

M701F3 型燃气-蒸汽联合循环机组的水洗系统优化

陈林霄¹, 杨新健²

(1. 广东惠州天然气发电有限公司, 广东 惠州 516082;
2. 广东省特种设备检测研究院珠海检测院, 广东 珠海 519002)

摘 要:对 M701F3 型燃气-蒸汽联合循环发电机组进行了简要介绍, 详细阐述了燃气轮机进行水洗的必要性, 通过计算最佳离线水洗周期和水洗时不建立抽真空两种技改对机组的水洗系统进行优化, 通过试验对比表明两项技改能够为企业带来明显的经济效益。

关 键 词:燃气-蒸汽联合循环; 燃气轮机; 最佳离线水洗周期; 压气机

中图分类号: TK477

文献标识码: B

文章编号: 1009-2889(2015)01-0062-04

M701F3 型联合循环机组高负荷运行时, 压气机需提供 600 kg/s 以上的空气, 以满足燃气轮机正常运行的需要。由于空气中含有各种污物、灰尘和烟雾等悬浮物质, 虽然在压气机进口处装有一粗一细两级空气过滤器, 但因为空气中大约 90% 以上的悬浮物直径小于 2 μm , 压气机进气过滤器不可能将这些物质除尽, 这些物质进入压气机后, 随着运行时间的不断增加, 将会逐渐吸附在压气机叶片表面而产生积垢。压气机叶片积垢后就改变了叶片的气动性能, 导致机组出力、效率及运行性能逐步降低, 对燃气轮机安全运行造成很大影响, 具体表现如下^[1]:

(1) 压气机通道面积变小、升力系数减小、阻力系数增大, 导致压气机的流量、压缩比和效率降低。

(2) 喘振边界线下移, 使得实际运行工况更接近喘振边界, 机组的安全运行裕度减少, 压气机运行时容易发生喘振。

(3) 燃气轮机进气量减少, 机组在升负荷过程中, 燃气轮机容易进入 BPT (叶片通道温度) 控制模式, 使得机组升负荷缓慢。

由以上三点可知燃气轮机水洗系统对于恢复联合循环机组性能很有必要。由于机组燃料为天然气, 燃料品质很高, 对燃气轮机透平的污染很小, 与燃油发电机组不同, 积垢现象不明显。燃气轮机透

平在日常运行过程中无需水洗, 燃气轮机水洗指的主要是压气机的水洗。在线水洗需要频繁进行、工作量大、水洗效果不佳^[2], 机组一般采用离线水洗。燃气轮机水洗周期的确定在以前主要是根据经验, 随意性比较大。由于对机组必须水洗周期的不明确, 在负荷高峰期, 限于调峰、消缺需要, 有时长时间无法安排机组水洗, 会发生机组性能急剧恶化, 实际最高负荷、升负荷速率、机组效率等性能参数大幅下降的情况, 严重影响机组的运行经济性 & 调峰性能。合理安排水洗周期, 将使机组性能始终保持在较高水平。机组必须按水洗周期安排水洗, 可以有效避免性能骤降的情况, 使经济效益最大化。此外, 在水洗时不建立真空环境, 能够减少更多的用电成本。本文就从最佳水洗周期和水洗时不建立真空两方面的经济效益最大化出发, 对这两种方法进行分析研究。

1 机组水洗系统流程

M701F3 型单轴燃气-蒸汽联合循环发电机组的工质为天然气和水蒸气。在保证工况下, 机组出力为 391.8 MW, 发电效率为 56.7%。由燃气轮机、蒸汽轮机、余热锅炉、发电机及其他设备系统组成。

压气机水洗的用水来自机组除盐水供水管道, 水洗水箱内的除盐水经过水洗水泵升压后, 首先通

收稿日期: 2014-07-01 改稿日期: 2014-07-31

作者简介: 陈林霄 (1988-), 男, 河北廊坊人, 工学硕士, 主要从事燃气-蒸汽轮机联合循环机组的设备运行优化及管理工作, E-mail: chenlinxiao2@163.com。

过供水压力调节阀调压,再通过离线水洗供水阀或在线水洗供水阀,送到离线水洗喷头或在线水洗喷头,进入压气机,如图 1 所示。为了防止水洗水泵憋压,在水洗水泵出口设置有再循环管路,保证水洗水泵最小流量。离线水洗与在线水洗喷头安装位置如图 2 所示,图中喷头后的阴影部分表示水洗喷头的作用范围。

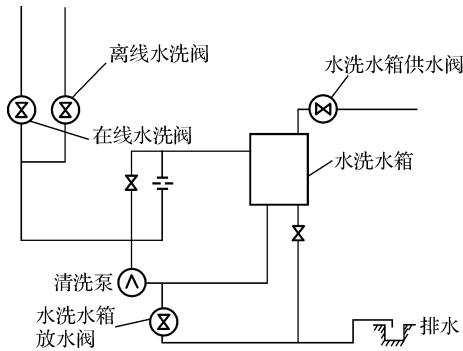


图 1 压气机水洗流程图

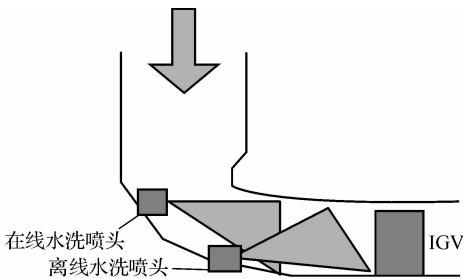


图 2 离线水洗与在线水洗喷头安装位置

2 压气机离线水洗不抽真空的分析

考虑到对蒸汽轮机的影响,在单轴联合循环的 M701F3 型燃气轮机压气机离线水洗时,需要机组建立真空系统。离线水洗时,轴系在 SFC(静止变频器)启动装置带动下以转速 710 r/min 转动,离线水洗式时建立真空主要出于以下考虑^[3]:

- (1) 防止蒸汽轮机低压缸叶片产生鼓风热量使得低压缸排气温度升高,损坏末级叶片。
- (2) 减小 SFC 装置的功率。

当机组满负荷运行时,蒸汽轮机低压缸末级叶片承受的压力最大,包括高速旋转产生的离心力,蒸汽推动叶片产生的切向应力。压气机离线水洗时,蒸汽轮机低压缸末级叶片只承受低速旋转产生的离心力及空气阻力产生的切向应力。根据离心力与转速的二次方成正比可知,压气机离线水洗时蒸汽轮机低压缸末级叶片承受的离心力只有额定转速的

5.5%,末级叶片承受的空气阻力产生的切向应力非常有限。因此,不抽真空进行水洗时,只要低压缸排气温度、低压缸末级静叶金属温度、低压缸排气导流板金属温度在报警值以下就可以。另外,不抽真空时,低压缸末级叶片的工况比机组满负荷时低压缸末级叶片的工况要安全很多。同时,如果机组建立真空系统,虽然能减小 SFC 在高盘时的功率,但需要相关的辅机(包括凝结水泵、循环水泵、启动锅炉等)投运运行,并耗用较多的辅助蒸汽。从节能的角度来说,不抽真空水洗更节能。

综合以上分析可知,单轴联合循环的 M701F3 型燃气轮机压气机水洗时,可采用不抽真空水洗方法。在此基础上,通过实验(抽真空与不抽真空情况下离线水洗)得出:SFC 启动电流变化不大,不抽真空的情况下,高速盘车时 SFC 电流增大约 60A,功率增大约 500 kW。经过分析可得出表 1 所示的经济性对比。从表中可见,不抽真空的离线水洗更节能。

表 1 不抽真空与抽真空离线水洗经济性对比

	凝汽器抽真空		凝汽器不抽真空
	机组、系统全停	部分公用系统在运行	
水洗时间/min	70	70	70
循环水泵(单台)运行时间/h	3.2	0	0
循泵耗电量/(kW·h)	2 900	0	0
凝结水泵运行时间/h	2.5	2.5	0
凝泵耗电量/(kW·h)	450	450	0
真空泵运行时间/h	2.5	2.5	0
真空泵耗电量/(kW·h)	250	250	0
耗用辅助蒸汽/t	15	10	0
SFC 运行时间/h	1.2	1.2	1.2
SFC 耗电量/(kW·h)	1 900	1 900	2 500
总耗能	耗电 5 500 kW·h + 15t 辅助蒸汽	耗电 2 600 kW·h + 10t 辅助蒸汽	耗电 2 500 kW·h

3 最佳离线水洗周期的分析

离线水洗可使机组基本恢复到最佳工况运行,但是频繁的进行离线水洗,消耗大量的厂用电和除盐水,成本较高;同时使得燃气轮机及余热锅炉热通

道部件经受较大的热应力,缩短机组寿命。因此,选择合适的离线水洗周期至关重要。依据三菱公司制造时的设计推荐,机组原始的水洗周期方案如下:

(1) 机组距上次水洗后的实际运行小时数达 1 300 h 以上,应及时安排水洗。

(2) 机组满负荷运行时,转换到基准状态下的相关性能参数较上次水洗后满负荷运行时的值下降了一定程度,如压缩比下降达 2%,机组最大出力下降达 4%,其他性能参数也有明显下降,这时应及时安排水洗。

(3) 机组发生升负荷速率异常缓慢,且机组运行较长时间(大于 1 000 h)未水洗时,应及时安排水洗。

(4) 从效益最大化考虑,经验值为 700 运行小时。

由于机组的设备老化,外界环境的改变,以及作为两班制机组,经常需要启停机,最佳水洗周期会随着机组的性能改变而发生变化,因此原来的额定最佳水洗周期也是在变化的。

3.1 离线水洗周期的计算模型

在一个水洗周期内的离线水洗总成本主要由停机成本和运行附加成本两部分组成。运行附加成本主要是由于压气机叶片结垢,流量减小,燃气轮机的出力减小;停机成本主要是由于水洗停机而造成的少发电而带来的损失。最小的离线水洗成本的目标函数如(1)式所示:

$$\text{Min}M_{\text{mean}} = \frac{M_{\text{run}} + M_{\text{stop}}}{T} \quad (1)$$

$$M_{\text{run}} = \Delta W_1 C_e + \Delta F_1 C_f \quad (2)$$

$$\Delta W_1 = \int_0^T P_{gt} k t dt \quad (3)$$

$$\Delta F_1 = \int_0^T P_{gt} (1 - kt) 0.25 k t G_0 dt \quad (4)$$

$$M_{\text{stop}} = \Delta W_2 C_e + M_w - \Delta F_2 C_f \quad (5)$$

$$\Delta W_2 = (P_{gt} (1 - kT) + P_{st}) T_{\text{stop}} \quad (6)$$

$$\Delta F_2 = G_0 (1 + 0.25 k T) P_{gt} (1 - kT) T_{\text{stop}} \quad (7)$$

式中: M_{mean} 为离线水洗总成本, M_{run} 为运行附加成本, M_{stop} 为停机成本, T 为离线水洗周期, ΔW_1 为燃气轮机组跟清洁状态下相比一个水洗周期内少发的电量; C_e 为电厂的上网电价; ΔF_1 为燃气轮机组跟清洁状态下相比发同样的电量多消耗的燃料量; C_f 为燃料的价格; P_{gt} 为机组清洁状态时的额定功率; k 为机组的性能恶化速率; t 为机组运行时间, G_0 为机组清洁状态下燃料消耗率; ΔW_2 为停机期间联合循环机组少发的电量; M_w 为一次水洗所消耗的去

离子水(包括加热)和清洁剂的成本; ΔF_2 为停机期间节省的燃料量; P_{st} 为联合循环机组汽轮机的满发功率; T_{stop} 为停机冷却和水洗总共耗费的时间。

对于式(4)和式(7)中,燃料消耗量主要是通过厂家提供的曲线得出,出力下降与热耗率增加基本上是 4:1 的关系。由于每次水洗过后,机组达不到上次检修后的性能状况^[2],所以 P_{gt} 是变化的值,对于水洗过 n 次之后,则

$$P_{gt} = P_{iso} \varphi^n \quad (8)$$

式中: P_{iso} 为上次检修后的额定功率, φ 为水洗恢复系数,现场检修时发现压气机的水洗效果很好,基本能够达到检修前水平,根据经验, φ 取值为 0.94。将 M_{mean} 对 T 求偏导,当偏导数为零,且默认其它值或者因素为定值时,得出最佳离线水洗周期 T_{opt} 的近似数学模型如(9)式所示^[4]:

$$T_{\text{opt}} \approx \sqrt{\frac{M_w + (P_{gt} + P_{st}) T_{\text{stop}} C_e - G_0 C_f P_{gt} T_{\text{stop}}}{(0.5 C_e + 0.125 G_0 C_f) k P_{gt}}} \quad (9)$$

3.2 最佳水洗周期的实例计算

以某 M701F3 型的联合发电机组为例,计算机组的最佳水洗周期,对于某次大修之后,燃气轮机基本上能够恢复到额定功率 270 MW,汽轮机也基本达到额定功率 120 MW,一次水洗使用的除盐水成本约 800 元,由于除盐水清洗效果满足生产要求,未加清洗剂。每次水洗时需要停机冷却至少一天,加上水洗、烘干等过程,耗时约为 48 h。该厂的上网电价为 0.53 元/(kW·h),使用的为澳洲天然气,价格为 1.31 元/m³,燃料消耗率为 0.174 m³/(kW·h),燃气轮机的平均性能恶化速率为 0.051%/h。通过以上数据得出离线水洗周期与离线水洗总成本的变化曲线如图 3 所示。

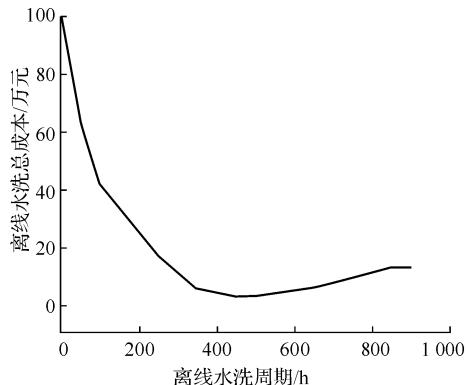


图 3 离线水洗总成本与离线水洗周期的变化曲线

由图 3 可知,该厂的离线水洗总成本开始随着离线水洗周期的增加逐渐降低,之后有小幅升高,符

合实际规律,曲线最低对应的最佳离线水洗周期为 452.8 h。实际生产中无法停机水洗时,可以适当延长离线水洗周期,但不要提前,从图 3 能够清楚地看出水洗周期缩短后水洗成本增加的速率比水洗周期延长时高。因此,水洗周期宜迟不宜早。

最佳水洗周期不是不变的,由于每次水洗后机组不可能恢复到上次检修前的性能状态。随着水洗次数的增加得出的最佳水洗周期如表 2 所示。由表 2 可知,随着水洗次数的增加,最佳离线水洗周期逐渐缩短。

表 2 最佳离线水洗周期与水洗次数的变化

水洗次数	最佳离线水洗周期/h
0	452.8
10	428.6
20	406.5
30	394.3

3.3 试验验证

在一年的时间里,对两台 M701F3 型联合循环机组进行对比试验,#1 机组采用原始的水洗方案,#2 机组用最佳的水洗周期方案。通过 SIS 系统计算出该年平均燃料消耗量,#1 机组燃料平均消耗量为 $0.175\text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$,#2 机组燃料平均消耗量为 $0.169\text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

3.4 最佳水洗周期效益分析

该厂#1、#2 机组都为调峰机组,年运行时间基本都在 4 500 h 左右,即#1 机组共进行 10 次水洗,#2 机组共进行 6 次水洗,#1 机比#2 机多 4 次停机成本。每发 $1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 可得 0.226 元,由于机组不是全天连运,4 次停机水洗即少运行大约 100 h,从而得出#1 机组比#2 机组多的停机成本 P_1 约为 $0.226\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})\times 100\text{ h}\times 391\,800\text{ kW}\approx 885.5\text{ 万元}$ 。#2

机组比#1 机组多节约的燃料总价 P_2 约为 $(0.175\text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h}) - 0.169\text{ m}^3/(\text{kW}\cdot\text{h}))\times 391\,800\text{ kW}\times 4\,500\text{ h}\times 1.31\text{ 元}/\text{m}^3\approx 1\,385.8\text{ 万元}$ 。因此,采用最佳水洗周期方案每年节约 $P = P_2 + P_1 = 2\,271.3\text{ 万元}$ 。

4 结论

1) 机组不抽真空水洗,可以减少大量燃气、水、电的损耗,大幅降低离线水洗成本。M701F3 型燃气轮机离线水洗时采用不抽真空的方法是安全、经济、可靠的。

2) 采用从效益最大化角度出发计算的最佳水洗周期,给电厂的带来的效益明显,但是未考虑水洗对设备寿命带来的折损成本,因此最佳水洗周期的计算模型还有待进一步完善。

3) 由于实际生产过程中无法停机水洗时,从利益最大化方面考虑,离线水洗周期宜迟不宜早。

参考文献:

[1] 广东惠州天然气发电有限公司. 大型燃气-蒸汽联合循环发电设备与运行机务分册[M]. 北京:机械工业出版社,2013:226-230.

[2] Schneider E, Demircioglu S, Franco S, et al. Analysis of compressor on-line washing to optimize gas turbine power plant performance[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo. . Orlando, FL, United States: ASME,2009:591-599.

[3] Basendwah A A, Pilidis P, Li Y G. Turbine off-line water wash optimization approach for power generation[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo. . Barcelona, Spain: ASME,2006:65-76.

[4] 程元,陈坚红,盛德仁,等. 联合循环发电机组燃气轮机水洗策略优化模型研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(26):95-100.

Washing System Optimization of M701F3 Gas-Steam Combined Cycle Units

CHEN Lin-xiao¹, YANG Xin-jian²

(1. Guangdong Huizhou LNG Power Co., Ltd., Guangdong Huizhou 516082, China;
2. Zhuhai Institute of Special Guangdong Equipment Inspection and Testing Centers, Guangdong Zhuhai 519002, China)

Abstract: There is a case of M701F3 gas-steam combined cycle generating units, the necessity of washing gas turbine is explained. By calculating the optimal off-line washing cycle and washing without vacuum, the units were optimized. Comparison tests indicate that the technical innovations can bring significant economic benefits for the enterprise.

Key words: gas-steam combined cycle; gas turbine; best offline washing cycle; compressor