

电力系统自动化设备状态监测与故障预警技术研究

秦立

中安恒慧建设集团有限公司 安徽合肥 230000

摘要: 随着全球能源转型加速, 分布式电源 (DG) 凭借清洁、高效、灵活等优势, 在电力系统中渗透率不断提高。但大量接入改变了传统电力系统固有特性, 影响其稳定性。本文先阐述分布式电源主要类型及并网特性, 接着从电压、频率、暂态和小干扰稳定性四个维度, 分析其接入对电力系统稳定性的影响机制, 重点探讨不同类型DG在故障和正常运行时的动态响应特性。在此基础上, 归纳提升含分布式电源电力系统稳定性的关键技术措施, 如优化DG控制策略、加强配电网规划与重构等。最后, 展望未来研究方向, 为高比例分布式电源接入下电力系统安全稳定运行提供理论和技术支撑。

关键词: 分布式电源; 电力系统; 稳定性; 控制策略

引言

能源是国民经济发展的重要基石, 面对日益严峻的环境问题和能源结构调整需求, 开发利用可再生能源已成为全球共识。分布式电源作为可再生能源利用的主要形式之一, 通常指接入中低压配电网或直接接入用户侧的小型发电装置, 如太阳能光伏 (PV)、风力发电 (WT)、微型燃气轮机 (MT)、燃料电池 (FC) 等^[1]。与传统集中式发电相比, DG具有能源利用效率高、环境污染小、投资灵活等优点, 在各国能源战略中占据重要地位。

然而, 电力系统的稳定性是保障电力持续可靠供应的核心, 传统电力系统稳定性分析主要针对同步发电机主导的大电网。DG的大量接入, 特别是以电力电子逆变器为接口的可再生能源DG, 其动态特性与传统同步发电机存在显著差异, 导致电力系统的惯量水平降低、阻尼特性改变、故障电流特性复杂化, 对系统的电压、频率等稳定问题带来新的挑战^[2]。因此, 深入分析分布式电源接入对电力系统稳定性的影响机理, 并研究相应的改善措施, 对于推动DG的大规模友好并网和电力系统的安全稳定运行具有重要的理论意义和工程价值。本文将围绕上述问题展开详细探讨。

一、分布式电源的类型与并网特性

(一) 分布式电源的主要类型

根据能源来源和转换技术的不同, 分布式电源可分为以下几类:

可再生能源型DG: 主要包括太阳能光伏发电系统、

风力发电系统、水力发电 (小型)、生物质能发电等。这类DG依赖自然资源, 出力具有间歇性和波动性。

化石能源型DG: 如微型燃气轮机、内燃机等, 通常与热电联产 (CHP) 技术结合, 能源利用效率较高, 出力相对稳定可控。

储能型DG: 如蓄电池储能系统、飞轮储能等, 虽然本身不直接产生电能, 但其作为重要的灵活性资源, 能有效平抑可再生能源的波动, 提升系统稳定性。

(二) 分布式电源的并网特性

不同类型的DG由于其原动机和能量转换接口的差异, 表现出不同的并网特性, 主要体现在以下几个方面:

同步发电机型DG (如小型水力发电机、部分微型燃气轮机): 其运行特性与传统同步发电机类似, 具有一定的转动惯量和励磁调节系统, 能够参与系统电压和频率的调节, 对系统稳定性有一定支撑作用。但其单机容量小, 调节能力有限。

异步发电机型DG (如传统笼型异步风力发电机): 需要从电网吸收无功功率以建立磁场, 其并网会导致并网点电压下降。在故障情况下, 容易因电压跌落而失速脱网, 对系统暂态稳定产生不利影响。

电力电子接口型DG (如太阳能光伏、变速风力发电、燃料电池等): 通过逆变器与电网连接, 是目前DG的主流形式。其动态响应速度快, 但本质上不提供或提供很少的旋转惯量和短路电流。传统的电流源控制策略 (如最大功率点跟踪MPPT) 下, DG对电网电压和频率的变化不敏感, 缺乏主动支撑能力, 甚至在电网故障时会

因保护动作快速脱网，进一步加剧系统的不稳定^[3]。

二、分布式电源接入对电力系统稳定性的影响分析

(一) 对电压稳定性的影响

电压稳定性是指电力系统在受到扰动后，各节点电压能够维持在允许范围内或恢复到额定值的能力。DG接入影响复杂，取决于类型、容量、接入位置及控制策略。积极影响在于DG相当于负荷中心电源点，就近提供功率，减少线路损耗和电压降落，改善电压分布；尤其无功可控DG可动态调整无功输出，支撑并网点及周边电压，提升静态电压稳定性裕度。消极影响有：电压波动与闪变（出力波动大的DG导致线路潮流波动，引起电压波动超范围影响设备）；电压越限（DG出力大本地负荷小时潮流反向，致并网点电压升高越限，高渗透率时更突出）；无功需求与控制挑战（异步发电机型DG需吸收无功，容量大且无补偿会使电压下降；电力电子接口型DG传统MPPT控制不提供动态无功支撑，电压跌落时可能无法注入足够无功甚至脱网）；多DG间无功交互（同一区域接入的DG无功控制策略不协调，可能产生无功环流或电压调节“正反馈”效应，导致局部电压失稳）。

(二) 对频率稳定性的影响

频率稳定性取决于系统有功功率平衡，指受扰动后频率维持或恢复额定值的能力。DG接入通过改变惯量特性、一次调频能力和有功平衡影响频率稳定。主要影响：系统惯量降低（电力电子接口型DG不贡献惯量，渗透率提高使系统总惯量显著降低，有功扰动时频率变化率增大，稳定裕度减小）；一次调频能力减弱（大量DG不参与或有限参与调频，系统一次调频容量和响应速度下降，负荷波动或DG出力骤变时频率偏差难恢复）；有功波动加剧频率波动（风电、光伏等DG出力随机间歇，功率波动直接传递给电网，频率频繁波动超调节能力威胁稳定）；“孤岛效应”下频率稳定问题（配电网与主网解列形成“孤岛”时，DG容量与负荷不匹配或缺乏频率控制机制，导致频率不稳定，可能损坏设备或中断供电）^[4]。

(三) 对暂态稳定性的影响

暂态稳定性指系统遭受大扰动后同步发电机保持同步运行并过渡到新稳定状态的能力。DG接入影响体现在故障期间短路电流贡献、自身暂态响应及对故障后恢复的影响。不同类型DG影响：同步发电机型DG暂态特性与传统同步发电机相似，能提供短路电流并参与暂态恢复，控制得当可增强暂态稳定性，但单机容量小影响有限；异步发电机型DG故障时定子电压骤降致电磁转矩减

小，转子加速，故障切除时间长可能失步脱网，短路电流也较小；电力电子接口型DG传统逆变器故障时输出电流受限，短路电流远小于同步发电机，使配电网保护配合困难，若故障期间脱网会减少电源支撑，高渗透率时可能导致功角失稳或电压崩溃，其快速控制响应还可能与其他动态元件交互引发新暂态稳定问题。故障位置与DG接入位置影响：DG靠近故障点提供的短路电流有助于维持局部电压，减轻对其他区域影响；远离故障点时脱网对系统暂态稳定影响更大。

(四) 对小干扰稳定性的影响

小干扰稳定性指系统受小扰动后自动恢复原始平衡状态的能力，与阻尼特性有关。DG接入可能改变网络拓扑、潮流分布及动态元件阻尼特性，影响小干扰稳定性。主要影响：系统惯量和阻尼变化（高比例电力电子接口型DG降低惯量，使系统对小扰动频率响应更敏感，逆变器控制参数或策略不当可能引入负阻尼或弱阻尼，激发低频振荡模式）；多DG交互与谐振风险（多个逆变器接口型DG控制参数不匹配或耦合，可能产生动态交互作用，引发次同步或超同步振荡，逆变器开关频率和谐波与电网参数也可能发生谐振）；控制环路相互作用（DG逆变器多层控制环路与电网及其他DG控制环路可能存在动态耦合，设计不当易导致系统不稳定）。

三、提升含分布式电源电力系统稳定性的关键技术措施

针对上述分布式电源接入对电力系统稳定性带来的挑战，需要从技术层面采取有效措施加以应对：

(一) 优化分布式电源的控制策略

虚拟同步机（Virtual Synchronous Generator, VSG）/同步逆变器（Synchronverter）技术：通过控制算法使电力电子接口型DG模拟同步发电机的惯量、阻尼和励磁调节特性，使其具备电压和频率支撑能力，参与系统调频调峰，提高系统的惯量水平和抗扰动能力^[8]。

改进的低电压穿越（LVRT）与高电压穿越（HVRT）能力：增强DG在电网电压异常时的耐受能力，避免非计划脱网。在LVRT期间，不仅要求DG不脱网，还可根据电网需求控制其输出一定的有功和无功功率，以支撑电网电压恢复。

主动无功/电压控制与有功/频率控制：配置先进的逆变器控制策略，使DG能够根据电网调度指令或本地测量信息，主动调节无功输出以支撑电压，参与一次、二次调频以维持系统频率稳定。例如，采用下垂控制

(DroopControl)、虚拟惯量控制等。

协同控制策略：针对多DG接入场景，研究多DG之间的协同电压控制、频率控制和无功优化策略，避免控制冲突和负交互影响^[5]。

（二）加强配电网规划与重构

合理规划DG接入位置与容量：在配电网规划阶段，综合考虑负荷分布、线路参数、短路电流水平等因素，优化DG的接入点和接入容量，使DG的接入既能最大限度发挥其效益，又能减少对系统稳定性的负面影响。

网络重构与升级改造：通过配电网重构（如改变网络拓扑、开关状态）优化潮流分布，减轻DG接入引起的电压越限和潮流反转问题。对薄弱线路进行升级改造，提高线路载流量和电压支撑能力。

柔性交流输电系统（FACTS）与智能软开关（SOP）应用：在关键节点安装STATCOM、SVC等动态无功补偿装置，快速响应电压波动，提升电压稳定性。应用SOP等新型电力电子设备，实现潮流的灵活控制和优化分配。

（三）应用先进储能技术

储能系统（Energy Storage System, ESS）具有快速充放电能力，是平抑DG出力波动、提供惯量支撑、改善系统稳定性的有效手段：

平抑功率波动：储能可以吸收DG的多余出力，在DG出力不足时释放能量，减小对电网的冲击，缓解电压和频率波动。

提供惯量和调频备用：储能系统配合VSG控制策略，可以快速响应频率变化，提供虚拟惯量和一次调频支撑。

改善暂态稳定：在系统发生大扰动时，储能系统可以快速注入或吸收有功、无功功率，帮助系统维持电压和频率稳定，防止DG大规模脱网。

（四）完善并网标准与调度机制

制定和完善DG并网技术标准：系统明确分布式电源在电压调节精度、频率响应速度、低/高电压穿越（LVRT/HVRT）能力、短路电流贡献量、有功/无功功率控制策略等关键技术参数的量化指标，细化不同类型DG（光伏、风电、储能等）的并网接口规范，建立动态适应新能源渗透率提升的标准更新机制，确保DG并网行为的规范性和对电网的友好性。

加强需求侧响应（Demand Response, DR）：构建包

含峰谷电价、实时电价、可中断负荷电价等在内的多元化电价激励机制，开发用户侧智能响应终端与聚合平台，引导工业、商业及居民用户根据电网实时供需平衡情况和电价信号，主动调整用电时段与用电负荷，培育灵活性负荷资源池，增强电力系统的调节弹性，有效平抑DG出力随机波动对系统电压、频率稳定性造成的冲击。

构建智能化调度运行与监控系统：利用先进的量测、通信和信息处理技术（如智能电表AMI、配电自动化DA、高级量测体系AMI），实现对DG出力、负荷、电网运行状态的实时监测和精准预测，优化调度策略，协调DG、储能和传统电源的运行，保障系统稳定。

四、结论与展望

随着分布式电源在电力系统中的广泛应用，其对系统稳定性的影响日益凸显。本文详细分析了不同类型分布式电源的并网特性及其对电压、频率、暂态和小干扰稳定性的影响机理，并提出了针对性的关键技术措施。研究表明，通过优化分布式电源的控制策略、加强配电网规划与重构、应用先进储能技术以及完善并网标准与调度机制，可以有效提升含分布式电源电力系统的稳定性。未来的研究方向应进一步聚焦于多类型分布式电源协同运行的智能化控制技术，以及高比例可再生能源接入场景下的新型电力系统稳定性理论，为实现能源转型和可持续发展提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 马诚. 分布式电源接入对电力系统稳定运行产生的影响分析[J]. 电子测试, 2021. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8519.2021.03.043.
- [2] 张登义. 分布式电源及其并网对电力系统的影响研究[J]. 科技风, 2021(17): 3. DOI: 10.19392/j.cnki.1671-7341.202117081.
- [3] 李国栋, 王峥, 郝帅, 等. 分布式电源接入对配电网运行指标的影响评估[J]. 低压电器, 2021, 000(006): 79-85.
- [4] 桂前进, 江千军, 徐瑞翔, 等. 关于电力系统分布式电源接入电网承载力估算研究[J]. 通讯世界, 2020, 27(5): 2.
- [5] 费云婷. 分布式发电及其对电力系统的影响分析[J]. 电子技术与软件工程, 2022(005): 000.