

水利电力系统稳定性分析与控制策略

黄甫丞 李 行

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530007

摘 要：本文深入探讨了水利电力系统的稳定性问题。首先阐述了水利电力系统稳定性的重要性和分类，接着详细分析了影响水利电力系统稳定性的各类因素，包括系统结构、运行参数、外部干扰等。在此基础上，对现有的水利电力系统稳定性控制策略进行了系统梳理和评估，并提出了针对不同稳定性问题的优化控制策略。最后，通过仿真实验验证了所提控制策略的有效性和可行性，为水利电力系统的安全稳定运行提供了理论支持和实践指导。

关键词：水利电力系统；稳定性分析；控制策略

引言

水利电力系统作为国家能源体系的重要组成部分，承担着发电、输电、配电和用电等关键任务，其稳定运行对于保障社会经济的正常发展和人民生活的稳定至关重要。水利电力系统的稳定性是指系统在受到各种扰动后，能够保持或恢复到正常运行状态的能力。随着电力系统规模的不断扩大、新能源的大规模接入以及电力市场改革的深入推进，水利电力系统面临着日益复杂的运行环境和挑战，稳定性问题愈发突出。因此，深入研究水利电力系统的稳定性分析与控制策略具有重要的现实意义。

1 水利电力系统稳定性的重要性及分类

水利电力系统的稳定性是电力系统安全可靠运行的基础。稳定的电力系统能够确保电能的持续供应，满足用户的用电需求，避免因停电造成的经济损失和社会影响。同时，稳定的系统运行也有利于提高电力设备的利用率，延长设备使用寿命，降低运行维护成本。水利电力系统的稳定性可根据不同的特征和表现形式进行分类。常见的分类方式包括功角稳定性、电压稳定性和频率稳定性。功角稳定性主要关注发电机转子之间的相对角度变化，当系统受到扰动时，若发电机转子角度不能保持稳定，将导致发电机之间失去同步，引发系统振荡甚至崩溃。电压稳定性涉及系统中各节点电压的维持能力，当系统无功功率供需不平衡或负荷特性发生变化时，可能导致电压持续下降或上升，影响用电设备的正常运行。频率稳定性则与系统的有功功率平衡密切相关，当系统有功功率出现缺额或过剩时，频率将发生变化，频率偏差过大可能损坏电力设备和影响用电质量^[1]。

2 影响水利电力系统稳定性的因素

2.1 系统结构因素

水利电力系统的结构复杂多样，包括发电机、变压

器、输电线路、负荷等元件的连接方式和参数配置。系统的拓扑结构对稳定性有着重要影响。例如，长距离输电线路的存在会增加系统的电抗，降低系统的稳定性裕度；而合理的电网结构，如环形网络或双回路供电，能够提高系统的可靠性和稳定性。此外，系统中发电机的类型、容量和分布也会影响稳定性。不同类型的发电机具有不同的动态特性，大容量发电机的接入可能会改变系统的惯性时间和阻尼特性，对稳定性产生显著影响。

2.2 运行参数因素

水利电力系统的运行参数，如有功功率、无功功率、电压、频率等，对稳定性起着关键作用。有功功率的平衡是维持系统频率稳定的前提，当负荷突然增加或发电机出力减少时，有功功率缺额将导致频率下降。无功功率的合理分配对于维持电压稳定至关重要，无功功率不足会引发电压崩溃。电压和频率的偏差不仅会影响用电设备的性能，还可能引发保护装置动作，导致系统解列。此外，系统的负荷特性也会影响稳定性，不同类型的负荷对电压和频率变化的敏感程度不同，动态负荷的存在可能会加剧系统的稳定性问题。

2.3 外部干扰因素

水利电力系统在运行过程中不可避免地会受到各种外部干扰，如自然灾害（台风、地震、洪水等）、设备故障、人为操作失误等。自然灾害可能导致输电线路倒塔、变电站设备损坏，造成系统局部或大面积停电。设备故障如发电机故障、变压器故障等会破坏系统的正常运行，引发功率不平衡和稳定性问题。人为操作失误，如错误的倒闸操作、保护定值设置不当等，也可能导致系统事故的发生。此外，新能源的大规模接入给水利电力系统带来了新的挑战，新能源发电具有间歇性、波动性和随机性的特点，其大规模并网会增加系统的不确定性和复杂性，对稳定性产生不利影响。

3 现有水利电力系统稳定性控制策略评估

3.1 励磁控制策略

励磁控制是提高发电机功角稳定性和电压稳定性的重要手段。传统的励磁控制方式如比例-积分-微分（PID）控制，通过调节发电机的励磁电流来维持机端电压恒定。PID控制具有结构简单、易于实现的优点，在早期的电力系统中得到了广泛应用。然而，PID控制对系统参数变化和外部扰动的适应性较差。当系统运行状态发生变化，如负荷突然变化、发电机参数改变等，PID控制的参数可能不再适用，导致控制效果下降。此外，PID控制无法充分考虑系统的非线性特性，在系统出现较大扰动时，可能无法有效抑制发电机的振荡，影响系统的稳定性。随着控制技术的发展，出现了线性最优励磁控制、非线性励磁控制等先进控制策略。线性最优励磁控制基于线性系统理论，通过优化控制参数来提高系统的阻尼和稳定性。它考虑了系统的动态特性和性能指标，能够在一定程度上提高系统的稳定性。但线性最优励磁控制对系统模型的依赖性较强，它假设系统是线性的，而实际电力系统是一个复杂的非线性系统，当系统模型不准确时，控制效果会受到影响。非线性励磁控制则考虑了系统的非线性特性，能够更好地适应系统的动态变化^[2]。它通过引入非线性控制算法，如反馈线性化、滑模控制等，实现对发电机励磁的精确控制。非线性励磁控制能够在系统出现较大扰动时，快速调整励磁电流，抑制发电机的振荡，提高系统的稳定性。然而，非线性励磁控制的算法较为复杂，实现难度较大，对控制系统的硬件和软件要求较高，在实际应用中受到一定限制。

3.2 调速控制策略

调速控制主要用于维持系统的频率稳定。传统的调速器通过调节发电机的原动机进汽量或进水量来改变发电机的有功出力，以响应系统频率的变化。传统调速器具有结构简单、可靠性高的优点，在早期的电力系统中发挥了重要作用。但随着电力系统的发展，其对系统复杂动态特性的适应能力逐渐不足。随着电力系统的发展，出现了基于先进控制理论的调速控制策略，如模糊控制、神经网络控制等。模糊控制能够处理不确定性和非线性问题，它根据系统的运行状态和频率偏差，通过模糊规则模糊地调整调速器的输出。模糊控制不依赖于精确的系统模型，能够根据实际情况灵活调整控制策略，具有较强的适应能力。例如，当系统出现复杂扰动时，模糊控制可以根据模糊规则快速做出反应，调整发电机的有功出力，维持系统频率稳定。神经网络控制则具有自学习和自适应能力，它能够通过训练学习系统的

动态特性，实现更精确的调速控制^[3]。神经网络可以模拟人类的神经系统，通过对大量历史数据的学习，建立系统输入与输出之间的映射关系。在调速控制中，神经网络可以根据系统的实时运行数据，自动调整控制参数，提高调速控制的精度和稳定性。然而，这些先进控制策略的计算复杂度较高，需要大量的计算资源和时间，对硬件设备的要求也较高。此外，神经网络控制的训练过程需要大量的样本数据，且训练结果可能受到样本数据的质量和数量的影响，在实际应用中受到一定限制。

3.3 柔性交流输电系统（FACTS）控制策略

FACTS技术通过在电力系统中引入电力电子装置，实现对系统电压、阻抗和功率的快速灵活控制。常见的FACTS装置包括静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）、晶闸管控制的串联电容器（TCSC）等。SVC和STATCOM可以快速补偿系统的无功缺额，抑制电压波动。SVC通过调节晶闸管的触发角来改变其等效电纳，从而调节无功输出；STATCOM则通过控制逆变器的输出电压幅值和相位，实现无功功率的快速调节。它们能够在短时间内响应系统电压的变化，提高系统的电压稳定性。例如，在系统负荷突然增加导致电压下降时，SVC或STATCOM可以迅速增加无功输出，提升电压水平。TCSC可以改变线路的等效阻抗，提高系统的暂态稳定性。通过调节晶闸管的触发角，TCSC可以改变串联在输电线路中的电容值，从而改变线路的等效阻抗。在系统发生故障时，TCSC可以快速调整线路阻抗，提高系统的功率传输能力和稳定性。然而，FACTS装置的成本较高，其控制策略的设计和优化较为复杂。FACTS装置的制造和安装需要大量的资金投入，这在一定程度上限制了其大规模应用。同时，FACTS装置的控制策略需要综合考虑系统的运行状态和FACTS装置的特性，如装置的容量、响应速度、控制精度等，设计出最优的控制策略以提高系统的稳定性是一个具有挑战性的问题。

4 优化控制策略的提出

4.1 基于多智能体系统的协同控制策略

针对水利电力系统的复杂性和分布式特点，提出基于多智能体系统的协同控制策略。多智能体系统是由多个具有自主决策和通信能力的智能体组成的系统，每个智能体可以代表系统中的一个元件，如发电机、负荷、FACTS装置等。在功角稳定性控制方面，发电机智能体可以根据自身的运行状态和与其他智能体的信息交换，调整励磁和调速参数。发电机智能体可以实时监测自身的转子角度、转速、有功和无功出力等参数，并通

过通信网络与其他发电机智能体和系统控制中心进行信息交互。根据接收到的信息,发电机智能体可以判断系统的运行状态,自动调整励磁电流和原动机的进汽量或进水量,以实现发电机的协同稳定运行。例如,当系统出现功率振荡时,发电机智能体可以根据振荡的频率和幅度,协调调整励磁和调速参数,抑制振荡的传播和发展。在电压稳定性控制方面,SVC、STATCOM等智能体可以根据系统电压的变化,协调调节无功输出。这些智能体可以实时监测所在节点的电压值,并通过通信网络与其他智能体共享信息。当系统某节点电压下降时,附近的SVC或STATCOM智能体可以自动增加无功输出,提升电压水平;同时,其他智能体也可以根据系统整体的无功需求,调整自己的无功输出,实现无功功率的合理分配,维持系统电压稳定。这种协同控制策略能够充分发挥各智能体的优势,提高系统的整体稳定性和适应性。通过智能体之间的信息交互和协同合作,系统可以更加灵活地应对各种扰动和变化,实现更加精确和高效的控制。

4.2 基于大数据和人工智能的预测控制策略

利用大数据技术收集和分析水利电力系统的历史运行数据、实时监测数据以及外部环境数据,挖掘数据中蕴含的系统运行规律和稳定性特征。大数据技术可以处理海量的数据,包括发电机的运行参数、负荷的变化情况、气象数据等。通过对这些数据的分析和挖掘,可以发现系统运行中的潜在规律和稳定性影响因素。结合人工智能算法,如深度学习、强化学习等,建立系统稳定性预测模型。深度学习算法具有强大的特征提取和模式识别能力,可以从大量的数据中学习系统的复杂非线性关系。强化学习算法则可以通过与环境的交互,不断优化控制策略,以实现系统的最优控制。例如,利用深度学习算法对系统的历史运行数据进行训练,建立系统稳定性预测模型,该模型可以根据当前的运行数据和外部环境数据,预测系统未来的稳定性状态^[4]。通过预测模型提前预测系统的稳定性状态,及时采取相应的控制措施。例如,当预测到系统可能出现频率不稳定时,可以提前调整发电机的出力或投入备用电源,以避免频率偏差过大;当预测到电压可能出现波动时,可以提前调节FACTS装置的无功输出,稳定系统电压。这种基于大数

据和人工智能的预测控制策略能够实现对系统稳定性的主动控制,提高系统的可靠性和安全性。它可以在问题发生之前采取措施,将潜在的风险降到最低。

4.3 考虑新能源接入的混合控制策略

针对新能源大规模接入带来的稳定性问题,提出考虑新能源接入的混合控制策略。将新能源发电系统与传统水利电力系统进行有机结合,充分发挥两者的优势。在控制策略上,综合考虑新能源发电的间歇性和波动性特点,采用混合控制方式。例如,在新能源发电高峰期,通过储能装置储存多余的电能。储能装置可以在新能源发电过剩时将电能储存起来,在发电低谷期释放电能,以平衡系统的有功功率。这样既可以提高新能源的利用率,又可以减少新能源发电波动对系统稳定性的影响。同时,结合FACTS装置和传统控制策略,对系统的电压和频率进行综合调节。FACTS装置可以快速调节系统的无功功率和电压,提高系统的电压稳定性;传统控制策略如励磁控制和调速控制可以维持系统的频率稳定。

结束语

未来的研究可以进一步优化控制策略的算法和参数,提高控制系统的实时性和可靠性。例如,深入研究多智能体系统的通信协议和协同算法,提高智能体之间的信息交互效率和协同控制能力;优化大数据和人工智能算法,提高预测模型的准确性和泛化能力。同时,加强对新能源接入后系统稳定性的深入研究,探索更加有效的控制策略和技术手段,以适应新能源大规模接入的发展趋势,为水利电力系统的安全稳定运行提供更加完善的理论和技术支持。

参考文献

- [1]叶铁丰,戴志博,陈伟,等.基于数据挖掘技术的短期电力负荷预测方法[J].电子世界,2019(01):30-31.
- [2]张守艮.电力系统供电负荷稳定性优化控制研究[J].数字通信世界,2018(11):99+56.[1]谢文涛.变电站自动无功控制装置的研究与实现[J].电气开关,2021,59(05):30-33.
- [3]谢文涛.变电站自动无功控制装置的研究与实现[J].电气开关,2021,59(05):30-33.
- [4]席嫣娜,王方敏,李占赫,等.计及系统级控制的柔性直流牵引供电系统潮流计算方法[J].电工电能新技术,2021,40(02):9-14.