

# 基于轨迹灵敏度频域特征提取的电力系统 仿真误差主导参数识别

刘征帆<sup>1</sup>, 安军<sup>1</sup>, 蒋振国<sup>1</sup>, 李德鑫<sup>2</sup>, 刘座铭<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;

2. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 130021)

**摘要:**电力系统动态仿真中主导参数的准确识别是进行仿真验证的前提,传统方法通过比较各参数的轨迹灵敏度时域特征大小确定主导参数。对此,提出了一种基于轨迹灵敏度频域特征提取的电力系统仿真误差主导参数识别方法。通过分析仿真误差曲线的频域特征,提取误差敏感频点;建立评估参数对轨迹灵敏度频域影响的特征指标,通过指标分析各参数轨迹灵敏度在敏感频点处的频域特性,进而得到仿真误差的主导参数集。采用WSCC 3机9节点系统验证了所提方法的有效性,结果表明所提方法弥补了从时域角度提取轨迹灵敏度信息不充分的不足,可为电力系统仿真验证提供理论支持。

**关键词:**电力系统;动态仿真;主导参数;轨迹灵敏度;频域分析

**中图分类号:**TM 743

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202101015

## 0 引言

动态仿真是了解电力系统动态行为的重要手段之一<sup>[1]</sup>,仿真精度对电力系统安全分析的有效性具有重要影响<sup>[2-3]</sup>。实际系统中已多次出现动态仿真无法反映系统实际行为的问题<sup>[4]</sup>,仿真的有效性问题受到越来越多的关注<sup>[5]</sup>。元件模型参数不准确被认为是导致动态仿真结果和实测数据轨迹不一致的主要因素<sup>[6]</sup>。由于实际运行条件的复杂性及元件老化等因素,电力系统中各元件的参数识别难免存在误差<sup>[7]</sup>。从计算能力和时效性角度出发,难以对系统中所有误差参数进行校核。同时,大量研究表明不同参数对动态行为的影响程度存在差异,仅需识别对动态行为影响最显著的相关参数,即主导参数<sup>[8]</sup>,通过对主导参数的校核可显著提高动态仿真可信度。

如何准确识别仿真误差的主导参数集是一个难题。灵敏度分析方法广泛用于主导参数集的识别:文献[9]基于轨迹灵敏度最大值的大小进行排序,选择灵敏度最大值较大的参数组成主导参数集,该方法仅能利用轨迹灵敏度曲线上某点的数据,无法充分利用轨迹灵敏度曲线蕴含的丰富信息;文献[10]提出了参数对有功功率第一摆幅和振荡阻尼的灵敏度指标,通过该指标确定主导参数集;文献[11]按

仿真时间步长对灵敏度进行累加,从而确定待校正参数集。以上研究均从时域角度提取轨迹灵敏度的少量特征,并未充分挖掘轨迹灵敏度中蕴含的丰富动态信息,故而影响了主导参数识别的效果。

频域分析为研究动态系统行为特征提供了另一个思路。本文从频域分析角度出发,提出了一种基于轨迹灵敏度频域特征提取的电力系统仿真误差主导参数识别方法。通过分析仿真误差的频域特征,提取误差敏感频点;分析参数轨迹灵敏度在敏感频点处的频域特性,构建平均幅值和幅值比作为频域指标,通过计算各参数轨迹灵敏度的频域指标并进行排序得到仿真误差的主导参数集。本文基于WSCC 3机9节点系统进行仿真,结果表明所提方法提高了主导参数集识别的有效性,为电力系统动态仿真中的模型验证与参数校正提供了理论支持。

## 1 轨迹灵敏度的计算方法

轨迹灵敏度是定量描述动态系统中某一参数或者结构的微小变化对系统轨迹影响程度的数学工具<sup>[12]</sup>,在电力系统动态分析的多个领域都得到了广泛应用。

系统受扰后的动态行为可用式(1)描述<sup>[13-14]</sup>。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), y(t), \alpha) \\ 0 = g(x(t), y(t), \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $t$ 为时间; $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为系统的状态变量和代数变量; $\alpha$ 为系统的参数。式(1)中上式为系统中的微分方程,下式为系统中的代数方程。

根据轨迹灵敏度的定义,可得轨迹灵敏度方程如式(2)所示。

收稿日期:2020-07-26;修回日期:2020-11-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904500);国家电网有限公司总部科技项目(18-GW-05)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0904500) and the Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China(18-GW-05)

$$\begin{cases} \dot{x}_\alpha = \frac{\partial f}{\partial x} x_\alpha + \frac{\partial f}{\partial y} y_\alpha + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \\ 0 = \frac{\partial g}{\partial x} x_\alpha + \frac{\partial g}{\partial y} y_\alpha + \frac{\partial g}{\partial \alpha} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $x_\alpha = \partial x / \partial \alpha$  和  $y_\alpha = \partial y / \partial \alpha$  分别为参数  $\alpha$  对轨迹  $x(t)$  和  $y(t)$  的灵敏度。采用数值方法联立式(2)进行求解,即可获得系统的受扰轨迹和轨迹灵敏度。

式(2)计算较为复杂,通常采用式(3)计算轨迹灵敏度<sup>[15-16]</sup>。

$$\begin{cases} x_\alpha = \frac{x(\alpha + \Delta\alpha, t) - x(\alpha, t)}{\Delta\alpha/\alpha} \\ y_\alpha = \frac{y(\alpha + \Delta\alpha, t) - y(\alpha, t)}{\Delta\alpha/\alpha} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Delta\alpha$  为参数摄动量。此方法采用2次仿真结果相减,计算简单,概念清晰,减轻了建立轨迹灵敏度数学模型的任务。

## 2 轨迹灵敏度频域特征提取的基本原理

与静态灵敏度不同,轨迹灵敏度自身是一个动态轨迹,其蕴含着丰富的动态特征以及参数对动态系统特征的影响趋势。本文采用频域分析方法提取轨迹灵敏度和仿真误差中的动态特征,建立二者之间的关系,为实现主导参数的准确识别提供重要理论支持。

### 2.1 频域变换的基本描述

离散傅里叶变换 DFT (Discrete Fourier Transform) 是一种成熟的分析方法,可将离散的信号序列由时域变换到频域。某有限长时域连续曲线  $f(t)$  可表示为:

$$f(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \left( a_i \cos \frac{i\pi t}{T} + b_i \sin \frac{i\pi t}{T} \right) \quad (4)$$

其中,  $a_0$  为常数偏置量;  $a_i$  和  $b_i$  为  $i$  次谐波的傅里叶系数;  $T$  为总时长。对式(4)所示的曲线进行采样得到时域离散有限长样本序列  $x(n)$ , 常用的 DFT 方法如式(5)所示。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

其中,  $N$  为序列  $x(n)$  的长度;  $X(k)$  为  $x(n)$  对应的频域样本序列,显然其长度也为  $N$ 。

从式(5)中可见,  $X(k)$  为与  $x(n)$  相关的级数,因此频域的每一个点实际上包含全体时域点的信息。在电力系统动态仿真中,注入实测数据和仿真结果都是离散序列,可以使用 DFT 方法进行频域变换。

### 2.2 仿真误差的频域特征

仿真结果与实测数据之间的不一致可以用误差  $\Delta x(n)$  表示,如式(6)所示。

$$\Delta x(n) = x_r(n) - x_s(n) \quad (6)$$

其中,  $x_r(n)$  为实测数据;  $x_s(n)$  为仿真结果。由式(6)可知,实测数据作为信息被包含于误差中。

使用 DFT 方法对误差曲线进行频域变换,得到其频谱。图1为某扰动下某有功功率仿真误差曲线及其频谱。图中  $\Delta P$  为标么值,由 DFT 原理可知频谱幅值单位与  $\Delta P$  相同。

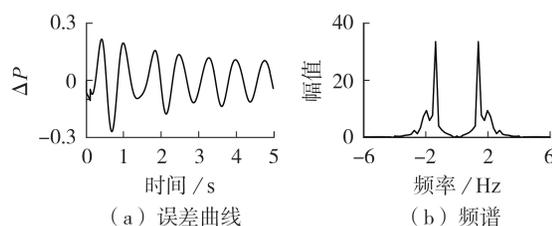


图1 某有功功率仿真误差曲线及其频谱

Fig.1 Curves of active power simulation error and its spectrum

由图1可见,误差曲线存在波动特征,误差频谱存在明显峰值,峰值所在频点即为误差中含有的主要频率分量。只要补偿该主要频率成分,即可显著减小仿真结果与实测数据之间的误差,故应提取峰值所在频点为仿真误差的敏感频点。

### 2.3 轨迹灵敏度的频域特征

元件模型参数与系统实际参数不一致是产生仿真误差的主要因素<sup>[6]</sup>。可认为仿真误差  $\Delta x(n)$  是各参数从其模型现有值到真实值的轨迹灵敏度积分的累加,如式(7)所示。

$$\Delta x(n) = \sum_{i=1}^{N_p} \int_{\alpha_{m,i}}^{\alpha_{r,i}} S_i(\alpha, n) d\alpha_i \quad (7)$$

其中,  $S_i$  为与参数值  $\alpha_i$  有关的轨迹灵敏度;  $\alpha_{r,i}$  为参数真实值;  $\alpha_{m,i}$  为模型参数现有值;  $N_p$  为参数总量。由式(7)可知,误差中包含参数轨迹灵敏度的信息。

同样采用 DFT 方法对各参数轨迹灵敏度进行频域变换。由于仿真误差存在敏感频点,对于轨迹灵敏度的频谱,应将其在敏感频点处的幅值作为关键特征。该幅值表示轨迹灵敏度曲线在敏感频点处频率成分的含量,体现了参数对敏感频点处的影响能力,即对误差的主要频率成分的影响能力。误差频谱和灵敏度频谱可能含有多个敏感频点,各个敏感频点的幅值均需关注。

需要指出的是,轨迹灵敏度的频域变换和频域灵敏度是完全不同的2个概念。前者描述动态系统参数对其动态行为响应轨迹的灵敏度,动态系统既可以是线性的也可以是非线性的;后者描述线性系统中参数对传递函数频域响应的灵敏度<sup>[17]</sup>。对于线性系统,二者存在如式(8)所示的关系。

$$Y_i(\alpha, j2\pi f^*) = H_i(\alpha, j2\pi f^*) U(j2\pi f^*) \quad (8)$$

其中,  $Y_i$  为轨迹灵敏度的频域变换;  $H_i$  为传递函数灵敏度;  $U$  为输入变量的频域变换;  $f^*$  为频率。此时可

以通过频域灵敏度换算得到轨迹灵敏度的频域变换结果。对于非线性系统,二者本质上是不同的,扰动越大,二者计算结果差别也会越大。

## 2.4 频域特征指标及误差评价指标

灵敏度频谱在多个敏感频点处的幅值可能不同,表明参数对各敏感频率分量的影响能力不平衡。误差频谱的各敏感频点幅值也不同,表明误差中所含各敏感频率分量同样存在差异。在选取主导参数时,应准确衡量各幅值的作用,既要考虑幅值的总体作用,也应使主导参数的影响能力与误差的各敏感频率分量相适应。为此,本文定义了平均幅值指标,以衡量参数对敏感频率分量的总体影响能力;定义了幅值比指标,以衡量这种影响能力的不平衡。

对于某一频谱,平均幅值指标 $\bar{M}$ 的定义由式(9)给出。

$$\bar{M} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} M_i \quad (9)$$

其中, $M_i$ 为频谱中第*i*个敏感频点幅值; $N_f$ 为敏感频点个数。平均幅值指标 $\bar{M}_\alpha$ 体现了参数 $\alpha$ 对敏感频点的平均影响能力。

幅值比指标 $R_{ij}$ 的定义由式(10)给出。

$$R_{ij} = \frac{M_i}{M_j} \quad 1 \leq i \leq N_f, 1 \leq j \leq N_f \quad (10)$$

其中, $M_j$ 为频谱中第*j*个敏感频点幅值。参数轨迹灵敏度的幅值比指标 $R_{\alpha,ij}$ 体现了参数 $\alpha$ 对各敏感频点影响能力的比例关系;误差的幅值比指标 $R_{e,ij}$ 体现了各敏感频点频率成分的含量关系。若二者的数值相近,说明参数对轨迹的影响符合误差的频率成分比例。当调整该参数时,能同步削减误差各频率分量。若频谱含有多个敏感频点,则有多个幅值比指标,其中较重要的指标是误差中频率分量较大的主要敏感频点的幅值比。

为定量评估仿真误差的大小,引入整体能量误差指标 $E^{[18]}$ ,定义由式(11)给出。

$$E = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (x_r(n) - x_s(n))^2}{\sum_{n=0}^{N-1} (x_r(n) - x_r(0))^2} \quad (11)$$

## 3 主导参数集的识别方法

### 3.1 主导参数集的识别流程

参数校正的目标是合理调整参数值,使仿真结果与实测数据的误差减小。因此,首先应分析仿真结果与实测轨迹误差的频域特征,提取敏感频点 $f_i$ ,并计算误差频谱的幅值比指标 $R_{e,ij}$ 。

式(7)描述了误差和参数轨迹灵敏度的时域关系。频域上,误差的敏感频点及其幅值也是由参数

轨迹灵敏度造成的。因此,应分析各参数轨迹灵敏度的频域特征(特别是对误差敏感频点的特征),提取敏感频点幅值 $M_{\alpha,i}$ 。

显然,通过有效补偿误差的敏感频率成分可以显著减小仿真结果与实测数据的不一致。在此原则下,考察各参数轨迹灵敏度的频域特征。按参数轨迹灵敏度在各误差敏感频点的幅值大小排序,并与各敏感频点的阈值 $T_{1,i}$ 进行比较。如果参数 $\alpha$ 至少存在一个不小于阈值 $T_{1,i}$ 的敏感频点幅值,则将其作为候选参数。候选参数集 $\Omega_c$ 的定义如式(12)所示。

$$\Omega_c = \left\{ \alpha \mid \exists M_{\alpha,i} \geq T_{1,i}, 1 \leq i \leq N_f \right\} \quad (12)$$

获得候选参数集后,计算其中参数轨迹灵敏度的平均幅值指标 $\bar{M}_\alpha$ 和幅值比指标 $R_{\alpha,ij}$ 。将平均幅值指标小于阈值 $T_2$ 的参数剔除。按式(13)计算其余参数的幅值比与误差幅值比的差值 $\Delta R_{\alpha,ij}$ 。

$$\Delta R_{\alpha,ij} = \left| R_{\alpha,ij} - R_{e,ij} \right| \quad (13)$$

根据参数轨迹灵敏度特征、计算能力及时间要求等条件,确定主导参数数量 $N_d$ 。按式(13)从小到大排序,选取前 $N_d$ 个参数,即可得到误差的主导参数集 $\Omega_d$ 。

主导参数集的识别流程如附录中图A1所示。

### 3.2 阈值和主导参数数量的确定

阈值的选取对主导参数的有效性有重要影响,并且将间接影响到参数校正的效果。阈值 $T_{1,i}$ 和 $T_2$ 的设置是为了排除低效参数,减小计算成本。综合上述分析,可由式(14)确定阈值。

$$\begin{cases} T_{1,i} = k_1 \max_{\alpha} M_{\alpha,i} & 1 \leq i \leq N_f \\ T_2 = k_2 \max_{\alpha \in \Omega_c} \bar{M}_\alpha \end{cases} \quad (14)$$

系数 $k_1$ 和 $k_2$ 的选择一方面与系统规模、受扰条件、目标轨迹下参数对轨迹的灵敏度频域特性都有关,另一方面需考虑主导参数的数量。本文将 $k_1$ 和 $k_2$ 设为5%,取得了较好的筛选效果。

对于主导参数数量的选择,应注意主导与非主导参数之间并无理论上的明确划分。但一般认为当某些参数的轨迹灵敏度特征明显高于其他参数(数量级上的差别或数倍的差别)时,可将其作为主导参数。当然,从参数校正的可实现性角度出发,主导参数的数量不宜过多,否则可能出现无法校正的问题。

## 4 算例分析

### 4.1 算例条件

以基于PSAT仿真工具<sup>[19]</sup>的WSCC 3机9节点系统为例进行仿真分析,其结构见图2。在节点8设置三相短路故障,初始时刻开始,0.1 s后结束。同步机采用四阶模型,励磁器采用PSAT中II型励磁器模型,负荷采用恒功率加频敏负荷模型(设频敏负荷率

为有功占30%、无功占80%)。文献[20]给出了用频敏负荷表示感应电机的参数值,算例采用该组参数值来表示负荷中的感应电机部分。

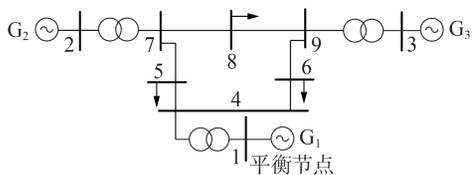


图2 WSCC 3机9节点系统图

Fig.2 Diagram of WSCC 3-machine 9-bus system

WSCC 3机9节点系统共有21个同步机参数、27个励磁器参数、6个频敏负荷参数,按附录中表A1对系统的部分参数进行摄动,使得摄动前后系统模型参数产生误差。表中,SYN表示同步机参数,EXC表示励磁器参数,FL表示频敏负荷参数,其下标所示的数字编号表示元件所在节点。同步机中, $T_J$ 为惯性时间常数; $X'_d$ 为d轴暂态电抗; $X'_q$ 为q轴电抗; $X''_q$ 为q轴暂态电抗。励磁器中, $K_e$ 为磁路积分偏差。负荷中, $K_q$ 为频率敏感型无功负荷占比; $K_p$ 为频率敏感型有功负荷占比。

将摄动前的参数作为未知的系统真实参数集,其仿真结果作为实测结果;将摄动后的参数作为已有的现有模型参数进行仿真。在此情况下,计算轨迹灵敏度,通过频域特征提取确定主导参数集。对主导参数集进行参数校正,并验证所选主导参数集的合理性。

对于观测量的选取,理论上可选取电压、电流、频率、功率、功角、角速度等观测量。但从广域测量系统WAMS(Wide-Area Measurement System)量测数据的有效性出发,只有电压、电流的幅值和相角是直接实际测量得到的,有功功率和无功功率均是在此基础上计算得到的,而发电机功角、角频率通常不是直接测量得到的。其次,在同一扰动下,应选择轨迹误差大、动态行为激发充分的观测量,以充分体现参数的作用。在该小系统中,观测量的动态行为激发都比较充分。另外,所选观测量应是运行人员比较关注的、对系统安全有重要影响的变量。故障发生短期内不太关注频率变化,电流亦不是系统分析中所格外关注的,通常关注的是有功功率和节点电压。综合以上3点,本文选择节点电压幅值和有功功率为观测量进行分析。

求取参数轨迹灵敏度频谱有以下2种方法:方法1是通过轨迹灵敏度直接进行频域变换,方法2是通过传递函数进行频域灵敏度换算(如式(8)所示),所用传递函数按文献[17]所提方法得到。因扰动设定在节点8,故以节点8电压幅值为输入变量,并以节点3电压幅值为输出变量。图3对比了大扰动下(此处设三相短路故障时间为0.16s)通过2种方

法得到的节点3同步机参数 $X'_d$ ( $SYN_3-X'_d$ )对节点3电压幅值的参数轨迹灵敏度频谱,图中幅值为标么值,后同。

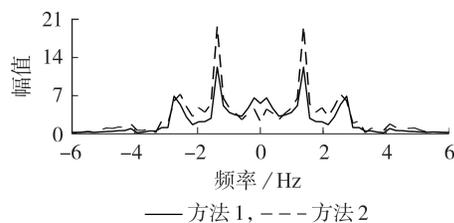


图3  $SYN_3-X'_d$ 对节点3电压幅值的轨迹灵敏度频谱  
Fig.3 Spectrum of trajectory sensitivity of  $SYN_3-X'_d$  to voltage amplitude at Bus 3

由图3可见,2种方法获得的频谱第一峰值大小有较大差异,第二峰值频点存在偏移。这是由于该系统是非线性系统,且在该扰动下不可进行线性化,而方法2将该系统当作线性化系统进行处理,此时采用方法2得到的频谱是不准确的。为保证频谱的准确性,应采用方法1求取各参数轨迹灵敏度的频谱。

#### 4.2 频域分析和主导参数识别

首先,以有功功率为观测量进行分析。计算节点3仿真与实测有功功率的误差并进行频域变换,其变换结果见图4。可见该有功误差频谱有2个明显的峰值,以峰值所在频点为误差频谱的2个敏感频点,仿真误差的幅值比指标为3.67。

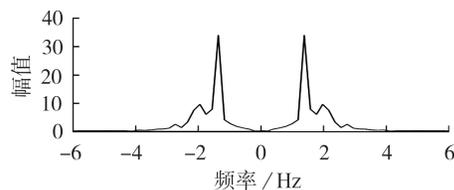


图4 节点3有功功率误差频谱

Fig.4 Spectrum of active power error at Bus 3

然后,计算系统中各参数对节点3有功功率的轨迹灵敏度。对参数轨迹灵敏度曲线进行频域变换,从所有参数的轨迹灵敏度频谱中提取敏感频点的幅值。按照第3节所提方法,得到候选参数集,并计算候选参数集中各参数的平均幅值指标和幅值比指标。按式(13)计算幅值比指标与误差的幅值比指标的差值,并进行排序,其中排在第六位的差值为1.66,而排在第七位的差值为2.89。可见,从第七位开始,差值大幅增加,因此选择前六位参数为有功功率主导参数集。同理,对电压幅值进行分析,发现从第五位开始差值集中在1.15附近,与前四位的数值特征明显不同,因此选取前四位参数为电压主导参数集。综上,节点3有功功率和电压幅值的主导参数集如表1所示。

经对比发现,表1中2个观测量的主导参数集并

表1 节点3有功功率和电压幅值的主导参数集  
Table 1 Dominant parameter sets of active power and voltage amplitude at Bus 3

观测量	主导参数集
有功功率	$\{SYN_2-T_J, SYN_3-T_J, SYN_3-X'_d, EXC_1-K_e, EXC_2-K_e, SYN_2-X_q\}$
电压幅值	$\{SYN_2-X_q, EXC_2-K_e, EXC_1-K_e, SYN_3-X_q\}$

不完全一致,仅有3个共有参数。由于特定参数对于不同观测量的影响效果是不同的(即某些参数与有功强相关,而另一些参数与电压强相关),因此不同观测量所识别的主导参数集也可能不同,这是合理的。此时应对各主导参数集分别进行校正,并比较校正效果,再将多组主导参数集合并为一组整体效果较好的最终主导参数集,以提高主导参数识别的有效性。

采用试错法<sup>[10]</sup>分别对有功功率和电压幅值的主导参数集进行参数校正。以式(11)所示的整体能量误差指标 $E$ 为目标函数,并用其衡量校正前、后的仿真误差,如表2所示。

表2 两观测量主导参数集校正前、后整体能量误差指标  
Table 2 Overall energy error indicator before and after calibration of dominant parameter sets for two observations

环节	校正参数集	有功误差指标	电压误差指标
校正前	—	0.5883	0.0533
校正后	有功功率主导参数集	0.0431	0.0329
	电压幅值主导参数集	0.2008	0.0052

由表2可知,校正有功功率主导参数集后,有功误差指标减少了92.7%;校正电压幅值主导参数集后,电压误差指标减小了90.2%。可见,两主导参数集确为各自观测量的主导参数集。本文采用的主导参数集合并方法如下:对于各参数集的独有参数,保留其校正值,并在此基础上对共有参数重新进行校正,校正仍采用试错法。由于校正的是两观测量的共有参数,在设定目标函数时,两观测量的仿真误差都应得到体现,即有功和电压各自的仿真误差应按照一定比例折算到目标函数中。若同等对待有功功率和电压,可设置目标函数如下:

$$\begin{cases} \min E \\ E = 0.5E_p + 0.5E_v \end{cases} \quad (15)$$

其中, $E_p$ 为有功整体能量误差指标; $E_v$ 为电压整体能量误差指标。

以该目标函数对共有参数进行校正,并获得共有参数的校正值,得到包含所有参数的最终主导参数集如表3所示。表3还列出了采用传统的轨迹灵敏度最大值排序方法识别的主导参数集。得到参数校正值见表4,表中 $X'_d, X_q$ 均为标么值。

表3 用2种方法识别的主导参数集

Table 3 Dominant parameter sets identified by two methods

方法	主导参数集
本文方法	$\{SYN_2-T_J, SYN_3-T_J, SYN_3-X'_d, EXC_1-K_e, EXC_2-K_e, SYN_2-X_q, SYN_3-X_q\}$
传统方法	$\{SYN_2-T_J, SYN_1-T_J, SYN_3-T_J, FL_8-K_p, FL_5-K_p, FL_6-K_p\}$

表4 最终主导参数集校正结果及误差

Table 4 Calibration results and errors of final dominant parameter sets

参数	实际值	仿真值		误差 / %	
		校正前	校正后	校正前	校正后
$SYN_2-T_J$	12.8 s	11.52 s	12.16 s	10	5.00
$SYN_3-T_J$	6.02 s	6.622 s	6.272 s	10	4.18
$SYN_3-X'_d$	0.1813	0.25382	0.1611	40	11.14
$EXC_1-K_e$	1	1.25	1.1875	25	18.75
$EXC_2-K_e$	1	0.8	1.092	20	9.20
$SYN_2-X_q$	0.8645	0.82128	0.9027	5	4.42
$SYN_3-X_q$	1.2578	2.26404	1.1886	80	5.50

#### 4.3 主导参数集的合理性

本文算例摄动参数集为 $\{SYN_3-T_J, SYN_2-T_J, SYN_3-X'_d, SYN_3-X_q, SYN_2-X_q, SYN_1-X'_d, SYN_1-X_q, SYN_3-X'_q, EXC_1-K_e, EXC_2-K_e, FL_5-K_p, FL_6-K_p, FL_8-K_p\}$ ,具体的参数原始值、摄动值见附录中表A1。本算例中,误差参数是通过摄动来人为给定的,只有摄动参数才是确实存在误差的参数。根据表3,通过比较2种方法识别的主导参数集和算例摄动参数集可知,本文方法识别的最终主导参数集的全部7个参数均存在误差,而传统方法确定的主导参数集中只有2个参数是确有误差的参数。与传统方法相比,采用本文方法识别误差主导参数的准确性得到显著提高。

由表4可见,与校正前相比,最终主导参数集中校正后参数误差均大幅减小,参数值的准确性显著提高。

最终得到主导参数集校正前、后仿真结果对比如图5所示,取稳态有功功率为0.85 p.u.,稳态电压幅值为1.025 p.u。图中, $P$ 和 $V$ 均为标么值。

由图5可见,与校正前相比,有功功率和电压幅值在校正后仿真结果与实测数据之间不一致性明显减小。以式(11)的整体能量误差指标衡量校正后仿真误差,有功误差指标为0.0663,与校正前(见表2)相比减小了88.73%;电压误差指标为0.0019,与校正前相比减小了96.44%。由图5及上述指标可知,校正后仿真有效性显著提高。

对传统方法识别的主导参数集同样采用试错法进行参数校正,并使用校正后的模型参数进行仿真,与本文方法识别的最终主导参数集校正后仿真结果进行对比,如附录中图A2所示,有功和电压稳态值同上文。图中, $P$ 和 $V$ 均为标么值。仍以整体能

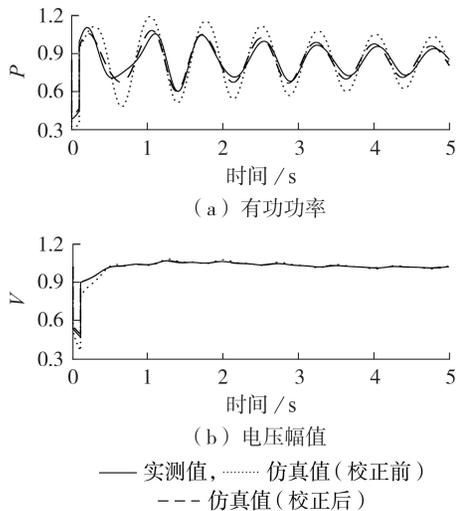


图5 校正前、后节点3观测量对比

Fig.5 Comparison of observations before and after calibration at Bus 3

量误差指标衡量仿真误差,传统方法识别的主导参数集校正后有功误差指标为0.2713,电压误差指标为0.0539。与之相比,本文方法识别的最终主导参数集校正后有功误差指标减小了75.56%,电压误差指标减小了96.47%。由附录中图A2及上述指标可见,与传统方法相比,校正本文方法识别的最终主导参数集能更有效地减小仿真误差,参数主导性更高。

综上,本文方法识别的主导参数集经校正后参数准确性、仿真有效性均显著提高;与传统方法相比,主导参数识别的准确性显著提高,所得主导参数集的主导性更高。

## 5 结论

针对电力系统仿真误差主导参数识别问题,本文提出基于轨迹灵敏度频域特征提取的主导参数识别方法,从频域角度揭示了轨迹灵敏度对电力系统动态行为的影响。与传统方法相比,所提方法充分挖掘轨迹灵敏度中蕴含的频域特征信息,为主导参数识别提供了新思路,间接改善了模型参数校正效果。后续研究将对各参数轨迹灵敏度频域特征进行深入挖掘,进一步提取参数对轨迹特征影响的信息,为实现仿真验证的可解释性提供理论指导。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] 贾旭东,李庚银,赵成勇,等. 电力系统仿真可信度评估方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):51-57.  
JIA Xudong,LI Gengyin,ZHAO Chengyong,et al. Study of the credibility evaluation method for the power system simulation [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19):51-57.

[2] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术,2000,24(12):1-4.  
HE Renmu. Research into veracity of power system dynamic

simulation[J]. Power System Technology,2000,24(12):1-4.

[3] HUANG Zhenyu,DU Pengwei,KOSTEREV D,et al. Generator dynamic model validation and parameter calibration using phasor measurements at the point of connection[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(2):1939-1949.

[4] TSAI C,CHANG-CHIEN L,CHEN I,et al. Practical considerations to calibrate generator model parameters using phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2228-2238.

[5] 郝丽丽,岳浩永,王昊昊. 基于校准导航的广域电力系统负荷模型校准[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):74-81,89.  
HAO Lili,YUE Haoyong,WANG Haohao. Load model calibration based on calibration navigator for wide-area power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):74-81,89.

[6] 陈聪. 基于实测系统扰动的同步发电机参数辨识研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.  
CHEN Cong. Research on the identification of synchronous generator parameters based on measured system disturbance [D]. Guangzhou:South China University of Technology,2017.

[7] NAYAK N,CHEN Heng,SCHMUS W,et al. Generator parameter validation and calibration process based on PMU data [C]//2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition(T&D). Dallas,TX,USA:IEEE,2016:1-5.

[8] 郑竞宏,李康,朱守真. 暂态稳定分析中负荷模型主导参数研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):1-6.  
ZHENG Jinghong,LI Kang,ZHU Shouzheng. Dominant parameters of load model in transient stability analysis [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):1-6.

[9] HISKENS I A. Nonlinear dynamic model evaluation from disturbance measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2001,16(4):702-710.

[10] HAJNOROOZI A A,AMINIFAR F,AYOUBZADEH H. Generating unit model validation and calibration through synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(1):441-449.

[11] HUANG Renke,DIAO Ruisheng,LI Yuanyuan,et al. Calibrating parameters of power system stability models using advanced ensemble Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):2895-2905.

[12] 周在彦. 基于多扰动事件WAMS信息的电力系统动态仿真验证研究[D]. 吉林:东北电力大学,2018.  
ZHOU Zaiyan. Research on dynamic simulation and verification of power system based on WAMS information of multi disturbance events[D]. Jilin:Northeast Electric Power University,2018.

[13] GENG Sijia,HISKENS I A. Second-order trajectory sensitivity analysis of hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers,2019,66(5):1922-1934.

[14] MOAWWAD A,EL-SAADANY E F,EL MOURSI M S. Critical loading characterization for MTDC converters using trajectory sensitivity analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(4):1962-1972.

[15] YUAN Heling,XU Yan. Trajectory sensitivity based preventive transient stability control of power systems against wind power variation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,117:1-8.

[16] 韩睿,郑竞宏,朱守真,等. 基于灵敏度分析的同步发电机参数分步辨识策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):74-80.  
HAN Rui,ZHENG Jinghong,ZHU Shouzheng,et al. Step identification of synchronous generator parameters based on sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,

- 32(5):74-80.
- [17] 鞠平,郭磊,高昌培,等. 频域灵敏度及其在电力系统参数辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28):19-24.  
JU Ping, GUO Lei, GAO Changpei, et al. Frequency-domain sensitivities with application to power system modeling [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 19-24.
- [18] 张艳军,刘佳琦,高凯,等. 基于冲击负荷注入的电力系统混合动态仿真方法[J]. 中国电力,2020,53(3):59-65.  
ZHANG Yanjun, LIU Jiaqi, GAO Kai, et al. Hybrid dynamic simulation method of power system based on impulse load injection [J]. Electric Power, 2020, 53(3): 59-65.
- [19] MILANO F. Psat-2.1.11-mat.zip[CP/OL]. (2019-08-17)[2020-06-13]. <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>.
- [20] BERG G J. Power-system load representation [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973, 120(3): 344-348.

## 作者简介:



刘征帆

刘征帆(1993—),男,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统仿真验证及参数校核方法(E-mail: lzf.academic@gmail.com);

安军(1978—),男,安徽马鞍山人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统动态安全分析与控制(E-mail: 173681572@qq.com);

蒋振国(1994—),男,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为数据驱动的电力系统动态仿真有效性评估(E-mail: 924561874@qq.com)。

(编辑 李玮)

### Dominant parameter identification of power system simulation error based on frequency domain characteristic extraction of trajectory sensitivity

LIU Zhengfan<sup>1</sup>, AN Jun<sup>1</sup>, JIANG Zhenguo<sup>1</sup>, LI Dexin<sup>2</sup>, LIU Zuoming<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jilin Electric Power Supply Co., Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** Accurate identification of dominant parameters in the dynamic simulation of power systems is the prerequisite for simulation validation. Traditionally, the comparison of time domain characteristics of trajectory sensitivity for parameters is used to confirm dominant parameters. So a method for dominant parameter identification of power system simulation errors based on frequency domain characteristic extraction of trajectory sensitivity is proposed. The sensitive frequency points are extracted by analyzing frequency domain characteristics of curves for simulation errors. The characteristic indicators to depict the influence of evaluation parameters on the frequency domain of trajectory sensitivity are established, and the indicators are used to analyze the frequency domain characteristics of trajectory sensitivity for parameters at sensitive frequency points. Then, the dominant parameter sets of simulation errors are acquired. The effectiveness of the proposed method is validated with a WSCC 3-machine 9-bus system. The results show that the proposed method makes up the deficiency of insufficient utilization of trajectory sensitivity information from aspect of time domain, and can provide theoretical support for simulation validation in power systems.

**Key words:** electric power systems; dynamic simulation; dominant parameters; trajectory sensitivity; frequency domain analysis

## 附录

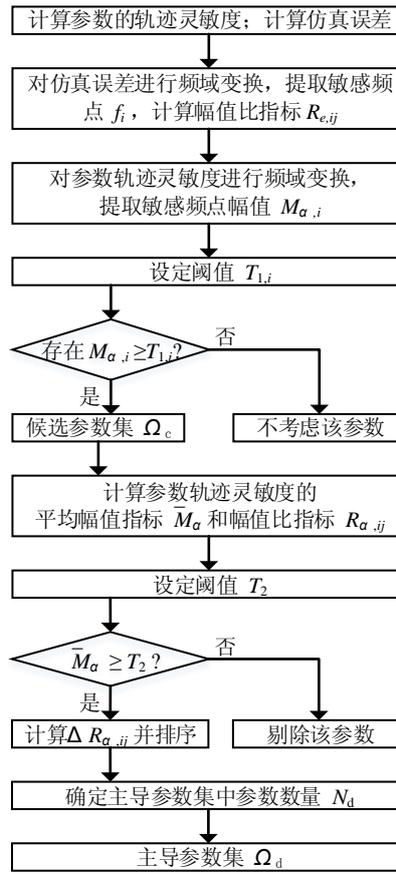


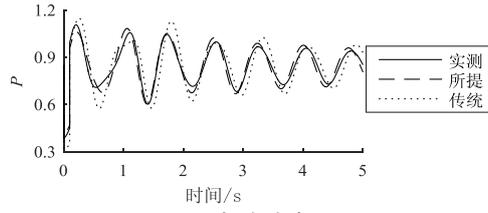
图 A1 主导参数集的认识流程

Fig.A1 Identification process of dominant parameter set

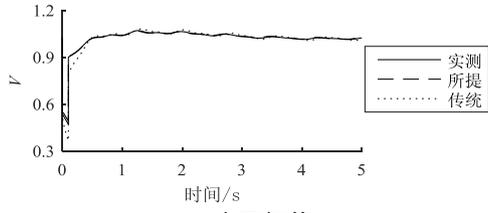
表 A1 摄动参数

Table A1 Perturbed parameters

元件/节点-参数	单位	原始值	摄动值
SYN <sub>3</sub> -T <sub>1</sub>	s	6.02	6.622
SYN <sub>2</sub> -T <sub>1</sub>	s	12.8	11.52
SYN <sub>3</sub> -X <sub>d</sub> '	p.u.	0.1813	0.25382
SYN <sub>3</sub> -X <sub>q</sub>	p.u.	1.2578	2.26404
SYN <sub>2</sub> -X <sub>q</sub>	p.u.	0.8645	0.821275
SYN <sub>1</sub> -X <sub>q</sub> '	p.u.	0.0969	0.101745
SYN <sub>1</sub> -X <sub>q</sub>	p.u.	0.0969	0.101745
SYN <sub>3</sub> -X <sub>q</sub> '	p.u.	0.25	0.2375
EXC <sub>1</sub> -K <sub>e</sub>	p.u./p.u.	1	1.25
EXC <sub>2</sub> -K <sub>e</sub>	p.u./p.u.	1	0.8
FL <sub>5</sub> -K <sub>q</sub>	—	80%	60%
FL <sub>6</sub> -K <sub>q</sub>	—	80%	60%
FL <sub>8</sub> -K <sub>q</sub>	—	80%	60%



(a)有功功率



(b)电压幅值

图 A2 2 种主导参数集校正后节点 3 观测量对比

Fig.A2 Comparison of Bus 3 observations between two methods after calibration of dominant parameter sets