基于模型预测控制的火电厂主蒸汽温度优化

付旭[1]　丁建设[2]　潘军民[2]　周宇阳[2]　白强[2]　邱海[1]

（1.通用电气（中国）研究开发中心有限公司，上海　201203；2.通用电气新华控制工程有限公司，上海　200241）

主蒸汽温度是火力发电厂热力系统中的重要参数，主蒸汽温度控制品质的优劣直接影响到整个机组的安全和经济运行。主蒸汽温度过高会缩短过热器、汽轮机等部件的使用寿命，长期超温还会导致过热器爆管等；主蒸汽温度过低，则会降低机组的循环热效率，一般蒸汽温度每降低 5~10℃，效率约降低 1%。

从系统外部来看，主蒸汽温度受扰动因素比较多，扰动量大而且扰动频繁；从系统内部来看，主蒸汽温度被控对象具有大迟延、大惯性、时变性等特点，这些都增加了主蒸汽温度控制的难度。常规的机组控制方案结合前馈补偿、串级等控制策略，采用基于 PID 线性控制算法的多个单入单出反馈控制回路组成的分散控制结构，没有完全考虑上述问题，有时需要运行人员大量的手工操作和监督控制，机组运行参数偏离经济指标较大，造成一定的能量损失，增加了设备故障率，影响机组的经济效益和安全可靠运行。为了解决常规控制系统应用中存在的问题，通用电气（GE）新华控制工程有限公司与通用电气（GE）全球研发中心共同研究开发了模型预测控制技术并应用到主蒸汽温度控制中，在实际应用中取得了良好的效果。模型预测控制技术还可应用于机组的其他控制回路，如汽压负荷的协调控制等。

1　基于模型预测控制的主蒸汽温度优化方案

1.1　主蒸汽温度流程简图

主蒸汽温度的控制一般由喷水减温器完成，一般设置为二级喷水，每级减温器分左右两侧布置。图 1 给出了单级单侧的主蒸汽温度工艺流程简图。由图 1 可以看出，在主蒸汽温度的控制中，调节机构位于控制对象的前端，是一个典型的大延时控制对象；并且主蒸汽温度受到各种扰动的影响，尤其是锅炉的燃烧扰动。这些难题都使得传统 PID 控制对主蒸汽温度难以取得理想的的控制效果。

1.2　模型预测控制

模型预测控制是一种基于模型的闭环优化控制策略，其算法的核心是：建立可预测未来的动态模

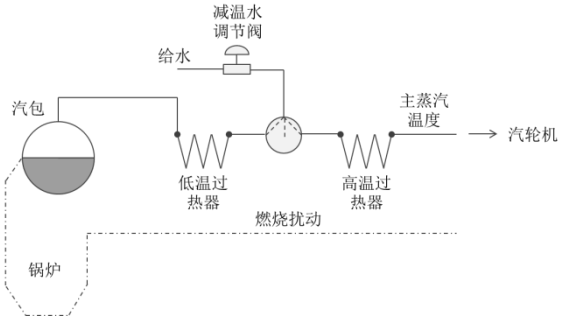


图 1　主蒸汽温度流程简图

型，在线反复优化计算并滚动实施的控制作用和模型误差的反馈校正。模型预测有三个基本要素：①预测模型：预测模型是指一类能够显式地拟合被控系统的特性的动态模型；②滚动优化：滚动优化是指在每个采样周期都基于系统的当前状态及预测模型，按照给定的有限时域目标函数优化过程性能，找出最优控制序列，并将该序列的第一个元素施加给被控对象；

③反馈校正：反馈校正用于补偿模型预测误差和其他扰动。

一个准确合理的预测模型是模型预测控制的基础，本项目采用粒子群优化算法，结合现场的历史数据，构建主蒸汽温度对象的多输入模型。模型的输入包括：减温水的阀门开度和，可以测量到的对主蒸汽温度有影响的扰动变量，如：过热器入口温度，蒸汽压力等。控制系统的结构如图 2 所示。

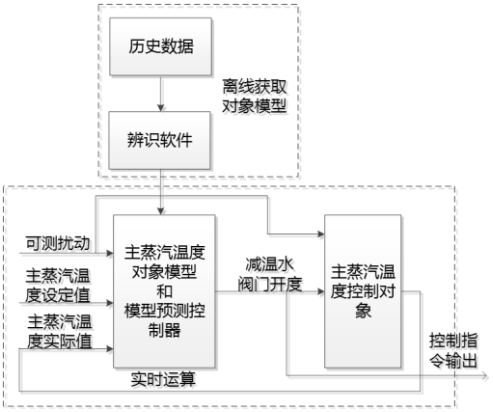


图 2　基于模型预测控制的主蒸汽温度控制

这些算法已集成到 GE 新华控制工程有限公司的优化控制系统 IntelliMax 产品中，并分别在 180MW，350MW，600MW 机组的火电厂的主蒸汽温度控制中得到了成功的应用。

1.3　关键设备描述

IntelliMax 是 GE 新华控制工程有限公司开发的火电厂优化控制产品，包括：AGC 负荷优化、汽压优化、汽温优化、NOx 排放优化、吹灰优化等多个功能模块。IntelliMax 优化控制系统由软件和硬件两部分构成。软件的核心是模型辨识、模型预测控制、模糊控制等各种先进控制算法；硬件系统的实物及通信架构如图3所示。该系统不仅兼容于GE新华控制工程有限公司现有的OC4000, OC6000e 的 DCS 产品，还可与其他公司的 DCS 进行数据交互，在不改变现有控制系统的同时，可方便地对现有的控制系统进行升级优化。

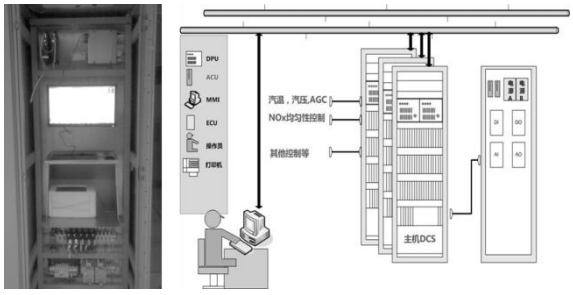


图 3　IntelliMax 优化控制系统及通信结构

2　成果案例

2.1　控制指标

根据国家通用标准和规范，主蒸汽温度控制的品质要求为：对于 300MW 以下机组，稳态品质指标：±2℃；AGC 负荷跟随试验动态品质指标：±10℃。对于 300MW 及以上机组：稳态品质指标：±3℃； AGC 负荷跟随试验动态品质指标：±10℃。

2.2　实际控制效果

本技术在内蒙古上都发电有限责任公司 3#、4#两台 600MW 机组中得到了成功的实际应用。

项目实施前，该机组使用的是 FOXBORO 的 DCS 控制系统。根据电厂反馈，原有的控制系统难于投入自动控制，需较多的人为干预；从实际控制效果看，当 AGC 负荷变化时，超温较多，最大偏差可达 30℃；如图 4 所示。

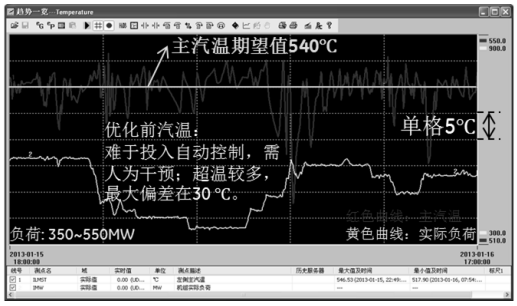


图 4　优化前，主蒸汽温度控制效果

（2013 年 01 月 15 日数据，1 天）

根据项目要求，采用 GE 新华控制工程有限公司的 IntelliMax 产品对主蒸汽温度进行优化。基于模型预测控制的算法投入后，主蒸汽温度控制效果明显改善：在负荷稳定时，控制精度在±2.5℃；在 AGC 负荷变化时，控制精度在±5℃，改善目标非常明显；如图 5 所示。

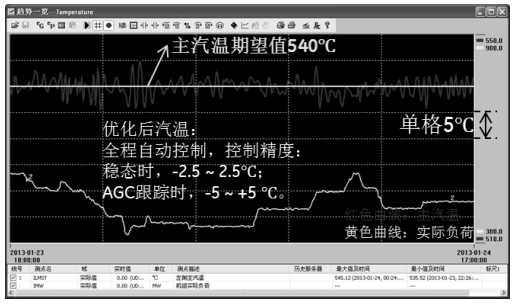


图 5　优化后，主蒸汽温度控制效果

（2013 年 01 月 23 日数据，1 天）

根据现场数据，系统运行半年后，仍能达到良好的控制效果；如图 6 所示。

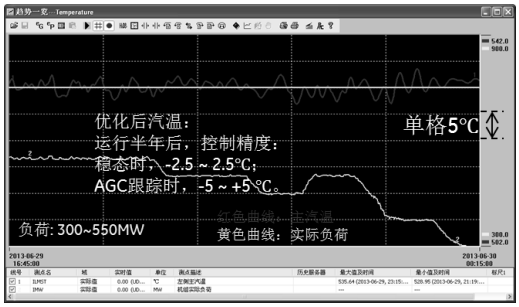


图 6　优化运行半年后，主蒸汽温度控制效果

（2013 年 06 月 29 日数据，8h）