

汽轮机最有利真空循环水泵变频驱动控制系统

张承慧, 程 金, 夏东伟

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘 要: 在火电厂中循环水流量大多采用节流调节方式, 控制效果差, 不能保证凝汽器工作在最有利真空值, 而且循环水泵电耗严重。研制了一种循环水泵变频调速控制系统, 利用 PLC(可编程控制器)设计合理的控制逻辑, 实现平稳启停和切换, 保证最有利真空值的实现, 使汽轮机经济运行。同时分析了汽轮机的经济运行方式, 给出了最有利真空值的计算原则; 详细介绍了系统的控制原理、硬件结构及 PLC 程序的设计, 并给出了应用效果。

关 键 词: 火电厂; 最有利真空; 可编程控制器; 循环水泵; 变频调速; PID 控制

中图分类号: TM621 文献标识码: A

1 引 言

汽轮机的经济运行是火电厂节能技术改造的重要内容。由于循环水泵所提供的冷却水流量是影响汽轮机真空度的主要因素, 因而其控制历来是汽轮机经济运行的一个重要问题。目前国内大多采用节流方式调节汽轮机的循环水流量, 而对循环水泵采取定速控制^[1]。这种控制方式造成大量的能量耗费在阀门上, 并且控制粗糙, 不能精确的控制冷却水流量, 造成汽轮机的真空度不稳定, 不能保证汽轮机在最有利真空位置处稳定运行^[2]。随着大功率机组的大量投入运行, 各电网中的中等功率机组相继参入调峰运行, 循环水泵大多数运行时间在变工况下工作。因此, 在能源资源日益紧张的今天, 研究如何对循环水泵进行调速控制使汽轮机经济运行, 具有十分重要的社会价值和经济价值。

通过分析汽轮机的经济运行原理, 提出了一种新的先进的调速流量控制方案, 采用 PLC、PID 和变频技术对循环水泵进行调速控制, 组成“汽轮机最有利真空循环水泵变频驱动 PLC 控制系统”。该控制系统能够根据运行负荷的变化自动调节汽轮机循环水泵系统水泵的数量和转速, 达到最有利真空的控制目的, 从而改变了火电厂以往的状况, 实现了汽轮

机真空度的高精度控制和经济运行, 且运行稳定, 可靠性能高, 节能效果显著。

2 汽轮机的经济运行方式与循环水泵流量的控制

2.1 汽轮机的最有利真空度

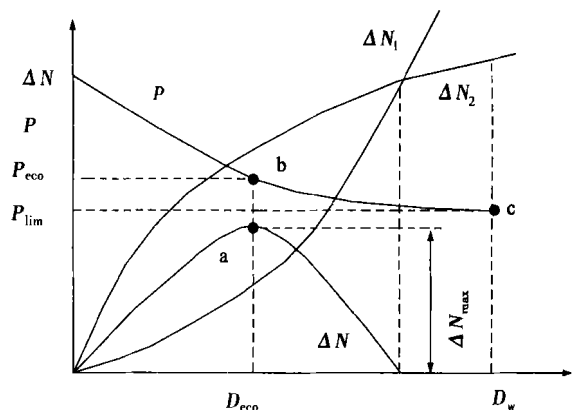


图 1 汽轮机最有利真空的确定

由汽轮机的运行原理可以知道, 运行中的凝汽器压力主要取决于蒸汽负荷、冷却水入口温度和冷却水流量。冷却水温一般取决于自然条件, 于是在蒸汽负荷一定的情况下就只有靠增加冷却水的流量来提高凝汽器的真空度, 但是当冷却水流量增加使真空度提高的同时, 循环泵的投资及运行电耗将大幅增加。为了提高机组运行的经济性, 真空度提高汽轮机功率的增量 ΔN_1 应大于为增加循环水量水泵所多消耗的功率 ΔN_2 。显然, 汽轮机的最有利真空 P_{ecc} (又称为经济真空), 应位于净增功率 $\Delta N = \Delta N_1 - \Delta N_2$ 的最大值处^[3], 此时汽轮机工作在经济运行方式^[3]。如图 1 所示, D_w 为冷却水流量, p 为汽轮机的凝汽器真空, ΔN 为功率差值, ΔN 在冷却水流量

收稿日期: 2003-03-10; 修订日期: 2003-05-19

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y2001G01); 山东省优秀中青年科学家基金资助项目(02BS020)

作者简介: 张承慧(1963-)男, 山东滕县人, 山东大学教授, 博士生导师

比较小的时候随冷却水量的增大而增加,到 a 点达到最大,如果再进一步增大冷却水水流量, ΔV 反而开始减小,直至为零。从图中可以看出,由 a 点引等水量线与凝汽器压力线相交的 b 点所对应的真空值 p_{eco} 就是最有利真空^[4], a 点所对应的冷却水水量 D_{eco} 就是最有利冷却水水量。

2.2 最有利真空度的计算

由上可知,应经过计算分析确定出汽轮机的最有利真空,并以此为依据来控制冷却水的流量,使汽轮机的排气压力尽量维持最有利真空位置,以保证机组在经济运行方式下工作。为了便于在工程应用,本文根据工程实际经验^[4],采用如下计算原则:

- (1) 根据循环水量增加以前的测试数据,计算出凝汽器的传热系数 k_1 和冷却水速修正系数 Φ_{v1} 。
- (2) 根据循环水量增加以后的测试数据,计算出增加循环水量后的水速修正系数 Φ_{v2} 。由公式:

$$k_2 = \frac{k_1}{\Phi_{v1}} \Phi_{v2} \quad (1)$$

求出增加循环水量后的传热系数 k_2 。

- (3) 假设一个排汽压力 p_n , 计算出传热等效平均温差 Δt_{m2} 。由公式:

$$D_{n2} = \frac{\Delta t_{m2} A k_2}{r_2} \quad (2)$$

计算出循环水流量增加后汽轮机排汽量 D_{n2} 。

式中: A —凝冷器换热面积; r_2 —凝汽器潜热。

如果 D_{n2} 的值满足下式(式中 D_{n1} 为循环水量增加前汽轮机的排汽量):

$$\frac{|D_{n2} - D_{n1}|}{D_{n1}} < 0.2\% \quad (3)$$

则认为 p_n 就是增加循环水量后的排汽压力。如果不满足上式,应重新设定排汽压力值进行计算,直至满足为止。

- (4) 根据排汽压力为 p_n , 计算出相对真空和提高的真空度。根据提高的真空度与标准煤耗的关系以及增加循环水流量后的电能耗费,就可以计算出循环水流量增加所带来的经济效益 ΔV 。

- (5) 按照以上步骤重复计算不同流量下增加的经济效益 ΔV , 由图 1 可以确定最有利真空的位置 p_{eco} 。

以上计算分析的原则可以实时计算最有利真空的数值,由此作为依据(PID 调节器的设定值),来调节循环水泵的运行台数和运行转速,控制循环水流量使汽轮机的真空度维持在最有利真空位置,保证机组的经济运行。

2.3 循环水流量的调速控制

图 2 所示曲线为转速 n 一定时水泵的扬程—流量($H \sim Q$) 特性曲线和管阻特性曲线。

$$Q_1 / Q_2 = n_1 / n_2 \quad (4)$$

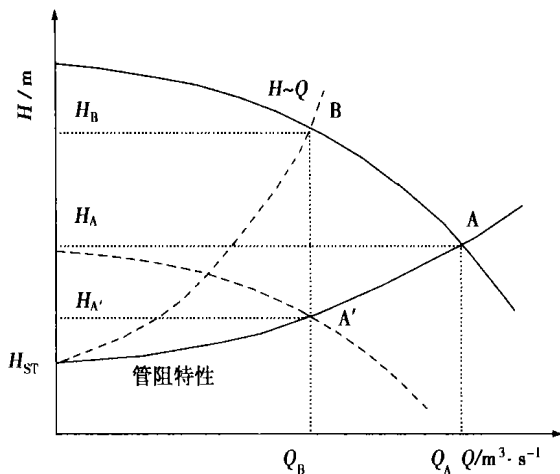


图 2 变频调速节能原理图解

由式(4)可知,控制水泵的转速可以线性的调节水量,其 $H \sim Q$ 特性曲线随着转速的改变在图中平行上下移动(如从 n_A 降到 $n_{A'}$ 时的虚线曲线所示)。

水泵的管阻特性曲线可用式(5)表示:

$$H_e = H_{ST} + S_f Q^2 \quad (5)$$

式中: S_f 为管网阻力系数, H_{ST} 为水泵进口到冷凝器的汽包的位差和压力差之和,它是个定值。 $S_f Q^2$ 为总的水阻力损失,它与流量的平方成正比。管阻特性曲线与 $H \sim Q$ 曲线的交点即为水泵运行的工况点^[4]。

当汽轮机的蒸汽负荷改变时,为了使汽轮机维持在最有利真空位置处运行,要随之调节循环水的流量(假设流量从 Q_A 降为 Q_B)。常用的一种方法是控制调节阀的开度,改变管网阻力系数 S_f ,从而改变管阻特性曲线,如图 2 所示,这时水泵运行的工况点变为 B,对应的流量是 Q_B ,扬程是 H_B 。另一种方法是通过改变水泵的转速,改变水泵的 $H \sim Q$ 曲线,这时水泵运行的工况点为 A' ,转速由 n_A 降到 $n_{A'}$,流量也为 Q_B ,而扬程为 $H_{A'}$ 。

可以看出,与调速方式相比,节流控制方式中有 $(H_B - H_{A'})$ 的扬程浪费在管网中;长期运行能耗十分严重,不利于汽轮机的经济运行。因而循环水泵采用调速运行,节能效果是很显著的。

3 汽轮机最有利真空度循环泵控制系统设计

3.1 系统的控制原理

系统的控制原理框图如图 3 所示。该系统主要由 3 台水泵、1 台变频器、PLC、PID 以及线性压力传感器等组成。

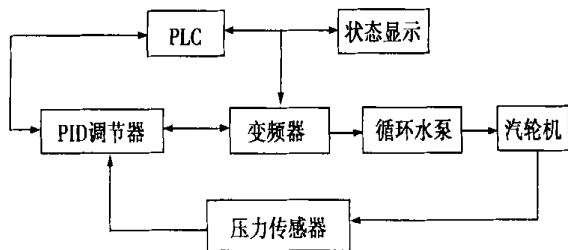


图 3 控制系统主框图

系统采用“一变多定”的控制方式, 利用变频器对循环水泵进行速度控制, 并根据 PID 调节器输出电压信号驱动变频泵电机。PLC、PID 调节器和压力传感器组成闭环反馈控制系统, 用来控制循环冷却水流量。其中, PLC 控制着各台水泵的运行状态(工频、变频、停止), 从而控制水泵的运行台数, 在大范围上控制循环水的流量; PID 调节器根据设定值和反馈值, 自动调整变频器的频率给定输入, 控制变频器对变频泵进行速度调节, 在小范围上控制循环水的流量, 从而使汽轮机的真空度稳定的维持在最有利真空位置。

3.2 控制系统的硬件设计

表 1 PLC 点数分配表

输入	功 能	输出	功 能
I0.0	手动/自动	Q0.0	变频器运行
I0.1	自动启停	Q0.1	BX 滑行停车
I0.2	1 号电机启动	Q0.2	第二频率设
I0.3	1 号电机停止	Q0.3	1 号工频运行
I0.4	2 号电机启动	Q0.4	1 号变频运行
I0.5	2 号电机停止	Q0.5	2 号工频运行
I0.6	3 号电机启动	Q0.6	2 号变频运行
I0.7	3 号电机停止	Q0.7	3 号工频运行
I1.0	压力上限	Q1.0	3 号变频运行
I1.1	压力下限	Q1.1	加泵提示
I1.2	频率上限	Q1.2	减泵提示
I1.3	频率下限	Q1.3	工频降压启
I1.4	1 号电机故障	Q1.4	1 号电机故障
I1.5	2 号电机故障	Q1.5	2 号电机故障
I1.6	3 号电机故障	Q1.6	3 号电机故障
I1.7	真空报警	Q1.7	变频器故障

系统选用的 PLC 为 Siemens S7-200 CPU226, 用来控制 3 台水泵的运行逻辑(加减泵、切换、热备和故障处理), 并检测系统的状态(电机运行方式、变频

器频率上/下限和各种故障等), 实现系统的全自动运行。硬件设计如表 1 所示。由此, 系统可根据最有利真空的位置, 实时调节循环水泵的冷却水流量, 实现最有利真空经济运行。

此外, 为了在故障或检修时保证循环水泵可靠运行和设备安全, 该系统还具有自动/手动切换功能和指定运行功能。

3.3 PLC 程序设计

PLC 控制程序主要完成循环水泵系统最有利真空经济运行的所有逻辑控制功能。整个程序可分为 5 个模块: 状态检测模块、运行逻辑运算块、逻辑控制模块、热备模块和故障处理及显示模块。

3.3.1 状态检测模块

本模块程序的任务是检测控制系统状态, 包括泵电机的运行状态、频率上(下)限信号、各种故障、汽轮机的排气压力状况等, 并将系统状态送入寄存器保存。为了防止干扰引起运行时误动作, 程序对变频器的频率上限(下限)信号、压力状态等信号都进行数字滤波。

3.3.2 泵电机运行逻辑运算块

运算块的作用就是根据系统的状态和泵电机的当前运行状态来确定泵电机的启停、切换以及运行方式(变频/工频)。切换水泵时应遵循以下控制规则:

(1) 当经过滤波后仍有压力下限信号, 且变频器频率已达 50 Hz(频率上限)时, 继续升频至 51 Hz, 然后关断频率输出信号, 延时 1 s, 将该泵切换至工频运行, 然后变频启动另一台空闲泵。

(2) 当经滤波后仍有压力上限信号, 且变频器频率降至 20 Hz(频率下限)时, 切掉变频运行的泵电机, 并将另一台工频运行的泵电机切换为变频运行。

这两条控制规则能够有效的抑制水泵切换时冷却水流量的突变, 使之平滑过渡。切换过程结束后, PID 调节器继续通过检测的真空压力信号, 调节变频器的运行频率, 控制冷却水的流量, 使汽轮机凝汽器在设定真空值处稳定运行。

在程序中, PLC 会根据上述控制逻辑, 设定各台水泵的运行状态字, 形成操作字, 灵活地实现运行水泵数量的增减切换。

3.3.3 逻辑控制模块

逻辑控制块的作用是按照运算块形成的操作字, 使 PLC 输出控制指令, 控制继电器、接触器等低压电器的闭合断开, 从而实现对泵电机切换、启停等控制功能。

3.3.4 热备模块

热备控制模块能够在线监控各台泵电机的运行时间,并且根据现场实际情况确定最有利切换时刻,以尽量减少真空度的波动为原则,实现泵电机的轮流工作,平均承担供水任务,以延长电机寿命,防止水泵生锈导致电机堵转和电机绕组受潮。

3.3.5 故障处理及显示模块

故障处理模块能够实时检测设备的运行状况,及时处理各种运行故障,并显示报警。该模块程序能够不经运算及控制模块迅速处理诸如电机过热、进水温度过高等故障。此外还具有故障消除后自动复位等功能。

3.4 应用情况

该系统已于 1997 年在某热电公司汽轮机组中投入运行,运行表明系统可将汽轮机真空度控制在设定真空值的 $\pm 0.25\%$ 范围内稳定运行,性能稳定,节能效果显著,平均节电率为 35%。

应用表明,循环水泵变频控制系统具有以下优点:

(1) 与节流调节方式相比,调速方式提高了真空度的控制精度,改善了汽轮机机组运行的经济性能。

(2) 适应主机调频的需要。定速泵已不能适应大中型机组的启停和低负荷运行。调速给水泵的出口压力是可变的,因此能满足调频机组给水压力的需要。

(3) 提高机组的安全可靠性。当系统发生故障时,调速水泵可降低转速运行,降低给水压力和流量,在排除事故以后,机组即可重新启动参与运行。

4 结 论

通过分析汽轮机的经济运行方式,设计了一种汽轮机最有利真空控制系统。该系统能够根据最有利真空的计算值,通过控制循环水泵的运行台数和转速来调整循环水流量,使电机组汽轮机工作在最有利真空位置,实现经济运行的目的。其控制技术先进,精度高、稳定可靠。另外,本文给出了一种计算最有利真空值的简便方法。

该系统对于改变目前大多数热电厂循环泵控制精度差、自动化程序低、能源浪费严重的状况,具有重要的现实意义。可广泛的应用于供水、供暖、油田等其它行业领域,将会产生巨大的经济效益,应用前景广阔。本系统已获山东省科技进步二等奖。

参考文献:

- [1] 沈士一. 汽轮机原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1992.
- [2] 陈绍彬. 汽轮机及其辅助设备经济分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 卡别洛维奇 BΘ. 汽轮机设备的运行[M]. 任 曙, 译. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [4] 张承慧. 变频调速系统效率优化控制: 理论及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2001.

(何静芳 编辑)

新机组

优化组合的 Frame 5E 燃气轮机

据《Gas Turbine World》2002 年 9~10 月号报道,原 MS5002D 型机在 ISO 条件下额定功率为 32 590 kW,效率为 29.4%。改进的 MS5002E(Frame 5E)型机在 ISO 条件下额定输出功率为 30 000 kW,效率为 36.4%。

新的 Frame 5E 机使比例放大的 GE10 的轴流压气机与 LM2500⁺ 的动力涡轮模块设计相结合,以便达到比机械传动用的类似 30MW 级燃气轮机更高的效率。

Frame 5E 机的压气机直接由 GE10 设计的比例放大,以便由 11 级压气机提供 17:1 的压比,96 kg/s 的空气流量。

可转进口导叶加第一级和第二级可转导叶能避免低速起动失速并提供流量控制。第四级抽气用于涡轮盘冷却和轴承密封。此外,第七级抽气用于冷却以及起动和停机时的喘振控制。压气机设计采用三维叶型叠加,从而抑制了二次流动和附面层流动,减少由于局部流动分离而造成的损失。

6 个管—环回流式燃烧室安装在压气机出口机匣上。虽然基于“F”级设计,但是“Fr 5E”的燃烧温度更低。结果,“E”的燃烧室具有更保守的设计、更长的部件寿命和更有效的排放控制。

二级轴流式高压涡轮设计结合了先进的航改型叶型冷却技术,减少了冷却空气流量的要求,并使空气冷却的静叶和动叶可以在宽广的功率范围内高效率的运行。

动力涡轮的机械结构实际上与 LM2500⁺ 高速动力涡轮设计的低压模块相同,但是包括了重新设计的叶型和流型,以便适应更高的空气流量。二级重型设计在空气动力学上与燃气发生器相匹配。

(吉桂明 供稿)

temperature air entering a combustion furnace and its flow speed is in no way related to the opening degree of the forced draft fan, but they will increase with an increase in the opening degree of the fume exhaust fan. **Key words:** high-temperature air generator, cold-state experiment, biomass energy, high-temperature air gasification

孔隙结构对石灰石脱硫性能的影响 = The Influence of Pore Structure on the Desulfurization Performance of Limestone [刊, 汉] / LIU Xian-zhou, ZHAO Chang-sui, QIAN Xiao-dong, et al (Shandong Provincial Consulting Institution of Electric Power Engineering, Shandong Ludian Environmental Protection Co., Jinan, China, Post Code: 250100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 77 ~ 80

After undergoing flashing and expansion on a solid-particle pore diameter expansion device limestone particles were investigated for their desulfurization performance on a gas-flow reactor. The results of the investigation indicate that after expansion of the limestone pore diameter there was a relatively great improvement of the transport properties of reaction gases due to an enhancement in the cross-linking quality among the pores, thus decreasing the influence of sintering in the pyrolysis process. As a result, the desulfurization activity in the pore inner surface has increased. Hence, under identical test conditions after the expansion of the pore diameter there will be a significant increase in the desulfurization efficiency of the limestone. **Key words:** flashing, limestone, hole structure, desulfurization

汽轮机最有利真空循环水泵变频驱动控制系统 = A Variable-frequency Drive Control System of a Circulating Water Pump for Allowing a Steam Turbine Unit to Operate at an Optimum Vacuum [刊, 汉] / ZHANG Cheng-hui, CHENG Jin, XIA Dong-wei (Institute of Control Science & Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 81 ~ 84

Currently, thermal power plants adopt in most cases a throttle-governing mode for regulating the flow rate of circulating water. Such a regulating method suffers from poor control effectiveness and is incapable of ensuring that a steam condenser operates at a most favorable vacuum. Moreover, it also results in a high power consumption of circulating water pumps. In view of the above, the authors have developed a variable-frequency speed-governing system, using a programmable logic controller (PLC) to design a rational control logic. This makes it possible to realize a stable start-up, shutdown and the switching-over of the circulating water pumps, thus providing a steam turbine unit with an optimum vacuum for its economic operation. The economic operating modes of the steam turbine unit are analyzed and a method for calculating optimum vacuum values is given along with a detailed description of the system control theory, hardware configuration and PLC program design. Furthermore, some fruitful application results are presented. **Key words:** thermal power plant, optimum vacuum, programmable logic controller, variable frequency governing, proportional-integral-differential control

基于遗传算法的燃煤电站锅炉整体燃烧优化方法研究 = Genetic Algorithm-based Integrated Optimization of a Combustion Process for a Coal-fired Utility Boiler [刊, 汉] / SUN Qiao-ling, SHEN Jiong, LI Yi-guo (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 85 ~ 88

Concerning the combustion efficiency and pollutant emissions of utility boilers a concept is proposed concerning the integrated optimization of a combustion process. In combination with a genetic algorithm and the techniques of an artificial neural-network an investigation was performed of the method of integrated optimization for a combustion process. The results of a simulation indicate that the system of optimized combustion control proposed by the authors can lead not only to sizable energy savings but also to a decrease in nitrogen oxide emissions by flue gases, contributing to a reduction in environmental pollution. Because of the foregoing the proposed system has a great potential for engineering applications. **Key words:** utility boiler, integrated optimization of combustion, BP neural network, genetic algorithm

简单循环船用燃气轮机间冷回热改造方案探讨 = Exploratory Study of a Modification Scheme Incorporating Intercooling and Regeneration for a Simple-cycle Marine Gas turbine [刊, 汉] / XIAO Dong-ming, WEN Xue-you