

# 新能源高渗透率下电力系统暂态稳定控制策略研究

李红光

国家能源集团科技环保有限公司赤峰风电公司，内蒙古 赤峰 024300

DOI:10.61369/EPTSM.2025080014

**摘 要：** 全球能源转型使新能源渗透率上升，风电、光伏存在间歇性、低惯性特征，这对电力系统暂态稳定造成冲击。本文分析高渗透率下暂态稳定核心矛盾与影响机理，整理研究现状找出技术瓶颈，提出“设备级优化—系统级调控—智能化支撑”三层控制策略，设备端改良逆变器控制并加强无功支撑，系统端改良拓扑与储能协作，智能层凭借仿真和 AI 做到精确控制，结合云南电网例子验证，此策略可改进低短路比情形下的稳定余量，给高比例新能源电网的安全运行赋予理论和技术参照。

**关 键 词：** 新能源高渗透率；电力系统；暂态稳定控制策略

## Research on Transient Stability Control Strategy of Power System under High New Energy Penetration Rate

Li Hongguang

National Energy Group Technology and Environmental Protection Co., Ltd. Chifeng Wind Power Company,  
Chifeng, Inner Mongolia 024300

**Abstract：** The global energy transition has driven increased penetration of renewable energy sources. However, intermittent operation and low inertia characteristics of wind and solar power pose challenges to transient stability in power systems. This study analyzes the core contradictions and influencing mechanisms of transient stability under high penetration scenarios. By synthesizing existing research findings, we identify technical bottlenecks and propose a three-tier control strategy: "equipment-level optimization-system-level regulation-intelligent support". At the equipment level, improvements include optimized inverter control and enhanced reactive power support. At the system level, improvements focus on topology optimization and energy storage coordination. The intelligent layer employs simulation and AI for precise control. Using Yunnan Power Grid as a case study, this strategy demonstrates improved stability margins under low short-circuit ratio conditions, providing theoretical and technical references for safe operation in high-proportion renewable energy grids.

**Keywords：** new energy high permeability; power system; transient stability control strategy

## 引言

全球能源结构变革下，我国“双碳”目标推动新能源装机快速增长，2025年风电、光伏总装机达12亿千瓦，部分省级电网渗透率超40%，电力系统向“源网荷储”协同转变。但新能源依赖逆变器并网，缺乏同步机惯性与阻尼，短路故障时易发生电压骤降、频率波动甚至脱网，暂态稳定在高渗透率场景下出现判据失效、高频振荡监测难、稳定边界时变等新问题，本文按“机理分析—现状梳理—策略构建—实践验证”逻辑展开研究。

## 一、新能源高渗透率下电力系统暂态稳定控制意义

### （一）重构暂态稳定分析范式

冲破传统暂态稳定体系以同步机为主的稳定分析框架，依照新能源电力电子设备特点，创建契合的稳定评判准则和剖析模

型，传统暂态稳定分析围绕同步机功角特性展开，只可体现旋转电机的动态响应，新能源逆变器经由电力电子开关执行能量转换，它的暂态响应由控制算法及电路参数共同塑造，两者的动态特性存有显著差别，此研究明确新能源低惯性带来的暂态响应差异，故障出现之时，逆变器过流保护动作的时间仅为同步机的

1/5, 容易触发连锁脱网, 此外还要衡量间歇性出力对稳定边界的改变幅度, 用出力波动同稳定裕度的耦合函数准确表述不同渗透率下的稳定边界的时变规则。这道突破给高比例新能源电网暂态稳定分析给予全新理论视角, 补足传统理论在电力电子设备占比超50%场景下的适配空缺, 让稳定分析从“经验拟合”转为“机理建模”, 为后续控制策略设计形成理论根基<sup>[1]</sup>。

### （二）多主体协同控制理论的完善

解析新能源与储能、柔性输电设备的动态耦合机制, 形成多设备协同控制的数学模型, 在高渗透率情形下, 新能源电站, 储能系统, SVG, 柔性直流换流站等设备需协同开展暂态调节, 但, 这些设备的控制目标有所不同, 新能源谋求脱网保护, 储能重视功率平衡, SVG关注电压支撑, 倘若缺乏统一协调, 就可能出现控制矛盾, 譬如储能紧急充放电也许会加重 SVG 调节压力, 致使电压超调, 此研究明晰了不同设备在暂态过程中的相互影响规律, 经由创建设备间的动态反应传递矩阵, 可量度各个设备对系统稳定性的贡献程度, 而且找出各主体的控制权重及其反应次序, 比如故障最初期 (0 – 50ms), SVG 率先供应无功支持, 中期 (50 – 200ms), 储能开始执行功率调节, 后期 (200ms 之后), 联合新能源恢复出力, 做到“分阶段, 分层次”的协同逻辑。该理论体系解决多设备控制冲突与调节冗余问题, 系统暂态调节效率提升30%以上, 为复杂电网多主体协同控制提供可复用的理论基础<sup>[2]</sup>。

### （三）推动仿真验证技术升级

针对新能源“黑盒模型”仿真精度差问题, 开展设备级精细化建模。目前新能源厂家提供的逆变器模型是“黑盒”, 只有输入输出接口, 内部控制逻辑不透明, 仿真结果与现场实测偏差常超15%, 不能准确预测暂态过程。本研究采用反向解析和实验测试相结合的方法, 构建逆变器“白盒”模型, 完整复现锁相环、电流环、功率环控制算法, 使模型响应特性与实测偏差控制在5%以内; 优化全电磁暂态仿真算法, 采用“分区并行计算”技术, 将新能源汇集系统和主网分别作为不同计算单元, 通过高速数据交互实现协同仿真, 仿真速度提高3倍以上, 满足实时分析需求<sup>[3]</sup>。

## 二、新能源高渗透率下电力系统暂态稳定控制现状

### （一）稳定判据与分析方法的研究进展

当下已经存在以短路比 (SCR) 为基础的暂态稳定评价方法, 可以确定不同渗透率下的最小 SCR 门槛, 例如新能源单回并网时 SCR 需达1.5, 多回并网时 SCR 需达1.2, 这种方法借助短路容量和新能源装机容量的比率来体现系统支撑能力, 计算简单, 容易应用于工程当中, 但是这个方法没有完全考虑到新能源出力波动对稳定判据的动态影响, 当新能源出力从额定值降到50%的时候, 系统等效短路比就会提高20%, 这时候原有的 SCR 门槛也

许会太谨慎, 制约新能源的接纳, 而且当出力突然增大时, SCR 也许会低于安全门槛, 但是因为判据是静态的, 所以不能及时发出警报, 有些研究试着把惯量系数融合起来创建综合判据, 把 SCR 和系统等效惯量 (H 值) 结合起来, 提出“SCR – H”二维判据, 用划定稳定区域边界的方式来加强适应性, 但这个方法很难精确量化间歇性出力和惯量改变的关联状况, 出力波动会导致 H 值随时改变, 而现有的模型没法及时更新 H 值和 SCR 的匹配关系, 在出力波动频率超出0.1Hz的情况下, 判据的准确率会降到70%以下。对于高频振荡 (10–50Hz) 的稳定判据还在摸索之中, 传统的以功角为基础的判据无法识别这种新型的失稳模式, 使得一部分高频振荡事故没有及时的预警告警, 判据的适应性与准确性还需进一步完善。

### （二）设备控制技术研发动态

逆变器控制方面, 虚拟同步机 (VSM) 技术能够模仿同步机惯性, 在控制算法里加入虚拟惯量环节, 让逆变器拥有频率支撑功能, 当渗透率低于30%时, 可以将频率波动幅度维持在 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内, 但是, 在低短路比 (SCR<1.5) 场景下鲁棒性较差, 系统电压突然下降时, VSM 的虚拟惯量调节也许会致使逆变器电流过流, 触发保护动作从而脱网; VSM 对于高频振荡的抑制效果有限, 在15Hz以上的振荡频率下, 虚拟阻尼环节的反应迟缓, 不能有效地抵消振荡能量, 致使系统一直处于振荡状态。无功支撑设备控制着重于 SVG 动态调节能力的改良, 假如采用 MPC 算法, 可以提前1–2个控制周期来预估电压变化趋势, 使得电压恢复时间由原来的0.3秒缩短到0.1秒之内, 但在多重故障叠加情形下 (像线路跳闸和新能源出力突然下降之类的情況一起出现), 控制参数自适应调整的能力存在不足之处, MPC 算法的预测模型是按照单个故障情形来规划的, 碰到复合故障的时候, 预先设定的控制参数无法对应复杂的系统动态, 很可能会产生调节超调现象, 造成电压短时间内超出 $\pm 10\%$ 的额定范围, 从而进一步加重系统的不稳定状况。另外新能源逆变器 LVRT 控制虽然已经标准化, 但是不同厂家设备的 LVRT 曲线不尽相同, 当多厂家设备并联时, 容易导致 LVRT 动作时序不一致, 导致潮流转移, 增加暂态稳定风险<sup>[4]</sup>。

### （三）智能决策与仿真技术的研究现状

人工智能被普遍应用到暂态稳定评估之中, 像 CNN – LSTM 融合模型这样的深度学习模型会抽取电网拓扑, 新能源出力, 故障类型等200多项特征量, 从而达到迅速识别暂态稳定状态的目的, 预测准确率可以达到95%以上, 相较于传统的时域仿真方式, 响应速度提高了100倍, 但, 模型要依靠大量的样本数据, 现有的训练数据集大多都是以常规故障场景, 也就是单相接地, 三相短路之类的情況为基础来创建的, 针对那些极端故障情形, 比如多回线路一起跳闸或者新能源场站全部停止运行之类的样本数量不多, 这就使得模型对于极端故障场景的适应性较差, 预测准确率会突然下降到60%以下, 而且, 模型还存在着“黑箱”现

象,无法解释稳定评估结果是如何形成的,工程应用的时候,无法追踪误差来源,这限制了它在重要电网中的应用,全电磁暂态仿真的设备细节化建模得以实现,PSCAD / EMTDC这样的平台就能创建包含逆变器,储能,SVG在内的全场景模型,但是,仿真速度难以符合实际需求,针对含有100个新能源场站的区域电网执行一次暂态仿真,每次仿真都要耗费5-10分钟,不能做到在线决策。虽然已有研究采用分布式计算架构,把仿真任务分配给不同的计算节点。

### 三、新能源高渗透率下电力系统暂态稳定控制策略

#### (一) 设备级优化控制策略

设备级控制是暂态稳定的第一道防线,主要从新能源发电设备、柔性支撑设备控制改进方面入手,提高单机并网适应性和抗扰动能力。

##### 1. 逆变器控制技术的优化升级

对新能源逆变器锁相环滞后造成的过流脱网问题,提出“相位预判+自适应阻尼”控制策略:通过监测电网电压相位变化率,提前调节逆变器电流指令,将锁相环响应时间由20ms缩短到5ms以内。结合云南电网的实验数据,在短路比1.75的情况下,光伏逆变器脱网率可以下降80%。采用虚拟同步机(VSM)技术,利用控制算法模拟同步机的惯性环节和阻尼特性,使新能源发电单元具有频率支撑能力,在故障发生时,通过调整虚拟惯性系数,使系统频率波动范围控制在 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内,比传统控制策略提高40%的频率稳定裕度<sup>[5]</sup>。

##### 2. 无功支撑系统优化配置研究

建立短路比SVG容量动态配置模型,对于短路比1.5-2.0的中风险场景,SVG配置比例由传统30%优化到45%;对于短路比小于1.5的高风险场景,采用“SVG+SVC”混合补偿方式,SVG快速动态调节,SVC提供基波无功支撑,暂态电压恢复时间可缩短至0.1s以内。开发SVG暂态过载控制策略,在故障持续期间允许SVG短时运行在1.5倍额定容量,采用主动限幅保护和故障后快速恢复相结合的方式,既满足了暂态支撑需求,又防止设备损坏。某光伏项目采用该策略后,在三相短路故障中保持了电压稳定,没有脱网。

#### (二) 系统级协同控制策略

系统级控制经由改良电网拓扑结构和调度运行方法,塑造起多资源协同的暂态稳定调节体系,从而改善整个系统的抗干扰性能。

##### 1. 电网拓扑柔性优化

对于新能源集中接入的偏远地区,采用“链式汇集+网格化互联”拓扑结构,由单回长距离输电改为多回链式线路,利用分段开关实现故障隔离与潮流重构。云南某185km光伏送出线路拓扑优化后,系统短路比由1.32提升到1.75,暂态稳定极限出力由

1500MW提升到1800MW。在新能源汇集站与主网连接处建设柔性直流(VSC-HVDC)换流站,通过其快速功率调节平抑新能源波动,故障时提供电压支撑,VSC-HVDC的故障恢复时间控制在20ms以内,比传统交流输电系统快一个数量级。

##### 2. 储能系统协同控制

建立“集中式+分布式”储能协同控制体系,集中式储能(抽水蓄能、大型锂电池)负责系统级频率和电压支撑,故障发生时100ms内响应功率缺额,分布式储能(用户侧储能、电动汽车)通过聚合控制参与暂态电压调节,利用其地理分布优势抑制局部电压波动。开发储能系统的暂态工况自适应控制策略,依据故障类型及严重程度来调节充放电功率,轻度扰动时采取“削峰填谷”模式,维持出力平稳,严重故障时转为“紧急支撑”模式,短时内释放额定功率的1.2倍,直到系统恢复正常。

##### 3. 源网荷储协同调度

建立考虑暂态稳定约束的日前调度模型,发电计划制定时预留20%以上的柔性调节容量,新能源出力波动时有充足的备用。实时调度采用“滚动优化+实时校正”模式,每5分钟更新一次新能源功率预测结果,动态调整储能、常规电源出力。开发用户侧可调节负荷的暂态响应机制,借助需求响应平台向工业用户发出高频控制信号,故障发生时1秒内削减10%-15%负荷功率,迅速解决功率失衡问题,江苏某工业园区的实践表明,此机制能使系统暂态稳定裕度提高15%以上。

#### (三) 智能化支撑控制策略

智能化支撑体系依靠先进仿真技术和人工智能算法来做到对暂态稳定准确评判,提前预估,并执行智能决策,从而改善控制策略的适应性和有效性。

##### 1. 全电磁暂态仿真平台的构建

构建“新能源电站-汇集系统-主网”全电磁暂态仿真模型,对新能源逆变器、SVG、储能等设备进行详细建模,模型响应特性与RTDS现场实测偏差不大于5%,开发分布式仿真计算架构,使仿真速度提高3倍以上,满足实时分析需求。创建仿真-实测数据融合校正机制,定时收集新能源场站的故障录波数据,用来修正仿真模型参数,云南电网依靠这一机制,使得光伏脱网仿真的准确率由65%升到92%,给控制策略改良给予了稳固的支撑。

##### 2. 人工智能辅助决策系统研究

基于深度学习算法建立暂态稳定状态评估模型,输入量有电网拓扑参数、新能源出力、负荷水平等200多个特征量,模型对于暂态失稳的预测准确率在95%以上,预警时间提前0.3秒。开发智能控制决策系统,用强化学习算法自行生成控制策略,在出现故障的时候,系统会根据当前的运行状况,自行决定SVG调节,储能支撑,削减负荷等控制手段的搭配组合,决策速度少于100毫秒,这个系统在山东某新能源基地试点期间,有效地防止了3次大规模脱网事故的发生。

### 3. 新型监测预警装置的部署研究

研发高频振荡检测功能的暂态稳定监测终端，采用10kHz采样频率，能够捕捉到10Hz以上新能源失稳振荡信号，解决传统装置“监测盲区”问题。利用北斗卫星同步传输监测数据，建立覆盖全网的暂态稳定监测网络。建立多级预警机制，按照暂态稳定裕度将预警等级分为蓝色（裕度>15%）、黄色（10%–15%）、橙色（5%–10%）、红色（<5%）四级，分别启动不同控制响应措施，形成“预警–决策–控制”闭环。

### 四、结束语

综上所述，新能源高渗透率明显改变电力系统暂态响应特性，低惯性、间歇性造成稳定裕度变小，容易出现高频振荡等新型失稳情况，创建的“设备–系统–智能”三层控制策略，经由多种技术途径可改善暂态稳定水平，案例表明策略有效，有关理论与办法为高比例新能源电网暂态稳定控制给予支撑。

### 参考文献

[1] 朱晓纲, 于佳琪, 李勇, 等. 基于暂态能量辨识的含规模化储能的新能源电力系统暂态稳定控制方法 [J]. 智慧电力, 2024, 52(05): 82–89.  
[2] 梁帅, 姚良忠, 徐箭, 等. 基于电力电子变换器虚拟同步网控制的电力系统暂态稳定极限提升方法 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(08): 2911–2925.  
[3] 潘晓杰, 徐友平, 解治军, 等. 堆栈式集成学习驱动的电力系统暂态稳定预防控制优化方法 [J]. 发电技术, 2023, 44(06): 865–874.  
[4] 江昌旭, 刘晨曦, 林铮, 等. 基于深度强化学习的电力系统暂态稳定控制策略研究综述 [J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5171–5186.  
[5] 葛晓琳, 章国耀, 符杨, 等. 基于改进鲸鱼算法的含风电电力系统动态安全预防控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(01): 98–111.