

新能源并网技术下的电气工程自动化挑战与对策研究

陈伟强

福建亿兴电力设计院有限公司 福建 泉州 362200

摘要: 新能源并网技术因与自然环境深度耦合,存在功率波动、预测难等问题,给电力系统带来挑战。电气工程自动化需从感知、控制等维度升级。本文分析新能源并网下电气工程自动化面临的系统稳定、控制策略等挑战,提出智能控制创新、稳定性增强等对策,并探讨前沿技术融合、系统形态演进等发展趋势,为新能源高效并网提供参考。

关键词: 新能源并网; 电气工程自动化; 挑战对策; 技术趋势

引言: 随着新能源大规模开发利用,并网技术成为电力系统发展的关键。新能源发电受自然因素影响,输出功率具有间歇性与不确定性,传统电力系统难以适应。电气工程自动化作为保障新能源高效并网的核心支撑,面临诸多新挑战。深入研究这些挑战并提出有效对策,对构建适应新能源特性的新型电力系统,推动能源绿色转型具有重要意义。

1 新能源并网技术特征与电气工程自动化需求

1.1 新能源并网技术核心特征

新能源并网技术的本质特征源于与自然环境的深度耦合,这种耦合关系直接塑造了独特的运行规律^[1]。风力发电系统受制于大气运动的不确定性,风速的瞬时变化会直接引发输出功率的剧烈波动,当风速在8-12米/秒范围内波动时,风力发电系统的输出功率可能在1000-3000千瓦之间大幅变化,而风向的偏转则可能导致机组偏离最佳受风角度,进一步加剧功率输出的不稳定性。光伏发电系统同样面临环境因素的制约,太阳辐射强度的周期性变化决定了输出功率的日间波动特性,在晴朗天气下,光伏发电系统在正午时分输出功率可达5000千瓦,而在早晚时段可能降至500千瓦以下,而云层遮挡、沙尘覆盖等突发因素则会引发功率的瞬时跌落,这种非连续性变化使得光伏出力呈现显著的间歇性。更为复杂的是,气象要素的时空分布具有高度随机性,现有预测模型难以精准捕捉局部气象条件的突变,导致新能源发电功率的预测结果与实际值存在偏差,这种不确定性给电力系统的供需平衡带来了根本性挑战。传统电力系统基于确定性调度的运行模式,在应对新能源高比例接入时,暴露出调节能力不足、抗扰动性差等短板,迫切需要构建适应新能源特性的新型运行体系。

1.2 电气工程自动化技术需求分析

为化解新能源并网引发的技术矛盾,电气工程自动

化技术需从感知、控制、决策、协同四个维度实现系统性升级。在感知层面,需构建覆盖发电设备、气象环境、电网状态的立体化监测网络,通过部署高精度传感器与智能终端,实现运行参数的实时采集与传输,为后续控制决策提供数据支撑。要求传感器采集频率达到每秒100次以上,数据传输延迟控制在10毫秒以内。控制层面要求开发具备快速响应能力的动态调控系统,能够根据新能源功率波动特性,自动调整传统机组出力或储能系统充放电状态,在毫秒级时间内完成功率平衡,确保电网频率与电压的稳定运行。控制系统的响应时间需控制在50毫秒以内。决策系统需突破传统调度模式的局限性,通过融合大数据分析与人工智能算法,实现对新能源发电功率的精准预测与优化调度,提前制定应对策略以降低不确定性影响。预测模型的精度需提升至90%以上。系统集成层面则需构建多能源互补的协同控制架构,将风能、太阳能、储能装置与传统电源进行有机整合,通过能量管理系统的统一调度,实现各类资源的优势互补与高效利用,最终形成适应新能源高比例接入的智能电网运行体系。

2 新能源并网技术下的电气工程自动化挑战

2.1 系统稳定性挑战

新能源大规模接入对电力系统稳定运行带来多维冲击。传统电网频率稳定依赖同步发电机转子惯性支撑,新能源发电设备经电力电子接口并网后,机械惯性被完全解耦,系统等效惯量大幅降低^[2]。这种惯量缺失导致功率供需失衡时频率偏移速度加快,传统调频手段响应延迟可能引发频率越限,严重时甚至会触发低频减载或高频切机保护动作,威胁电网安全。分布式电源分散接入改变了电网无功分布特性,局部区域因无功补偿不足或过剩引发电压波动,叠加新能源出力间歇性,电压波动范围扩大,部分节点电压越限现象频发,影响用电设备正常

运行。暂态稳定层面,新能源发电设备故障穿越能力不足成为突出问题,部分逆变器在电压跌落时快速脱网,可能引发连锁故障,导致故障范围扩大甚至造成大面积停电,对电网抗扰动能力提出严峻考验。

2.2 控制策略挑战

新能源并网控制面临多变量强耦合的复杂场景。功率、电压、频率协同调节需兼顾多个控制目标,各变量间存在强耦合关系,单一环节调整可能引发其他变量波动,多目标优化控制算法开发成为关键。新能源设备动态特性呈现显著非线性,风力发电机空气动力学过程、光伏发电最大功率点跟踪均涉及非线性环节,建立精确系统模型需考虑多物理场耦合,模型复杂度与计算效率矛盾突出,传统线性控制方法难以适应。预测控制精度受制于气象条件与发电功率映射关系模糊性,云层运动、风速突变等局部气象变化难以通过宏观数据准确捕捉,导致功率预测结果与实际出力存在偏差,影响调度决策准确性,提升预测模型适应性成为亟待解决的问题。

2.3 设备适配性挑战

电力电子设备技术瓶颈制约新能源并网效率提升。逆变器作为关键接口设备,需具备宽范围电压适应能力,但现有产品在电压波动超出设计范围时易出现谐波超标或脱网问题,影响电能质量与电网稳定。储能系统匹配方面,功率型储能响应速度快但能量密度低,能量型储能能量密度高但响应速度慢,协同调度需解决功率分配、能量管理、寿命均衡等难题。例如,功率型储能功率响应时间可小于10ms,但能量密度通常低于50Wh/kg;能量型储能能量密度可达100-200Wh/kg,但功率响应时间可能大于100ms。现有策略难以实现优势互补。通信协议兼容性问题突出,不同厂商设备采用私有协议,数据交互需协议转换装置,增加系统复杂度与运维成本,制约设备互操作性与系统扩展性。

2.4 经济性优化挑战

新能源并网经济性优化需在多重约束下寻求平衡。储能配置规模优化需综合考虑投资成本、使用寿命与收益回报,过度配置导致资源闲置,配置不足则无法满足调峰需求,实现全生命周期成本最小化成为核心问题。电力现货市场环境下,新能源发电边际成本接近零,但需承担预测偏差惩罚、辅助服务费用等额外成本,交易策略设计需兼顾经济性与可靠性。运维成本管控方面,新能源设备分布广、环境复杂,故障率高于传统机组,全生命周期管理需整合状态监测、故障诊断、维修决策等环节,现有管理模式存在信息孤岛、决策滞后等问题,提升管理效率成为降低运维成本的关键。

3 应对新能源并网挑战的电气工程自动化对策

3.1 智能控制技术创新

为应对新能源并网带来的复杂控制难题,需推动智能控制技术的深度创新。自适应控制算法通过实时采集系统运行数据,动态调整控制参数,使控制系统能够快速适应新能源出力的间歇性与波动性,提升功率调节的精准度与响应速度^[3]。例如,自适应控制可使功率调节误差控制在5%以内,响应时间缩短至50-100ms。模型预测控制借助高精度预测模型,对未来5-15步的系统状态进行预测,并基于预测结果优化当前调度策略,实现功率、电压、频率等多目标的协同优化,有效降低新能源并网对电网的冲击。分布式协同控制采用边缘计算与云计算融合架构,将部分计算任务下沉至边缘节点,减少数据传输延迟,同时利用云计算的强大算力进行全局优化,实现多设备、多区域的协同控制,提升系统的整体控制效能。

3.2 系统稳定性增强技术

虚拟同步机技术通过模拟传统发电机的惯量特性,使新能源发电设备具备类似传统发电机的动态响应能力。在电网频率发生变化时,虚拟同步机可自动调整输出功率,为电网提供频率支撑,增强电网的稳定性,当频率偏差在 ± 0.1 到 ± 0.3 赫兹时,能有效稳定频率。柔性直流输电技术采用电压源换流器,具备灵活控制有功功率与无功功率的能力,可有效提升新能源外送能力,输送容量可提升30%到50%。该技术能够克服传统直流输电在换相失败等方面的缺陷,实现新能源发电的远距离、大规模输送,促进新能源的消纳,输送距离可达1000到2000公里。动态无功补偿装置可根据电网电压的实时变化,快速调整无功功率输出,抑制电压波动与闪变,响应时间可缩短至10到30毫秒。在新能源发电占比较高的电网中,该装置对于维持电压稳定、提高电能质量具有重要作用,电压波动范围可控制在额定电压的 $\pm 5\%$ 以内。

3.3 设备技术升级路径

设备技术的升级是提升新能源并网效率的重要支撑。宽禁带半导体器件具有更高的开关频率、更低的导通损耗与更高的耐压能力,应用于逆变器中可显著提升转换效率,降低能量损耗,同时增强逆变器的宽范围电压适应能力。模块化储能系统通过将储能单元进行模块化设计,实现功率与能量的灵活配置,可根据不同应用场景的需求进行快速组合与扩展,提升储能系统的灵活性与经济性。数字孪生技术通过构建设备的高精度虚拟模型,实时映射设备的运行状态,实现对设备故障的提前预警与运维策略的优化,降低运维成本,提升设备全

生命周期的运行效率。

3.4 经济性优化策略

实现新能源并网的经济性优化需多管齐下。多时间尺度调度通过日前、日内、实时三个时间层的协同优化,充分考虑新能源出力的不确定性,合理安排发电计划与储能充放电策略,实现发电成本的最小化与供电可靠性的提升。需求响应机制通过价格信号或激励措施,引导用户侧灵活调整用电行为,参与电网的调节,缓解新能源出力波动对电网的影响,同时降低用户的用电成本。将碳交易市场与电力调度决策相耦合,将碳成本纳入调度模型,促使发电企业优先选择低碳发电方式,推动新能源的消纳与能源结构的绿色转型。

4 技术发展趋势与展望

4.1 前沿技术融合方向

未来电气工程自动化领域将加速前沿技术的深度融合。人工智能领域,大模型凭借强大的特征提取与泛化能力,在电网故障诊断中展现出巨大潜力^[4]。通过迁移学习技术,可将大模型在通用领域积累的知识迁移至电网故障诊断场景,减少对大量标注数据的依赖,提升故障诊断的准确性与效率,实现故障的快速定位与类型识别。物联网层面,边缘计算与雾计算的分布式控制架构将成为重要发展方向。边缘计算将计算任务下沉至网络边缘,降低数据传输延迟,雾计算则进一步整合边缘节点资源,形成分层分布式控制体系,实现设备间的实时协同控制,提升电网对新能源出力波动的响应速度。量子计算凭借其强大的并行计算能力,为大规模电力系统优化问题的求解提供了新途径。传统优化算法在处理大规模电力系统问题时面临计算复杂度高、求解时间长等难题,量子计算可突破这些限制,实现优化问题的快速求解,为电力系统规划、调度等提供更高效的决策支持。

4.2 系统形态演进方向

电气系统形态正朝着更高级的阶段演进。主动配电网作为智能电网的高级形态,具备自愈能力,能够实时监测电网运行状态,在发生故障时自动隔离故障区域,并快速恢复非故障区域的供电,提升供电可靠性与电能质量。能源互联网推动能源、信息、价值三流深度融合,实现多能流的协同优化与互补利用。通过信息物

理系统的构建,打破能源系统间的壁垒,促进电力、热力、燃气等多种能源的互联互通,提升能源利用效率。零碳园区以微电网集群为基础,实现自治与协同运行。微电网内部通过分布式电源、储能装置与负荷的优化配置,实现能源的自给自足,多个微电网之间通过能量管理系统实现协同运行,提升整个园区的能源利用效率与可再生能源消纳能力,推动园区向零碳目标迈进。

4.3 关键能力提升方向

电网关键能力的提升是应对新能源并网挑战的关键。超容性要求电网具备更强的容纳新能源功率波动的能力,通过优化电网结构、提升调峰调频资源配置水平,降低新能源出力波动对电网稳定运行的影响。超柔性强调电网对极端工况的弹性适应能力,在遭受自然灾害、设备故障等极端情况时,电网能够快速调整运行方式,保障重要负荷的供电,减少停电范围与停电时间。超智能则聚焦于电网的自主决策与自优化运行能力,借助人工智能、大数据等技术,实现电网运行状态的实时感知、故障的自主诊断与处理、运行策略的自动优化,提升电网的智能化水平与运行效率。

结束语

新能源并网技术发展促使电气工程自动化不断变革。通过智能控制技术创新、系统稳定性增强、设备技术升级及经济性优化等对策,能有效应对当下挑战。前沿技术融合、系统形态演进以及关键能力提升方向,为电气工程自动化发展指明路径。持续推动技术进步与创新,可提升电网对新能源的接纳与调控能力,保障能源供应安全与可持续性。

参考文献

- [1]李泽豪.新能源发电系统的电气自动化控制策略研究[J].中国战略新兴产业,2025,(30):77-79.
- [2]丁长瑜.新能源接入下电气工程及其自动化的稳定性[J].智慧中国,2025,(S1):25-26.
- [3]周丽萍.电气自动化技术在新能源汽车中的应用探究[J].汽车维修技师,2025,(16):115-116.
- [4]王强,张军,赵宇.分布式能源供电系统与电力系统并网的相关研究分析[J].电气工程专业,2023,11(3):100-105.