

# 火电机组一次调频性能实时监测系统

盛 锴<sup>1</sup>, 邹 鑫<sup>2</sup>, 朱晓星<sup>3</sup>, 陈 珣<sup>4</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410007; 2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410004;  
3. 高效清洁火力发电技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410007; 4. 湖南省湘电试验研究院有限公司, 湖南长沙 410006)

**摘要:** 为了实时监测和评价火电机组一次调频性能, 开发了火电机组一次调频性能实测监测系统。该系统具有一次调频参数异动感知、一次调频性能量化预测及自适应校正等关键功能。某机组的实际应用表明, 该系统能够实现火电机组一次调频关键参数的实时监测和调频性能的准确预测。

**关键词:** 火电机组; 一次调频; 实时监测; 参数异动感知; 性能量化预测; 自适应校正

中图分类号: TM621 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.08.024

[引用本文格式] 盛 锴, 邹 鑫, 朱晓星, 等. 火电机组一次调频性能实时监测系统[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 197-203. SHENG Kai, ZOU Xin, ZHU Xiao-xing, et al. Thermal power unit's real-time performance monitoring system for primary frequency modulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 197-203.

## Thermal Power Unit's Real-time Performance Monitoring System for Primary Frequency Modulation

SHENG Kai<sup>1</sup>, ZOU Xin<sup>2</sup>, ZHU Xiao-xing<sup>3</sup>, CHEN Xun<sup>4</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007; 2. State Grid Hunan Electric Power Co. Ltd., Changsha, China, Post Code: 410004; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency & Clean Thermal Power Technology, Changsha, China, Post Code: 410007; 4. Hunan Xiangdian Test & Research Institute Co. Ltd, Changsha, China, Post Code: 410006)

**Abstract:** In order to monitor and evaluate the primary frequency modulation performance of thermal power unit in real time, a performance monitoring system for primary frequency modulation of thermal power unit was developed. This system has the key functions such as abnormal response of parameter variation, performance quantitative prediction of primary frequency modulation and self-adaptive correction, etc. The practical application of a unit shows that the system can realize the real-time monitoring for key parameter variation of primary frequency modulation of thermal power unit and predict the frequency modulation performance accurately.

**Key words:** thermal power unit, primary frequency control, online monitoring, parameter variation sensing, performance quantitative prediction, self-adaptive correction

## 引言

火电机组的一次调频性能具有非线性和时变特

性, 运行工况、控制参数及本体特性变化均有可能导致一次调频性能恶化<sup>[1-2]</sup>。2015年9月19日, 锦苏特高压直流线路发生双极闭锁, 华东电网损失发电约3.55%, 造成了约0.41 Hz的频率跌落。频率异

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-10-18

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A520000D)

**Fund-supported Project:** Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. (5216A520000D)

作者简介: 盛 锴(1983-), 男, 湖南长沙人, 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院高级工程师。

常跌落与网内部分火电机组一次调频性能不佳密切相关<sup>[3-4]</sup>。为了更好地管理火电机组一次调频性能,目前在华东、华中等电网已建成或正在建设一次调频主动测试系统,通过远程、定期测试的方式,对火电机组的一次调频性能进行评价<sup>[5-6]</sup>。

为了能够准确预测火电机组一次调频性能,本文开发了一套火电机组一次调频性能实时预测系统,该系统能够实时监测一次调频关键参数、实时预测火电机组一次调频性能及实现一次调频性能预测的自动校正。在某 600 MW 超临界机组完成了该系统的应用,应用结果表明,该系统能够准确预测火电机组的一次调频性能,能够为其性能优化调整提供指导依据。

### 1 核心功能

为实现火电机组一次调频性能精确监测的目的,首先分析当前一次调频性能监测系统存在的问题,并围绕其存在的难点开展火电机组一次调频性能实时监测系统核心功能的设计开发。大量工程实践表明,精确监测存在以下难点:

- (1) 一次调频控制参数,如转速不等率、死区及 PID 参数等存在异常修改的可能,进而导致机组一次调频性能发生变化;
- (2) 对机组一次调频性能的分析主要还停留在定性分析阶段,尚缺少精确定量分析的技术手段;
- (3) 机组运行特性的非线性和时变性(如阀门流量特性)将导致机组一次调频性能随工况和时间而变化。

针对以上难点,分别设计了一次调频参数异动感知、一次调频性能量化预测和一次调频特性参数自适应校正 3 大核心功能予以应对。

#### 1.1 一次调频参数异动感知

火电机组一次调频控制参数如转速不等率、死区、PID 参数等对其性能表现具有重要作用。根据《电力系统网源协调技术规范》,原则上以上参数不得擅自变更。然而出于某些原因以及火电机组分散控制系统(DCS)的开放性,以上参数的异常调整并不鲜见,由此可能带来一次调频性能变化、异常等涉网风险。一次调频参数异动感知功能的设计目的就是使系统能够动态感知一次调频参数的变化。

一次调频控制参数对一次调频性能的影响首先

会体现在某些中间量上,如改变一次调频 PID 参数会导致相同条件下总阀位指令曲线形态变化、改变转速不等率将导致调频目标功率变化。据此设计一次调频参数异动感知功能:在本系统中构建与 DCS 内结构和参数一致的一次调频控制仿真模型,当实际机组发生一次调频动作时收集总阀位指令和调频目标功率等实际数据,将所构建的模型置于与实际机组一致的仿真条件下,计算生成总阀位指令和调频目标功率的仿真数据,比较总阀位指令和调频目标功率实测数据与仿真数据的一致性,若吻合度好则说明一次调频控制参数正常,反之则可能发生参数异动。

典型的一次调频功能设计如图 1 所示。调频目标功率由机组转速差经不等率函数运算得到。协调控制系统(CCS)或功率回路侧体现网频变化的转速差经转速不等率设计函数进行调频目标功率补偿,而数字电液系统(DEH)侧则将转速差信号经转速不等率设计函数直接叠加在汽轮机调节汽阀上。DEH 侧的调频作用直接控制汽轮机调节汽阀开度,从而迅速改变机组功率;而 CCS 或功率回路侧的调频作用经 PID 控制器运算后对机组功率进行闭环调节,保证了机组稳态功率与调频目标功率一致。

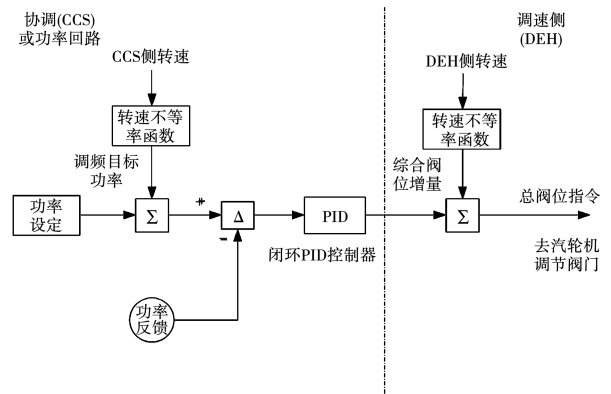


图 1 火电机组一次调频原理

Fig. 1 Schematic diagram of thermal power unit's primary frequency modulation

尽管对于一次调频结构设计有标准要求,但实际上不同机组的一次调频控制策略差异较大且存在与典型设计偏离的可能。因此,在构建一次调频控制模型方面,需要提高模型适应性以覆盖各种一次调频控制策略。经过梳理大量实际机组的一次调频控制策略,构建如图 2 所示的一次调频控制模型。

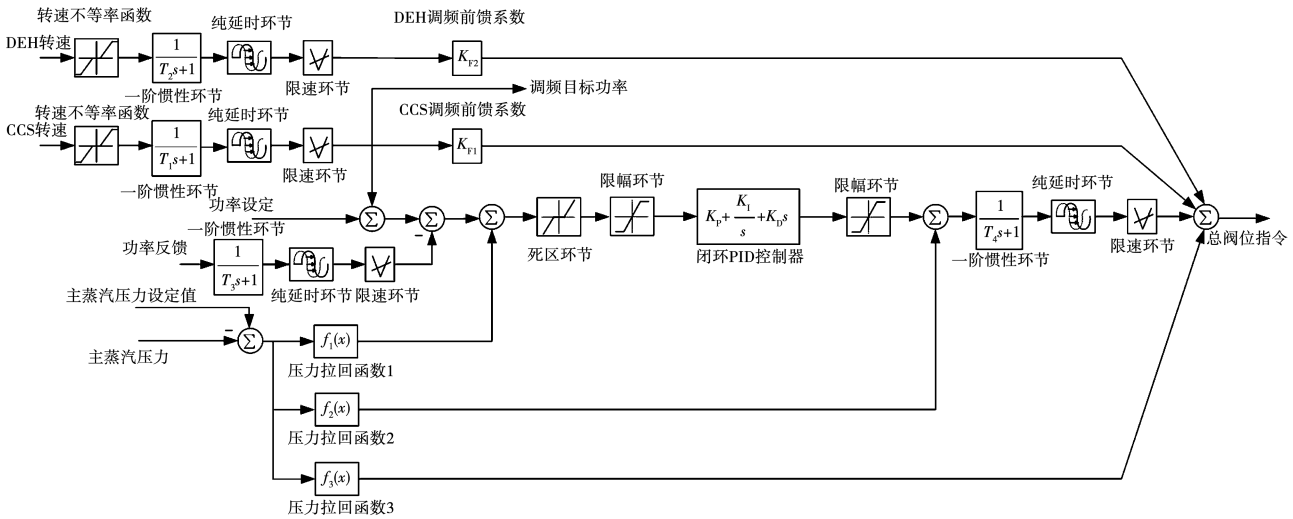


图 2 一次调频控制模型

Fig.2 Model of controller for primary frequency modulation

对比图 1、图 2 可知,图 2 模型增加了大量额外环节,如惯性环节,死区、限速以及延时等非线性环节,这些在实际机组的一次调频控制策略中较为常用。需要指出的是,这些环节在具体机组上并非都起作用,若实际策略的具体回路上没有以上环节,可以通过设置环节参数使之不起作用。而对于具体回路上存在多个相同环节时,则可采取合并或转换的方式将其等效为图 2 中的某一对应环节。若存在多个纯延时环节,则将延时时间累加等效为一个环节;若有多个限速环节,可取限速率最小环节进行等效。然而,由于一次调频控制策略的多样性,并不能保证该模型能够完全适用于所有类型的一次调频控制策略。对于更为特殊的策略,仍需对图 2 模型进行调整优化以提高其适用性。

实际机组的一次调频设计中,CCS/DEH 前馈系数、PID 控制参数采用变参数较为常见。这样设计的目的是,通过参数调整以匹配不同工况,进而维持不同工况下的机组一次调频性能。因此,在构建通用一次调频控制模型之外,控制模型的 CCS/DEH 前馈系数、PID 控制参数可设置为固定参数或是变参数模式,以与实际机组策略相匹配。

## 1.2 一次调频特性参数自适应校正

### 1.2.1 阀门流量特性

汽轮机的阀门流量特性存在非线性和时变双重

特点。当阀门流量函数设置不合理时,将导致其非线性;而阀序调整、阀门解体检修和长期运行造成特性变化等原因又使其具有时变的特点。参考文献 [7] 提出的阀门流量特性在线监测优化方法,周期性地读取机组总阀位指令、调节级压力及主汽压力数据,并据此计算和更新阀门流量特性函数。通过反复计算,以保障模型中的阀门流量特性环节与机组实际匹配。

### 1.2.2 汽轮机响应特性参数

汽轮机响应特性参数是指高、中、低压缸功率比例,蒸汽容积、再热蒸汽、交叉管时间常数及高压缸功率自然过调系数。其自适应校正原理与主汽压响应特性参数一致。

### 1.2.3 主汽压响应特性参数

分别在 400 及 580 MW 两个工况下对某机组进行一次调频试验,其主汽压力响应趋势及根据实际响应数据辨识所得主汽压响应特性参数如图 3 所示。

图 3 中,根据辨识所得主蒸汽压力响应特性参数和图 5 所示主蒸汽压力模型生成的主蒸汽压力仿真曲线与实测曲线能够较好吻合。然而不同工况下,具体参数的辨识值差异较大,这表明不同工况下由主汽压响应特性参数所表征的主汽压力动态特性也存在一定差异。而这种差异需要在模型使用时加

以考虑,以避免其对一次调频性能预测准确性的影响。

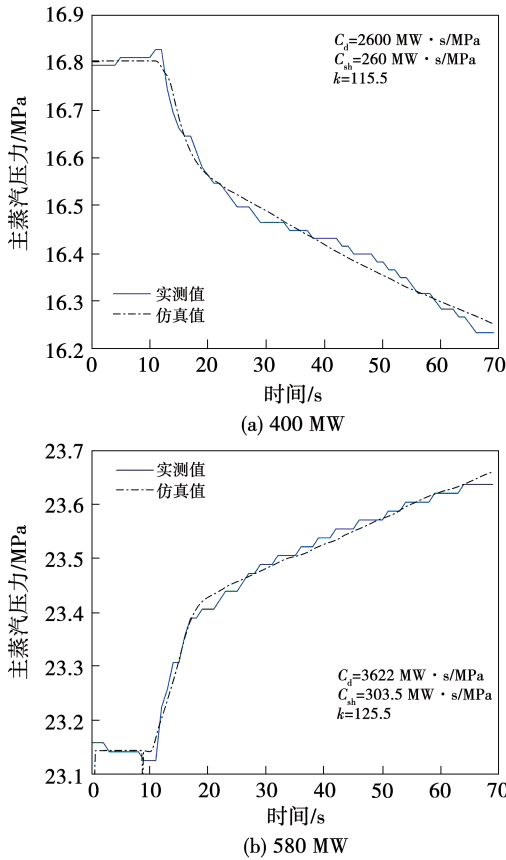


图 3 主汽压力响应趋势

Fig. 3 Response trends of throttle pressure

通过建立主汽压力响应特性参数的数据库,并确定数据库数据调用原则,以改善主汽压力特性非线性的影响。所述主汽压响应特性参数数据库中数据元素由锅炉蓄热系数  $T_d$ 、过热器蓄热系数  $T_{sh}$ 、过热器及主汽管道流量系数  $k$  及相似度特征向量组成。发生一次调频扰动时,系统对  $T_d, T_{sh}, k$  进行辨识,辨识得到的  $T_d, T_{sh}, k$  及相似度特征向量  $A_i$  将被写入数据库。 $A_i$  定义为:  $A_i = [\mu_i^*, p_{T,i}^*, P_i^*]$ , 其中  $A_i$  为第  $i$  次扰动对应的相似度特征向量;  $\mu_i^*$  是第  $i$  次扰动前的稳态总阀位指令;  $p_{T,i}^*$  是第  $i$  次扰动前的稳态主汽压力;  $P_i^*$  是第  $i$  次扰动前的稳态负荷。当要进行一次调频性能预测时,系统首先读取当前机组的相似度特征向量  $A$  ( $A = [\mu, p, P]$ , 其中  $\mu^*$  是当前工况稳态总阀位指令;  $p_{T,i}^*$  是当前工况稳态主蒸汽压力;  $P^*$  是当前工况稳态负荷), 并计算相似度

指标  $J$ :

$$J = \frac{1}{3} \left[ \left( \frac{\mu - \mu_i^*}{\mu_R} \right)^2 + \left( \frac{p_T - p_{T,i}^*}{p_{T,R}} \right)^2 + \left( \frac{P - P_i^*}{P_R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中:  $\mu_R$  —总阀位指令额定值 (= 100%);  $p_{T,R}$  —主蒸汽压力额定值;  $P_R$  —负荷额定值。

根据  $J$  计算数据库中各元素与当前预测工况的相似度,选取  $J$  最小的数据库元素  $T_d, T_{sh}$  和  $k$  作为计算参数进行一次调频性能预测。

主汽压力响应特性参数自适应校正方法可归纳为:(1) 通过一次调频扰动试验辨识不同工况下的响应特性参数;(2) 将各工况下的响应特性参数写入数据库,随着扰动次数的增多,数据库将实现对响应特性参数非线性特征的全面覆盖;(3) 依据相似度指标  $J$  选择数据库中最优参数进行一次调频性能预测,提高预测精度。

### 1.3 一次调频性能量化预测

工程实践表明,技术专家根据其工程经验并结合其对机组特性的分析,一定程度上可以对机组一次调频性能进行定性分析和评价。但无论是国内各区域的“两个细则”还是相关规程,对于机组一次调频性能的评价是有量化指标的。定性评价的结果无法精确反映和预测实际机组的一次调频性能。本文通过构建一次调频性能响应模型以实现一次调频性能的精量化预测。所述一次调频性能响应模型如图 4 所示。

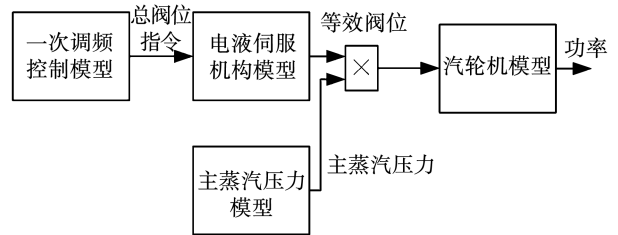


图 4 一次调频性能响应模型

Fig. 4 Model of primary frequency modulation performance response

一次调频控制模型模拟 DCS 中的一次调频控制策略计算生成总阀位指令;电液伺服机构模型模拟实际机组的高压调节汽阀特性并根据总阀位指令形成等效阀位;主汽压力模型模拟一次调频动作过

程中主汽压的动态变化;等效阀位与主汽压力之积决定了进入汽轮机模型的蒸汽流量,汽轮机模型通过模拟蒸汽流量的膨胀做功过程输出仿真功率。电液伺服机构模型、主汽压力模型及汽轮机模型参考文献[8]的改进模型搭建,如图 5 ~ 图 7 所示。

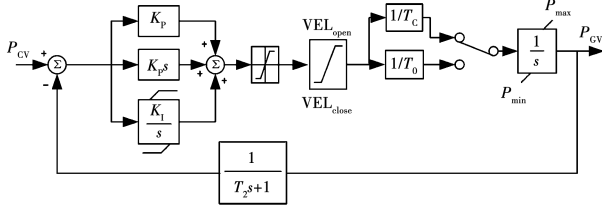


图 5 电液伺服机构模型

Fig.5 Model of turbine actuator

电液伺服机构模型如图 5 所示。其中,  $K_p, K_i, K_d$  分别为电液伺服机构比例、积分、微分系数;  $VEL_{open}, VEL_{close}$  分别为油动机最大开启、关闭速度;  $T_o, T_c$  分别为油动机开启、关闭时间常数;  $T_2$  是反馈环节滤波时间常数;  $P_{max}, P_{min}$  分别为汽门开度上限、下限。与实际机组 2 ~ 6 个高压调节汽阀不同的是, 图 5 仅用 1 个电液伺服机构模型代表实际机组所有的高压调节汽阀, 因此其输出  $P_{cv}$  表征的是所有高压调节汽阀的等效阀位而非单个高压调节汽阀的实际阀位。

$p_T$  是主蒸汽压力) 的关系;  $F_{HP}, F_{IP}, F_{LP}$  分别为高、中、低压缸功率比例;  $T_{CH}, T_{RH}, T_{CO}$  分别为蒸汽容积、再热蒸汽及交叉管的时间常数;  $\lambda$  是高压缸功率自然过调系数。

主汽压力模型如图 7 所示。其中,  $T_d$  是锅炉蓄热系数;  $T_{sh}$  是过热器蓄热系数;  $k$  是过热器及主蒸汽管道流量系数。

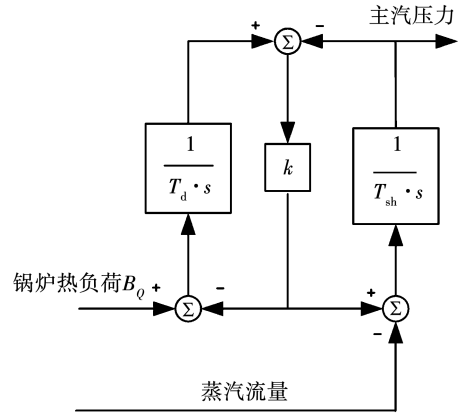


图 7 主汽压力简化模型

Fig.7 Model of throttle pressure

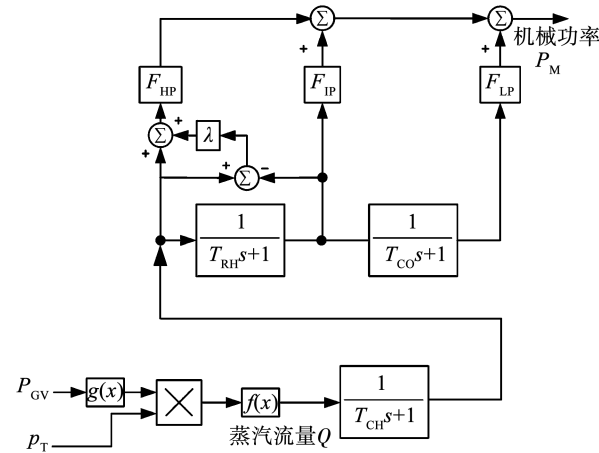


图 6 汽轮机模型

Fig.6 Model of steam turbine

汽轮机模型如图 6 所示。其中,  $f(x)$  表示调节级压力与负荷的函数关系;  $g(x)$  表示由等效阀位(总阀位指令)与压比  $\varepsilon (\varepsilon = \frac{p_1}{p_T}, p_1$  为调节级压力,

## 2 系统应用

### 2.1 系统实现

基于编程软件 LabVIEW 2017, 开发了火电机组一次调频性能实时监测系统。采用 Modbus RTU 协议和《电力系统实时动态监测系统技术规范》从机组 DCS 或同步向量测量装置(PMU)获取一次调频参数异动感知、一次调频性能预测在内的核心功能所需机组实时运行数据。该系统主要功能包括: (1) 一次调频参数异动感知, 计算比对系统预测的调频目标功率、总阀位指令与实际值偏差; (2) 参数自适应校正, 当机组发生实际一次调频扰动时, 系统对主蒸汽压力响应特性参数、汽轮机响应特性参数进行辨识; (3) 预测结果校核, 当机组发生实际一次调频扰动时, 比对功率响应预测曲线与实际机组扰动曲线, 可视化显示预测精度; (4) 一次调频性能量化预测, 基于机组实际运行工况, 周期性计算当前机组的一次调频负荷响应仿真曲线; (5) 阀门流量特性监测, 周期性地更新计算阀门流量特性曲线。

## 2.2 系统应用

将该系统应用于某 600 MW 超临界火电机组,两者通过 Modbus RTU 实现通讯,对系统的核心功能进行测试验证。

### 2.2.1 一次调频参数异动感知

该机组汽机主控参数原始设置为:比例系数  $K_p = 0.2$ ,积分系数  $K_i = 0.05$ ,前馈系数  $K = 1$ 。依照此对系统中的对应参数进行设置。对实际机组进行一次调频试验,首次试验时汽机主控参数保持原始参数;再次试验前将汽机主控参数调整为: $K_p = 0.4, K_i = 0.1, K_d = 0.8$ 。系统计算生成总阀位指令预测曲线并与机组实测值进行比对,如图 8 所示。

当系统的一次调频控制参数与实际机组一致时,总阀位指令预测值与实际值几乎一致;当参数不同时,两者存在偏差。监测系统将根据预测曲线与实际曲线的拟合度分析系统与机组参数的一致性,为判断机组侧参数是否存在异动提供依据。

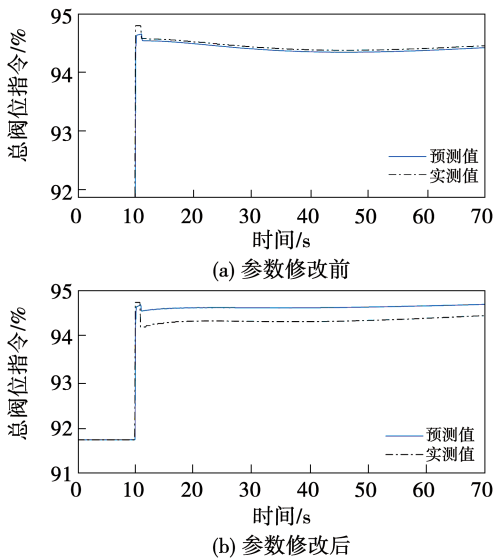


图 8 总阀位指令预测及实测曲线

Fig. 8 Prediction curves and actual curves of total valve position instruction

### 2.2.2 参数自适应校正

一次调频功率响应预测曲线是根据系统默认参数计算得到的,此时预测曲线与实际曲线存在较为明显的差异。一般来说,交叉管时间常数  $T_{Co}$  较小,可对中、低压缸进行合缸处理<sup>[9]</sup>,此时系统视  $T_{Co} = 0, F_{LP} = 0, F_{IP} = 1 - F_{HP}$ ,以提高辨识效率。利用此

次扰动数据,系统辨识得到了主蒸汽压力、汽轮机响应特性参数,辨识参数与默认参数对比如表 1 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of the model

参数	默认值	辨识值
高压缸功率比例 $F_{HP}$	0.3	0.3
中压缸功率比例 $F_{IP}$	0.7	0.7
低压缸功率比例 $F_{LP}$	0	0
高压缸功率自然过调系数 $\lambda$	0.667	1.082
蒸汽容积时间常数 $T_{CH}$	1	1.11
再热蒸汽容积时间常数 $T_{RH}$	10	24.43
交叉管时间常数 $T_{Co}$	0	0
锅炉蓄热系数 $C_d$	2 812	3 038.5
过热器蓄热系数 $C_{sh}$	300	240
过热器及主汽管道流量系数 $k$	200	145

得到辨识值并更新数据库后,再次在相邻工况进行一次调频扰动试验,此时预测及仿真曲线对比如图 9 所示。预测曲线能够与实测曲线较好吻合,参数自适应校正达到了预期目标。

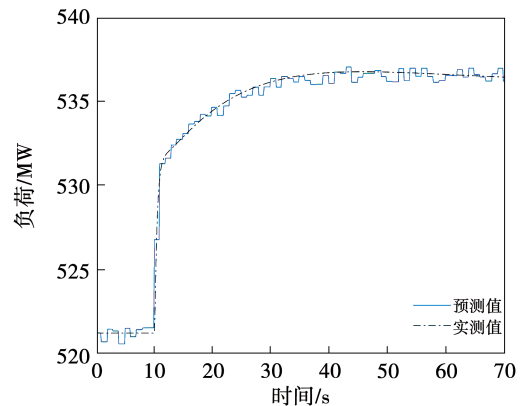


图 9 负荷预测及实测曲线

Fig. 9 Prediction curves and actual curves of load

### 2.2.3 一次调频性能量化预测

除 520 MW 工况外,分别在 450 及 580 MW 两个工况下测试一次调频性能量化预测功能,结果如图 10 所示。

由图 9 ~ 图 10 可知,尽管不同工况下机组实际负荷响应曲线形态存在差异,但系统预测曲线仍能与其较好吻合。

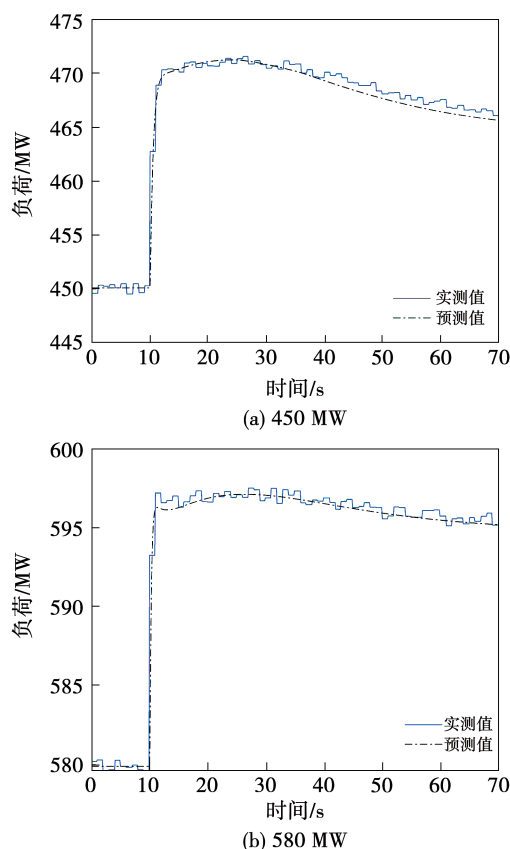


图10 450 MW和580 MW工况负荷预测及实测曲线

Fig. 10 Prediction curves and actual curves of load under 450 MW and 580 MW conditions

### 3 结 论

开发了一套火电机组一次调频性能实时监测系统,实现了火电机组一次调频参数异动感知、一次调频性能量化预测、一次调频参数自适应校正。

(1) 构建了一次调频控制模型,通过比较模型仿真输出与机组实际输出的差异,从而判断一次调频死区、转速不等率及PID参数是否存在异动可能。

(2) 设计了基于一次调频性能响应模型的性能量化预测算法,实现了对火电机组一次调频性能的在线量化预测。

(3) 提出了一次调频参数自适应校正的方法,利用该方法可动态优化一次调频参数,提升一次调频性能量化预测的精度。

(4) 所开发的系统可为电网和电厂提供一种一次调频功能性能精细化管理和优化工具,具有一定的工程应用价值。

### 参考文献:

[1] 张小科,郭 辉,刘 恪,等.大型火电机组一次调频反调问题

研究[J]. 电站系统工程,2021,37(1):69-73.

ZHANG Xiao-ke, GUO Hui, LIU Ke, et al. Research on reverse regulation of primary frequency control of power plant[J]. Power System Engineering, 2021, 37(1): 69-73.

[2] 盛 锴,宋军英,寻 新,等.汽轮机阀门流量特性在线监测优化系统及应用[J]. 热能动力工程,2020,35(8):26-31.

SHENG Kai, SONG Jun-ying, XUN Xin, et al. Online-monitoring and optimization system for valves discharge characteristics of steam turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 26-31.

[3] 宣晓华,尹 峰,张永军,等.特高压受端电网直流闭锁故障下机组一次调频性能分析[J]. 中国电力,2016,49(11):140-144.

XUN Xiao-hua, YIN Feng, ZHANG Yong-jun, et al. Analysis on primary frequency regulation performance of the units under DC blocking fault in UHV receiving end power grid[J]. Electric Power, 2016, 49(11): 140-144.

[4] 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 System, 2012, 36(7): 104-109.

[5] 何 钧,刘育辰,徐教锋,等.并网机组一次调频和AGC性能考核在线监测与评估系统[J]. 上海电力大学学报,2021,37(4):324-329,334.

HE Jun, LIU Yu-chen, XU Jiao-feng, et al. An on-line monitoring and evaluation system of primary frequency modulation and AGC performance assessment of grid-connected units[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(4): 324-329, 334.

[6] 谈 博,陈志刚,顾 涛,等.机组一次调频特性在线监测方法[J]. 中国电力,2017,50(12):68-74.

TAN Bo, CHEN Zhi-gang, GU Tao, et al. A method of online monitoring on characteristics of primary frequency regulation in thermal power units[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 68-74.

[7] 盛 锴,周年光,宋军英,等.再热凝汽式汽轮机阀门流量特性在线监测优化[J]. 中国电力,2017,50(12):62-67,102.

SHENG Kai, ZHOU Nian-guang, Song Jun-ying, et al. Online monitoring and optimization of valve discharge characteristics for a reheat turbine[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 62-67, 102.

[8] 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.

[9] 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. A mathematical model of reheat turbine for power grid stability calculation[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 39-44.

(丛 敏 编辑)