

发电机励磁控制系统稳定性分析与优化

刘宇琦

中油电能气电公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16775

[摘要] 本文聚焦发电机励磁控制系统稳定性。先阐述其组成、工作原理与稳定性理论,分析现有系统存在的稳定性问题及影响因素。接着介绍数学建模、仿真分析、实验测试等稳定性分析方法。最后从控制策略、硬件、抗干扰措施三方面提出优化策略。旨在为提升发电机励磁控制系统稳定性提供理论支持与实践参考,保障电力系统安全稳定运行。

[关键词] 发电机; 励磁控制系统; 稳定性分析; 优化策略

中图分类号: TM301.2 **文献标识码:** A

Stability Analysis and Optimization

Yuqi Liu

CNPC Power and Gas-Fired Power Generation Company

[Abstract] This paper focuses on the stability of the generator excitation control system. It begins by explaining its components, working principles, and stability theory, analyzing existing stability issues and influencing factors. Subsequently, methods for stability analysis, such as mathematical modeling, simulation analysis, and experimental testing, are introduced. Finally, optimization strategies are proposed from three aspects: control strategies, hardware, and anti-interference measures. The aim is to provide theoretical support and practical references for enhancing the stability of the generator excitation control system, thereby ensuring the safe and stable operation of the power system.

[Key words] generator; excitation control system; stability analysis; optimization strategy

引言

发电机励磁控制系统是电力系统的关键部分,其稳定性直接影响电力供应的可靠与安全。随着电力系统规模扩大与新能源大规模接入,系统运行环境愈发复杂,对励磁控制系统稳定性提出更高要求。然而,现有系统在稳定性方面存在诸多问题。因此,深入分析其稳定性并探索优化策略具有重要的现实意义,本文将就此展开详细探讨。

1 发电机励磁控制系统相关理论

1.1 励磁控制系统的组成

发电机励磁控制系统主要由励磁功率单元和励磁调节器两部分构成,二者协同工作,与同步发电机共同构成闭环反馈控制系统。励磁功率单元是励磁系统的能量供给核心,负责向发电机励磁绕组提供直流励磁功率。其构成方式多样,根据不同励磁方式可分为多种类型。励磁调节器作为系统的“智能中枢”,通过实时监测发电机电压、电流等运行参数,结合预设的调节准则,精确控制励磁功率单元输出的励磁电流^[1]。其功能实现依赖于多种硬件设备与软件算法的协同:硬件方面,包含传感器、信号调理电路、微处理器等,用于数据采集与处理;软件层面,通过

编程实现控制逻辑,如PID控制、模糊控制等算法,以适应不同工况下的调节需求。

1.2 励磁控制系统的工作原理

励磁控制系统的工作原理基于电磁感应定律与闭环反馈控制理论。当发电机运行时,励磁功率单元向转子绕组提供直流励磁电流,在转子中建立磁场;定子绕组切割磁感线产生感应电动势,进而输出电能。励磁调节器通过实时监测发电机端电压,与设定值进行比较,计算偏差值,并根据预设的控制策略调整励磁功率单元的输出。以自并励励磁系统为例,其工作过程如下:发电机出口电压经励磁变压器降压后,输入可控整流装置;励磁调节器根据电压偏差信号,通过调节可控硅的导通角,改变整流装置的输出电压,从而调整励磁电流大小。当发电机负荷增加导致端电压下降时,励磁调节器增大导通角,提高励磁电流,增强转子磁场,使端电压回升至设定值;反之,当负荷减少导致端电压升高时,则减小导通角,降低励磁电流,维持电压稳定。

1.3 稳定性相关理论

发电机励磁控制系统的稳定性是指系统在受到扰动后,能够恢复或保持原有运行状态的能力。根据扰动性质与作用时间,

稳定性可分为静态稳定性、暂态稳定性和动态稳定性三类。静态稳定性研究系统在小扰动下的稳定性,如负荷缓慢变化时的电压波动。其分析方法主要包括小干扰分析法,通过建立系统线性化模型,计算特征值判断稳定性:若所有特征值实部均为负,则系统稳定;反之则不稳定。暂态稳定性关注系统在大扰动(如短路故障)后的稳定性,重点分析发电机功角的变化。其评估指标为功角摇摆曲线,若功角经过衰减振荡后趋于稳定,则系统暂态稳定;若功角持续增大,则失去稳定。动态稳定性研究系统在持续小扰动下的稳定性,如低频振荡。其分析方法包括频域分析法与时域仿真法:频域分析法通过频率响应特性评估稳定性;时域仿真法则通过数值计算模拟系统动态过程,直观展示变量变化趋势。

2 发电机励磁控制系统稳定性现状分析

2.1 现有励磁控制系统存在的稳定性问题

当前,发电机励磁控制系统在稳定性方面仍存在诸多问题。首先,传统PID控制策略在应对复杂工况时存在局限性。PID控制器参数整定依赖经验与试错法,缺乏系统性方法,难以实现最优控制;当系统运行条件变化时,参数自适应调整能力不足,可能导致控制性能下降,甚至引发系统失稳。其次,系统非线性特性对稳定性影响显著。发电机励磁系统存在饱和、死区等非线性环节,传统线性控制方法难以准确描述系统动态特性,导致控制精度降低^[2]。另外,新能源大规模接入对励磁控制系统稳定性提出新挑战。风电、光伏等新能源具有间歇性与波动性,其接入导致电网功率平衡与电压稳定问题加剧,传统励磁控制策略难以适应新能源接入后的电网特性变化,易引发低频振荡与电压崩溃。

2.2 影响稳定性的因素

2.2.1 系统参数变化

系统参数变化是影响励磁控制系统稳定性的重要因素。发电机参数(如转子电阻、电感)随运行时间延长会发生老化与漂移,导致系统模型失配;励磁调节器参数(如比例增益、积分时间常数)整定不合理,会降低控制性能。

2.2.2 外部干扰

外部干扰对励磁控制系统稳定性的影响不容忽视。电网短路故障、负荷突变等大扰动会引发系统电压与频率剧烈波动,考验励磁控制系统的动态响应能力;雷电冲击、开关操作等瞬态过程会产生过电压与过电流,可能损坏励磁设备,导致系统失稳。

2.2.3 控制策略的合理性

控制策略的合理性直接决定励磁控制系统的稳定性。传统PID控制策略结构简单、易于实现,但难以适应复杂工况;智能控制策略(如模糊控制、神经网络控制)虽具有自适应与鲁棒性优势,但算法复杂、计算量大,对硬件要求较高。控制策略的协调性也至关重要,如自动电压调节器(AVR)与电力系统稳定器(PSS)的配合不当,可能引发负阻尼效应,导致低频振荡。

3 发电机励磁控制系统稳定性分析方法

3.1 数学建模法

数学建模法作为分析励磁控制系统稳定性的基础且关键方法,有着严谨且系统的流程。首先,要依据系统的物理结构与工作原理,细致剖析每个部件的特性,进而建立各部件精确的数学模型。像发电机模型,需考虑其电磁关系、机械运动等多方面因素;励磁机模型要涵盖励磁电流的产生与调节机制;励磁调节器模型则要精准描述其信号处理与控制逻辑。其次,把建立好的各部件模型按照实际系统的连接方式进行整合,构建成整体系统模型。在此过程中,要充分考虑系统中存在的非线性环节与饱和特性,因为这些因素会显著影响系统的稳定性。最后,运用线性化处理,例如小扰动法,将复杂的非线性模型转化为线性模型。线性模型便于利用成熟的线性系统理论进行稳定性分析,如通过计算特征值判断系统的稳定性。数学建模法的优势在于能深入揭示系统内在的物理机理,为后续控制策略的设计提供坚实的理论依据。

3.2 仿真分析法

仿真分析法借助计算机模拟技术,对励磁控制系统展开数字化建模与分析,是一种高效且实用的研究手段。首先,要选择合适的仿真软件,像MATLAB/Simulink具有强大的建模与仿真功能,PSCAD则在电力系统仿真方面表现出色。依据励磁控制系统的实际结构和参数,在选定的软件中搭建精确的系统仿真模型,确保模型能够准确反映系统的动态特性。其次,合理设置仿真参数,包括仿真时间的长短、步长的大小以及故障类型等。不同的参数设置会模拟出系统在不同工况下的运行过程,如模拟短路故障、负荷突变等情况^[3]。最后,对仿真结果进行深入分析,重点关注电压、电流、功角等关键参数的变化曲线。通过观察这些曲线的波动情况,评估系统在不同工况下的稳定性。仿真分析法的优势在于能够直观地展示系统的动态特性,方便比较不同控制策略的效果;但其局限性在于仿真结果受模型精度与参数设置的影响较大,因此需要结合实验进行验证。

3.3 实验测试法

实验测试法通过实际系统或物理模拟装置,对励磁控制系统进行稳定性测试,是获取真实可靠数据的重要途径。首先要精心搭建实验平台,将发电机、励磁系统、负载等设备按照实际运行要求进行连接,确保实验环境与实际运行环境尽可能相似。在连接过程中,要注意设备的安装位置、接线方式以及电气参数的匹配等问题。其次,设计科学合理的实验方案,在实验过程中,要准确采集实验数据,包括电压波动、功角变化等关键信息。最后,对采集到的实验数据进行详细分析,根据数据的变化趋势评估系统的稳定性。实验测试法的优势在于其结果真实可靠,能够直接反映实际系统的性能;然而,其局限性在于实验成本高,需要投入大量的人力、物力和财力;实验周期长,从实验准备到数据采集与分析需要较长时间;且难以模拟所有可能的工况,存在一定的局限性。

4 发电机励磁控制系统稳定性优化策略

4.1 控制策略优化

控制策略优化在提升励磁控制系统稳定性方面起着至关重要的作用,是整个系统稳定运行的关键所在。传统的PID控制虽然结构简单、易于实现,但在面对复杂多变的工况时,其局限性逐渐显现。为克服这些问题,可引入先进的智能控制算法,像模糊PID控制和神经网络PID控制等。模糊PID控制巧妙地结合了模糊逻辑与PID控制的优点,它能够依据系统当前的运行状态,通过模糊逻辑规则实时地调整PID参数,使系统在不同工况下都能保持良好的自适应能力,从而有效应对各种不确定因素。神经网络PID控制则借助神经网络强大的学习能力,通过对大量历史数据的学习和分析,实现PID参数的在线优化。它可以根据系统的实时反馈信息,自动调整参数,以适应系统动态特性的变化。另外,将自动电压调节器(AVR)与电力系统稳定器(PSS)相结合也是一种有效的策略。通过在系统中附加特定的控制环节,能够有效抑制系统的低频振荡。例如,在AVR中引入PSS模块,以转速偏差或功率偏差作为输入信号,经过PSS的处理后产生附加励磁电流。这一附加电流可以补偿励磁电流的相位滞后,增加系统的阻尼,从而提高系统的稳定性,确保电力系统在各种运行条件下都能安全可靠地运行。

4.2 硬件优化

硬件优化是保障励磁控制系统稳定性的坚实基础,对于系统的长期稳定运行起着不可或缺的作用。选用高性能的励磁调节器至关重要,高性能的励磁调节器具备更快的数据处理速度和更高的控制精度,能够迅速准确地响应系统的各种指令和变化,及时调整励磁参数,保证系统的稳定运行。优化励磁功率单元的设计也是关键环节。采用高可靠性的可控硅和低损耗的整流装置等先进元件,可以有效降低设备的故障率,提高系统的可靠性和稳定性。高可靠性的可控硅能够承受较大的电流和电压冲击,减少因元件损坏导致的系统故障;低损耗的整流装置可以降低能量损耗,提高系统的效率。加强励磁系统监测与保护装置的配置也是必不可少的。设置过电压、过电流、欠励磁等完善的保护环节,能够实时监测系统的运行状态,一旦发现异常情况,立即采取相应的保护措施,如切断电源、发出警报等,确保系统在安全的状态下运行,避免因故障扩大而造成更严重的后果。

4.3 抗干扰措施优化

抗干扰措施优化是提高励磁控制系统稳定性的重要手段,针对外部干扰,可采取一系列有针对性的措施。加强电网结构规划是提高电网抗干扰能力的基础。通过合理规划电网布局,增加电网的短路容量,能够增强电网对外部干扰的承受能力,减少干扰对励磁控制系统的影响。优化励磁系统接地设计也是关键一步。良好的接地设计可以降低电磁干扰的影响,为系统提供一个稳定的参考电位,减少因电磁干扰引起的信号失真和系统误动作^[4]。采用滤波装置抑制谐波干扰也是常用的方法。如RC滤波器、LC滤波器等,它们能够有效地滤除信号中的谐波成分,提高信号质量,保证系统的准确运行。针对内部干扰,优化励磁调节器硬件设计是首要任务。采用屏蔽电缆、隔离变压器等措施可以减少电磁耦合,降低内部元件之间的相互干扰。同时加强软件抗干扰设计也至关重要。采用数字滤波算法可以对采集到的信号进行滤波处理,去除噪声干扰;看门狗技术则能够实时监测系统的运行状态,一旦发现系统出现异常,及时进行复位操作,提高系统的可靠性和稳定性。

5 结束语

发电机励磁控制系统稳定性对电力系统至关重要。本文通过理论分析、方法研究及策略探讨,全面剖析了影响稳定性的因素并提出针对性优化措施。未来,随着技术发展,需持续探索更先进的控制算法与硬件技术,加强抗干扰能力,以适应电力系统不断变化的需求,进一步提升发电机励磁控制系统稳定性,保障电力系统长期稳定运行。

[参考文献]

- [1]陆青卓.基于云计算的发电机励磁系统故障检测系统设计[J].电气技术与经济,2025,(06):304-306+311.
- [2]袁晨,袁训奎.典型发电机励磁系统模型参数的确认[J].山东电力高等专科学校学报,2025,28(01):49-53+60.
- [3]刘刚,邱悦,虞儒新,等.火电厂发电机励磁调节系统故障及策略研究[J].中国机械,2024,(26):100-103.
- [4]王斌,张继胜,杜亮,等.我厂发电机微机励磁系统改造对电力稳定性的影响[J].中国设备工程,2020,(15):109-111.