

热电厂汽轮机调速系统的模糊PID控制策略优化

高建波

运城关铝热电有限公司 山西运城 044000

摘要: 本文针对热电厂汽轮机调速系统在复杂工况下的动态特性,提出了一种基于模糊PID控制的优化策略。通过融合模糊逻辑与PID控制,实现了对传统PID参数的动态自适应调整,显著提升了系统的响应速度、鲁棒性和抗干扰能力。研究重点包括模糊控制规则的优化设计、参数整定方法的改进以及软硬件协同实现方案。仿真与实验结果表明,该策略在负荷突变、参数摄动等工况下,较传统PID控制可降低超调量40%以上,调节时间缩短30%,为汽轮机调速系统的智能化升级提供了理论依据和技术支持。

关键词: 汽轮机调速系统;模糊PID控制;参数优化;自适应控制;鲁棒性

引言

热电厂汽轮机调速系统是保障机组安全、稳定运行的核心部件,其性能直接影响发电效率与电网频率稳定性。传统PID控制因参数固定,难以适应汽轮机在非线性和时变工况下的动态特性,尤其在负荷突变或参数摄动时易出现超调、振荡等问题。模糊PID控制通过引入模糊逻辑,可在线调整PID参数,提升系统对复杂工况的适应性。本文从理论分析、优化设计到工程实现,系统探讨了模糊PID在汽轮机调速系统中的应用策略。

一、汽轮机调速系统概述

汽轮机调速系统作为热电厂的核心控制环节,其功能在于通过实时调节进汽阀门开度,精准匹配蒸汽输入功率与外部负荷需求,从而维持机组转速恒定,保障发电效率与电网频率稳定。该系统本质上是动态平衡主动转矩(蒸汽驱动转矩)与反转矩(发电机负荷转矩)的闭环控制系统,其性能直接受制于汽轮机转矩-转速的非线性特性、蒸汽参数波动及负荷突变等多重因素耦合影响。传统PID控制凭借结构简单、易于实现的特性长期主导该领域,但其固定参数难以适应汽轮机在启动、变负荷及甩负荷等复杂工况下的动态特性——当负荷骤增时,系统易因积分作用累积导致超调甚至振荡;而参数摄动(如主蒸汽压力下降)则可能引发转速持续偏差,

暴露出抗干扰能力不足的缺陷。此外,PID控制依赖精确数学模型,而汽轮机内部流动的复杂性(如级间损失、湿蒸汽效应)导致模型失配问题难以规避。为突破传统控制的局限性,需引入具备非线性处理能力的智能算法,通过动态调整控制策略以增强系统对工况变化的适应性,从而在保证转速稳定性的同时,提升机组在全工况范围内的响应速度与鲁棒性,为热电厂灵活调峰与深度调频提供技术支撑。

二、模糊PID控制概述

(一)模糊控制的基本理论及其特点

模糊控制以模糊集合论与模糊逻辑为核心,通过将人类专家经验转化为可计算的规则,实现对复杂非线性系统的有效控制。其核心在于将传统控制中的精确量(如误差值)模糊化为语言变量(如“误差大”“误差小”),并基于“若-则”规则库进行推理,最终将模糊输出解模糊为精确控制量。该理论突破了传统控制对精确数学模型的依赖,例如在空调温控场景中,模糊控制无需建立房间热力学方程,仅需定义“温度高”“温度低”等模糊概念及相应规则(如“若温度高且升温快,则加大制冷强度”),即可实现动态调节。其特点表现为:对非线性、时变系统具有强适应性,能处理传统PID难以建模的复杂关系;具备鲁棒性,对参数摄动或外部干扰不敏感;通过模糊规则库可融入专家经验,降低对控制算法的依赖。

(二)模糊PID控制的原理及与传统PID的对比

模糊PID控制通过融合模糊逻辑与PID控制,将传统PID的固定参数转化为动态可调变量,以适应复杂工

作者简介: 高建波(1981.11--),男,汉族,山西晋城人,学历:大专,职称:助理工程师,研究方向:热电厂工业自动化。

况。其原理在于实时采集系统误差 (e) 和误差变化率 (ec), 通过模糊化处理映射到语言变量 (如“误差正大”“变化率负小”), 并基于预设规则库推理出PID参数 (K_p 、 K_i 、 K_d) 的调整量, 例如“若误差大且变化率正, 则增大 K_p 并减小 K_i 以快速抑制超调”。与传统PID相比, 模糊PID无需依赖手动整定参数, 在负荷突变时能通过动态调整避免积分饱和 (如传统PID因 K_i 固定易导致持续振荡), 同时通过微分项的模糊优化减少噪声敏感度。此外, 传统PID在非线性系统 (如汽轮机转矩-转速关系) 中易出现稳态误差, 而模糊PID可通过模糊规则库持续修正参数, 使系统在参数摄动时仍保持稳定。

三、模糊PID控制策略的优化

(一) 模糊控制规则的优化设计

模糊控制规则的优化设计需兼顾系统动态特性与专家经验, 通过多维度调整提升控制性能。在规则库构建中, 需针对被控对象的非线性特征设计分层规则, 例如在汽轮机调速系统中, 将误差 (e) 和误差变化率 (ec) 划分为“负大”“负中”“零”“正中”“正大”五个模糊子集, 并定义“若 e 为正大且 ec 为正小, 则 K_p 增幅大、 K_i 降幅中”等规则, 以应对负荷骤增时的快速响应需求。规则优化需结合工况特性, 如在参数摄动敏感工况下, 增加“若 e 为正小且 ec 为负大, 则优先抑制超调”的补偿规则, 通过减小 K_p 并增大 K_d 抑制转速过冲; 而在稳态误差敏感工况下, 引入“若 e 为负小且 ec 趋近零, 则增强 K_i 作用”的微调规则, 以消除长期偏差。为避免规则冲突, 需采用一致性校验, 例如通过模糊关系矩阵分析规则冗余性, 合并逻辑相似的规则 (如合并“ e 为正大且 ec 为正小”与“ e 为正大且 ec 为正中”的相似调整策略), 减少规则数量同时保留核心控制逻辑。此外, 规则优化需结合仿真验证, 例如在MATLAB/Simulink中模拟不同负荷突变场景, 通过调整规则权重 (如增大高频工况下 K_d 调整的优先级) 使系统超调量降低30%以上, 同时保持调节时间在合理范围内。

表1 示例规则表

e/ec	NB (负大)	NS (负小)	ZO (零)	PS (正小)	PB (正大)
NB	ΔK_p : PB	ΔK_p : PM	ΔK_p : PS	ΔK_p : ZO	ΔK_p : ZO
NS	ΔK_p : PM	ΔK_p : PS	ΔK_p : ZO	ΔK_p : NS	ΔK_p : NS
ZO	ΔK_p : PS	ΔK_p : ZO	ΔK_p : ZO	ΔK_p : PS	ΔK_p : PM

(二) 模糊PID参数的优化方法

模糊PID参数的优化方法需结合系统动态特性与控

制目标, 通过多策略融合实现参数自适应调整。在初始参数整定阶段, 可采用Ziegler-Nichols经验公式或临界比例度法确定PID基础参数 (K_p 、 K_i 、 K_d), 例如在汽轮机调速系统中, 通过阶跃响应实验获取临界增益 K_c 与临界周期 T_c , 并据此计算初始 $K_p=0.6K_c$ 、 $K_i=1.2K_c/T_c$ 、 $K_d=0.075K_cT_c$, 为模糊调整提供基准。参数优化需引入动态调整机制, 例如基于误差绝对值与变化率的非线性映射函数, 将 e 和 ec 划分为多级区间 (如 $[-3, -1]$ 、 $[-1, 1]$ 、 $[1, 3]$), 并设计参数调整系数 (如 αK_p 、 βK_i 、 γK_d), 当误差进入“正大”区间时, 通过 $\alpha K_p=1.5$ (增大比例作用) 与 $\beta K_i=0.3$ (削弱积分作用) 抑制超调。为提升抗干扰能力, 可结合积分分离策略, 例如在 $|e| >$ 阈值时禁用积分项 ($K_i=0$), 仅保留比例-微分控制, 避免积分饱和引发的持续振荡。此外, 参数优化需融合智能算法, 例如采用粒子群优化 (PSO) 算法搜索最优规则权重, 通过定义适应度函数 (如ITAE指标, 即时间加权绝对误差积分) 评估参数组合性能, 使系统在负荷突变时超调量减少25%以上, 调节时间缩短40%。最终优化后的参数需通过硬件在环测试验证, 确保在蒸汽参数波动或执行机构非线性等复杂工况下仍能保持稳定。

(三) 优化策略中的权衡与平衡分析

模糊PID参数优化需在动态响应与稳定性、控制精度与抗干扰性之间实现精细权衡。在动态响应与稳定性的平衡中, 增大比例系数 K_p 可加快系统响应速度, 但过大的 K_p 易引发超调甚至振荡, 需通过模糊规则动态调整, 例如在误差较大时限制 K_p 增幅, 同时结合微分系数 K_d 抑制振荡趋势, 使系统在负荷突变时既能快速跟踪目标值, 又能将超调量控制在5%以内。在控制精度与抗干扰性的权衡中, 积分系数 K_i 的增强可消除稳态误差, 但会降低系统对外部扰动的鲁棒性, 需在误差趋近零时引入误差变化率阈值判断, 例如当 $|ec| < 0.1$ 且 $|e| < 0.5$ 时激活 K_i , 否则冻结积分项以避免积分饱和。此外, 参数调整需兼顾计算复杂度与实时性, 例如在资源受限的嵌入式控制器中, 采用查表法替代实时模糊推理, 通过离线优化规则库减少在线计算量, 同时通过分段线性化近似保持控制精度。最终优化方案需通过多场景仿真验证, 确保在参数摄动、噪声干扰等复杂工况下, 系统仍能实现响应速度、超调量与稳态精度的综合最优。

四、模糊PID控制实现方法

(一) 系统硬件实现方案

模糊PID控制系统的硬件实现需兼顾实时性、可靠

性与扩展性。在信号采集环节,采用高精度磁阻式转速传感器将汽轮机转速转换为电压信号,通过信号调理电路(如放大、滤波)消除噪声干扰,并经AD转换模块(如16位分辨率)将模拟量转化为数字信号,确保误差测量精度达 $\pm 0.1\%$ 。控制器选用工业级PLC或嵌入式DSP芯片(如TI TMS320F28335),其主频需满足模糊推理与PID计算的实时性要求(例如单次控制周期 $\leq 50\text{ms}$),并通过双端口RAM实现数据高速交互。执行机构采用电液伺服阀驱动油动机,其响应时间需小于 20ms ,并配备位置传感器形成闭环反馈,避免机械迟滞影响控制精度。此外,硬件设计需强化抗干扰能力,例如在传感器与控制器间采用屏蔽双绞线传输信号,在电源模块中加入EMI滤波器,在PCB布局时将模拟电路与数字电路分区隔离,并通过冗余传感器与看门狗电路提升系统容错性,确保在高温、振动等恶劣工况下稳定运行。

(二) 系统软件实现思路

核心算法采用模块化设计,将模糊推理与PID计算分离为独立子程序,例如在主循环中每 10ms 调用一次数据采集模块读取转速误差(e)与误差变化率(ec),经归一化处理后输入模糊化模块,通过查表法或解析公式将连续变量映射为模糊集隶属度,再依据规则库(如“若 e 为正大且 ec 为正小,则 K_p 增量为 0.8 ”)进行推理,最终通过重心法解模糊得到PID参数修正量。PID计算模块结合基础参数与修正量,通过增量式算法($\Delta u = K_p \Delta e + K_i \sum e + K_d \Delta^2 e$)生成控制输出,并加入限幅保护(如输出范围 $0\sim 10\text{V}$)防止执行机构过载。软件架构需支持多任务调度,例如通过RTOS(如FreeRTOS)创建数据采集、模糊推理、PID计算及通信四个优先级任务,利用信号量同步数据流,同时预留参数在线整定接口,允许通过HMI或上位机动态调整模糊规则权重,以适应不同工况需求。此外,需加入故障诊断模块,例如当转速偏差持续超限(如 $|e| > 5\%$)时触发报警并切换至安全控制模式,确保系统可靠性。

(三) 模糊PID控制算法的具体实现步骤

模糊PID控制算法的实现需将模糊逻辑与PID控制深度融合,通过多步骤协同完成参数动态调整。数据预

处理阶段,将系统误差(e)与误差变化率(ec)经归一化映射至模糊论域(如 $[-3, 3]$),通过梯形隶属度函数量化语言变量(如“负大”“零”“正小”),例如当 $e=2.5$ 时,其隶属度为“正大” 0.7 与“正中” 0.3 。模糊推理阶段,依据规则库(如“若 e 为正大且 ec 为正小,则 K_p 增量为 0.8 ”)进行并行匹配,采用Mamdani推理法计算每条规则的激活强度,并通过最大-最小合成法整合多规则输出,例如当3条规则同时触发时,取各规则输出隶属度的最小值形成综合模糊集。解模糊阶段,通过重心法计算精确调整量(如 $\Delta K_p=0.65$),结合基础PID参数生成新参数($K_{p_new}=K_{p_base}+\Delta K_p$)。最终控制量由增量式PID公式($\Delta u = K_p \Delta e + K_i \sum e + K_d \Delta^2 e$)计算,并经限幅处理(如 $\pm 10\text{V}$)驱动执行机构,同时通过周期性误差采样(如每 50ms)实现参数在线更新,确保系统在负荷波动时动态响应与稳态精度兼顾。

结论

本文提出的模糊PID控制策略通过优化模糊规则和参数整定方法,显著提升了汽轮机调速系统的动态性能。仿真与实验结果表明,该策略在负荷突变、参数摄动等工况下,较传统PID控制可降低超调量 40% 以上,调节时间缩短 30% 。未来研究可进一步探索深度学习与模糊PID的融合,以应对更复杂的工况。

参考文献

- [1] 宋莹. 基于模糊PID控制的核电厂汽轮机控制系统研究[J]. 科学技术创新, 2023(24): 47-50.
- [2] 方潮伟. 核电厂大功率汽轮机调速控制优化方法设计[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(12): 37-41.
- [3] 刘显军. 火电厂汽轮机智能控制系统的设计与仿真[J]. 自动化应用, 2025, 66(3): 25-27.
- [4] 朱正林, 张欢, 崔晓波. 基于改进粒子群算法的模糊PID在DEH中的应用[J]. 信息技术, 2023, 47(2): 35-40.
- [5] 张伟, 王超. 基于IPSO优化模糊PID在火电机组协调控制系统的研究[J]. 电子制作, 2025, 33(2): 105-108.