

电力系统暂态稳定性分析与改进方法

邱源源

四川省机场集团有限公司，四川 成都 610200

摘 要： 本文概述了电力系统暂态稳定性的基本概念、影响因素和评价指标，探讨了电力系统暂态稳定性的分析方法，包括时域仿真法、直接法、人工智能法和小信号分析法，并提出了暂态稳定性的改进方法，如优化调度策略、FACTS装置应用、电力系统结构优化和人工智能技术的应用。最终，分析了我国电力系统暂态稳定性的现状及未来发展趋势，指出改进暂态稳定性是一个长期且复杂的任务，需要多方面的协同努力。

关 键 词： 电力系统；暂态稳定性；分析方法；改进方法；现状与展望

Transient Stability Analysis and Improvement Methods for Power Systems

Qiu Yuanyuan

Sichuan Provincial Airport Group Co., Ltd. Chengdu, Sichuan 610200

Abstract： This paper summarizes the basic concepts, influencing factors, and evaluation indicators of power system transient stability. It explores various analysis methods for transient stability, including time-domain simulation, direct method, artificial intelligence method, and small signal analysis. Additionally, improvement methods for transient stability are proposed, such as optimizing scheduling strategies, applying FACTS devices, optimizing the power system structure, and utilizing artificial intelligence technology. Finally, the paper analyzes the current status and future trends of transient stability in China's power systems, pointing out that improving transient stability is a long-term and complex task requiring collaborative efforts from multiple fronts.

Keywords： power system; transient stability; analysis method; improvement method; current status and prospects

引言

电力系统作为现代社会的重要基础设施，其安全稳定运行对于保障国家经济发展和人民生活至关重要。在电力系统的运行过程中，暂态稳定性问题一直是电网安全领域的热点和难点。随着我国电网规模的不断扩大、新能源的大量接入以及电力市场的逐步形成，电力系统的暂态稳定性面临着前所未有的挑战。因此，深入研究电力系统暂态稳定性的基本理论、分析方法及改进措施，对于确保我国电力系统的安全稳定运行具有重要的理论和实际意义。

一、电力系统暂态稳定性概述

在电力系统的运行与发展中，暂态稳定性扮演着至关重要的角色。它不仅关系到电网的安全可靠运行，还直接影响到电力供应的质量和效率。

（一）暂态稳定性的定义

电力系统稳定性根据对故障的反应、干扰的性质和持续时间进行分类。主要类别包括小干扰和暂态稳定性、频率和电压稳定性。暂态稳定性是指系统在发生大干扰后保持同步的能力，例如三相故障，这是可能发生的关键故障。相比之下，频率稳定性描述电力系统在中断后保持恒定频率的能力^[1]。这种稳定性不仅涉及系统内能量的转换和分布，还涉及发电机、变压器、线路等设备的动态响应特性。简而言之，暂态稳定性是电力系统在紧急状

态下保持不失稳的能力。

（二）暂态稳定性的影响因素

电力系统的暂态稳定性是由众多因素交织影响而成的，其中系统结构的作用尤为关键。电网的拓扑结构、元件的连接方式以及电网的强度都直接决定了系统在遭遇干扰时的稳定性能。例如，长距离输电线路和联系薄弱的电网在受到冲击时更易出现稳定性问题。设备特性同样不容忽视，发电机的励磁系统、原动机的调节特性以及无功补偿装置的效能都是影响暂态稳定性的重要因素。运行方式的变化，如负荷水平、发电出力分配和电压水平的不同，也会对稳定性产生一定影响。不可预测的外部扰动，如自然灾害、操作失误或设备故障，都可能引发系统的大规模波动，对暂态稳定性构成挑战。因此，保障电力系统的暂态稳定性是一项复杂的系统工程，需要全面考虑这些相互交织的影响因素。

（三）暂态稳定性的评价指标

评价电力系统暂态稳定性的主要指标包括扰动后系统恢复到稳态的时间、系统的最大摇摆角度、最大摇摆速度以及系统在扰动后的能量变化。通常情况下，系统从扰动中恢复到稳态的时间越短，表明其暂态稳定性越好；同时，若扰动后系统的最大摇摆角度和速度较小，也反映出较强的暂态稳定性^[9]。此外，系统在遭受扰动后的能量变化越小，意味着系统的暂态稳定性越强。这些指标综合反映了电力系统在遭遇大扰动时的动态响应能力和稳定性水平。

二、电力系统暂态稳定性分析方法

尽管我国电力系统在暂态稳定性领域取得了显著成就，但前方仍充满挑战。在一些地区，电网结构的脆弱性使得它们难以抵抗大规模的扰动，这与电网的迅猛发展形成了鲜明对比。另外，新能源的融入，尤其是风电和太阳能的间歇性和不可预测性，为系统的稳定运行带来了前所未有的挑战。

（一）时域仿真法

时域仿真法，作为评估电力系统暂态稳定性的经典方法，通过精细模拟系统在时间轴上的动态响应来进行深入分析。该技术的核心在于建立一个精确的电力系统模型，其中包括发电机、变压器、输电线路等关键组件的动态方程。在特定的扰动场景下，利用数值积分方法求解这些方程，以监测和记录系统的实时动态。时域仿真法的优势在于其能够详尽地重现系统的动态过程，并为我们提供了丰富的参数变化数据，如发电机的转速、电压和功率等。然而，在处理庞大的电力系统时，这种方法也遭遇了计算量大和耗时长挑战。

（二）直接法

直接法是一种高效的暂态稳定性分析技术，它摒弃了传统的时域仿真复杂性，转而通过能量函数或稳定性指标来直接判断系统的暂态稳定性^[10]。该方法通常依据李雅普诺夫稳定性理论，通过构建系统的能量函数来推断扰动后的行为走向。直接法的一大亮点是其计算的高效率，这使得它在在线实时分析方面表现出色。尽管如此，该方法在精确度和适用范围上受制于能量函数的构建和稳定性指标的选择，这在分析复杂电力系统时可能会对直接法的分析和决策能力构成限制。

（三）人工智能法

随着人工智能技术的飞速发展，特别是机器学习，尤其是深度学习技术的崭露头角，这些尖端技术已经开始应用于电力系统暂态稳定性分析。通过训练模型以处理大量的历史和仿真数据，人工智能技术能够精确预测电力系统的暂态稳定性。人工智能方法的特点在于其处理非线性、非平稳复杂系统的强大能力，以及其潜在的自适应学习能力^[11]。然而，这些方法对数据的质和量有较高的要求，且在模型的可解释性方面存在短板，这些局限性限制了它们在实际应用中的广泛采用。

（四）小信号分析法

小信号分析法是一种基于线性化理论的稳定性评估方法，它

通过分析系统对微小扰动的反应来评估暂态稳定性。该方法主要针对系统的弱稳定性问题，通过计算特征值来确定稳定性边界。小信号分析法的显著优势在于其理论基础的严密性和计算过程的简洁性。然而，该方法不适用于直接分析较大的扰动，且在处理非线性系统时其分析能力有所局限。因此，在实际应用中，小信号分析法通常需要与其他分析技术结合使用，以最大化其效能。

三、电力系统暂态稳定性改进方法

电力系统的暂态稳定性是确保电网安全、可靠运行的基础要素。随着电网规模的持续扩大和结构复杂性的日益提升，如何有效地增强暂态稳定性已经成为电力工程领域面临的一项极具挑战性的研究课题^[12]。这不仅关系到电网的运行效率，更直接影响到电力供应的稳定性，进而对国民经济和社会生活产生深远影响。

（一）优化调度策略

优化调度策略在提升电力系统暂态稳定性方面扮演着至关重要的角色。该策略通过精确调整系统的各项运行参数，包括发电机出力的合理分配、负荷的最优配置，以及备用容量的高效运用，旨在最大化系统的稳定性。借助尖端的优化算法，可以在严格遵守系统运行约束的前提下，最大限度地提高暂态稳定性。具体而言，通过采取预防性控制措施，可以在扰动发生前调整系统的运行状态，有效降低遭遇干扰时的不稳定风险。一旦系统遭受实际扰动，能够迅速调整发电机出力 and 负荷分配，这种快速响应能力对于抑制系统振荡、确保电力系统的稳定运行至关重要^[13]。这种综合性的调度策略，不仅增强了电力系统的抗干扰能力，也为电网的可靠性和安全性提供了坚实的技术支撑。

（二）FACTS装置应用

灵活交流输电系统（FACTS）装置的广泛应用，为增强电力系统的暂态稳定性提供了强有力的技术保障。通过精心部署诸如静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）以及可控串联补偿器（TCSC）等先进的 FACTS 设备，电力系统得以实时、高效地调节无功功率和电压水平，从而优化其暂态响应性能。这些装置的优势在于其出色的实时调整能力，能够动态地改变系统参数，显著增强系统面对各种扰动的抵抗力。同时，得益于其卓越的快速响应特性，FACTS 装置能够大幅缩短系统从扰动中恢复至稳定状态的时间，有效遏制不稳定因素的蔓延，从而在整体上显著提升电力系统的暂态稳定性。这种技术的引入，不仅提高了电网的运行效率，也为保障电网的可靠与安全运行提供了坚实的支撑。

（三）电力系统结构优化

电力系统结构的优化对于提高暂态稳定性具有不可忽视的作用。通过精心调整网络结构，包括增加输电线路、改造电网布局、提升线路的传输能力等策略，我们能够有效地加固系统的整体稳定性框架。结构优化的核心目标是识别并减少系统中的薄弱环节，以此提高电网面对扰动的抵抗能力^[14]。此外，通过增强电网的互联互通，不仅扩大了系统的备用容量，也提升了其调节灵活性，这对于电力系统在遭遇突发情况时的快速响应和稳定恢复

至关重要。因此，这种结构优化为电力系统的暂态稳定性提供了坚固的基石，确保了电网在复杂多变环境中的可靠运行。

（四）人工智能在暂态稳定性改进中的应用

随着人工智能技术的飞速发展，电力系统暂态稳定性的提升迎来了新的契机。得益于机器学习、深度学习等前沿技术的应用，我们得以实现对电力系统运行状态的智能化监测与前瞻性预测，以及对控制策略的自动化优化。在电力系统中，人工智能的运用主要体现在两个方面：一是利用海量历史数据和实时信息，对暂态稳定性进行精确的预测和分析，为系统运行提供科学依据；二是通过智能优化算法，自动推导出最优控制策略，以应对各种可能的扰动情况，从而极大地提高了电力系统的暂态稳定性^[8]。这种技术的融合与应用，不仅增强了电力系统的自适应能力，也为电网的稳定运行和智能化管理开辟了新的道路。

四、我国电力系统暂态稳定性现状及展望

伴随着中国经济的强劲增长和能源需求的持续攀升，我国的电力系统正经历着规模的迅速扩张和复杂性的日益增加。这不仅体现在电网结构的日益复杂和覆盖范围的广泛延伸，还体现在电力系统运行管理的多元化和技术要求的提高。

（一）现状分析

目前，我国电力系统在暂态稳定性方面取得了显著的成果。这一成就主要体现在电网结构的持续加强上，通过新建输电线路和优化网络布局等策略，大幅提高了系统的整体稳定性。同时，大量灵活交流传输系统（FACTS）装置的部署，有效提升了系统对各类扰动的快速响应能力。此外，广域测量系统（WAMS）和基于相量测量单元（PMU）的先进控制技术的广泛应用，进一步提升了暂态稳定性监测与控制的精确性^[9]。这些技术进步的累积效应，为我国电力系统的安全稳定运行构筑了坚固的防线。

（二）存在问题

尽管我国电力系统在暂态稳定性领域取得了显著成就，但前

方仍充满挑战。在一些地区，电网结构的脆弱性使得它们难以抵抗大规模的扰动，这与电网的迅猛发展形成了鲜明对比。另外，新能源的融入，尤其是风电和太阳能的间歇性和不可预测性，为系统的稳定运行带来了前所未有的挑战。与此同时，随着电力市场的不断深化与演变，系统运行模式必须与之相适应。在市场化的大背景下确保电力系统的稳定性，已经成为我们亟待研究和解决的关键议题。

（三）发展趋势及展望

展望未来，我国电力系统暂态稳定性的发展将呈现几个清晰的趋势：先是电网智能化水平的持续提升，这将依赖于大数据、云计算、人工智能等尖端技术，实现对暂态稳定性更深入的分析 and 更精确的控制。之后，新能源并网技术的不断进步，将促进更高效、更可靠的并网解决方案的研发，以适应可再生能源比例的日益增长^[10]。然后，电力市场与系统运行的深度整合，将利用市场机制激励所有参与者共同维护电力系统的稳定性。最终，加强跨区域电网的互联互通，将进一步增强电力系统的互供能力和抵御扰动的能力，确保系统的安全与稳定运行。

五、结束语

本文从电力系统暂态稳定性的基本概念、分析方法、改进措施以及我国电力系统暂态稳定性的现状和展望等方面进行了详细探讨。通过对暂态稳定性问题的深入研究，不仅对电力系统暂态稳定性的内涵有了更加清晰的认识，而且为实际工程中的应用提供了理论依据和实践指导。在新的历史时期，我国电力系统正面临着前所未有的发展机遇和挑战。新能源的广泛接入、电力市场的逐步完善以及特高压技术的推广，都对电力系统的暂态稳定性提出了更高的要求。最终，本文虽然对电力系统暂态稳定性进行了较为全面的探讨，但仍有许多不足之处和待解决的问题。希望在今后的研究和实践中，广大学者和工程技术人员能够共同努力，为我国电力系统暂态稳定性的进一步提升做出更大的贡献。

参考文献

- [1]白金梁, 姜智业. 基于稳压器系统的电力系统暂态稳定性改善 [J]. 电气技术与经济, 2023, (02): 121-124.
- [2]邹焱. 基于 Kuramoto 模型的电力系统暂态稳定性分析与提升方法 [D]. 浙江大学, 2023.DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2023.001904.
- [3]詹献文. 基于 CRMN 和 GRU 的电力系统暂态稳定性预测与控制研究 [D]. 贵州大学, 2023.DOI:10.27047/d.cnki.ggudu.2023.002332.
- [4]吴国庆, 黄新宇. 不同静态负荷模型对电力系统暂态稳定性影响分析 [J]. 电气传动自动化, 2023, 45(02): 53-58+73.
- [5]彭鑫, 刘俊, 刘嘉诚, 等. 图像化数据驱动的电力系统暂态稳定性在线评估方法 [J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 17-24.
- [6]张谦. 基于改进 Gronwall 不等式的电力系统暂态稳定研究 [D]. 浙江大学, 2022.DOI:10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.002159.
- [7]周高涵. 基于机器学习算法的电力系统暂态稳定性评估研究 [D]. 武汉理工大学, 2022.DOI:10.27381/d.cnki.gwlgw.2022.001100.
- [8]李青. 基于改进 Euler 法的电力系统暂态稳定性的非线性仿真研究 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2021, 33(15): 41-43.
- [9]刘挺坚. 基于人工智能的电力系统暂态稳定在线分析与控制方法研究 [D]. 四川大学, 2021.DOI:10.27342/d.cnki.gscdu.2021.002791.
- [10]孙黎. 含直流输电的交流电力系统暂态稳定性研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2020.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000116.