

# 滑压、凝结水控制技术及协调控制系统优化策略

林伟波, 罗颖坚

(中国能源建设集团广东电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 随着我国电力供需矛盾逐渐趋向缓和, 发电机组年利用小时数逐年减少, 长期处于低负荷运行状态, 造成发电机组热经济性不断降低, 无法满足国家节能降耗, 提高生产率的需求。针对低负荷运行发电机组进行滑压优化, 对基于最佳阀点的滑压控制技术优化方案进行研究, 并采用加快主汽压力响应及凝结水节流技术的协调控制系统优化策略, 不仅提高了发电机组在低负荷状态下的运行效率, 也保证了机组在变负荷过程中, 能够及时快速响应负荷变化的要求。研究表明, 基于最佳阀点的滑压控制技术及其协调控制系统优化策略能有效提高低负荷运行工况下的机组运行效率及控制品质, 可以在国内其它发电机组进行推广应用。

**关键词:** 滑压运行; 协调控制; 最佳阀点; 热耗率; 凝结水节流

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0053-05

## Optimization Strategy of Sliding Pressure, Condensated Water Control and Coordinated Control System

LIN Weibo, LUO Yingjian

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** As the contradiction between power supply and demand of our country gradually easing, annual utilization hours of generating units decreasing year by year, running in low load condition for a long time, it has been caused the unit thermal economy continue to decrease, unable to meet our country's need for energy saving and improving productivity. This paper concentrated on optimization of sliding pressure for low load operation generating units. The optimization scheme of sliding pressure control technology based on optimum valve-point was studied. The optimization strategy accelerating the response of main steam pressure and the throttling technique of condensed water is adopted in CCS that can not only improve the operation efficiency of the generating unit under low load condition, but also ensure the unit to promptly and rapidly respond the load change requirement during the variable load process. The result of this study shows that the optimization strategy of sliding pressure control technology based on optimum valve-point and the coordinated control system can effectively improve the operation efficiency and control quality of the unit under low load operation condition, and can be popularized and applied in other generating units in china.

**Key words:** sliding pressure operation; coordinated control; optimum valve-point; heat rate; condensed water throttling

近年来, 随着我国经济的发展及能源结构的调整, 电力生产和需求发生较大的变化, 昼夜用电和夏冬用电需求的差别, 导致电网负荷峰谷相差越来越大, 600 MW 以上的大容量机组也需要参与进行

电网调峰<sup>[1]</sup>。随着我国电力供需矛盾逐渐趋向缓和, 各发电机组年利用小时数逐年减少, 部分机组长期处于低负荷运行状态, 由于偏离了设计工况, 造成机组热经济性降低。因此, 如何提高机组低负荷运行的经济性已逐渐成为是各方探讨的焦点问题<sup>[2-3]</sup>。在确保机组安全、稳定运行的前提下, 使机组更加有效提高发电效率, 保持最佳运行工况, 有效降低供电煤耗是关系每家发电企业发展及存亡的现实要求。影响机组运行经济性的多个主要因素

收稿日期: 2017-06-05

作者简介: 林伟波(1982), 男, 广东揭阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事发电厂热工自动化设计工作(e-mail) linweibo@gedi.com.cn.

中,只有运行方式是可人为进行调整的,因此,研究发电机组变负荷运行时不同运行方式的特点对运行经济性的影响,以此来提高机组在低负荷运行状态下的经济性,对各发电机组节能降耗具有重要意义。本文介绍了滑压控制技术及协调控制系统(CCS)优化策略,在得到兼顾经济性和可控性的滑压曲线之后,提出对滑压曲线的在线实时修正方法,并在此基础上进行控制技术及管理策略优化。

## 1 滑压优化原理

目前,我国主要的发电机组基本上采用定-滑-定的复合滑压运行方式<sup>[4]</sup>,即当机组带正常运行负荷时,主蒸汽压力不随负荷变化,而是保持额定值,当机组带部分负荷时进行滑压运行,当机组负荷下降到一定程度时,又保持最低压力运行,这种复合运行方式可显著提高机组整体的经济性。确定机组运行的滑压曲线,并根据实际工况采取优化工作,是本文的关键。实际上,机组初始滑压曲线一般由汽轮机制造厂提供,与实际运行工况的最优滑压曲线存在一定的偏差,该偏差就是优化的空间,可通过测试的方法寻找出满足机组实际运行工况的最优滑压曲线,并由控制系统按照最优的滑压曲线控制机组运行,提高机组的运行效率。

在热力系统运行状态及运行参数不变的前提下,机组负荷与主蒸汽流量成正比,而主蒸汽流量与主蒸汽压力和高压调阀的开度成正比,对于同一机组负荷,当主蒸汽压力变大,高压调阀开度相应变小;反之,当主蒸汽压力变小,高压调阀开度相应变大。在相同的机组负荷前提下,采用较大的高压调阀开度将对机组运行带来如下影响:一方面,主汽调阀开度变大,引起主蒸汽压力降低,机组热循环效率下降;另一方面,高压主汽调阀节流损失减少,有利于提升高压缸效率。因此,存在着某一高压主汽调阀开度,使机组的运行效率达到最高。寻找机组最优滑压曲线可认为是寻找各负荷下主蒸汽压力与高压主汽调阀开度之间的最优匹配关系,并确定机组运行过程中最佳的滑压阀位。

然而,实际最优的滑压曲线不仅与机组运行负荷有关,而且与环境参数、汽轮机真空值及回热抽汽量等因素有关。如不考虑其它因素的影响,仅环境温度变化就对最优运行主蒸汽压力的影响可达2

MPa以上。在夏、冬季,回热抽汽量或工业供热用的抽汽量差别较大,也会对最优滑压曲线造成影响,根据机组发电功率计算的主蒸汽压力控制将更加偏离目标值。因此,对滑压曲线的优化,还必须考虑各种运行工况下,由于外部条件影响,导致滑压曲线的动态修正。

## 2 滑压曲线的确定

目前,国内常用确定机组运行滑压曲线方法有三种:第一种方法是以机组负荷为基准进行滑压试验,这种试验方法要求在各负荷点上,根据经验或设计的滑压运行曲线,选择多个不同的主蒸汽压力进行试验,测算出不同的主蒸汽压力所对应的机组热耗率,热耗率最小的则为最优压力,依次测算出不同负荷下的主蒸汽压力及相应的机组热耗率,选择对应最小热耗率的主蒸汽压力组成最优的滑压曲线。第二种方法是以阀点为基准<sup>[5]</sup>,认为负荷相同时热耗率最低点只会出现在阀点位置上,通过比较不同阀点的热耗率,得到机组运行的最优滑压曲线。文献[6]采用了第三种方法,提出了联合使用负荷与阀点基准的概念,在机组负荷范围内寻找最优主蒸汽压力,得到机组运行的最优滑压曲线。该方法认为在某些负荷点,高压调阀有3种不同的运行方式:较高汽压的二阀点滑压运行方式、较低汽压的三阀点滑压运行方式和汽压适中的复合滑压运行方式。热耗率最低点不一定只出现在阀点位置上。无论以上哪种试验方式,最终可以得到适应各机组的最优滑压曲线(图1)。本文主要针对以阀点为基准得到的最优滑压曲线来进行控制技术描述。

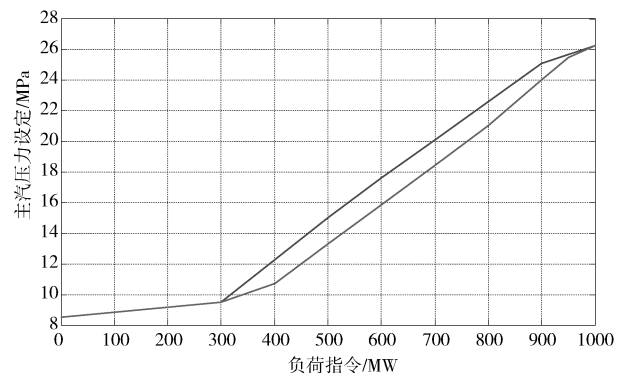


图1 机组运行滑压曲线

Fig. 1 Unit operation sliding pressure curve

发电机组滑压运行状态一般可分为:四阀、三

阀、二阀的滑压运行, 在汽轮机热耗特性已知的情  
况下, 主汽压力由高压主汽调阀的开度决定。所以  
寻找一定负荷下最优的主蒸汽压力可转化为寻找最  
佳的滑压阀点, 与传统方法以最佳的主汽压力进行  
寻优相比, 该方法的寻优对象更加形象和明确。可  
以通过确定最佳的滑压阀点, 并根据机组的汽耗率  
来不断修正滑压压力设定值。为了实现在不同工况  
下机组均能以最佳的主汽压力运行来提高机组的运  
行效率, 本文提出了一个闭环控制回路, 该回路以  
最佳滑压阀点为控制目标。此方法能够使主汽调阀  
的阀位不会落在各调阀的重叠位置, 进一步保证了  
控制的稳定性, 同时, 可以优化阀门流量特性修正  
曲线和阀门重叠度来减少主汽调阀的节流损失, 更  
好地提高机组效率。

通过实际测试来确定机组的最佳滑压阀点, 根  
据滑压原理, 滑压曲线就是最优的效率曲线, 也就  
是说, 当机组运行在最优滑压曲线上, 其热耗率是  
最低的, 所以, 须进行不同机组负荷、不同工艺参  
数下的热耗率测试, 最终得到所有热耗率最低的点  
汇集成机组特定工况下的最优滑压曲线。

### 3 滑压控制技术优化

有了特定工况下的最优滑压曲线, 便可以针对  
滑压曲线进行控制技术及策略优化, 首先, 结合前  
面的测试结果, 以最佳滑压阀点作为目标值, 考虑  
到负荷指令的变化有可能引起阀点的变化, 为了防  
止不同阀点目标值来回波动, 须为不同阀点设置一  
定的缓冲区。

其次, 须考虑机组汽耗率对机组最优的滑压曲  
线影响, 根据影响自动修正滑压设定值, 获得不同  
汽耗率下的最优滑压阀点。机组的抽汽量和汽轮机  
的真空值是比较容易在线测量且影响较大的两个因  
素, 必须将这两个因素对主汽压力的修正量作为前  
馈叠加到主控系统中进行粗调, 并对前馈信号进行  
滤波处理, 以避免对 CCS 系统造成较大的扰动,  
影响控制效果。

再次, 对阀位控制回路参与精细调节增加限定  
条件, 判断主汽压力控制偏差幅度应比较小(例如  
小于 0.2 MPa), 以及机组不处在变负荷过程中,  
阀位控制回路才参与进行精调, 防止由于在变负荷  
过程中或压力控制偏差太大, 造成不同阀点之间产  
生漂移而进行的不必要调整。

最后, 对控制输出量进行动态高、低限幅, 避  
免叠加控制输出量后的压力设定值超过高、低限而  
出现控制饱和的不灵敏区, 影响控制效果。

综上所述, 通过以最佳滑压阀点作为控制目  
标, 设计了闭环 PID 控制回路, 通过在线调整主汽  
压力设定值偏置量, 限定参与调节条件, 减少前馈  
信号干扰, 最终实现机组在不同工况下仍然能够以  
最佳的主汽压力运行, 保证机组持续的最优控制和  
节能效果。图 2 所示是滑压控制策略优化方案图。

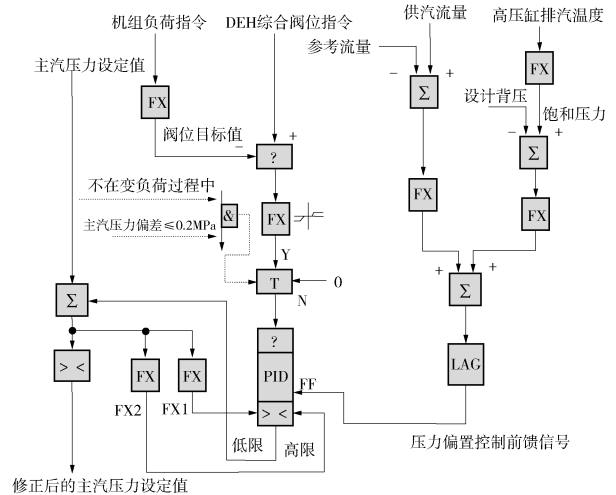


图 2 滑压控制策略优化方案图

Fig. 2 Sliding pressure control strategy optimization scheme

### 4 CCS 系统优化策略

#### 4.1 加快主汽压力响应

控制输出量叠加到主汽压力设定值, 对 CCS  
系统来说是一个不小扰动, 势必引起锅炉的燃料波  
动, 除了造成 CCS 系统不稳定外, 还会引起锅炉  
燃烧不稳, 降低了锅炉的燃烧效率。为减少对锅炉  
的扰动, 除了对阀点闭环控制回路进行一定的优化  
处理外, 还需要对 CCS 系统进行优化, 降低压力  
设定值变化对锅炉的扰动量。锅炉对主汽压力调整  
的响应相比汽轮机通过主汽调阀调整的响应慢很多,  
是一个大迟延环节。用汽轮机主汽调阀来调整  
主汽压力, 能够达到快速改变主汽压力, 使汽轮机  
主汽调阀平稳落在最佳阀位处, 从而减少对锅炉的  
扰动量。将主汽压力设定值进行微分和限幅后, 前  
馈到主控系统中, 并叠加到负荷设定值上, 利用汽  
轮机来消纳锅炉的蓄热, 从而快速改变主汽压力,  
以避免锅炉不必要的燃料动作。

另外,在主控系统负荷指令设定值后补充延时环节,该环节的延长时间须根据锅炉响应特性进行在线跟随调整,从而保证汽机与锅炉的协调控制,避免由于两者参数不匹配出现的控制不稳定。图3所示是加快主汽压力响应优化方案图。

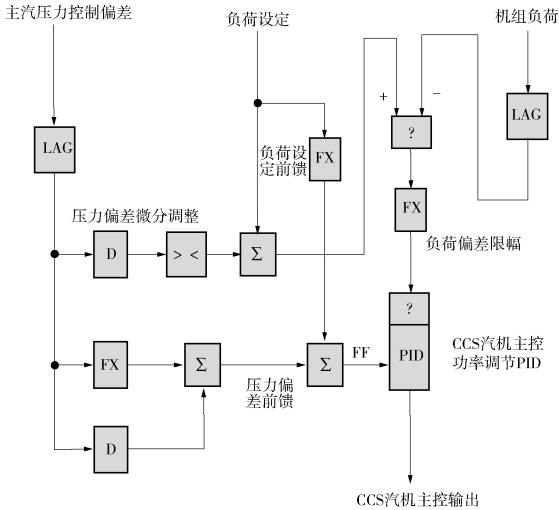


图3 加快主汽压力响应优化方案图

Fig. 3 Speeding up main steam pressure response optimization scheme

#### 4.2 凝结水节流技术

前面提到,采用较大的高压调阀开度进行滑压优化将使机组主蒸汽压力降低,主蒸汽压力的降低将直接导致锅炉蓄热能力的降低,在机组快速升负荷时,如果锅炉无足够的蓄能,将使得机组无法快速响应负荷指令。因此,在满足机组运行安全性、稳定性需求的前提下,实现机组的实时优化经济运行,提高负荷响应能力和品质,可采用凝结水节流技术<sup>[7-9]</sup>。

在机组快速升负荷时,通过调节变频凝结水泵频率或除氧器水位调节阀开度,以减少凝结水流量,也就是减少进入各低压加热器(低加)和除氧器的凝结水量,从而减少凝结水吸收的热量,排挤一部分抽汽回到低压缸做功,加快机组升负荷速率;反之,增加凝结水流量,也就增大低加和除氧器的抽汽量,从而快速降低机组负荷。机组变负荷过程完成后,通过较缓慢的速率来恢复凝结水流量及除氧器水位的控制,尽可能避免对机组负荷产生较大影响。采用凝结水节流技术,将对凝汽器水位、除氧器水位的控制精度和品质提出了更高的要求。

机组响应负荷指令的速率一般在汽轮机调节阀

大幅动作约10 s后下降,约150 s后燃料量的改变才能使主蒸汽压力恢复至预期目标值。这个阶段正是凝结水节流变负荷的时间段。一方面凝结水流量变化引起的负荷响应滞后10 s左右,另一方面凝结水流量的改变将影响汽水平衡,所以凝结水节流变负荷功能不适合长时间投运,启用时间需控制在3分钟之内。这样,凝结水变负荷技术恰好适合在机组升降负荷的瓶颈期(10~150 s)应用,从而有效地提高机组变负荷响应的速率,使机组得以深度挖掘节能运行潜力。

## 5 结论

滑压运行是发电机组低负荷运行状态下提高经济性经常采用的方式<sup>[10]</sup>。在近几年节能降耗政策的刺激下,大部分电厂已经通过各种办法寻找适合机组低负荷运行下的最优滑压曲线,提高了电厂在低负荷运行状态下的经济性。本文针对以阀点为基准得到的最优滑压曲线来进行控制技术及CCS系统控制优化,在满足机组运行安全性、稳定性的前提下,实现了机组的实时经济运行,并提高机组负荷响应能力和品质。

本文所述的深度滑压优化控制技术及CCS系统优化策略,在我院设计的多个广东沿海电厂得到了应用,节能效果及控制水平得到明显提高。在机组滑压曲线优化的前提下,即使真空值、抽汽量等工艺参数发生较大变化,机组也能始终保持在最佳滑压曲线上运行,确保了机组安全、经济运行。此外,为了提高机组协调控制的品质,实现主蒸汽压力快速、平稳过渡到最佳滑压曲线上,本文通过实施加快主汽压力响应及凝结水节流技术的控制策略,很好地解决了深度滑压优化过程中出现的种种问题,使发电机组维持在最佳滑压曲线上高效运行,又同时满足了快速响应机组负荷变化的要求。

#### 参考文献:

- [1] 王伟,徐婧,赵翔,等.中国煤电机组调峰运行现状分析[J].南方能源建设,2017,4(1):18-24.  
WANG W, XU J, ZHAO X, et al. Analysis on peak load regulation status quo for coal-fired power plants in china [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 18-24.
- [2] 赵伟光,刘明远,杨尚文,等.国产超临界600 MW汽轮机深化滑压运行试验研究[J].东北电力技术,2014,35(3):

- 13-17.
- ZHAO W G, LIU M Y, YANG S W, et al. Test study on deepen sliding pressure operation for domestic supercritical 600 MW steam turbine [J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(3): 13-17.
- [3] 张希富,王运民,师保平,等. 电厂汽轮机组变负荷运行安全经济性分析[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(6): 464-466.
- ZHANG X F, WANG Y M, SHI B P, et al. Safety and economic analysis on variable load operation of steam turbine unit in power plant [J]. Turbine Technology, 2014, 56(6): 464-466.
- [4] 李明,黄丕维,焦庆丰,等. 大型汽轮机组运行方式优化试验研究及经济性分析[J]. 湖南电力, 2008, 28(1): 27-30.
- LI M, HUANG P W, JIAO Q F, et al. Research on test of large steam turbine units optimal operation and economy analysis [J]. Hunan Electric Power, 2008, 28(1): 27-30.
- [5] 刘双白. 汽轮机定滑压运行曲线测试方法研究[J]. 华北电力技术, 2007(12): 9-12.
- LIU S B. Test method of rated-sliding pressure operation curve of steam turbine [J]. North China Electric Power, 2007(12): 9-12.
- [6] 李千军,霍鹏,郑李坤,等. 国产600 MW汽轮机组定滑压运行方式测试方法研究[J]. 汽轮机技术, 2009, 51(5): 386-389.
- LI Q J, H P, Z L K, et al. Test method of rated-sliding pressure operation mode for domestic 600 mw steam turbines [J]. Turbine Technology, 2009, 51(5): 386-389.
- [7] 高林,李尔堪,薛建中,等. 基于凝结水变负荷技术的深度滑压节能控制[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 121-124.
- GAO L, LI E K, XUE J Z, et al. Energy saving automatic control with deeply pressure sliding based on condensate load adjustment technology [J]. Thermal Power Generation, 2016. 04, 45(4): 121-124.
- [8] 李西军,赵爽,周虹任,等. 岱海电厂1号机组凝结水节流响应负荷变化试验分析[J]. 电站系统工程, 2010, 26(4): 39-41+44.
- LI X J, ZHAO S, ZHOU H R, et al. Experiment of condensate throttling response to the load of daihai power plant unit 1 [J]. Power System Engineering, 2010, 26(4): 39-41+44.
- [9] 郑卫东,马浩,李肖肖,等. 凝结水节流技术在1000 MW机组的应用[J]. 浙江电力, 2015, 34(6): 39-43.
- ZHENG W D, MA H, LI X X, et al. Application of condensate throttling technology in 1000 mw units [J]. Zhejiang Electric Power, 2015, 34(6): 39-43.
- [10] 庄会庆,张贻珍,刘井泉. 亚临界N330-17.75/540/540型汽轮机定、滑压运行分析[J]. 热力透平, 2009, 38(2): 86-89+109.
- ZHUANG H Q, ZHANG Y Z, LIU J Q. Analysis on constant/sliding pressure operating of subcritical steam turbine with model N330-17.75/540/540 [J]. Thermal Turbine, 2009, 38(2): 86-89+109.

(责任编辑 黄肇和)

## (下接第62页 Continued from Page 62)

- [5] 邹振宇. 多灵活交流输电控制器间交互影响分析及其协调控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [6] 杜文娟,秦川,王海风,等. UPFC控制的协调设计—变参数开环解耦控制方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 19-23.
- DU W J, QIN C, WANG H F, et al. Coordinated design of UPFC—a variable-parameter open-loop decoupling method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 19-23.
- [7] 鞠平,代飞,金宇清,等. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [8] 陈维,黎灿兵,曹一家,等. 基于WAMS的多FACTS装置协调控制系统的框架设计[C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会第十二届青年学术会议论文集. 杭州: 中国电机工程学会, 2012.
- [9] 巩伟峥,房鑫炎. 基于广域测量系统的电压稳定指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 71-75.
- GONG W Z, FANG X Y. A on-line voltage stability index based on wide area measurement system [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 71-75.
- [10] 吴为,汤涌,孙华东,等. 电力系统暂态功角失稳与暂态电
- 压失稳的主导性识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5610-5617.
- WU W, TANG Y, SUN H D, et al. The recognition of principal mode between rotor angle instability and transient voltage instability [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5610-5617.
- [11] 项英桐,刘天琪,李兴源. STATCOM基本控制与附加控制的比较研究[J]. 华东电力, 2011, 39(9): 1462-1466.
- XIANG Y T, LIU T Q, LI X Y. Comparative study between basic control and supplementary control of STATCOM [J]. East China Electric Power, 2011, 39(9): 1462-1466.
- [12] KUMKRATUG P, HAQUE M H. Versatile model a simple power of a unified power flow controller in system [J]. IEE Proc-Gener Transm. Distrib. 2003, 150(2): 155-161.
- [13] 万波,张焰. 一种新的UPFC潮流计算模型[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 25-27.
- WAN B, ZHANG Y. A new UPFC model for power flow analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 25-27.

(责任编辑 郑文棠)