

新能源并网条件下的电气系统稳定性分析与优化研究

张立恒

(深圳晟能电力工程设计有限公司, 广东 深圳 518110)

摘要 在能源清洁低碳转型背景下, 分析新能源并网对电气系统稳定性的影响, 探究相应分析与优化方法具有重要意义。研究从频率、电压、功角维度剖析新能源并网影响机制, 采用时域仿真、频域分析及混合分析等方法开展稳定性分析, 发现新能源低惯量、无功支撑弱等特性加剧系统失稳风险, 混合分析方法可有效解决复杂工况分析瓶颈。研究结果表明, 构建多源储能协调控制、实施无功精准调节、建立动态负荷响应体系、优化电网拓扑重构及强化电力电子设备故障穿越能力等策略, 能显著提升系统稳定性, 为新能源高比例并网提供技术支撑。

关键词 新能源并网; 电气系统稳定性; 时域仿真法; 频域分析法; 混合分析方法

中图分类号: TM92

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.040

0 引言

在电力电子技术飞速发展的今天, 新能源发电由变流器并网, 动态响应特性和传统旋转电机有本质不同。这一电源特性的变化, 使电力系统阻尼特性和动态行为发生变化, 导致系统受干扰后更易发生次同步振荡、频率崩溃等稳定问题。与此同时, 新能源电站集群接入给电网拓扑结构带来的冲击, 进一步增加了系统稳定控制问题的复杂程度。因此, 探讨适应新能源并网特点的电气系统稳定性、优化方法对于促进能源清洁并网转型有实际意义。

1 新能源并网对电气系统稳定性的影响

1.1 新能源发电特性

新能源发电具有间歇性、波动性、低惯性等特点, 和传统的同步发电机有明显的区别。它的能量转换主要取决于自然条件、光照、风速等因素, 对发电功率产生影响, 使得输出功率呈现离散化的波动状态, 难以通过常规调度进行精准预测调控^[1]。

传统的同步发电机依靠转子的惯性和励磁系统, 能够稳定地支持电网。当新能源发电设备通过电力电子换流器与电网连接时, 由于缺少物理上的惯性, 系统在频率突然变化时不能释放或吸收动能, 并且其运行主要受到最大功率追踪控制策略的影响, 难兼顾电网稳定, 扰动时无类似同步发电机的动态响应能力。

1.2 对系统稳定性的影响机制

新能源并网冲击系统的稳定性受频率、电压、功角等因素影响。在频率稳定性方面, 低惯量使得系统

抵抗扰动的能力较弱。在负荷突增或者电源故障的情况下, 传统系统的同步发电机能够弥补功率缺额的不足, 而新能源主导系统由于缺惯性导致频率变化率显著增加, 容易突破安全阈值。

在电压稳定性上, 新能源发电设备的无功支撑受到限制。当电力电子换流器处于正常工作状态时, 不会参与无功的调整, 而在系统电压发生波动时, 无法迅速进行补偿, 增加在弱电网中电压崩溃的风险。

2 新能源并网稳定性分析方法

2.1 时域仿真法

时域仿真技术以高精度非线性动态建模框架为基础, 通过直接数值求解系统微分一代数方程组, 完整地展现新能源并网系统受到复杂干扰时的动态反应过程。这种方法打破了传统线性化分析在强非线性系统建模中的局限性, 能够准确地捕捉到电力电子设备在多时间尺度耦合作用下触发振荡特性, 尤其是对宽频振荡, 暂态过电压、功角失稳等强非线性问题进行机理分析时, 它的核心优点是不需要预设稳定性判据, 只需数值积分就能直观地显示出系统由初始状态到稳定或者不稳定的完整演化轨迹, 从而为失稳机制的揭示提供直接的观测依据^[2]。

从建模层面上看, 这种技术能够将精细控制算法和电磁暂态特性结合起来, 采用模块化建模的方法对发电单元、变流器、电网进行深度耦合分析。但模型精度和计算效率有显著矛盾: 高阶模型虽能增强仿真置信度, 但会造成计算复杂度成倍增加, 从而制约它

在大规模系统上的应用范围。因此,在验证其他分析手段的有效性时,时域仿真经常被用作参考工具,它在振荡事件的再现、控制参数的优化以及系统稳定性的评估等核心领域得到了广泛应用。

2.2 频域分析法

频域分析技术利用系统阻抗数学模型,将新能源并网系统稳定性评价问题转换为频域内源侧与荷侧之间阻抗匹配性能判断问题。这种方法是基于奈奎斯特稳定性判据的理论,通过研究电源侧和负荷侧的阻抗比在复平面上的运动轨迹,从而实现了对系统稳定性的评估和稳定裕度的量化评价。其理论核心在于将非线性系统线性化到稳态工作点周围,用传递函数矩阵来表征系统的动态特性,使稳定性分析问题变为频域内代数方程求解的过程。

频域分析法的显著优点是物理概念清晰,计算效率突出,能快速辨识谐振频率点,揭示参数变化对系统稳定性影响的规律。从建模方法水平上看,采用 dq 轴坐标系阻抗建模,相序分解阻抗建模以及极坐标系阻抗建模的不同技术路线,可以分别适应不同控制策略以及电网拓扑结构的稳定分析要求。但这种方法依赖于系统线性化假设,在系统表现出强非线性特征或者出现宽频振荡等情况下,传统阻抗模型会显著降低其分析准确性,需要采用谐波线性化和多频段线性化改进技术,以扩大模型有效应用范围。

2.3 混合分析方法

混合分析技术将时域仿真和频域分析专长结合起来,搭建多尺度多物理场耦合稳定性评价框架。其核心分析逻辑表现在:先利用频域分析对关键振荡模态进行精准锁定,然后再利用时域仿真对模态存在性进行验证和动态演化规律解析,最后构建一个闭环分析模式,即“频域模态筛选—时域动态验证—机理逆向推演”。

从技术执行的角度看,这种方法可以被分为两个主要的技术路径:(1)基于特征值分解的模态解析路径,它通过计算系统状态矩阵的特征值来确定主导的振荡模态,并利用时域仿真来量化模态的阻尼特性;(2)阻抗灵敏度参数优化途径,根据频域阻抗模型辨识出关键参数并在时域内进行仿真,证明参数优化对系统稳定性有增强作用^[3]。

3 新能源并网条件下的电气系统稳定性优化策略

3.1 构建多源储能协调控制机制

随着新能源并网规模的持续攀升,电力系统对于灵活调节能力提出严格要求。多源储能协同调控机制关键是构建一个能够集成电池储能、抽水蓄能、飞轮

储能、压缩空气储能不同技术路线设备数据的统一能量管理平台,并进一步根据实时功率需求、储能状态、设备响应特性建立动态优化模型。

从控制策略上看,要发展分层分布式的控制架构。上层能量管理系统根据电网频率和电压的波动,以及新能源出力的预测结果制定储能充放电的全时段计划并下发至区域控制器;中层区域控制器综合考虑当地新能源发电的特点和负荷需求,实现所辖区域储能设备的功率分配、状态调整;下层设备控制器完成特定的命令,将实时的运行数据进行反馈,以构成闭环控制^[4]。

考虑到不同储能技术的特点差异,需要构建以响应速度、能量密度、循环寿命为目标函数的权重分配模型。比如当电网频率波动较快时,飞轮储能就会被优先选择;以电池储能深度充放电为重点,动态调节权重,实现长时间功率支持需求情景下多源储能准确适配。此外,还需要建立储能设备的健康状态评估体系,寿命预测模型需要根据电化学模型、温度场分布和其他数据来搭建。协同控制时留出安全裕度,对充放电策略进行优化,避免过充过放导致设备性能恶化,确保多源储能系统长时间稳定工作。

3.2 实施新能源电站无功功率精准调节

新能源电站无功功率精准调控,对确保电网电压平稳有着至关重要的作用。在新能源电站中,需要安装高精度无功功率测量设备,对电站无功功率输出情况进行实时监控。基于监测到的数据,采用尖端的智能控制技术,如基于深度学习的无功功率预测方法,并整合气象信息、过去的发电记录等多种数据来源,对新能源电站在未来某一特定时间段的无功功率需求进行精确的预估分析。

根据预测数据,应当合理地配置具有灵活调节功能的无功补偿设备,如静止无功发生器(SVG)和并联电容器组合。在预估电站无功功率不足的情况下,对 SVG 快速输出无功功率进行重点调控,实现电网电压的快速提升;在 SVG 容量有限的情况下启用并联电容器组以进一步补充无功。

此外,构建新能源电站与电网调度中心间的实时通信通道,接收电网调度指令,依据电网整体电压调控需求,动态调整电站的无功功率输出。通过对无功功率整定控制策略进行优化,可以使得新能源电站能够在各种运行条件下实现无功功率准确,快速整定,进而对电网电压的稳定起到强有力的支持作用。

3.3 建立动态负荷预测与响应体系

新能源并网场景中负荷侧表现出的随机性和不确定性特点进一步加大了功率平衡难度。为此,需借助

动态负荷预测与需求响应的协同联动机制,推动负荷角色由“被动消纳”向“可调节的资源”转变,以此增强系统的灵活性。

在动态负荷预测体系的建设中,要整合多源数据,采用先进的算法。具体而言,一方面需要将气象数据、用户用电行为和经济指标等外部信息进行集成;另一方面需要与智能电表、分布式传感器和其他终端设备实时数据连接,建立“宏观—微观上”结合预测模型。同时,采用长短期记忆网络(LSTM)、图神经网络(GNN)等深度学习算法提高预测精度,实现小时级到日级的负荷动态预测。

在实施需求响应时,需要构建一个“激励型+价格型”的双轨响应策略。激励型响应以签署协议的形式,引导大用户与工业负荷主动削减系统紧急时段负荷;通过利用分时电价、实时电价等价格信号,价格型响应能够指导居民和商业负荷调整其用电行为。

3.4 优化电网拓扑结构动态重构方案

新能源接入电网所带来的功率动态变化、不确定性特征,对传统电力系统稳定运行带来了巨大的考验。电网拓扑结构作为电能传输和分配的物理基础架构,其动态调节能力的强弱直接关系到整个系统的效率。建设数据—模型协同驱动电网拓扑智能重构系统,需要依靠实时量测系统和广域同步测量技术,实现电网节点电压、线路潮流等参数、新能源出力及其他多元数据同步采集和融合分析等。

基于深度强化学习与混合整数线性规划的耦合建模方法,构建囊括新能源出力波动性以及负荷需求不确定性的动态拓扑优化模型,借助图论方式对电网拓扑给予离散化建模,搭建拓扑状态快速评估以及优化决策算法架构。在工程实施方面,配备拥有毫秒级动作能力的智能开关装置,协同柔性交流输电设备实现拓扑结构的动态调整。采用边缘计算架构把控制权下放到配电网末端节点,经由分层分布式控制策略实现故障区域快速隔离、负荷智能转移以及潮流动态优化,切实提升新型电力系统在新能源高比例接入情形下的结构韧性与抗扰动能力。

3.5 强化电力电子设备故障穿越能力

新能源并网时,电力电子设备在能量转换和调控方面起到了核心的作用,它们的故障穿越特性直接影响到电网的平稳运行。为加强电力电子设备故障穿越能力,需要建设完善的技术保障体系。在装置设计环节中,可以选择宽禁带半导体元件,利用集成模块化

设计方法,对变流器散热和电磁兼容特性进行优化,进而增强装置功率密度和运行可靠性。同时,开发基于快速傅里叶变换及小波分析的复合故障诊断算法,借助高频采样技术捕获故障特征信号,实现故障类型的精准识别与定位^[5]。

此外,构建三段式控制策略,涵盖故障前预调控、故障中动态调整及故障后快速复原:在发生故障前,通过实时监测电网运行状况,调整变流器控制参数以提高故障耐受能力;在发生故障时,采用自适应虚拟同步控制技术对同步发电机惯性和阻尼特性进行仿真,维持电网频率平稳,注入无功电流来支持电网电压;在发生故障后,根据模型预测启动快速复原控制以使装置和系统平滑过渡。

4 结束语

随着新能源的大规模并网,电力系统的稳定性受到了全新的挑战。本研究从多维度影响分析、多方法融合评估两个方面揭示了新能源并网和系统动态行为之间的内在联系。所提出的稳定性优化策略,以提高系统灵活调节能力、改善结构韧性为主线,实现多源储能配合,即无功动态调控和、荷资源活化、拓扑智能重构、设备性能强化相结合的多元技术路径;构建与新能源特性相适应的稳定控制体系。这些研究结果不仅加深了人们对于新能源电力系统工作规律的认识,而且为新型电力系统安全、稳定工作提供了理论和技术参考,对推动能源结构转型、保障电力安全具有重要的科学价值与工程指导意义。

参考文献:

- [1] 王逊,侯丽君.新能源并网对继电保护系统的影响及其应对策略研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(12):70-72.
- [2] 张立伟,刘红丽,谢东升.适应新能源并网的新一代变电站自主可控二次系统研究与应用[J].山西电力,2023(06):17-20.
- [3] 谢学渊,曾麟,张宇峰,等.光伏新能源并网对继电保护的影响研究[J].煤化工,2023,51(04):154-159.
- [4] 杜强,郎泽萌,张小雷,等.新能源并网对电力系统电能质量的影响[J].电力设备管理,2020(12):120-121.
- [5] 宋军.新能源并网对配电系统继电保护影响分析[J].科学技术创新,2018(31):147-148.