

外高桥三期工程 1000MW 超超临界机组调试期的节能减排与技术创新

冯伟忠

(上海外高桥第三发电有限责任公司,上海 200137)

摘 要： 在外高桥三期工程 2 台 1000MW 超超临界汽轮发电机组调试阶段,高标准、严格要求,以又好又快地完成调试项目及节能减排为目标,以技术创新为抓手,以完全不同于传统的启动方式,成功实现多项世界上首创的运行技术,如:不启动给水泵、静压状态下的锅炉上水及热态水冲洗技术;大型汽动给水泵组低速启动及全程调速运行技术;直流锅炉蒸汽加热启动和稳燃技术;直流锅炉低给水流量疏水启动技术以及带旁路启动高动量清洗技术等,大大提高了机组的启动和运行安全性,简化了系统和控制策略,并使启动用油及用电呈数量级下降。并通过合理安排辅机调试和启动方式,改革冲管和带旁路清洗工艺等,在全面提高调试质量的同时取得了巨大的节能减排效益。

关键词： 超超临界;调试;节能;启动

作者简介： 冯伟忠 (1954-2),男,教授级高级工程师,总经理,研究方向为超超临界发电技术。

中图分类号： TK2 T 9; M621

文献标识码： A

文章编号： 1001 2 9529 (2008) 06 2 0001 2 05

Key words: ultra 2supercritical; debugging; energy2saving; starting2up

FEN G W ei2zhong

近年来,随着全球变暖趋势的加剧,节能减排已经成为国际社会的共识。外高桥三期工程,建设 2 台 1000MW 超超临界汽轮发电机组。自项目的策划和方案论证,至机组完成试运行并投产,始终以节能减排为主线。项目伊始,投资方就明确地将工程建设目标确定为“国内领先,国际先进”。因此,对系统进行引进技术基础上的全面优化和技术创新便成了这项工程最主要的抓手。而机组的调试阶段是实现这一系列的优化和技术创新的最主要的过程。

1、外高桥三期工程的总体调试思路

1.1 对调试阶段的认识和定位

根据国内规范,在完成基本的调试项目,并通过 168h 满负荷试运行后就可以投产。由于规定从锅炉点火冲管至完成 168h 应小于 90d,对于大机组而言,要使机组调试到完全满足设计要求是困难的。因此,在机组投产后仍有半年的试生产期,在此期间,还可以进一步做一些试验及深入的细调工作。在外高桥二期引进 2×900MW 超临界机组的建设期间,基于外方的坚持,合同的带负荷调试期为 5 个月(机组并网发电至 168h 试运行结束),远远长于国内规范。但是,机组投产后并不安排试生产期,直接进入商业运行。二期工程实际执行的结果是两台机组的带负荷调试均为 4 个月。由于调试期相对充裕,调试标准高,工作细致且充分,机组投产后的自动

化水平,可靠性和经济性等各项指标均名列国内前茅。虽然调试期的电价远低于商业运行,但机组投产后上佳的表现使企业获得了丰厚的收益,与之相比,延长调试期所减少的发电收入可以忽略不计。实践证明,这样的调试安排更符合“科学发展”的理念。因此,虽然三期工程为国产项目,但对于调试期的安排,各投资方一致赞同参照二期。此外,相当部分的设计优化和技术创新也需要安排充分的时间,通过调试阶段进行试验、实践和完善,从而使机组的综合性能更上一层楼。

1.2 有关调试启动程序和标准

外高桥二期和三期工程的主设备均采用了德国技术,从二期的调试实践来看,在许多方面德国的标准远高于国内。例如,按中、美、日等国的技术规范,在新机组的调试阶段,允许蒸汽品质可远低于正常运行标准,通过不同负荷阶段的“洗硅”等调试步骤,不断改善汽水品质以逐步达到生产标准。在此过程中,不可避免地造成大量低品质的蒸汽进入汽轮机,这必然会对汽轮机的通流部分产生一定的伤害。而德国的超超(超)临界机组,即使在调试阶段,也必须执行正常运行的蒸汽品质标准。因此,在汽轮机启动前,要经过一个锅炉带旁路并以不低于规定的热负荷运行(清洗)的过程,经过2~3个星期的时间,直至主、再热蒸汽及凝结水质等完全符合标准后才能冲转汽轮机,以确保汽轮机叶片不受侵害。当然,这一期间的燃油、燃煤及厂用电等消耗惊人,且不产生任何发电效益。但考虑到汽轮机的叶片一旦受损是不可逆的,因此从长远的经济性着眼,这样的启动程序是有益的,外高桥二期工程的实践也充分证明了这一点。因此,外高桥三期工程的调试,将毫无疑问地参考这一经验。

1.3 调试期的节能与创新的意义

根据以上论述,安排较为充裕的调试期,执行先进合理的调试启动程序,高标准、严要求,符合社会和企业长远的利益。但对调试的要求越高,调试期内的燃料和电力等资源的消耗和排放量越大,对于2台百万级机组的项目,仅不产生电力的调试用燃料费的开支就要逾亿。以外高桥二期为例,在整个调试期内燃用的轻柴油量就达21 000 t,按目前的油价,其总值高达1.4亿。若再加上燃煤和外购厂用电,项目的资金压力甚为可观。因此,尽可能地降低工程投资,对于提高机组投产后的企业竞争力也相当重要。因此,如何通过创新,全面优化进程,达到节油、节煤和节电,又好又快又安全地完成机组调试,无论对社会还是对企业,都是一项利在当前、功在长远的工作。

2、外高桥三期工程机组启动方式的全面创新和节能减排

大型超超(超)临界机组启动,需要消耗大量的水、电、油、煤、蒸汽等资源,时间长,且这一阶段的风险远远高于机组的正常运行时期。而超超(超)临界机组特有的氧化皮脱落以及固体颗粒侵蚀问题也主要发生在这一阶段。另外,一般的启动阶段,基于不充分燃烧下的油烟粘性强,为防止其对电除尘极板的污染,纯燃油及煤油混烧阶段不允许投电除尘,从而大大增加了这一阶段的污染物排放。通过外高桥二期工程的实践,我们深切体会到了全面优化和改革大型超超(超)临界机组的启动方式的必要性和紧迫性。通过对国内外直流锅炉不同启动方式以及相应的优、缺点和存在问题的深入研究,在理论上取得了一系列的重大突破。在此基础上,我们对传统的机组启动方式进行了全面的颠覆和创新,研究并设计出了一整套全新的启动方

式。在对系统做了相应改进后,从第一台锅炉的点火启动冲管阶段起便陆续进行试验并付诸实施,取得了一系列世界首创和领先的成果。2.1 成功实现世界上首次不启动给水泵、静压状态下的锅炉上水及热态水冲洗

在 2007 年 11 月 11 日第一台机组首次冲管前,成功实现世界上首次不启动给水泵、静压状态下的锅炉上水及热态水冲洗,其清洗效果远远优于传统方法。在完成了水冲洗并进行第一次锅炉冲管时,锅炉汽水分离器的水质就达到了含铁量仅为 $131.8 \mu\text{g/L}$ 的水平,其疏水可直接回收。这在以往是不可想象的。这种水冲洗方法不用启动给水泵,也不用点火加热,节约了大量的燃料和厂用电,并且操作简单,可控性好。由于冲洗的水温高,且整个被冲洗受热面内的冲洗介质均处于汽水两相流,极大地改善了冲洗效果。而已被清洗水洗出并携带的垢污不会因为炉内燃烧加热而在向火侧内壁再出现二次沉淀(结垢)。由于锅炉水质的迅速改善,在冲管过程中就能对汽水分离器的疏水进行回收,大大减少了系统的热量和工质损失。而且,由于锅炉受热面和给水泵同时得到了相当程度的预热,大大改善了启动和运行条件,缩短了锅炉的点火启动加热过程,也显著提高了系统的启动安全性。由于给水压力高,常规管板卧式高压加热器的管板极厚(1 000 MW 超超临界双列高加的管板厚度为 565 /600 mm,单列高加的管板厚达 680 /800 mm),其抗热应力冲击的能力差,对投运的操作要求很高。而在静压上水和热态清洗过程中,相当于在对给水泵进行预热的同时,实际对高压加热器也进行了预热,这对后续投入高压加热器极为有利,可大大减少高压加热器投运时的热应力冲击,确保了高压加热器的安全性。

2.2 成功实现了世界上首次大型汽动给水泵组低速启动及全程调速运行

外高桥三期工程在国内首次采用了 100%容量的汽动给水泵,自配凝汽器,可单独启动,无电 动给水泵。在第一台机组首次冲管时,成功实现了世界上首次大型汽动给水泵组低速启动及运行,并实现了泵组的全程调速运行。“外三”汽动给水泵额定转速为 4 700 r/m in。为避开临界转速区域,该给水泵组的最低运行转速设定为 2 700 r/m in。在机组启动阶段,这一高速启动方式会造成较大的能量损耗,由于对应于最低启动转速的启动压力高,而此时锅炉尚未起压,故必须采用泵的出口调节阀进行压力和流量调节,直到锅炉运行压力不断提高至接近给水泵的出口压力,调节阀全开时才进入调速方式运行。在此过程中,由于给水泵存在最小运行流量,且转速越高,其最小运行流量越大,而此时的锅炉并不需要太多的给水流量,故最小流量阀必须在较高的压力下返回较多的流量,整个给水系统不但损失大,而且控制方式复杂,并且容易造成最小流量阀冲蚀并泄漏,而这种泄漏在运行中是无法处理的,这会造成长久的损失。为此,我们经过深入的理论研究,打破常规,提出了“大型汽动给水泵组低速启动及运行”的创新思路和实施方 案,并通过与供货外商的沟通协调,取得了外方的支持。在第一次汽动给水泵整组启动试验中,低速运行和全程调速试验均取得了圆满成功。目前,这一大型汽动给水泵组低速启动及运行方式已在两台锅炉包括冲管在内的的所有各次启动中均得到了很好的应用,目前已作为标准的启动方式。这不仅大大降低了锅炉启动时的能量损耗,还提高了机组效率,大大简化了系统控制策略,提高了设备运行安全性。

2.3 成功实现世界首创的直流锅炉蒸汽加热启动和稳燃技术

传统的煤粉锅炉燃油点火启动方法,耗油量大,费用高。而近些年来的一些少油甚至无油的点火启动方法,不同程度存在着煤粉燃尽率低,安全风险较大的问题。为突破这一瓶颈,我们研究开发了直流锅炉蒸汽加热启动和稳燃技术。该技术的总体思路,是采用蒸汽替代燃油和燃煤对锅炉进行整体预加热,使锅炉在点火时已处于一个“热炉、热风”的热环境。该启动方法的系统简单,实施容易,所增加的费用远低于等离子点火等其他省油方法。采用这一启动方法后,锅炉在启动中所需的燃油强度大为降低,燃油过程大大缩短,从而使总体耗油量下降了一个数量级以上,目前,每次锅炉启动的点火用油仅为 12~18t;同时,还可以大大减少厂用电及燃煤量,使整个启动过程中所消耗的能源总量和启动总成本显著降低,从实践来看,仅节省厂用电一项的价值就超过了加热蒸汽的费用。另外,直流锅炉采用蒸汽加热启动法和稳燃技术,不仅将锅炉由原来的冷态启动转为热态启动,并且使烟风系统的运行条件更优于热态启动,极大地改善了锅炉的点火和稳燃条件,显著提高了锅炉的启动安全性。在第一台机组调试期间,创造了最低断油稳燃负荷 19.1%BMCR 的世界纪录,大大提升了锅炉启动和运行的安全性。采用这一方法,还得到了其他一系列的附加好处,如,因加热蒸汽取自相邻汽轮机已经发过电的抽汽,这将显著提高该机组的发电效率;点火阶段很好的热环境,极大地提高了该阶段的燃油和燃煤的燃烧率,彻底消除了燃油的“黑烟”现象,防止了油烟粘结在空预器等尾部受热面而危及锅炉安全,电除尘可及早投入,显著改善了该阶段的环保效应;由于大大提高了启动阶段的排烟温度,极大地降低了空预器结露和堵灰的概率,提高了锅炉运行经济性和安全性。对于配有 SCR 脱硝系统的锅炉,同样可杜绝其在启动阶段可能出现的低温结露、堵灰、催化剂中毒以及未燃尽烟灰的粘附甚至二次燃烧的威胁等。

2.4 成功实现世界首创的直流锅炉低给水流量疏水启动技术

超超(超)临界锅炉通常采用的启动方式有两种,一种是疏水启动(如外高桥二期 900MW 超临界锅炉),这种方法系统简单,可靠性高,投资省。但存在启动阶段的汽水损失大,热态和极热态启动时间长等缺点。另一种是带炉水循环泵启动(如目前 1000MW 超超临界锅炉的普遍设计),这种方法的优缺点正好与前一种完全相反。通过二期工程几年以来的实践和总结,我们利用蒸汽加热启动法的水冷壁流量分布均匀性好的有利条件,研究开发了兼有这两者优点,避免各自缺点的低流量(15% BMCR)疏水启动技术,取得了圆满成功。采用该技术,取消炉水循环泵,大大简化了启动系统和运行控制,提高了安全性和可靠性,减少了启动损失,但仍具有常规带炉水循环泵锅炉的极热态启动时间短,损失小的特点。在第一台锅炉冲管期间,低流量疏水启动技术试验成功后,从机组整组启动及并网直至投产,以及第二台锅炉冲管直到并网发电至今,现在的所有启动(包括冷态、温态、热态和极热态的各种状态的启动),均采用此项技术,节约了大量的燃料和工质,取得了很好的成效。

2.5 成功实现世界首创的带旁路启动高动量清洗

对于超超临界机组而言,所面临的最大的技术风险是蒸汽氧化和固体颗粒侵蚀(SPE)问题,目前全世界的超超临界机组都被这一问题所困扰。另外,随着主蒸汽参数到达 600℃ 等级,传统的冲管和启动技术已不能满足实际需要。高温高压的锅炉和系统管道在热加工过程中,其内壁会产生较厚的硬质氧化层,且很难在后续工艺中完全被清除。由于施工阶段的酸洗是针

对直管段的内壁清洗所设计,对热加工部分产生的厚氧化层的清除作用有限。而现有的冲管技术,受冲管工艺和临冲管材质所限,冲管时的主、再热汽温比额定运行温度低 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$,系统内的氧化物难以被充分剥离并冲净。这必然造成机组从第一次启动起就面临氧化物的逐渐剥落和固体颗粒侵(SPE)问题。这也能解释超超(超)临界机组在经若干次启动后,汽轮机内效率就会明显下降;机组运行一年后的开缸检查时,会发现汽轮机的叶片已出现了明显的固体颗粒侵蚀现象。为应对上述问题,经过几年来的研究,我们从设备选型及设计阶段开始,在外三工程中就采取了一系列的蒸汽氧化和固体颗粒侵蚀的综合防治措施。在此基础上,我们针对 SPE 问题主要发生在机组启动阶段的特点,进一步研究开发了带旁路高动量清洗技术。采用这一技术,配以特殊的旁路系统和控制方式,能在每次汽轮机启动前最大限度地剥离氧化物,并将系统内已剥落的氧化皮,包括滞留在零流速区的颗粒物等全部直接送至凝汽器,使机组彻底杜绝 SPE 问题。从外三工程首台机组的第一次整组启动起,我们就坚持采用这一技术,收到了极佳的效果。第一次启动,在主蒸汽达到最高动量阶段,凝结水含铁量从 $108.7\mu\text{g}/\text{l}$ 急剧上升至 $1756\mu\text{g}/\text{l}$ 并出现混浊,事后停机检查时,在凝汽器内竟清理出约 20kg 含铬的氧化物。据统计,在尔后的每次启动阶段,平均能在凝汽器内收集约 4kg 的氧化物。试想,如果这部分硬质氧化物进入了汽轮机,将会发生怎样的后果。在调试阶段经过十数次的启、停并进入 168h 试运行前的一次停机机会,我们用工业内窥镜通过窥视孔对高压缸第一级叶片进行了拍照和录像,发现叶片依然光亮如新!

2.6 调试阶段的节电在调试中,节电的措施贯穿始终。如前述的静压上水及热态清洗的全过程;锅炉均不启动风机。使整个启动过程的耗电量呈数量级下降。从冲管到带旁路清洗,以及每一次机组的整组启动, 50% 热负荷以下的时间都占到很大的比例,其中冲管的热负荷均在 48% 以下。在此过程中,除有试验需要外,送、引风机尽可采用单侧运行,这进一步使厂用电大幅下降。在第二台机组的调试阶段,对于循环冷却水需要量不大的部分辅机试转,如汽动给水泵试转等,则采用打开循环水联络阀借用邻机冷却水的方法,大大节约了厂用电。

2.7 又好又快地完成调试项目。常规的直流锅炉稳压冲管,水冷壁出口一般都处于湿态。基于该处在运行中实际为干态,运行温度比冲管时高出一百多度,为探索改善冲管效果,在第一台锅炉的冲管期间,尝试了干态冲管,发现冲管效果明显优于传统方法。经总结归纳,在第二台锅炉冲管时,全部采用干态冲管,收到了很好的效果。实际冲管次数比第一台减少了近一半,既大大降低了煤、油电及蒸汽等资源的消耗,又有效节约了时间。按 SIEMENS 和 ALSTOM 推荐的带旁路启动及清洗程序,时间长,消耗大,凝结水前置过滤器及精处理系统的负担重,且主蒸汽管得不到有效的冲洗。另外,由于清洗时的参数低,热负荷及蒸汽动量小,与蒸汽温度高达 600°C 的实际运行工况并不吻合。因此,即使清洗的指标合格,亦不能确保运行阶段的安全。为此,在外三工程的调试阶段,对这一工艺进行了全面改进。其主导思路是改原来的稳定热负荷为变负荷,蒸汽参数为变参数,冲洗途径为变回路。同时,主蒸汽管也能得到充分的冲洗。另外,经一个冲洗程序周期(约 $8\sim 10\text{h}$),凝结水已被严重污染后立即停炉,并将系统内的存水全部排尽和重新进水,而后再重复前一个过程。经实践下来这种与漂洗衣服类似的方法非常有效,在经过 2 次停炉放水、3 次循环清洗后,蒸汽参数就满足了汽轮机冲转的要求,大大节约了这

一阶段的能源消耗,同时,也彻底杜绝了机组在高温及高负荷情况下系统内氧化皮及颗粒物的再次析出,确保了机组的安全性和经济性。

3、结语

外高桥三期工程,第一台机组于2007年12月17日并网发电。2008年初南方发生雪灾时,外三在毫无准备的情况下,从1月15日起,根据上海市政府和电力公司的要求,中止调试,直接带到满负荷并加入顶峰保电的行列,持续整整20d,在为电网及社会做出重大贡献的同时,也充分显示了机组的高性能。保电结束后,公司并未将保电时段作为完成168h试运行处理,仍然坚持精益求精地完成剩余的35个调试和试验项目,而后在3月18日晚以国内最高水准的100%负荷FCB试验圆满结束了调试,并于3月26日完成168h试运行并热态移交生产。从投产后一个多月的运行业绩和技术经济指标来看,远优于国内现有的最好水平,故达到原先制定的“国内领先,国际先进”的建设目标应无悬念。另外,第二台机组已于4月27日并网发电,4月29日便已达到满负荷,目前正在进行带负荷调试,从目前的在线数据显示,其综合技术经济指标进一步优于第一台机组。外高桥三期工程的建设,我们以技术创新为抓手,高标准,严要求,又好、又快、又省、又安全地进行了机组调试,取得了一系列优异的成绩,以实际行动为节能减排作出了应有的贡献。