

电气自动化系统中新能源接入对电网稳定性的影响分析

高世贵

陕西友发钢管有限公司, 陕西省渭南市, 715405;

摘要: 新能源高比例接入改变了电力系统的惯量、阻尼与潮流分布, 使频率、电压与暂态过程呈现更强的时变性与区域差异。电气自动化系统作为运行大脑与执行手臂, 其测量、控制与保护逻辑直接影响系统稳定边界。文章从并网电源的电气特性、自动化控制的层级协同与保护配合三条主线出发, 阐释稳定性影响机理与关键约束, 提出以源网荷储协同、分层解耦控制、广域同步测量支撑的综合治理框架, 并给出面向工程的一体化实施路径与评估指标。目标是在安全红线内压缩波动、提升可再生能源可接纳能力, 并以可复用的作业文件与数据闭环降低长期运维不确定性。

关键词: 新能源并网; 电网稳定; 电气自动化; 分层控制; 广域测量

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.059

引言

电力系统正经历从以同步发电机为主的高惯量格局, 向以电力电子接口为主的低惯量格局转型。传统依赖旋转动能与励磁特性的调节机理逐渐让位于以控制算法为核心的虚拟调节机制, 频率调节、无功支撑与故障穿越呈现新的动态行为。与此同时, 负荷侧的用电形态与分布式接入亦引入更多随机性与耦合。要在安全、经济与清洁之间取得平衡, 必须把新能源接入视为“源—网—荷—储—调度—保护”全链条问题。电气自动化系统连接测量、决策与执行, 是收敛复杂性的枢纽。围绕对象建模、控制分层、保护配合与数据治理构建一套可落地的方法, 既要尊重物理规律, 也要兼顾工程可实施性与长期可维护性。本文据此开展分析与路径设计。

1 影响机理与稳定性分类

1.1 新能源电源的电气特性与系统耦合

电力电子接口型电源依靠控制算法调节有功与无功, 外在表现由参数与策略决定, 不再天然提供同步转子带来的惯量与阻尼。并网后, 系统的等效惯量下降, 功率不平衡在更短时间尺度内显化, 频率变化率更大; 电压支撑能力由励磁硬特性转为控制软特性, 对测量延迟与参数设定敏感。并网点阻抗、短路比与电源控制器的电流限幅共同决定故障电流幅值与相位, 影响继电保护的动作判据^[1]。多台电源在公共连接点耦合, 控制器之间可能产生相互作用, 出现低频振荡与高频次谐波共振等现象, 运行窗口变窄。负荷与储能的可控性提升, 同时带来新的协调问题, 若缺乏明确的优先级与解耦机制, 局部调节可能引起全局波动。要保持稳定, 需要把

物理约束统一进模型, 约束包括电压、电流、功角与温升, 并在时间尺度上分区管理, 使慢变量与快变量分别闭环。电源控制策略通常分为电网成形与电网跟随两类。电网成形通过电压与频率参考塑造局部等效电源, 具备较强的抗扰与孤网能力, 但参数设置不当可能与上级调节产生冲突; 电网跟随依赖相位锁定, 易受弱电网影响而出现相角抖动与电流畸变。并网点阻抗抗频率特性与控制环节的滤波与延时共同决定耦合强度, 若阻抗交叉点靠近控制带宽, 容易触发振荡。大规模聚合后, 场站之间的有功与无功交互会沿网络拓扑传播, 形成区域性耦合, 需以分区与解耦手段降低互扰。在故障与重构场景下, 电流限幅导致的电压塌陷可能长期存在, 恢复路径应与无功分配策略协调, 避免反复触发过流与再限幅。对于含串补与长线路的系统, 还应关注次同步振荡与低频低阻尼模态, 通过阻尼注入与有功下垂缓和耦合。控制侧约束包括采样、滤波、限幅、饱和与时延, 任何一项的边界值变化都会改变系统等效特性, 必须与运行方式联动管理。

1.2 稳定性类型、判据与边界量化

稳定性可分频率稳定、电压稳定与暂态稳定三个维度, 并辅以小干扰与大扰动的分类。频率稳定关注功率平衡与惯量支撑, 可用频率偏差、变化率与恢复时间表征; 电压稳定关注无功平衡与网络阻抗, 可用电压偏移、无功裕度与静特性曲线斜率描述; 暂态稳定关注故障清除后的同步与能量交换, 可用临界切除时间与暂态角度界限评估^[2]。新能源占比提升后, 惯量与阻尼来自控制环节, 需要在一次调节、快速无功、故障穿越、虚拟惯

量与虚拟阻尼等功能中设定明确目标。边界量化应当以场站与系统的双层指标展开：场站侧约束并网点电压范围、电流限幅与低电压穿越曲线；系统侧约束频率偏差与变化率、区域无功裕度与故障清除时间。指标与装置能力的映射需通过仿真与试验确认，并在运行中滚动校准，使评估不被理想化参数误导。在小干扰范围内，可通过线性化模型求取特征值与阻尼比，以量化振荡模态的稳定裕度；在大扰动条件下，能量函数与等面积判据可用于估计临界切除时间与失稳风险。电压稳定评估除静态曲线外，还需考虑无功源的动态响应与限幅特性，短时无功不足会与电流限幅叠加，导致电压恢复缓慢。指标管理层面，可引入目标线与红黄绿分级：目标线基于历史最佳与设备能力确定，红区代表越界，黄区提示接近边界，绿区表示安全运行。各指标与责任单位一一对应，偏离即触发纠偏单与复盘记录。边界不应一成不变，应随季节、负荷结构与网络方式滚动校准，并把参数变更纳入流程管理，保证评估口径在时间与空间上保持一致。对频率侧的评估，还应计入备用启停与调节器饱和带来的非线性效应，必要时采用分段模型描述；对电压侧的评估，则需把变压器分接、并联补偿投切与柔性装置限幅纳入动态仿真，保证判据对应真实装置行为。

2 自动化控制与保护配合的适配原则

2.1 源网协调的分层控制与电压频率支撑

在新能源占比较高的区域，调节能力应分解到场站、区域与全网多个层级。场站层实现功率曲线跟踪、无功电压控制与故障穿越；区域层协调多个场站与常规电源，实现有功与无功的最小代价分配；全网层以安全边界为约束进行备用与潮流优化^[3]。频率侧，需将一次调节与快速储能的响应叠加，设定分段斜率与死区，限定变化率在可承受区间；电压侧，依据短路比选择并网控制模式，弱网条件下优先电压源特性并叠加下垂，强网条件下优先电流限制并以无功支撑为主。分层控制要避免重叠调节与相互抢占，可通过优先级与限幅、时延与滤波、主从与自治切换等机制实现解耦。对跨区域波动，应以广域同步测量提供全网相角与频率参考，避免仅凭就地信号作出片面决策。运行中以目标线方式约束功率爬坡、无功交换与电压偏移，偏离阈值触发纠偏与复盘。频率响应方面，场站可在功率调节中叠加虚拟惯量与虚拟阻尼，使频率变化率得到抑制；储能则以毫秒级响应弥补短时功率缺口，待频率回到工作带内再逐步退出，避免长期占用容量。无功侧的分层设置需要明确并网点电压目标与无功分配曲线，弱网条件下优先本地支撑，强网

条件下优先区域优化，避免跨区大幅无功潮流造成损耗与越限。为降低互扰，场站间应共享出力计划与可用调节能力，上级仅下达目标与边界，具体实现由就地完成。控制器应具备设定参数的在线切换能力，以适应网络重构与季节性特性变化。在边界接近时，调度以约束驱动的方式调整备用与潮流，必要时触发有序减载与错峰，引导系统回到安全域。在多能源互补场景，热电联产、水火风光之间的计划协调尤为重要，约束条件需在日前就明确传递到场站，避免临场频繁改口导致控制策略反复切换。

2.2 继电保护、安稳装置与广域测量的协同

保护定值与判据需要适配新能源的故障特性。由于电力电子装置故障电流幅值有限、相位受控制影响，传统以电流幅值与阻抗轨迹为主的判据可靠度下降，应引入电压跌落、频率变化率与相角变化等量作为补充证据^[4]。区内与区间的选择性依赖于分布式故障源的等效注入，定值需在多场景下校核，保证在弱电流条件下仍能快速选择。安稳装置的切机、减载与无功支撑指令应与场站控制策略协同，避免重复动作与冲突。广域同步测量系统提供高精度时间对齐的数据，支撑跨区振荡识别、相相差监视与自适应分区。为提升韧性，建议把保护与控制的关键逻辑标准化为可重用模块，配置版本与适用范围清晰可追溯；对通信中断与测量异常设置降级策略，保持基本保护与就地自保。检修与扩容时，所有变更须经仿真验证与灰度上线，并在运行初期加强监视，以数据闭环固化新配置的可信度。方向判据与相角差判据在低故障电流场景下更具选择性，应结合电压时间特性构成多证据体系。对穿越功能启用的场站，保护需要识别故障期间的受限电流并适当延时，避免误切。当网络处于弱联络或环网切分状态，自适应定值可根据拓扑与潮流自动整定，特殊方式下采用分区保护以确保选择性与速动性。广域同步测量不仅用于监视，也用于快速重构后的暂态监控与振荡抑制触发，实现跨区协调。通信异常时，保护与控制应降级到就地策略，并保留最小闭锁逻辑，避免因单点故障引发大范围失稳。变更与检修后的首日运行应启用增强监视与快速回退，以运行证据完善定值与策略。对越区影响的事件建立跨区协同处置通道。

3 工程化实施路径与评估方法

3.1 源网荷储协同与运行组织优化

实施路径宜从可落地的环节启动：场站侧完善功率

一无功一体化控制与快速响应能力,配置爬坡约束与有功下垂;网络侧以电压分区与无功分区为抓手,配合并联电容器、可控电抗器与柔性装置形成分层支撑;负荷侧引入可中断负荷与可转移负荷,形成与新能源出力互补的调节池;储能侧承担低惯量场景下的快速支撑与峰谷调节,并与场站功率控制形成联动。运行组织方面,建立跨专业的例会与看板制度,以频率偏差、变化率、电压越限时长、无功交换与越界事件作为核心指标,按班次与区域进行归因与纠偏。计划层将气象预测、出力预测与负荷预测联合编制,生成按时段的备用、爬坡与检修窗口安排,减少高风险叠加。设备层强化测点质量与拓扑一致性,保证模型、定值与现场一致。在此基础上,逐步推进更高层次的自适应优化,使调度、场站与用户侧在统一边界内协同。源侧把场站控制与功率预测紧密耦合,依据出力不确定度设置动态爬坡限值与备用比例;对易受气象突变影响的区域配置滚动预测与快速纠偏机制,减少计划与实际的背离。网侧通过无功分区、相角差阈值与导纳阈值构建分层管控,常规电源与柔性装置共同承担电压支撑与潮流再分配。荷侧以负荷聚合器方式组织可调资源,按响应速度与可持续时长分档,纳入辅助服务考核;储能参与一次与二次调节时应设定容量保底与循环寿命管理,防止过度深循环。运维组织方面,建立模型、策略与现场一致性核查清单;采集、通信与计量按完备率、准确率与及时率考核,偏离阈值即触发巡检。跨专业的排班与例会形成问题闭环,经验沉淀为可查询的知识条目。当运行接近极限时,启动分层告警与临界工况演练,班组按剧本执行处置步骤,并在事件结束后一小时内完成复盘,把细节固化为可检索条目。

3.2 仿真评估、试验验证与指标体系构建

评估体系应覆盖模型、试验与运行三类证据。模型侧通过稳态与暂态联合仿真,刻画多场景下的边界行为与薄弱环节;试验侧以场站试验与系统试验验证关键功能曲线与响应时间,包括功率爬坡、一次调节、无功支撑与低电压穿越;运行侧以同步相量、故障录波与能量计量数据校核模型假设,并滚动修正参数。指标体系分为运行安全、动态质量与接纳能力三组:运行安全关注越界事件次数与持续时间、保护误动拒动、故障清除时间;动态质量关注频率响应、变化率、电压偏移与振荡阻尼;接纳能力关注高比例时段内的弃风弃光与限发、网损与备用效率。评估报告以功能单位归一,剔除气候

与负荷差异,确保不同阶段与区域具有可比性。为促进复制推广,应把试点成果沉淀为标准作业文件、定值校核指南与监测报表模板,在新场景中以少量参数修订即可复用,降低扩展成本与学习门槛。仿真平台宜支持从单场站到全网的多层级模型,参数来自型式试验、现场辨识与运行反演,并提供批量场景自动计算能力。硬件在环试验用于验证关键控制在极端情形下的动作边界,避免直接在生产系统中试错。为保证跨区域的可比性,评估采用功能单位归一,按气象、负荷与方式进行情景归类;报告同时展示收益与代价,包括弃风弃光变化、备用效率、网损、设备温升与动作次数。数据闭环方面,仿真、试验与运行三类数据统一在一套词典与时间坐标下,任何校正都保留痕迹,便于追溯。对评估结论的偏差设立回溯机制,推动参数与模型持续修订。随着能力成熟度提升,可引入更高阶的协同优化与自适应策略,把评估从项目化工作转变为日常化能力,让系统稳定性在每一次滚动中逐步提升。

4 结语

新能源接入改变了电力系统的动态属性与稳定边界,电气自动化系统需要在尊重物理约束的前提下,以分层控制、保护协同与数据治理重构运行机制。围绕电源控制策略、网络无功支撑、继电保护自适应与广域同步测量构建一体化方案,并以源网荷储协同与可复制的作业文件支撑长期运行,既能提升可再生能源可接纳能力,也能把频率与电压波动压缩在可承受区间。通过模型一试验一运行的滚动校核与路线图推进,系统稳定性与经济性将同步改进,电力系统获得更强的韧性与扩展能力。

参考文献

- [1] 杨晓婷,李斌,苏玮. 新能源接入对电网稳定性的影响与应对策略[J]. 光源与照明, 2025, (01): 222-224.
- [2] 刘哲睿,王儒科,曹宝丹. 基于频率响应模型新能源接入对电网运维的影响研究[J]. 电力设备管理, 2024, (17): 20-22.
- [3] 李芊芊. 分布式新能源接入对电网调度影响分析及应对策略[J]. 张江科技评论, 2024, (06): 38-40.
- [4] 李佳蔚,张冠宇. 大规模分布式新能源接入对省级电网稳定性影响[J]. 中国电力, 2024, 57 (06): 174-180.
- [5] 翟晓敏,夏昊. 新能源接入电网稳定性控制策略研究[J]. 光源与照明, 2023, (11): 150-152.