

# 火电机组变负荷工况下汽温精准控制策略

王威威

华电库车发电有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.19007

**[摘要]** 新能源大规模并网背景下,火电机组需承担调峰调频任务,变负荷运行成为常态。此工况下,机组燃烧、烟气流量等参数剧烈波动,使主汽温、再热汽温(统称“汽温”)控制难度剧增,易出现超温、欠温问题,影响运行安全与经济性。本研究针对核心难点,提出含控制算法优化、受热面优化等的多维度精准控制方案,引入模型预测控制与模糊PID复合算法,结合吹灰优化等辅助手段。仿真与现场验证表明,该策略可有效降低汽温波动,提升响应速度,为机组灵活安全经济运行提供支撑。

**[关键词]** 火电机组; 变负荷工况; 汽温控制

中图分类号: TM31 文献标识码: A

## Precise steam temperature control strategy for thermal power units under variable load conditions

Weiwei Wang

Huadian Kuche Power Generation Co., Ltd.

**[Abstract]** Under the background of large-scale grid connection of new energy sources, thermal power units need to undertake peak shaving and frequency regulation tasks, and variable load operation has become the norm. Under this condition, the unit combustion, flue gas flow and other parameters fluctuate drastically, which greatly increases the difficulty of controlling the main steam temperature and reheat steam temperature (collectively referred to as "steam temperature"), and easily leads to over-temperature and under-temperature problems, affecting operational safety and economy. This study proposes a multi-dimensional precision control scheme that includes control algorithm optimization and heating surface optimization to address the core difficulties. It introduces a composite algorithm of model predictive control and fuzzy PID, combined with auxiliary means such as soot blowing optimization. Simulation and field verification show that this strategy can effectively reduce steam temperature fluctuations, improve response speed, and provide support for the flexible, safe and economical operation of the unit.

**[Key words]** thermal power unit; variable load condition; steam temperature control

## 引言

“双碳”目标下新能源电力爆发式增长,其间歇性特征迫使火电机组承担调峰调频任务,频繁变负荷运行成为常态。汽温是机组核心运行参数,需严格控制偏差,但变负荷工况下燃烧、汽水系统参数剧烈波动,导致汽温控制呈现强耦合、大滞后等特性,传统控制难以适配。因此,本研究探讨在变负荷工况下汽温精准控制策略,对保障机组安全经济运行、助力新能源消纳作参考。

### 1 火电机组变负荷工况下汽温动态特性与控制难点

#### 1.1 本研究变负荷工况下汽温动态特性分析

火电机组的汽温形成过程涉及燃烧、换热、汽水流动等多个复杂环节,在变负荷工况下,这些环节的参数相互耦合、动态变化,导致汽温呈现出独特的动态特性。

从负荷变化对汽温的影响机制来看,当机组负荷升高时,为满足功率需求,燃料量与送风量同步增加,炉膛燃烧强度提升,烟气温度与烟气流量显著增大,使得过热器、再热器受热面的换热量增加,汽温随之上升。而负荷升高会导致蒸汽流量增加,汽水流动速度加快,对受热面的冷却效果增强,又会在一定程度上抑制汽温的上升幅度。这两种作用相互叠加,使得汽温的变化呈现出非线性特征。此外,受热面的蓄热效应会导致汽温的变化滞后于负荷的变化,滞后时间通常在数十秒至数分钟之间,且负荷变化速率越快,滞后现象越明显。

当机组负荷降低时,燃料量与送风量减少,炉膛燃烧强度减弱,烟气温度与流量下降,受热面换热量减少,汽温趋于下降<sup>[1]</sup>。此时蒸汽流量减少,汽水流动速度减慢,冷却效果减弱,

对汽温下降有一定的抑制作用。与负荷升高过程类似,汽温变化同样存在滞后性与非线性,且在低负荷区间,由于炉膛温度较低、烟气流量小,受热面换热效率的波动更为显著,汽温的稳定性更差。此外,变负荷工况下,过热器与再热器之间、不同受热面区域之间存在热耦合现象。例如,主汽温的变化会通过蒸汽流量的调整间接影响再热汽温,同时调节烟气挡板,改变过热器与再热器的烟气分配量,导致两者汽温相互干扰。这种耦合特性进一步增加了汽温控制的复杂性。

### 1.2 本研究变负荷工况下汽温控制难点

结合上述动态特性分析,变负荷工况下汽温控制主要面临以下四大难点:

一是大滞后特性导致控制响应不及时。如前所述,负荷变化对汽温的影响存在显著的滞后,传统PID控制基于当前汽温偏差进行调节,难以提前预判汽温的变化趋势,容易出现调节滞后、超调等问题。例如,当机组快速升负荷时,汽温尚未明显上升,但此时受热面已积累大量热量,若未能及时提前调节减温水流量,待汽温上升后再加大减水量,极易导致汽温超调。

二是非线性特性导致控制参数适配性差。变负荷工况下,汽温控制对象的增益、时间常数等参数会随负荷变化而显著变化,呈现出强非线性。传统PID控制采用固定的比例、积分、微分参数,难以适应不同负荷区间的特性变化,在高负荷区间可能出现调节不足,在低负荷区间则可能出现调节过度,无法实现全负荷范围内的精准控制。

三是多变量耦合导致控制相互干扰。汽温控制涉及燃料量、送风量、减温水流量、烟气挡板开度等多个控制变量,各变量之间存在复杂的耦合关系。例如,调节减温水流量控制主汽温时,会改变进入再热器的蒸汽温度与流量,进而影响再热汽温;调节烟气挡板开度时,会同步改变过热器与再热器的烟气换热强度,导致两者汽温同步变化。这种耦合干扰使得单一变量的调节难以达到预期效果,容易引发汽温的波动。

四是外部扰动因素多且不确定。变负荷工况下,机组不仅要应对负荷变化本身的影响,还需承受燃料热值波动、给水温度变化、环境温度变化、受热面积灰结渣等外部扰动。这些扰动因素具有随机性与不确定性,会进一步加剧汽温的波动,增加控制难度。例如,燃料热值突然升高会导致炉膛燃烧强度骤增,即使负荷未变,也会引发汽温快速上升;受热面积灰会降低换热效率,导致汽温偏低,且积灰程度随运行时间动态变化,难以精准预判。

## 2 火电机组变负荷工况下汽温精准控制策略优化

### 2.1 本研究基于模糊PID与模型预测的复合控制算法

#### 2.1.1 本研究模糊PID控制优化

模糊PID控制通过模糊逻辑推理,根据汽温偏差与偏差变化率,实时调整PID控制器的比例系数( $K_p$ )、积分系数( $K_i$ )、微分系数( $K_d$ ),使控制参数能够自适应负荷变化带来的特性变化。具体实现过程如下:首先,确定模糊控制的输入量与输出量,输入量为汽温偏差 $e$ 与偏差变化率 $ec$ ,输出量为PID参数的修正量 $\Delta$

$K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$ ;其次,根据现场运行经验与仿真数据,建立模糊规则库,例如当 $e$ 较大且 $ec$ 较大时,应增大 $K_p$ 、减小 $K_i$ (避免积分饱和)、适当增大 $K_d$ ,以加快响应速度、抑制超调;最后,通过模糊推理与清晰化处理,将模糊输出量转化为精确的PID参数修正值,实时更新PID控制器的参数。本研究发现模糊PID控制能够有效改善PID控制在非线性工况下的适配性,但对于大滞后特性的应对能力仍有不足。因此,在模糊PID控制的基础上,引入模型预测控制(MPC),利用其提前预判的特性,补偿汽温控制的滞后性。

#### 2.1.2 本研究模型预测控制(MPC)的融合

MPC的核心思想是基于控制对象的数学模型,预测未来一段时间内汽温的变化趋势,根据预测结果优化控制策略,生成最优的控制序列。在变负荷工况下,首先建立汽温预测模型,该模型以负荷变化率、燃料量、送风量、减温水流量等为输入变量,以汽温为输出变量,通过现场运行数据训练得到,能够精准反映变负荷过程中汽温的动态变化规律<sup>[2]</sup>。

将MPC与模糊PID相结合,形成复合控制算法:MPC根据当前负荷变化趋势与控制变量,预测未来一段时间内的汽温值,若预测汽温将超出允许范围,则提前输出预调节信号,调整减温水流量或烟气挡板开度,提前干预汽温变化;模糊PID则根据实时汽温偏差与偏差变化率,对MPC的预调节信号进行修正,实现精准微调。这种复合控制算法既利用了MPC的提前预判能力,有效补偿了汽温控制的大滞后,又利用了模糊PID的自适应能力,应对了控制对象的非线性特性,显著提升了变负荷工况下汽温控制的响应速度与精准度。

#### 2.2 本研究多变量协同控制策略

##### 2.2.1 本研究主汽温与再热汽温协同控制

主汽温与再热汽温存在显著的耦合关系,传统的单回路独立控制容易导致两者相互干扰。因此,采用双回路协同控制结构,以主汽温与再热汽温为控制目标,以减温水流量(主汽减温水、再热减温水)、烟气挡板开度为控制变量,建立多变量预测模型,将主汽温与再热汽温的预测值同时纳入优化目标函数。目标函数不仅考虑主汽温与再热汽温的偏差,还引入两者的耦合惩罚项,避免单一变量调节对另一变量产生过大影响。通过模型预测优化,生成主汽减温水流量、再热减温水流量、烟气挡板开度的协同控制序列,实现主汽温与再热汽温的同步稳定控制<sup>[3]</sup>。

##### 2.2.2 本研究燃烧系统与汽水系统协同调节

负荷变化过程中,燃烧系统的燃料量、送风量调整是导致汽温变化的根源,因此,实现燃烧系统与汽水系统的协同调节,能够从源头抑制汽温的大幅波动。在变负荷指令下达后,协同控制器首先根据负荷变化率,计算出燃料量与送风量的最优调整速率与幅度,避免燃烧强度的剧烈变化;并且根据MPC预测的汽温变化趋势,提前调整减温水流量,实现燃烧系统与汽水系统的同步调节,减少汽温的波动。

#### 2.3 本研究受热面优化设计与运行维护

受热面的换热特性是影响汽温变化的关键因素,在变负荷

工况下,受热面积灰、结渣等问题会加剧汽温的波动。因此,通过受热面优化设计与精细化运行维护,改善受热面的换热稳定性,为汽温精准控制提供硬件支撑。

### 2.3.1 本研究受热面结构优化

针对变负荷工况下不同负荷区间的换热需求,优化过热器、再热器的受热面布置方式。例如,采用分级式受热面结构,将过热器分为低温、中温、高温三级,根据不同负荷下的烟气温度分布,合理分配各级受热面的面积,使各负荷区间的换热强度更加均匀;并在受热面管排之间设置扰流装置,增强烟气扰动,提升换热效率,减少换热死区。此外,采用耐腐蚀、耐磨的管材,降低高温烟气对受热面的侵蚀,延长受热面使用寿命,保证换热特性的稳定性。

### 2.3.2 本研究受热面吹灰优化

积灰是导致受热面换热效率下降的主要原因,传统的定期吹灰方式难以适应变负荷工况下积灰的动态变化,容易出现吹灰不及时或过度吹灰的问题。因此,提出基于汽温偏差与换热效率的自适应吹灰策略:通过在线监测受热面的进出口烟温差、汽温差,计算实时换热效率,结合汽温偏差,判断积灰程度;当换热效率低于设定阈值且汽温偏差低于下限时(表明积灰导致换热不足),启动吹灰装置;当换热效率恢复至正常范围或汽温偏差回到允许区间时,停止吹灰;并根据负荷变化情况,调整吹灰强度与频率,例如高负荷工况下,烟气流量大、积灰速度快,可适当提高吹灰频率;低负荷工况下,炉膛温度低,吹灰可能导致烟气温度骤降,应降低吹灰强度,避免汽温大幅波动。

### 2.4 本研究辅助控制措施

#### 2.4.1 本研究负荷前馈控制

变负荷指令是汽温变化的主要扰动源,因此在控制系统中引入负荷前馈通道,将负荷变化率作为前馈信号,提前调整控制变量<sup>[4]</sup>。例如,当接收到升负荷指令时,前馈控制器根据负荷变化率,提前增大减温水流量的预调节量,抑制因燃烧强度提升导致的汽温上升;当接收到降负荷指令时,提前减小减温水流量,避免汽温过度下降。负荷前馈控制能够有效补偿汽温控制的滞后性,减少负荷变化对汽温的冲击。

#### 2.4.2 本研究扰动补偿控制

针对燃料热值波动、给水温度变化等外部扰动,建立扰动监测与补偿机制。通过在线监测燃料热值、给水温度等参数,当发

现参数偏离设定值时,根据扰动对汽温的影响程度,计算补偿量,调整燃料量、送风量或减温水流量,抵消扰动对汽温的影响<sup>[5]</sup>。例如,当燃料热值升高时,适当减少燃料量的情况下,同步增大减温水流量,避免汽温因燃烧强度骤增而上升。

#### 2.4.3 本研究汽温偏差预警与容错控制

为保障机组运行安全,设置汽温偏差预警机制,当汽温偏差接近允许范围上限或下限时,发出预警信号,提醒运行人员关注;并引入容错控制策略,当某一控制设备出现故障时(如减温水调节阀、烟气挡板发生故障),系统能够自动检测故障类型与程度,切换至备用控制方案,例如当主汽减温水调节阀故障时,自动增大烟气挡板开度,通过调整烟气流量来控制汽温,确保汽温仍能维持在允许范围内。

## 3 结语

新能源大规模并网下,火电机组变负荷运行成常态,汽温精准控制关乎机组安全经济运行。本研究针对汽温控制大滞后、非线性等难点,从控制算法、多变量协同、受热面优化及辅助措施四维度,提出以模糊PID与模型预测复合算法为核心的策略。该策略有效提升控制响应与适配性,解决耦合干扰,经验证可稳定汽温、降低波动。未来融入人工智能与数字孪生技术,可进一步提升策略适应性,助力机组灵活运行。

### [参考文献]

- [1]郑伟,张其龙,郭俊海,等.基于自动控制模型的氧化风系节能改造[J].电力安全技术,2025,27(1):70-75.
- [2]郑来松,吴桂安,张俊新,等.燃气热水器负荷与风速自适应匹配的控制研究[C]//2024年中国家用电器技术大会论文集,2024(5).
- [3]张辉,颜星雨,毛建旭,等.面向源网荷的智能化数据协同推断技术研究综述[J].自动化学报,2025,51(11):2387-2411.
- [4]田济源,范帅,杨冬阳,等.考虑负荷静态电压特性的虚拟电厂精准调控方法[J].电工技术学报,2025,40(15):4770-4787.
- [5]王玮,徐颖,谢欣言.基于电热协同与能量平衡的供热机组快速变负荷控制策略[J].动力工程学报,2025,45(6):878-886.

### 作者简介:

王威威(1992--),男,汉族,河南睢县人,大学本科,助理工程师,研究方向:热控控制。