

高比例新能源并网下电力系统暂态稳定控制策略优化研究

王亚浩

河南中原能建工程有限公司，河南省鹤壁市，458030；

摘要：随着全球能源结构的转型和可再生能源技术的快速发展，高比例新能源并网已成为电力系统面临的重要趋势。这一变革在给电力系统带来清洁能源的同时，也对电力系统的暂态稳定性提出了新的挑战。传统电力系统主要依赖于同步发电机提供惯量和阻尼，以维持系统的暂态稳定。然而，新能源如风电和光伏等，由于其出力具有间歇性和不确定性，且新能源并网主要通过电力电子逆变器接入电网，缺乏同步发电机的物理惯量和阻尼特性，这导致电力系统的暂态稳定性问题日益突出。

关键词：高比例新能源并网；电力系统；暂态稳定控制策略

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.015

引言

随着新能源渗透率的不断提高，电力系统的结构和运行特性发生了显著变化。高比例新能源并网不仅改变了电力系统的供需平衡，还对电力系统的动态行为和稳定性产生了深远影响。因此，研究高比例新能源并网下电力系统的暂态稳定控制策略优化，对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

1 高比例新能源并网对电力系统暂态稳定的影响

1.1 新能源并网对电力系统暂态稳定性的挑战

高比例新能源（风电、光伏为主）并网彻底改变了传统电力系统的惯量特性与功率支撑能力，给暂态稳定带来多维度挑战。传统同步发电机通过转子惯性储存能量，在扰动发生时能短暂维持系统频率稳定，而新能源发电依赖电力电子逆变器并网，几乎不提供转动惯量，导致系统惯量水平随新能源渗透率升高而显著下降，频率对功率扰动的敏感度大幅增加，扰动后频率变化率（ROCOF）急剧上升，易触发低频或高频切机保护，扩大事故范围。功率支撑方面，新能源逆变器的控制策略以最大功率点跟踪（MPPT）为主，故障期间多采用低电压穿越（LVRT）策略保持并网，但缺乏同步发电机的强励磁调节能力，无法快速提供动态无功支撑以抑制电压跌落，可能导致电压失稳。此外，新能源出力的随机性与波动性使系统功率平衡难度增加，扰动发生时更易出现功率缺额或盈余，加剧暂态不稳定风险；而大规模新能源集中并网形成的“弱惯量-弱支撑”系统，对故障清除速度与控制策略的响应精度提出了更严苛的要求。

1.2 影响暂态稳定性的关键因素分析

高比例新能源并网下，电力系统暂态稳定性受新能源特性、系统结构与故障特性三类关键因素耦合影响。新能源侧因素中，惯量特性是核心：逆变器的虚拟惯量控制参数（如惯量系数、阻尼系数）设置不合理，会导致惯量支撑不足或过度，影响频率稳定；故障穿越策略若仅关注保持并网而忽视无功输出，会加剧故障期间的电压崩溃风险；出力波动性则通过影响系统备用容量配置，间接降低暂态稳定裕度。系统结构因素方面，网络拓扑的强弱直接决定故障传播速度，新能源集中并网的远距离输电网络（如“三北”地区风电外送通道），线路阻抗大、暂态稳定极限低，易发生功角失稳；调峰调频资源配置不足，无法快速平抑新能源出力波动与故障导致的功率差额，会延长暂态过渡过程。故障特性因素中，故障类型与清除时间至关重要：三相短路等严重故障会瞬间造成大量功率缺额，而故障清除时间超过临界值会使系统失去稳定；故障位置若靠近新能源汇集站，会导致多台逆变器同时脱网，引发连锁反应，进一步恶化暂态稳定。

2 电力系统暂态稳定的问题

2.1 系统惯量不足导致的频率稳定问题加剧

高比例新能源并网下，电力系统惯量特性的根本性改变使频率稳定问题成为暂态稳定的首要挑战。传统电力系统的惯量主要由同步发电机的旋转转子提供，转子储存的动能在功率扰动时可短暂弥补功率差额，减缓频率变化速度。而风电、光伏等新能源发电依赖电力电子逆变器与电网连接，其发电过程不涉及机械旋转部件，无法像同步发电机那样提供天然惯量，导致系统总惯量随新能源渗透率升高而线性下降。当新能源渗透率超过50%时，系统惯量可能降至传统系统的1/3以下，此时

若发生大型机组跳闸、新能源出力骤降等功率扰动,频率变化率(ROCOF)会急剧上升,很容易突破发电机组、负荷的频率耐受极限(如低于49Hz或高于51Hz)。同时,惯量不足还会导致频率稳定裕度大幅缩小,传统的一次调频手段因响应速度滞后难以有效遏制频率跌落,进而触发低频减载、新能源脱网等连锁保护动作,甚至引发系统性频率崩溃。

2.2 动态无功支撑能力薄弱引发电压失稳风险

新能源机组的无功调节特性缺陷,使电力系统在暂态过程中面临严重的电压失稳风险。传统同步发电机通过励磁系统可快速调节励磁电流,在故障期间输出大量动态无功功率,支撑电网电压恢复;而新能源机组的逆变器通常采用最大功率点跟踪(MPPT)控制策略,设计初衷是优先保证有功功率输出,无功调节能力受限于逆变器容量与控制算法,且响应速度与调节范围均不及同步发电机。在高比例新能源并网场景下,若发生线路短路、雷击等故障导致电压骤降,新能源机组为满足低电压穿越(LVRT)要求,往往会减少甚至暂停无功输出,进一步加剧系统无功缺额。此外,大规模新能源集中并网多采用远距离输电方式,线路充电功率与无功损耗较大,而沿途无功补偿设备(如并联电容器)多为静态补偿,无法动态跟踪暂态过程中的无功需求变化。这种“无功供给不足-电压跌落-新能源脱网-无功进一步短缺”的恶性循环,极易引发区域性电压崩溃,扩大故障影响范围。

2.3 功率波动与备用不足导致暂态过渡过程恶化

新能源出力的随机性、波动性与系统备用容量配置的不匹配,会显著恶化暂态稳定的过渡过程,增加稳定控制难度。风电、光伏出力受风速、光照等自然条件影响,呈现出日内波动、季节变化等特性,且短期(分钟级)出力波动幅度可达额定容量的20%-40%,这种波动本身就构成持续的小扰动,降低系统暂态稳定裕度。当叠加突发故障(如设备跳闸、负荷突变)时,系统需快速调用备用容量弥补功率差额,但传统备用容量主要依赖同步发电机的调峰能力,而高比例新能源并网下,大量同步发电机因发电效益低而停机或降出力运行,导致系统旋转备用、热备用容量严重不足。若备用容量无法及时响应功率缺额,暂态过程中系统功率失衡的持续时间会延长,功角摇摆幅度增大,原本可恢复稳定的故障可能演变为失稳事故。此外,新能源出力预测精度不足(短期预测误差通常在10%-15%),使备用容量配置难以精准匹配实际需求,要么因备用过多造成资源浪费,

要么因备用不足埋下稳定隐患。

3 稳定控制策略优化研究

3.1 新能源逆变器虚拟惯量与阻尼协同控制优化

针对系统惯量不足问题,需通过优化新能源逆变器的虚拟惯量与阻尼协同控制,模拟同步发电机的惯量支撑特性。核心优化方向是虚拟惯量参数自适应调节:基于实时监测的系统惯量水平与频率变化率,动态调整惯量系数,在频率跌落初期增大惯量系数以减缓频率下降速度,在频率恢复阶段减小惯量系数以避免频率超调;同时引入阻尼系数与频率偏差的关联调节,通过比例-微分(PD)控制算法抑制频率振荡,避免惯量支撑引发的系统不稳定。此外,多逆变器惯量协同分配策略可解决大规模新能源并网时的惯量支撑分配不均问题:根据各逆变器的额定容量、当前出力与接入位置,采用加权分配算法确定各逆变器的惯量支撑份额,确保惯量支撑与系统需求匹配,避免单台逆变器过载。该策略需兼顾惯量支撑效果与新能源出力利用率,通过限制虚拟惯量控制对MPPT的影响,在稳定与效率间实现平衡。

3.2 动态无功协同支撑控制策略优化

优化动态无功协同支撑策略是提升故障期间电压稳定的关键,需整合新能源逆变器、静止无功发生器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等多类无功源的调节能力。首先,新能源逆变器无功输出特性优化:突破传统LVRT策略的局限,在故障期间根据电压跌落深度自动切换至“无功优先”模式,通过扩大逆变器的无功输出范围(如利用直流侧电容储能短时提供超额无功),快速抑制电压跌落;同时引入电压暂降预测算法,根据故障初期的电压变化趋势提前调节无功输出,缩短响应延迟。其次,多无功源分层协同控制:将系统分为新能源汇集层、输电层与负荷中心层,汇集层以逆变器无功调节为主,快速响应局部电压扰动;输电层利用STATCOM的动态无功支撑能力,维持线路电压稳定;负荷中心层通过SVC补偿负荷无功需求,减轻系统无功压力。通过建立统一的无功控制指令分配机制,实现多无功源的动作协调,避免无功调节冲突。

3.3 基于广域测量的暂态稳定紧急控制优化

基于广域测量系统(WAMS)的暂态稳定紧急控制,通过实时获取全系统运行数据,实现扰动后的快速精准控制。优化重点在于控制决策的快速性与准确性:采用边缘计算技术将部分数据处理任务下放至厂站端,缩短数据传输与处理延迟,使控制指令生成时间从数百毫秒

降至数十毫秒；同时构建基于机器学习的暂态稳定快速评估模型，通过训练大量故障场景数据，实现扰动发生后100ms内判断系统稳定状态，为控制决策提供依据。控制措施的自适应选择也是优化核心：根据稳定评估结果，自动匹配最优控制措施组合（如切机、切负荷、紧急制动电阻投入），并基于广域信息优化控制量分配，例如在功角失稳风险时，优先切除离扰动点最近、对稳定影响最大的新能源机组；在频率失稳时，按负荷重要性分级切负荷，减少供电损失。此外，引入“预测-控制”闭环机制，根据控制后的系统状态反馈动态调整控制措施，提升控制效果。

3.4 储能系统参与的暂态稳定协同控制优化

储能系统（电化学储能、飞轮储能等）凭借快速功率调节能力，成为暂态稳定控制的重要支撑，其控制优化需聚焦“源-储-荷”协同。储能功率调节策略优化：根据系统扰动类型动态切换储能运行模式，频率扰动时工作于惯量支撑与一次调频模式，通过快速充放电平抑频率波动；电压扰动时切换至无功补偿模式，辅助维持电压稳定；功角扰动时则通过精准控制储能的有功输出，调整系统功角特性，抑制功角振荡。储能与新能源协同控制：将储能与新能源场站一体化控制，新能源出力波动时，储能实时补偿功率差额，减少对系统的扰动；故障期间，储能与新能源逆变器协同提供有功与无功支撑，提升系统稳定裕度。此外，多类型储能协同优化可发挥各自优势：飞轮储能响应速度快（毫秒级），适用于抑制高频振荡；电化学储能容量大，适用于长时间功率差额补偿，通过协调控制实现优势互补。

3.5 系统惯量与备用容量协同优化配置

从规划层面优化系统惯量与备用容量配置，是提升高比例新能源并网下暂态稳定的基础。惯量配置优化需建立惯量需求与新能源渗透率的量化关系模型，根据不同渗透率水平确定最小惯量阈值，通过保留部分同步发电机、配置虚拟惯量装置等方式满足惯量需求；同时考虑惯量的空间分布，避免惯量集中在某一区域导致系统“局部弱惯量”。备用容量配置优化需突破传统固定备用模式，采用“常规备用+新能源备用+储能备用”的混合备用模式：常规备用（同步发电机调峰）保障基荷稳定，新能源备用通过预留部分新能源发电容量实现，储能备用则利用其快速响应能力应对突发功率缺额。通过

建立基于场景分析的备用容量优化模型，根据新能源出力预测与负荷变化，动态调整各类备用容量比例，在满足暂态稳定需求的同时降低备用成本。

4 优化策略的未来发展趋势

未来，高比例新能源并网下的暂态稳定控制策略将向智能化、协同化、柔性化方向发展。智能化方面，人工智能技术将深度融入控制决策全过程，基于数字孪生构建电力系统虚拟镜像，实现扰动的提前预测与控制策略的离线预演；强化学习算法将自主优化控制参数，适应新能源出力与系统结构的动态变化，实现“自学习-自决策-自控制”的智能闭环。协同化方面，控制范围将从单一电力系统拓展至“源网荷储”多主体协同，通过需求响应技术引导用户负荷参与暂态稳定控制，例如在频率扰动时，聚合柔性负荷快速削减用电功率，补充系统惯量支撑；同时加强多能源系统（电、热、气）的协同控制，利用其他能源系统的调节能力提升电力系统暂态稳定。柔性化方面，基于电力电子技术的柔性控制设备（如固态断路器、统一潮流控制器）将广泛应用，实现故障的快速隔离与功率的精准调控；分布式控制架构将逐步替代集中式控制，提升系统对局部扰动的响应速度与抗干扰能力。此外，随着新能源渗透率进一步提升，控制策略需兼顾暂态稳定与长期安全，探索适应100%新能源系统的稳定控制新理论与新方法。

5 结语

总之高比例新能源并网对电力系统暂态稳定的影响深远且复杂，需要综合考虑新能源并网带来的挑战、影响暂态稳定性的关键因素以及具体的稳定控制策略优化。通过深入研究新能源逆变器的虚拟惯量与阻尼协同控制、动态无功协同支撑控制、基于广域测量的暂态稳定紧急控制、储能系统参与的暂态稳定协同控制以及系统惯量与备用容量的协同优化配置等措施，可以有效提升电力系统的暂态稳定性能。

参考文献

- [1] 解治军. 数据驱动的电力系统暂态稳定分析和预防控制方法研究[D]. 太原理工大学, 2024.
- [2] 朱晓纲, 于佳琪, 李勇, 马俊杰, 常樊睿. 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.