

风力发电机在电力系统中的优化配置与经济性分析

李永宁 杨燕

酒钢集团宏晟电热公司 甘肃嘉峪关 735100

摘要: 随着全球对清洁能源需求的不断增长, 风力发电作为一种重要的可再生能源利用方式, 在电力系统中的地位日益凸显。本文深入探讨了风力发电机在电力系统中的优化配置方法, 并对其经济性进行了全面分析。通过对风力资源评估、风电场布局优化、机组选型与容量确定等方面的研究, 阐述了实现风力发电机优化配置的关键技术与策略。同时, 从投资成本、运营维护成本、发电收益以及政策补贴等多个角度, 详细分析了风力发电的经济性。研究表明, 合理的优化配置能够显著提高风力发电的效率与稳定性, 增强其在电力市场中的竞争力, 为推动风力发电产业的可持续发展提供有力支撑。

关键词: 风力发电机; 电力系统; 优化配置; 经济性分析

引言

在全球能源转型的大背景下, 传统化石能源的逐渐枯竭以及其带来的环境污染问题促使各国积极寻求可再生、清洁的能源替代方案。风力发电以其资源丰富、清洁环保、可持续等显著优势, 成为世界各国能源发展战略中的重要组成部分。由于风能的间歇性和波动性特点, 大规模风力发电接入电力系统给系统的稳定性、可靠性和经济性带来了一系列挑战。如何在电力系统中实现风力发电机的优化配置, 充分发挥其发电潜力, 同时降低对系统的不利影响, 并提高其经济性, 成为当前电力领域研究的热点与重点问题。对风力发电机在电力系统中的优化配置与经济性进行深入研究, 不仅有助于提高风力发电的效率和质量, 促进风力发电产业的健康发展, 还对保障能源安全、推动可持续能源转型具有重要的现实意义。

1. 风力发电技术发展趋势

随着科技的不断进步, 风力发电机技术呈现出以下几个主要发展趋势, 一是单机容量不断增大。为了降低单位发电成本, 提高风能利用效率, 风力发电机的单机容量正朝着更大的方向发展。目前, 海上风力发电机的单机容量已突破10MW, 未来还将继续提升。二是叶片技术不断创新。为了提高风能捕获能力, 风力发电机的叶片长度不断增加, 同时采用新型材料和设计理念, 以减轻叶片重量, 提高叶片强度和韧性。三是智能化控制技术广泛应用。通过引入先进的传感器、通信技术和智能算法, 风力发电机能够实现对风速、风向、功率等参数的实时监测与精确控制, 提高发电效率和

稳定性, 降低运维成本。四是海上风电技术快速发展。海上风能资源丰富、风速稳定、不占用陆地资源, 随着海上风电技术的不断成熟, 海上风电将成为未来风力发电发展的重要方向^[1]。

2. 风力发电机在电力系统中的优化配置

2.1 风力资源评估

在拟建设风电场的区域, 需设置多个测风塔, 安装风速仪、风向标等设备, 对不同高度的风速、风向进行长期、连续的测量。同时, 收集当地的气象数据, 包括气温、气压、湿度等, 以便综合分析风力资源状况。测量数据的时间跨度一般要求至少为一年, 以获取较为完整的风速变化信息。

对收集到的风速数据进行统计分析, 计算平均风速、风速标准差、风切变指数等参数。通过威布尔分布、瑞利分布等概率分布函数对风速数据进行拟合, 建立风速概率分布模型, 以预测不同风速出现的概率。此外, 还需分析风速的日变化、季节变化规律, 为风力发电机的选型与运行调度提供依据。

根据风速数据和风力发电机的功率特性曲线, 计算风能密度、年发电量等风能资源评估指标。风能密度是衡量一个地区风能资源丰富程度的重要指标, 其计算公式为:

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3$$

其中, W 为风能密度, ρ 为空气密度, v 为风速。年发电量是评估风电场经济效益的关键指标, 可通过对不同风速下的发电量进行积分计算得到:

$$E = \int_{v_{in}}^{v_{out}} P(v)f(v)dv$$

其中, E 为年发电量, P(v) 为风力发电机在风速 v 下的功率输出, f(v) 为风速概率密度函数, v_{in} 和 v_{out} 分别为风力发电机的切入风速和切出风速。

2.2 风电场布局优化

风电场布局优化的目标是在给定的风电场区域内, 合理确定风力发电机的位置, 以最大限度地提高风能利用效率, 减少机组之间的尾流影响, 降低建设成本。尾流效应是指当风吹过风力发电机时, 在其下游会形成一个风速降低、湍流增强的区域, 对后续风力发电机的发电性能产生负面影响。尾流效应的大小与风力发电机的间距、排列方式、地形地貌等因素有关。通过数值模拟方法, 如计算流体力学 (CFD) 模型, 对风电场内的尾流效应进行分析, 可得到不同布局方案下风力发电机的尾流速度分布和功率损失情况。

为了实现风电场布局的优化, 可采用多种优化算法, 如遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等。这些算法通过不断迭代搜索, 在满足一定约束条件 (如风力发电机之间的最小间距要求、风电场边界限制等) 的情况下, 寻找使风电场总发电量最大或总成本最小的布局方案。

2.3 机组选型与容量确定

在选择风力发电机组时, 需综合考虑多种因素, 包括当地的风力资源条件、风电场的建设规模、地形地貌、电网接入要求以及机组的技术性能、可靠性、价格等。一般来说, 应优先选择适合当地风速范围、发电效率高、可靠性强、维护方便且性价比高的机组^[2]。

对于风力资源丰富、风速较高的地区, 可选择单机容量较大、额定风速较高的机组; 而对于风力资源相对较弱、风速较低的地区, 则宜选择启动风速低、在低风速下发电性能好的机组。同时, 还需考虑机组的抗恶劣环境能力, 如在沿海地区, 需选择具有良好防腐性能的机组; 在高海拔地区, 需选择适应低气压环境的机组^[3]。

确定风电场中风力发电机的容量, 需综合考虑电力系统的负荷需求、电网的接纳能力、风电场的投资成本和经济效益等因素。常用的容量确定方法有以下几种: 基于负荷需求的方法: 根据所在地区的电力负荷预测, 结合风电场在电力系统中的定位, 确定风电场需要承担的负荷比例, 从而计算出风电场的装机容量。基于电网接纳能力的方法: 考虑电

网的输电容量、稳定性要求以及对风电的消纳能力, 通过电网潮流计算、稳定性分析等手段, 确定风电场接入电网后不会对电网运行产生不利影响的**最大装机容量**。

2.4 与其他电源的协同优化配置

在电力系统中, 风力发电具有间歇性和波动性特点, 为了提高电力系统的供电可靠性和稳定性, 实现电力的可靠供应, 需要将风力发电机与其他类型的电源 (如火电、水电、储能等) 进行协同优化配置。风力发电与火力发电联合运行是一种常见的电源协同配置方式^[4]。通过合理安排火电机组的发电计划, 使其在风力发电不足时补充电力供应, 在风力发电过剩时减少发电量, 从而平抑风电的波动, 保障电力系统的功率平衡。在风 - 火联合运行中, 需建立合理的协调控制策略, 根据风速预测和电力系统负荷需求, 优化火电机组的启停和出力调整, 以提高系统的运行经济性和可靠性。

在有水电资源的地区, 可实现风力发电与水力发电的联合运行。水电具有调节灵活、响应速度快的优点, 能够快速跟踪风电的功率变化, 对风电进行有效调节。通过制定合理的风 - 水联合调度方案, 充分发挥水电的调节作用, 可提高电力系统对风电的接纳能力, 减少弃风现象的发生。

储能系统 (如电池储能、抽水蓄能等) 的引入为风力发电的稳定运行提供了有效解决方案。在风力发电过剩时, 将多余的电能储存起来; 在风力发电不足或电力系统负荷高峰时, 释放储存的电能, 补充电力供应。风 - 储联合运行能够平滑风电功率波动, 提高风电的电能质量, 增强风电在电力市场中的竞争力。同时, 通过优化储能系统的充放电策略, 可进一步提高风 - 储联合系统的经济性和可靠性^[5]。

3. 风力发电机的经济性分析

3.1 成本构成

初始投资成本是风力发电项目建设初期的一次性投入, 主要包括风力发电机设备购置费用、塔架及基础建设费用、电气控制系统费用、输变电设备费用、土地购置或租赁费用以及项目前期的可行性研究、勘察设计、环境影响评价等费用。其中, 风力发电机设备购置费用占初始投资成本的比重最大, 其价格受到单机容量、技术水平、市场供需关系等因素的影响。随着风力发电技术的不断成熟和规模化生产的推进, 风力发电机设备价格呈下降趋势, 但初始投资成本仍然是制约风力发电项目经济性的**重要因素之一**。

运营维护成本是风力发电项目在运行期间每年需要支

出的费用,主要包括设备的定期维护保养费用、零部件更换费用、故障检修费用、人员工资费用、保险费用以及电网接入费用等。运营维护成本与风力发电机的可靠性、使用寿命、运行环境等因素密切相关。通过采用先进的设备监测与故障诊断技术,优化运维管理策略,可有效降低运营维护成本,提高项目的经济效益。

对于大多数风力发电项目来说,需要通过融资来解决初始投资资金问题。融资成本主要包括贷款利息、债券发行费用以及其他融资相关的手续费等。融资成本的高低取决于融资方式、融资期限、贷款利率等因素。政府的政策支持(如贴息贷款、绿色金融政策等)有助于降低风力发电项目的融资成本,提高项目的经济性。

3.2 发电收益分析

上网电价是影响风力发电项目发电收益的关键因素之一。目前,各国普遍采用不同的上网电价政策来支持风力发电产业的发展,主要包括固定上网电价政策、标杆上网电价政策和竞价上网电价政策等。固定上网电价政策是指政府根据风力发电项目的投资成本、运营成本等因素,制定一个固定的上网电价,在项目运营期内保持不变。标杆上网电价政策是将全国或地区分为不同的风能资源区,分别制定相应的标杆上网电价,同一资源区内的风力发电项目执行相同的上网电价。竞价上网电价政策则是通过市场竞争的方式,由发电企业自行申报上网电价,按照价格优先的原则确定中标企业和上网电价。合理的上网电价政策能够保障风力发电项目获得稳定的发电收益,促进产业的健康发展。

根据风力资源评估结果和风力发电机的功率特性曲线,可对风电场的年发电量进行预测。发电量预测的准确性直接影响到发电收益的计算。发电收益等于发电量乘以上网电价,再扣除相关税费。在计算发电收益时,还需考虑风力发电项目可能获得的其他收入,如参与电力辅助服务市场获得的收益、碳减排交易收益等。通过对发电收益的详细分析,可评估风力发电项目的盈利能力和经济可行性。

3.3 政策补贴影响

为了鼓励风力发电产业的发展,各国政府纷纷出台了一系列政策补贴措施,这些补贴政策对风力发电项目的经济性具有重要影响。投资补贴是政府在风力发电项目建设初期给予的一次性补贴,旨在降低项目的初始投资成本,提高项目的投资吸引力。投资补贴的方式主要有现金补贴、设备补贴等。例如,我国在过去曾对部分风力发电项目给予过投资补贴,有效促进

了风电产业的快速发展。度电补贴是根据风力发电项目的实际发电量给予的补贴,补贴金额随着发电量的增加而增加。

税收优惠政策也是常见的政策补贴方式之一,主要包括减免企业所得税、增值税等。通过实施税收优惠政策,可降低风力发电项目的运营成本,提高项目的经济效益。例如,我国对风力发电企业实行增值税即征即退 50% 的政策,有效减轻了企业的税收负担。随着风力发电技术的不断进步和成本的逐渐降低,政策补贴将逐步退坡,风力发电项目将逐渐走向市场化竞争。因此,提高风力发电的经济性,降低对政策补贴的依赖,是风力发电产业可持续发展的关键。

4. 结束语

综上所述,风力发电机在电力系统中的优化配置与经济性分析是推动清洁能源发展的关键课题。通过综合考虑风资源特性、与其他电源协同、电网约束等因素进行优化配置,能够有效提升电力系统稳定性与风力发电消纳能力;运用净现值、内部收益率等多维度经济性评价指标,可科学评估项目投资价值与经济效益。然而,当前风力发电仍面临间歇性难题待解、部分地区建设成本较高等挑战。未来,随着储能技术突破、智能电网发展及政策支持体系完善,风力发电有望在优化配置与经济性提升上实现新跨越,为全球能源转型与可持续发展注入强劲动力。

参考文献:

- [1] 黎强强. 双馈风力发电机的动力学行为与随机稳定性分析方法 [D]. 兰州理工大学, 2024. DOI:10.27206/d.cnki.gsgsu.2024.001255.
- [2] 姚雄. 高比例可再生能源接入下电力系统惯量支撑及评估研究 [D]. 山西大学, 2024. DOI:10.27284/d.cnki.gsxu.2024.000480.
- [3] 袁栳钧, 冯月媛. 鼠笼式风力发电机串联动态电压调整器的模拟研究 [J]. 电子元器件与信息技术, 2024,8(09):154-157. DOI:10.19772/j.cnki.2096-4455.2024.9.046.
- [4] 李冠森. 新能源发电技术在电力系统中的应用 [J]. 光源与照明, 2022,(02):198-200.
- [5] 雷静静. 电力系统电力电子技术应用探讨 [J]. 技术与市场, 2020,27(01):164+166.

作者简介: 李永宁 (1987—) 男, 汉, 甘肃省合水县人, 工程师, 从事新能源设备管理工作。

基金项目: 嘉峪关市科技计划“高比例新能源接入企业电网安全稳定分析研究与应用”(23-03)