

电力技术

新能源并网对电力系统稳定性的影响及控制策略

倪可彬 李翔宇
国网西安供电公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7290

[摘要] 本文综合分析了新能源并网对电力系统稳定性的影响及控制策略，阐述了其应用现状和稳定性面临的挑战，深入探讨了系统频率和电压稳定性问题，详细介绍了提升稳定性的技术手段，包括控制策略改进优化、阻抗重塑与适配器应用，特别是自适应虚拟电阻控制策略设计和自适应阻抗适配器仿真验证，经过具体案例分析与实证研究展示了其实际应用效果，验证了在提高系统稳定性和电能质量的显著作用。

[关键词] 新能源并网；电力系统稳定性；虚拟电阻控制；阻抗适配器；频率稳定性

The influence of new energy grid connection on the stability of the power system and control strategy

Ni Kebin, Li Xiangyu

State Grid Xi'an Power Supply Company

[Abstract] This paper comprehensively analyzes the influence of new energy grid on the stability of power system and control strategy, expounds the application status and stability challenges, system frequency and voltage stability, introduces the technical means of improving the stability, including control strategy optimization, impedance remodeling and adapter application, especially the adaptive virtual resistance control strategy design and adaptive impedance adapter simulation verification, through specific case analysis and empirical research shows the practical application effect, verified the significant role in improving the system stability and power quality.

[Key words] new energy grid connection, power system stability, virtual resistance control, impedance adapter, frequency stability

引言：

新能源并网系统的快速发展与大规模应用是应对能源危机和环境污染的重要途径，但风电和光伏发电的间歇性及波动性增加了电力系统的随机性和复杂性，使系统频率和电压稳定性面临严峻挑战，传统电力系统控制策略难以应对高比例新能源接入后的稳定性问题，急需经过分析新能源并网对电力系统稳定性的影响，探讨改进控制策略和应用自适应阻抗适配器等技术手段来提升系统的频率和电压稳定性。

一、新能源并网对电力系统稳定性的现状分析

(一) 新能源并网系统的应用现状

随着能源危机与环境污染问题的不断加剧，风电、光伏等新能源发电技术实现了迅猛发展并得到大规模应用。全球众多国家和地区都在积极推动以新能源为主体的新型电力系统建设，这不仅是达成能源结构转型的重要方式，也是实现碳中和目标的关键途径。新能源并网系统将分布式发电单元接入电网，不但提高了能源利用效率，还减少了对传统化石能源的依

赖。新能源发电具有的间歇性和波动性特点，增大了电网运行的随机性和复杂性。高比例的新能源接入致使电力系统的动态特性出现显著变化，传统电力系统的设计和运行模式面临全新挑战。特别是随着新能源发电比例的持续提高，电网的稳定性和可靠性问题变得愈发突出，需要借助先进的控制技术和设备来予以解决。

(二) 电力系统稳定性面临的挑战

新能源发电的波动性和间歇性致使系统频率和电压的稳定性难以把控，在传统电力系统中，频率和电压的稳定性主要依赖大型同步发电机的惯量和调节能力，而新能源发电由于缺少惯量，难以提供有效的频率支撑^[1]。高比例的电力电子设备接入令系统呈现出低惯量、弱阻尼特性，容易引发宽频带振荡现象，威胁电网的稳定运行。分布式新能源接入的随机性和不可控性，使得电力系统的调度和控制变得更为复杂，需要更高效的协调和管理策略。新能源并网系统的保护和控制技术尚未完善，在面临突发故障或异常情况时，系统的快速响应和恢复

能力有限，增加了电网运行的风险。

二、新能源并网系统稳定性存在的问题

(一) 频率稳定性问题

由于风电和光伏发电的间歇性和随机性，发电功率输出存在较大的波动性，这直接影响到系统频率的稳定。在传统电力系统中，频率稳定性依赖于同步发电机的惯性和一次调频能力。新能源发电设备如风电和光伏系统没有转动惯量，无法提供惯性支撑，导致系统频率在受到扰动时的响应变得更加敏感和快速。新能源发电系统在接入弱电网时，电网阻抗和发电设备阻抗之间的相互作用容易引发频率振荡，进一步加剧了频率不稳定的问题。频率稳定性的不足还会引发连锁反应，对系统的电压稳定性、功率质量和整体运行安全性产生负面影响。对新能源并网系统中的频率稳定性问题，需要采取有效的控制策略，如虚拟惯性控制、快速频率响应技术以及多层次的频率调节机制，以提高系统对频率扰动的适应能力，确保电力系统在高比例新能源接入下的频率稳定。这些控制策略能够在系统频率出现波动时迅速发挥作用，及时调整发电设备的输出功率，有效平抑频率的变化，并且，它们相互配合，形成一个协同的控制体系，增强了电力系统应对复杂频率扰动情况的能力，为新能源在电力系统中的大规模接入和稳定运行提供有力保障。

(二) 电压稳定性问题

新能源发电的间歇性和波动性不仅影响系统的频率稳定性，也对电压稳定性产生重大影响，在传统电力系统中，电压稳定性主要依靠同步发电机的无功功率调节能力和电压控制装置。风电和光伏发电系统的无功调节能力有限，且受天气和环境因素的影响较大，导致电压水平容易出现大幅波动。高比例电力电子设备的接入使得电网的动态特性发生变化，电压暂态响应速度加快，系统的电压稳定性面临更大的压力^[2]。在弱电网中，电压波动更为明显，容易引发电压崩溃或不稳定现象。为了提高新能源并网系统的电压稳定性，需要采用先进的控制技术，如动态电压恢复器、静止无功补偿器和自适应电压控制策略。还需加强电网结构的优化设计，提高电网的抗扰能力，确保在不同工况下系统电压的稳定运行。

三、提升新能源并网系统稳定性的技术手段

(一) 控制策略的改进与优化

随着新能源发电比例的不断增加，传统的电力系统控制策略已难以满足高比例新能源接入后的稳定性要求，故而需要采用一系列先进的控制策略来提升系统的稳定性和可靠性。虚拟

惯性控制技术在新能源并网系统中得到了广泛应用，其在逆变器中引入虚拟惯性元件，模拟同步发电机的惯性特性，提供惯性支撑，进而提高系统的频率稳定性。当系统频率发生波动时，虚拟惯性控制能够迅速响应并调整逆变器的输出功率，以平息频率波动。快速频率响应 (Fast Frequency Response, FFR) 技术也被引入到新能源并网系统当中，FFR 技术迅速调节发电设备的输出功率，响应系统频率的变化，弥补了传统发电设备响应速度缓慢的缺陷。在实际应用中，风电场和光伏电站配置的 FFR 装置能够在几百毫秒内完成响应，极大地提高了系统的频率稳定性。多层次的频率调节机制同样是一种行之有效的控制策略，涵盖一次调频、二次调频和三级调频。一次调频主要由发电设备自动完成，二次调频由调度中心进行协调，三级调频则经过市场化手段进行调节，构建起多层次、多主体协同的频率调节体系。这些控制策略的综合运用，使得新能源并网系统在高比例接入的情况下，能够维持良好的频率稳定性，确保电力系统的安全稳定运行。

(二) 阻抗重塑与适配器的应用

由于新能源发电设备的无功调节能力有限，所以需要借助阻抗重塑技术来优化系统的电压特性，阻抗重塑技术调整发电设备的输出阻抗特性，改善电力系统的电压稳定性。具体举措包括优化控制参数、设计合理的控制策略以及采用先进的控制算法。优化逆变器的控制参数，令其输出阻抗在宽频带范围内具备良好的特性，从而提升系统的稳定性。自适应阻抗适配器 (Adaptive Impedance Adapter, AIA) 在新能源并网系统中也得到了广泛应用，AIA 在公共耦合点 (PCC) 并联一个基于自适应虚拟阻抗控制的装置，增强系统的阻尼，抑制电压波动^[3]。AIA 可以实时监测 PCC 点的电压变化，自动调节虚拟电阻的值，使系统在不同工况下都能保持良好的电压稳定性。具体步骤包括：经过带阻滤波器和带通滤波器提取 PCC 点电压的振荡分量；利用 PI 控制器计算虚拟电阻的导数值；经过 PWM 调制调整逆变器的输出电流，使其与 PCC 点电压的振荡分量呈比例关系从而实现虚拟电阻的自适应调节。仿真和实际应用表明，AIA 能够显著减少系统的负阻性区域，提高电压稳定性。在某实际应用中，AIA 的应用使系统的电压总谐波畸变率 (THD) 从 19.93%降低到 8.68%，有效地提升了系统的运行稳定性。应用这些技术手段，新能源并网系统在高比例接入的情况下，能够有效地改善电压稳定性，确保电力系统的安全可靠运行。如表 1 所示：

表 1 新能源并网系统中不同控制策略的性能参数对比

控制策略	响应时间 (ms)	频率波动范围 (Hz)	电压波动范围 (V)	THD (%)	应用场景
传统控制策略	1000-2000	±0.5	±20	15-20	低比例新能源接入
虚拟惯性控制	100-500	±0.2	±10	10-15	中等比例新能源接入
快速频率响应	50-100	±0.1	±5	5-10	高比例新能源接入
自适应阻抗适配器	<50	±0.05	±2	<5	高比例新能源接入
多层次频率调节机制	200-1000	±0.3	±15	10-20	各种比例新能源接入

四、自适应阻抗适配器在新能源并网系统中的应用

(一) 自适应虚拟电阻控制策略的设计

该策略在公共耦合点 (PCC) 并联一个基于自适应虚拟阻抗控制的装置, 来实现电压和频率的稳定控制, 具体的设计步骤如下: 在 PCC 点并联阻抗适配器, 此适配器检测 PCC 点的电压变化, 实时监测系统的运行状态; 利用带阻滤波器和带通滤波器提取 PCC 点电压的振荡分量, 以消除工频分量的影响; 经过 PI 控制器计算虚拟电阻的导数值, 从而得到自适应虚拟电阻的控制信号。为了确保虚拟电阻能够有效抑制振荡, PI 控制器的参数需要依据系统的运行特性进行优化调节。在实际应用中, 设置带阻滤波器的中心频率为 50Hz, 带通滤波器的中心频率为 113Hz, 以确保滤波器能够准确提取振荡分量; 经过 PWM 调制调整逆变器的输出电流, 使其与 PCC 点电压的振荡分量呈比例关系, 从而实现虚拟电阻的自适应调节。

(二) 自适应阻抗适配器的仿真验证与效果分析

仿真系统采用 MATLAB/Simulink 平台, 仿真参数包括直流电压为 700V, 滤波电感为 3mH, 滤波电容为 10 μ F, 直流母线电容为 1000 μ F。在 PCC 点注入不同频率的扰动电压, 分析系统在安装阻抗适配器前后的导纳特性变化。仿真结果表明, 安装阻抗适配器后, 系统的负阻性区域显著减少, 导纳特性在中频段的幅值明显增大^[4]。在未安装阻抗适配器时, 系统的负阻性区域频率范围为 0 - 50Hz, 而安装阻抗适配器后, 该频率范围缩小至 0 - 30Hz, 系统的稳定性显著提高。广义奈奎斯特稳定判据分析, 发现系统在短路比 (SCR) 为 2 时, 安装阻抗适配器后, 特征根的奈奎斯特曲线未包围 (-1, j0) 点, 系统保持稳定。而在未安装阻抗适配器时, SCR 为 2 时, 特征根的奈奎斯特曲线包围 (-1, j0) 点, 系统失稳。进一步的仿真验证表明, 自适应虚拟电阻控制策略能够在并网功率变化和 PCC 点电压波动的情况下, 自动调整虚拟电阻值, 使系统维持稳定运行。在仿真中, 虚拟电阻值从 23.14 欧姆调整至 22.84 欧姆, 系统的电压和电流波形保持平稳, 无明显振荡。经过这些仿真分析, 充分证明了自适应阻抗适配器的有效性和实用性, 为新能源并网系统的广泛应用提供了可靠的技术支持。

五、新能源并网系统稳定性的案例分析与实证研究

(一) 具体案例的分析与研究

在对某实际新能源并网项目进行案例分析时, 选择了某风电场的并网运行情况作为研究对象, 该风电场装机容量为 150MW, 由 50 台 3MW 风力发电机组成, 全部接入当地的 110kV 电网。在并网过程中, 系统频率和电压波动较大, 尤其在风速变化较大的情况下, 频率和电压波动范围分别达到了 ± 0.3 Hz 和 ± 15 V。为了改善系统的稳定性, 项目组决定在 PCC 点安装自适应阻抗适配器。安装前, 系统经过传统的无功补偿装置进行电压调节, 但效果不理想。安装自适应阻抗适配器后, 经过带阻滤波器和带通滤波器提取 PCC 点电压的振荡分量,

并利用 PI 控制器计算虚拟电阻的导数值, 从而实现了虚拟电阻的自适应调节。调节过程中, 虚拟电阻的初始设定值为 25 欧姆, 实际运行数据调整至 22 欧姆, 以达到最佳稳定效果。在应用自适应阻抗适配器后, 系统的频率波动范围降低至 ± 0.1 Hz, 电压波动范围降低至 ± 5 V, 显著提高了风电场并网的稳定性。

(二) 实证研究结果与效果展示

对上述风电场的实证研究系统在不同风速条件下的稳定性得到了有效提升, 研究数据显示, 在风速变化范围为 3m/s 至 15m/s 的情况下, 系统频率波动最大不超过 0.12Hz, 电压波动最大不超过 6V, 显著优于未安装自适应阻抗适配器时的运行状况^[5]。对比分析发现, 在风速突变时, 系统响应时间由原来的 500 毫秒缩短至 200 毫秒, 显示了自适应阻抗适配器在提升系统响应速度的显著效果。进一步的运行数据显示, 风电场并网后的发电效率提高了 2.5%, 这是由于频率和电压的稳定性增强, 减少了因波动导致的发电损失。系统的谐波总畸变率 (THD) 由原来的 13% 降低至 8%, 电能质量得到明显改善。这些数据表明, 自适应阻抗适配器不仅提高了系统的稳定性和响应速度, 还在提升电能质量和发电效率表现出色。经过实证研究, 充分验证了自适应阻抗适配器在新能源并网系统中的实际应用效果, 为进一步推广该技术提供了坚实的基础。

结语:

本文系统分析了新能源并网系统对电力系统稳定性的影响, 提出经过改进控制策略和应用自适应阻抗适配器等技术手段提升系统稳定性的方法, 仿真验证和实际案例研究表明, 自适应虚拟电阻控制策略和阻抗适配器能显著改善系统频率和电压稳定性、电能质量及系统响应速度, 为新能源并网系统稳定运行提供可靠技术支持, 有重要应用价值和推广前景。未来研究应进一步优化控制算法, 提升系统在不同工况下适应能力, 确保其持续稳定运行。

[参考文献]

- [1] 周柯, 李旭阳, 金庆忍, 等. 基于自适应阻抗适配器的新能源并网系统稳定性提升策略 [J/OL]. 电网技术, 1-13 [2024-08-07].
- [2] 冯建辰, 孙赛. 高渗透可再生能源并网电力系统的稳定性与控制研究 [J]. 电气技术与经济, 2024, (05): 207-209.
- [3] 谢德兴, 肖仕武. 新能源接入电网短路故障低电压穿越期间静态电压稳定研究 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-15 [2024-08-07].
- [4] 韩佳琦, 朱文静. 新能源并网系统的稳定性分析与控制策略 [J]. 中国高科技, 2024, (06): 75-77.
- [5] 高磊, 马骏超, 吕敬, 等. 基于频域模态法的新能源电力系统振荡稳定性评估 [J/OL]. 上海交通大学学报, 1-32 [2024-08-07].