

双背压双转子改造机组汽轮机及调节系统实测建模试验研究

贾 斌, 李晓波, 范志强

(内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 电力系统仿真模型中, 原有汽轮机及其调节系统模型和参数是基于80%的纯凝工况一次调频试验获得的火电机组进行“双背压双转子”改造后, 供热季以低压转子光轴工况运行。电网仿真如果沿用纯凝工况仿真模型, 仿真结果会与实际特性产生较大偏差。针对机组低压转子光轴工况开展汽轮机及其调节系统参数实测、建模, 并与纯凝工况模型、参数进行对比研究, 验证了改造机组重新开展实测建模的必要性。

关键词: “双背压双转子”; 汽轮机; 调节系统; 实测建模; 涉网特性

Experimental study on measured modeling of steam turbine and regulating system of double back pressure and double rotor retrofit unit

JIA Bin, LI Xiaobo, FAN Zhiqiang

(Inner Mongolia Electric Power Science & Research Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: Power system simulation model of steam turbine and its control system model and parameters is based on the original working condition of 80% pure condensation an FM test, thermal power unit for the “double back pressure double rotor” after modification, the heating season in low-pressure rotor axis operation. Power grid simulation uses the pure condensation condition simulation model, the simulation results will have great deviation with the actual characteristics. In this paper, the parameters of steam turbine and its regulating system are measured and modeled in the light shaft condition of low-pressure rotor of the unit, and compared with the model and parameters of pure condensation condition. It is proved that it is necessary to carry out measurement modeling again.

Key words: double back pressure and double rotor; turbin; governing system; testing and modeling; network-related characteristic

0 引言

电站汽轮机及其调节系统参数测试的目的是建立和规范电力系统并网机组参与电网一次调频的数学模型, 通过参数实测与建模, 获得汽轮机调节系统、执行机构、汽轮机本体数学模型及其参数, 为电力系统中长期稳定性仿真分析提供真实可靠的数据。

为提高机组供热能力和运行灵活性, 火电机组灵活性改造在我国北方地区得到了广泛开展。“双背压双转子”方案在供热改造机组中占有一定比例。改造后汽轮机本体结构及典型运行工况发生了显著变化, 汽轮机及其调节系统对电网一次调频的响应特性、对电网调度指令的响应能力均发生明显变化。本文针对某电

厂“双背压双转子”改造机组开展一次调频负荷扰动试验，基于测试数据完成汽轮机及其调节系统仿真建模，并与纯凝工况模型、参数进行对比研究。

1 “双背压双转子”改造机组模型参数实测、辨识与校核

本文测试机组汽轮机为国产150 MW超高压，一次中间再热，抽汽凝汽式汽轮机。机组于2016年完成“双背压双转子”改造，供热季汽轮机以低压缸光轴转子运行，冬季供热工况机组额定出力113 MW，最大出力116 MW。机组控制系统为上海新华自动控制公司产品。根据现场控制组态、设备情况选用汽轮机及其调节系统模型，具体如下文介绍。

1.1 汽轮机模型及其参数辨识

(1) 汽轮机模型

测试机组完成“双背压双转子”改造后，供热季低压缸以“零出力”工况运行，汽轮机高压蒸汽容积、再热蒸汽容积及高和中压缸做功能力均未发生变化。冬季低压缸以光轴转子运行时，牺牲低压缸做功能力，换取机组供热能力。此类型汽轮机模型可以选择PSASP电力系统稳定计算程序中典型一次中间再热汽轮机模型，如图1所示。

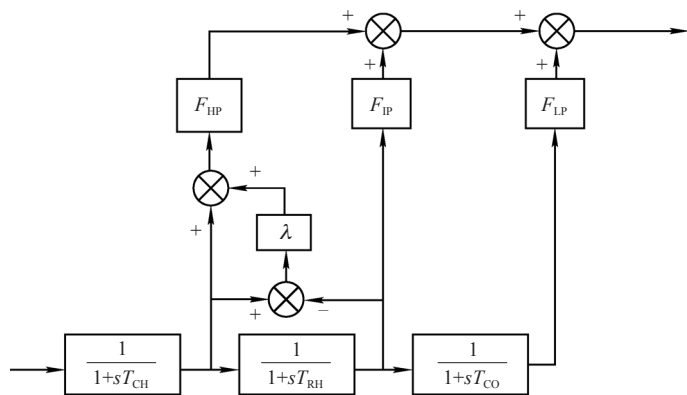


图1 典型一次中间再热汽轮机模型

Fig. 1 Typical model of primary reheat steam turbine

模型中 T_{CH} 、 T_{RH} 和 T_{CO} 分别为高压容积时间常数、再热容积时间常数和低压容积

时间常数； F_{HP} 、 F_{IP} 和 F_{LP} 分别为高压缸功率比例、中压缸功率比例和低压缸功率比例， $F_{HP}+F_{IP}+F_{LP}=1$ ，供热季低压缸功率比例系数 $F_{LP}=0$ ； λ 为高压缸功率自然过调系数，用来表征机组动态调整过程中高压缸功率过调现象。汽轮机模型参数需要通过DEH功率开环控制方式的一次调频扰动试验数据进行参数辨识获得。

(2) 参数实测

本文针对机组冬季供热工况开展实测、建模，现场参数实测方法如下。

1) 根据相关导则要求，动态扰动试验机组负荷为额定值的80%以上。测试机组改造后额定负荷为113 MW，结合机组供热期运行典型负荷点，确定试验负荷点为85 MW。

2) 机组退出AGC控制和CCS控制，投入DEH阀位控制、顺序阀控制。

3) 强制 ± 10 转的一次调频转速偏差，进行一次调频上下阶跃扰动试验。

4) 记录以下参数的变化情况：频差、流量指令、功率、高调阀1~4、调节级压力、高排压力和再热压力，测试曲线如图2、图3所示。

(3) 参数辨识与校核

汽轮机模型中需要确定的参数有：高/中/低容积时间常数 T_{CH} 、 T_{RH} 、 T_{CO} ；汽轮机三缸功率比例 F_{HP} 、 F_{IP} 、 F_{LP} ；高压缸功率自然过调系数 λ 。根据汽轮机光轴改造后的热平衡关系，得出 $F_{HP}=0.42$ ， $F_{IP}=0.58$ ， $F_{LP}=0$ 。根据实测功率曲线，采用PSD-BPA仿真程序辨识得到 $T_{CH}=0.1$ s，高压缸功率自然过调系数 $\lambda=0.4$ 。根据试验测得再热压力，辨识得到 $T_{RH}=26.0$ s。

功率仿真结果与实测曲线对比结果如图4所示。上下阶跃仿真曲线与实测曲线吻合效果良好，说明测试、辨识得出的汽轮机模型能够较好地反映机组开环控制方式一次调频响应特性。

1.2 调节系统模型及其参数辨识

(1) 调节系统模型

根据现场逻辑组态，机组DEH、CCS一次调频控制逻辑由比例、积分和加减等模块组

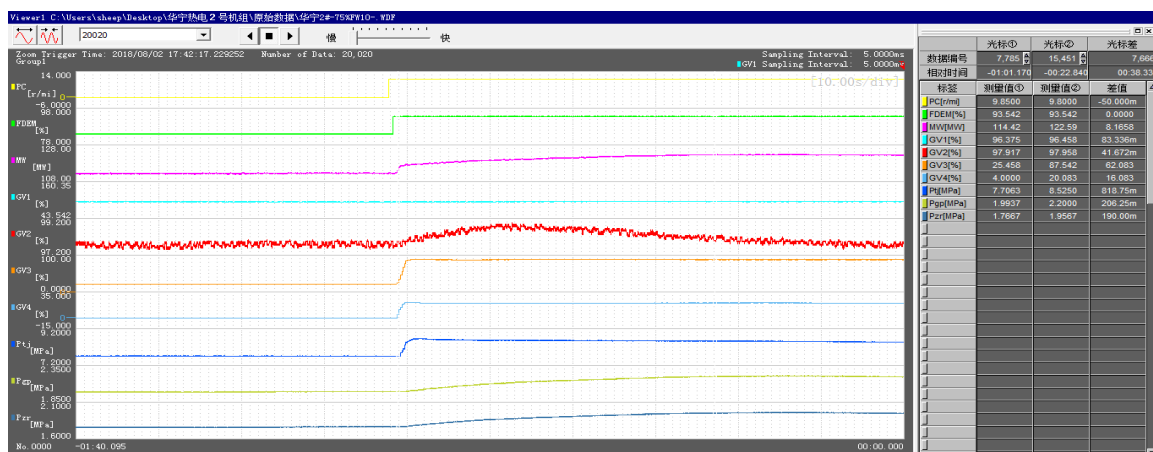


图2 阀位控制方式上阶跃扰动试验曲线

Fig. 2 Up step disturbance test curve of valve position control mode

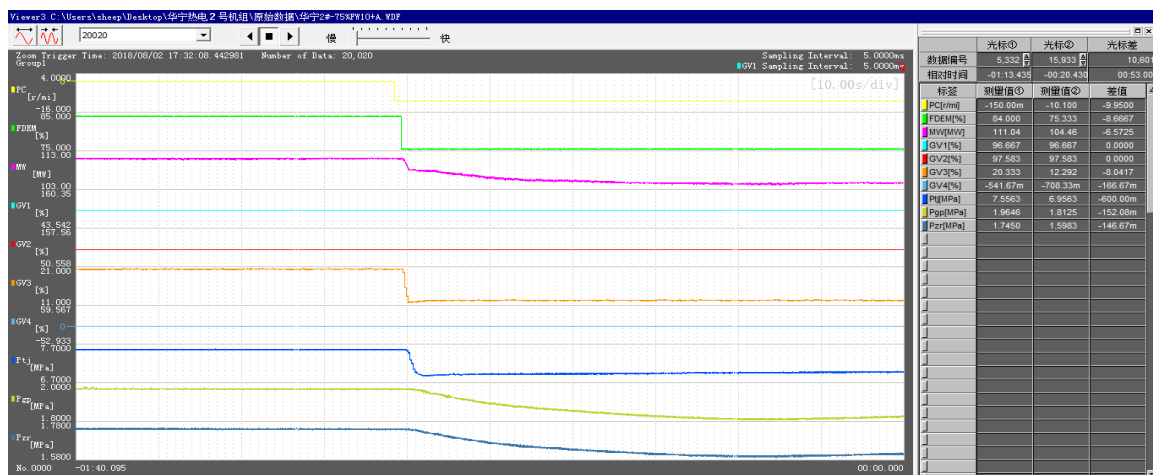


图3 阀位控制方式下阶跃扰动试验曲线

Fig. 3 Down step disturbance test curve under valve position control mode

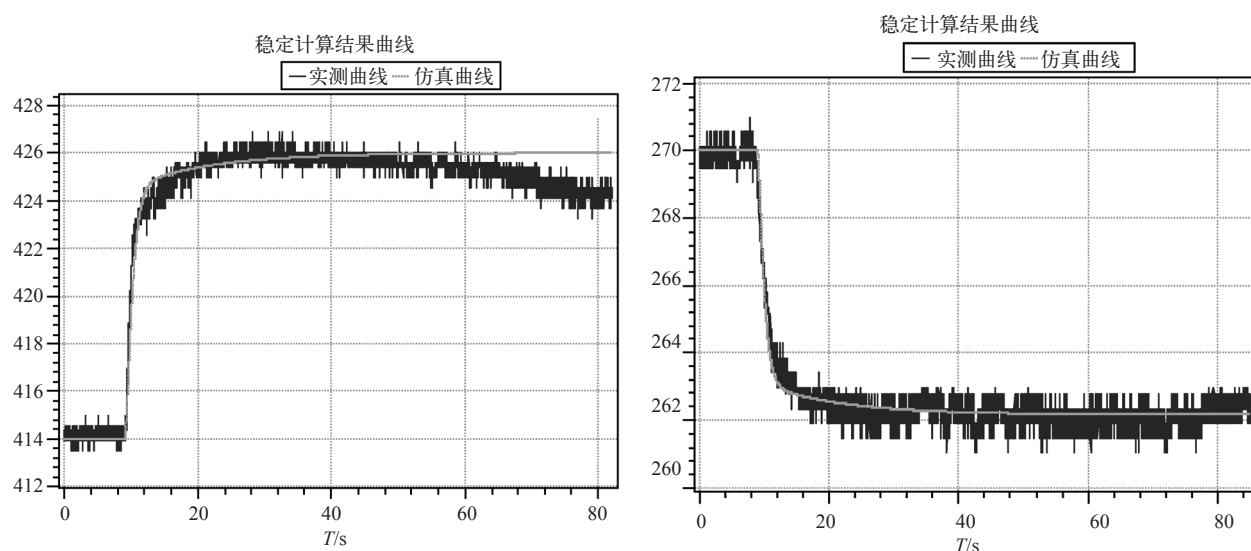


图4 上、下阶跃仿真结果与实测结果比对

Fig. 4 Comparison between simulation results and measured results of up and down step

成。机组并网后可用阀位控制、功率控制和调节级压力控制三种方式运行，其中带负荷前馈的功率控制为机组常用控制方式。由此，电液

调节系统模型选用PSASP电力系统专用计算程序中四型调速器，如图5所示。

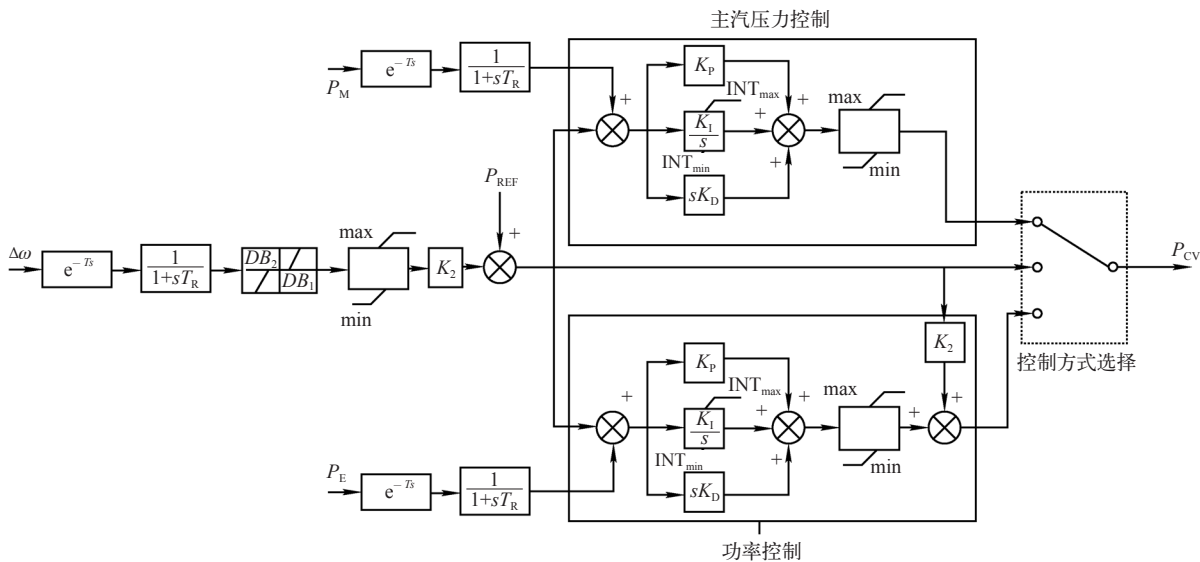


图 5 电液调节系统模型

Fig. 5 Model of electrohydraulic control system

(2) 机组功率闭环方式负荷扰动试验

试验过程中机组投入CCS控制，其他测试过程同前文所述。测试记录以下参数的变化情况：频差、流量指令、功率、高调阀1~4、调节级压力、高排压力和再热压力，测试曲线如图6、图7所示。

(3) 参数辨识与校核

根据实测功率曲线，采用PSD - BPA仿真程序辨识得到 $T_{CH}=0.1\text{ s}$ 、高压缸功率自然过调

系数 $\lambda=0.2$ 。根据试验测得再热压力，辨识得到 $T_{RH}=12.0\text{ s}$ 。

电液调节系统中的模型参数通过查阅设计资料与机组控制系统参数进行初步设定。通过PSD - BPA系统仿真求出相同频率扰动下仿真模型输出曲线，与实测曲线进行比较，判断仿真误差，直至仿真误差合格，并得到合格的模型参数。依据实测功率曲线，采用PSD - BPA仿真程序辨识得到调节系统主要模型参数

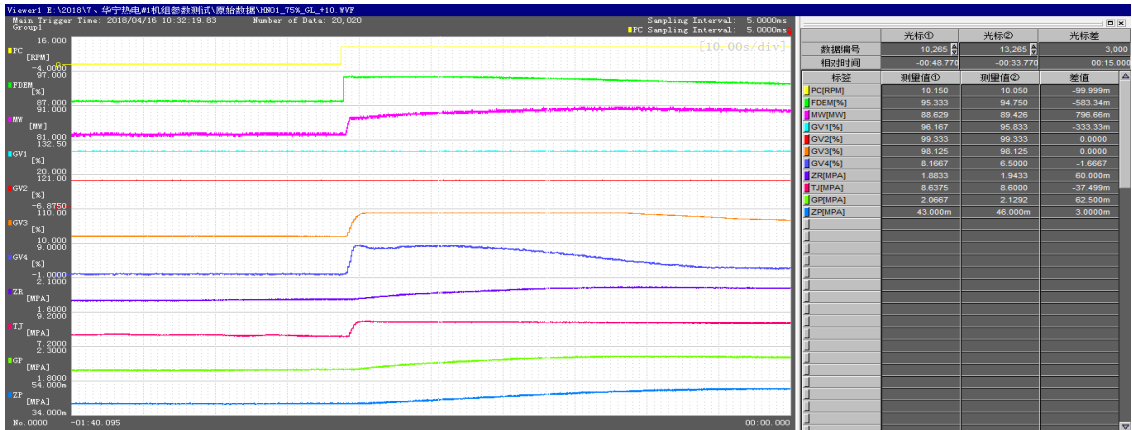


图 6 上阶跃扰动试验曲线

Fig. 6 Up step disturbance test curve

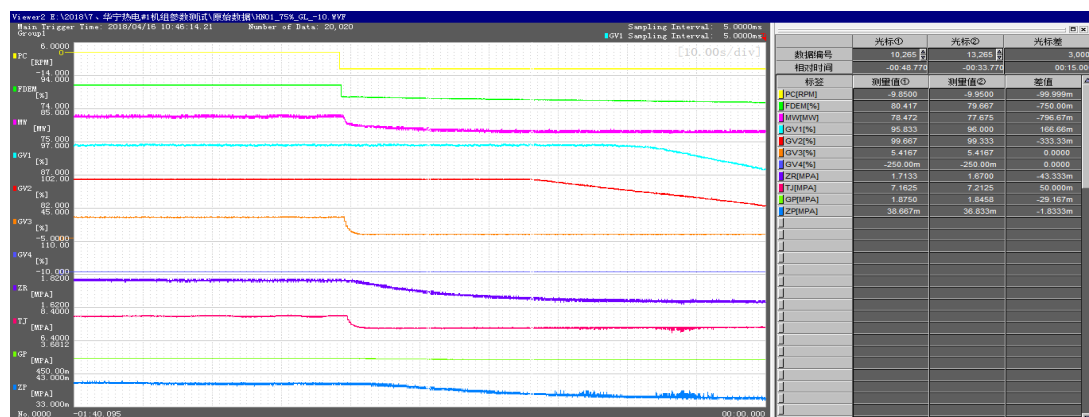


图7 下阶跃扰动试验曲线

Fig. 7 Down step disturbance test curve

有: 转速误差放大倍数 $K=19.85$; PID 环节比例系数 $K_P=0.35$, 微分系数 $K_D=0$, 积分系数 $K_I=0.05$; 负荷控制前馈系数 $K_f=1.0$ 。

有功功率仿真曲线与实测曲线对比结果如

图8所示。仿真曲线与实测曲线吻合效果良好,说明测试、辨识得出的汽轮机及其调节系统模型能够很好地反映机组实际特性。

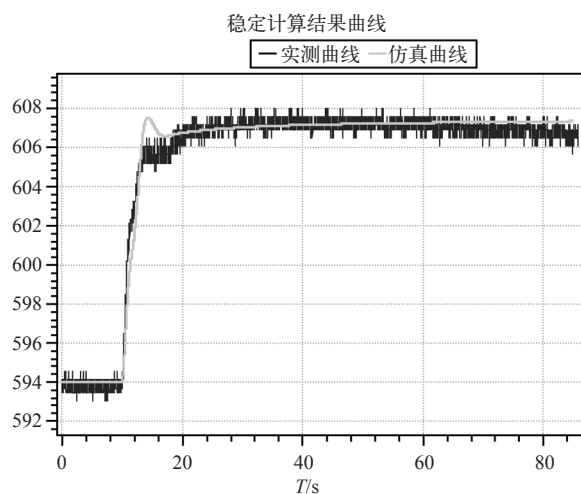
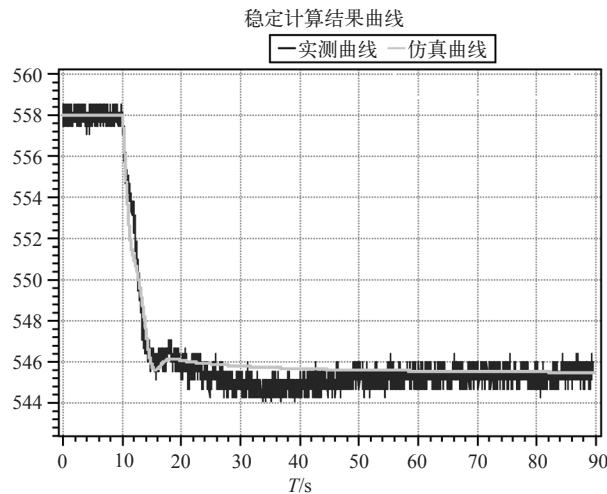


图 8 一次调频上下阶跃仿真、实测曲线对比

Fig. 8 Comparison of simulation and measured curves of up and down step of primary frequency modulation

2 低压转子光轴工况与纯凝工况模型参数对比

上述通过实测、建模给出了测试机组供热季低压转子光轴工况汽轮机及其调节系统建模结果,与纯凝工况比较,部分模型参数存在较大差异。汽轮机模型、调节系统模型分别对应PSD-BPA程序TB卡、GJ卡,低压转子光轴工况与纯凝工况模型参数对比如表1、表2所示。

由表1、表2数据可以看出, 低压转子光轴工况汽轮机及其调节系统模型中高压容积时

间、再热容积时间、高压缸功率过调系数、高中压缸做功比例以及调节系统模型中负荷前馈系数都发生了显著变化。这些显著差异的模型参数,使模型的仿真结果产生较大误差,因此针对这一类型改造机组,在电网仿真计算中,纯凝工况与低压转子光轴工况应使用不同的模型参数。

3 结束语

针对“双背压双转子”改造机组冬季供热

表 1 汽轮机模型参数 (TB 卡)

Tab. 1 Turbine model parameters (TB card)

参数名	符号	单位	纯凝工况	低压转子光轴工况
高压容积时间常数	T_{CH}	s	0.05	0.1
再热容积时间常数	T_{RH}	s	16	26.0
低压容积时间常数	T_{CO}	s	1.0	0
高压缸功率比例	F_{HP}	—	0.307	0.42
中压缸功率比例	F_{IP}	—	0.693	0.58
低压缸功率比例	F_{LP}	—	0	0
高压缸功率自然过调系数	λ	—	0.2	0.4

表 2 调节系统模型参数表 (GJ 卡)

Tab. 2 Parameter table of regulating system model (GJ card)

参数名	符号	单位	纯凝工况	低压转子光轴工况
转速测量环节时间常数	T_i	s	0.01	0.01
转速误差死区	—	—	0.001 33	0.001 33
转速误差放大倍数	—	—	19.78	19.85
控制方式选择	—	—	3	3
PID 比例环节倍数	K_p	—	0.45	0.35
PID 微分环节倍数	K_D	—	0	0
PID 积分环节倍数	K_I	—	0.05	0.05
PID 积分环节限幅上限	—	—	1.0	1.0
PID 积分环节限幅下限	—	—	-1.0	-1.0
PID 输出限幅环节的上限	—	—	1.0	1.0
PID 输出限幅环节的下限	—	—	-1.0	-1.0
负荷控制前馈系数	K_2	—	0.5	1.0
一次调频负荷上限	—	—	0.005	0.005
一次调频负荷下限	—	—	-0.005	-0.005

工况开展一次调频负荷扰动试验,依据试验测试数据进行改造后低压转子光轴工况汽轮机及其调节系统仿真建模。对比纯凝工况与低压转子光轴工况各环节模型,原动机模型参数差异明显:高压容积时间常数、高中低压缸功率比例以及高压缸功率过调系数均与改造前存在较大差异。虽然调节系统模型机组实际控制参数未改变,但由于改造后低压转子光轴工况机组一次调频功率响应特性发生变化,为适应机组

新特性,仿真模型中负荷前馈系数、PID 环节比例系数也需要进行较大调整。所以,有必要针对“双背压双转子”改造机组冬季、夏季运行模式,分别开展实测建模。在电网稳定计算中,根据机组不同的运行模式采用不同的模型参数。

参考文献

[1] 朱熹,谢明江,等. 汽轮机低压缸零出力供热技术研究[J]. 机械工程师, 2019(11): 118-122.

[2] 谷俊杰,陈顺青. 适用电网稳定性计算的一种超临界汽轮机动态数学模型[J]. 汽轮机技术, 2013, 55(3): 75-78.

[3] 谷俊杰,朱伟民. 超临界汽轮机调速系统模型参数确定的新方法[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(2): 103-106.

[4] 田云峰,郭嘉阳,刘永奇,等. 用于电网稳定性计算的再热凝汽式汽轮机数学模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 39-44.

[5] 韩忠旭,周孝信,李芳. 单元制再热凝汽式汽轮机数学模型分析及其动态特性仿真[J]. 电网技术, 2010(12): 180-186.

[6] 马龙义. BPA与PSS_E仿真模型分析与转换研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[7] 刘禾,白焰,等. 火电厂热工自动控制技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[8] 沈崇德. 大型火电机组系统仿真与建模[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[9] 同步发电机原动机及调节系统参数实测建模导则: DL/T 1235—2013 [S].

作者简介



贾 斌

贾斌(1976—),男,硕士,高级工程师,研究方向为汽轮机及其调节系统参数实测与建模。

(收稿日期: 2020-07-21)EA