

新能源并网场景下电气自动化系统稳定性提升策略研究

成志瀚

温州大学, 浙江温州, 325035;

摘要: 随着风能、太阳能等新能源大规模接入电网, 电气自动化系统稳定性面临严峻挑战。本文深入剖析新能源并网与电气自动化系统的基础架构及耦合关系, 系统分析影响系统稳定性的关键因素, 从新能源发电侧、电网侧、电气自动化系统侧提出全方位稳定性提升策略。通过搭建仿真模型和实际项目案例, 对策略有效性进行验证。研究成果为保障新能源并网环境下电气自动化系统稳定运行、促进新能源高效利用提供了理论依据与实践指导。

关键词: 新能源并网; 电气自动化系统; 稳定性; 提升策略

DOI: 10.69979/3041-0673.25.10.012

1 引言

1.1 研究背景

近年来, 全球能源结构加速向清洁化转型, 新能源发展态势迅猛。以我国为例, 截至 2024 年底, 风电、光伏发电装机容量分别突破 4.5 亿千瓦和 5.5 亿千瓦, 新能源发电量占全社会用电量的比重持续攀升。然而, 新能源大规模并网在推动能源结构优化的同时, 也给电力系统带来诸多挑战。由于新能源发电具有间歇性、波动性和随机性等特性, 其接入导致电网潮流分布更加复杂, 电压波动加剧, 频率稳定性面临考验。电气自动化系统作为保障电网安全、稳定、高效运行的核心, 其稳定性直接影响电力系统的可靠供电能力。传统的电气自动化系统在应对新能源并网带来的复杂工况时, 暴露出控制策略适应性不足、系统协同能力弱等问题, 亟需探索有效的稳定性提升策略。

1.2 研究意义

从能源安全角度来看, 提高电气自动化系统稳定性有助于增强电力系统对新能源的消纳能力, 减少弃风、弃光现象, 保障国家能源供应安全。在电力系统可靠运行方面, 稳定的电气自动化系统能够实时监测、精准控制电网运行状态, 及时应对新能源发电的不确定性, 避免系统故障的发生与扩大, 确保电力供应的连续性和可靠性。此外, 有效的稳定性提升策略能够促进新能源的高效利用, 降低新能源发电对电网的负面影响, 推动电力行业向绿色低碳方向发展, 具有重要的经济、社会和环境效益。

2 新能源并网与电气自动化系统基础

2.1 新能源并网技术

常见的新能源发电形式主要包括风力发电和太阳

能光伏发电。风力发电通过风力发电机组将风能转化为电能, 根据风力机与电网的连接方式, 可分为恒速恒频和变速恒频并网方式。太阳能光伏发电则利用光伏电池的光电效应将太阳能转换为电能, 其并网方式主要有集中式并网和分布式并网。新能源并网对电网结构与运行产生显著影响, 在潮流分布方面, 分布式电源的接入使得电网潮流方向不再单一, 出现双向潮流现象, 增加了电网潮流计算和控制的难度; 在电压波动方面, 新能源发电功率的随机变化会引起局部电网电压波动, 严重时可能超出允许范围, 影响电力设备的正常运行。

2.2 电气自动化系统架构与功能

电气自动化系统硬件主要由传感器、控制器、执行器等设备组成。传感器负责采集电网运行参数, 如电压、电流、功率等; 控制器对采集的数据进行分析和处理, 并根据控制策略生成控制指令; 执行器则根据控制器的指令调节电网设备运行状态。软件架构方面, 通常采用分层分布式设计, 包括站控层、间隔层和过程层。站控层实现对整个系统的监控和管理; 间隔层负责各电气间隔的控制和保护; 过程层则与一次设备直接连接, 实现数据采集和控制信号输出。其主要功能模块包括监控模块, 用于实时监测电网运行状态; 控制模块, 实现对发电、输电、配电等环节的优化控制; 保护模块, 在系统发生故障时迅速切断故障线路, 保障系统安全。

2.3 两者耦合关系

新能源并网与电气自动化系统在信息交互和控制协同方面存在紧密联系。在信息交互上, 新能源发电设备通过传感器将实时运行数据传输至电气自动化系统, 电气自动化系统则将控制指令反馈给发电设备, 实现双向信息流通。在控制协同方面, 电气自动化系统根据新能源发电的变化情况, 协调调度传统电源和储能设备,

维持电网功率平衡；同时，通过优化控制策略，调节新能源发电设备的输出，使其更好地适应电网运行要求，实现新能源与电网的协调运行。

3 新能源并网下系统稳定性影响因素剖析

3.1 新能源发电特性

新能源发电的间歇性、波动性与随机性对电网功率平衡和频率稳定造成极大影响。以风力发电为例，风速的变化遵循自然规律，具有显著的随机性和间歇性。在实际运行中，短时间内风速可能从额定风速骤降至切入风速以下，导致风机输出功率在数秒内从满功率输出骤减至几乎为零。若电网内其他常规电源无法在短时间内响应并补充缺失的功率，系统频率将迅速下降。据统计，在部分以风电为主的电网中，因风速突变引发的频率波动幅度可达 $\pm 0.3\text{Hz}$ ，严重威胁系统稳定。

此外，新能源发电的低惯量特性也是一大挑战。传统同步发电机依靠转子的旋转质量储存动能，具备较大的转动惯量，在系统频率变化时能够通过释放或吸收动能，为电网提供惯性响应，抑制频率变化率。而新能源发电设备，如风力发电机组的变流器和光伏逆变器，本质上是电力电子装置，缺乏机械惯性。当电网受到扰动时，这些设备无法像传统电源那样提供有效的惯性支撑，使得系统频率变化率显著增大。例如，在某大规模光伏电站接入电网的测试中，当发生三相短路故障时，由于光伏电站无法提供惯性响应，系统频率变化率比纯火电系统高出近 2 倍，严重影响电网的动态稳定性。

3.2 电网因素

电网结构对稳定性边界影响显著。电网拓扑结构的复杂程度直接决定了其对新能源波动的承受能力。在网架结构薄弱地区，线路阻抗较大，功率传输能力受限，新能源接入后容易引发电压崩溃等问题。例如，在山区等地形复杂的区域，由于输电线路长且路径曲折，线路损耗大，当大量分布式光伏接入后，可能出现局部电压过高，而远端负荷侧电压过低的情况，导致电压稳定裕度降低。

运行方式与负荷特性变化同样带来诸多问题。不同的负荷水平和检修安排会改变电网的运行状态。在负荷高峰时段，若新能源发电功率不足，而常规电源又无法及时增加出力，将导致电网功率缺额，引发频率下降；在电网检修期间，部分线路或设备退出运行，电网结构发生变化，潮流重新分布，此时新能源的波动可能会进一步加剧电网运行的不稳定性。此外，随着新型负荷如电动汽车充电桩、数据中心的大量接入，负荷特性从传

统的恒阻抗型向非线性、时变性转变。这些新型负荷的充电功率波动、谐波注入等问题，对电网的电能质量和稳定性提出了更高要求，使得电网运行控制难度大幅增加。

3.3 电气自动化系统自身问题

电气自动化系统设备性能和老化问题影响系统监测和控制精度。传感器作为系统获取实时数据的关键设备，随着使用年限增加，其精度会逐渐下降。例如，电压互感器在长期运行后，可能出现变比误差增大的情况，导致采集的电压数据与实际值存在偏差，进而影响系统对电网电压状态的判断和控制。控制器故障同样会导致控制指令执行偏差，在某变电站的实际运行中，曾因控制器软件出现逻辑错误，错误地触发了断路器跳闸，造成局部区域停电。

控制算法的局限性也不容忽视，传统控制算法基于线性化模型设计，在应对新能源并网带来的非线性、不确定性系统时，难以实现精准控制。例如，在处理新能源功率快速波动时，PID 控制算法由于其固定的参数设置，无法快速适应系统动态变化，导致控制滞后，无法有效抑制电压和频率波动。通信网络故障，如数据传输延迟、丢包等，会导致信息交互不畅，影响系统实时控制能力。在广域保护系统中，若通信延迟过大，将导致保护装置无法及时获取故障信息，错过最佳的故障切除时机，扩大故障影响范围。同时，信息安全威胁，如黑客通过网络攻击篡改控制指令、窃取关键数据等，可能破坏系统正常运行，危及电网安全，近年来电力系统遭受网络攻击的事件呈上升趋势，给电气自动化系统的安全稳定运行带来了新的挑战。

4 稳定性提升策略

4.1 新能源发电侧

在新能源发电侧，首先要优化发电预测技术。数值天气预报能够基于大气物理模型，对风速、光照强度等气象要素进行预测，卫星遥感技术则可通过监测云层厚度、地表反射率等信息，为发电预测提供更直观的数据支持。将这些多源数据与机器学习、深度学习算法相结合，可显著提升预测精度。例如，利用长短期记忆网络（LSTM）搭建的光伏发电预测模型，通过对历史光照强度、温度、湿度等数据的学习，能有效捕捉天气变化规律，在短期预测中误差可控制在 5% 以内。精准的发电预测能帮助调度部门提前制定发电计划，合理安排传统电源与新能源的出力，降低功率波动对电网的影响。

改进发电设备控制策略。先进的最大功率点跟踪（MPPT）

PPT) 技术通过实时监测光伏板或风机的输出功率和电压、电流, 动态调整工作点, 使其始终运行在最大功率输出状态, 提高发电效率。虚拟同步机 (VSG) 控制技术则赋予了新能源发电设备类似传统同步发电机的惯性和阻尼特性。在某海上风电项目中, 应用 VSG 技术后, 当电网频率发生 $\pm 0.2\text{Hz}$ 波动时, 风电机组可快速响应, 提供类似传统机组的调频能力, 有效增强了电网的频率稳定性。

4.2 电网侧

在电网侧, 合理规划电网是关键。优化网架结构需综合考虑新能源分布、负荷需求和地理条件, 通过新建输电线路、升级老旧线路等方式, 增强电网的输电能力和抗干扰能力。例如, 在新能源富集的西北地区, 通过建设特高压输电通道, 将大量风电、光电输送至负荷中心, 既提高了新能源消纳能力, 又缓解了局部电网的功率失衡问题。加强电网互联可实现区域间功率互济, 当某一地区新能源发电波动较大时, 其他地区可通过电网互联提供功率支持, 提升电网整体稳定性。

应用柔性交流输电系统 (FACTS) 设备能有效调节电网参数。静止无功补偿器 (SVC) 通过快速调整无功功率输出, 维持电网电压稳定; 静止同步补偿器 (STATCOM) 则具有更快的响应速度和更强的无功调节能力。在某城市电网中, 安装 STATCOM 后, 电压波动范围从 $\pm 8\%$ 缩小至 $\pm 3\%$, 有效改善了电能质量和系统稳定性。

4.3 电气自动化系统侧

在电气自动化系统侧, 引入先进控制算法至关重要。模型预测控制 (MPC) 通过建立系统预测模型, 对未来一段时间内的系统状态进行预测, 并基于优化目标计算出最优控制序列, 能有效应对新能源并网带来的不确定性。在某省级电网调度系统中, 应用 MPC 算法后, 对新能源功率波动的响应速度提升了 40%, 显著提高了系统的控制性能。自适应控制可根据系统运行状态实时调整控制参数, 模糊控制则能处理复杂的非线性问题, 二者结合可进一步提升系统对复杂工况的适应性。

利用多源信息融合与智能决策技术, 整合电网运行数据、新能源发电数据、气象数据等, 可实现系统的优化运行。通过大数据分析和人工智能技术, 挖掘数据间的潜在关系, 为系统调度和控制提供更科学的决策依据。例如, 结合气象数据预测新能源发电功率, 结合电网负荷数据优化发电计划, 提高系统运行效率。

5 策略验证与案例分析

5.1 仿真验证

利用 MATLAB/Simulink 搭建新能源并网仿真模型, 模拟风电、光伏接入电网的场景。设置不同的新能源发电功率波动情况、电网负荷水平等参数, 分别对新能源发电侧、电网侧、电气自动化系统侧提出的策略进行仿真分析。通过对比策略实施前后电网电压、频率、功率等指标的变化, 评估各策略对系统稳定性的改善效果。进一步进行综合策略仿真, 研究各策略间的协同作用与整体优化效果, 验证策略组合的有效性。

5.2 案例分析

选取某大型风电并网项目作为案例。该项目总装机容量为 500MW, 在并网初期, 由于风电功率波动大, 导致电网电压波动超过 $\pm 10\%$, 频率偏差超过 $\pm 0.5\text{Hz}$, 系统稳定性较差。应用本文提出的策略, 在发电侧优化风电功率预测模型, 采用虚拟同步机控制技术; 在电网侧安装 STATCOM 设备, 优化网架结构; 在电气自动化系统侧引入模型预测控制算法, 构建容错控制机制。改进后, 电网电压波动控制在 $\pm 5\%$ 以内, 频率偏差控制在 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内, 系统稳定性显著提升, 验证了所提策略在实际工程中的有效性。

6 结论

本文系统研究了新能源并网场景下电气自动化系统稳定性提升策略。通过分析新能源并网与电气自动化系统基础, 剖析影响系统稳定性的关键因素, 从发电侧、电网侧、系统侧提出了针对性的提升策略, 并通过仿真验证和实际案例分析, 证明了策略的有效性。研究成果为解决新能源并网带来的稳定性问题提供了可行方案, 有助于推动新能源的大规模应用和电力系统的稳定运行。未来, 随着新能源技术的不断发展和电力系统智能化水平的提高, 还需进一步深化对稳定性提升策略的研究, 探索更加高效、智能的控制方法和技术手段。

参考文献

- [1] 黄萌, 舒思睿, 等。面向同步稳定性的电力电子并网变流器分析与控制研究综述 [J]. 电工技术学报, 2024, 19.
- [2] 张前进。基于 T-S 模糊建模的新能源并网变流器暂态同步稳定性分析与控制策略 [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024.