1 000 MW燃煤机组的协调控制技术优化研究

文/刘　旺　谢　军　侍述成
国能寿光发电有限责任公司

摘要：对国产1 000 MW机组协调优化进行研究，结合国产锅炉燃烧特性，优化中间点温度和控制策略，采用先进的预测控制、自适应控制等先进控制理念，经过现场实际应用，效果显著，各项参数均有大幅提高，且机组性能达到山东电网AGCR模式投运条件，为其他同类型电厂提供参考。

关键词：协调；预测控制；优化；控制；锅炉

寿光电厂2号机组为国产1000 MW超超临界机组，锅炉为东方锅炉厂制造的π形炉，原设计中间点温度采用分离器出口温度，但实际运行中，此温度点存在过热度不足的缺陷。控制策略采用“前馈+PID反馈”的常规调节方案，随着机组工况和煤种的变化，机组被控对象非线性和时变性的特征越来越明显，过程的滞后和惯性时间也变得越来越长，而山东电网AGCR模式要求的负荷响应综合考评系数达到1.6以上，进一步提高了协调控制的性能指标。

原协调控制缺点

1. 中间点温度性能不佳

此机组控制策略中用于衡量快速干预燃水比的中间点为分离器出口温度，但其过热度不良，不能将燃水比进行有效且稳定的调整，导致主汽温的调节性能不佳，串级调节控制中，一、二级减温水作为前馈量介入过多易导致调节发散，目前国内有同类型机组进行过优化，选取了屏过入口温度作为中间点，但此点受过热器一级减温水影响较大，效果并不理想。

2. 原DCS控制策略存在的问题

原DCS控制策略采用了传统的负荷指令“前馈+PID反馈”的调节方案，其核心思路在于尽可能减小反馈调节的作用，使其只作为小幅度的微调，整个控制回路定成开环调节的方式，这种方案对前馈量的参数要求非常严格，其精度必须得到保障。然而，面对煤种多变、机组控制及测量设备不精确、运行参数经常与设计参数存在较大偏差的国内机组，其控制效果显然跟不上现场实际要求。尽管是有大量的BIR回路，但是由于机组工况和煤种的变化，机组被控对象的动态特性已变得越来越差，过程的滞后和惯性已变得越来越大，对象非线性和时变性的特征也越来越明显。通过对现场运行情况的调研和归纳，主要体现在如下几个方面。

1）消除扰动能力差，易出现参数大幅波动及调节振荡情况。这是目前机组运行中最普遍出现的情况，机组在负荷大幅度波动、制粉系统起停、锅炉吹灰等扰动工况下，控制系统常会出现控制不稳定或温度、压力大幅偏离设定值的情况，严重影响运行安全性。

2）机组负荷升降速率低。常规的自动发电控制（AGC）方案，由于对大滞后被控对象无法找到有效的控制方法，机组负荷的升降速率仅在1%/min左右，机组的调峰、调频能力差，无法满足电网对机

组负荷的响应要求。

3）煤质变化对波动的影响较大。在燃煤品质变差时，控制系统缺乏自适应手段，控制性能也随之变差。运行人员为保证机组安全，只能采用很低的变负荷率运行。

4）正常AGC调节中，协调模式下，燃料主控、给水主控等控制量波动大。机组正常AGC运行中，由于AGC指令的频繁反复变化（平均1～2 min变化一次），使得机组的燃料、给水、送风等各控制量也大幅来回波动，此时虽然主汽压力、温度等被控参数较为稳定，但会造成炉内四管受到较大冲击，在机组长周期运行过程中存在安全隐患。

5）再热烟气挡板难以自动投入，机组运行经济性差。超（超）临界机组的再热汽温通常采用“喷水减温+烟气挡板”的调节手段，但由于烟气挡板对再热汽温的滞后很大（控制对象时间常数达十几分钟），采用DCS常规控制方案基本无法投入烟气挡板的自动控制。运行人员只能以再热喷水减温为控制手段来调节，机组运行经济性明显受到影响。

综合上述的几个方面，常规的采用负荷指令“前馈+PID反馈”的协调控制方案，已很难协调好控制系统快速性和稳定性之间的矛盾。近年来，预测控制、自适应控制以及神经网络等先进控制手段已越来越多地应用于工业现场，西门子公司推出的新协调控制系统PROFI，可根据锅炉的非线性模型（神经网络模型）及预测控制技术，对锅炉的热能进行预测，从而提前动作给煤量，有效补偿锅炉的惯性，确保机组具有快速的负荷响应速度和平稳的压力变化，这是一种很好的解决问题的思路，但PROFI的价格十分昂贵。

优化后协调控制特点

1. 中间点温度优化

找到一个最优的中间点温度，这直接关系到过热汽温的调节质量，通过改变中间点温度，可迅速作用到燃水比，进而可以快速调节主蒸汽温度，大大提升了主蒸汽温度的响应速度。原设计中间点温度采用分离器出口温度，但实际运行中，此温度点过热度不足，作为调节中间点效果很不理想。国内现有的优化手段中，主要分为两种：一是采用屏过入口温度作为中间点温度，但此点受过热器一级减温水影响较大，很难达到稳定的效果；另一种是采用低温过热器入口温度作为中间点，从目前实际应用来看，取得了良好效果。

经过对机组运行参数的长期观察和各方调研，最终认为低温过热器入口温度更适合作为中间点进行调节。此参数点既能保证足够的过热度，准确反映燃水比特性，又不受减温水的干扰，避免调节结果的发散。

2. 优化后的控制策略特点

为解决常规协调控制策略中的各类问题，此次协调控制优化就是在借鉴PROFI的控制思想及实现方式的基础上，综合应用预测控制、自适应控制、状态变量控制技术及相位补偿技术等先进控制理念，结合现场实际运行历史趋势，制定出最佳的控制策略，具有以下几个特点：

1）在整体的控制策略方面仍然为“前馈＋PID反馈”方案，其核心为预测控制技术，保持闭环控制系统的基本控制回路，但与常规DCS策略不同的是，其在反馈控制部分应用了目前国际上最前沿的解决大滞后对象控制问题的预测控制技术，取代了原有的PID控制。采用这种技术能够提前预测被调量（如主汽压力、汽温等参数）的未来变化趋势，而后根据被调量的未来变化量进行控制，有效提前调节过程，从而大幅提高了机组AGC系统的闭环稳定性和抗扰动能力。

2）采用了系统自学习的模式，对机组运行的性能参数进行全工况实时校正。常规DCS的控制回路整定完毕后，其控制参数不会再优化改变，对于未来的工况的改变无法及时做出响应；优化后的控制系统采用竞争型的神经网络学习算法来实时校正机组运行中与控制系统密切相关的各种特性参数（包括燃料热值、汽耗率、机组滑压曲线、中间点温度设定曲线、制粉系统惯性时间等），并根据这些特性参数实时计算AGC系统的前馈和反馈回路中的各项控制参数，使系统时刻处于自学习的状态，并且使系统各性能参数不断地趋于最优。

3）对AGC运行模式进行了特别优化。常规DCS方案对于机组运行在CCS方式还是AGC是不加区分的，优化后的控制系统中包含AGC运行模式下的特别优化模块：采用智能预测算法，一方面根据机组当前AGC指令、实发功率、电网频率等参数实

时预测调度EMSAGC指令在未来时刻的变化趋势；另一方面根据机组的燃料量、风量、给水流量等参数实时预测表征锅炉做功能力的锅炉热功率信号在未来时刻的变化值，并依据这两者间的匹配程度来修正锅炉指令的变化量。实际应用表明，增加AGC模式特别优化模块后，可在保证AGC负荷响应的基础上，使机组燃料量、风量、给水流量、减温水流量的波动幅度减小60%以上，对于延长锅炉管材寿命、减少爆管极为有利。

4）再热汽温控制系统的优化采用了大滞后控制技术。优化后的控制先将自适应SMITH控制技术、状态变量控制技术及相位补偿技术融于一体，对再热汽温被控对象的大滞后特性进行动态补偿，有效减小补偿后再热汽温广义被控对象的滞后性和惯性，而后以广义预测控制器作为反馈调节器，以模糊智能控制作为控制系统的前馈，通过对多种大滞后控制策略的有效组合，成功地实现了以烟气挡板调节为主、事故喷水调节为辅的再热汽温自动控制，有效减少了再热汽温的喷水流量，取得了明显的经济效益。

5）采用独立的硬件平台，调试效率、安全性和升级能力明显提升。优化后的控制系统在具体实现上选用西门子S7系列PLC为硬件平台，通过Modbus通信方式作为一个扩展DPU融入DCS中。DCS原有控制逻辑完全保留，仅增加少量切换逻辑，运行人员可以方便地在DCS和优化后的控制系统间进行无扰切换。对于该扩展部分控制逻辑的调试、修改不影响机组的正常运行，极大地提高了优化控制系统的调试效率和机组运行的安全性，也为今后新技术的应用升级打下了良好的基础。

优化后的协调控制策略如图1所示。

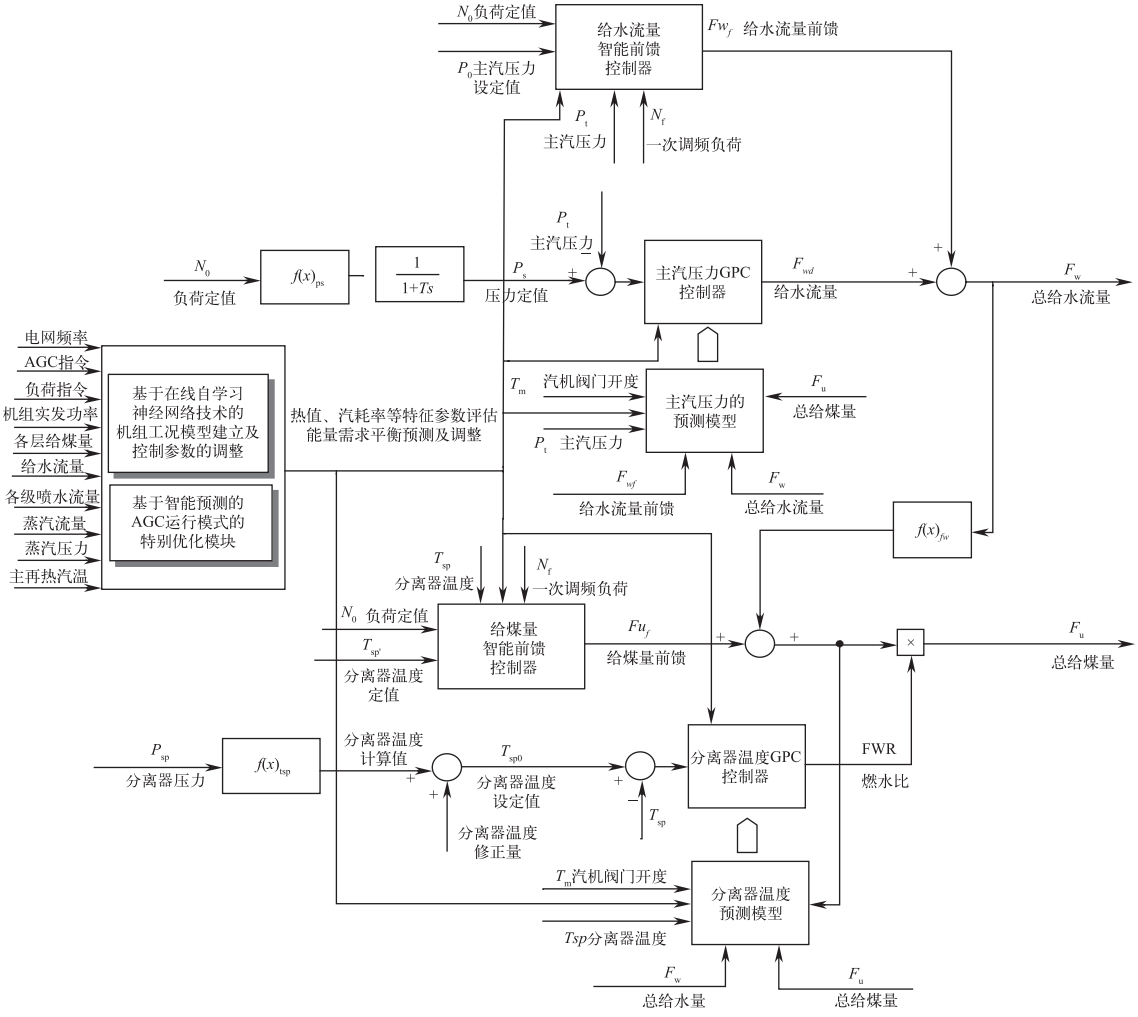

图1　优化后的协调控制策略

优化前后效果

1. 优化前控制效果

负荷控制性能不理想，准确度较差，满足不了电网两个细则的要求，综合K_p值约为1.3左右，无法满足电网AGC-R模式的投入要求。主汽压力的波动大，主再热汽温控制性能不佳。具体如图2所示。

图2　原DCS协调控制时主要参数曲线

2. 优化后控制效果

完成协调控制优化后，AGC-R模式下负荷控制性能大幅提高，变负荷时动态过程平稳，无振荡，过调量很小，实际速率、响应延迟时间、动态控制偏差和稳态控制准确度均满足要求。AGC综合考核系数K_p＞2.5，其中k_1为1.2，k_2≥1.25，k_3≥1.7，远超山东电网规定的1.6门槛值。

其他性能参数优良，主汽压力稳定，变负荷试验的平均动态偏差仅为0.3～0.4 MPa，在负荷稳定时的稳态偏差小于±0.1 MPa，且整体控制非常稳定，无任何调节振荡现象。主再热汽温控制性能极佳，在数次大幅度的变负荷试验中，主汽温动态偏差仅为1～2 ℃/－3～4 ℃，且绝大部分时间主汽温仅存在±1.0 ℃的偏差，再热汽温能控制在±5 ℃范围内，控制非常平稳。具体如图3、图4所示。

图3　高负荷段变负荷试验参数曲线

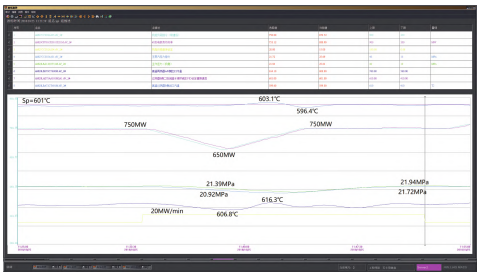

图4　低负荷段变负荷试验参数曲线

结束语

优化后的协调控制系统性能优良，综合考核系数K_p＞2.5，远超山东电网规定的1.6门槛值，具备投用AGC-R模式水平，且负荷、主汽压和主再热汽温控制性能优良，同时将锅炉壁温超温引入控制策略，综合兼顾了机组运行的经济性、稳定性和安全性，极大提高了百万机组协调控制性能。EA

参考文献

[1] 火力发电厂热工自动化系统可靠性评估技术导则：DLT 261—2012[S].

[2] 张铁军，吕剑虹，华志刚．机炉协调系统的模糊增益调度预测控制[J]．中国电机工程学报，2005，25(4)：158-165.

[3] 杨戈，吕剑虹，刘志远．一种新型RBF网络序贯学习算法[J]．中国科学（E辑），2004，34(7)：763-775.

[4] 吴波，吴科，吕剑虹．一种补偿递归模糊神经网络及其学习算法[J]．中国科学（F辑），2009，39(7)：694-703.

[5] KWU LPSC Technology Center．PROFI Unit Coordinated Control System[R]．Siemens AG，2000.

[6] 陈敏，徐翊霞．1 000 MW超超临界机组协调优化控制策略及应用[J]．自动化仪表，2014，35(6)：50-53.

[7] 赵志丹，顾涛，陈志刚，等．超临界600 MW机组协调控制的优化[J]．热力发电，2014，43(2)：40-42.

[8] 郎金洲．超临界600 MW机组协调控制的优化[J]．城市建设理论研究，2016，6(8)：6675-6676.