

基于主蒸汽流量的抽凝供热机组宽负荷滑压优化研究

张世东¹, 黄峻², 韩朝兵¹, 戴坤鹏¹

(1. 上海明华电力科技有限公司, 上海 200090; 2. 上海漕泾热电有限责任公司, 上海 201507)

摘要:为提高某超临界抽凝供热机组的运行经济性,分析了供暖期热负荷、背压等因素对传统机组负荷—主蒸汽压力滑压曲线适用性的影响。针对该抽凝供热机组,通过宽负荷滑压优化试验,给出了以主蒸汽流量为自变量的滑压优化曲线,在此基础上提出了在线计算主蒸汽流量的模型。试验结果表明:不同负荷下计算的通流系数基本为一定值,符合理论分析;不同通流系数下,计算主蒸汽流量和试验主蒸汽流量之间的相对误差均不超过1%;该模型计算的主蒸汽流量与试验值吻合度较高,能满足滑压运行的在线实时控制。

关键词:抽凝供热机组;宽负荷;滑压优化;主蒸汽流量;计算模型

中图分类号:TK267 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.06.004

[引用本文格式]张世东,黄峻,韩朝兵,等.基于主蒸汽流量的抽凝供热机组宽负荷滑压优化研究[J].热能动力工程,2022,37(6):26-31. ZHANG Shi-dong, HUANG Jun, HAN Chao-bing, et al. Study on wide load sliding pressure optimization of supercritical condensing heating units based on main steam flow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 26-31.

Study on Wide Load Sliding Pressure Optimization of Supercritical Condensing Heating Units based on Main Steam Flow

ZHANG Shi-dong¹, HUANG Jun², HAN Chao-bing¹, DAI Kun-peng¹

(1. Shanghai Minghua Electric Power Science & Technology Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200090;
2. Shanghai Caojing Cogeneration Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 201507)

Abstract: In order to improve the operation economy of a supercritical condensing heating units, the effect of the factors of thermal load and back pressure in heating period on the feasibility of traditional sliding pressure operation curve of unit load and main steam pressure was analyzed. Through the wide load sliding pressure optimization tests of the condensing heating unit, a new sliding pressure optimization curve with main steam flow as the independent variable was given. On this basis, a model for online calculation of main steam flow was proposed. Test results show that the calculated flow coefficient is basically a definite value under different loads, which is consistent with the theoretical analysis; and the relative error between the calculated main steam flow and the test main steam flow is less than 1% under different flow coefficients. The main steam flow calculated by the model is in good agreement with the test value, which can meet the online real-time control of sliding pressure operation.

Key words: condensing heating units, wide load, sliding pressure optimization, main steam flow, calculation model

引言

近年来,随着风电、太阳能等新能源电力的规模化发展,电网负荷的峰谷差越来越大,电网对火电机组深度调峰能力的要求也越来越高^[1-2]。为了适应电力新形势发展的需要,作为电网的主力,火电机组不得不长时间在部分负荷之间做大幅度的变工况运行。相比于纯凝工况,火电机组在供暖季有大量的供热需求,机组会在更低的电负荷下运行。为了提高供热机组的经济性,大部分机组都采用了滑压运行的方式。

目前,大多数机组的滑压曲线以机组负荷为自变量,在设计的主再热蒸汽温度和背压等边界参数下确定主蒸汽压力。当机组实际的运行方式与设计工况边界条件存在较大差异时,比如背压的变化,在主蒸汽压力相同的条件下,机组负荷会发生变化。若此时仍以负荷为自变量得到对应的主蒸汽压力,则该滑压值已非最优值,影响机组在该负荷下的运行经济性。尤其对于供暖季的抽凝供热机组,不仅背压有变化,供热抽汽流量也会发生大范围变化,导致相同电功率时的主蒸汽流量远远大于纯凝工况,此时设计滑压曲线已偏离实际最优值。李俊等人^[2]对某630 MW亚临界机组进行了宽度滑压试验研究,并对滑压曲线进行了背压修正,减小了不同环境温度对背压的影响。陈邵龙等人^[3]通过作图法和流量变工况计算,提出了基于背压和最佳阀位控制的滑压实时优化方法,实现了滑压值的实时调整。但该背压的修正主要针对以机组负荷为自变量的纯凝机组,对供热机组存在一定的局限性。文乐等人^[4]基于纯凝工况的滑压性能试验数据、调门流量特性及背压修正曲线等,利用回热系统汽水矩阵方程,提出了汽轮机供热期间的滑压压力优化计算方法。该方法中汽水矩阵方程需迭代计算,同时在迭代过程中对边界进行了一些假设,通过DCS数据挖掘的方法获得调门流量特性曲线,不适用于机组实时控制过程中。

对此,基于供热机组在纯凝工况下的定滑压性能试验数据,提出了一种基于主蒸汽流量为自变量的宽负荷滑压优化运行方法。针对主蒸汽流量难以

在线准确测量的问题,提出了一种在线计算主蒸汽流量的计算方法,并结合相应定滑压性能试验数据对这一方法进行了分析。

1 供热机组滑压运行分析

火电机组经济性主要受循环效率和汽轮机相对内效率影响^[4-5]。同一机组负荷下,主蒸汽压力越高,机组循环效率越高。但高压调门开度越小,进汽节流损失越大,高压缸效率降低。同时,随着给水压力的升高,给水泵耗功增加,小汽轮机抽汽量也加大,导致蒸汽在汽轮机内做功量减少。主蒸汽压力变化引起的循环效率和汽轮机相对内效率的变化存在极值,极值处的主蒸汽压力即为该负荷下的最优主蒸汽压力。

目前,大多数机组使用的机组负荷—主蒸汽压力关系曲线就是汽轮机厂家基于上述原理变工况计算得到的。对于抽凝供热机组,在供热期使用机组负荷—主蒸汽压力曲线,存在以下问题^[6]:

(1) 相同主蒸汽流量下,机组抽汽供热时对应的电负荷下降,机组负荷—主蒸汽压力关系曲线不再适用;

(2) 在供热期和非供热期,由于背压变化较大,在相同主蒸汽流量下,同一主蒸汽压力对应的机组负荷不一样,机组负荷—主蒸汽压力关系曲线不再适用;

(3) 供热机组采用非供热期的定滑压曲线,机组变负荷调节过程中的总煤量、给水流量、主蒸汽压力等主要参数会发生较大波动,调节动态特性变差,严重威胁机组安全运行。

通过耗差分析^[7]滑压运行对高压缸效率、循环效率和给水泵耗功的影响^[8-9]可知,这3个指标的变化与机组输出功率并无直接关系,而与主蒸汽流量有直接关系。因此,抽凝供热机组应采用“主蒸汽流量—主蒸汽压力”的关系曲线作为机组的定滑压运行曲线。

2 供热机组滑压控制分析

“主蒸汽流量—主蒸汽压力”关系曲线可通过滑压优化试验获得,然后根据主蒸汽流量确定最佳

主蒸汽压力即可。但是,目前大多数机组并未安装直接测量主蒸汽流量的孔板。由给水流量叠加过热减温水流量为基准计算的主蒸汽流量具有一定的精确性,但是该方法的前提是炉侧不能进行吹灰、排污等操作。而且随着运行时间的推移,流量孔板的测量精度也难以保证。因此,通过该方法计算主蒸汽流量存在一定的局限性,不适于供热机组滑压曲线的实时控制。

目前,大多数机组的主蒸汽流量都是根据弗留格尔公式^[10-12]计算:

$$\frac{G_1}{G} = k \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_0^2 - p_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \quad (1)$$

式中: k —变工况与设计工况的通流面积之比,称为通流系数; G_1 —变工况后的主蒸汽流量,t/h; p_{01} —变工况后级组前的压力,MPa; T_{01} —变工况后级组前主蒸汽温度,K; p_{21} —变工况后级组后的压力,MPa; G —额定负荷下的设计主蒸汽流量,t/h; p_0 —额定负荷下级组前的压力,MPa; T_0 —额定负荷下级组前主蒸汽温度,K; p_2 —额定负荷下级组后的压力,MPa。

弗留格尔公式存在以下两个应用条件:

(1) 变工况前后该级组通流面积不变,且级组内的蒸汽应是一股均质流。然而对于调节级,多数情况下是流过两股初压不同的气流,而且调节级在变负荷过程中,调门开度一直在变化。因此,调节级不能包含在机组内,即弗留格尔公式不能直接应用于调节级前后。

(2) 级组内各级流量应相同,级组不应包含有抽汽口。

根据弗留格尔公式计算的级前级后参数分别选调节级后参数和一段抽汽参数。但是,大多数机组并未安装调节级后温度测点,需将上式进行一定的改进。

由于一段抽汽温度和调节级后温度变化趋势一致,采用一段抽汽温度替代调节级后温度,用压力和比体积的乘积 pv 来修正,改进后的弗留格尔公式为:

$$\frac{G_1}{G} = k \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_0^2 - p_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{p_g v_g}{p_{g1} v_{g1}}} \quad (2)$$

式中: p_g —额定负荷下设计的一段抽汽压力,MPa; v_g —额定负荷下设计的一段抽汽比体积, m^3/kg ; p_{g1} —变工况后的一段抽汽压力,MPa; v_{g1} —变工况后的一段抽汽比体积, m^3/kg ;

由式(2)可见,要计算变工况后的主蒸汽流量,除需知道额定负荷下设计参数和变工况参数外,仍需知道该机组的通流系数^[13-14]。通流系数受叶片结垢或腐蚀等影响会发生变化,与负荷无关,可认为是该机组一段时间内的固有特性,为一定值,可通过同时期内不同负荷下的性能试验数据进行计算得到。

3 滑压运行曲线测试

3.1 试验简介

某厂2号机组为哈尔滨汽轮机厂生产的C350/293-24.2/0.39/566/566超临界、一次再热、两缸两排汽、湿冷、抽汽凝汽式汽轮机。该机组目前使用的是厂家推荐的滑压曲线,滑压范围为90%~40%机组负荷。由于受风电等新能源的冲击,该机组最低深度调峰负荷已下探至30%。尤其在机组供热改造后,冬季供热高峰期该机组会“切缸运行^[15]”,机组负荷会进一步降低。为了提高机组在深度调峰负荷范围内的运行经济性,本次试验在调峰范围内选取6个负荷点进行了滑压优化试验。

滑压优化试验以主蒸汽压力和机组负荷为基准,在目前运行滑压点的基础上,分别向上和向下施加压力偏置。根据汽轮机热耗率最低的原则判断不同压力下的经济性,以耗差分析法作为热耗率试验的验证手段,以此来对机组滑压曲线进行寻优。

3.2 优化试验结果分析

本次试验负荷范围为纯凝工况85%~30%负荷。试验中,同一负荷下高调门位置从两阀点逐渐开至三阀点,寻找压力最优点。其中,两阀点为 V_1 和 V_2 全开, V_3 为将开未开的开度;三阀点为 V_1 、 V_2 和 V_3 全开;中间阀点为 V_1 和 V_2 全开, V_3 部分开度。其中:中间阀点1为目前机组运行点;中间阀点2下 V_3 开度比中间阀点1下的 V_3 开度大,但仍未全开。具体试验结果如表1所示,滑压优化前后机组热耗率对比曲线如图1所示。

表 1 不同阀点下的主蒸汽压力和热耗率对比

Tab. 1 Comparison of main steam pressure and heat rate in different valves

机组负荷率/%	机组负荷/MW	主蒸汽压力/MPa				修正后热耗率/kJ · (kW · h) ⁻¹			
		两阀点	中间阀点 1	中间阀点 2	三阀点	两阀点	中间阀点 1	中间阀点 2	三阀点
85	300	24.2	23.03	21.64	20.61	7 989.56	7 999.28	8 014.20	8 022.35
70	245	20.46	18.65	17.51	17.00	8 131.34	8 147.88	8 177.76	8 170.29
60	210	16.67	15.17	-	14.00	8 248.74	8 270.49	-	8 283.57
50	180	15.04	13.23	-	12.66	8 422.96	8 466.88	-	8 483.22
40	150	13.08	11.16	-	-	8 568.35	8 605.96	-	-
30	110	9.75	7.78	-	-	9 057.29	9 104.84	-	-

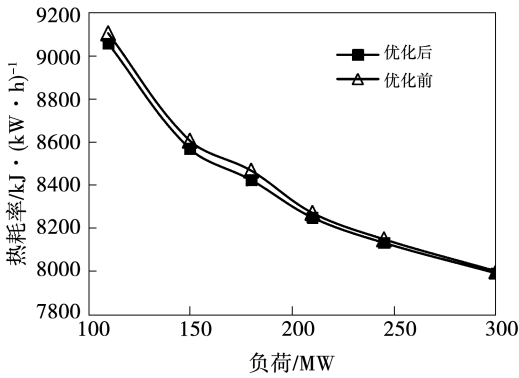


图 1 滑压优化前后汽轮机热耗率对比曲线

fig. 1 Comparison of heat rate of steam turbine before and after sliding pressure optimization

由图 1 可知,滑压优化后,机组热耗率有较可观的降低,不同负荷下热耗率平均降低了 29.52 kJ/(kW · h)。根据汽轮机热耗率最低的原则,拟合了相应的主蒸汽压力和主蒸汽流量之间的关系曲线,如图 2 所示。

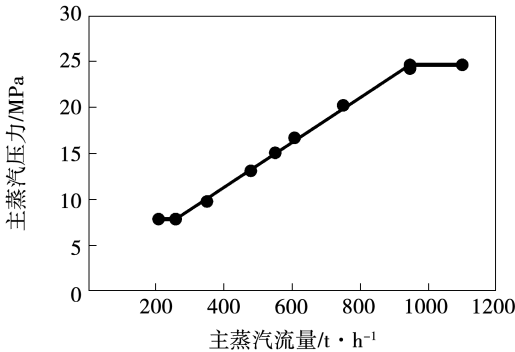


图 2 主蒸汽流量 - 主蒸汽压力关系曲线

Fig. 2 Correlation curve of main steam flow and main steam pressure

优化前,该机组采用复合滑压“定 - 滑 - 定”方式运行。根据表 1 数据可知,在 85% 负荷时主蒸汽压力为定压 24.2 MPa,对应的汽轮机热耗率最低。可见,滑压上限设为 85% 负荷对应的主蒸汽流量较合适,滑压下限由机组安全运行对应的最小给水流量确定。

在试验基础上,分别以 6 个试验负荷工况为基准计算了不同的通流系数 k 值,然后由式(2)依次计算了相应的主蒸汽流量,并给出了不同通流系数下试验主蒸汽流量和计算主蒸汽流量的相对误差,如表 2 和表 3 所示。

根据表 2 中数据可知,以不同负荷为基准计算的通流系数基本相同,这也与前述分析一致,即一段时间内通流系数是该机组的固有特性,是一定值。同时,由表 3 可知,以不同通流系数计算的主蒸汽流量相对误差最大不超过 1%,满足工程需要。

因此,试验中通流系数取上述结果平均值,即 $k = 0.9145$,并带入式(2)中,得到本机组主蒸汽流量在线计算模型为:

$$G_1 = 0.9145G \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{21}^2}{p_0^2 - p_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{p_g v_g}{p_{g1} v_{g1}}} \quad (3)$$

调节级结垢引起通流面积减小的问题,这是一个缓慢过程,可以通过定期的汽轮机性能试验数据与历史数据作对比,对 k 值进行修正。

表 2 不同通流系数下计算的主蒸汽流量

Tab.2 Main steam flow under different flow coefficients

工况	负荷/ MW	试验主蒸汽 流量/ $t \cdot h^{-1}$	通流系 数 k	计算主蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$						
				$k=0.914\ 1$	$k=0.916\ 1$	$k=0.919\ 3$	$k=0.910\ 3$	$k=0.914\ 2$	$k=0.913\ 0$	$k=0.914\ 5$
1	300	946.7	0.914 1	946.7	944.6	941.4	950.7	946.6	947.8	946.3
2	245	751.0	0.916 1	752.6	751.0	748.4	755.8	752.6	753.5	752.3
3	210	608.3	0.919 3	611.7	610.4	608.3	614.3	611.7	612.5	611.5
4	180	551.8	0.910 3	549.5	548.3	546.4	551.8	549.4	550.1	549.3
5	150	480.2	0.914 2	480.2	479.2	477.5	482.3	480.2	480.8	480.0
6	110	351.6	0.913 0	351.2	350.4	349.2	352.7	351.2	351.6	351.0

表 3 不同通流系数下试验和计算主蒸汽流量的相对误差

Tab.3 Relative errors of experimental and computational main steam flow under different flow coefficients

工况	负荷/MW	相对误差/%						
		$k=0.914\ 1$	$k=0.916\ 1$	$k=0.919\ 3$	$k=0.910\ 3$	$k=0.914\ 2$	$k=0.913\ 0$	$k=0.914\ 5$
1	300	0	0.22	0.56	0.42	0.01	0.12	0.04
2	245	0.22	0	0.35	0.64	0.21	0.33	0.18
3	210	0.57	0.35	0	0.99	0.56	0.68	0.52
4	180	0.42	0.64	0.98	0	0.43	0.30	0.46
5	150	0.01	0.21	0.56	0.43	0	0.12	0.03
6	110	0.12	0.33	0.68	0.30	0.12	0	0.16

4 结 论

(1) 根据抽凝供热机组纯凝工况下的定滑压试验数据,提出了以主蒸汽流量为自变量的滑压控制曲线,该方法可以适应背压和供热抽汽流量的变化,维持机组高效经济运行。

(2) 通过改进弗留格尔公式,提出了主蒸汽流量在线实时计算模型。滑压性能试验数据表明,不同通流系数下,试验主蒸汽流量和计算主蒸汽流量之间的相对误差均小于 1%,验证了该模型的准确性。结果显示,该模型具有较高准确性,可用于滑压控制的在线计算中。

参考文献:

[1] 毕庆生,李邓超,朱 侃,等.基于供热系统热惯性供热机组短时深度参与电网调峰及风电消纳研究[J].热能动力工程,2018,33(9):72-78.
BI Qing-sheng, LI Deng-chao, ZHU Kan, et al. In-depth grid power peak regulation with heating unit in wind power consumption based on thermal inertia characteristics[J]. Journal of Engineering for

Thermal Energy and Power, 2018, 33(9): 72-78.

- [2] 李 俊,包劲松,李 龙,等.630 MW 亚临界机组宽度滑压优化试验研究[J].汽轮机技术,2020,62(4): 147-150.
LI Jun, BAO Jin-song, LI Long, et al. Experimental study on width sliding pressure operation optimization of 630 MW subcritical unit [J]. Turbine Technology, 2020, 62(4): 147-150.
- [3] 陈邵龙,刘书元,王忠凯,等.基于背压和最佳阀位控制的滑压曲线实时优化及应用[J].热能动力工程,2020,35(6): 257-261.
CHEN Shao-long, LIU Shu-yuan, WANG Zhong-kai, et al. Real-time optimization and application of sliding-pressure curve based on backpressure and optimal valve position control[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 257-261.
- [4] 文 乐,杨新民,王伟锋,等.抽汽供热机组滑压压力优化计算[J].热力发电,2017,46(10): 71-75;
WEN Le, YANG Xin-min, WANG Wei-feng, et al. Optimization calculation for sliding pressure of steam turbine with extraction for heating[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(10): 71-75.
- [5] 吕 太,李耀德,胡乔良.汽轮机滑压运行方式的经济性实验分析[J].汽轮机技术,2010,52(2): 127-129.
LYU Tai, LI Yao-de, HU Qiao-liang. Economic experimental analy-

- sis and study of gliding pressure operation of steam turbine sets [J]. Turbine Technology, 2010, 52(2): 127 - 129.
- [6] 文 乐,薛志恒,杨新民. 深度调峰下汽轮机的定滑压曲线试验与优化[J]. 热能动力工程, 2019, 34(11): 21 - 26.
WEN Le, XUE Zhi-heng, YANG Xin-min. Test and optimization of the rated-sliding pressure curve for a steam turbine under deep peak regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(11): 21 - 26.
- [7] 乔 庆. 超临界汽轮发电机组流量特性与能耗分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
QIAO Qing. Research on flow characteristic and energy consumption analysis of supercritical steam turbine unit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [8] 王世勋, 龚源荣, 周金顺, 等. 600 MW 超临界机组滑压优化运行技术研究[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(2): 147 - 150;
WANG Shi-xun, GONG Yuan-rong, ZHOU Jin-shun, et al. Optimization on sliding pressure technology of 600 MW supercritical steam turbine[J]. Turbine Technology, 2011, 53(2): 147 - 150;
- [9] 徐乃华, 王 峰, 王安庆, 等. 超超临界 1 000 MW 节流配汽机组滑压运行曲线优化[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 116 - 121.
XU Nai-hua, WANG Feng, WANG An-qing, et al. Optimization on sliding pressure operation curve of an ultra supercritical 1 000 MW unit with throttle governing steam turbine[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 116 - 121.
- [10] 周兰欣, 华 敏, 王 为, 等. 机组初参数与热耗修正曲线的变工况计算法[J]. 动力工程学报, 2011, 31(5): 387 - 390.
ZHOU Lan-xin, HUA Min, WANG Wei, et al. A variable condition calculation method for main steam parameters and the heat rates correction curves[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(5): 387 - 390.
- [11] 江 宁, 曹祖庆. 调节级通用曲线的计算与应用[J]. 汽轮机技术, 2003, 45(1): 17 - 19.
JIANG Ning, CAO Zu-qing. The calculating and application of turbine's velocity stage master curve [J]. Turbine Technology, 2003, 45(1): 17 - 19.
- [12] 汪 军, 周建新, 司凤琪, 等. 汽轮机主蒸汽流量在线计算方法与应用[J]. 热力发电, 2010, 39(10): 42 - 45.
WANG Jun, ZHOU Jian-xin, SI Feng-qi, et al. On-line calculation method for the main steam flow rate of steam turbine and its application[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(10): 42 - 45.
- [13] 李丽萍, 李丽君. 火电厂主蒸汽流量测量方法比较分析[J]. 电站系统工程, 2019, 35(4): 15 - 17.
LI Li-ping, LI Li-jun. Comparison and analysis of measuring for main steam flow in TPP[J]. Power System Engineering, 2019, 35(4): 15 - 17.
- [14] 王 刚, 李存文, 梁正玉, 等. 基于特征通流面积的汽轮机流量特性辨识方法[J]. 热力发电, 2016, 45(6): 33 - 39.
WANG Gang, LI Cun-wen, LIANG Zheng-yu, et al. Identification-method for flow characteristics of steam turbine based on characteristic flow area[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(6): 33 - 39.
- [15] 梁天赋, 谢尉扬, 王 飞, 等. 汽轮机低压缸切缸运行关键技术研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(6): 471 - 472.
LIANG Tian-fu, XIE Wei-yang, WANG Fei, et al. The key technique research of removing the low pressure cylinder of steam turbine[J]. Turbine Technology, 2019, 61(6): 471 - 472.

(刘 颖 编辑)