

提升电力系统暂态稳定性的关键技术与控制策略研究

陈天兴

贵州西电电力股份有限公司鸭溪运营分公司 贵州遵义 563108

摘要: 在社会经济蓬勃发展的背景之下, 电力方面的需求在持续地攀升, 从而推动电力系统规模不断地扩张且结构愈发复杂。与此同时, 短路故障、负荷突变、设备故障以及恶劣天气等多样化的外部扰动, 也给电力系统的暂态稳定性带来了前所未有的严峻挑战。本文则会深入地剖析电力系统暂态稳定性。首先详细地阐述了其基本概念与分析方法, 着重梳理了常用的分析工具及软件。其次深入地探究了影响暂态稳定性的主要因素, 其中包括系统结构与配置、负荷与发电机动态特性、外部扰动与故障类型。而针对上述这些因素, 在文中还研究了暂态稳定性分析中的关键技术, 如功率系统建模与仿真、稳定性判别及多变量动态分析方法。最后以此为基础, 提出了自动发电控制与调度优化、电力系统防护与稳定控制、智能化控制技术应用等一系列的控制策略。经研究能够增强电力系统抗扰动能力, 从而提升其运行效率与安全性, 并为电力系统稳定运行提供理论支撑与实践指导。

关键词: 电力系统; 暂态稳定性; 影响因素; 分析技术; 控制策略

1. 引言

暂态稳定性分析作为电力系统安全运行的重要组成部分, 研究的重点不仅在于如何评估系统在故障后的响应, 还包括如何通过有效的控制策略确保系统能够在短时间内恢复到稳定状态。^[1] 本文通过对暂态稳定性的深入研究, 结合影响系统稳定性的各项因素, 提出了合理的控制措施和优化策略, 为提升电力系统的抗扰动能力和运行效率提供理论支持^[2]。

2. 电力系统暂态稳定性的基本概念与分析方法

2.1 暂态稳定性的定义与重要性

电力系统暂态稳定性是指在系统受到外部扰动(如故障、负荷变化等)后, 电力系统能否通过自我恢复机制快速回到稳定状态的能力。暂态稳定性反映了电力系统在动态响应过程中是否能够维持同步运行, 避免发生严重的电力设备损坏或大范围停电。系统的稳定性与电力系统的安全可靠性息息相关, 尤其在面对复杂的系统故障和大规模负荷波动时, 稳定性更显得尤为重要^[3]。

2.2 暂态稳定性的分析方法

暂态稳定性的分析方法主要是通过对电力系统在遭受扰动后的动态行为进行研究, 通常采用数值计算和仿真分析手段^[4]。最常用的方法是基于动力学模型的暂态分析, 这种方法通过建立系统的数学模型, 模拟电力系统在特定扰动条

件下的响应行为^[5]。同时还有另一种常见的分析方法是基于时域分析的方法^[6]。

2.3 常用暂态稳定性分析工具及软件

当下最常用的暂态稳定性分析工具之一是“PSS/E”(Power System Simulator for Engineering)。PSS/E是一款由美国西门子公司开发的电力系统分析软件, 它具备强大的动态仿真功能, 能够模拟电力系统在各种扰动下的暂态稳定性行为^[7]。除此之外, 另一个常见的分析工具是 MATLAB/Simulink, 特别是在电力系统控制策略研究中, MATLAB/Simulink 以其灵活的建模与仿真能力, 成为了电力系统暂态稳定性分析的重要工具^[8]。

3. 影响电力系统暂态稳定性的主要因素

3.1 系统结构与配置对暂态稳定性的影响

电力系统的结构和配置直接影响其暂态稳定性。一个电力系统的稳定性不仅取决于其组成部分的电气特性, 还受到系统拓扑结构和各个组件之间的耦合关系的影响^[9]。具体阐述如下:

发电机和负荷之间的配置关系是影响电力系统暂态稳定性的重要因素。如果发电机的分布过于集中, 可能会导致系统的局部负荷过重, 当遭遇外部扰动时, 集中发电机容易受到同步性问题的影响, 进而引发广泛的故障, 导致系统大规模失稳。而在多电源供应的电力系统中, 各电源之间的协

调和优化配置更加关键。不同类型的电源（如传统火电、核电、可再生能源等）对系统的稳定性贡献不同，合理的电源调度和负荷分配能有效提高系统的应急响应能力。

3.2 负荷与发电机的动态特性

电力系统的负荷和发电机动态特性对暂态稳定性具有深远的影响。发电机的转动惯量、功率输出特性及其控制系统的响应速度，直接决定了系统在受到扰动后的动态响应速度。发电机的惯性越大，能够提供更多的“能量储备”，从而帮助系统在出现扰动时保持稳定。然而，现代电力系统中，随着可再生能源的接入，尤其是风力和太阳能发电的比例增加，发电机的动态特性发生了改变，使得系统的暂态稳定性面临更大的挑战^[10]。

3.3 外部扰动与故障类型

外部扰动和故障类型对电力系统的暂态稳定性具有重要影响，尤其是在面对突发事件时，系统的稳定性和恢复能力是保障电力供应的关键。扰动源通常包括设备故障、系统过载、气候变化等，这些因素可能导致电力系统的迅速失衡。

实践当中，不同类型的设备故障对系统的影响程度也存在差异。例如，短路故障由于能量释放迅速，导致系统的暂态过程更加剧烈。而系统的过载问题也是一种常见的外部扰动。负荷的突然增加或发电机的功率输出不足，可能导致系统出现过载现象，造成设备的保护动作或系统脱网。此外，气候变化所引发的极端天气条件，如雷击、风暴、冰雪天气等，也会对电力系统的稳定性产生较大的影响^[11]。

4. 电力系统暂态稳定性分析中的关键技术

4.1 功率系统建模与仿真技术

电力系统建模与仿真是暂态稳定性分析中的核心技术之一。通过构建精确的电力系统模型，可以对系统的动态特性进行有效分析，评估系统在各种扰动下的响应。^[12]同时，在近年基于电力系统动态仿真软件的建模技术也逐渐地成为了主流。这些软件能够通过精细的模型和高效的计算方法，模拟电力系统在不同操作条件下的动态响应^[13]。

4.2 暂态稳定性判别方法

暂态稳定性判别方法是分析电力系统能否在外部扰动后恢复到稳定状态的关键技术。可随着电力系统复杂性的增加，传统的判别方法已逐渐无法满足现代电网对高精度和快速响应的需求。经典的暂态稳定性判别方法主要包括能量函数法和相平衡法。能量函数法基于系统的机械能和

电能的相互转化，利用系统的机械能储备来判断系统的暂态稳定性^[14]。

4.3 多变量动态分析方法

多变量动态分析方法是对电力系统暂态稳定性进行深入分析的重要手段。该方法通过对多个系统变量进行同时建模和分析，能够更真实地描述电力系统在复杂操作条件下的动态行为。电力系统中的发电机、变压器、负荷和电网等各个组件的动态特性都会影响到整个系统的稳定性，采用多变量动态分析可以揭示这些组件之间的相互作用^[15]。

5. 电力系统暂态稳定性的控制策略

5.1 自动发电控制与调度优化

自动发电控制（AGC）与调度优化的结合是保障电力系统暂态稳定性的关键策略之一。AGC的基本功能是通过实时调整发电机的功率输出，确保系统频率在扰动后的快速恢复。在电力系统中，频率波动是电力供需不平衡引起的常见问题，频率的过高或过低都可能导致系统的失稳或设备损坏。

与AGC系统相辅相成的是调度优化，它通过优化电力系统内各个发电机组的运行方式，实现负荷的合理分配和资源的最优利用。调度优化的核心目标是确保在满足负荷需求的前提下，尽可能减少能源浪费和系统运行成本。调度优化涉及的任务包括发电机组的启停决策、电网负荷的平衡、输电线路的负荷分配等。比如：在电力系统遇到突发故障或外部扰动时，调度优化系统能够迅速调整发电机组的运行策略，通过动态调整电网的配置和发电机功率分配，避免系统出现剧烈的波动或失稳。

5.2 电力系统防护与稳定控制策略

电力系统防护是确保电网暂态稳定性和安全性的重要环节，其核心功能在于通过快速反应与智能监控，预防系统故障蔓延，保持电网稳定运行。随着电力系统的智能化发展，传统的防护方式逐渐得到了升级。现代防护系统不再仅依赖于简单的机械设备，而是引入了智能化技术，实现了更高效的实时监控和调节。通过集成大数据分析、云计算和人工智能，智能防护系统能够实时获取电力系统的各项运行参数，并根据不同故障类型和影响范围，自动进行调整。

在稳定性控制方面，除了自动发电控制（AGC）和调度优化，现代电力系统还引入了其他更为精细的控制策略，如自动电压调节器（AVR）和功率因数控制。这些控制策略能够通过调整发电机的电压和功率因数来维持系统的平衡状

态。当系统发生暂态扰动时, AVR 系统能够立即响应, 通过调整发电机的励磁电流来调节电压, 避免电网电压的剧烈波动。而功率因数控制则通过调节负载的功率因数, 减少电力系统中的无功功率, 提高电能的利用效率, 从而缓解电网的压力, 维持电力系统的稳定运行。

电力系统稳定性的进一步提升还依赖于灵活的调度策略与动态负荷响应的结合。在面对复杂的运行情况时, 系统可以根据实时数据调整发电机组的启停顺序, 并根据负荷需求与发电能力动态调整功率分配。

5.3 智能化控制技术在暂态稳定性中的应用

智能化控制技术的核心优势在于其高效的数据处理和自动化决策能力。通过实时数据采集和大数据分析, 智能控制系统能够全面感知电力系统的运行情况, 从而为调度和控制提供精准的决策依据。就暂态稳定性控制而言, 智能化控制技术的另一个显著优势是其自学习和自适应能力。通过自适应算法, 控制系统能够根据实时运行数据自动优化电力系统的调度策略, 调整发电机的功率输出, 减少由负荷波动引起的频率波动。

智能化控制技术的另一个应用领域是电力系统的优化调度。通过高效的算法模型, 智能化控制技术能够根据电力系统的实时运行数据和负荷需求, 动态调整发电机组的启停和功率分配, 以实现系统的最优运行。

6. 结论

电力系统的暂态稳定性是确保电力供应安全、可靠的关键因素, 特别是在大规模扰动或系统故障发生时, 系统能否快速恢复稳定直接关系到电力供应的持续性和安全性。本文通过深入分析电力系统暂态稳定性的主要影响因素, 探讨了现代控制理论在暂态稳定性控制中的应用, 提出了针对性的控制策略。这些控制策略能够有效增强电力系统应对外部扰动的能力, 避免系统出现长期不稳定状态。未来随着智能电网技术的快速发展, 电力系统的暂态稳定性控制将更加依赖于先进的信息技术和人工智能技术。

参考文献:

- [1] 许颖. 新能源并网对电力系统稳定性的综合影响及优化策略[J]. 光源与照明, 2024,(11):237-239.
- [2] 严干贵, 岳霖, 张皓程, 等. 风电外送电力系统暂态

稳定性分析及提升策略[J]. 电网技术, 2024,48(12):4826-4832.

[3] 牛超超, 徐耀吉, 王杰, 等. 基于 PSASP 的多机电力系统暂态稳定性分析研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024,14(08):124-126.

[4] 袁娜. 电力系统动态潮流分析与暂态稳定性控制策略[J]. 光源与照明, 2024,(08):207-209.

[5] 杨宗伟, 张亚朦, 王飞, 等. 多机电力系统暂态稳定性及提高暂态稳定性措施分析研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024,14(06):257-259.

[6] 袁杰, 杜银昌, 许建奎, 等. 基于 ETAP 的海上油田群电力系统组网暂态稳定性仿真分析[J]. 电气应用, 2024,43(05):8-14.

[7] 孙玉伟, 刘勇, 吴健, 等. 并网型交直流电源对船舶电力系统暂态稳定性影响的仿真分析[J]. 上海海事大学学报, 2023,44(04):104-110.

[8] 肖荣荣, 孙孟. 电力系统稳定性分析及控制策略研究[J]. 产品可靠性报告, 2023,(09):109-110.

[9] 胡宗邱, 时洪奎, 张斯翔, 等. 大型海上风电场一体化电力系统暂态稳定性研究[J]. 电子设计工程, 2023,31(12):58-61+67.

[10] 王晓晖, 黄阮明, 李灏恩, 等. 基于瞬态能量函数法的电力系统暂态稳定性分析[J]. 电工技术, 2023,(07):72-74.

[11] 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.

[12] 曲莹, 韩肖清, 刘新元, 等. 基于多源数据驱动的电力系统暂态稳定性分析方法[J]. 太原理工大学学报, 2024,55(01):73-83.

[13] 黄孙华, 王杰, 熊林云. 分数阶滑模控制策略提高电力系统暂态稳定性研究[J]. 智慧电力, 2022,50(04):1-7.

[14] 何芳. 基于 MATLAB 的电力系统暂态稳定仿真与分析[J]. 滨州学院学报, 2022,38(02):86-90.

[15] 卢雪松, 张晓宇, 李璇, 等. 基于 ETAP 海洋平台电力系统组网暂态稳定性研究[J]. 电气应用, 2022,41(01):47-52.

作者简介: 陈天兴; 出生年月日:1994.10.11; 性别:男; 民族:汉; 籍贯:贵州贵阳; 学历:大学本科; 职称:助理工程师; 从事的研究方向:电力系统