

Stability analysis and control strategy of electric power system

Shiwei Cai

Jiangsu Dongxi Persimmon Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract

This paper focuses on the analysis of power system stability and control strategies. It begins by introducing the fundamental concepts and classifications of power system stability, covering frequency and voltage stability, transient stability, and small-signal stability. Subsequently, it explores key factors affecting stability, such as the increasing penetration of renewable energy and load variability. Furthermore, modern control strategies are examined, from traditional methods like PSS to advanced optimization strategies based on intelligent algorithms and big data. Finally, future directions in power system stability research are summarized to guide the development of secure and efficient grid operation.

Keywords

Power system; stability analysis; control strategies; renewable energy; grid optimization

电力系统稳定分析与控制策略研究

蔡诗伟

江苏东西柿科技有限公司, 中国·江苏南京 210000

摘要

本文聚焦于电力系统稳定性分析与控制策略, 首先介绍电力系统稳定性的基本概念及相关分类, 从频率和电压稳定到瞬态和小干扰稳定的多维视角进行综述。接着, 探讨影响电力系统稳定性的关键因素, 包括可再生能源渗透率的提升和负载波动性等挑战。进而, 分析现代稳定性控制策略的解决方案, 从传统方法如PSS到先进的基于智能算法和大数据的优化策略。最后, 总结电力系统稳定性研究的未来方向, 为实现安全、高效的电网运行提供指引。

关键词

电力系统; 稳定性分析; 控制策略; 可再生能源; 电网优化

1 引言

电力系统是现代社会的核心支柱, 其稳定性直接关系到国民经济和社会生活的正常运转。然而, 近年来, 由于电力系统规模不断扩大, 可再生能源接入比例迅速提升, 以及用户负荷的多样性和随机性增加, 电力系统的稳定性面临着前所未有的挑战。传统电力系统以集中式调度为主, 而现代电力系统正在向分布式和智能化方向发展, 这一转变对系统的运行、调控和协调提出了新的要求。在此背景下, 深入研究电力系统稳定性问题, 并提出有效的控制策略, 对保障电力系统安全可靠运行具有重要理论和实际意义。

2 电力系统稳定理论分析

2.1 电力系统稳定的定义与分类

电力系统稳定性是指在受到扰动后, 系统能够在一定

时间内恢复到新的平衡状态或保持运行平衡的能力。根据不同的分析对象和表现形式, 电力系统稳定性可分为以下几类:

①静态稳定性: 静态稳定性主要指电力系统在负荷或运行状态发生微小扰动的情况下, 仍能维持平衡运转的能力。其分析通常基于稳态潮流模型, 通过计算机单步计算评估系统的稳态能力。

②暂态稳定性: 此类稳定性描述电力系统在受到大扰动(如大规模负荷变化或断路器跳闸)后, 在较短时间内恢复同步运行的能力。注重发电机间功角关系的变化, 一般通过数值仿真和暂态分析方法预测系统行为。

③小干扰稳定性: 小干扰稳定性表征系统在受到较小扰动(如负荷变化或控制信号波动)后维持正常运行的能力, 一般利用线性化模型和特征值分析方法进行研究。

④频率稳定性: 关注系统在受到扰动后恢复和维持频率稳定的能力, 特别是在大规模发电机组离线或负荷突然变化情况下的频率漂移问题。其研究涉及惯性响应、一次调频和二次调频等动态过程。

【作者简介】蔡诗伟(1993-), 男, 中国江苏南京人, 本科, 助理工程师, 从事电气工程及其自动化研究。

2.2 电力系统稳定的数学建模

电力系统稳定性的分析离不开准确的数学建模。以下是常用模型及其核心理论：

①功角稳定性分析：以发电机功角为核心变量，通过经典摆动方程描述发电机机械功率与电磁功率之间的动态关系。针对暂态或小扰动问题，可采用一机无穷大模型、多机稳态模型及动态等值网络模型予以分析。

②电压稳定性分析：以系统节点电压幅值与无功功率间的关系为研究对象，揭示由于无功供需不平衡导致的电压崩溃现象。其数学模型以电压-无功方程为主，并结合 P-V 曲线、Q-V 曲线等分析手段进行研究。

③潮流计算：潮流计算是电力系统稳定分析的基础工具，通过求解非线性代数方程，得到系统的电压分布、潮流分布及损耗情况。在稳定性分析中，潮流结果提供了系统稳态前提条件，决定了后续动态分析的起点。

④动力系统仿真：针对暂态稳定问题，采用发电机动态方程、励磁系统及调速器模型构建动力系统，结合数值积分方法分析扰动后系统行为。此外，通过特征值分析辨识小信号稳定性，利用时间域仿真获取暂态行为。

2.3 新能源接入对稳定性的影响

随着新能源发电（如风电、光伏）的广泛接入，电力系统稳定性分析面临新的挑战：

①间歇性能源的扰动特性：新能源出力受天气、环境等因素控制，具有显著的间歇性和波动性。这使得系统功率平衡难以维持，增加了功角稳定和频率稳定的压力。尤其在低惯性电力系统中，传统调频措施可能难以快速响应功率波动，导致频率偏移问题加剧。

②电网拓扑复杂性增强：新能源接入改变了传统电力系统的单向功率传输模式，形成了多电源分布、多方向潮流的电网特性。这使电压稳定性分析面临更大挑战，特别是在弱电网区域，系统易发生电压崩溃或无功功率不足问题。

③复杂网络与稳定性：新能源发电单元通常通过电力电子设备并网，其动态特性与传统同步发电机有所不同。由于这些设备的快速响应与复杂控制策略，可能引发新的稳定性问题，如次同步振荡、低频振荡等。此外，新型电力电子设备也可能提供主动稳定性支撑，通过控制优化增强系统动态性能。

综上所述，新能源接入对电力系统稳定性提出了更高的要求，也促使研究者探索新的分析方法与控制策略，以确保系统安全、可靠运行。

3 电力系统控制策略设计

3.1 传统控制策略

传统电力系统的控制策略主要针对电压稳定、频率调节以及暂态稳定性。以下是两种重要的传统方法：

①基于自动电压调节器（AVR）的电压控制方法：自

动电压调节器（Automatic Voltage Regulator, AVR）是电力系统中保持母线电压稳定的核心设备。通过调节同步发电机的励磁电流，AVR能够快速响应电压波动，减小受扰后的电压偏差，维持系统的电压水平。AVR控制方法以简单、高效著称，广泛应用于传统电力系统。

②基于同步发电机励磁控制的暂态稳定策略：在发生短路等故障时，电力系统的暂态稳定性可能受到严重威胁。基于励磁系统的控制策略，例如 PSS（功率系统稳定器，Power System Stabilizer），可以通过调节励磁电流增强发电机的阻尼特性，抑制功角振荡，提升系统的暂态稳定性能。这类策略有效提高了系统抵御扰动的能力。

3.2 现代控制方法

随着电力系统规模的扩大和运行复杂性的提高，现代控制在稳定性保障中的应用逐步深入，以下两种方法尤为重要：基于状态反馈控制的优化方法

现代控制理论为解决电力系统的非线性和高维耦合问题提供了新工具。基于状态反馈控制的优化方法能够通过动态获取系统运行状态，设计最优控制律，从而实现系统全局稳定性的精准控制。在多机电力系统中，这种方法可以协调不同机组的运行，确保系统的整体稳定。

分布式控制与协同控制策略的应用研究：分布式能源（如光伏、风电）的大量接入，促使分布式控制与协同控制技术成为研究热点。这类策略通过将复杂的集中式控制问题分解并分配至多个子系统，确保控制策略的可扩展性和实时性。协同控制通过多主体间的通信与协调，提升了分布式电力系统在复杂扰动下的动态稳定水平。

3.3 新能源与储能系统控制

新能源发电与储能系统的加速发展对电力系统的稳定性提出了新要求，通过科学合理的控制策略设计，可以有效应对其带来的挑战。

①储能参与频率及电压调节的控制方法储能系统具有快速的功率响应能力，因此可以在电网频率波动发生时，通过参与一次调频和二次调频，快速补偿功率缺口，稳定系统频率。同时，储能还能通过电压源变流器（VSC）技术参与电压调节，提供无功支撑，改善新能源接入导致的电压波动问题。

②新能源发电与传统发电协同控制的策略设计：新能源发电具有随机性和波动性，其大规模并网引发了系统稳定性问题。通过设计协同控制策略，使新能源发电与传统火电机组在功率调度上互为补充，可以优化系统的动态性能。例如，通过引入虚拟同步机（VSG）技术，使风电、光伏发电具备类似于传统同步发电机的惯性响应特性，从而提升新能源的稳定性贡献。

3.4 电力市场环境下的控制策略优化

随着电力市场化改革的推进，市场机制对于电力系统运行的影响日益显著，控制策略的优化需要适应这种新

变化。

①电力市场对系统稳定的影响分析电力市场环境，发电与负荷的实时匹配需要充分考虑价格、市场竞争及发电成本等多因素的影响，这可能导致电力系统运行条件的频繁变化，对系统稳定性提出了新的挑战。因此，需要研究市场价格波动、电力交易行为对系统频率、电压的影响规律，结合市场机制优化控制策略。

②市场机制与实时调度结合的控制优化方法：在市场中，将电力市场交易结果和实时调度融入控制策略设计，可以确保系统在经济性与稳定性之间实现平衡。例如，通过提出基于经济调度与动态安全约束的协同优化模型，使得发电机组的功率分配既满足市场需求，又兼顾系统稳定性目标。同时，利用大数据和人工智能技术对市场运行与电力系统状态进行预测和分析，可以优化实时控制策略的快速响应能力。

综上所述，电力系统控制策略的设计需要从多维度、多技术并行推进，以适应新技术接入、电力市场化的趋势，最终实现安全、经济、绿色的发展目标。

4 电力系统稳定分析与控制策略仿真验证

4.1 仿真平台与模型设计

本研究选用了 MATLAB/Simulink 作为仿真平台，利用其强大的动态建模和求解能力，建立了一个典型的电力系统网络拓扑模型。具体包括：仿真平台搭建：系统包括发电机组、变压器、输电线路以及负荷等主要组件，通过 SimPowerSystems 模块实现精确建模。同时，考虑到耦合特性和实际运行需求，引入了动态建模和潮流分析模块，用于研究稳定性变化。典型网络拓扑建模：设计了两机一负荷系统和四机网络系统作为基础模型，分别用于静态稳定性和暂态稳定性测试。模型中模拟了实际运行环境，包括不同负荷波动、故障类型和系统初始分布，确保结果具有良好的代表性。

4.2 具体仿真研究

在搭建完成的仿真平台上，分别进行了静态稳定性分析、暂态稳定性测试以及控制策略效果验证，具体内容如下：

①静态稳定性测试与分析：通过改变负荷的大小和分布，测试系统在小扰动条件下的静态稳定性。实验表明，当负荷接近传输容量极限时，系统的静态稳定性明显下降。仿真结果体现了电压稳定裕度的变化曲线，并揭示了负荷波动对系统稳定性的敏感性。②暂态稳定性仿真测试：考虑典型的三相短路故障，通过设置故障持续时间、保护装置动作时序等参数，研究故障发生后系统恢复动态平衡的性能。仿真显示，在未采取控制策略时，故障会导致系统严重振荡，甚至无功崩溃；而通过优化保护动作时序和稳定器参数可以明显改善暂态响应。③控制策略性能验证：针对电力系统稳定性问题，本文对比了传统 PID 控制和基于智能算法的先进控制策略。

仿真显示，传统 PID 控制在处理简单负荷波动问题时表现良好，但在复杂工况下响应不足。而基于神经网络和模糊逻辑算法的智能控制具有更强的适应性，能够实现更快的振荡抑制效果和更高的稳态精度。

4.3 结果讨论与分析

①仿真结果对比及其物理机制解释：仿真结果表明，无论是静态稳定性还是暂态稳定性，系统运行状态均与负荷变化和故障类型高度相关。静态稳定性测试突出了负荷波动的累积效应，而暂态仿真则揭示了系统暂态行为的复杂动态机制。智能控制策略由于能够实时调整控制参数，在动态抑制中表现出色，有效减少了系统振荡时间及幅值。

②控制策略的适用性和局限性讨论：传统控制策略在单一场景下效果显著，但对复杂、多扰动情况下的性能提升有限。而智能控制算法尽管表现出显著优势，但在实际应用中其计算复杂性和实时性可能成为限制，因此需要进一步优化其算法结构。另外，为了确保安全性与经济性，未来控制策略或需结合多种技术，从而实现性能最优与成本最小的平衡。

综上所述，通过仿真验证，不仅验证了本文稳定性分析与控制策略的可行性，也奠定了其在实际应用中的理论基础。

5 结语

本文系统分析了电力系统稳定性的多种影响因素，明确了传统电力系统稳定性问题与新能源接入后面临的挑战。针对新能源接入、电力系统复杂化等问题，设计了一系列控制策略，包括基于动态响应优化的稳态控制方法。这些策略通过仿真验证表现出良好的效果，证明了其在提升电力系统稳定性方面的应用价值。未来，可进一步研究智能化技术（如人工智能与机器学习）在电力系统稳定控制中的应用，以期实现更高效、更精准的控制。同时，在碳中和的大背景下，需开展多能互补系统的稳定性分析与控制策略研究，以应对能源结构转型带来的挑战。此外，随着微电网和高渗透率新能源系统的发展，应重点关注其稳定性特性及相关应对策略，为未来智能电网的建设提供理论与技术支持。

参考文献

- [1] 基于切换仿射系统的风电电压稳定控制[J]. 张明锐;梅杰;李元浩;欧阳丽. 电工技术学报, 2016(03)
- [2] 基于MATCONT的电力系统电压稳定分岔及控制仿真试验[J]. 李升;徐艳;陈建华;陈小强. 实验室研究与探索, 2011(12)
- [3] Controlling chaos in power system based on finite-time stability theory[J]. 赵辉;马亚军;刘思佳;高士根;钟丹. Chinese Physics B, 2011(12)
- [4] 基于半张量积方法与准稳态时域仿真的电力系统中长期电压稳定分析[J]. 王义红;梅生伟. 电网技术, 2011(06)
- [5] 电力系统动态电压稳定分析方法及其研究进展[J]. 徐涛;黄慧;张勇军. 电气应用, 2011(01)