运输情况、现场吊装能力和后期运维费用。

3.2 材料优化与节能降耗

材料选取是最直接的方式,对结构成本下降贡献最大,主要包含高强度材料应用、截面形式改进、构造措施精简

三个部分。在保证承重安全及位移控制的基础上,用 Q355B 以上级别的钢材会使构件截面积更小;冷弯形成的工艺相比于热轧可以更加减轻重量。为了最大化地利用好综合能源站建筑围护结构节能、光伏使用等减碳作用力,需要建立建筑成本-能耗-碳排放之间的关系公式,在整个生命周期碳排放量最小作为优化目标进行综合配置,这个公式可以在哈尔滨、南昌、广州等地不同的气候条件下,给一些减碳技术提供优先顺序以及最佳组合方式。

3.3 结构安全性与经济性协调优化

安全性和经济性的统一是结构设计中经常遇到的问题,而优化设计就是对这两者之间的统一关系进行寻找,这需要通过可靠性理论来进行定量计算分析,在结构的重要性系数、荷载分项系数以及材料分项系数选取上合理选择,从而使得结构的安全裕量在满足规范的要求的基础上,防止出现过大的设计所带来的无效投资。针对新能源电站里广泛应用的一些标准化件,在极限状态的设计中可以明确地得到其承载力大小,合理地利用好材料强度。对于风电混凝土塔筒的设计,若采取全寿命周期的质量管理方式的话可以使塔筒维护费用减少大约为 23%,服役年限增加约为 8 年,可见前期的投资与后期产生的收益是相辅相成的关系。

3.4 智能化与数字化优化技术应用

人工智能技术给结构改进提供了新思路。基于 PSO 优化策略下光伏电站智能设计方案,把光伏板类型的选择以及安装角度还有排列间距等作为设计变量,最大化地实现年发电总量作为目标函数,在满足投资金额上限条件的基础上构造出多变量优化数学模型,仿真实验发现可以提高新型大容量光伏电站年发电量约 3.2%以及缩短投资回报时间 0.5 年。而基于代理模型的优化方案可以在保持相对较低准确度的情况下大大减少计算量,适合燃料电池流道设计这样的多个物理量相互关联的大规模优化难题。数字孪生技术把 BIM 模型同物联网检测信息结合起来就形成了一个完整的光伏发电站模型,能够使对结构的状态进行及时的判断与提示,在运营维护的时候有理论基础。使用智能化的设计平台可以使光伏电站的设计周期减少 90%,收益增加 20%,平准化度电成本下降大约 5%。

4 新能源电站建筑结构施工与运维管理

4.1 施工阶段结构质量控制

工程质量是实现设计目的的根本保证,更是结构安全的第一关卡,在新能源电站工程建设的质量管理中应该注意以下几个方面:地基及基础隐蔽验收、钢结构加工误差以及焊缝质量把关、大体积混凝土温度控制防止开裂措施

执行情况、设备预埋件精确安装等节点。全生命周期管理的思想认为把电站前期的市场开拓、中期的施工建设和后期的运维都作为一个整体来对待,施工期间要做好从头到尾的过程资料记录工作,加强对混凝土浇筑温度、保湿时间以及结合面质量等方面的把控。设置传感器持续观测受力状态,在施工期间同时获取的数据一方面可以对当前施工方案作出相应调整,另一方面也能为后续运行阶段提供参考依据。

4.2 结构运行维护与全寿命周期管理

风电站正式发电之后,结构维护管理便成了确保长期安全稳定工作的重点,工作内容有如下几点:定时进行结构外貌巡视、重点部位防腐蚀检查、地基下沉监测以及连接螺栓扭力抽检等等。全寿命周期管理模式是以整个结构寿命期内总费用最低为宗旨,兼顾了从规划到施工再到运行及最后拆卸各个时期的投资效益问题。在风电公司设备管理方面,全寿命期管理应该贯穿于设备选购、组装测试、使用保养到最后处置更换的一系列流程当中,实现闭环式管理。对于已经服役多年的旧电站应结合其结构检测评估提出修复加固或者延长使用年限的办法,在退役时考虑到混凝土破碎再生处理等资源再利用办法,最大化地发挥出现有资产效益。

5 结语

新能源电站是新型能源发展的主要形式,而建筑构造设计的好坏直接影响到发电运行中的安全性和经济效益,本文就新能源电站建筑结构设计的关键技术和优化措施以及后期维护三个方面展开全面的总结,得出以下几点结论:一是对于不同的新能源电站应该根据其自身情况做出不同的设计方案,钢结构由于其便捷的优点是首选方案,但是在腐蚀严重或者是地震严重的区域要慎重考虑;二是优化措施应当在结构的选择、材料的应用、安全与经济性的平衡以及智能型技术上进行一体化的设计,最终实现的是全周期费用最低化的目标,在此基础上光伏支架方案的选择、智能型优化算法的使用能够有效提高设计方案的质

量。三是 BIM 技术和全寿命周期管理模式的高度结合,将是提高新能源电力建设结构设计方案的新趋势,在整个项目生命周期内都应该予以应用。展望未来,“双碳”的推进会使得新能源的装机容量继续增加,结构设计标准化、模块化、智能化程度也需要提高,相应的设计标准也需要尽快建立起来。

[参考文献]

- [1] 哈衣那尔·吐尔艾力,高亮,魏立尧,等.基于粒子群优化的荒漠地区大型光伏电站智能设计方法[J].新疆石油天然气,2025,21(4):81-89.
- [2] 陈志刚,田鑫,张小龙.厂房建筑光伏项目开发、设计与施工探讨[J].现代建筑电气,2024,15(4):51-56.
- [3] 刘莹芳,邹耀东,陈银辉,等.基于全生命周期低碳的综合能源站建筑节能-光伏利用综合优化模型研究[J].建筑节能(中英文),2024,52(10):7-16.
- [4] 张向向,赵大军,侯献业,等.单柱固定光伏系统受荷特性及影响机制[J].福州大学学报(自然科学版),2025,53(2):244-252.
- [5] 马令勇,田航臣,韩杨,等.严寒地区光伏支架受力分析及优化[J].节能技术,2024,42(3):237-243.
- [6] 李伟豪,刘伟,马涛,等.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(6):105-114.
- [7] 嵇兴康,杨冠杰.电化学储能电站布置方式经济性分析和安全防范[J].能源工程,2024,44(4):15-19.
- [8] 邱璐.大规模储能电站的设计技术分析[J].电子技术,2024,53(8):224-225.
- [9] 何德恒,杨峥.电力行业运用绿色节能施工技术的探讨[J].节能,2025,44(6):145-147.

作者简介:石鑫(1984—),男,高级工程师,本科/学士,从事火电、新能源及多能耦合联合供能方面的研究工作;赵光明(1985—),男,高级工程师,研究生学历,工学硕士学位,从事火电、新能源方面的研究工作。