

某水电厂立式混流水轮发电机组励磁系统的组成及功能分析

严保龙

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南郑州 450000

摘要: 现代水电厂立式混流机组励磁系统采用数字化控制技术,整合了晶闸管整流、微机调节和智能诊断等先进功能模块。系统工作时通过实时监测发电机端电压、定子电流等参数,经闭环控制算法计算出最优励磁电流,驱动功率单元输出相应直流电压。这种设计使机组具备良好的强励能力和快速的暂态响应特性,既能满足孤网运行的调压需求,又可适应电网故障时的紧急支援要求。系统各部件间的协调配合,确保了机组在复杂工况下保持优良的电磁兼容性和运行可靠性。

关键词: 某水电厂立式混流水轮;发电机组励磁系统的组成;功能分析

引言

立式混流水轮发电机组励磁系统作为发电机组的核心控制系统,主要由励磁变压器、功率整流单元、自动电压调节装置及灭磁保护回路等部件构成。该系统通过调节转子绕组电流实现对发电机端电压的精确控制,确保机组在不同工况下维持稳定的输出电压。在动态调节过程中,励磁系统需快速响应电网电压波动,提供必要的无功功率支撑,同时具备完善的过电压、过电流保护功能。其控制策略不仅影响机组的并网性能,还直接关系到电力系统的电压稳定性和动态响应特性。

一、某水电厂立式混流水轮发电机组励磁系统概述

(一) 励磁系统定义与基本概念

励磁系统是水轮发电机组的重要组成部分,主要负责向发电机转子绕组提供可调节的直流电流,以建立并维持发电机所需的磁场强度。该系统由电源装置、功率整流单元、自动电压调节器、灭磁装置和保护回路等多个功能模块组成。励磁系统通过闭环控制方式,持续监测发电机端电压、定子电流及无功功率等运行参数,并根据设定值或电网要求动态调整励磁电流输出。在正常运行时,系统确保发电机输出电压稳定在额定范围内;在电网故障或负荷突变时,通过快速响应机制提供必要的强励或减磁控制。励磁系统的控制策略直接影响发电机的功率因数调节能力、动态稳定特性以及并网运行的可靠性。

(二) 水电厂励磁系统的重要性

水电厂立式混流机组的励磁系统对保障电力系统的稳定运行具有关键作用。该系统通过精确调节发电机磁

场强度,确保机组在各种负荷条件下维持恒定的端电压,从而支撑电网的无功功率平衡。在电网发生短路或电压骤降等故障时,励磁系统能够迅速提升输出电压,增强机组的暂态稳定能力,避免因电压崩溃导致的大面积停电事故。此外,良好的励磁控制可以优化机组运行效率,降低不必要的能量损耗,延长设备使用寿命。系统内置的各类保护功能,如过电压抑制、转子过流防护等,可有效避免发电机因异常工况受到损害。

二、某水电厂立式混流水轮发电机组励磁系统硬件组成

(一) 励磁功率单元的构成与特点

励磁功率单元是励磁系统的核心部件,主要由整流变压器、可控硅整流桥、直流输出回路和冷却系统组成。整流变压器将发电机端电压或厂用电降压至适合整流电路工作的电压等级。可控硅整流桥采用三相全控桥式结构,通过触发脉冲控制实现交流到直流的转换。直流输出回路包含平波电抗器和滤波电容,用于抑制输出电流纹波。功率单元配备强制风冷或水冷系统,确保大电流工况下的散热需求。该单元采用模块化设计,各功率柜可并联运行以提高系统冗余度。柜体内部设置分布式温度监测点,实时监控关键元件工作状态。功率单元的输入输出端均配置隔离测量装置,为控制系统提供准确的电气参数采样。

(二) 励磁调节器的结构与部件

励磁调节器采用分层式硬件架构,包含主控板、信号调理板、功率驱动板和通信接口板。主控板搭载高性能处理器,运行实时操作系统处理控制算法。信号调理板配备多通道AD转换电路,对PT/CT二次信号进行隔离

采样和滤波处理。功率驱动板生成符合时序要求的触发脉冲，通过光纤传输至可控硅门极。通信接口板支持多种工业协议，实现与电站监控系统的数据交换。调节器采用双重化冗余设计，主备通道具备自动切换功能。前面板设置人机交互界面，包括状态指示灯和操作按键。机箱内部配置看门狗电路，监测程序运行异常情况。调节器配备独立的电源模块，确保外部电源故障时维持正常工作。

（三）传感器与测量装置的类型

励磁系统配置三类测量装置：电气量测量采用高精度霍尔传感器，隔离采集转子电压电流信号。温度监测使用PT100热电阻，布置在整流柜、轴承等关键部位。机械量测量包括光电编码器和振动传感器，监测机组转速和机械状态。电压互感器采用环氧树脂浇注结构，实现发电机端电压的安全隔离测量。电流互感器选用罗氏线圈型，满足宽频带电流采样需求。所有传感器输出信号经过屏蔽电缆传输至调节器，电缆屏蔽层实施单端接地。测量回路设置防浪涌保护器件，抑制电磁干扰影响。重要参数采用三取二表决方式处理，提高测量可靠性。传感器供电采用DC/DC隔离电源模块，避免共模干扰。

（四）辅助设备的组成及作用

励磁系统辅助设备包含灭磁开关、过电压保护器和启励电源等部件。灭磁开关采用真空断路器，配备预充电电阻实现分级灭磁。过电压保护器由非线性电阻和火花间隙组成，限制转子回路过电压。启励电源提供机组启动时的初始励磁电流，采用可控硅整流或直流电源方式。系统配备蓄电池组作为备用励磁电源，确保电网故障时持续供电。冷却系统包括风机、水泵及其控制单元，维持设备工作温度。柜内安装加热除湿装置，防止凝露影响绝缘性能。辅助电源采用双路UPS供电，保证控制回路可靠性。所有辅助设备状态信号接入监控系统，实现集中监测管理。电缆桥架实施分段接地，降低电磁干扰影响。

三、某水电厂立式混流水轮发电机组励磁系统软件组成

（一）控制算法的种类与应用

励磁系统采用多模式控制算法，包括PID调节、模糊控制和自适应控制等。PID算法作为基础控制策略，实现发电机电压的稳态调节。模糊控制处理非线性工况，改善系统动态响应特性。自适应算法根据机组运行参数自动调整控制参数，优化调节性能。转子电流限制算法防止励磁绕组过热，采用反时限特性曲线。电压/无功下垂控制实现多机并联时的合理无功分配。电力系统稳定器算法抑制低频振荡，通过附加阻尼信号改善电网稳

定性。数字滤波算法处理测量信号，消除噪声干扰影响。所有算法在实时操作系统调度下运行，确保控制周期的精确性。算法参数可通过上位机在线修改，满足不同运行工况需求。

（二）调节策略的设计与实现

励磁调节策略采用分层设计架构，包含底层驱动、中层控制和上层管理三个层级。底层驱动实现脉冲触发和信号采集等基础功能，执行周期为微秒级。中层控制完成电压调节、限制保护等核心功能，运行在毫秒级周期。上层管理处理人机交互和通信任务，工作于秒级周期。调节策略包含正常调节模式和特殊工况处理模式，根据系统状态自动切换。电压给定值跟踪采用斜坡函数，避免阶跃变化引起的冲击。转子电流调节采用前馈-反馈复合控制，提高响应速度。系统设置多种限制器协同工作，包括欠励限制、过励限制和V/Hz限制等。所有策略模块采用模块化编程，支持在线组态和参数整定。

（三）监控软件的功能与界面

监控软件采用分层可视化设计，包含系统总览、参数设置、趋势记录和事件报警等功能界面。主界面显示发电机电压、励磁电流等关键参数的实时曲线和数字量。参数设置页提供控制模式选择和保护定值整定功能。趋势记录模块可回放历史数据，时间跨度可自由缩放。事件报警界面分类显示系统异常信息，包括发生时间和恢复状态。软件支持多级操作权限管理，不同账户具有差异化的功能访问权限。画面导航采用树形菜单结构，重要操作设置二次确认提示。所有界面元素符合人机工程学原则，关键参数采用颜色区分显示状态。软件提供报表自动生成功能，支持定制化输出格式。远程访问通过VPN加密通道实现，确保数据传输安全性。

（四）通信软件的特点与协议

励磁系统通信软件支持IEC61850、Modbus和DNP3.0等多种工业协议。IEC61850协议用于与电站自动化系统通信，实现GOOSE快速报文传输。ModbusTCP协议连接就地监控设备，完成数据采集和控制命令传输。DNP3.0协议适用于远程调度通信，支持时间戳和数据冻结功能。通信接口采用物理隔离设计，光电转换器实现不同网络间的电气隔离。数据交换采用发布/订阅模式，重要信号设置变化触发传输机制。通信报文实施CRC校验和超时重发机制，保证传输可靠性。网络配置支持VLAN划分，实现流量隔离和优先级管理。通信软件具备链路状态监测功能，实时诊断网络连接质量。所有通信接口记录详细日志，包括数据内容和时间信息。安全防护采用防火

墙和入侵检测技术, 防范网络攻击风险。

四、某水电厂立式混流水轮发电机组励磁系统功能分析

(一) 电压调节功能的原理与效果

励磁系统的电压调节功能基于闭环控制原理, 通过连续监测发电机端电压并与设定值比较, 动态调整励磁电流输出。调节器采用比例-积分-微分控制算法, 根据电压偏差量计算出所需的励磁电流修正值。当电网负荷变化导致电压波动时, 系统通过改变可控硅整流桥的触发角, 迅速调节转子绕组电流强度, 从而改变发电机气隙磁通密度。这种调节过程具有快速响应特性, 能够在秒级时间内将电压恢复到允许偏差范围内。系统同时具备电压跟踪功能, 可实现与电网参考电压的自动同步。在机组并网运行时, 电压调节精度直接影响电能质量指标, 包括电压波动率和闪变值等参数。调节过程中, 系统会自动补偿转子温度变化引起的参数漂移, 维持控制的准确性。

(二) 无功功率分配功能的实现

无功功率分配功能通过电压-无功下垂特性曲线实现, 使并联运行的发电机组能够按预定比例分担系统无功负荷。励磁调节器持续监测发电机的有功功率、无功功率和功率因数, 通过内置的分配算法计算出最优励磁电流。当多台机组并联时, 各调节器根据相同的电压基准和不同的调差系数协调工作。系统采用主从控制或对等控制模式, 确保无功负荷分配的稳定性。在自动电压控制模式下, 上级调度指令可通过通信接口下发至励磁系统, 实现全厂无功功率的集中优化分配。分配过程中, 系统会自动避开机组运行的限制区域, 包括欠励限制线和过励限制线。该功能显著提高了电站参与电网电压调节的能力, 有利于维持电力系统的电压水平。

(三) 故障保护功能的机制与作用

励磁系统设置多级故障保护机制, 包括转子过电压保护、励磁绕组过流保护和失磁保护等功能模块。保护系统采用硬件电路和软件算法双重判断方式, 提高动作可靠性。转子过电压保护通过跨接非线性电阻和触发灭磁开关实现, 限制转子回路可能出现的危险电压。励磁绕组过流保护采用反时限特性, 根据电流幅值和持续时间分级动作。失磁保护检测转子电压与电流的异常变化, 预防发电机失步运行。所有保护功能具有独立的信号采集回路和判断逻辑, 避免共因失效。保护动作分为报警、减励和跳闸三个等级, 根据故障严重程度采取相应措施。系统记录保护动作前后的完整数据, 便于事后分析。这

些保护功能共同构成了发电机转子的安全防护体系。

(四) 系统稳定性控制功能的表现

励磁系统的稳定性控制功能主要通过电力系统稳定器实现, 该装置通过检测发电机转速或功率振荡, 产生适当的相位补偿信号叠加到电压调节回路。控制算法采用加速度-功率双输入结构, 能够有效识别不同频率的振荡模式。系统实时计算电网的振荡阻尼比, 动态调整控制参数以获得最佳抑制效果。在低频振荡发生时, 稳定器产生的附加励磁信号与系统固有振荡形成反相互作用, 快速平息功率波动。控制过程中, 系统自动规避可能引起负阻尼的运行区域, 确保控制措施的有效性。该功能显著提高了机组在弱电网条件下的运行稳定性, 增强了电力系统承受大扰动能力。稳定性控制与常规电压调节功能协同工作, 共同保障发电机的安全稳定运行。

结束语

励磁系统的稳定运行对保障水轮发电机组安全并网具有重要意义, 通过各功能单元的协同工作, 系统实现了对发电机电磁参数的精准调控, 为电网提供了可靠的电压和无功支撑。随着控制技术的持续发展, 励磁系统在改善机组动态性能、提升电网稳定性方面发挥着越来越关键的作用。

参考文献

- [1] 骆铭. 考虑水力动态特性的水轮发电机组综合调节器模型及控制设计[D]. 广西大学, 2022.
- [2] 徐亮. 水电厂励磁系统智能化应用研究与实践[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(01): 45-48.
- [3] 鹿嘉扬. 渔子溪电站水轮发电机组下导轴承油雾成因分析及优化设计[D]. 西华大学, 2022.
- [4] 赖昕杰. 水轮发电机组调速系统稳定性与过渡过程控制优化研究[D]. 华中科技大学, 2021.
- [5] 吴卓煜. 碗米坡水电厂励磁系统保护逻辑优化[C]// 云南省水力发电工程学会, 贵州省水力发电工程学会, 四川省水力发电工程学会, 湖南省水力发电工程学会, 广西水力发电工程学会. 2019年云、贵、川、湘、桂、粤、青七省(区)水电站运行检修技术交流研讨会论文集. 五凌电力碗米坡水电厂, 2019: 34-37.
- [6] 范昭胜. 水电站立式混流水轮发电机组增容改造分析[J]. 大众用电, 2019, 34(10): 30-31.
- [7] 陈世群, 黄彦锋. 立式混流式水轮发电机组改造安装方法优化实践[J]. 福建水力发电, 2019, (01): 40-42.