

电力系统稳定性分析及优化策略研究

姚广谦

宁夏天元锰业集团有限公司 宁夏 中卫 755100

摘要：随着社会经济的飞速发展以及电力需求的持续增长，电力系统规模不断扩大、结构日益复杂，其稳定性问题愈发凸显。电力系统稳定性直接关系到电力供应的可靠性和安全性，对国民经济的平稳运行和社会的稳定发展具有至关重要的影响。本文深入剖析了电力系统稳定性的分类，详细探讨了影响电力系统稳定性的各类因素。在此基础上，针对电力系统稳定性问题提出了全面且具有针对性的优化策略，旨在为提高电力系统的稳定性提供理论支持和实践指导，推动电力行业的可持续发展。

关键词：电力系统；稳定性分析；优化策略；电力供应

1 引言

电力是现代社会的核心能源，其供应稳定可靠关乎国计民生。但电力系统易受负荷波动、设备故障、自然灾害等因素干扰而失稳。近年事故频发。2019年委内瑞拉因网络攻击和设备问题全国停电数日；2021年美国得州极寒天气致发电设备故障，数百万家庭企业受影响；2022年巴基斯坦高温干旱引发大规模停电。这些事故带来巨大损失，严重影响社会秩序与民生，凸显提升电力系统稳定性的紧迫性。

2 电力系统稳定性的分类

根据扰动的性质和系统响应的不同，电力系统稳定性通常可分为以下三类：

2.1 功角稳定性

功角稳定性是指电力系统中的同步发电机在受到扰动后，保持同步运行的能力。功角稳定又可进一步分为静态稳定、暂态稳定和动态稳定。静态稳定指电力系统在正常运行状态下，受到微小扰动后，能够自动恢复到原来运行状态的能力。静态稳定主要研究系统在小干扰下的动态特性，通常用小干扰法进行分析。暂态稳定指电力系统在遭受大扰动（如短路故障、发电机跳闸等）后，各同步发电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳定运行状态的能力。暂态稳定分析主要关注系统在故障发生后的最初几秒内的动态过程，通常采用时域仿真法进行计算。动态稳定指电力系统在受到大扰动后，在自动调节和控制装置的作用下，保持较长过程稳定运行的能力。动态稳定主要研究系统在故障切除后的较长动态过程中，由于自动励磁调节系统、调速系统等控制装置的作用而产生的低频振荡等问题。

2.2 电压稳定性

电压稳定性是指电力系统在正常运行或受到扰动

后，维持各母线电压在允许范围内的能力。当电力系统无功功率平衡遭到破坏，导致电压持续下降或上升，最终可能导致电压崩溃，造成大面积停电事故^[1]。电压稳定问题通常与系统的无功功率补偿、负荷特性、网络结构等因素密切相关。

2.3 频率稳定性

频率稳定性是指电力系统在正常运行或受到扰动后，维持系统频率在允许范围内的能力。电力系统的频率与系统的有功功率平衡密切相关，当发电功率与负荷功率不平衡时，系统频率将发生变化。如果频率偏差过大，将影响用电设备的正常运行，甚至可能导致发电机组解列，引发系统崩溃。

3 影响电力系统稳定性的因素

3.1 系统结构因素

（1）电网拓扑结构：电网的拓扑结构对电力系统的稳定性有着重要影响。合理的电网结构应具备适当的冗余度和坚强的联络线，以提高系统的抗干扰能力。例如，环形电网结构比辐射形电网结构具有更高的可靠性，能够在某条线路发生故障时，通过其他线路迅速转移负荷，保证系统的稳定运行。（2）电源布局：电源的合理布局对于电力系统的稳定性至关重要。电源应尽量靠近负荷中心，以减少输电损耗和线路压降，提高系统的电压稳定性。同时，不同类型电源（如火电、水电、核电、新能源发电等）的合理搭配，也有助于提高系统的调节能力和稳定性。

3.2 运行方式因素

（1）负荷水平：负荷的大小和变化特性对电力系统的稳定性有着显著影响。负荷的突然增加会导致系统频率下降、电压降低，如果超出系统的调节能力，可能引发稳定性问题。此外，负荷的波动性也会增加系统调节

的难度,影响系统的稳定性。(2)发电计划:发电计划的安排应充分考虑系统的负荷需求和运行约束条件。不合理的发电计划可能导致发电功率与负荷功率不匹配,引发频率和电压的波动。例如,在高峰负荷时段,如果发电功率不足,将导致系统频率下降;而在低谷负荷时段,如果发电功率过剩,可能导致电压升高。(3)无功功率平衡:无功功率的平衡是维持电力系统电压稳定的关键。无功功率不足会导致电压下降,影响用电设备的正常运行;而无功功率过剩则可能导致电压升高,危及设备的安全。因此,必须合理配置无功补偿装置,确保系统的无功功率平衡。

3.3 故障因素

(1)短路故障:短路故障是电力系统中最常见且危害严重的故障之一。短路故障会导致故障点电流急剧增大,电压急剧下降,可能引发发电机过电流、过电压保护动作,导致发电机跳闸,破坏系统的同步运行,甚至引发系统崩溃。(2)发电机跳闸:发电机跳闸会使系统的发电功率突然减少,导致系统频率下降。如果备用电源不能及时投入,或者负荷不能及时切除,将可能引发频率崩溃事故^[2]。(3)线路开断:线路开断会改变电网的拓扑结构,影响系统的功率分布和潮流方向。如果线路开断导致系统的某些部分失去电源或负荷转移困难,可能引发电压和频率的波动,影响系统的稳定性。

3.4 外部干扰因素

(1)自然灾害:自然灾害如台风、暴雨、雷电、地震等可能对电力系统造成严重破坏。例如,台风可能导致输电线路倒塔、断线,地震可能引发变电站设备损坏,从而影响电力系统的正常运行,甚至导致系统瘫痪。(2)人为因素:人为因素如误操作、蓄意破坏等也可能对电力系统的稳定性造成威胁。误操作可能导致设备损坏、保护装置误动,破坏系统的正常运行;蓄意破坏则可能直接破坏电力设施,导致停电事故。

4 电力系统稳定性优化策略

4.1 规划建设层面

4.1.1 优化电网结构

通过建设跨区域、跨电压等级的输电线路,实现电网之间的互联互通,提高电网的互联规模和互济能力。电网互联可以共享备用容量,提高系统的可靠性;在某一区域发生故障时,其他区域可以通过互联线路提供支援,减少停电范围。根据负荷分布和电源布局,合理规划变电站的位置和容量,优化输电线路的走向和回路数。避免出现线路迂回供电、变电站过载等问题,提高电网的供电能力和运行效率。积极推广应用柔性交流输

电系统(FACTS)技术、直流输电技术等先进的电网技术,提高电网的灵活性和可控性。FACTS技术可以通过快速调节输电线路的参数,实现对潮流的有效控制,提高系统的稳定性和输电能力;直流输电技术具有输送容量大、损耗小、控制灵活等优点,适用于远距离、大容量输电和异步电网互联。

4.1.2 合理布局电源

根据负荷增长的趋势和分布,合理规划电源的建设规模和布局,确保电源与负荷的协调发展。优先在负荷中心附近建设电源,减少输电损耗和线路压降,提高系统的电压稳定性。逐步提高清洁能源发电在电力系统中的比重,实现电源结构的多元化。同时,注重不同类型电源之间的互补性,如火电与水电、新能源与传统能源的协调配合,提高系统的调节能力和稳定性。在电源接入系统时,充分考虑接入点电网的强度、短路容量等因素,合理选择接入电压等级和接入方式,避免因电源接入不当而对系统稳定性造成不利影响。

4.2 运行控制层面

4.2.1 加强负荷预测与管理

采用先进的负荷预测方法和技术,综合考虑经济发展、气象条件、节假日等多种因素,提高负荷预测的准确性。准确的负荷预测可以为发电计划的制定提供可靠依据,减少因发电与负荷不匹配而引发的稳定性问题。通过价格机制、激励措施等手段,引导用户合理用电,削峰填谷,提高电力资源的利用效率。需求侧管理可以降低系统的峰值负荷,减轻电网的运行压力,提高系统的稳定性。

4.2.2 优化发电计划与调度

根据负荷预测结果和电源特性,制定科学合理的发电计划,确保发电功率与负荷功率的平衡。在发电计划中,充分考虑不同类型电源的调节能力和运行成本,合理安排发电顺序和发电量。建立完善的实时调度系统,实时监测电力系统的运行状态,及时发现和处理系统中的异常情况^[3]。通过自动发电控制(AGC)、自动电压控制(AVC)等自动控制系统,实现对发电机有功功率和无功功率的实时调节,维持系统的频率和电压稳定。

4.2.3 加强无功功率管理

根据电网的无功功率需求和分布情况,合理配置无功补偿装置,如电容器、电抗器、静止无功补偿器(SVC)、静止无功发生器(SVG)等。在负荷中心和电压薄弱环节适当增加无功补偿容量,提高系统的电压稳定性。制定合理的无功功率调度计划,根据系统的运行方式和负荷变化,实时调整无功补偿装置的投切和输

出,确保系统的无功功率平衡。同时,加强对发电机无功输出的调节,充分发挥发电机的无功调节能力。

4.3 技术创新层面

4.3.1 发展智能电网技术

智能电网以先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、控制技术和能源技术为基础,实现电网的智能化运行和管理。通过智能电网的建设,可以实现对电力系统的实时监测、精确控制和优化调度,提高电力系统的稳定性、可靠性和经济性。智能电表可以实现用户用电信息的实时采集和双向通信,为用户提供更加精准的用电服务和需求响应支持。分布式能源接入技术可以实现分布式电源(如太阳能、风能等)的友好接入和高效利用,提高电力系统的能源利用效率和稳定性。

4.3.2 加强电力系统仿真与分析技术研究

建立更加精确、全面的电力系统仿真模型,充分考虑系统中各种元件的动态特性和控制策略,提高仿真结果的准确性和可靠性。研发具有自主知识产权的电力系统仿真分析软件,提高仿真分析的效率和精度。利用仿真分析软件,对电力系统的各种运行工况和故障情况进行深入研究,为电力系统的规划、设计和运行提供科学依据。

4.3.3 研发新型电力设备与控制技术

提高发电机和变压器的效率、可靠性和稳定性,降低设备的损耗和故障率。例如,采用新型的绝缘材料和冷却技术,提高发电机的容量和运行温度;研发智能变压器,实现对变压器运行状态的实时监测和故障预警^[4]。电力电子技术在电力系统的发电、输电、配电和用电等各个环节都有着广泛的应用。通过研发先进的电力电子控制技术,如高压直流输电(HVDC)技术、柔性交流输电(FACTS)技术等,可以提高电力系统的控制灵活性和稳定性,实现对电力系统潮流的精确控制和优化分配。

4.4 应急管理层面

4.4.1 建立健全应急预案体系

针对可能发生的各种停电事故,制定详细的应急预案,明确应急处置的组织机构、职责分工、应急响应程序和处置措施等内容。应急预案应具有可操作性和针对性,确保在事故发生时能够迅速、有效地进行应对。定期组织相关部门和单位开展停电应急演练,检验应急预案的可行性和有效性,提高应急处置人员的实战能力和

协同配合能力。通过演练,及时发现应急预案中存在的问题和不足,并加以改进和完善。

4.4.2 加强应急物资储备与管理

根据电力系统的特点和可能发生的停电事故类型,建立相应的应急物资储备库,储备必要的应急物资和设备,如发电机、变压器、电缆、照明设备等。应急物资储备库应具备完善的仓储设施和管理制度,确保应急物资的质量和数量满足应急需求。建立应急物资管理信息系统,对应急物资的采购、储备、调配、使用等环节进行全程跟踪和管理。定期对应急物资进行检查和维护,及时补充和更新过期、损坏的物资,确保应急物资始终处于良好的备用状态。

4.4.3 提高应急通信与信息保障能力

建立多手段、多路由的应急通信网络,确保在停电事故发生时,应急指挥中心与现场应急处置人员之间能够保持畅通的通信联系。应急通信网络应具备抗干扰、抗破坏能力,能够适应各种恶劣的环境条件。电力信息系统是电力系统运行和管理的重要支撑,其安全稳定运行直接关系到电力系统的应急处置能力。加强电力信息系统的安全防护,采取防火墙、入侵检测、加密技术等安全措施,防止黑客攻击、病毒感染等安全事件的发生,确保电力信息的保密性、完整性和可用性。

结语

电力系统稳定性是复杂问题,关乎电力供应可靠安全,影响国民经济发展与社会稳定。本文剖析其内涵分类,探讨系统结构、运行方式、故障及外部干扰等影响因素,并提出规划建设、运行控制、技术创新、应急管理等多层面优化策略。未来应持续探索创新,保障电力系统稳定运行。

参考文献

- [1]乔潮江,孟祥金,董琛.电力设备过电压下的绝缘配合稳定性与优化[J].电力设备管理,2025,(03):209-211.
- [2]马超.大功率缺额下电力系统的稳定性分析与调整策略[J].电子元器件与信息技术,2024,8(12):26-28.
- [3]汤凯.电力配网的自适应电压控制策略及其稳定性分析[J].建设科技,2024,(S1):73-76.
- [4]黄颖.电力系统运行稳定性与安全性措施的分析[J].集成电路应用,2024,41(08):262-263.