

660 MW 超临界火电机组汽轮机及其调速系统 精细化模型研究和应用

谢昌亚¹, 朱龙飞¹, 胡娱欧², 崔福博²

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 2. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053)

摘要:为了解决典型模型适用性差的问题,针对某 660 MW 超临界火电机组,通过优化调速系统模型,并考虑机组流量特性和主蒸汽压力变化对一次调频特性的影响,搭建了汽轮机及其调速系统的精细化数学模型。采用典型模型和精细化模型对机组 20%, 40%, 50% 额定负荷下的一次调频响应过程进行仿真,将仿真结果与实测数据进行对比。结果表明:在不同工况下,精细化模型能更准确地反映机组一次调频功率的响应特性、机组流量指令响应特性和主蒸汽压力响应特性,并提出判断模型是否能正确反映机组一次调频特性的原则,对汽轮机及其调速系统模型的优化和改进具有一定的指导意义。

关键词:汽轮机;调速系统;仿真;一次调频响应特性

中图分类号:TK263.7 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2023.06.007

[引用本文格式]谢昌亚,朱龙飞,胡娱欧,等. 660 MW 超临界火电机组汽轮机及其调速系统精细化模型研究和应用[J]. 热能动力工程, 2023, 38(6): 58-67. XIE Chang-ya, ZHU Long-fei, HU Yu-ou, et al. Research and application of refined model for 660 MW supercritical thermal power unit steam turbine and its governing system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6): 58-67.

Research and Application of Refined Model for 660 MW Supercritical Thermal Power Unit Steam Turbine and Its Governing System

XIE Chang-ya¹, ZHU Long-fei¹, HU Yu-ou², CUI Fu-bo²

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045;
2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing, China, Post Code: 100053)

Abstract: In order to solve the problem of poor applicability of typical models, a refined mathematical model of the steam turbine and its speed control system was established for a 660 MW supercritical thermal power unit by optimizing the speed control system model and considering the impact of unit flow characteristics and main steam pressure changes on the primary frequency control characteristics. The primary frequency regulation response process of the unit at 20%, 40% and 50% rated load was simulated using typical and refined models, and the simulation results and the measured data were compared. The results show that under different operating conditions, the refined model can more accurately reflect the response characteristics of the unit's primary frequency regulation power, unit flow command response characteristics and main steam pressure response characteristics. The principle of judging whether the model can correctly reflect the unit's primary frequency regulation characteristics is proposed, which has a certain

收稿日期:2022-08-31; 修订日期:2022-10-14

基金项目:国家电网有限公司华北分部科技项目(KJJ2022105);华北电科院自有资金科技项目(KJZ2022006)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of North China Branch of State Grid Corporation of China (KJJ2022105); North China Electric Power Research Institute's Self-funded Technology Project (KJZ2022006)

作者简介:谢昌亚(1992-),男,华北电力科学研究院有限责任公司工程师。

guiding significance for the optimization and improvement of the turbine and its speed control system model.

Key words: steam turbine, speed regulation system, simulation, primary frequency regulation response characteristics

引言

为提升电力系统调节能力和新能源消纳能力,华北地区部分火电机组陆续开展了灵活性改造工作^[1-2],深度调峰工况逐渐成为机组常规运行工况。目前,针对火电机组开展的汽轮机及其调节系统参数实测和建模工作^[3-5],基于典型模型在机组典型工况获得的参数通常并不能适用于深度调峰工况。这是由于对典型模型的机组流量特性进行了简单的线性化处理,忽略了汽轮机及其调节系统是一个复杂的非线性系统,因此在机组宽负荷运行范围内,尤其是在典型工况和深度调峰工况的对比下,典型模型在不同负荷下的不适用性更加凸显,亟需开展相关研究,建立能够反映机组实际运行特性且适用性更广的精细化模型。

针对汽轮机及其调速系统模型的分析、改进和优化,国内许多学者进行了大量的研究。文献[6]在再热凝气式汽轮机经典模型的基础上创新性地提出了高压缸自然功率过调系数,提高了机组功率响应速率,形成了目前国内广泛应用的典型汽轮机模型。文献[7]建立了考虑机组协调控制的汽轮机调速器模型,并模拟了实际电力系统中的一次低频事故,验证了模型的准确性。文献[8]基于机理建模思想导出了一种考虑回热器蓄热效应的汽轮机动态模型,并讨论了给水回热系统动态蓄热效应对汽轮机动态特性的影响。文献[9]充分考虑质量流量与压差间的非线性关系以及压力的变化对汽轮机中蒸汽的焓降影响等,提出了一种新的汽轮机非线性模型。文献[10]将汽轮发电机组置于锅炉和单元机组协调控制系统的整体运行环境下,提出一种用于电力系统稳定分析的改进型数学模型。文献[11-13]均提及一种考虑阀门流量特性的再热凝汽式汽轮机模型,将一次调频动作过程中流量指令与实际流量进行了局部线性化处理,引入相关的斜率系数,但没有考虑阀门动作过程中流量非线性变化的问题。文献[14]研究了主蒸汽压力变化对汽轮发电机组一次调频动态特性的影响。文献[15]基于对

汽轮机调速系统线性模型的分析,提出了通过多工况扰动试验,引入“汽轮机调速系统协同曲线”的方法,改善了模型在多工况范围内对机组工频特性的适用性。文献[16]建立了考虑主蒸汽压力影响的燃煤机组调速模型,提高了模型的仿真精度。文献[17]在典型汽轮机模型的基础上构建了火电机组一次调频功率响应特性的精细化模型,新模型能够更好地反映实际机组一次调频功率的响应特性。上述研究仅对调速系统模型、汽轮机模型、主汽压力模型中的一项或两项进行了优化,既考虑机组实际流量特性和主蒸汽压力变化对一次调频特性的影响,又同时优化调速系统模型的研究并不多,汽轮机及其调速系统模型仍具有优化空间。现有研究通常将重点放在机组的功率响应特性上,忽略仿真流量指令和主蒸汽压力与实测数据的对比,而流量指令和主蒸汽压力又决定了机组的一次调频响应过程。同时,鲜有文献对深度调峰工况下开展的汽轮机及其调速系统参数测试与建模工作进行报道。

本文分析了典型模型适用性差的主要原因,针对某 660 MW 超临界火电机组,搭建了汽轮机及其调速系统的精细化模型。采用该模型对机组深度调峰工况下的一次调频响应过程进行仿真,将仿真功率、仿真流量指令以及主蒸汽压力与典型模型的仿真数据和实测数据进行对比,验证了模型的准确性和适用性。在上述研究的基础上提出了模型是否能正确反映机组一次调频特性的判断原则,对汽轮机及其调速系统模型的改进和优化具有一定的指导意义。

1 问题分析

目前,在对燃煤火电机组进行的汽轮机及其调速系统参数实测和建模工作中,基于机组典型工况获得的参数并不适用于深度调峰工况^[18]。

对于纯凝机组,产生上述问题的原因主要是典型模型采用流量指令线性对应汽轮机进汽量的仿真计算方法,并且在实际参数实测工作中,通常不考虑主蒸汽压力的影响,这与机组实际运行特性有较大差别。汽轮发电机组长时间运行以及大修改造后会

调门的流量特性有所变化^[19],导致机组设置的阀门管理函数无法匹配阀门实际流量特性,从而使流量指令与实际进汽量之间并不是线性的对应关系。同时,火电机组通常为滑压运行,不同负荷下机前主蒸汽压力不同,并且在一次调频响应过程中,主蒸汽压力也是动态变化的,不能完全忽略主蒸汽压力的影响。

对于供热机组,分为两种情况。第 1 种情况,供热机组在纯凝状态下运行,问题产生的原因与上述纯凝机组相同。第 2 种情况,供热机组在供热状态下运行,除上述原因外,由于部分中压缸排汽不进入低压缸做功,与纯凝工况相比,改变了机组的通流特性、做功能力以及高、中、低压缸的做功比例,不同的抽汽供热量产生的影响程度不同,而典型模型并没有考虑以上非线性因素。

文献[18]基于现有典型模型,对低压缸零出力改造机组进行了参数实测建模工作,发现仿真计算若沿用原有基于 80% 纯凝工况一次调频试验获得的汽轮机及其调节系统模型和参数,得到的结果会与实际特性存在较大偏差。在 PSD 电力系统分析软件中,默认高、中、低压缸做功比例之和应为 1,否则计算无法进行^[20]。但对于供热工况尤其是低压缸切除工况,在以流量指令表征汽轮机进汽量进而计算机组功率的情况下,三者之和不应等于 1,因为在低压缸切除工况下,进入汽轮机的蒸汽并不进入低压缸做功。

另外,有些机组在典型一次调频逻辑框架的基础上进行了优化:

(1) 大多数机组设有主蒸汽压力调整回路,当主蒸汽压力与设定值的偏差超过死区时,该回路通过限制机组功率来“拉回”主蒸汽压力;部分机组通过设定主蒸汽压力偏差调整系数并通过功率比例-积分-微分控制器(PID)起调节作用^[21];

(2) 部分机组根据机组主蒸汽压力或背压,对调频功率进行修正;

(3) 部分机组根据机组主蒸汽压力或流量指令,对调频前馈也设置有修正函数。

上述优化措施,在不同工况之间表现出强非线性关系,典型调速系统模型并没有考虑这些优化措施。

2 模型介绍

2.1 调速系统模型

通过分析案例机组调速系统逻辑,在 PSD 电力系统分析软件中 GJ 型调速系统模型的基础上进行优化和改进,得到如图 1 所示的调速系统模型。图中 T_i 为转速测量惯性时间常数, K_i 为转速放大系数, K_2 为前馈系数, K_p 为功率控制器比例系数, K_i 功率控制器积分系数, K_D 功率控制器微分数, $1/s$ 为积分算子, du/dt 为微分算子, Q_{CV} 为流量指令。

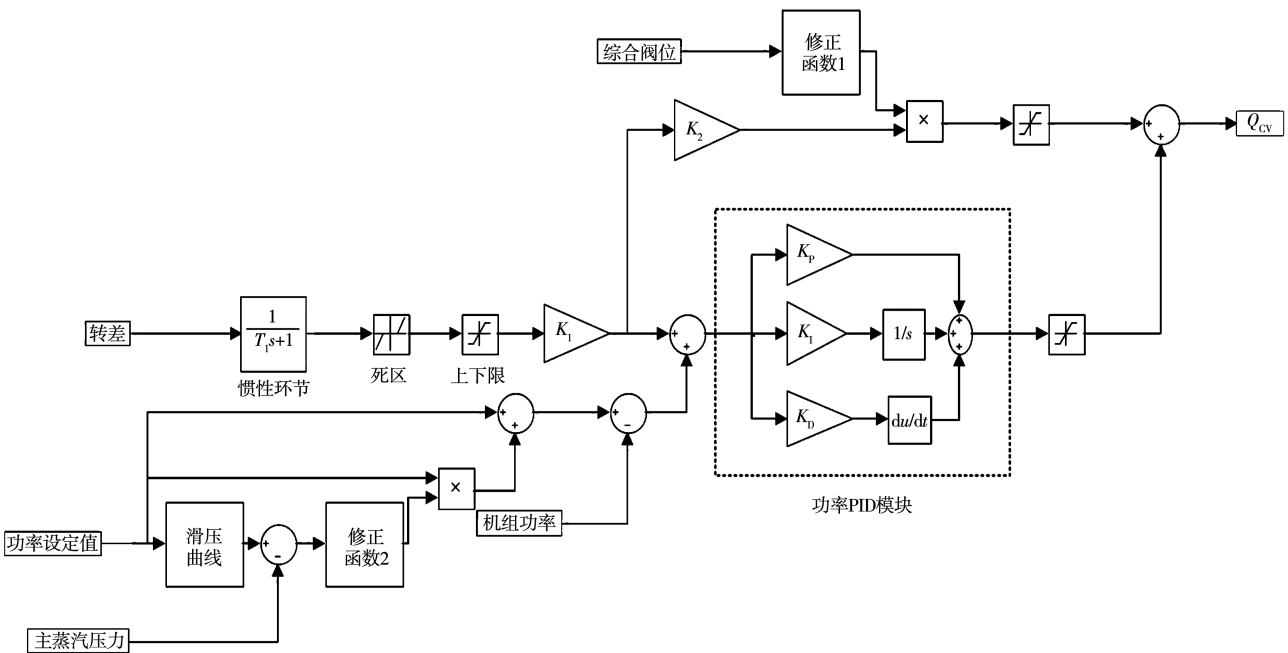


图 1 调速系统模型
Fig.1 Model of speed control system

机组滑压曲线如图 2 所示。修正函数 1 和修正函数 2 分别如图 3 和图 4 所示。与传统调速系统模型相比,新模型补充了主蒸汽压力修正环节和一次调频前馈修正环节。其中一次调频前馈修正环节表现为机组综合阀位(流量指令)通过修正函数 1 对前馈系数 K_2 进行修正。主蒸汽压力修正环节表现为滑压压力设定值与实际主蒸汽压力的偏差通过修正函数 2 对功率设定值进行修正。具体意义为:与压力设定值相比,当实际主蒸汽压力偏小或者偏大时,会减小或者增大汽轮机功率控制器的功率设定值,从而防止调门进一步开大或者关小造成主蒸汽压力继续减小或者增大,保证机组安全稳定运行。

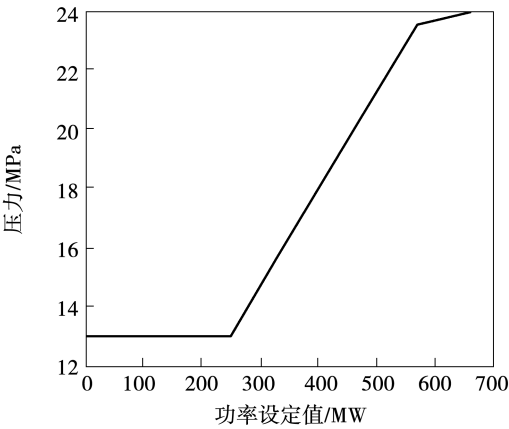


图 2 机组滑压曲线
Fig.2 Unit sliding pressure curve

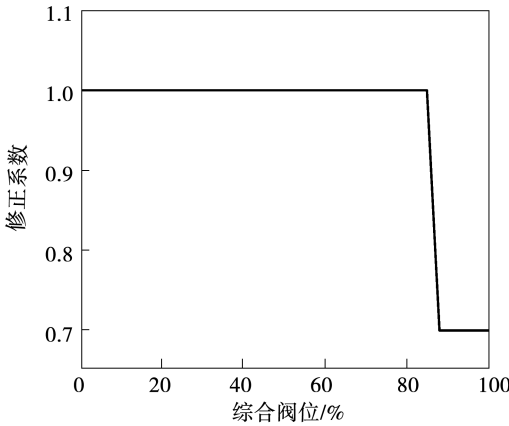


图 3 修正函数 1
Fig.3 Correction function 1

2.2 执行机构模型

执行机构模型采用文献[22]提出的模型。该

模型在电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and ELectronics Engineers, IEEE)推荐的伺服系统模型的基础上进行了改进,采用一套参数就能够满足阀门不同幅度动作时电网稳定性分析的要求,目前被广泛采用。

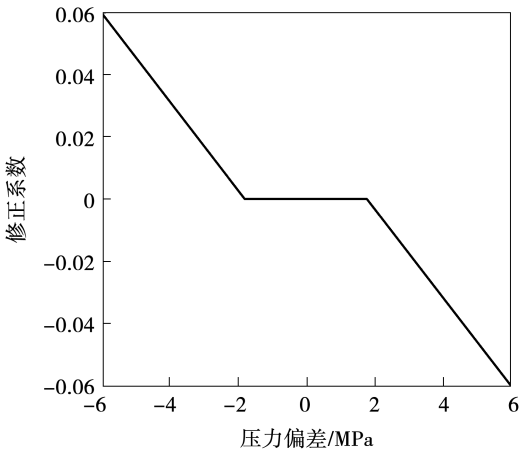


图 4 修正函数 2
Fig.4 Correction function 2

2.3 汽轮机模型

借鉴文献[17]提出的方法,对现有单再热式汽轮机模型进行优化,获得如图 5 所示的汽轮机数学模型。图中 q_{GV} 为综合阀位, δ 为调节级压力-负荷动态转换系数, T_{CH} 为高压缸前汽室容积时间常数, T_{RH} 为再热器容积时间常数, T_{CO} 为低压缸联通管汽室容积时间常数, F_{HP} 为高压缸做功比例, F_{IP} 为中压缸做功比例, F_{LP} 为低压缸做功比例, λ 为高压缸功率过调系数, P_M 为机械功率。该模型通过压比-综合阀位关系曲线、功率-调节级压力关系曲线构建了汽轮机进汽量与阀门开度、主蒸汽压力之间的关系。

根据案例机组历史运行数据和热力特性说明书,获得压比-综合阀位关系曲线和功率-调节级压力关系曲线,分别如图 6 和图 7 所示。与文献[17]不同的是,本文并没有将调节级压力-负荷动态转换系数 δ 作为数字式电液调节系统(Digital Electric Hydraulic Control System, DEH)的输出增益,而是用其修正蒸汽的做功能力。因为若将其作为 DEH 的输出增益,会造成仿真综合阀位与实际综合阀位存在差别,从而使通过图 6 压比-综合阀位关系曲线计算获得的压比偏离实际过程的压比。

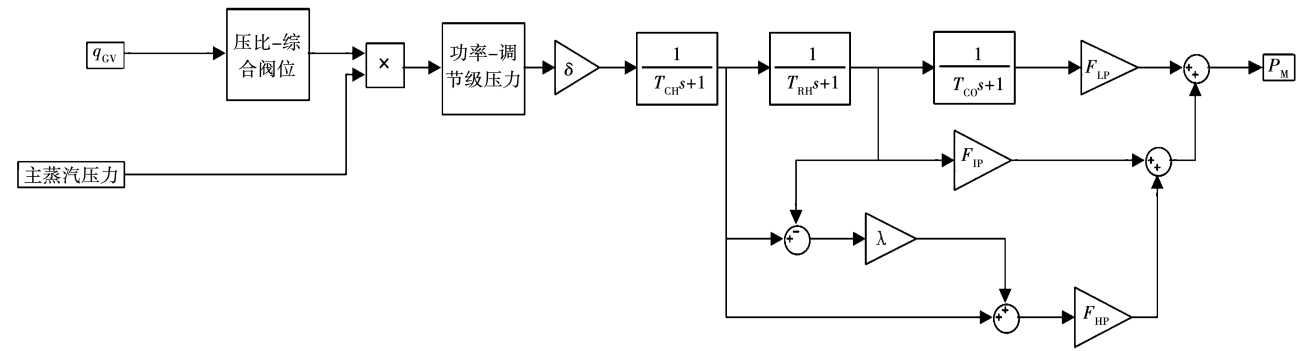


图 5 汽轮机数学模型

Fig.5 Mathematical model of steam turbine

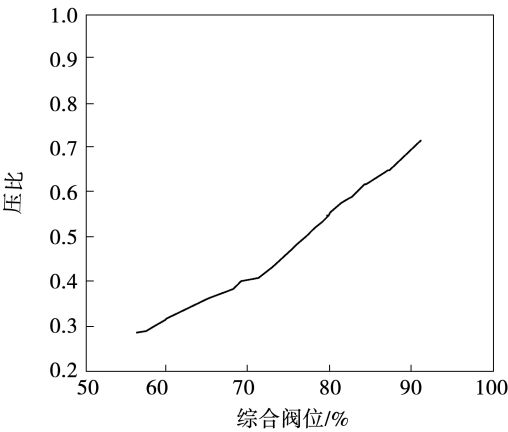


图 6 压比 - 综合阀位关系曲线

Fig.6 Pressure ratio-comprehensive valve position relation curve

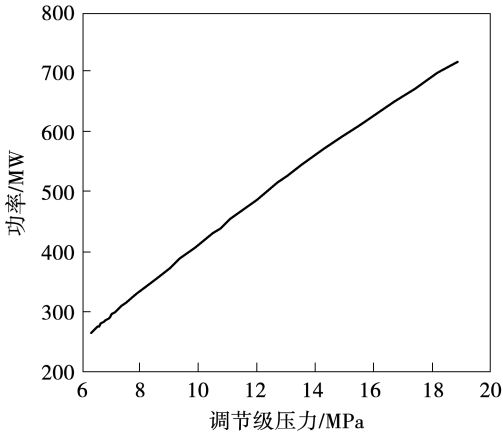


图 7 功率 - 调节级压力曲线

Fig.7 Power-governing stage pressure curve

因此可忽略锅炉燃料量的变化对主蒸汽压力的影响。在文献[5]推荐的主蒸汽压力模型的基础上进行简化,简化后的主蒸汽压力模型如图 8 所示。其中 T_d 为汽包蓄热时间常数, T_{sh} 为过热器容积时间常数, k 为流量系数。

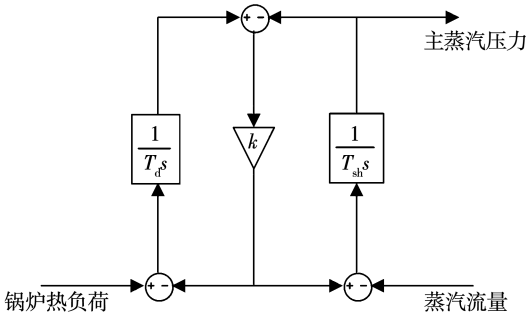


图 8 主蒸汽压力模型

Fig.8 Main steam pressure model

3 仿真结果与分析

本文建模对象为某 660 MW 超临界火电机组,为参与深度调峰市场,该机组进行了旁路供热改造,机组电功率最低可降至 20% 额定功率(下文以“ P_e ”代表额定功率)。在 20% ,40% 和 50% 额定功率下,分别进行了转差为 +10, ± 9 和 +10 r/min 的一次调频扰动试验(“+”、“-”分别表示负荷向上和向下扰动),并采用上述精细化模型对其一次调频响应过程进行仿真。

采用确定系数 R^2 表征仿真曲线和实测曲线之间的拟合优度, R^2 数值越大,说明仿真曲线与实测曲线越接近:

2.4 主蒸汽压力模型

一次调频主要关注短时间内(小于 60 s)机组的功率响应特性,机组锅炉存在较大的延迟和惯性,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

式中： y_i —实测值； $\hat{y}_i$ —仿真值； $\bar{y}_i$ —实测值的平均值。

3.1 功率响应特性

图9 是不同负荷工况下,一次调频动作过程中,机组功率响应曲线的对比图。表1 是精细化模型和典型模型仿真功率的确定系数。

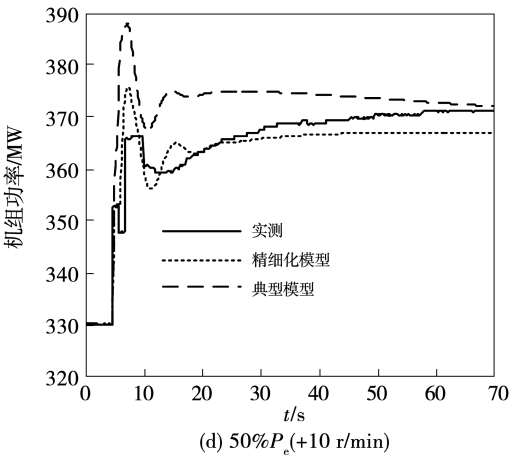
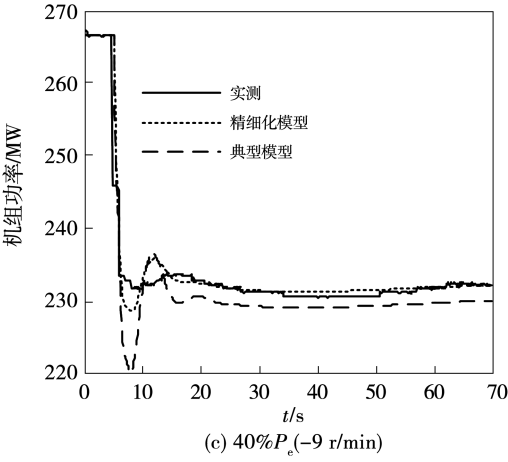
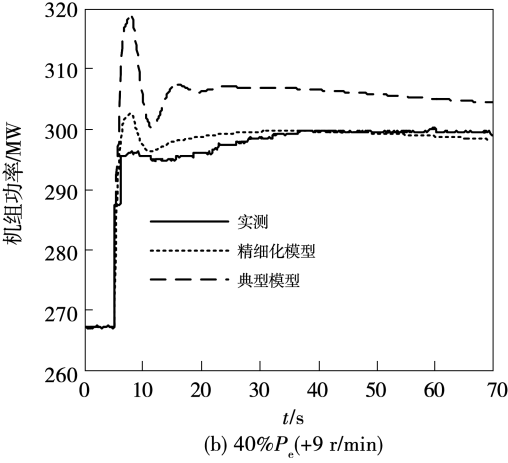
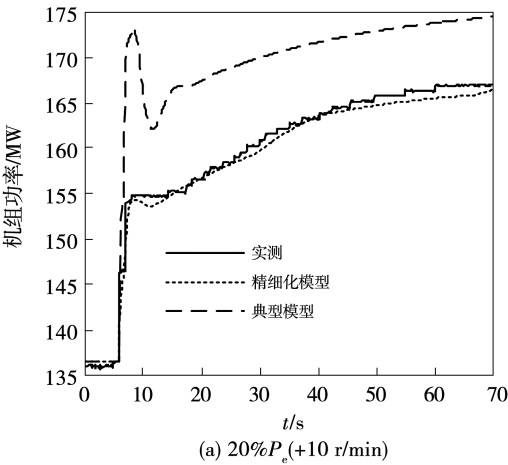


图9 实测与仿真功率曲线对比
Fig.9 Comparison of measured and simulated power curves

表1 仿真功率确定系数

Tab.1 Determination coefficient of simulated power

工况	R^2	
	精细化模型	典型模型
20% P_e (+10 r/min)	0.996	0.910
40% P_e (+9 r/min)	0.945	0.869
40% P_e (-9 r/min)	0.954	0.943
50% P_e (+10 r/min)	0.886	0.731

由图9 可以看出,在不同试验工况下,与现有典型模型相比,基于精细化模型得到的功率动态响应过程均与实测曲线更加接近,表现出更好的准确性和适用性。现有典型模型在40% P_e (-10 r/min) 的仿真工况中所获得的功率响应曲线相对准确,这是因为在特定的运行工况下,典型模型恰好能较为准确地反映当前机组的运行特性,但在其他负荷下则会偏离。

3.2 流量指令响应特性

现有关于汽轮机及其调速系统模型的研究工作通常仅将仿真计算获得的功率响应曲线和实测曲线进行对比来验证模型的准确性,忽略了流量指令和主蒸汽压力与实测数据的对比。因此,本文在功率响应曲线对比的基础上,将模型获得的综合阀位和主汽压力变化曲线同实测曲线进行对比。

图 10 是仿真流量指令和实测流量指令的对比图。表 2 是仿真流量指令的确定系数。由图 10 可以看出,基于精细化模型获得的流量指令更能反映机组在一次调频动作过程中流量指令的实际变化过程。由图 10(d)可以看出,精细化模型仿真流量指令在 3.5~4.5 s 的时间内有明显下降然后上升的趋势,该趋势与实测曲线完全一致,而典型模型仿真曲线并没有表现出这种趋势。这是因为在调速系统模型中加入了与机组逻辑组态一致的修正函数 1,当流量指令超过 85% 时,会对前馈系数 K_2 进行修正。

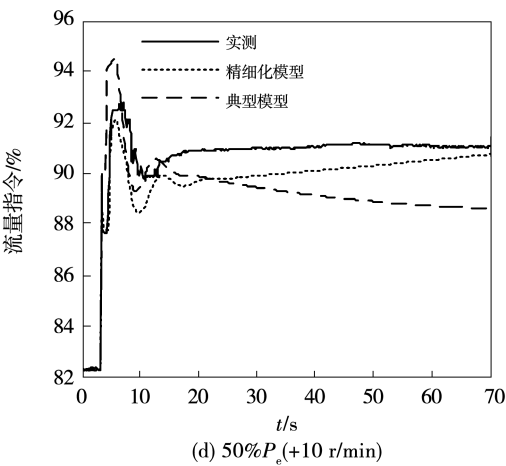
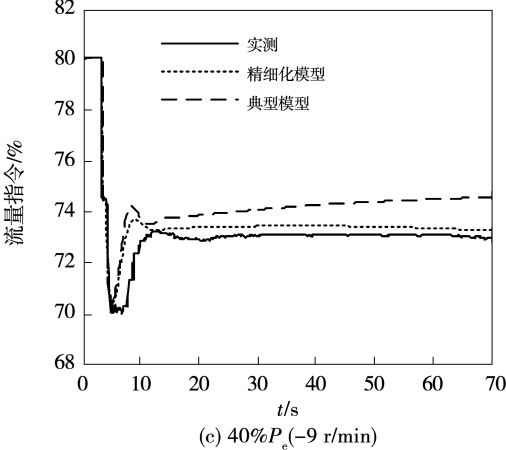
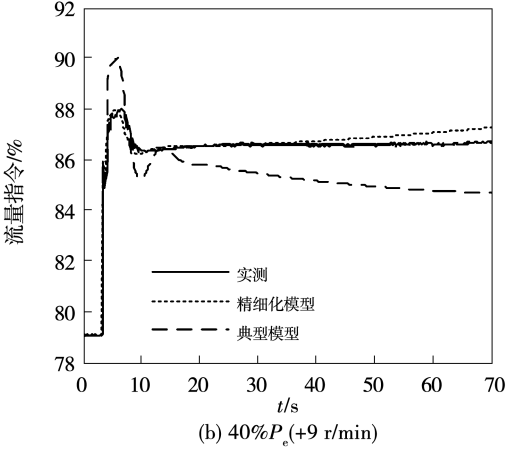
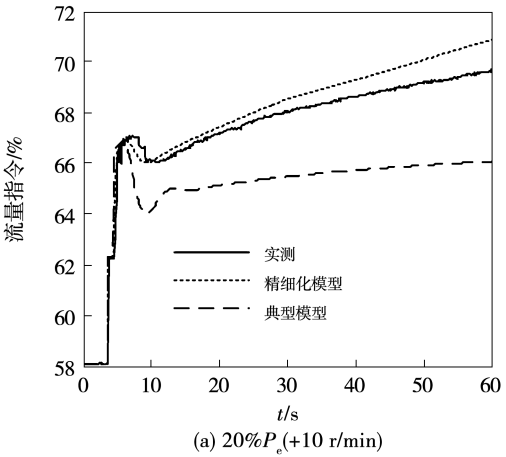


图 10 实测与仿真流量指令曲线对比
Fig. 10 Comparison of measured and simulated flow command curves

表 2 仿真流量指令确定系数
Tab. 2 Determination coefficient of simulated flow command

工况	R^2	
	精细化模型	典型模型
20% P_e (+10 r/min)	0.959	0.863
40% P_e (+9 r/min)	0.949	0.711
40% P_e (-9 r/min)	0.920	0.867
50% P_e (+10 r/min)	0.956	0.638

3.3 主蒸汽压力响应特性

图 11 是仿真主蒸汽压力和实测主蒸汽压力的对比曲线。表 3 是仿真主蒸汽压力确定系数。可以看出,在 20% P_e 和 40% P_e 下,基于精细化模型获得的主蒸汽压力变化曲线与实测主蒸汽压力变化曲线非常吻合。在 50% P_e 工况下,二者相对差别偏大,初步分析原因,在进行一次调频扰动试验前,锅炉热负荷存在波动,导致简化后的主蒸汽压力模型以及模型参数并不完全适用于该工况。

3.4 建模原则

对于某一确定工况(如 20% P_e),在改变调速系统参数设置的情况下,基于典型模型也可获得较为准确的功率响应曲线。将调速系统参数设置改为表 4 对应的数值,基于典型模型获得的功率响应曲线及流量指令曲线如图 12 和图 13 所示。

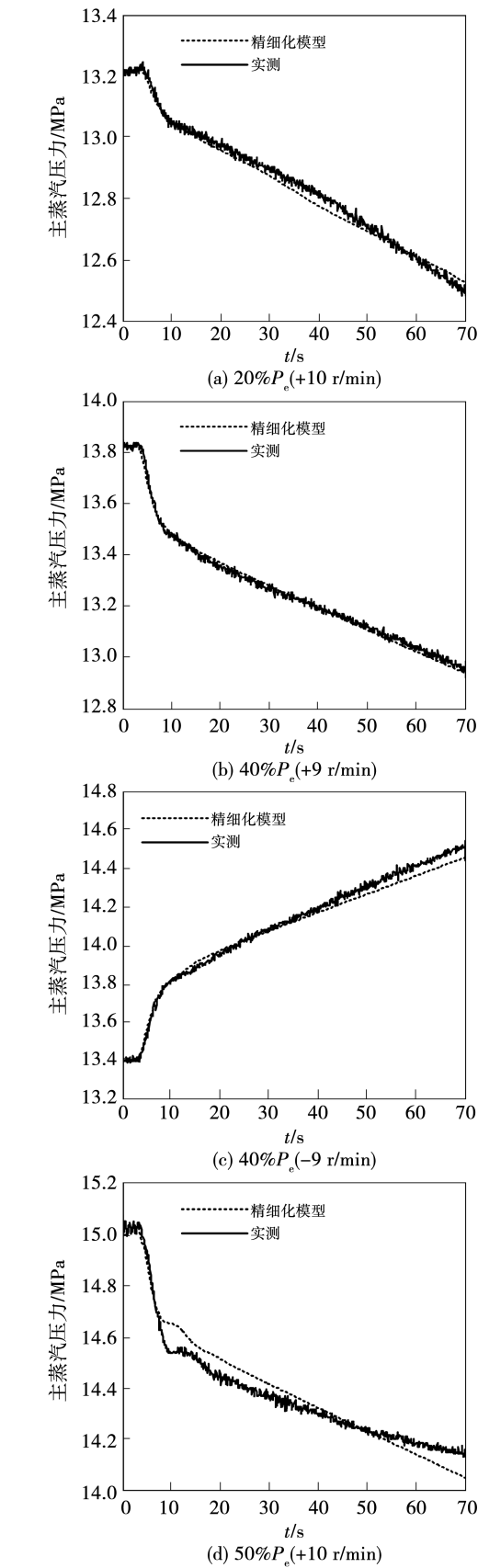


图 11 实测与仿真主蒸汽压力曲线对比

Fig. 11 Comparison of measured and simulated main steam pressure curves

表 3 仿真主蒸汽压力确定系数

Tab. 3 Determination coefficient of simulated main steam pressure

工况	R2
	精细化模型
20% P_e (+ 10 r/min)	0.991
40% P_e (+ 9 r/min)	0.997
40% P_e (- 9 r/min)	0.997
50% P_e (+ 10 r/min)	0.964

表 4 调速系统参数

Tab. 4 Speed control system parameters

参数	数值	
	修改前	修改后
转速放大系数 K_1	22.7	22.7
前馈系数 K_2	0.693	0.396
功率比例系数 K_P	0.687	0.29
功率积分系数 K_I	0.05	0.027
功率微分系数 K_D	0	0

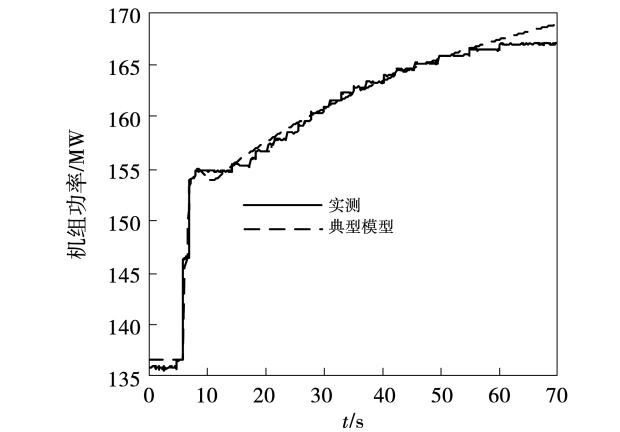


图 12 参数修改后 20% P_e 实测与仿真功率曲线对比

Fig. 12 Comparison of measured and simulated power curves at 20% P_e after parameter modification

可以看出,与图 9(a) 相比,参数修改后,典型模型在功率响应特性上表现出更好的准确性,但是仿真流量指令与实测曲线明显相差较大。并且该参数不适用于 40% P_e ,如图 14 所示,说明典型模型并没有正确反映机组一次调频的响应过程。

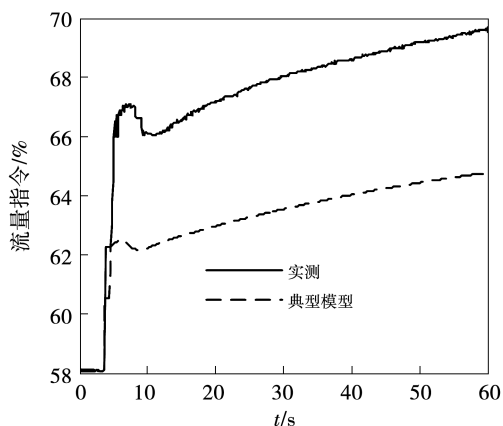


图 13 参数修改后 20% P_e 实测与
仿真流量指令曲线对比

Fig. 13 Comparison of measured and simulated
flow command curves at 20% P_e after
parameter modification

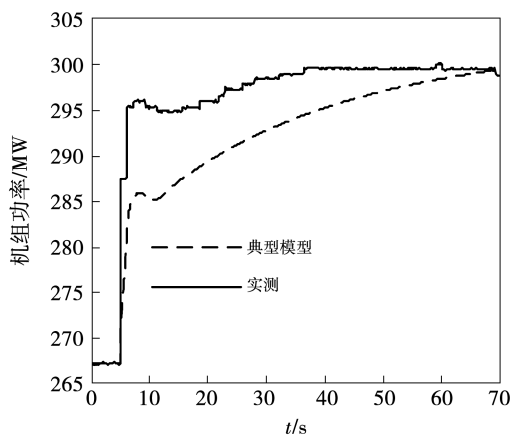


图 14 参数修改后 40% P_e 实测与
仿真功率曲线对比

Fig. 14 Comparison of measured and simulated power
curves at 40% P_e after parameter modification

基于上述结果,在不考虑蒸汽温度、背压、回热抽汽等影响机组功率的其他因素时,判断汽轮机及其调速系统模型能否在不同负荷下正确反映机组的一次调频特性,不能仅关注模型的功率响应特性,还应考虑流量指令和主蒸汽压力的响应过程,只有当三者均与实测曲线吻合,才能说明所建立的模型正确反映了机组的运行特性。

4 结 论

(1) 分析总结了汽轮机及其调速系统典型模型

适用性差的原因,指出了模型优化方向。针对某 660 MW 超临界火电机组,在优化调速系统模型的基础上,建立了考虑机组流量特性和主蒸汽压力影响的更为精细化的汽轮机及其调速系统模型,通过仿真数据与实测数据的对比,验证了模型的准确性和适用性。

(2) 提出了判断汽轮机及其调速系统模型是否能够在不同负荷下正确反映机组一次调频响应特性的原则:需要将仿真功率曲线、仿真流量指令曲线、仿真主蒸汽压力曲线分别与实测曲线对比,只有 3 条曲线同时表现出较好的拟合性,才能说明模型正确体现了机组的运行特性,才具有更好的适用性。

参考文献:

- [1] 李树明,刘青松,朱小东,等. 350 MW 超临界热电联产机组灵活性改造分析[J]. 发电技术,2018,39(5):449-454.
LI Shu-ming, LIU Qing-song, ZHU Xiao-dong, et al. Flexibility transformation analysis of 350 MW supercritical cogeneration unit [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 449-454.
- [2] 刘双白,张 晶,吴 昕,等. 320 MW 机组低压缸零出力性能分析及应用研究[J]. 中国电力,2021,54(5):213-220.
LIU Shuang-bai, ZHANG Jing, WU Xin, et al. Performance analysis and application research of low-pressure cylinder zero output technology on 320 MW Unit [J]. Electric Power, 2021, 54(5): 213-220.
- [3] GB/T 40594-2021,电力系统网源协调技术导则[S].
GB/T 40594-2021, Technical guide for power grid and source coordination [S].
- [4] 国网湖南省电力公司电力科学研究院. 火电机组控制系统建模仿真的实践与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2016.
Electric Power Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Company. Practice and application of modeling and simulation of thermal power unit control system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [5] DL/T 1235-2019,同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则[S].
DL/T 1235-2019, Guide for modeling and testing of generators prime mover and governing system [S].
- [6] 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.
TIAN Yun-feng, GUO Jia-yang, LIU Yong-qi, et al. Reheat condensing steam turbine mathematical model used for computing power grid stability [J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 39-44.
- [7] 刘 辉,田云峰,吴 涛. 考虑机组协调控制的汽轮机调速器模型及其应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(22):103-107.

LIU Hui, TIAN Yun-feng, WU Tao. A new turbine governor model including unit plant coordinated control system and its application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (22): 103 – 107.

[8] 于达仁, 郭钰锋, 王晓娟, 等. 计及回热器蓄热效应的汽轮机动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 84 – 88.

YU Da-ren, GUO Yu-feng, WANG Xiao-juan, et al. Dynamic turbine model with regenerator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 84 – 88.

[9] JIANG P, GAO L, DAI Y. A new non-linear model of steam turbine unit for dynamic analysis of power system[C]// 2010 International Conference on Power System Technology. IEEE, 2010.

[10] 韩忠旭, 周孝信, 李芳, 等. 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, 34(12): 180 – 186.

HAN zhong-xu, ZHOU Xiao-xin, LI Fang, et al. Analysis on mathematical model of reheat condensing turbine for power unit and simulation of its dynamic response[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 180 – 186.

[11] 陈彦峰. 计及阀门流量特性的再热凝汽式汽轮机模型及其仿真校验[J]. 湖南电力, 2017, 37(6): 17 – 20.

CHEN Yan-feng. Modeling and calibration of reheat turbine in consideration of flow characteristics of turbine valve[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(6): 17 – 20.

[12] 盛 锴, 刘复平, 刘武林, 等. 汽轮机阀门流量特性对电力系统的影响及其控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 104 – 109.

SHENG Kai, LIU Fu-ping, LIU Wu-lin, et al. Influence of steam turbine valve discharge characteristics on power systems and its control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 104 – 109.

[13] 李冰天, 王 强, 张军科, 等. 考虑阀门管理函数的汽轮机调速系统稳定性分析[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 150 – 156.

LI Bing-tian, WANG Qiang, ZHANG Jun-ke, et al. Stability analysis for turbine speed control system considering valve management function [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50 (2): 150 – 156.

[14] 刘晓强, 王西田. 考虑主蒸汽压力变化的机组一次调频动态特性[J]. 热能动力工程, 2008, 23(2): 140 – 143.

LIU Xiao-qiang, WANG Xi-tian. Dynamic characteristics of the primary frequency modulation of a turbo-generator under a due consideration of main steam pressure variation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008, 23(2): 140 – 143.

[15] 励 刚, 曹 路, 李建华, 等. 基于全工况试验修正的汽轮机调速系统模型研究[J]. 华东电力, 2014, 42(5): 939 – 942.

LI Gang, CAO Lu, LI Jian-hua, et al. Turbine speed governing system modeling based on all-condition experimental correction [J]. East China Electric Power, 2014, 42 (5): 939 – 942.

[16] 顾正皓, 包劲松, 张 宝, 等. 考虑主蒸汽压力的燃煤机组调速模型的分析与改进[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 93 – 98.

GU Zheng-hao, BAO Jin-song, ZHANG Bao, et al. Analysis and improvement of speed governor model considering the main steam pressure influences[J]. Electric Power, 2016, 49(9): 93 – 98.

[17] 盛 锴, 邹 鑫, 邱 靖, 等. 火电机组一次调频功率响应特性精细化建模[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 111 – 118, 152.

SHENG Kai, ZOU Xin, QIU Jing, et al. Refined modeling for power response characteristic of thermal power unit under primary frequency control [J]. Electric Power, 2021, 54 (6): 111 – 118, 152.

[18] 贾 斌, 李晓波, 殷建华. 低压缸零出力改造机组汽轮机及其调节系统参数实测建模[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(3): 12 – 18.

JIA Bin, LI Xiao-bo, YIN Jian-hua. Parameter measurement modeling of steam turbine and governing system of low pressure cylinder zero output renovation unit[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2021, 39(3): 12 – 18.

[19] 刘新龙, 巨林仓, 胡 平, 等. DEH 阀门流量特性曲线校正[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(4): 288 – 290.

LIU Xin-long, JU Lin-cang, HU Ping, et al. Adjustment for the flow characteristic curve of DEH valves[J]. Turbine Technology, 2011, 53(4): 288 – 290.

[20] 中国电力科学研究院有限公司. PSD-ST 暂态稳定程序用户手册(5.7) [R]. 北京: 中国电力科学研究院有限公司, 2020.

China Electric Power Research Institute Co., Ltd. PSD-ST transient stability program user manual (5.7) [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute Co., Ltd., 2020.

[21] 国网浙江省电力有限公司. 汽轮机流量特性与机网协调控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.

State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Turbine flow characteristics and turbine network coordinated regulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020.

[22] 赵 婷, 田云峰. 用于电网稳定分析的电液伺服及执行机构数学模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 98 – 103.

ZHAO Ting, TIAN Yun-feng. Math model of electro-hydraulic servo and actuator system for power grid stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 98 – 103.

(刘 颖 编辑)