

# 新型电力系统稳定性分析与优化

王楠

宁夏隆鼎电力有限公司, 宁夏 石嘴山 753000

DOI:10.61369/EPTSM.2025080012

**摘要 :** 随着高比例可再生能源、电力电子设备广泛接入, 电力系统正经历向新型电力系统的深刻变革。这一转变在提升系统清洁性与灵活性的同时, 也带来了惯量水平下降、抗扰动能力减弱等挑战, 对系统的稳定性构成了严峻考验。本文首先分析了新型电力系统面临的主要稳定性问题, 包括频率稳定性、电压稳定性和功角稳定性(特别是小干扰稳定性)的新特征。随后, 从“分析”与“优化”两个维度, 探讨了基于大数据和人工智能的稳定性评估方法, 以及从源、网、荷、储多环节协同的稳定性优化控制策略。最后, 对未来的技术发展方向进行了展望, 旨在为构建安全、高效、清洁的新型电力系统提供理论参考与实践路径。

**关键词 :** 新型电力系统; 稳定性分析; 电力电子化; 频率稳定; 优化控制

## Stability Analysis and Optimization of New Power Systems

Wang Nan

Ningxia Longding Electric Power Co., Ltd. Shizuishan, Ningxia 753000

**Abstract :** With the widespread integration of high-proportion renewable energy and power electronics, the power system is undergoing a profound transformation towards a new type of power system. This shift not only enhances the cleanliness and flexibility of the system but also poses challenges such as reduced inertia levels and weakened anti-disturbance capabilities, posing severe tests to the stability of the system. This paper first analyzes the main stability issues faced by the new power system, including new characteristics of frequency stability, voltage stability, and power angle stability (especially small signal stability). Subsequently, from the dimensions of "analysis" and "optimization", it discusses stability assessment methods based on big data and artificial intelligence, as well as stability optimization control strategies from the coordination of multiple links including sources, networks, loads, and storage. Finally, it looks forward to the future direction of technological development, aiming to provide theoretical references and practical paths for building a safe, efficient, and clean new power system.

**Keywords :** new power system; stability analysis; power electronics; frequency stability; optimal control

## 引言

在全球积极应对气候变化的宏大背景下, 能源转型已成为世界各国的共同选择。以风能、太阳能为代表的可再生能源, 凭借其清洁、可持续的显著优势, 正以前所未有的速度蓬勃发展, 成为能源领域的新宠。

传统电力系统中, 同步发电机占据主导地位。其旋转惯量和同步特性宛如坚固的基石, 为系统提供了天然的稳定性支撑, 保障了电力供应的平稳可靠。然而, 新型电力系统呈现出高比例可再生能源通过电力电子设备(如逆变器)接入的鲜明特征, 这无疑是对传统系统的一次深刻变革, 从根本上改变了系统的动态特性。

随着同步发电机被大量替代, 系统总体惯量显著降低, 频率变化速率加快, 犹如一艘失去部分压舱石的航船, 在风浪中变得摇摆不定。同时, 逆变器自身的快速、非线性控制特性与传统同步机存在巨大差异, 引发了次/超同步振荡等新型稳定问题, 给电力系统的安全运行带来了新的挑战。

在此形势下, 对新型电力系统稳定性的认知必须突破传统框架的束缚, 积极发展新的分析理论和优化方法。稳定性已然成为制约可再生能源消纳上限的关键瓶颈。本文正是在这样的背景下应运而生, 旨在系统性地梳理新型电力系统稳定性面临的新挑战, 重点探讨如何利用先进的分析工具和协同控制手段来优化系统稳定性, 为保障国家能源安全、推动“双碳”目标实现贡献智慧与力量, 具有重大的理论价值与现实意义。

作者简介: 王楠 (1978.10-), 男, 宁夏平罗县人, 硕士研究生, 助理工程师, 宁夏隆鼎电力有限公司。

## 一、新型电力系统稳定性的新挑战与传统差异

传统电力系统的稳定性分析已形成较为完善的体系，主要围绕同步发电机的机电暂态过程展开。而新型电力系统的稳定性表现出显著的差异性：

### （一）频率稳定性问题加剧

系统的频率稳定性与旋转惯量紧密相连，如同秤杆与秤砣，相互影响、缺一不可。在传统电力系统里，一旦出现功率失衡的状况，大量同步发电机的转子动能便会自发地发挥调节作用，吸收或释放能量，如同一位沉稳的舵手，有效减缓频率的变化，维持系统的稳定运行。然而，在新型电力系统中，风电、光伏等逆变器接口电源却难以提供物理惯量支撑，除非借助特定技术手段进行模拟。这使得系统等效惯量大幅降低，一旦遭遇大功率缺额，系统频率便会急剧下降，极易触及低频减载阈值，进而引发连锁故障，严重威胁电网的安全。

### （二）电压稳定性呈现新特征

在传统电力系统中，电压稳定问题大多与无功功率不足以及负荷持续增长密切相关，其变化过程相对缓慢，有较为充足的时间去应对和调整。然而，在新型电力系统里，电压稳定问题变得极为复杂。分布式光伏在光照条件良好时，会向电网馈入大量有功功率，这极有可能致使局部地区电压超出正常范围。同时，逆变器的无功支撑能力并非独立存在，它与有功输出、并网点电压等诸多因素相互耦合，虽然响应速度极快，但受控制参数影响极大，稍有不慎就可能引发快速的电压失稳或者电压振荡现象。

### （三）功角稳定性内涵拓展

在电力系统的稳定格局中，暂态功角稳定（第一摆稳定）问题曾一度令人担忧，不过得益于电力电子设备卓越的快速控制能力，该问题得到了一定程度的缓解。但与此同时，小干扰稳定性（Small-Signal Stability）问题却愈发凸显。如今，大量逆变器依靠锁相环（PLL）实现与电网的同步运行。然而，其控制环路之间、多台逆变器彼此间的相互作用，犹如埋下了一颗颗“不稳定炸弹”，极有可能引发低频振荡，且振荡频率通常处于0.1~10Hz范围内。这类振荡模式错综复杂，想要精准分析与定位困难重重，已然成为当前电力研究领域的热点和难点。

### （四）宽频带振荡风险

在新型电力系统构建的宏大图景里，正面临着最具“新型”特质的稳定性挑战。电力电子设备以其高开关频率的独特属性，在与电网阻抗相互交织作用时，极易成为引发不稳定因素的源头，可能诱发次同步振荡（SSO）或高频振荡。这类振荡的频率跨度极大，从几赫兹的低频区一直延伸至数千赫兹的高频段。其产生机理错综复杂，传统同步机模型在它面前显得捉襟见肘，根本无法精准模拟。这无疑给测量设备的精度、性能，以及分析方法的科学性、全面性都提出了前所未有的更高要求。

## 二、新型电力系统的稳定性分析关键技术

面对上述挑战，必须采用更先进、更精准的分析方法。

### （一）基于大数据与人工智能的稳定性评估

传统的基于物理模型的时域仿真法虽然精确，但计算量大，难以满足在线分析的需求。大数据和人工智能技术为稳定性评估提供了新思路。

**数据驱动建模：**利用广域测量系统（WAMS/PMU）海量数据，通过机器学习算法（如深度学习、支持向量机）挖掘系统运行状态与稳定边界之间的隐含关系，构建“数据-稳定”映射模型，实现稳定性的快速、在线评估。

**稳定态势感知：**通过对历史扰动数据和实时运行数据的分析，AI可以识别系统的薄弱环节，预测潜在的失稳风险，实现从“被动应对”到“主动预警”的转变。

### （二）阻抗分析法与稳定性判据

电力电子化系统的振荡问题，阻抗分析法成为一种有效工具。该方法将系统等效为“源”阻抗和“负载”阻抗的相互作用，利用奈奎斯特稳定判据等频域方法，可以直观地分析系统的稳定性边界，并指导控制器参数设计，避免振荡风险。

## 三、新型电力系统稳定性的多环节协同优化策略

保障稳定性必须从系统整体出发，实现源、网、荷、储的协同优化。

### （一）“源”侧：提升灵活性与支撑能力

**新能源场站“构网型”（Grid-Forming）控制技术：**与传统“跟网型”（Grid-Following）控制不同，构网型控制可使逆变器模拟同步发电机的外特性，主动提供惯量和阻尼支撑，是增强系统稳定性的革命性技术。

**火电灵活性改造：**保留并优化部分火电机组，使其在系统中不仅作为能量来源，更作为重要的稳定性和灵活性资源，参与调峰、调频和备用。

### （二）“网”侧：强化结构与智能化控制

**柔性交流输电系统（FACTS）与高压直流输电（HVDC）：**利用这些先进输电技术，快速、精确地调节线路潮流和节点电压，抑制振荡，提升输电能力和稳定性。

**智能调度与协同控制：**建立考虑稳定性约束的优化调度模型，将频率稳定、电压稳定等指标纳入日前、日内调度计划中，实现经济性与安全性的统一。

### （三）“荷、储”侧：挖掘响应潜力

**需求侧响应（DR）：**激活工业、商业甚至居民负荷的调节能力，在系统频率或电压异常时，通过价格或激励信号引导负荷主动削减或转移，为系统提供宝贵的“负瓦”资源。

**规模化储能系统：**储能（特别是电化学储能）具有毫秒级响应速度，是理想的灵活性资源。它既可以平抑可再生能源波动，也可以快速注入或吸收功率，为系统提供一次调频、惯量支撑和阻尼服务，是优化稳定性的“超级武器”。

## 四、结语

构建以新能源为主体的新型电力系统是一项长期而复杂的系统工程，其稳定性是核心基石。本文分析表明，新型电力系统的稳定性问题呈现出低惯量、快动态、多时间尺度和强非线性等新特征，对传统分析控制理论构成了巨大挑战。未来，稳定性分析与优化的研究将呈现以下趋势：一是分析方法的深度融合，即物

理模型驱动与大数据驱动方法的结合，实现更精准、更快速的仿真与评估；二是控制技术的协同创新，特别是构网型技术的规模化应用，以及跨区域、跨环节的协同控制架构设计；三是市场机制的配套完善，通过建立合理的补偿机制，激励各类主体主动为系统稳定性提供服务。

唯有通过技术突破、机制创新和跨领域协作，才能最终攻克新型电力系统的稳定性难题，支撑能源革命的顺利实现。

## 参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划 [R]. 2022.
- [2] 唐岩峰. 新形势下电力系统及自动化技术发展应用研究 [J]. 工程科技研究, 2024, 2(2).
- [3] 舒印彪, 曹一家, 刘建坤, 等. 新能源电力系统稳定性分析、控制与优化研究框架 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1).
- [4] 潘云峰, 郭军. 智能配电装备与物联网 [J]. 电力技术研究, 2021, 3(4).
- [5] 毕天姝, 孔祥玉, 杨奇逊. 电力系统宽频带振荡分析与抑制研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4).
- [6] 洪永顺, 上官敬亮. 新能源与新型电力系统协同赋能乡村振兴的深度思考 [J]. 电力工程与管理, 2025, 3(3).
- [7] 孙宏斌, 郭庆来, 王彬. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19).
- [8] 钱鹤鹏, 王思伟. 配电工程管理的重要性与改进措施分析 [J]. 当代水利水电, 2023, 5(3).
- [9] 蔡泽田. 智能配电网技术在配电网规划中的应用 [J]. 电力技术研究, 2023, 5(11).
- [10] 孙鸿飞, 葛文博, 武帅. 面向新型电力系统的电力生产安全优化策略研究 [J]. 电力技术研究, 2024, 6(11).