

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.015

二次再热机组 DEH 建模与分析

朱朝阳¹, 廖金龙², 李蔚², 陈坚红², 盛德仁^{2*}

(1. 淮浙煤电有限责任公司凤台发电分公司, 安徽 淮南 232131;

2. 浙江大学 热工与动力系统研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了更好地研究二次再热汽轮机组控制技术, 针对二次再热机组 DEH 建模的问题, 进行了理论分析与仿真研究。阐述了二次再热机组与一次再热机组的结构区别与特点, 分析了二次再热机组启动方式、控制方案, 重点研究了二次再热机组的动态特性, 建立了二次再热机组 DEH 中各汽缸功率、伺服系统、PID 调节器等各个环节的传递函数模型, 结合超(超)临界机组运行参数, 采用 Matlab 中的 SIMULINK 对模型进行了仿真模拟。结果显示, 实际值能很好地跟随系统给定值, 两者曲线几乎完全重合, 说明建立的二次再热机组 DEH 模型是可行的。

关键词: 汽轮机; 二次再热; DEH; 建模

中图分类号: TK 269; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)10-1232-05

DEH of double reheat steam turbine modeling and analysis

ZHU Chao-yang¹, LIAO Jin-long², LI Wei², CHENG Jian-hong², SHENG De-ren²

(1. Fengtai Power units of Huaizhe coal and electricity Co., Ltd., Anhui province, Huainan 232131, China;

2. Institute of Thermal Science and Power System, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at modeling DEH of double reheat steam turbine to study its controlling technology of double reheat steam turbine, the theory of DEH was analyzed and simulation was conducted. The structure difference between double reheat steam turbine and reheat steam turbine and the characteristics were introduced. The control scheme of double reheat turbine and starting method were analyzed and its dynamic characteristics of double reheat steam turbine was researched especially. Cylinder power, servo system, PID regulator etc. in DEH of double reheat steam turbine were modeled. SIMULINK was used to simulate the model combined with supercritical (ultra-supercritical) unit operation parameters. The results showed the actual value follow the given value well and the actual value curve was almost completely coincided with the given value curve. The results indicate that the model of DEH of double reheat steam turbine is viable.

Key words: steam turbine; double reheat; DEH; modeling

0 引言

随着电力技术的发展, 在提倡高效清洁燃煤发电原则的同时为了提高燃煤发电效率, 汽轮发电机组参数日益提高, 大型超(超)临界发电机组已成为主力发电机组。根据朗肯循环, 可继续提高平均吸热温度来提高机组热效率。二次再热技术相比于现

在的一次中间再热能提高机组的循环热效率 1% ~ 2%, 并能有效地减少氮氧化物和二氧化碳等燃烧污染废弃物。

张学超等^[1]建立了汽轮机组 DEH(数字电液调节系统)系统仿真模型, 整定负荷串级控制系统的调节器参数, 优化了反馈回路投切与阀门控制方式切换的控制算法; 姜杰夫等^[2]利用电力系统综合分析程序中

收稿日期: 2016-07-06

作者简介: 朱朝阳(1970-), 男, 浙江天台人, 高级工程师, 从事汽轮机运行优化, 故障诊断等方面研究。E-mail: zhuchaoyang@hzmdft.com

通信联系人: 盛德仁, 男, 教授。E-mail: shengdr@zju.edu.cn

的用户自定义建模功能,建立汽轮机 DEH 模型,进行仿真校核;孙玉芬等^[3]运用 Matlab 仿真平台建立 DEH 模糊数学模型,在功率控制回路中引入模糊 PID 复合控制策略,提高系统的鲁棒性;阎树田等^[4]利用 Simulink 图形化可视仿真平台对汽轮机 DEH 系统进行了仿真研究,通过建立 DEH 系统的部件和元件模型库,实现了电液控制系统仿真模型的构建,探讨对不同参数变化对 DEH 系统的影响;王超等^[5]在 Matlab/Simulink 环境下,对 DEH 进行动态建模与仿真;张文娜等^[6]建立 DEH 控制系统动态特性的数学模型,研究不同工况下的动态过程。

目前国内成功并网运行的二次再热机组较少,运行时间也较短,可供借鉴的经验较欠缺,所以建立二次再热机组汽轮机 DEH 的模型来研究并发展二次再热机组控制技术具有重要的意义。本研究通过分析二次再热机组的控制系统,提出二次再热 DEH 控制方案。对二次再热机组 DEH 控制系统建模,并采用 Matlab 对模型仿真验证其可行性。

1 二次再热 DEH 分析

一次中间再热机组配备有一级再热装置,蒸汽在汽轮机高压缸做功后,引入再热器中再热,升温升压后进入中压缸做功。而二次再热机组具有两级再热装置,蒸汽经超高压缸做功后通往一级再热器再热,进入高压缸做功^[7]。高压缸排汽经二级再热器再热后进入中压缸继续做功。

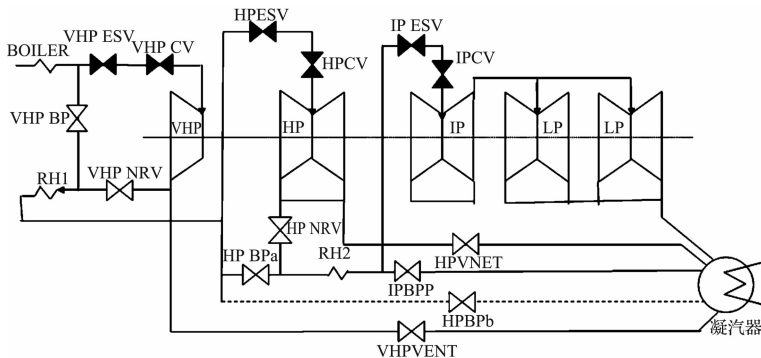


图 1 二次再热汽轮机旁路系统配置

1.2 二次再热机组控制方案分析

二次再热汽轮机 DEH 的控制方案如图 2 所示。DEH 采用功率控制,转速控制和监视段压力控制三级控制回路。当机组处于升转速阶段时,切除功率控制和监视段压力控制回路,采用转速控制方式控制机组转速上升至 3 000 r/min。转速控制原理如图 3 所示。

设定转速值作为给定信号,测速器测得的转子

汽轮机转速的调节依靠调节汽轮机的进汽量来实现。二次再热汽轮机包括超高压缸、高压缸、中压缸以及低压缸,在结构上比一次再热机组增加了一级超高压缸以及超高压主汽调节阀,相比于一次再热机组增加了一个中间再热容积和超高压汽室容积^[8]。汽室容积的增加,虽然提高了机组的蓄热能力,也提高了机组一次调频余量,但另一方面,对于机组转速和负荷的调节响应具有一定的迟滞性,降低了一次调频能力。如今大功率机组日渐成为主流发电机组,为了机组能安全稳定的运行,且须保证二次再热机组具备安全稳定参与电网一次调频的能力,对于机组控制系统的控制性能的要求更高。

1.1 二次再热机组启动方式

基于汽轮机超高压缸启动方式建立二次再热机组 DEH 系统模型,包括转速控制系统模型及负荷控制系统模型。蒸汽流程为串联流程,即主蒸汽由超高压缸(VHP)进入→排汽至一级再热器→进入高压缸(HP)→高压缸排汽至二级再热器→进入中压缸(IP)→低压缸(LP)→凝汽器。机组设高、中、低压三级串联汽机旁路系统。二次再热汽轮机旁路系统配置如图 1 所示。

采用超高压缸启动方式,即汽轮机挂闸后高压主汽门、高压调节汽门和中压主汽门、中压调节汽门全部开启,高压调门和中压调门不参与转速调节过程,由超高压主汽门控制机组升速。

转速作为反馈信号,以给定信号与反馈信号的转速偏差信号作为 PID 控制器的输入信号,输出为阀位偏差信号,经伺服放大器放大后通过电液转换器转换成油压信号,然后通过调节油动机位移来控制超高压主汽阀的阀门开度,从而改变蒸汽进汽量进而调节转子转速^[9]。当测速器得到的反馈信号与给定信号一致时,偏差信号消失,此时转子转速达到并稳定于目标值。

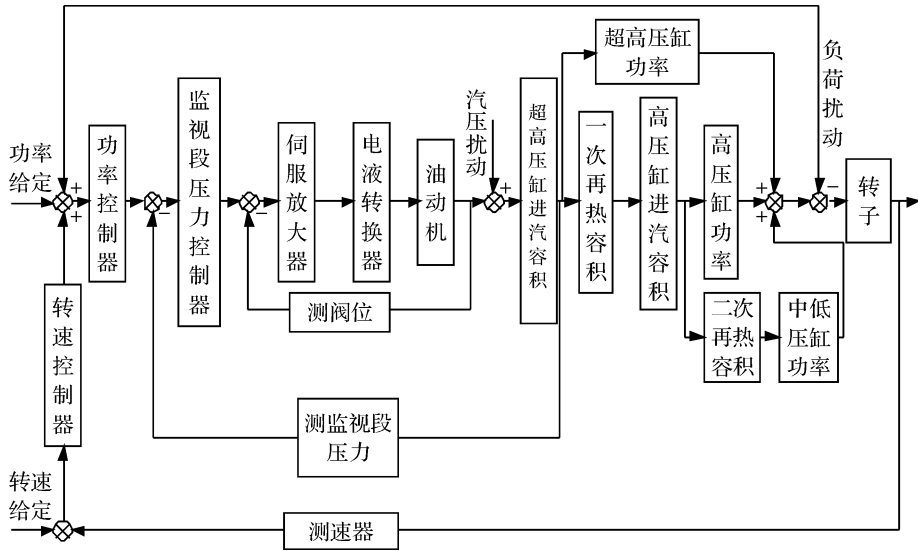


图 2 二次再热汽轮机 DEH 控制系统框图

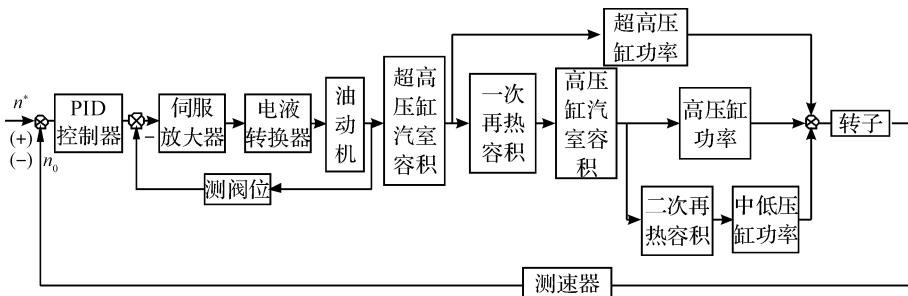


图 3 转速控制回路的简化原理框图

转子转速达到目标转速 3 000 r/min, 机组并网, 频率与电网同步, 此时 DEH 需先控制机组升负荷。机组并网升负荷阶段需先升至基本负荷, 应按照 DEH 的给定功率来输出功率。先切除监视段压力控制回路和转速控制回路, 由功率控制回路控制机组增加功率^[10]。功率控制器为 PID 控制器, 设定给定功率信号, 以转子机械功率作为反馈信号, 信号偏差值作为功率控制器的输入, 输出的阀门偏差信号经伺服放大器、电液转换器输出为油压信号, 然后控制油动机位移从而改变超高压调节阀开度调节蒸汽进汽量改变机组输出功率。当信号偏差值消失后, 机组功率达到目标值。

当机组参与电网一次调频时, 系统以调频方式运行, 投入监视段压力控制回路, 监视段压力控制器为 PID 控制器。机组运行时, 系统内扰主要来自锅炉的蒸汽压力扰动, 外扰来自于电网负荷的变化^[11]。内扰发生时, 蒸汽压力的扰动使得监视段压力发生变化, 监视段压力控制器接收到监视段压力变化信号, 通过伺服系统改变调节阀开度从而使得机组功率恢复正常。外扰发生时, 电网负荷变化, 监视段压力最先受到影响^[12]。电网负荷增加, 机组需增加功率满足电网需

求, 进汽量增加, 监视段压力降低。电网负荷降低, 机组需降低功率, 进汽量减少, 监视段压力增加。监视段压力变化信号通过监视段压力控制器来控制阀门开度, 改变机组功率输出从而满足电网负荷需求。

1.3 二次再热机组的动态特性

一般情况下, 在开大超高压调节汽门时, 超高压缸进汽量是瞬间增加的, 因此超高压缸的功率也能瞬间增加。机组再热装置具有较大的再热容积, 受一级再热器的再热容积影响, 超高压缸排气会滞留在再热装置内, 所以高压缸进汽不会随着超高压缸进汽增多而增多, 高压缸功率会随着一级再热器的压力增加而缓慢增加。同理, 中低压缸功率会随着二级再热器的压力增加而缓慢增加。值得注意的是, 由于第二级再热器压力受第一级再热器的迟滞性影响, 第二级再热器的压力上升会比第一级再热器压力上升更为缓慢, 因此中低压部分的功率会比高压缸功率增加的更迟滞^[13]。为了降低两级再热装置的迟滞性给机组参加一次调频带来的影响, 可以采用动态校正器来校正由于再热环节的惯性作用给功率调节带来的滞后影响。

为使二次再热机组参与电网一次调频的能力尽量达到非中间再热机组同等水平, 在机组负荷增大或减

少时,将超高压调节汽阀动态过开或过关,用超高压功率的过增或过减,弥补再热器动态滞后产生的功率盈缺。

2 二次再热 DEH 模型的建立

基于 Matlab 的二次再热汽轮机仿真,需建立二次再热机组的 DEH 控制系统模型^[14]。

2.1 DEH 的功率环节

二次再热汽轮机组的功率由超高压缸功率、高压缸功率和中低压缸功率组成,功率环节模型如图 4 所示。

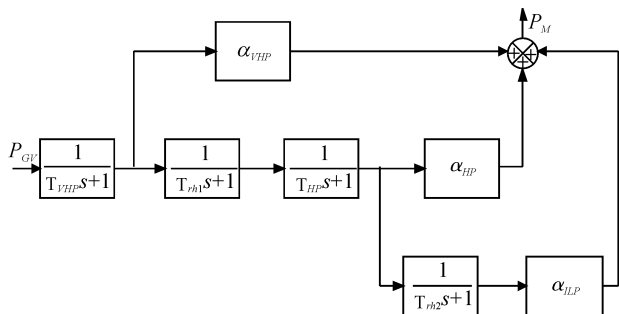


图 4 二次再热汽轮机功率环节模型

P_{GV} —进入汽轮机的蒸汽流量, P_M —汽轮机转子的功率输出; T_{VHP} —超高压缸汽室容积时间常数; T_{HP} —高压缸汽室容积时间常数; T_{H1} —第一级再热器的再热蒸汽容积时间常数; T_{H2} —第二级再热器的再热蒸汽容积时间常数; α_{VHP} —超高压缸的功率系数; α_{HP} —高压缸的功率系数; α_{LP} —中低压缸的功率系数, 并且有 $\alpha_{VHP} + \alpha_{HP} + \alpha_{LP} = 1$, 其中超高压缸功率占 1/4, 高压缸功率占 1/4, 中低压缸功率占 1/2

2.2 伺服系统环节

DEH 控制系统中的伺服系统环节如图 5 所示, 由凸轮特性、伺服放大器、电液转换器、油动机组成。其中伺服放大器为信号放大装置, 为纯比例控制环节, 比例系数为 k , 一般 $k = 1$ 。电液转换器是将电压信号转换成油压信号的装置, 油动机的输出为油动机行程信号, 即阀门开度信号。位移变送器实际上属于位移传感器, 将所测的油动机位移信号作为负反馈调节油动机位移。

在整个伺服系统中, 输入为 DEH 计算机信号, 输出为油动机位移信号即阀门开度信号。在此伺服系统中引进凸轮的静态特性, 凸轮静态特性^[15]是油动机的凸轮效应, 指控制器采用相对增长较小的输入电压, 使油动机以较快的速度达到阀门控制位置特性。由于凸轮特性的模型复杂, 特性曲线非线性, 直接用 SIMULINK 创建模型不太现实, 为了解决这个问题, 可用 MATLAB 语言描述具体的模型, 将其封装成

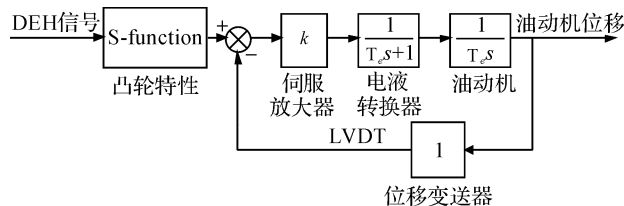


图 5 二次再热汽轮机伺服系统环节模型

T_e —电液转换器的时间常数; T_o —油动机时间常数

S 函数模块, 然后放入 SIMULINK 中仿真模拟。本研究中, S 函数是通过编制 m 文件来实现的, 具体过程为:

- (1) 在 work 空间中创建 tuluntexing 的 m 文件。
- (2) 编写特性曲线的源代码。
- (3) 封装 S 函数, 添加 S-function 模块, 设置函数名称以及参数。

2.3 其他环节

(1) 汽轮机转子环节

汽轮机单机运行时可视为积分环节, $W(S) = 1/T_a S$, 其中: T_a —转子时间常数。并网运行转子与电网频率一致, $W(S) = b/(T_a S + B)$, b —蒸汽容积时间常数; B —考虑电网频率变化时, 负荷的自平衡能力和电网中各并列机组调节系统动作对电网频率影响的系数。一般 $W(S) = 1/(T_a S + 1)$ 。

(2) 测速反馈

通常视为比例环节 $W(S) = 1$ 。

(3) 测功反馈

由于实际测量汽轮机所发功率时, 一般都是用发电机的发电量来表示汽轮机的实际功率, 测功反馈环节通常视为比例环节 $W(S) = 1$ 。

(4) 频差放大器

传递函数为 $W(s) = 1/\delta$ 。其中: δ —汽轮机调节系统的速度不等率。 δ 大时, 动态稳定性好, 调节速度快, 但是静态偏差和动态偏差都较大。通常取 $\delta = 3\% \sim 5\%$, 文中 δ 取 5%。

(5) PID 调节器

PID 调节器的传递函数为:

$$W(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right)$$

式中: K_p —比例放大系数, T_i —积分时间常数, T_d —微分时间常数。

3 模型仿真

通过查阅相关文献和资料, 结合超(超)临界机组的参数选取一组适用于二次再热机组的参数进行仿真模拟, 参数如表 1 所示。

表 1 模型参数值

参数	参考值
电液转换器时间常数 T_e	0.03
油动机时间常数 T_o	0.1
超高压缸汽室容积时间常数 T_{VHP}	0.35
高压缸汽室容积时间常数 T_{HP}	0.2
一级再热器再热时间常数 T_{rh1}	0.8
二级再热器再热时间常数 T_{rh2}	0.8
超高压缸功率系数 α_{VHP}	1/4
高压缸功率系数 α_{HP}	1/4
中低压缸功率系数 α_{LLP}	1/2
转子飞升时间常数 $T\alpha$	6.2

使用 Matlab 中的 SIMULINK 对 DEH 转速控制以及负荷控制进行仿真。将各环节模型所对应的仿真模块在 SIMULINK 中连接起来,仿真结果如图 6 所示。

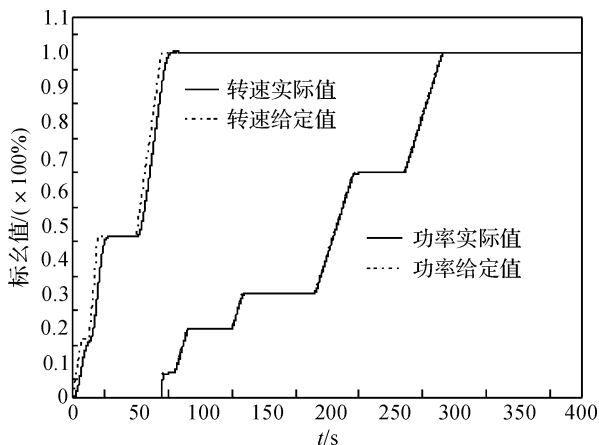


图 6 仿真结果图

从图 6 中可以看出转速实际值曲线与转速给定值曲线几乎完全吻合,转速实际值曲线延迟跟随给定值曲线是受机组惯性环节的影响。当机组转速达到 3 000 r/min,并网初期带一定初负荷一方面防止发电机逆功率运行;另一方面保护汽轮机低压缸动静部件的安全,防止因少蒸汽而引起鼓风摩擦热量过大引起排汽缸温度过高。根据功率控制仿真曲线,功率实际值与功率给定值同样几乎完全吻合,验证了所建二次再热 DEH 模型的可行性。

4 结束语

本研究介绍了二次再热机组控制系统与一次再热机组的不同,通过分析二次再热机组控制系统,提出二

次再热机组 DEH 控制方案并分析了机组动态特性。针对二次再热机组的结构特点,建立二次再热机组 DEH 模型。与一次再热机组相比,二次再热机组 DEH 增加了超高压缸汽室容积与超高压缸功率环节的建模。对特性复杂的伺服系统,引入凸轮静态特性,并采用封装的 S 函数模块对其建模。结合超(超)临界机组运行参数,选取适用于二次再热机组的参数进行仿真分析。仿真结果表明,实际值曲线与给定值几乎完全吻合,验证了所建模型的准确性。

参考文献 (References) :

- [1] 张学超,姚 群. DEH 系统负荷控制功能仿真研究[J]. 热力透平,2009,38(3):197-201.
- [2] 姜杰夫. 300MW 机组汽轮机调节系统建模研究[J]. 湖南电力,2014,34(6):22-25.
- [3] 孙玉芬,王再英. 汽轮机 DEH 系统建模及仿真研究[J]. 计算机仿真,2013,30(9):126-130.
- [4] 阎树田,肖林海,魏莉莉. 基于 Matlab 的 DEH 系统仿真研究[J]. 机械与电子,2010,28(9):28-31.
- [5] 王 超,陈申乾,姬海刚,等. 基于 Matlab 的 DEH 控制系统动态仿真与分析[C]//2016 第一届今日财富论坛论文集. 北京:今日财富杂志社,2016:263-264.
- [6] 张文娜,任鸿秋,田慕琴. 基于 Matlab 的 DEH 控制系统的仿真[J]. 电气技术,2011(3):4-6.
- [7] 王志群,朱守真,楼鸿祥等. 基于时域分段线性多项式法的大型汽轮机建模和参数辨识. 中国电机工程学报,2003,23(4):128-133.
- [8] 张晓东,方 宇,唐清舟等. 660MW 超超临界二次再热汽轮机结构特点[J]. 东方汽轮机,2015,7(2):1-6.
- [9] 阮大伟. 大型火电机组汽轮机数字式电液控制系统[J]. 热力发电,2001,30(5):24-26.
- [10] 张学超,姚 群. DEH 系统负荷控制功能仿真研究[J]. 热力透平,2009,38(3):197-201.
- [11] 张 军. 汽轮机电液控制系统试验研究. 黑龙江电力[J]. 2001,23(2):111-113.
- [12] 余 炎,刘晓澜,范世望. 二次再热汽轮机关键技术分析及探讨[J]. 热力透平,2013,42(2):69-72.
- [13] 夏晓华,杨 宇,范世望. 二次再热汽轮机能级效率法研究[J]. 热力透平,2015,44(1):46-49.
- [14] 高昊天,范浩杰,董建聪,等. 超超临界二次再热机组的发展[J]. 锅炉技术,2014,45(4):1-3.
- [15] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

朱朝阳,廖金龙,李 蔚,等. 二次再热机组 DEH 建模与分析[J]. 机电工程,2016,33(10):1232-1236.

ZHU Chao-yang, LIAO Jin-long, LI Wei, et al. DEH of double reheat steam turbine modeling and analysis[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(10):1232-1236. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>