

西门子 GUD 1S. V94.3A 燃气-蒸汽联合 循环发电机组的应用与优化

陈慧聪

(浙江萧山发电厂, 浙江 杭州 311251)

摘要: 为便于同行能更好地了解和掌握燃气轮机的基本情况, 介绍了西门子 V94.3A 型燃气轮机基本结构与运行特性, 总结了该燃气轮机在我国运行中存在的一些突出问题, 并提出了优化和改进的措施与方法, 以便将燃机技术普及并成熟应用到发电厂。实践结果表明这种新型燃气-蒸汽联合循环发电机组发电技术, 体现了其机组整体运行安全可靠、效率高、排放低、启停迅速, 且有利于电网性能调节等显著的特点。

关键词: 燃气轮机; 结构特点; 运行优化

中图分类号: TM611.31

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)06-0757-05

Application and optimization of Siemens GUD 1S. V94.3A gas-steam combined cycle power units

CHEN Hui-cong

(Zhejiang Xiaoshan Power Plant, Hangzhou 311251, China)

Abstract: Aiming at helping counter-parts to understand gas turbine better and promote gas turbine technology in energy industry, basic structure and operation characteristics of SIEMENS V94.3A gas turbine was introduced. A summary of some protruding problems of this type of gas turbine operating in our country was given. Method for optimization and mitigation was provided as well. The results in practice indicate that gas and steam combined cycle power generation, as a new energy technology, has a remarkable characteristic of safety, high efficiency, low emission, fast start and shut down, and it is easy to adjust grid performance.

Key words: gas turbine; structure characteristics; operation optimization

0 引言

我国在“十·五”、“十一·五”规划中把以天然气为燃料的燃气轮机发电列入重点发展项目,“西气东输”工程的实施,东海、渤海天然气的开发,以及引进国外的液态天然气(LNG),为发展天然气发电创造了良机。近几年来,本着“以市场换技术”的原则,国家已先后进行了3次捆绑招标,在实际燃气轮机设备制造本土化和国产燃气轮机技术开发方面都取得了良好的成果。前两次捆绑招标涵盖了18个电厂,共41台9F级燃气轮机发电机组。

第1批捆绑招标的半山电厂、张家港电厂、望亭电

厂、漕泾电厂等机组,机型使用GE公司的PG9351FA型燃气轮机或三菱的M701F型燃气轮机,均投入商业运行。

在第2批捆绑招标中,有4个燃机电厂共9台机组采用了德国西门子V94.3A型燃气轮机,这在国内尚属首次引进,由上海电气集团和西门子组成联合体进行总包供货。主要应用于上海石洞口电厂、浙江萧山电厂、郑州燃气电厂、中原燃气电厂、厦门LNG电厂,其中浙江萧山电厂两台燃机已于2007年10月和2008年4月相继通过168运行,并投入商业运行。

本研究主要针对西门子GUD 1S. V94.3A燃气—蒸汽联合循环发电机组在实际使用过程中的运行、控制及优化作了分析与探讨。

1.3 “一键启动”功能

整个机组的启动功能设置成“一键启动模式”,即在单元协调的环境下,通过“一键”操作方式,按预先拟定的控制逻辑,完成所有辅助系统的启动,余热锅炉的上水,燃机的启动与自动并网,汽轮机的自动、冲转、暖机与并网过程,这大大减轻了运行人员的工作量。并在整个程序的启动过程中设置一个断点,即“汽水品质确认按钮”,只有在汽水品质保证的前提下,通过运行人员的手动确认,才能允许汽轮机的自动启动。在启动初期,燃气轮机受到余热锅炉启动速度的限制,当余热锅炉汽包壁温差正常、各阶段汽包压力允许瞬变速率满足的前提下,才能进行燃气轮机的带负荷过程。汽轮机冲转启动后,燃气轮机的带负荷速率受到汽机启动应力监督程序的限制,引入高压自动主气门、高压调门、高压缸、高压轴、中压轴 5 个温度信号,当任意一个温度超过所规定的允许瞬变值时,应力程序就限制燃机的进一步带负荷过程。当汽轮机并入发电机运行后,随着燃机负荷的增加,汽轮机从最初启动的定压运行模式,逐渐进入滑压运行模式,跟随燃机负荷的变化而变化。

单元协调的“一键启动模式”同时包含了“一键停机”模式,它是启动模式的一个反向执行程序,在执行“一键停机”的过程中,汽轮机、燃机全部自动完成减载与停机操作,但程序中间也设置个别断点,比如“凝汽器热备用”、“除氧器热备用”等,便于运行人员掌控对辅助设备的停机要求。这种设计极大地满足了燃气轮机适合于日开夜停运行方式。

2 V94.3A 型燃气轮机结构

V94.3A 型燃气轮机由压气机、燃烧室、透平组成。压气机和透平为多级轴流设计,压气机共 15 级,采用先进的可控扩压三维设计,压比 17.0,前 4 级叶片上采用 TBC 涂层,进口设一级电动可调导叶,并在第 5 级和第 9 级设置 3 个防喘放气口^[4-6]。

透平为 4 级,其中第 1 级采用单晶叶片。转子由中心拉杆叠盘式组成,端面齿传扭、中空轴和轮盘由中心拉杆及拉杆螺母连接,使用液压机构可调整拉杆的预紧力。本研究利用中空的转子将压气机内的部分空气抽出到透平动叶作冷却使用,从而使转子的温度变化几乎跟透平汽缸变化一样快,有利于机组快速启动。端面齿传扭能保证单个叶轮的径向膨胀和良好的对中功能,并且在转子不解体的情况下,可直接进行压气机、透平叶片的更换。

燃烧室采用环形结构,内置陶瓷隔热片,并逆时针布置 24 个 DLN 低 NO_x 燃烧器,每个燃烧器独立设置点火装置。可通过入孔进入燃烧室,检查热通道的所有部件,并单独更换一些陶瓷隔热片,而不需要对透平汽缸进行解体,极大地方便了检修工作。其本体结构如图 3 所示。

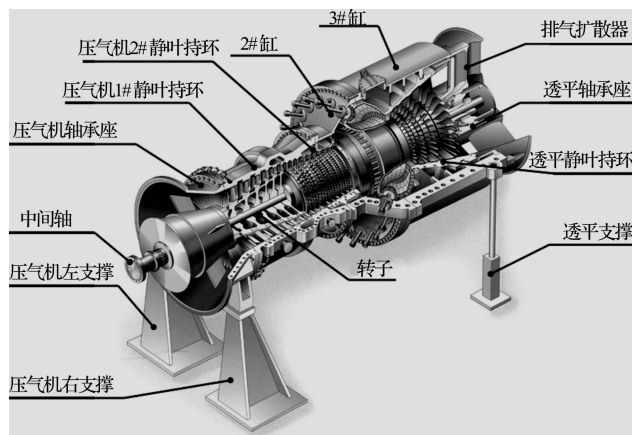


图3 燃气轮机本体结构图

3 V94.3A 型燃气轮机燃烧特性

V94.3A 型燃气轮机的燃烧方式仅扩散与预混两种方式,从点火到额定转速运行时,采用扩散燃烧方式,并在并网前,投入值班燃烧器,同时将扩散燃烧模式切换为预混燃烧模式,使用值班火焰的主要作用是确保预混燃烧时有一个稳定的点火源。

3.1 设计理念及燃烧原理

V94.3A 燃气轮机所采用的环形燃烧室,是带有 24 个周向布置的干式低 NO_x 排放混合型燃烧器(DLN)组成,如图 4 所示。该燃烧室的环形燃烧空间是用敷有氧化物—陶瓷涂层的高温合金钢制成遮热板组合而成的。冷却空气将通过遮热板之间气隙排出,它既能防止高温的热燃气排出燃烧空间,又能在遮热板上形成一层冷却气膜。

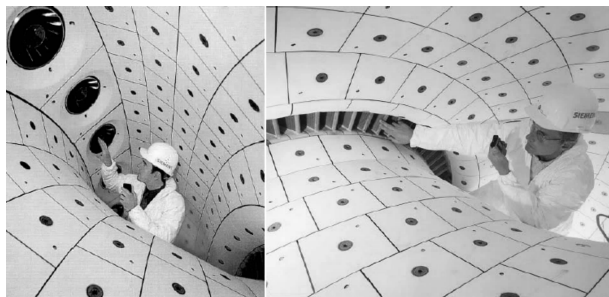


图4 燃烧器出口与透平进口结构图

所谓的扩散燃烧方式就是把天然气与空气分别供

入燃烧区,一边混合、一边燃烧的方式。

把流经紧急关断阀和扩散控制阀后的天然气引入燃烧器扩散管路接口,然后与空气流经内旋流器混合燃烧。这种供给方式是模拟液体燃料的喷射而设计的,它的特点是燃料着火之前需要依靠紊流扰动与氧化剂混合。由于燃烧在高温区的过量空气系数 α 始终保持在较小的数值,而大部分空气经外向旋流器流入燃烧区的后部,以达到燃烧补偿的目的。在燃烧中,因为混合过程比燃烧过程缓慢得多,它的火焰比较长,但燃烧的稳定范围却宽得多,同时燃烧区的温度较高,这对启动点火和升速阶段需要较高的燃烧强度和燃烧温度,对于产生稳定的火焰和提高燃烧效率是有利的。燃烧器结构图如图 5 所示。

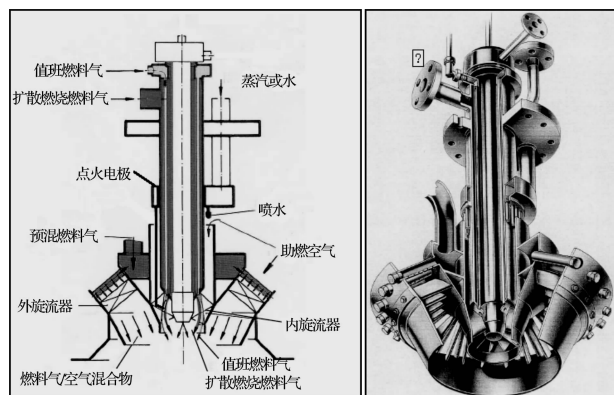


图 5 燃烧器结构图

研究表明,燃烧过程中 NO_x 的生成率不仅是火焰温度的函数,而且是可燃混合物在火焰温度条件下逗留时间的线性函数。而燃气轮机燃烧室中温度常常在 $1\ 800\ ^\circ\text{C} \sim 2\ 000\ ^\circ\text{C}$ 左右,它远远高于 N_2 与 O_2 起化学反应生成 NO_x 的起始温度 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$ 。因而在组织燃烧过程中必然会产生数量较多的 NO_x ,一般可达 $200\ \text{mg}/\text{m}^3$,这超过了许多工业化国家的环保规定。

为了抑制 NO_x 的生成,西门子引入预混燃烧方案,把天然气与空气预先混合以后,再供到燃烧室进行燃烧。即把流经紧急关断阀和预混控制阀的天然气引入燃烧器预混接口,然后与空气流在外旋流器内混合成可燃气体,由安装在内旋流器中心的值班火焰喷嘴引燃。它的特点是由于燃烧时预混气的过量空气系数 α 较大,燃烧区的燃料溶度和反应温度都比较均匀,从而控制燃烧温度不高于 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$,使得 NO_x 的生成低于 $50\ \text{mg}/\text{m}^3$ 的水平。所以干式低污染燃烧的基本措施是“贫预混”,即预先通过对燃料和预混空气的配比加以严格控制,也就是说预混的可燃气体是按大于 1 的过量空气系数构成的。

在预混模式下运行时,当负荷降低时,由于压气机

进口空气流量基本不变(压气机进口导叶没有关的状态),而燃料量会随着负荷的下降而减少,此时预混气中各处的燃料溶度普遍降低,过量空气系数 α 进一步增大,甚至会超出天然气的可燃范围。为克服这个缺点,本研究设置了值班喷嘴,当机组负荷变化时,流经值班喷嘴控制阀的天然气流量基本不变,这样就可以保证在它附近区域的过量空气系数控制在 $\alpha = 1.0 \sim 1.1$ 之间,以达到一个稳定的点火源,流经值班喷嘴的天然气流量约为燃烧室满负荷天然气量的 $5\% \sim 10\%$ 左右。

3.2 机组启动过程

V94.3 燃气轮机启动过程是首先利用发电机作为同步电机,通过一套启动变频装置 SFC ($0 \sim 2\ 100\ \text{r}/\text{min}$ 可调节),来拖动燃气轮机及发电机转子,并将转速带动到 $780\ \text{r}/\text{min}$ 左右进行清吹 $10\ \text{min}$,清吹结束后, SFC 停止运行,燃气轮机转速惰走到 $300\ \text{r}/\text{min}$ 时,天然气扩散控制阀首先开启,最小点火流量投入运行,确保扩散控制阀开度满足最小点火流量的需要,同时天然气紧急关断阀开启,24 个点火变压器也全部投入点火状态,点火变压器计时及火焰监视计时器同时跟随触发。点火的同时,启动变频装置 SFC 开始拖动燃气轮机转子加速,当点火变压器投入运行时间达 $9\ \text{s}$ 后,自动退出运行,火焰监视时间达 $12\ \text{s}$,并确认两个红外线火焰探头已经全部检测到火焰,燃气轮机就进入正常燃烧和加速状态,否则程序自动执行停机步骤,关断燃料控制伐。

当燃气轮机点火成功后,透平所做的功与启动变频装置 SFC 一起拖动转子进行加速,根据预先设定的升速斜率,升速监视系统监视一旦转速太快或跌落到规定范围以下,保护触发停止机组运行。在转速达 $660\ \text{r}/\text{min}$ 时,扩散控制阀开度增加,第 1 次燃料梯度加入,确保燃气轮机的有效加速。在转速达 $1\ 500\ \text{r}/\text{min}$ 时,扩散控制阀再次开启,第 2 次燃料梯度加入,确保燃气轮机加速超过 $1\ 560\ \text{r}/\text{min}$ 的自持转速。在转速达 $1\ 980\ \text{r}/\text{min}$ 左右时,第 3 次燃料梯度加入, $2\ 100\ \text{r}/\text{min}$ 启动变频装置就退出运行,此时燃气轮机完全依靠燃烧产生的功率来进行升速。

当转速达 $2\ 940\ \text{r}/\text{min}$ 时,发电机起励,因此转入准备并网状态。燃气轮机由点火到额定转速,耗时大概 $4\ \text{min}$ 左右,在额定转速下,等待 3 个防喘放气阀全部关闭后,值班控制阀开启,天然气比例控制器投入运行,此时扩散控制阀缓慢关闭,而预混控制阀开启,以保持总输入燃料量不发生改变,在大概 $50\ \text{s}$ 左右的时间内完成整个切换过程。燃烧切换结束后,发电机就自动并网,并带上 $5\ \text{MW}$ 最小启动负荷,控制系统在检

测到发电机并网后,以单元协调的模式完成燃气轮机的自动加载过程。而燃气轮机一旦进入预混燃烧模式,也就意味着进入低 NO_x 燃烧方式,此时汽轮机因 SSS 离合器处于脱扣状态,而处于定速盘车运行模式,仅仅是利用旁路系统完成升温升压操作。当余热锅炉蒸汽相关参数满足汽轮机冲转后,进行汽轮冲转,SSS 离合器啮合,汽轮机接带负荷。

4 主要问题和优化措施

GUD 1S.V94.3A 型燃气-蒸汽联合循环机组以先进的设计理念与控制手段,极大地减轻了运行人员的劳动强度和维护成本。但由于保护系统设置考虑过于繁杂,会导致单元协调程序在执行时因个别条件不足而难以执行下去,延长了机组的启动时间;同时有些保护条件的苛刻或相对比较单薄,引发了频繁跳机的事件,对电网系统的稳定运行带来了一些不安全因素,为此本研究进行了一系列的优化与改进措施,达到了良好的效果。

4.1 启动时间的缩短与优化

4.1.1 燃机加载速率控制

冷态启动,燃机的加载速率完全决定了余热锅炉的温度水平,根据余热锅炉承受干烧的温度水平以及升温升压时对应压力下饱和温度的变化值,适当提高和精确控制燃机排烟温度水平,在汽机并网前引入汽包壁温差和主汽集箱温度变化速率,在汽机并网后引入高压缸、高压轴、中压轴温度变化速率,作为燃机加载梯度的依据。热态启动和二班制运行期间,做好余热锅炉的保温保压工作,防止应力极限导致加载梯度受限。

4.1.2 汽水品质控制

西门子要求,在汽机冲转中对蒸汽品质的要求非常高,要求蒸汽的氢导控制小于 $0.3 \mu\text{s}/\text{cm}$,期望值在 $0.2 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以内,但几乎国内所有的燃机电厂均无法满足这个要求,严重制约了机组的启动时间。为此,从安全与经济的角度考虑,同时参考同类型煤机对蒸汽品质的控制标准,将氢导的范围更改到 $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$ 以内进行汽机冲转。

4.1.3 暖机标准控制

汽机在暖机过程中,采用高压与中压缸同时进汽的方式,转速控制在 $900 \text{ r}/\text{min}$,同时要求中压转子中心温度超过 200°C 才确认暖机结束。由于暖机转速很低,进汽量较小,而逻辑控制的标准是高压缸暖机结束后才进行中压缸暖机,从而使整个暖机时间非常长,利用破

坏真空和降低冲转参数等方式,缩短机组的暖机时间。

4.2 保护逻辑梳理与整治

辅助系统的启动程序条件不满足会引起整个协调程序难以执行下去,为此本研究将经常碰到的节点问题全面的梳理和整治,重点检查仪控系统元件的性能,在不影响保护的前提下,适当放宽额度,确保程序的顺利执行。针对主保护仅仅设置单点保护的逻辑,本研究进行全面的设备改造,如高压旁路后温度保护、低压轴封温度保护、低压旁路减温水压力开关、燃烧室加速度 ACC 保护等,进行 3 取 2 逻辑修改;对压气机进口导叶 IGV、高中低压旁路、天然气调节阀等单位位置反馈测量机构改造为双位置反馈;对压气机防喘放气阀、透平叶片冷却空气调节阀等位置反馈等采用接近式开关的主保护进行逻辑内指令与反应用“与”门信号进行修改;对辅助设备的温度与振动保护测量系统在逻辑内采用速率判断的方式,避免通道故障或测量坏点引起的保护误动,进一步提高机组运行的安全和可靠。

5 结束语

随着天然气清洁发电进程的不断加快,9F 级燃气-蒸汽联合循环发电技术在我国已具规模化发展与应用,它清洁、高效、敏捷、安全的运行特点逐被公众得到认可,已是今后电力系统发展的趋势,掌握燃气轮机的运行与管理显得尤其重要。研究表明,国外高科技燃气轮机技术完全能在国内消化吸收并得到充分的应用。本研究根据国内天然气资源的开发利用和燃气发电厂技术的运行特点,研究对西门子燃机设备特点、控制方式以及运行经验的总结交流,为今后燃机电厂的建设、运行以及相关的技术改进提供了更加广泛的借鉴与参考依据,具有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 林汝谋,金红光. 燃气轮机发电动力装置及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 刘万琨,魏毓璞,赵 萍,等. 燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 清华大学. 燃气轮机与燃气—蒸汽联合循环装置[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [4] SIEMENS. V94.3A 燃气-蒸汽联合循环机组 DCS、TCS 组态逻辑[M]. SIEMENS,2006.
- [5] SIEMENS. V94.3A 燃气轮机设备规范手册[M]. SIEMENS,2006.
- [6] 王小荣. V94.3A 燃气-蒸汽联合循环机组运行规程[M]. 杭州:浙江萧山发电厂,2006. [编辑:张 翔]