电力系统自动化技术在新能源并网中的应用研究

王胜荣
中国能源建设集团（甘肃）工程有限公司　甘肃　兰州　730000

摘　要：风电、光伏新能源具有间歇性与波动性特征，大规模并网易造成电网频率、电压波动，降低系统运行稳定性与新能源消纳能力。本文围绕电力系统自动化技术体系，阐述其在并网监测、智能调控、故障保护与智能调度中的应用现状，分析当前调控精度不足、系统适配性弱、保护误动拒动等突出问题，提出针对性优化改进策略，并结合前沿技术展望行业发展趋势，为高比例新能源安全并网运行提供技术支撑。

关键词：电力系统；自动化技术；新能源并网；应用

引言：在双碳战略持续推进的背景下，新能源逐步替代传统能源，成为电力系统转型发展的核心力量。新能源机组弱惯量、低抗扰的并网特性，打破了传统电网的稳定运行状态，滋生振荡失稳、功率波动、弃风弃光等诸多运行难题。电力系统自动化是平衡电网安全与新能源高效消纳的核心技术。本文系统探究自动化技术的并网应用机理与实践路径，总结现存问题并提出优化方案，助力新型电力系统高质量建设。

1 新能源并网与电力系统自动化核心理论基础

1.1 新能源并网核心特性

（1）风电出力受风速随机性影响，光伏依赖光照与温度，二者均呈间歇性、波动性与反调峰特性。并网时经电力电子变流器接入，呈现弱惯量、低抗扰及有限过流能力，功率预测精度随周期延长显著下降。（2）新能源出力波动引发馈线电压越限与闪变，系统惯量下降使频率变化率（RoCoF）增大，一次调频压力上升。大量功率从配网注入，改变传统单向潮流分布，导致线路过载和网损增加。（3）高比例新能源并网带来暂态过电压、宽频带振荡、频率失稳等新型风险。调峰不足致弃风弃光，转动惯量短缺加剧频率安全约束，电压支撑减弱，系统安全运行边界大幅收缩。

1.2 电力系统自动化核心技术体系

（1）自动监测与数据采集技术（SCADA、物联网感知技术）。SCADA系统实现电网运行状态的远程监视与控制，物联网感知技术通过海量传感终端采集设备状态、环境参数等多元信息，支撑全景态势感知。（2）智能自动控制与协同调控技术。包括自动发电控制（AGC）、自动电压控制（AVC）及源网荷储协同控制，实现多时间尺度下的有功-无功协调优化。（3）继电保护与故障自动化处置技术。针对新能源故障特性，采用自适应保护策略与智能故障隔离技术，实现故障快速精准切除与供电恢复。（4）电网智能调度自动化技术。基于能量管理系统（EMS），融合人工智能算法，实现调度决策智能化、风险预警实时化与运行控制自主化[1]。

1.3 自动化技术适配新能源并网的运行机理

（1）动态感知技术对新能源出力波动的实时监测原理。基于广域测量系统（WAMS）与相量测量单元（PMU），结合边缘计算与深度学习预测算法，实现对新能源秒级/分钟级功率波动的快速准确跟踪。（2）自动调控技术平抑电网波动、保障并网稳定的作用机理。储能快速充放电与灵活负荷需求响应协同配合，快速响应功率缺额，提供虚拟惯量与一次调频支撑，同时通过无功补偿装置动态调节电压。（3）智能化运维技术提升新能源并网消纳效率的核心逻辑。依托数字孪生与大数据分析，优化检修策略与调度计划，提升设备利用率与预测精度，实现新能源最大化消纳与电网安全经济的协调统一。

2 电力系统自动化技术在新能源并网中的具体应用

2.1 并网数据自动化采集与监测应用

（1）多源新能源并网数据的自动化采集方案与终端部署。针对风电场、光伏电站等分散式电源，部署高精度气象监测站、功率变送器及并网点电气量测终端，采用工业以太网与5G融合的混合组网架构，实现风速、光照、温度与电压、电流、频率等数据的同步采集。220kV及以上并网场站，每台风机或逆变器单元配独立监测终端，采样频率100Hz，数据上传达毫秒级，满足动态监测与实时调度需求。（2）电网运行状态、新能源出力数据的实时监测与动态分析。基于同步相量测量装置（PMU）和故障录波器，构建时空同步的电网运行全景图，连续跟踪并网点电压偏差、频率波动、功率因数及谐波畸变率。通过在线潮流计算与静态安全分析，实时评估新能源出力变化对节点电压、线路负载率及功角稳

定性的影响，使监测数据从“可观”升至“可析”，提供清晰态势感知界面[2]。（3）基于大数据的新能源并网趋势预判与异常预警应用。融合数值天气预报、历史出力与实时运行信息，采用LSTM及Transformer等深度学习算法，构建超短期（0-4h）与短期（0-72h）多时间尺度出力预测模型。设定多级告警阈值，当预测偏差超额定容量15%或运行参数连续越限达3个采样周期时，系统自动触发预警并推送调整建议，为调度决策提供10-15分钟提前应对窗口。

2.2 并网过程自动化控制技术应用

（1）电压、频率自动化稳定控制技术在新能源并网中的应用。部署自动电压控制（AVC）系统，通过无功补偿装置（SVG/STATCOM）动态投切与变压器分接头自动调节，实现并网点电压在额定值±2%范围内恒定控制。配置一次调频模块与快速频率响应装置，利用储能或可调负荷在电网频率偏差超出死区（±0.05Hz）后200ms内快速响应，有效弥补新能源机组缺乏惯量支撑的固有短板。（2）虚拟同步机、构网型控制技术优化新能源并网惯性响应的实践应用。将新能源变流器由跟网型（PLL同步）切换为构网型（VSG控制），模拟同步发电机的转子运动方程与励磁调节特性，主动建立并网点电压参考相位和幅值。电网发生扰动时，构网型变流器自主提供惯量支撑与阻尼转矩，实测表明系统频率变化率（RoCoF）可降低40%-60%，暂态电压跌落恢复时间缩短至100ms以内。（3）柔性直流输电自动化控制技术适配大规模新能源外送场景。基于模块化多电平换流器（MMC）的柔性直流系统，采用有功无功解耦控制与环流抑制策略，实现千万千瓦级新能源功率的大容量、远距离、低损耗外送。同时利用柔直换流站的动态无功补偿能力，在送端交流电网故障时提供毫秒级无功支撑，将新能源送出极限提升约20%-30%[3]。

2.3 并网故障自动化保护与处置应用

（1）新能源并网故障的自动化识别与精准定位技术。利用行波测距与故障暂态信号特征提取相结合的方法，分析新能源并网系统在单相接地、相间短路等不对称故障下的电压/电流序分量变化规律。基于卷积神经网络（CNN）的故障类型识别模型可在20ms内完成故障分类与定位计算，定位误差控制在500米范围内，为后续隔离操作提供精确的位置信息。（2）自适应继电保护技术规避并网故障风险的应用实践。针对新能源提供的短路电流幅值受限（仅约1.2-1.5倍额定电流）、相位受控、谐波含量高等特性，配置自适应距离保护和差动保护装置，实时识别系统运行方式并动态调整保护定值及动作特性曲线。在逆变器送出线路上采用基于正序故障分量的方向元件，有效规避弱馈侧保护拒动问题，使保护正确动作率由常规方案的85%显著提升至97%以上[4]。（3）故障自动隔离与电网快速恢复的自动化处置流程。构建"保护动作-断路器跳闸-故障区域精确定位-自动化隔离-重合闸或备自投-孤岛转并网"的标准化处置时序链。依托区域备自投装置与分布式电源孤岛运行策略，在110kV及以下电压等级配电网中实现3分钟内供电恢复，关键用户供电可靠性提升至99.99%，非故障区段恢复供电时间较传统人工处置模式缩短80%。

2.4 新能源并网智能调度自动化应用

（1）多新能源主体协同调度自动化模型构建。建立考虑各新能源场站出力特性、调节速率、爬坡能力及预测精度差异的多目标优化调度模型，以系统运行成本最小化和新能源消纳最大化为优化目标，综合考虑网络安全约束、常规机组运行约束与备用容量配置要求，形成日前-日内-实时三时间尺度协同调度框架，实现风、光、水、火、储多源协调优化。（2）基于新能源出力预测的电网动态调度优化策略。基于日内滚动预测结果，每15分钟动态调整常规机组出力计划与联络线交换功率，采用模型预测控制（MPC）滚动优化方法应对新能源预测偏差。当预测误差超出设定阈值时，系统自动触发备用容量调用或需求侧响应指令，保持发用电实时平衡，日内调度计划调整频率由每小时一次提升至每15分钟一次，调度响应时效大幅改善[5]。（3）储能与新能源并网的自动化协同调度应用。将电化学储能系统接入自动发电控制（AGC）主站，采用储能-新能源联合出力平滑策略，储能自动跟踪新能源实际出力与计划出力的偏差量进行充放电补偿。同时利用储能毫秒级响应特性参与二次调频，在新能源出力陡升陡降时自动调节充放电功率。实际工程数据显示，配置储能协同调度后弃风弃光率可下降5-8个百分点，系统调频性能指标（CPS1）提升至120%以上，有效缓解新能源高渗透率下的系统调节压力。

3 技术应用现存问题与优化对策

3.1 新能源并网中自动化技术应用现存问题

（1）新能源出力随机性导致自动化调控精度不足。风电、光伏超短期功率预测误差达10%–20%，AGC频繁调节仍难以精确跟踪计划曲线，常规机组爬坡速率难以匹配波动速度，系统频率偏差和联络线功率偏差超标频发。（2）多类型新能源并网场景下自动化系统适配性较差。风电、光伏、光热、生物质等电源出力特性、响应速率、控制方式差异悬殊，现有系统多针对单一场景，多源协调时参数整定困难，切换与策略重构时间长，难

以快速适配不同工况。（3）并网故障保护误动、拒动问题突出。新能源短路电流仅约1.2–1.5倍额定电流且相位受控，传统基于工频量变化率的保护判据失效，区内故障保护灵敏度不足致拒动率升高，区外故障方向元件误判致误动风险增加，动作正确率远低于常规电源场景。（4）自动化调度协同性不足，新能源消纳率偏低。日前调度计划与日内实时运行脱节，多级调度信息交互时延较长，备用容量在各区域间难以动态共享，调节资源利用率低，弃风弃光在高渗透率时段依然突出。

3.2 技术应用优化改进策略

（1）优化智能感知算法，提升新能源出力动态监测精准度。引入气象多源数据融合与图神经网络时空预测模型，将超短期预测误差压缩至8%以内；结合边缘计算终端实现百毫秒级功率变化捕捉，为自动控制系统提供高置信度输入。（2）升级自适应自动化控制系统，适配多场景新能源并网需求。研发控制参数在线自整定模块，依据新能源渗透率与电网运行状态实时切换控制策略，实现风-光-储-荷多主体的自适应协同调节；建立标准化通信接口与即插即用控制框架，缩短新场站接入的系统适配周期。（3）优化继电保护逻辑，完善并网故障智能处置机制。采用基于故障暂态高频分量与人工智能模式识别的保护新原理，替代传统工频量判据；构建保护定值在线校核与动态调整系统，使保护性能随并网运行方式变化自适应优化，将保护正确动作率目标提升至98%以上。

3.3 新技术融合应用发展展望

（1）人工智能、数字孪生技术与电力自动化系统的融合应用。深度学习将全面嵌入负荷预测、故障诊断与调度决策全链条；数字孪生通过高保真仿真镜像实现运行状态推演与预判，使自动化系统从事后响应向事前预警跨越，决策响应时间缩短至毫秒级。（2）构网型并网控制技术、柔性互联技术的规模化应用前景。构网型变流器作为电压源主动支撑电网，将从示范工程向百万千瓦级新能源场站全面推广；柔性直流与智能软开关（SOP）实现配电网柔性互联，将大幅提升新能源跨区域消纳能力与供电互济水平。（3）新型电力系统下新能源并网自动化技术的未来发展趋势。自动化系统向"云-边-端"协同架构演进，以数据驱动与机理模型融合为内核，实现源网荷储全要素的透明感知、智能决策与自主运行，支撑碳中和目标下新能源装机占比超过60%时电网的安全稳定高效运行。

结束语

本文梳理了电力系统自动化技术适配新能源并网的运行机理与应用场景，归纳了目前技术应用中存在的各类短板问题，并从算法优化、系统升级、保护迭代等方面给出优化对策。自动化技术可有效平抑新能源出力波动、提升电网故障处置能力与资源调度水平。随着数字孪生、人工智能等技术深度融合，电力自动化体系将更加智能高效，全面适配高比例新能源并网的发展需求。

参考文献

[1]李鸣,常永康,毛永涛.高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J].高电压技术,2024,50(11):4773-4788.

[2]王仕韬,郭方正,李立.孤岛下基于虚拟振荡器控制的构网型并联逆变器电压控制策略[J].电力自动化设备,2025,45(01):131-138.

[3]杨铭,曹武,赵剑锋.受控电压/电流源型变流器混合多机暂态电压支撑策略[J].电工技术学报,2023,38(19):5207-5223.

[4]曹帅,刘东,赵成功.适用于风电经柔性直流并网系统的柔性耗能装置及控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):51-62.

[5]李卫星,潘韵同,马欣彤.构网型新能源调频控制技术综述[J].沈阳工业大学学报,2025,47(05):545-557.