

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.06.016

200 MW 机组切除低压缸进汽供热改造 技术分析

Analysis on heating supply retrofit of a 200 MW unit by cutting off the
low-pressure cylinder steam admission

刘帅¹, 郑立军¹, 俞聪¹, 高新勇¹, 刘国弼¹, 赵春风², 张晓丽², 曹创², 徐建鹏²
LIU Shuai¹, ZHENG Lijun¹, YU Cong¹, GAO Xinyong¹, Liu Guobi¹,
ZHAO Chunfeng², ZHANG Xiaoli², CAO Chuang², XU Jianpeng²

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030; 2. 沈阳金山能源股份有限公司
金山热电分公司, 沈阳 110000)

(1. Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China; 2. Jinshan
Thermal Power Company, Shenyang Jinshan Energy Company Limited, Shenyang 110000, China)

摘 要:为提高热电机组的运行灵活性,进一步缓解热电矛盾,以国内某发电公司 200 MW 机组为例,进行了切除低压缸进汽的供热改造。为避免小流量工况下的叶片颤振危害,以文献中的试验数据作为切除低压缸进汽运行工况的理论指导,提出了限制低压缸冷却蒸汽流量在额定排汽流量的 1.0% ~ 1.5% 之间的运行参数。进行加装末两级温度测点、更换连通管蝶阀以及加装具有减温减压功能的冷却蒸汽旁路系统等改造后,对机组的供热和调峰能力进行了核算分析,历时 2 个采暖季的切缸运行结果表明:热电机组切除低压缸进汽在技术上是可行的,能够实现热电解耦,减少冷凝损失,提高机组运行的经济性。

关键词:热电机组;切除低压缸进汽;供热改造;冷却蒸汽;叶片颤振;调峰

中图分类号:TK 262 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)06-0076-07

Abstract: It is essential to alleviate the conflict between heating and electricity supply, and improve the flexibility of thermal power units. A heating supply retrofit by cutting off the low-pressure cylinder steam admission was made on a 200 MW unit in a domestic power generation company. In order to avoid the blade flutter under low flow conditions, guided by the test data in the literature about cutting off the low-pressure cylinder steam admission, the cooling steam flow running into the low-pressure cylinder was limited to 1.0% ~ 1.5% of the rated exhaust gas flow. After replacing the connecting pipe butterfly valve, installing measuring points on the last two stages and adding a cooling steam bypass system with desuperheating and decompression functions, heating supply and peaking load regulating capacities of the unit were calculated. Proven by data in two heating seasons, the retrofit scheme is feasible. The scheme decouples the heating and electricity capacities, lowers the condensation loss, and improves the economy of the unit.

Keywords: thermal power units; cutting off the low-pressure cylinder steam admission; heat supply retrofit; cooling steam; blade flutter; peak regulation

0 引言

近年来,我国以光伏和风电为主的可再生能源机组迅速增长,大力发展可再生能源是我国未来能源战略的重要组成部分。为配合可再生能源机组发电并网以及消除峰谷差日益增大对电网安全的影响,

电网对火电机组的调峰次数和品质提出了更高的要求。在供暖季,受系统热力特性的限制,热电厂均采取“以热定电”的模式运行,供热负荷随时间变化缓慢,为保证供热质量,机组调峰能力受限,稳定的供热需求和频繁的调峰需求之间存在矛盾。近几年东北地区非水可再生能源发展迅猛,为了更多地消纳非水可再生能源,电网公司相应出台了一系列鼓励发电企业辅助调峰运行的政策,“十三五”期间,我国将加快电力系统调峰能力建设,大力推进火

收稿日期:2019-10-21;修回日期:2019-11-18

基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ18-02-68)

电灵活性改造工作^[1-3]。

切除低压缸进汽供热技术是一项可以有效提高热电联产机组调峰深度的改造技术^[4-7]。切除低压缸进汽,缸内流场属于极小流量工况,截至目前,还没有建立能够完善描述此种工况下涡系脱离现象和叶片颤振产生机理及规律的数学计算模型,笔者通过查阅相关文献并结合自身经验,以文献中的试验数据为依据,得出了每台低压缸的合理冷却蒸汽流量区间,以国内某电厂 200 MW 供热机组切除低压缸改造为示范案例,通过试验的方式验证了热电机组实施切除低压缸改造的可行性。

1 机组概况

某发电公司 #2 机组为 CC150/N220 - 12. 75/0. 981/0. 245 型 200 MW 超高压蒸汽参数、一次中间再热、单轴、双缸、双排汽、双抽、凝汽供热式汽轮机。机组主要技术规范见表 1。

表 1 机组主要技术规范

Tab. 1 Main technical specifications of the unit

项目	参数
额定功率(抽汽/冷凝)/MW	150/220
主蒸汽额定压力(绝对压力)/MPa	12. 750 0
主蒸汽额定温度/℃	535. 0
主蒸汽额定流量(抽汽/冷凝)/(t·h ⁻¹)	745. 00/659. 44
再热蒸汽压力(抽汽/冷凝,绝对压力)/MPa	2. 543 0/2. 504 0
再热蒸汽进汽温度/℃	535. 0
再热蒸汽流量(抽汽/冷凝)/(t·h ⁻¹)	547. 32/544. 80
工业抽汽额定压力(绝对压力)/MPa	0. 981 0
工业抽汽额定温度/℃	419. 9
最大工业抽汽量/(t·h ⁻¹)	360. 00
额定工业抽汽量/(t·h ⁻¹)	56. 00
采暖抽汽额定压力(绝对压力)/MPa	0. 245 0
采暖抽汽额定温度/℃	259. 1
最大采暖抽汽量/(t·h ⁻¹)	420. 00
额定采暖抽汽量/(t·h ⁻¹)	290. 00
额定背压(绝对压力)/MPa	0. 004 9
维持额定出力的最高背压(绝对压力)/MPa	0. 011 8
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
最终给水温度(冷凝)/℃	249. 0

2 切除低压缸进汽供热技术分析

切除低压缸进汽供热技术是指在供热期间,通过全密封、零泄漏的供热蝶阀关断作用切除低压缸

进汽,使得低压缸转子在高真空条件下“空转”运行,高中压缸高背压供热运行的一种灵活的运行技术。此技术可以在低压转子不脱离、整体轴系始终同频运转的情况下,通过中低压缸连通管上新加装的全密封、零泄漏的液压蝶阀启闭动作,实现机组凝、抽、背(切缸)3 种工况的灵活切换。

切除低压缸进汽,低压缸在高真空条件下“空转”运行,理论上如果低压缸内是完全真空,则不会有鼓风超温发热的危害,但完全真空目前无法实现,极少的漏汽在低压缸内流动性较差,同时被高速旋转的叶片搅动并鼓风产热,若不将这些热量带走,将会由于结构热变形不均而导致振动及胀差超限等,因此切缸运行时低压缸必须通入少量的冷却蒸汽,保持一定的流动性以带走鼓风热。低压缸处在一个高真空度、极小流量的运行工况,但低流量工况会带来另外一个问题——低压级叶片的机械性能问题,也就是通常所说的小流量工况下的叶片颤振危害。极小流量工况由于严重的流场畸变,到目前为止还没有准确的数学计算模型,国际上均是通过试验的方法获取叶片动应力;转子表面蒸汽涡系脱离,转子表面换热无法进行数学计算,因此转子受热膨胀量也只能通过试验的方法获得;排汽温度升高,缸后喷水需要长期投运,汽流夹带水滴回流冲刷叶片根部,这种损伤也不能进行准确的理论计算,只能认为会有水蚀加剧的风险。

冷却蒸汽的汽源选自中压缸排汽,冷却蒸汽流量必须避开叶片的颤振临界区,文献[8-14]讲述了国内外相关低压缸末级叶片的部分断裂事故和动应力试验数据,世界各国关于叶片动应力的数据均得到了相同的规律:在相对体积流量从额定工况开始减少的过程中,动应力先平稳地减小,然后急剧增大至峰值,随后随着体积流量的减小,动应力又逐渐减小。图 1 为文献[8]提到的前苏联哈尔科夫工学院针对某汽轮机末级叶片动应力随相对体积流量 $\bar{q}_{V,rel}$ 和背压 p_k 变化的试验测量数据:当 $\bar{q}_{V,rel}$ 为 0. 20 ~ 0. 30 时,随着 $\bar{q}_{V,rel}$ 的减小,动应力大大增加; $\bar{q}_{V,rel}$ 为 0. 05 ~ 0. 10 时,动应力达最大值; $\bar{q}_{V,rel}$ 进一步减小时,动应力急剧下降;当 $\bar{q}_{V,rel}$ 达 0. 03 ~ 0. 05 时,动应力几乎为 0; $\bar{q}_{V,rel}$ 为 0 ~ 0. 03 时,末级叶片已经没有了动应力了,或者说叶片的动应力已经小到超出试验检测设备的检测范围了。从图 1 可以看出:曲线族几乎是在 $\bar{q}_{V,rel}$ 接近 0. 03 的位置同时消失,0. 03 的位置介于动应力有或无的临界位置,并且在 0 ~ 0. 03 的区间,动应力已经与排汽压力关系不大了,或者说当低压缸冷却蒸汽流量小于 3. 0% 额定排汽流量时,排汽压力反而可以适当高一些。

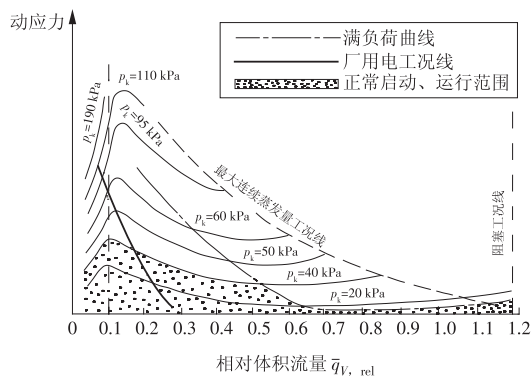


图 1 动应力与相对体积流量、背压的关系

Fig. 1 Relationship between dynamical stress, volume flowrate and back pressure

虽然这组数据的试验对象与本文分析的对象不同,但末级叶片在这种工况下的动应力变化规律基本相同,因此可以大胆推断:只要低压缸冷却蒸汽流量小于额定排汽流量的 3.0%,叶片潜在的颤振危害就不存在了。

切低压缸运行是一个长周期运行工况,笔者认为不能以 0.03 作为冷却蒸汽相对流量的上限值,出于安全考虑,要远离这条红线。该机组低压缸额定排汽流量为 440 t/h,按 0.03 计,冷却蒸汽流量上限为 13.2 t/h,由于实际运行中冷却蒸汽流量难免会有波动,因此要预留足够的裕量。基于以上分析,限制冷却蒸汽流量在额定排汽流量的 1.0% ~ 1.5% 之间,则冷却蒸汽流量范围为 4.4 ~ 6.6 t/h。将这股中压排汽通入低压缸内,若此股蒸汽能够顺利带走缸内的热量,即低压缸内没有出现叶片超温、转子胀差超限的情况,则机组实现切缸运行;若低压缸内依然出现叶片超温或低压胀差超限的情况,则必须对该股冷却蒸汽进行减温减压处理,才可满足切缸长周期运行要求。

3 切除低压缸进汽改造技术方案

为了保证改造工程顺利完成,该机组进行了如下改造^[15-16]。

(1) 加装末两级温度测点。切低压缸改造后,机组背压供热运行期间低压缸内少量蒸汽依然处于鼓风状态,并且鼓风会前移(不限于末几级长叶片),因此需要对末几级长叶片附近的蒸汽温度进行监测,以确保机组长期安全地背压运行。因此在末级、次末级动叶之后共装设 4 个温度测点,并引入机组分散控制系统,设定安全范围,参与机组调节控制。

(2) 更换中低压缸连通管供热蝶阀。切低压缸改造要求背压运行期间切除低压缸进汽,该机组原始设计有 2 个中低压缸连通管,且各自装有 1 个具有一定机械限位的电动调整蝶阀,根据切缸运行要

求,即使将此阀门关到最小机械限位处依然有较大泄漏量,因此需要对原中低压缸连通管供热蝶阀进行更换。新更换的阀门本体要求可以达到关到零位、全密封且零泄漏的目的,同时为了防止阀门在全关时出现打不开的危险情况,特要求此阀门采用液压执行机构。

(3) 增设冷却蒸汽旁路系统。连通管阀门更换后,虽然实现了全关断、零泄漏的目的,但为了带走缸内的鼓风热,还需要保证极少量冷却蒸汽可通入低压缸内,若直接利用连通管阀门进行调节,则该阀门的阀位肯定很小,此种情况下阀门前后压差大,容易引发振动,给运行带来额外风险;同时,此种方式也无法实现对冷却蒸汽参数进行调节的目的,因此需对连通管蝶阀加装冷却蒸汽旁路系统。设计新加 1 个冷却蒸汽系统,该系统设计有电动调节阀、减温减压器、汽水分离器、流量监测装置以及相关其他电控仪表等设备^[17],改造后原则性热力系统图如图 2 所示。

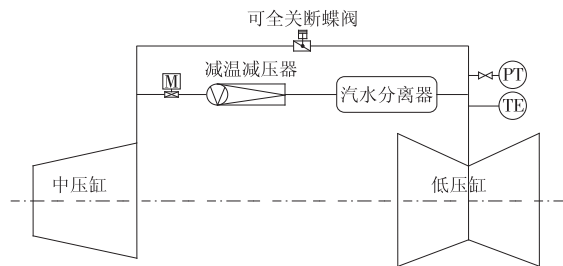


图 2 供热改造方案原则性热力系统图

Fig. 2 Principle thermal system diagram of the heating supply retrofit

4 改造后机组供热调峰能力分析

切低压缸改造后,在相同锅炉蒸发量的情况下,机组抽凝和切缸工况的发电抽汽量数据见表 2,特性对比如图 3 所示。可以看出,通过切除低压缸进汽,相比于抽凝运行,可以增加约 140 t/h 的采暖抽汽,机组发电负荷可下降约 25 MW。

表 2 改造前、后机组不同供热工况下热力特性对比

Tab. 2 Comparison of the thermal characteristics under different heating-supply conditions before and after the retrofit

工况	项目	锅炉出力系数/%			
		30	50	75	100
抽凝	发电功率/MW	65.9	85.0	140.0	165.0
	主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	210.0	330.0	480.0	660.0
	采暖抽汽流量/(t·h ⁻¹)	0	120.0	230.0	420.0
切缸	发电功率/MW	47.0	60.0	114.0	140.0
	主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	210.0	330.0	480.0	660.0
	采暖抽汽流量/(t·h ⁻¹)	140.0	263.5	273.0	556.0

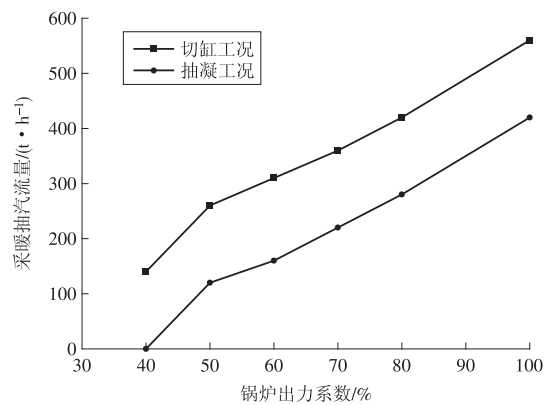


图 3 切缸与抽凝供热特性对比

Fig.3 Comparison of the heating characteristics between cylinder cutting and extraction condensing

表 3 和图 4 为切低压缸改造后机组的调峰能力核算结果,可以看出,相比于改造前,在保证对外供热负荷不变的情况下,机组从抽凝转为切低压缸运行,可使发电功率下降约 58 MW,大大提高了机组的调峰能力。图 5 为切缸(背压)运行期间的控制画面,图中 DF 为中低压缸连通管供热蝶阀,此时的阀位为 0%,发电负荷为 49 MW,低于机组额定功率的 30%,符合电网的辅助调峰政策,通过切除低压缸进汽,在满足供热、调峰的同时,减少了凝汽冷源损失。

5 试验验证

切除低压缸进汽,低压缸内流场严重畸变,颤振、鼓风超温以及水蚀等均难以定量计算,因此更重要的环节是在在运机组上进行试验验证。该机组于 2017 年 9 月进行了相关改造,并于 2017 年 11 月采暖季开始进行试验投运,机组稳定运行后从 2017 年 11 月 11 日开始连续切缸运行至 2018 年 3 月 31 日采暖季结束,2018 年 6 月进行了第 1 次开缸检查。2018 年 11 月开始转为灵活性切缸运行直至 2019 年 3 月 31 日采暖季结束,灵活性切缸共计 60 次,累

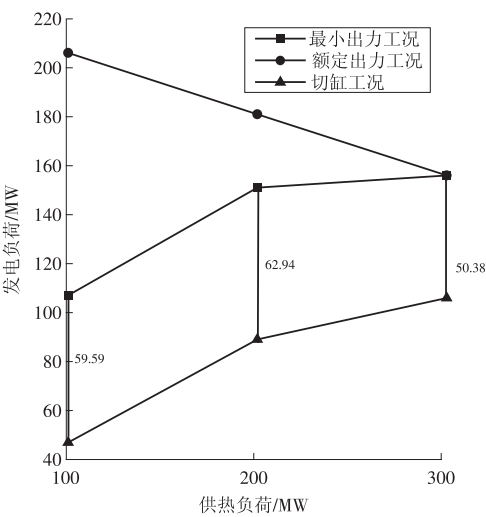


图 4 改造前、后机组调峰能力对比

Fig.4 Comparison of the peak regulating capacity of the unit before and after the retrofit

计时长约 500 h,2019 年 6 月进行了第 2 次开缸检查。

5.1 鼓风发热试验验证

2017 年 11 月 7 日进行了第 1 次切除低压缸进汽试验,这次试验不投减温水,直接将小股中压排汽作为冷却蒸汽通入低压缸,当完全关断中低压缸连通管蝶阀、调整小旁路流量至 5 t/h 左右之后,机组在当天 13:40 正式进入切缸运行状态,此时机组的低压胀差为 3.93 mm,起初的 1 个小时胀差先是减小到 3.67 mm,之后开始慢慢上涨。分析认为,切除低压缸进汽后,转子、汽缸表面高温蒸汽大幅减少,转子出现了短暂的冷却收缩现象,之后与周围不连续的蒸汽摩擦发热慢慢膨胀。到第 2 天 00:00,胀差涨到 5.97 mm(低压胀差报警值为 5.50 mm,跳机值为 6.00 mm),此时已经切缸 10 h,现场观察胀差依然有上涨的趋势,为安全起见切回到抽凝状态,大流量蒸汽进入低压缸,转子受到冷却,胀差增长止

表 3 改造前、后机组调峰能力对比

Tab.3 Comparison of the peak regulating capacity of the unit before and after the retrofit

供热负荷/MW	锅炉工况	发电功率/MW	电负荷出力系数/%	锅炉出力系数/%	低压缸排汽流量/(t·h ⁻¹)	供热量/MW
100	最小出力	107.06	48.66	52.37	140	101.64
	额定出力	206.00	93.64	100.00	360	101.24
	切缸	47.47	21.58	34.50	5	102.05
200	最小出力	151.47	68.85	79.39	140	202.87
	额定出力	181.33	82.42	100.00	200	202.41
	切缸	88.53	40.24	52.37	5	203.28
300	最小出力	156.63	71.20	100.00	140	303.65
	额定出力	156.63	71.20	100.00	140	303.65
	切缸	106.25	48.30	79.39	5	304.82



图 5 背压运行画面

Fig. 5 Interface of back-pressure operation

步,开始回落。加装的温度测点测量值显示:整个试验过程中叶顶的温度始终处于安全范围内,应该没有出现过热导致的相关损伤。表 4 为当时的胀差变化记录。

表 4 切缸试验过程中胀差变化
Tab. 4 Differential expansions during the low-pressure cylinder cutting test

时刻	胀差/mm	备注
13:40	3.93	切缸开始
14:30	3.67	
15:30	4.14	
16:30	4.25	
17:30	4.45	
18:30	4.67	
19:30	4.95	
20:30	5.15	
21:30	5.37	
22:30	5.48	
23:30	5.73	连续切缸约 10 h
00:00	5.97	切回抽凝
00:10	5.9	
00:20	5.88	
00:30	5.87	

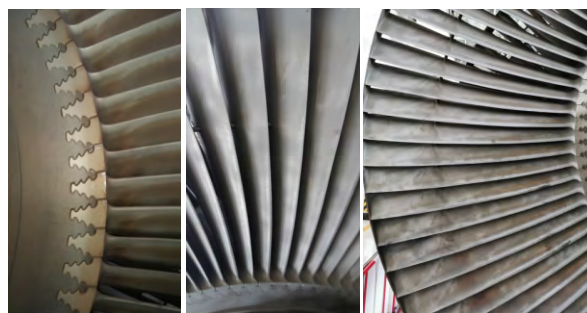
2017-11-10 T 09:00 进行第 2 次切缸试验,这次试验投入减温水,将冷却蒸汽温度调整至 165℃后进入低压缸,刚开始时低压胀差为 4.0 mm,连续运行 24 h 后,第 2 天早上低压胀差稳定在了 4.9 mm,随后维持此状态连续切缸运行至采暖季结束。

2 次试验结果证实:如果直接将中压排汽作为冷却蒸汽会导致低压胀差超限,必须对该股蒸汽进行减温处理才可保证机组长周期安全切缸运行。

5.2 水蚀损伤试验验证

该机组于 2008 年 12 月投产,2017 年 9 月进行了切除低压缸进汽的相关改造,切缸前机组已经投运了 10 年。

图 6 为切缸前、后末级叶片出汽边根部状态。图 6a 为切缸前的叶片出汽边叶根,已经有了一定的水蚀损伤;图 6b 为 2018 年 6 月第 1 次开缸检查时末级叶片出汽边根部的状态,图 6c 为 2019 年 6 月第 2 次开缸检查时末级叶片出汽边根部的状态,经过连续 2 年的切缸运行,叶片出汽边根部损伤并没有明显加深,说明切缸后的水蚀变化非常缓慢。



a 切缸前末级叶根出汽边
a The last stage blade root on steam outlet side before cylinder cutting
b 切缸后第 1 次开缸检查
b The first cylinder deformation inspection after cylinder cutting
c 切缸后第 2 次开缸检查
c The second cylinder deformation inspection after cylinder cutting

图 6 末级动叶出汽边叶根水蚀

Fig. 6 Water erosion of the last-stage blade root on steam outlet side

由 5.1 章节知,冷却蒸汽是进行了喷水减温后引入低压缸的,为了验证旁路系统的工作性能,开缸

后对低压首级叶片进汽边也进行了详细排查。

图7a为第1次开缸时的状态,可以看出叶片有部分铁锈;图7b为第1次开缸检查喷砂后的叶片状态,作者现场观察并亲自用手触摸,发现首级叶片几乎没有损伤;图7c为第2次开缸检查时首级叶片的状态。2次开缸检查证实,首级叶片没有因为喷水减温而出现水蚀损伤,充分论证了加装的冷却蒸汽系统工作性能非常可靠。

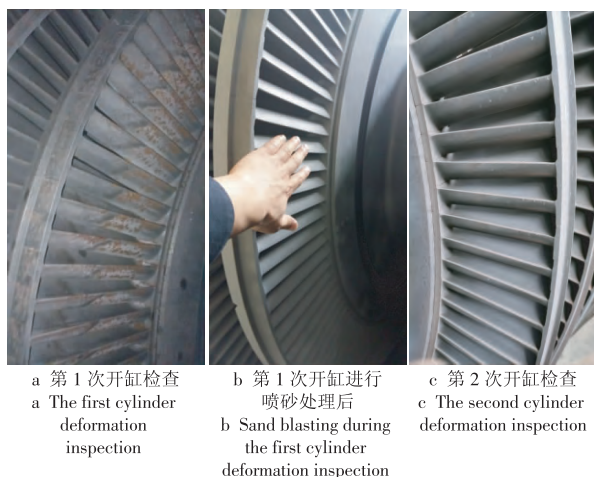


图7 切缸后低压首级叶片水蚀

Fig.7 Water erosion of the first-stage low-pressure blade after cylinder cutting

5.3 叶片颤振试验验证

该机组于2016年5月进行过大修,运行1年后于2017年9月开缸进行试验前状态记录。开缸发现动叶拉筋共3处原修复好的焊口裂开,现场焊接修复后,于2017年采暖季进行切除低压缸进汽试验,连续切缸运行1个采暖季后,2018年6月进行了第1次开缸检查,发现仅有1处原修复好的拉筋焊口裂开,如图8所示。



图8 拉筋断开位置

Fig.8 Breaking site of the lacing wire

为进一步检查叶片内部损伤,对其进行着色探伤检查,叶片没有裂纹等损伤。通过拉筋损伤可以看出,切除低压缸进汽后,叶片动应力是小于常规运行动应力的。

2019年6月进行了第2次开缸检查,发现低压转子有3处断裂,但均为以前旧的断裂位置,现场技

术分析认为,拉筋多处断裂与切缸运行关系不大,是抽凝运行造成的,因此没有对转子叶片进行喷砂和着色探伤,仅对拉筋断裂处进行焊接修复后就合缸恢复运行了。

疲劳寿命预估是学科内的难题,尤其对于已经服役多年的机组,其剩余寿命很难评估,但从该机组开缸后叶片颤振所反映出的情况看,将冷却蒸汽流量控制在其额定排汽流量的1.0%~1.5%,叶片的颤振危害就可以有效规避。

6 结论

(1)切除低压缸进汽,将低压缸冷却蒸汽流量控制在其额定排汽流量的1.0%~1.5%,可以有效规避叶片颤振危害;必须对冷却蒸汽进行减温处理才可避免叶片超温、胀差超限,保证长周期安全切缸运行;缸后喷水长期投运,叶片出汽边水蚀变化非常缓慢。

(2)切除低压缸进汽,在相同锅炉蒸发量的情况下,可增加采暖抽汽量约140 t/h,机组发电负荷可下降约25 MW。

(3)切除低压缸进汽,在保证相同供热能力的情况下,可降低机组发电负荷约58 MW,大大提高了机组深度调峰的能力,在满足供热、调峰的同时,减少了凝汽冷凝损失。

参考文献:

- [1]李则衡,陈磊,路晓敏,等.基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J].电网技术,2017,47(7):143-150.
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 47(7): 143-150.
- [2]裴哲义,王新雷,董存,等.东北供热机组对新能源消纳的影响分析及热电解耦措施[J].电网技术,2017,41(6):1786-1792.
PEI Zheyi, WANG Xinlei, DONG Cun, et al. Analysis of impact of CHP plant on renewable energy accommodation in Northeast China and thermoelectric decoupling measures[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1786-1792.
- [3]裴哲义,王彩霞,和青,等.对中国新能源消纳问题的分析与建议[J].中国电力,2016,49(11):1-7.
PEI Zheyi, WANG Caixia, HE Qing, et al. Analysis and suggestions on renewable energy integration problems in China[J]. Electric Power, 2016, 49(11): 1-7.
- [4]李刚.供热汽轮机实现大范围热电解耦的方案探讨[J].技术与市场,2017,24(3):50-51.
LI Gang. Discussion on the scheme of large-scale thermoelectric decoupling of heating turbine[J]. Technology and Market, 2017, 24(3): 50-51.

- [5] 唐树芳, 唐郭安, 刘帅. 300 MW 机组新型凝抽背供热改造技术分析[J]. 工程技术研究, 2018, 31(15): 88-89.
TANG Shufang, TANG Guoan, LIU Shuai. Technical analysis of new condensing extraction backpressure heating retrofit technology of 300 MW unit[J]. Engineering Technological Research, 2018, 31(15): 88-89.
- [6] 李树明, 刘青松, 朱小东, 等. 350 MW 超临界热电联产机组灵活性改造分析[J]. 发电技术, 2018, 39(5): 65-70.
LI Shuming, LIU Qingsong, ZHU Xiaodong, et al. Flexibility transformation analysis of 350 MW supercritical cogeneration unit[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 65-70.
- [7] 居文平, 吕凯, 马汀山, 等. 供热机组热电解耦技术对比[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 115-121.
JU Wenping, LYU Kai, MA Tingshan, et al. Comparison of thermo-electric decoupling techniques for heating units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 115-121.
- [8] KOXTKVT A T. 汽轮机末级动叶栅在非设计工况下的振动[J]. 郑叔琛, 译. 国外透平, 1984, (24).
KOXTKVT A T. Vibration of turbine last stage moving cascade under non design condition[J]. Translate by ZHENG Shuchen. Overseas Turbine, 1984, (24).
- [9] 孟凡林. 665 毫米末级叶片在小容积流量工况下的试验研究[J]. 汽轮机技术, 1986, 28(6): 24-29.
MENG Fanlin. Experimental study of 665 mm last stage blade under the condition of small volume flow[J]. Turbine Technology, 1986, 28(6): 24-29.
- [10] 王仲博. 小容积流量下汽轮机末级长叶片可靠性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(4): 45-51.
WANG Zhongbo. Experimental study on reliability of last stage long blade of steam turbine under small volume flow[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 1987, 7(4): 45-51.
- [11] 刘万琨. 汽轮机末级叶片颤振设计[J]. 东方电气评论, 2007, 21(4): 7-13.
LIU Wankun. Flutter design for steam turbine last blade[J]. Dongfang Electric Review, 2007, 21(4): 7-13.
- [12] 周盛, 郑叔琛. 蒸汽轮机叶片颤振研究[J]. 力学与实践, 1986, 8(1): 13-17.
ZHOU Sheng, ZHENG Shuchen. Study on blade flutter of steam turbine[J]. Mechanics in Engineering, 1986, 8(1): 13-17.
- [13] 佚名. 大功率汽轮机叶片安全运行问题[J]. 热力发电, 1974, 3(7): 30-43.
Anonymous. Safety operation of blades of high power steam turbine[J]. Thermal Power Generation, 1974, 3(7): 30-43.
- [14] 夏宝鸾, 杜鲜明, 郑德澍. 国外大型汽轮机事故的一些情况[J]. 热力发电, 1974, 3(7): 88-125, 127.
XIA Baoluan, DU Xianming, ZHENG Deshu. Some cases of large steam turbine accidents abroad[J]. Thermal Power Generation, 1974, 3(7): 88-125, 127.
- [15] 刘帅. 沈阳金山能源股份有限公司切除低压缸进汽改造可行性研究报告[R]. 杭州: 华电电力科学研究院有限公司, 2017: 44-49.
- [16] 刘帅. 沈阳金山能源股份有限公司切除低压缸进汽工程总结报告[R]. 杭州: 华电电力科学研究院有限公司, 2018: 3-9.
- [17] 刘帅, 高新勇, 孙士恩, 等. 一种用于切除低压缸进汽的热电联产系统: 201820288317.3[P]. 2018-03-01.
- (本文责编: 刘芳)
-
- 作者简介:**
刘帅(1990—), 男, 陕西西安人, 工程师, 工学硕士, 从事叶轮机械结构强度与振动特性分析、火电机组热电解耦技术等方面的研究(E-mail: 240867583@qq.com).
-
- REN Tianlong. Study on oil and gas boiler vibration of overseas EPC project[J]. Boiler Technology, 2015, 46(2): 27-29.
- [12] BAUKALC EJR. The john zink combustion handbook[M]. Florid: CRC-Press, 2001.
- [13] 沈引根. 伊拉克 Wassit 油气锅炉燃烧器烧损及油枪漏油的原因分析[J]. 锅炉技术, 2014, 45(4): 49-52.
SHEN Yingen. Analysis of the cause of burning loss and oil leakage of the burner of Wassit oil and gas boiler in Iraq[J]. Boiler Technology, 2014, 45(4): 49-52.
- (本文责编: 刘芳)
-
- 作者简介:**
朱少春(1988—), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 工程硕士, 从事海外电站热机专业技术管理工作(E-mail: zsc_hust@163.com).