

风电新能源发展与并网技术探讨

任朝阳

浙江华东院控股有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19239

[摘要] 在全球应对气候变化、推动能源结构转型的大背景下,风能作为一种清洁、可再生、资源丰富的新能源,已成为全球能源体系的重要组成部分。然而,风电固有的间歇性、波动性和不确定性给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战。本文系统梳理了全球及中国风电发展的现状与趋势,深入分析了风电大规模并网对电力系统在调频调峰、电压稳定、电能质量、继电保护等方面带来的影响,并重点探讨了当前主流的风电并网关键技术,包括变流器控制策略、无功补偿技术、储能系统集成、虚拟同步机技术以及先进的调度与预测方法。最后,文章展望了未来风电并网技术的发展方向,提出构建以高比例可再生能源为主体的新型电力系统需要多技术协同、多主体参与和体制机制创新,以实现风电高质量、高比例、高效率的消纳与利用。

[关键词] 风力发电; 新能源; 并网技术; 电力系统稳定性; 变流器控制; 储能系统; 虚拟同步机
中图分类号: TM614 **文献标识码:** A

Discussion on the Development of Wind Power New Energy and Grid-Connection Technology

Chaoyang Ren

Zhejiang Huadong Institute Holdings Co., Ltd.

[Abstract] Against the background of global climate change response and energy structure transformation, wind energy, as a clean, renewable, and resource-rich new energy, has become an important part of the global energy system. However, the inherent intermittency, volatility, and uncertainty of wind power pose serious challenges to the safe and stable operation of power systems. This paper systematically reviews the current status and trends of wind power development globally and in China, deeply analyzes the impact of large-scale wind power grid connection on power systems in terms of frequency regulation, peak shaving, voltage stability, power quality, and relay protection, and focuses on discussing current mainstream wind power grid-connection key technologies, including converter control strategies, reactive power compensation technology, energy storage system integration, virtual synchronous generator technology, and advanced dispatching and forecasting methods. Finally, the paper looks forward to the future development direction of wind power grid-connection technology, proposing that the construction of a new power system with a high proportion of renewable energy as the main body requires multi-technology collaboration, multi-stakeholder participation, and institutional and mechanism innovation to achieve high-quality, high-proportion, and high-efficiency consumption and utilization of wind power.

[Key words] wind power generation; new energy; grid-connection technology; power system stability; converter control; energy storage system; virtual synchronous generator

引言

21世纪全球能源格局深刻变革,传统化石能源体系因不可持续且破坏环境而难以为继,《巴黎协定》彰显全球低碳转型共识。在此形势下,风能等可再生能源因清洁、可持续成为各国能源战略核心。风力发电技术成熟、成本下降快、资源潜力大,实现跨越发展,截至2023年底,全球风电累计装机超1000GW,中

国以超400GW居首。不过,风电出力受气象影响,具随机性与波动性。低渗透率时对电网影响可控,但高比例风电并网成常态后,对传统电力系统冲击巨大。有效解决风电并网技术难题,保障电网安全稳定经济运行,是实现“双碳”目标关键。所以,深入研究风电发展现状与并网关键技术,既有重要理论价值,也具现实紧迫性。

1 全球及中国风电发展现状与趋势

1.1 全球风电发展格局

全球风电产业在过去二十年间经历了爆发式增长。欧洲作为风电技术的发源地,在海上风电领域保持领先;北美市场,特别是美国,陆上风电发展迅猛;亚太地区则成为全球风电增长的主要引擎,其中中国贡献了绝大部分增量。技术层面,风机单机容量持续增大,从早期的兆瓦级发展到如今的10MW以上,甚至15MW级别的海上风机已进入商业化应用阶段。这不仅降低了单位千瓦的建设成本(LCOE),也提升了风电场的整体效率和经济性。

1.2 中国风电发展成就与挑战

中国风电的发展堪称世界奇迹。自“十一五”规划将可再生能源列为战略性新兴产业以来,通过强有力的政策扶持(如固定上网电价、可再生能源配额制等)、完善的产业链建设和持续的技术创新,中国风电实现了从“跟跑”到“领跑”的跨越。目前,中国不仅拥有全球最大的风电装机规模,还形成了涵盖整机制造、零部件供应、开发建设、运维服务在内的完整产业链,具备强大的国际竞争力^[1]。然而,高速发展中也暴露出一些深层次问题。早期“大干快上”的发展模式导致部分地区电网规划滞后于电源建设,出现了严重的“弃风”现象,即因电网无法消纳而被迫放弃部分风电出力,造成了巨大的资源浪费和经济损失。尽管近年来通过特高压输电通道建设、火电灵活性改造、跨省区电力交易等措施,“三北”(西北、华北、东北)地区的弃风率已大幅下降,但在局部时段和区域,消纳压力依然存在。此外,海上风电作为未来发展的主战场,面临着深远海化、漂浮式基础、送出技术等新的技术与成本挑战。

1.3 未来发展趋势

展望未来,风电发展将呈现三大趋势:一是继续在资源富集区(如“三北”地区、沿海)建设大型风电基地,实现规模化开发;二是在中东部负荷中心积极发展分散式风电,推动就地消纳,减少远距离输电损耗与投资;三是加速推进“风光储氢”一体化、“源网荷储”协同互动等融合模式,通过数字化、智能化手段提升整个能源系统的灵活性、韧性和综合效率。这三大趋势共同指向一个更加多元、智能、高效的风电发展格局。

2 风电并网对电力系统的影响

风电大规模接入电网,从根本上改变了电力系统的电源结构和运行特性,主要带来以下几方面的影响:

2.1 对系统频率稳定性的影响

传统电力系统依靠大量同步发电机转子的转动惯量来缓冲功率的瞬时不平衡,维持系统频率稳定。风电,尤其是采用全功率变流器的直驱或半直驱风机,其与电网之间是“柔性”连接,本身不提供或仅提供有限的转动惯量。当系统发生大功率缺额(如大型机组跳闸)时,由于系统总惯量下降,频率下降速率(RoCoF)会显著加快,可能导致低频减载装置动作,甚至引发连锁故障。此外,风电出力的快速波动也会引起频率的频繁小幅波动,增加一次调频和二次调频的压力。

2.2 对系统电压稳定性的影响

风电场通常位于电网末端或薄弱环节,短路容量相对较小。风机通过电力电子变流器接入电网,其无功功率输出能力受限于变流器容量。在电网发生故障导致电压跌落时,如果风机不具备足够的低电压穿越(LVRT)能力,可能会因保护动作而大规模脱网,进一步恶化系统电压,形成恶性循环,甚至引发电压崩溃^[2]。同时,风电出力的波动也会引起接入点电压的闪变,影响电能质量。

2.3 对电能质量的影响

风电并网对电能质量的影响主要体现在谐波和电压波动/闪变两个方面。电力电子变流器在进行交直流变换过程中,会产生大量的特征谐波和非特征谐波,如果滤波措施不当,会污染电网,影响其他用电设备的正常运行。此外,风速的随机变化导致风电出力随之波动,这种有功功率的快速变化会在电网阻抗上产生压降,从而引起公共连接点(PCC)电压的波动和闪变,对敏感负荷(如精密仪器、照明系统)造成干扰。

2.4 对继电保护与自动化系统的影响

传统继电保护装置的设计基于系统短路电流由同步发电机提供的假设。风电接入后,故障电流的大小、相位和衰减特性都发生了改变。例如,双馈风机在故障期间提供的短路电流幅值较小且含有大量谐波分量,而全功率变流器风机的故障电流则完全由其控制策略决定,可能呈现受控电流源特性。这些变化可能导致距离保护、过流保护等出现拒动或误动,严重影响电网故障隔离的可靠性和选择性。

3 风电并网关键技术探讨

3.1 先进的变流器控制策略

作为风机与电网之间的核心接口,电力电子变流器的控制策略直接决定了风电并网的性能优劣。现代风机普遍采用基于电网电压定向的矢量控制技术,该技术通过坐标变换将三相交流量解耦为有功(d轴)和无功(q轴)分量,从而实现两者独立、快速、精确的控制。在此基础上,低电压穿越(LVRT)与高电压穿越(HVRT)功能已成为强制性并网标准。当电网电压发生跌落时,控制系统能够迅速检测并切换到故障穿越模式,优先保证向电网注入无功电流以支撑电压恢复,同时限制有功电流以保护变流器器件,确保风机在规定的电压-时间轮廓内不脱网运行。为进一步提升风电对系统的支撑能力,研究人员提出了虚拟惯量控制和一次调频控制策略。这些策略通过实时监测系统频率的变化率或偏差,利用风机转子中储存的动能或直流母线电容的能量,主动释放或吸收额外的有功功率,模拟同步发电机的惯量响应和一次调频特性,有效减缓系统频率的恶化速度,为其他调节资源争取宝贵的响应时间。

3.2 动态无功补偿技术

鉴于单台风机的无功调节能力有限,且风电场通常位于电网薄弱节点,集中配置动态无功补偿装置成为提升局部电压稳定性的有效工程手段。静止无功发生器(SVG)或静止同步补偿器(STATCOM)是当前的主流选择。这类装置基于全控型电力电子器

件(如IGBT)构成的电压源型变流器,能够根据系统电压的变化,在毫秒级时间内连续、平滑地输出或吸收感性或容性无功功率。与传统的机械投切电容器(MSC)或晶闸管控制电抗器(TCR)相比,SVG不仅响应速度更快、调节精度更高,而且自身不会产生额外的谐波,反而可以兼作有源滤波器,改善电能质量^[3]。在风电场升压站低压侧或公共连接点安装SVG,可以在风电出力波动或系统故障时,提供强有力的动态电压支撑,有效抑制电压闪变,并协助风机顺利完成低电压穿越过程。

3.3 储能系统集成技术

储能技术被视为破解风电间歇性难题、提升其可调度性的关键钥匙。通过在风电场侧、电网侧或用户侧合理配置储能系统,可以实现对风电出力的“削峰填谷”。具体而言,在风电大发而负荷较低的时段,将多余的电能存储起来;在风电出力不足或负荷高峰时段,再将存储的电能释放出来,从而平滑风电场的整体输出功率曲线,使其更符合电网调度的计划要求。此外,储能系统凭借其毫秒级的响应速度和双向调节能力,还可以为电网提供优质的调频、调峰、备用等辅助服务,极大地增强了电力系统的灵活性和韧性。目前,锂离子电池因其高能量密度、高效率 and 快速响应特性,在短时(小时级)储能应用中占据主导地位。对于更长时间尺度的能量转移需求,抽水蓄能、压缩空气储能、液流电池等长时储能技术也在不断取得进展。随着技术的成熟和成本的持续下降,储能与风电的深度融合将成为未来高比例可再生能源系统不可或缺的组成部分。

3.4 虚拟同步机(VSG)技术

虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术代表了电力电子并网控制理念的一次重大革新。其核心思想是通过在变流器的外环控制中嵌入同步发电机的经典二阶摇摆方程,使电力电子接口电源(如风电变流器、储能变流器)在外部电气特性上“模仿”一台真实的同步发电机。这意味着VSG不仅能自主地根据电网频率和电压的变化调整自身的有功和无功输出,参与系统的频率和电压调节,更重要的是,它能对外呈现出与同步机相似的功角稳定特性、转动惯量特性和阻尼特性。这种“构网型”(Grid-Forming)的能力,使得VSG能够在弱电网甚至孤岛运行条件下,主动建立并维持稳定的电压和频率,为其他“跟网型”(Grid-Following)电源提供稳定的参考^[4]。VSG技术有望从根本上解决高比例电力电子设备接入所导致的系统弱惯量、弱阻尼问题,是构建未来以新能源为主体的新型电力系统的关键使能技术。

3.5 风电功率预测与先进调度技术

精准的风电功率预测是实现其高效、安全消纳的前提。现代风电功率预测系统是一个复杂的多源信息融合体,它综合运用数值天气预报(NWP)模型提供的未来风速、风向等气象要素,结合风电场的历史运行数据、风机性能曲线以及实时SCADA系统采集的风速、功率等数据,借助机器学习,特别是长短期记忆网络(LSTM)、门控循环单元(GRU)等深度学习算法,对风电场未来数小时乃至数天的出力进行高精度预测。高精度的预测结果为电网调度部门制定科学合理的发电计划提供了坚实的数据基础。在此基础上,电网调度正朝着多时间尺度协调优化的方向发展。日前调度基于中期预测安排可调节机组的启停组合;日内滚动调度则利用超短期预测不断修正发电计划;到了实时运行阶段,则依靠自动发电控制(AGC)系统,调动燃气轮机、储能电站、可中断负荷等快速调节资源,实时跟踪并平衡风电实际出力与计划值之间的偏差,从而确保整个电力系统的实时功率平衡与安全稳定运行。

4 结语

风电是能源转型与“双碳”目标主力军,但高比例并网给传统电力系统带来系统性挑战。解决这一问题不能依靠单一技术,需采取“源-网-荷-储”协同方案:电源侧风机借先进变流器控制提升并网能力;电网侧加强网架、部署动态无功补偿装置、发展跨区输电通道;储能侧推进储能技术规模化应用;调度运行侧依托高精度预测与智能算法实现协同优化调度。展望未来,新型电力系统构建下,风电并网技术将更“构网型”、智能化,虚拟同步机技术或成标配,新兴技术将深度融合助力全景感知、精准预测与智能调控。实现风电高质量发展,除技术创新外,还需电力市场机制改革与政策法规保障,以释放风电潜力,构建现代能源体系。

[参考文献]

- [1]李斌华.风电新能源发展及并网技术研究[J].电力设备管理,2024,(23):104-106.
- [2]唐晓磊,张海瀛,刘天骄,等.可持续发展战略下风电新能源发展与并网技术[J].中国信息界,2025,(08):26-28.
- [3]魏赛.风电新能源数字化发展与并网技术探讨[J].科技视界,2025,15(21):26-29.
- [4]黄建虹.风电新能源的发展现状及其并网技术的发展前景[J].中国高新科技,2023,(10):88-90.