

超临界电厂励磁系统的优化设计与性能分析

于波, 张晏平

华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730000

摘要： 本研究聚焦于超临界发电厂励磁系统的性能分析，作为电力系统的核心组成部分，励磁系统性能会影响电网。在对励磁系统稳定性分析后，可以确认系统在静态和动态条件下的稳定性，然后评估了系统的小扰动恢复能力，再从特征根分析检验系统面对大扰动的稳定性。

动态响应特性主要研究了系统对变动的快速适应性，在研究PID控制器的优化和附加控制策略的运用后，可以发现其能提升系统对电压波动的控制精度。电磁暂态过程仿真在模拟极端情况下，提供了故障期间系统响应的可视化数据。

关键词： 发电厂励磁系统；扰动恢复能力；附加控制策略

Optimized Design And Performance Analysis Of The Excitation System In The Supercritical Power Plant

Yu Bo, Zhang Yanping

Huaneng Lanzhou Thermal power Co., LTD. Gansu, Lanzhou 730000

Abstract： This study focuses on the performance analysis of the excitation system in supercritical power plants. As a core component of the power system, the performance of the excitation system will affect the power grid. After the stability analysis of the excitation system, the stability of the system under the static and dynamic conditions can be confirmed, and then the small disturbance recovery ability of the system is evaluated, and then the stability of the system facing the large disturbance is tested from the characteristic root analysis. The dynamic response characteristics mainly study the rapid adaptability of the system to changes. After studying the optimization of PID controller and the application of additional control strategy, it can be found that it can improve the control accuracy of the system to voltage fluctuation. The electromagnetic transient process simulation provides visual data of the system response during failure.

Keywords： power plant excitation system; disturbance recovery ability; additional control strategy

引言

现在，能源的高效利用与可持续发展已成为全球关注的焦点。随着工业化进程的加速，不断增长的人口对电力的需求日益攀升，推动了电力行业的技术革新，也促使我们深入探索如何在保证电力供应的同时，实现环境的保护与资源的节约。在此背景下，超临界发电技术就成为现代电力工业的重要组成部分。

超临界发电厂将水加热至超临界状态来提高蒸汽的热力学效率，从而提升能量转换率，减少化石燃料的消耗及温室气体的排放。但这一过程要求电厂各系统之间具备高度的协调性。励磁系统是确保发电机稳定运行的关键部分，其性能直接影响到整个电力系统的可靠性。本论文深入探讨超临界电厂励磁系统的优化设计及其性能分析，将从理论出发对励磁系统的参数进行精细化设计，以期达到最佳的控制效果。希望这一研究可以为超临界发电厂的励磁系统提供更为科学的设计依据，也为电力行业的节能减排和可持续发展贡献力量。

一、超临界电厂励磁系统的基本原理

（一）超临界电厂概述

超临界电厂是工作在水的超临界状态下的火力发电站，在这里，水会加热至超过其临界温度和压力，形成一种既非液体也非

气体的独特状态，从而提升热效率，降低燃料消耗与环境污染。

超临界电厂之所以被称为“超临界”，是因为其工作参数超越了水的临界点（压力221.15 bar，温度374.15° C）。在这样的状态下，水的性质介于液体和气体之间，超临界流体具有极高的热传递效率。当水被加热至超临界状态后，再通过蒸汽涡轮机

作者简介：于波，男，出生日期：1995年9月2日，籍贯：河北省唐山市玉田县，学历：大学本科，职称：助理工程师，工作领域：发电厂继电保护专业。

驱动发电机，能够以更高的热效率（通常超过40%）转换能量，相较于亚临界或常规燃煤电厂，超临界电厂能减少燃料消耗，每kWh煤耗最低约有327g左右。除此之外，在温室气体排放方面，主要成分为氮氧化物和少量其他有害物质，脱硫率更是超98%。

鉴于其高效率 and 环保优势，超临界电厂在世界各地非常受欢迎，尤其是在能源需求旺盛的地区，比如大城市周边、工业集中区域或是国家电网的关键节点，需求非常大。随着全球对可持续能源的重视，超临界发电技术也在不断进步，超超临界技术在内的升级版正逐步成为现代电力行业的重要组成部分^[1]。

（二）励磁系统的构成

励磁系统就是负责向发电机转子绕组提供励磁电流的装置，核心在于维持发电机端电压的稳定，并在系统出现扰动时快速响应，恢复电网的稳定状态。它由励磁电源、励磁调节器、电压互感器和电流互感器等多个关键部件组成。对于一台额定励磁电流为1000安培的发电机来说，励磁电源应能在几毫秒内响应指令，才能适应从500安培到1500安培的励磁电流变化，最终使电压达到稳定的程度。

励磁电源为系统提供稳定的直流电，而励磁调节器则是整个系统的“大脑”，根据发电机端电压的实时变化，调整励磁电流的大小，使得电压稳定在设定值附近。在正常运行条件下，励磁调节器需保持发电机端电压在 $\pm 1\%$ 的范围内波动，即如果设定电压为110伏特，实际电压应在109伏特至111伏特之间。当检测到电压偏离设定值时，励磁调节器通过PID算法计算出适当的励磁电流变化量，使电压迅速恢复至目标值。

电压互感器和电流互感器则分别是使得测量发电机可以输出电压和电流，为励磁调节器提供必要的反馈信息。电压互感器的精度等级至少应为0.5s，即使在轻微电压波动下励磁调节器也能获得准确的反馈信息，电流互感器的测量范围应覆盖从0到150%的额定励磁电流。

（三）励磁控制策略分析

励磁控制策略是励磁系统的核心，在超临界发电厂中，励磁控制策略要考虑电压的稳定，还需兼顾系统的动态响应特性。常见的控制策略包括比例积分（PI）控制、比例积分微分（PID）控制，以及更为先进的自适应控制和模糊逻辑控制等。PID控制的鲁棒性良好，PID控制通过比例项P、积分项I和微分项D三者结合，实现了对电压偏差的快速响应^[2]。

比例积分（PI）控制是最为基础且广泛使用的控制策略之一，它的设计哲学在于即时的比例作用和累积的积分作用，然后再对偏差进行补偿。比例作用能够迅速响应偏差，然后再提供与偏差成正比的控制动作，使得系统的快速响应；而积分作用则主要是为了消除静态误差，然后再利用累积偏差的总和，随着时间的推移逐渐减小偏差直至消除。PI控制在许多稳定且变化缓慢的系统中表现很好，常见的在维持发电机端电压恒定时，就能够提供良好的控制效果。

比例积分微分（PID）控制则在此基础上加入了微分作用，增强了系统对变化的预测能力。微分作用利用检测偏差的变化率，预判偏差的趋势，提前调整控制量，可以有效抑制系统振荡，改

善动态性能。PID控制在处理复杂动态过程时更为出色，特别是在需要快速响应和抑制振荡的场合，PID控制能够更精确地调整励磁电流，最常见的就是在电网突然变化或负载快速波动时保持系统稳定。

自适应控制则代表了控制策略的进一步研发，它能够根据系统运行状态的变化自动调整控制器参数，自动地去适应不同的运行条件。在电力系统中，自适应控制特别适用于那些参数随时间或运行条件改变的场合，自适应控制器能够实时调整保证系统在不同工况下均保持高性能。

模糊逻辑控制是一种基于模糊集理论的智能控制策略，它模仿人类的决策过程，使用模糊语言变量和规则来描述控制逻辑。模糊控制适合处理那些难建模或具有不确定性的问题，在定义输入输出的模糊集合和隶属函数下，模糊控制器能够处理复杂非线性关系。在电力系统中，模糊逻辑控制在处理不确定的负荷变化、电压波动等场合上用处很大。

二、励磁系统优化设计

（一）设计目标与约束条件

在深入探讨超临界电厂励磁系统的优化设计时，首先需明确设计的目标与约束条件。励磁系统的优化设计寻找一组参数配置，使系统在各种运行条件下均能表现出优异的动态特性，同时降低能耗并延长设备寿命^[3]。

设计目标主要包括：（1）提高系统动态响应速度，减少过渡过程中的振荡；（2）增强系统稳定性，特别是在电网扰动或负荷变化时；（3）减少励磁调节器的损耗，提高整体效率，这些目标需在满足特定的物理和电气约束条件下实现。

（二）选择优化算法

选择合适的优化算法是实现上述目标的关键步骤，在励磁系统设计中，可以采用遗传算法（GA），遗传算法有全局搜索能力，适合处理非线性、多变量的问题。遗传算法通过模拟自然选择的过程，迭代地改进解集，直至找到最优或近似最优解。优化算法关系到设计过程的效率与成果的精度，复杂的励磁系统必须基于计算机的智能优化算法。

（三）参数优化

基于选定的优化算法，所以要对励磁系统的各个关键参数，如比例积分微分（PID）控制器的增益系数、励磁机时间常数等，进行反复迭代微调。这一过程需要大量的计算模拟，通过不断地试错修正，最终将得到一组既能满足系统稳定性要求，又能达到最优性能指标的参数集合。

三、性能分析与评估

（一）励磁系统稳定性分析

励磁系统的稳定性是衡量其能否在各种运行条件下保持系统电压恒定、防止振荡和失稳的关键指标，关联到超临界发电厂乃至整个电力网络的安全。稳定性分析通常涉及两个主要方面：静

态稳定性和动态稳定性。

静态稳定性关注的是系统在受到小幅度扰动后恢复到原平衡状态的能力，这一分析依赖励磁系统的静态增益以及系统的开环传递函数。在励磁控制回路中，可以通过 Nyquist 图或 Bode 图来直观地评估系统的静态稳定性。如果系统的 Nyquist 图不穿越 $(-1, j0)$ 点，且具有足够的相位裕度和增益裕度，那么就可以认为系统在静态条件下是稳定的^[4]。

动态稳定性则是系统对较大扰动的响应，动态稳定性分析及系统的小信号模型，通过线性化系统在工作点附近的动态行为，可以得到系统的状态空间模型。利用特征根分析或 Lyapunov 第二方法，可以判断系统是否能够在动态扰动下保持稳定，即所有特征根的实部是否小于零^[5]。

为了确保励磁系统的稳定性，还需要考虑励磁机的惯性、延迟效应，以及励磁调节器的参数。励磁机的惯性会延缓励磁电流的变化，而调节器的参数（如 PID 增益）则影响到系统的响应速度^[6]。

（二）系统动态响应特性

当转向系统动态响应特性的分析时，实际上是在考察励磁系统在不同工况下，如何迅速而准确地响应外部刺激。动态响应特性包括上升时间、峰值时间、超调量和调节时间等指标，指标反映了系统在扰动作用下，从初始状态过渡到新的稳态所需的时间和过程中的振荡程度^[7]。

在励磁系统中，动态响应特性的好坏会影响发电机端电压的稳定性和电力系统的整体可靠性。上升时间和调节时间过长可能导致电压波动过大，影响用户设备的正常运行；而超调量过大则可能引起系统的振荡，甚至导致失稳。因此，为了优化动态响应

特性，励磁系统的调节器设计必须兼顾快速响应和抑制振荡的双重目标^[8]。

（三）电磁暂态过程仿真

电磁暂态过程仿真是通过数值计算方法模拟电力系统在发生快速变化事件（如短路、断路器操作或雷击）时的行为，这些仿真能够预测系统在极端条件下的响应，评估保护装置和控制策略的有效性以及验证系统设计的合理性^[9]。在仿真过程中，必须使用详细的电路模型和电机模型，考虑所有元件的电磁特性，包括电阻、电感、电容和非线性磁化曲线。PSCAD/EMTDC 或 MATLAB/Simulink 的仿真软件可以为研究人员提供强大的计算平台，通过求解微分代数方程组，再现系统的动态行为^[10]。

结语

在电力系统的运行环境中，励磁系统的性能分析是电网稳定的重要环节。励磁系统稳定性分析首先要进行静态稳定性和动态稳定性的考量，前者主要是测试系统对小扰动的恢复能力，后者则侧重于系统在大扰动后的响应。稳定性分析通过 Nyquist 图、Bode 图和特征根分析等方式，可以看到系统在各种条件下能维持电压稳定，避免振荡失稳。动态响应特性评估了系统对变动的反应速度，通过优化 PID 控制器参数和引入先进控制策略，提高了系统对电压波动的控制能力。电磁暂态过程仿真则模拟了系统在极端条件下的行为，研究出了故障期间的电压电流波形。因此，励磁系统的性能分析更依赖于实际的测试与仿真，如此才能达到最优的系统设计，使之运行状态达到巅峰。

参考文献

- [1] 朱振青. 励磁控制与电力系统稳定 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
- [2] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 吴光军. 同步发电机励磁控制研究 [J]. 电厂电站设备, 2002(4): 31235.
- [4] 黄耀群, 李兴源. 同步电机现代励磁系统及其控制 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.
- [5] 竺士章. 发电机励磁系统试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [6] 王志. 发电机励磁系统波动分析 [C] // 吉林省电机工程学会. 吉林省电机工程学会 2023 年学术年会获奖论文集. 大唐长春第三热电厂; , 2023: 5.
- [7] 朱春成, 陶荣. 一起励磁系统非线性电阻柜烧损事故分析 [J]. 电力安全技术, 2023, 25(09): 31-32+36.
- [8] 余伟. 励磁系统涉网试验中转子过电压保护动作分析与处理 [J]. 水电站机电技术, 2023, 46(09): 97-98.
- [9] 许超财, 刘祖国, 孙志军. 发电厂励磁系统故障分析与处理 [J]. 电工技术, 2023, (14): 123-125.
- [10] 马寅兴. 发电机励磁变压器状态监测系统研究 [D]. 西安理工大学, 2023.