

DOI: 10.7667/PSPC151248

# 基于功率响应的汽轮机调节系统模型参数辨识方法研究

盛 锴<sup>1</sup>, 江效龙<sup>2</sup>, 魏 乐<sup>3</sup>

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 神华神皖合肥庐江发电有限责任公司, 安徽 合肥 246008; 3. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 基于功率响应特性辨识汽轮机调节系统参数。采用简易模型克服了辨识算法中难以实现的发电机建模问题。通过分析参数对机组功率特性影响的关联性, 对辨识流程和优化目标函数进行了设计。再以先进数值计算方法作为辨识手段辨识得到模型参数。利用 PSASP 对辨识结果进行仿真并与实测对比, 结果表明: 新方法所建模型仿真值与实测值相当接近, 所建立的汽轮机调节系统模型能够较为真实地反映机组实际的响应特性, 说明该方法正确有效。与原有辨识方法相比, 实现了对模型参数的更加准确辨识。

**关键词:** 汽轮机; 调速系统; 功率响应; 参数辨识; 电力系统分析综合程序(PSASP)

## Research on parameter identification of turbine governing system based on power response characteristics

SHENG Kai<sup>1</sup>, JIANG Xiaolong<sup>2</sup>, WEI Le<sup>3</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China; 2. Shenhua Shenwan Hefei Wanjiang Power Generation Co., Ltd., Hefei 246008, China; 3. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The parameters of steam turbine governing system based on power response characteristics are identified. A simplified model is adopted to overcome the difficulty of generator modeling. The identification process and optimization objective function are designed by analyzing the relevance of the influence of parameters on the power characteristic. Then using an advanced numerical method, the parameters of model are obtained. The simulative results of identification are compared with the measured value by PSASP, which show that the simulation results of the model built by new method are close to the measured value, and the steam turbine governing system model built in this paper reflects the actual response characteristics. The correctness and effectiveness of the new method are proved. Compared with the original identification method, the new method can realize more accurate identification of the model parameters.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61203107) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 13MS90).

**Key words:** steam turbine; governing system; power response characteristics; parameter identification; Power System Analysis Software Package ( PSASP )

## 0 引言

电力系统中长期稳定分析中, 电磁暂态过程和机电暂态过程是同时进行并相互影响的, 所以在暂态稳定计算中, 除了要考虑发电机及其励磁调节系统的影响, 还应考虑原动机及其调节系统的动态特

性。在我国的电源结构中, 火电机组占有相当的比重, 因此建立能够真实反映此类原动机实际特性的稳定计算用模型就具有十分重要的意义。汽轮机及其调节系统参数实测与建模工作的目的在于通过实际试验的方法建立能够真实反映实际汽轮机及其调节系统特性的仿真模型。

目前, 有关汽轮机及其调节系统参数实测与建模的研究工作已经取得一定进展。文献[1]针对火电厂汽轮机模型考虑了协调控制系统(CCS), 并对锅

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61203107); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13MS90)

炉模型和汽轮机模型进行了参数辨识和仿真; 文献[2]对单元机组再热凝汽式汽轮机数学模型进行了研究, 并与锅炉、协调控制系统作为一个整体进行建模, 提出了一种改进型数学模型; 文献[3]提出了高压缸功率自然过调系数的概念, 改进了电力系统稳定计算用的汽轮机模型; 文献[4]在此基础上, 又提出了高、中压缸功率同时过调的概念, 根据汽轮机有效热平衡数据来计算高压缸、中压缸功率自然过调系数; 文献[5]指出了汽轮机阀门流量特性是影响电力系统安全稳定和汽轮机调节系统仿真精确性的重要因素。这些研究成果对于汽轮机及其调节系统参数实测与建模工作的规范和促进具有十分重要的意义。

文献[6](以下简称《导则》)涵盖了汽轮机及其调节系统实测与建模工作的试验项目、辨识手段、仿真校核等多个方面, 但并未硬性规定其辨识方法。而目前, 对辨识方法的研究更多的集中于先进算法对模型参数的辨识应用上, 取得了一定成果<sup>[7-11]</sup>。本文根据现场测试及分析提出了一种基于原动机功率响应特性的辨识方法, 与其他汽轮机参数辨识文献不同的是本文调整了辨识原理和辨识依据, 并以简易模型处理辨识算法中难以实现发电机建模的问题, 由于该方法考虑了汽轮机及其调节系统在电力系统稳定分析中的实质作用, 同时以先进数值计算方法作为辨识手段, 所得到的模型参数能够较为真实地反映实际建模对象的响应特性, 与原有辨识算法相比, 实现了对模型参数的准确辨识, 具有一定重要意义和工程应用价值。

## 1 稳定计算用汽轮机模型及其传统辨识方法

### 1.1 汽轮机模型

电力系统稳定计算所用的汽轮机及其调节系统模型一般包括 3 部分: 调节系统、电液伺服机构、汽轮机模型。在其实测与建模工作的实践中, 调节系统、电液伺服系统的参数辨识采用典型方法即可取得较为理想的结果, 而对于汽轮机模型参数的辨识方法却仍有值得研究之处。图 1 是稳定计算用的典型再热凝汽式汽轮机模型。

### 1.2 传统辨识方法的原理及存在的不足

图 1 中, 待确定的参数共有 7 个, 分别是  $T_{CH}/T_{RH}/T_{CO}$ 、 $F_{HP}/F_{IP}/F_{LP}$ 、 $\lambda$ 。一般传统方法对各个参数的辨识分为 3 种途径: 高压缸/中压缸/低压缸功率比( $F_{HP}/F_{IP}/F_{LP}$ )一般根据汽轮机热力特性说明书的设计值计算得到<sup>[12]</sup>; 高压缸功率自然过调系数通常根据经验公式计算获得; 而汽轮机模型中各容积环节时间常数则采用集总参数法将汽轮机特征压力作

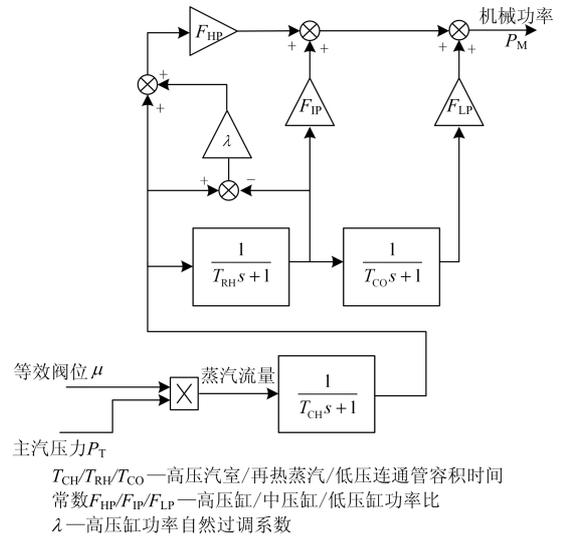


图 1 典型汽轮机模型

Fig. 1 Typical model of steam turbine

为对应容积环节的集总参数辨识得到的, 一般调节级压力对应高压汽室容积, 高排压力或热再压力对应再热器容积, 中排压力对应连通管容积<sup>[3]</sup>。

虽然传统辨识方法已被很多学者研究和使用的, 但也存在以下问题将制约着辨识精度。

(1) 压力采样装置本身存在的时延将降低汽轮机容积环节时间常数的辨识精度, 尤其对时间常数较小的高压汽室容积时间常数的影响很大, 文献[13]曾做过专门研究, 其结论也恰好证实了这点;

(2) 当汽轮机实际运行状态接近设计值时, 采用经验公式和设计值可以获得具有较高精度的高压缸自然过调系数和高/中/低压缸功率比, 然而机组长时间运行可能存在的汽轮机通流部分结垢、叶片磨损、机组检修、改造等原因都有可能使汽轮机实际特性偏离设计值, 此时若再依据经验公式或设计值取得的模型参数就可能与机组实际特性不符<sup>[14]</sup>, 从而降低建模精度。

由于传统辨识方法存在着以上不足, 可能导致辨识精度不理想, 进而影响模型的真实性和准确性, 故有必要对辨识方法进行优化研究。

## 2 基于功率响应的汽轮机调节系统模型参数辨识

为了提高汽轮机调节系统模型参数辨识的精度, 提出基于功率响应特性的参数辨识方法。该方法的基本原则是, 利用汽轮机功率响应曲线反向辨识汽轮机模型参数, 由于模型参数在辨识过程中已考虑应匹配汽轮机的功率响应特性, 因此辨识结果能够更真实地反映机组的实际特性。

## 2.1 设计难点

实际系统中, 汽轮机输出的机械功率是无法直接测量的, 而能测量到的功率实际上是发电机输出的电磁功率<sup>[15]</sup>(有功功率), 因此要实现基于功率响应特性的参数辨识就需要在方法设计中考虑发电机环节的影响。实际发电机具有高阶非线性的特征, 其模型结构复杂且建模难度大, 在辨识算法中难以直接实现。

此外, 《导则》<sup>[6]</sup>对汽轮机精度是以高压缸峰值功率  $P_{HP}$ 、峰值功率时间  $T_{HP}$  和调节时间  $t_s$  三个品质参数进行评价的, 而模型中的不同参数对功率变化不同阶段影响的关联性是有区别的, 若不加区分笼统地进行辨识, 可能无法保证所有品质参数均满足《导则》<sup>[6]</sup>的要求, 最终导致辨识结果精度不够。

## 2.2 解决方法

首先基于 Prony 分析的思想, 从高阶模型中抽取线性化的低阶模型, 在辨识方法中建立兼具较高精度和较简单结构的发电机模型<sup>[5,16]</sup>, 低阶发电机模型如式(1)所示<sup>[17]</sup>。

$$G_{EN}(s) = \frac{P_E}{P_M} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad (1)$$

式中:  $w_n$  为系统自然振荡频率;  $\xi$  为系统阻尼系数。再对原有汽轮机模型进行简化, 对中、低压缸进行合缸处理<sup>[3,5]</sup>, 此时汽轮机模型的传递函数如式(2)所示。

$$G_T(s) = \frac{1 + F_{HP} \cdot (1 + \lambda) \cdot T_{RH} \cdot s}{(1 + T_{CH} \cdot s)(1 + T_{RH} \cdot s)} \quad (2)$$

式中:  $F_{HP}$  为高压缸功率比;  $\lambda$  为高压缸功率自然过调系数;  $T_{CH}/T_{RH}$  分别为高压汽室/再热蒸汽容积时间常数。

进一步地, 令  $T_N = F_{HP} \cdot (1 + \lambda) \cdot T_{RH}$ , 此时

$$G_T(s) = \frac{1 + T_N \cdot s}{(1 + T_{CH} \cdot s)(1 + T_{RH} \cdot s)}, \quad \text{则需辨识的参数减少至 } T_{CH}、T_N、T_{RH} \text{ 三个参数。}$$

设  $T_N=5$ 、 $T_{RH}=10$ , 考虑到  $T_{CH}$  的典型值区间为 0~1 s, 令  $T_{CH}=0.05/0.1/0.2/0.5$ , 分析  $T_{CH}$ 、 $T_N$ 、 $T_{RH}$  三个参数对高压缸峰值功率  $P_{HP}$ 、峰值功率时间  $T_{HP}$ 、调节时间  $t_s$  的影响。

由图 2 可知,  $T_{CH}$  对功率响应曲线初期形态有较大影响, 即对品质参数  $P_{HP}$ 、 $T_{HP}$  有显著影响, 而对后期的功率响应特性作用较少。

再设  $T_{CH}=0.1$ 、 $T_N/T_{RH}=0.5$  不变, 令  $T_{RH}=10/15/20$ , 仿真结果如图 3 所示。

图 3 的仿真结果表明:  $T_N/T_{RH}$  比值一定,  $T_{RH}$ 、 $T_N$ ( $T_N$  随  $T_{RH}$  变化)对功率响应曲线后期形态有较大影响, 即对品质参数  $t_s$  有显著影响。

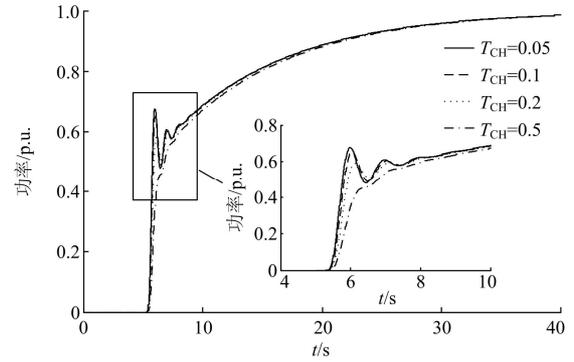


图 2  $T_{CH}$  对功率响应的影响

Fig. 2 Impacts of  $T_{CH}$  on power response

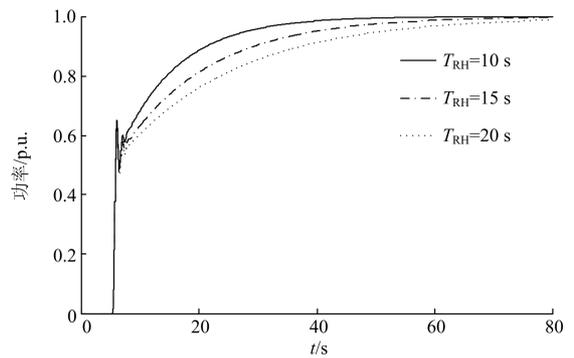


图 3  $T_{RH}$  对功率响应的影响

Fig. 3 Impacts of  $T_{RH}$  on power response

通过以上仿真分析, 本文将根据参数对机组功率特性影响的关联性设计辨识流程和优化目标, 以期提高辨识精度、优化辨识效果。辨识流程如图 4 所示。

(1) 将功率响应曲线分为响应初期和响应后期两个阶段。

(2) 对模型参数  $T_{CH}$ 、 $T_N$ 、 $T_{RH}$  进行初始化, 固定  $T_{CH}$ 。

(3) 利用响应后期的功率数据  $Y_{R1}$ , 设计优化目标由式(3)表示。

$$e_1 = \sum (Y_{M1} - Y_{R1})^2 \quad (3)$$

式中,  $Y_{M1}$  是同时间阶段的模型功率响应数据。

(4) 选择人工鱼群算法作为寻优算法调整  $T_N$ 、 $T_{RH}$  值, 最终使模型误差  $e_{1,F} = \min(e_1)$  达到最小, 此时对应的  $T_N$ 、 $T_{RH}$  即为最终辨识结果。

(5) 将  $T_N$ 、 $T_{RH}$  最终辨识结果固定至模型。

(6) 设计优化目标由式(4)表示。

$$e_2 = \frac{(P_{HP,R} - P_{HP,M})^2}{\Delta P_{HP}^2} + \frac{(T_{HP,R} - T_{HP,M})^2}{\Delta T_{HP}^2} \quad (4)$$

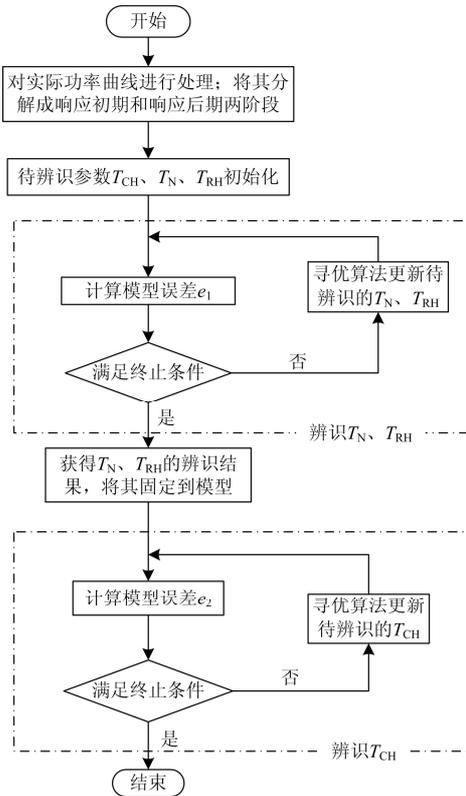


图 4 基于功率响应的参数辨识方法辨识流程

Fig. 4 Process of parameter identification based on power response

式中:  $\Delta P_{HP}$  是《导则》<sup>[6]</sup>规定的高压缸峰值功率偏差允许值;  $\Delta T_{HP}$  是高压缸峰值时间偏差允许值, 根据响应初期的实际功率曲线提取实际高压缸峰值功率  $P_{HP,R}$  和峰值时间  $T_{HP,R}$ , 根据响应初期的仿真功率曲线提取模型高压缸峰值功率  $P_{HP,M}$  和峰值时间  $T_{HP,M}$ 。  $e_2$  的设计原则是使最终辨识得到的  $T_{CH}$  同时令高压缸峰值功率偏差与高压缸峰值时间偏差最小化。

(7) 使用人工鱼群算法调整  $T_{CH}$  值, 最终使模型误差  $e_{2,F} = \min(e_2)$  达到最小, 此时对应的  $T_{CH}$  即为最终辨识结果。

### 3 两种辨识方法效果比较

以某电厂 600 MW 机组为例, 对其进行汽轮机及其调节系统建模, 分别采用传统方法和新方法进行参数辨识并比较。

#### 3.1 传统方法

传统方法以调节级压力、高排压力、连通管压力作为高压汽室容积环节、再热器容积环节、连通管容积环节的集总参数, 令并网机组的高压调节阀阶跃动作, 以上各压力随之变化, 根据其变化趋势对  $T_{CH}$ 、 $T_{RH}$ 、 $T_{CO}$  的参数值进行辨识, 此时辨识结果如图 5 所示。

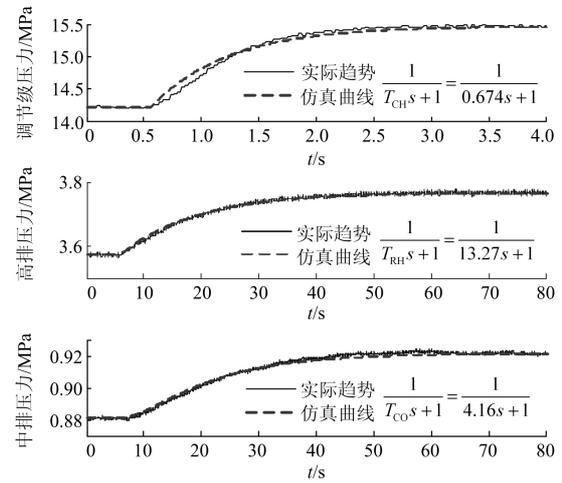


图 5 基于集总参数法辨识仿真结果

Fig. 5 Simulation results of identification based on lumped parameter

正常运行时, 该机组高排压力与调节级压力的压比  $\varepsilon \approx 0.252$ , 根据式(5)计算理论高压缸功率自然过调系数  $\lambda = 0.683$ 。

$$\lambda = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\varepsilon^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}}} \quad (5)$$

式中,  $k$  是绝热系数且  $k=1.3$ 。

该机组采用哈尔滨汽轮机厂有限责任公司 CCLN-600/25/600/600 型汽轮机, 通流级数总热力级 28 级。高压缸由 1 个单列调节级和 10 个压力级构成; 中压缸由 7 个压力级构成; 低压缸 2×5 压力级构成。由汽轮机额定 THA 工况通流部分热力参数数据可以得到:

$$\text{高压缸功率比 } F_{HP} = \frac{N_0 + \sum_{i=1}^{10} N_i}{\sum_{i=0}^{27} N_i} = 0.313$$

$$\text{中压缸功率比 } F_{IP} = \frac{\sum_{i=11}^{17} N_i}{\sum_{i=0}^{27} N_i} = 0.272$$

$$\text{低压缸功率比 } F_{LP} = \frac{2 \times \sum_{i=18}^{22} N_i}{\sum_{i=0}^{27} N_i} = 0.415$$

其中,  $N_i$  代表汽缸内各级功率。

由此, 采用传统方法辨识的汽轮机模型参数已全部确定, 结果如表 1 所示。

表 1 基于集总参数法辨识汽轮机模型参数结果  
Table 1 Results of turbine parameter identification based on lumped parameter

名称	符号	单位	数值
高压汽室容积时间常数	$T_{CH}$	s	0.674
再热器容积时间常数	$T_{RH}$	s	13.27
连通管容积时间常数	$T_{CO}$	s	4.16
高压缸功率比	$F_{HP}$	/	0.313
高压缸功率比	$F_{IP}$	/	0.272
高压缸功率比	$F_{LP}$	/	0.415
高压缸功率自然过调系数	$\lambda$	/	0.683

3.2 新方法

新方法是基于机组功率响应特性实现模型参数辨识的, 由于机械功率无法直接测量, 只能利用有功功率进行辨识, 因此首先需要建立包含发电机的机组模型, 此时模型如图 6 所示。

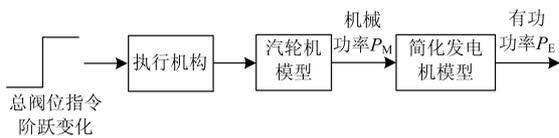


图 6 包含发电机的机组模型

Fig. 6 Model of unit including the generator

图 6 中, 除汽轮机模型待辨识的参数  $T_{CH}$ 、 $T_N$ 、 $T_{RH}$  之外, 其他模型结构与参数都是已知的。新方法中, 发电机模型为简化模型, 其具体的功率响应特性仍与高阶模型接近。电力系统稳定计算中, 该机组发电机模型采用 PSASP 的 6 型发电机模型, 按 Prony 分析思想<sup>[18-20]</sup>, 根据其功率特性对简化发电机模型参数进行辨识, 辨识结果为

$$\frac{P_E^*}{P_M^*} = \frac{1}{0.0228s^2 + 0.07s + 1} \quad (6)$$

式中:  $P_E^*$  是有功功率(标么值);  $P_M^*$  是机械功率(标么值)。图 7 是实际模型与简化后模型的仿真效果比较。

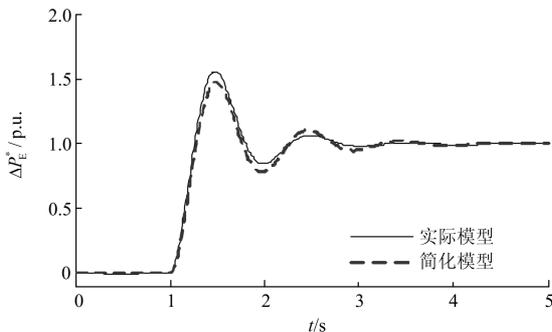


图 7 简化模型与实际模型功率响应仿真效果比较

Fig. 7 Comparison on the power response simulation of the simplified model and actual model

图 7 表明: 简化模型能够较好地反映实际模型的功率响应特性。由于其结构简单, 从而易于在辨识方法中实现发电机建模。按实际机组的总阀位指令设置模型输入, 此时实际功率变化是由总阀位指令阶跃变化引起的, 新方法将根据其辨识流程, 实现对  $T_{CH}$ 、 $T_N$ 、 $T_{RH}$  的辨识, 结果如表 2 所示。

表 2 新方法辨识汽轮机模型参数结果

Table 2 Results of turbine parameter identification based on new method

名称	符号	单位	数值
高压汽室容积时间常数	$T_{CH}$	s	0.036 3
再热器容积时间常数	$T_N$	s	7.895
连通管容积时间常数	$T_{RH}$	s	12.378

3.3 两种方法效果比较

比较传统方法和新方法的辨识效果, 在 PSASP 中将辨识结果代入模型, 其他仿真参数相同, 具体参数见表 3、表 4。

表 3 控制器部分仿真参数

Table 3 Simulation parameters of the controller

测试参数	符号	单位	参数
死区	$\epsilon$	p.u.	0.001 333
转速变换常数	$T_1$	s	0.02
转速放大倍数	$K$	/	20
负荷前馈控制系数	$K_2$	/	1.1
PID 比例环节倍数	$K_P$	/	0.2
PID 微分环节倍数	$K_D$	/	0
PID 积分环节倍数	$K_I$	/	0.05

表 4 执行机构部分仿真参数

Table 4 Simulation parameters of the actuator

测试参数	符号	单位	参数
油动机关闭时间常数	$T_c$	s	1.219
油动机开启时间常数	$T_o$	s	1.423
超速关闭系数(标么值)	VELclose	/	-1.0
超速开启系数(标么值)	VELopen	/	1
油动机行程反馈时间常数	$T_2$	s	0.02
电液转换器比例放大倍数	$K_P$	/	10
电液转换器微分倍数	$K_D$	/	0
电液转换器积分倍数	$K_I$	/	1
积分限幅环节上限	INTG_MAX	/	0.1
积分限幅环节下限	INTG_MIN	/	-0.1
电液转换器 PID 输出上限	PID_MAX	/	10
电液转换器 PID 输出下限	PID_MIN	/	-10

仿真结果如图 8、图 9 所示。由图 8、图 9 结果表明: 新方法的辨识精度明显高于传统方法, 在功率响应初期阶段最为明显, 此时传统方法辨识所得

模型特性与实际机组特性存在较大差距, 而新方法所建模型特性与机组实际特性十分吻合。

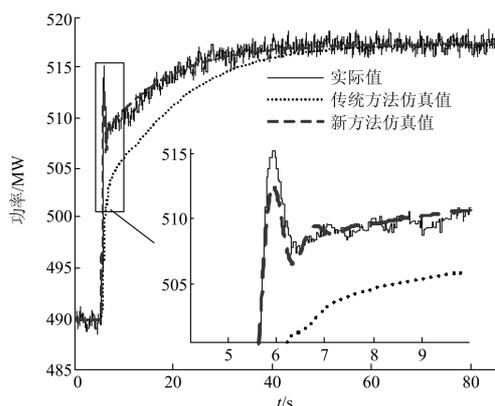


图 8 阀控方式下仿真结果比较

Fig. 8 Comparison on simulation results under valve-controlled mode

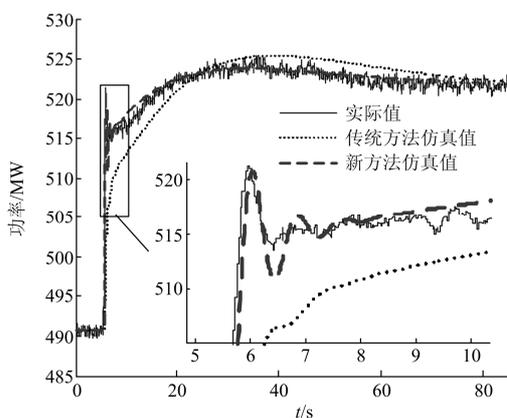


图 9 CCS 方式下仿真结果比较

Fig. 9 Comparison on simulation results under CCS mode

此外, 《导则》<sup>[6]</sup>对仿真结果的校核指标给出了明确的要求, 以下将对各仿真结果指标进行计算, 结果如表 5、表 6 所示。

表 5 传统方法辨识结果仿真与实测偏差

Table 5 Deviation between simulation results and test value of the original identification algorithm

名称	品质参数	实测值	仿真值	偏差	偏差允许值
阀控方式	$P_{HP}$	25.4 MW	/	/	$\pm 10\%$ 的功率阶跃量
	$T_{HP}$	0.59 s	/	/	$\pm 0.1$ s
	$t_s$	23.25 s	32.64 s	-9.39 s	$\pm 2.0$ s
协调方式	$P_{HP}$	30.6 MW	/	/	$\pm 30\%$ 的功率阶跃量
	$T_{HP}$	0.46 s	/	/	$\pm 0.2$ s
	$t_s$	47.69 s	64.24 s	-16.6 s	$\pm 2.0$ s

表 6 新方法辨识结果仿真与实测偏差

Table 6 Deviation between simulation results and test value of the new identification algorithm

名称	品质参数	实测值	仿真值	偏差	偏差允许值
阀控方式	$P_{HP}$	25.4 MW	22.7 MW	9.82%	$\pm 10\%$ 的功率阶跃量
	$T_{HP}$	0.59 s	0.587 s	0.003 s	$\pm 0.1$ s
	$t_s$	23.25 s	22.88 s	0.37 s	$\pm 2.0$ s
协调方式	$P_{HP}$	30.6 MW	30.2 MW	1.33%	$\pm 30\%$ 的功率阶跃量
	$T_{HP}$	0.46 s	0.535 s	-0.075 s	$\pm 0.2$ s
	$t_s$	47.69 s	46.78 s	0.91 s	$\pm 2.0$ s

如图 8、图 9 所示, 传统辨识方法所得仿真功率曲线在响应初期变化平缓, 无明显的峰值功率, 故而未确定表 5 中仿真功率曲线的  $P_{HP}$ 、 $T_{HP}$  值及其偏差。而表 6 中定量分析的结果表明, 新方法所得仿真值与实际值之间的误差较小, 各项偏差均在允许值以内。通过该实际应用案例, 验证了新方法的实用性。

## 4 结论

本文以功率响应特性作为汽轮机调节系统参数辨识依据, 采用简易模型有效克服了辨识算法中难以实现发电机建模的问题; 根据参数对机组功率特性影响的关联性设计辨识流程和优化目标, 正确区分了不同待辨识参数对品质参数的影响, 辅以先进数值计算方法作为辨识手段得到模型参数, 仿真结果表明新方法所建模型能够较为真实地反映实际建模对象的响应特性, 与原有辨识算法相比, 实现了对模型参数的更加准确辨识。

## 参考文献

- [1] GAO Lin, DAI Yiping. Modeling large modern fossil-fueled steam electric power plant and its coordinated control system for power system dynamic analysis[C] // 2010 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Hangzhou, 24-28 Oct. 2010, 1-5.
- [2] 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 Zhongxu, ZHOU Xiaoxin, 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.
- [3] 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 Yunfeng, GUO Jiayang, LIU Yongqi, et al. A mathematical model of reheat turbine for power grid stability calculation[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 39-44.
- [4] 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): 175-177.  
GU Junjie, CHEN Shunqing. A dynamic mathematical model of supercritical steam turbine for power grid stability calculation[J]. Turbine Technology, 2013, 55(3): 175-177.
- [5] 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 Fuping, LIU Wulin, 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.
- [6] 国家能源局. DL/T 1235-2013 同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [7] 江效龙, 魏乐, 盛锴, 等. 基于果蝇优化算法的汽轮机调节系统参数辨识[J]. 动力工程学报, 2015, 35(7): 556-561.  
JIANG Xiaolong, WEI Le, SHENG Kai, et al. Parameter identification of turbine governing system based on fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(7): 556-561.
- [8] 朱晓星, 盛锴, 刘陆军. 基于综合算法的汽轮机及其调节系统参数智能辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 138-143.  
ZHU Xiaoxing, SHENG Kai, LIU Lujun. Intelligent parameter identification of steam turbine and its governing systems based on multi-algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 138-143.
- [9] 高伟, 李阳海, 王大光, 等. 遗传算法在汽轮机调速系统参数辨识中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 80-82.  
GAO Wei, LI Yanghai, WANG Daguang, et al. Genetic algorithm applied to parameter identification of the speed governor system for steam turbines[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2006, 34(10): 80-82.
- [10] 赵林, 王丽. 基于 BP 神经网络的结构系统跟踪辨识方法[J]. 郑州大学学报, 2005, 26(1): 50-54.  
ZHAO Lin, WANG Li. Tracing identification method of structure system based on BP neural network[J]. Journal of Zhengzhou University, 2005, 26(1): 50-54.
- [11] 李阳海, 王坤, 黄树红, 等. 粒子群优化算法及其在发电机组调速系统参数辨识中的应用[J]. 热能动力工程, 2011, 26(6): 747-750.  
LI Yanghai, WANG Kun, HUANG Shuhong, et al. Particle colony algorithm and its application in discriminating parameters of a speed regulation system of a generator unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2011, 26(6): 747-750.
- [12] 谷俊杰, 朱伟民. 超临界机组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.  
GU Junjie, ZHU Weimin. A novel method for determine the model parameters supercritical steam turbine[J]. Turbine Technology, 2011, 53(2): 103-106.
- [13] 盛锴. 高压汽室蒸汽容积环节模型参数对再热凝汽式汽轮机调速系统仿真校验的影响[J]. 华东电力, 2012, 40(11): 2049-2053.  
SHENG Kai. Influence of high pressure cylinder steam volume link model parameters on the speed governing system simulation and calibration for reheat condensing turbine[J]. East China Electric Power, 2012, 40(11): 2049-2053.
- [14] 李勇, 金国华, 曹祖庆. 弗留格尔公式的证明及应用[J]. 汽轮机技术, 1995, 37(3): 158-162.  
LI Yong, JIN Guohua, CAO Zuqing. The proof of Flügel formula and its application[J]. Turbine Technology, 1995, 37(3): 158-162.
- [15] 竺炜, 谭平, 周孝信. 低频振荡时的汽轮机调速控制方式在线调整策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 87-92.  
ZHU Wei, TAN Ping, ZHOU Xiaoxin. An on-line adjusting strategy for turbine speed control under low frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 87-92.

- [16] 李啸骢, 鹿建成, 韦善革, 等. 汽轮发电机组轴系扭振多指标非线性协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 1-7.  
LI Xiacong, LU Jiancheng, WEI Shange, et al. Multi-index nonlinear coordination control design for steam-turbine generator shafting torsional vibration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 1-7.
- [17] 盛锴, 魏乐, 江效龙, 等. 基于PSASP和Simulink的汽轮机调节系统建模与仿真校核[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 1-6, 26.  
SHENG Kai, WEI Le, JIANG Xiaolong, et al. Modeling, simulation and verification of turbine governing system based on PSASP and Simulink[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 1-6, 26.
- [18] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.  
LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.
- [19] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 140-145.  
WANG Hui, SU Xiaolin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 140-145.
- [20] 唐昆明, 杨伟, 张太勤, 等. 基于 Stehfest 算法的配网单相接地故障双端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 76-83.  
TANG Kunming, YANG Wei, ZHANG Taiqin, et al. A new two-terminal fault location method for distribution network based on Stehfest algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 76-83.

收稿日期: 2015-07-20; 修回日期: 2015-09-15

作者简介:

盛 锴(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为源网协调研究与热工自动优化研究; E-mail: shengkai0815@163.com

江效龙(1989-), 男, 硕士, 研究方向为发电系统建模、仿真与优化控制;

魏 乐(1976-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为过程控制、复杂能源系统的建模与仿真。

(编辑 姜新丽)