

4-10-2023

## Mechanism analysis and application of ambient noise decoupling load measurement and identification model

Xian XU

*State Grid Corporation of Jiangsu Province Nanjing, Nanjing 210024, China*

Jinhang ZHOU

*Electrical Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China,  
zjhyddx@163.com*

Ying WANG

*Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Peixuan WU

*Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Ting ZHOU

*State Grid Corporation of Jiangsu Province Nanjing, Nanjing 210024, China*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

XU, Xian; ZHOU, Jinhang; WANG, Ying; WU, Peixuan; ZHOU, Ting; and LU, Chao (2023) "Mechanism analysis and application of ambient noise decoupling load measurement and identification model," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 1, Article 16.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.016

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss1/16>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

---

## Mechanism analysis and application of ambient noise decoupling load measurement and identification model

### Authors

Xian XU, Jinhang ZHOU, Ying WANG, Peixuan WU, Ting ZHOU, and Chao LU

# 基于类噪声的解耦测辨负荷模型 机理分析及应用

徐 贤<sup>1</sup>, 周晋航<sup>3</sup>, 王 颖<sup>2</sup>, 吴沛萱<sup>2</sup>, 周 挺<sup>1</sup>, 陆 超<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;  
3. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 负荷辨识是电力系统仿真的重要环节。为得到准确的负荷辨识动态参数, 国内外学者在合理构建辨识模型方面做出了大量深入的研究。首先, 在传统负荷模型基础上反推出 2 种基于类噪声的负荷实时动态参数辨识模型, 实现测辨数据在辨识模型计算中的输入数据时序的解耦, 同时避免辨识初始物理量冗余性以及辨识量误差迭代放大对参数功率响应能力造成的负面影响。再从类噪声仿真数据和实测数据上验证分析这 2 种测辨模型的数据功率响应能力。结果显示测辨得到负荷动态参数适用于现在的电力仿真系统, 说明此研究能够为进一步研究辨识模型提供新方向, 为负荷可控性提供数据基础。

**关 键 词:** 负荷辨识; 数据解耦; 动态参数; 类噪声

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.016 中图分类号: TM714 文章编号: 1673-9140(2023)01-0138-08

## Mechanism analysis and application of ambient noise decoupling load measurement and identification model

XU Xian<sup>1</sup>, ZHOU Jinhang<sup>3</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, WU Peixuan<sup>2</sup>, ZHOU Ting<sup>1</sup>, LU Chao<sup>2</sup>

(1. State Grid Corporation of Jiangsu Province Nanjing, Nanjing 210024, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Electrical Power Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Load identification is an important part of power system simulation. In order to obtain accurate load identification dynamic parameters, scholars at home and abroad have done a lot of in-depth research on the reasonable construction of identification models. Firstly, on the basis of the traditional load model, two real-time dynamic parameter identification load models based on ambient noise are deduced, which realizes the decoupling of the input data sequence of the measurement and identification data in the calculation of the identification model. At the same time, it avoids the negative impact of the identification of the initial physical quantity redundancy and the iterative amplification of the identification quantity error on the parameter power response capability. Then, the data power response capability of the two measurement and identification models is verified and analyzed from the ambient noise simulation data and the actual measurement data. The results show that the load dynamic parameters measured and identified are applicable to the current power simulation system, indicating that the research can provide a new direction for further research on the identification model and provide a data basis for load controllability.

**Key words:** load identification; data decoupling; dynamic parameters; ambient noise

收稿日期: 2021-03-20; 修回日期: 2021-11-05

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(20192001526)

通信作者: 周晋航(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事负荷辨识方面研究; E-mail: zjhyddx@163.com

负荷建模是电力系统中重要而困难的问题。目前常用的负荷建模方法包括故障拟合法、统计综合法和总体测辨法。对于故障拟合法来说,其大扰动持续时间短,利用暂态方程拟合时常出现多解情况<sup>[1]</sup>。同时,在系统中,变频电动机在暂态过程中经常出现因为逆变器电路低压保护导致切机的情况。因此,其动态参数所对应的电动机特性可能无法反应真实的电动机暂态特性。因此,本文不讨论暂态情况。对于统计综合法来说,由于其网点下的电气设备参数不属于同一个电压等级,其聚合到高电压等级时经常会出现参数不准的情况,并且调查不具有实时性<sup>[2]</sup>。

1997年 Pierre 发现,由负载策略改变等原因引起的扰动信号可用于系统动态分析<sup>[3]</sup>。近年来,随着国家电网调度部门对电力系统仿真计算准确度和时效性要求的提高,类噪声环境下负荷辨识正日益得到重视。随着 PMU/WAMS 设备的普及<sup>[4]</sup>,已有相关研究者展开了工程应用研究<sup>[5]</sup>。如今,电网中有大量的类噪声信号已经被采集,可以用于识别模型的动态响应特性。已有研究者在此基础上对电网中类噪声数据进行动态辨识,并且取得比较理想的结果<sup>[6]</sup>,但并未说明确切的模型内部机理。本文在此基础上对其测辨模型做出详细机理分析。

由于电动机在系统中所占的比重较大<sup>[7]</sup>,因此负荷建模的关键在于对电动机的建模。公认的电动机有五阶电磁暂态模型、三阶机电暂态模型、一阶机械暂态模型和一阶电压暂态模型。基于文献<sup>[6]</sup>的分析和常规类噪声辨识是基于一段秒级时间尺度来做辨识,因此三阶机电暂态模型无论是从精度上还是计算量上都最适合于负荷动态参数辨识。其中,传统的负荷模型中的电动机模型计算辨识比较依赖于初始量的准确性。然而,系统动态过程中,并不容易存在初始的稳态过程。因此,本文提出一种输入数据的时序解耦测辨模型。从电压和功率量测值的角度出发计算辨识参数,避免了辨识初始物理和模型中时序状态变量迭代计算对参数辨识的冗余性,而是通过离散的动态功率和电压数据,同时辨识电磁参数和滑差。

对于辨识模型主导参数选取,基于类噪声的动态辨识同样基于电动机的动态微分方程和输出方程<sup>[6]</sup>。因此可以利用文献<sup>[8-9]</sup>提出的相关结论到

类噪声的动态辨识上:由于其参数对功率的响应能力各不相同,其灵敏度从大到小顺序大致为(动静负荷比  $p_{ct}$ , 转子电阻  $R_r$ , 定子电抗  $X_s$ , 转子电抗  $X_r$ , 转子滑差  $s$ ) > (机械转矩  $T_m$ , 电动机惯量  $H$ , 机械方程系数  $A, B, C$ )。根据转子运动方程,滑差  $s$  即包含了机械参数的特性,因此从参数灵敏度角度本论文将着重分析电磁参数和滑差的辨识。

本文对辨识模型的效果验证将从仿真数据、PMU/WAMS 采集的实测数据 2 个方面来进行说明。首先介绍传统负荷模型理论和解耦测辨模型的构建过程;然后从仿真角度验证解耦测量模型的辨识效果;最后通过实测数据的辨识来验证测辨模型实际应用效果和可行性。

## 1 传统负荷模型和解耦测辨模型

### 1.1 传统负荷模型理论简述

目前,电网分析负荷模型仍然采用 Z+IM 作为主流<sup>[10]</sup>,在计算初始物理量时,根据初始时刻的电磁暂态,将其视为稳态过程<sup>[11]</sup>。由于定子电阻  $R_s$  对电动机暂态特性的影响不大所以经常性忽略<sup>[12]</sup>。简化后的电动机如图 1 所示。

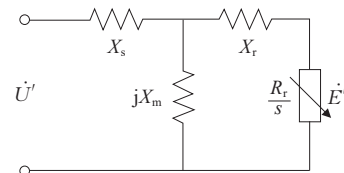


图 1 感应电动机稳态等效电路

Figure 1 Steady state equivalent circuit diagram of induction motor

通过等效电路功率与初始潮流计算后可得初始滑差和初始暂态电动势<sup>[11]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_0 = \frac{2R_r(X_s + X_m)^2 \frac{P_0 k_p}{U_0^2}}{X_m^2 + \sqrt{X_m^4 - 4((X_s + X_m)X_p \frac{P_0 k_p}{U_0^2})^2}} \\ X_p = X_s X_r + X_s X_m + X_m X_r \\ X = X_s + X_m \\ X' = X_s + X_m // X_r \\ \dot{E}'_{0,1} = \frac{\frac{X - X'}{X'}}{1 + \frac{X - X'}{X'} + js_0 \omega_b T'_{d0}} \dot{U}_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

其中,  $P_0$ 、 $k_p$ 分别为初始总有功功率,电动机有功比例,  $X$ 、 $X'$ 、 $T'_{d0}$ 分别为电动机等值电抗、暂态等值电抗、转子开路时间常数。在类噪声条件下,默认频率不变,则  $\omega_b = 100\pi$  rad/s, 求出  $s_0$ , 即可求出初始时刻和第1时刻的暂态电动势  $\dot{E}'_{0,1}$ 。时域仿真中, 计算第2时刻及以后的物理量需要利用电动机的2个微分方程:

$$\begin{cases} \frac{d\dot{E}'}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (-\dot{E}' + j(X - X')\dot{I}) - js\omega_b \dot{E}' \\ \frac{ds}{dt} = \frac{1}{H} (T_m - E_d I_d - E_q I_q) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $H$ 、 $T_m$ 分别为惯量和机械转矩,  $I$ 、 $E'$ 分别为三阶电动机等值  $dq$  轴系电路的电流和暂态电动势。其中的电流公式通过等值电路可得:

$$\begin{cases} I_d = \frac{U_q - E'_q}{X'} \\ I_q = \frac{-U_d + E'_d}{X'} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)求得的初始滑差和初始暂态电动势, 通过转子运动方程和暂态电动势方程式(2), 求得全时刻的状态量后, 通过功率方程式加上静负荷  $Z$  模式的定义式即得到  $Z+IM$  的总功率。功率方程为

$$\begin{cases} P_M = U_d I_d + U_q I_q \\ Q_M = U_q I_d - U_d I_q \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 负荷时序解耦测辨模型

由于系统动态过程中并不容易存在初始的稳态过程, 本文提出一种避免计算初始物理量和状态量迭代计算的解耦测辨模型。

从电动机功率方程式(4)出发, 除测量信号  $\dot{U}$  以外, 与功率相关的物理量为  $\{X', \dot{E}'\}$ 。而与  $\dot{E}'$  相关的物理量为  $\{X, X', T'_{d0}, s\}$ ,  $\{\dot{E}', s\}$  为状态变量,  $\{X, X', T'_{d0}\}$  为恒定辨识量。在特定的离散方式下, 每一个时刻的  $\{X, X', T'_{d0}, s\}$  均可由前后2个时刻的  $\{\dot{E}', s\}$  描述。下面将结合算法误差介绍具体模型的实现过程。

首先通过采集得到的所有时刻输入数据  $\{\dot{U}, P, Q\}$ , 计算理论上电动机负荷应该消耗的误差功率为

$$\begin{cases} P_{Mc} = P - \dot{U}^2 (a_p + \epsilon_1) \\ Q_{Mc} = Q - \dot{U}^2 (a_q + \epsilon_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $a_p$ 、 $a_q$  为静负荷定义式中恒阻抗比例系数。由于辨识是一个优化问题, 在参数非真值情况下, 将  $\{a_p, a_q\}$  的误差描述为  $\{\epsilon_1, \epsilon_2\}$ , 通过辨识量引入的中间变量的误差用下标  $c$  表示, 下同。

根据式(3)、(4)可以合并反推为

$$\begin{cases} E'_{dc} = \frac{P_{Mc}(X' + \epsilon_3)U_q - Q_{Mc}(X' + \epsilon_3)U_d + U_d^3 + U_d U_q^2}{U_d^2 + U_q^2} \\ E'_{qc} = \frac{-P_{Mc}(X' + \epsilon_3)U_d - Q_{Mc}(X' + \epsilon_3)U_q + U_q^3 + U_q U_d^2}{U_d^2 + U_q^2} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)引入  $X'$  的误差  $\epsilon_3$ 。根据式(2)中的暂态电动势方程分解成  $dq$  轴后, 前向欧拉下可写为

$$\begin{cases} s_{dc}(k) = \frac{E'_{dc}(k+1) - E'_{dc}(k)}{\omega_b E'_{qc}(k) dt} + \frac{1}{\omega_b E'_{qc}(k)(T'_{d0} + \epsilon_4)} \\ [E'_{dc}(k) + (X - X' + \epsilon_5 - \epsilon_3)I_{qc}(k)] \\ s_{qc}(k) = \frac{E'_{qc}(k) - E'_{qc}(k+1)}{\omega_b E'_{dc}(k) dt} + \frac{1}{\omega_b E'_{dc}(k)(T'_{d0} + \epsilon_4)} \\ [E'_{qc}(k) - (X - X' + \epsilon_5 - \epsilon_3)I_{dc}(k)] \end{cases} \quad (7)$$

至此, 在参数非真值情况下, 每一个时刻的滑差包含所有辨识量  $\{R_j, X_j, X', T'_{d0}, X\}$  的算法误差为  $\epsilon_1 \sim \epsilon_5$ 。

可发现式(6)、(7)均是式(2)~(4)的反推。在参数真值情况下, 滑差是一个统一量, 但现在参数非真值, 并且  $dq$  轴系方程非完全对称。因此, 在没有得到最优解情况下, 式(7)中的2个滑差难以保证相等。

式(7)处理成复数形式可以得到:

$$s_c = \frac{1}{j\omega_b \dot{E}'_c T'_{d0}} (-\dot{E}'_c + j(X - X' + \epsilon_5 - \epsilon_3)\dot{I}_c) - \frac{d\dot{E}'_c}{j\omega_b \dot{E}'_c dt} \quad (8)$$

同理, 在参数非真值条件下,  $s_c$  是个复数。已知滑差在真值条件下一定是一个实数, 将  $s_c$  给予一个人处理误差  $\epsilon_6$  ( $\epsilon_6$  包含了  $\epsilon_1 \sim \epsilon_5$ )。为方便起见, 处理过后的状态变量称为算法预测量, 用下标  $p$  来表示。现在已知对状态变量的处理方法有2种。

1) 通过  $s_c$  加绝对值来引入  $\epsilon_6$ 。

$$s_p = \left| \frac{1}{j\omega_b \dot{E}'_c / T'_{d0}} (-\dot{E}'_c + j(X - X' + \epsilon_5 - \epsilon_3) \dot{I}_c) - \frac{d\dot{E}'_c}{j\omega_b \dot{E}'_c dt} \right| \quad (9)$$

将预测量  $s_p$  带回到式(2)中的暂态电动势方程,计算每一个采样时间长度的离散的暂态电动势差  $d\dot{E}'_c$ ,并加上式(6)得到的  $\dot{E}'_c(k)$ ,得到下一时刻的预测量  $\dot{E}'_c(k+1)$ ,计算预测功率  $P_p(k+1)$ 、 $Q_p(k+1)$  后构建目标函数为

$$J = \sum (P_p - P)^2 + (Q_p - Q)^2 \quad (10)$$

算法目的是求代价的全局极小值,算法的过程即为  $J$  的收敛,使得  $\epsilon_6$  接近于 0,从而使  $\epsilon_1 \sim \epsilon_5$  接近于 0,使辨识参数接近真值。

2) 将  $s_{dc}$ 、 $s_{qc}$  带回互异的分解  $dq$  轴暂态电动势方程来构造  $\epsilon_6$ ,此时  $\epsilon_6 = |s_{dc} - s_{qc}|$ :

$$\begin{cases} \frac{dE'_{dc}}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0} + \epsilon_4} [E'_d + (X - X' + \epsilon_5 - \epsilon_3) I_{qc}] + s_1 \omega_b E'_q \\ \frac{dE'_{qc}}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0} + \epsilon_4} [E'_q - (X - X' + \epsilon_5 - \epsilon_3) I_{dc}] - s_2 \omega_b E'_d \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $[s_1, s_2] \in \{[s_{dc}, s_{dc}] || [s_{qc}, s_{qc}] || [s_{qc}, s_{dc}] || [s_{dc}, s_{qc}]\}$ 。但  $[s_1, s_2] = [s_{dc}, s_{qc}]$ ,会发现  $s_{dc}$  和  $s_{qc}$  其实就是从  $dE'_{dc}$  和  $dE'_{qc}$  通过式(7)推得,回带后会出现左右等式相消的情况( $\epsilon_6 = |s_{dc} - s_{dc}|$ ,  $\epsilon_6 = |s_{qc} - s_{qc}|$ ),  $\epsilon_6$  无作用,因此选择另外 3 种情况引入误差。3 种情况对应  $\{[E'_{dc}(s_{dc}), E'_{qp}(s_{dc})] || [E'_{dp}(s_{qc}), E'_{qc}(s_{qc})] || [E'_{dp}(s_{qc}), E'_{qp}(s_{dc})]\}$ ,并对应 3 种功率的计算方式,可以表示为  $\{[P_1, Q_1] || [P_2, Q_2] || [P_3, Q_3]\}$ 。由于目标函数是根据功率的计算方式列写的,因此根据排列组合,计算功率的方式有 9 种 ( $\{[P_1, Q_1] || [P_1, Q_2] || \dots || [P_3, Q_3]\}$ )。

综上所述,简化的总体辨识流程如图 2 所示。

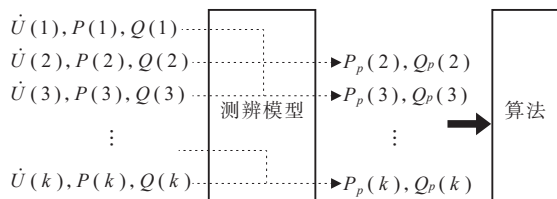


图 2 测辨模型流程

Figure 2 Flow chart of measurement and identification model

## 2 负荷解耦测辨模型有效性验证

### 2.1 2 种仿真数据生成(类噪声引入模型)

1) 理论数据生成。根据相关文献<sup>[13]</sup>的经验,三阶电动机因小扰动信号产生的幅频特性应集中在 5 Hz 以下。因此,在基值电压基础上,加上由白噪声通过 Matlab 数字滤波器按截止频率滤波的方式产生的噪声信号来作为传统模型的类噪声输入电压信号。通过数字滤波器产生的类噪声信号的时域和频谱如图 3 所示。

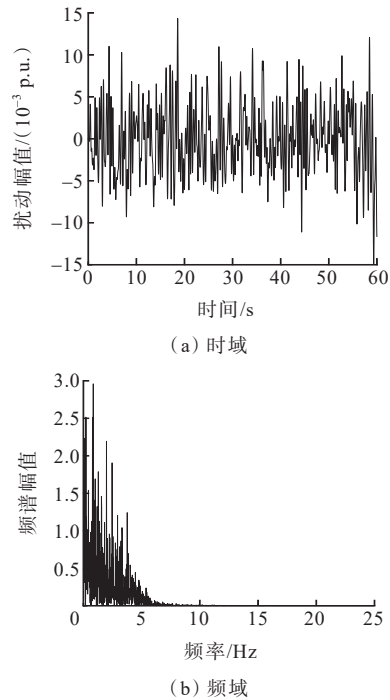


图 3 类噪声叠加信号时域与频域

Figure 3 Time domain and frequency domain diagram of ambient noise superimposed signals

输入到理论模型中后,电动机模型的真值设定为  $R_s=0, X_m=3.8, X_r=0.12, X_s=0.18, R_r=0.02, H=2, A=1, B=0$ ,静负荷恒阻抗比例系数  $a_p=1/R_j=0.5, a_q=1/X_j=0.2$ ,产生 60 s 的数据如图 4 所示。

2) 软件仿真数据生成。PSAT<sup>[14]</sup>(power system analysis toolbox)软件具有时域仿真和开源可编程功能,容易引入模拟的数字滤波信号。由图 5 所示,通过在 PSAT 的扰动文件中编写相同的噪声信号函数程序,作用在 3 机 9 节点系统在 5 号节点时域仿真中每一步长下的 5 节点有功功率全局变量,来模拟现实电网负荷节点的负载策略变化。

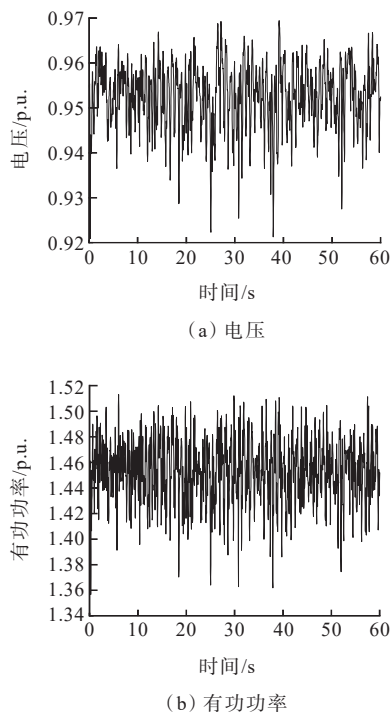


图4 电动机电压和有功功率理论仿真数据

Figure 4 Theoretical simulation data of motor voltage and active power

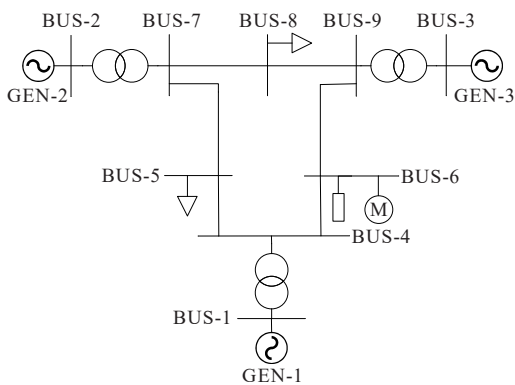


图5 3机9节点系统

Figure 5 Three-machine nine-node model

在6号节点采集输出数据,电动机电路参数和静负荷参数设置同上。产生60s的仿真数据如图6所示。

由图6可知,无论是直接通过将类噪声叠加在基准电压上直接输入理论模型,还是间接地通过仿真系统其他节点的功率波动传递到测量节点模型上,在对于相同电气参数的Z+IM负荷模型通过2种不同方法生成的数据中的2个功率频率特性基本类似。如图7所示,证明了2个模型具有类似的滤波(传递函数)性质。

综上所述,输入电压和输出功率统称为类噪声辨识的测辨信号数据。以上2种仿真数据用作文2.2解耦测辨模型的输入数据。

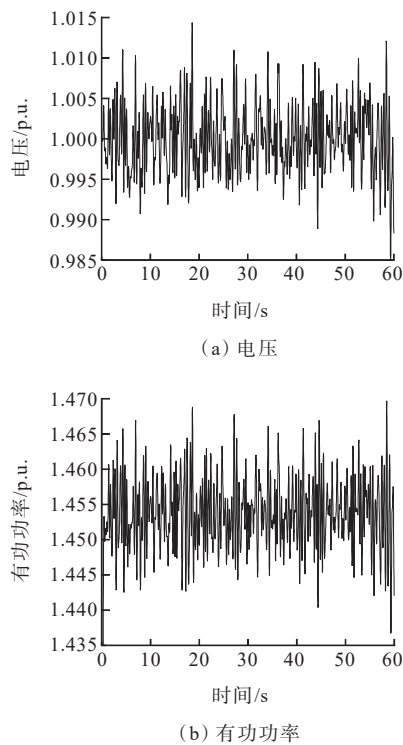


图6 电动机电压和有功功率软件仿真数据

Figure 6 Motor voltage and active power software simulation data

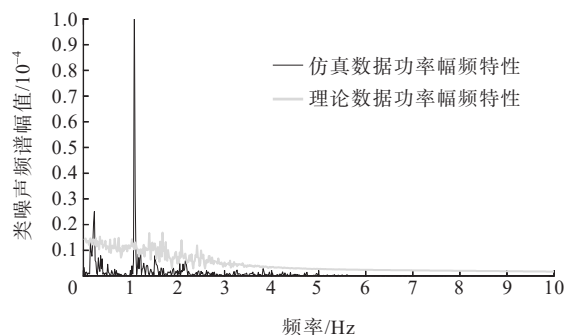


图7 仿真和理论数据功率频谱

Figure 7 Simulation and theoretical data power spectrum

## 2.2 测辨模型对仿真数据的有效性验证

在对PMU/WAMS实测数据验证前,需要对测辨模型进行理论数据和仿真数据的有效性验证。验证的方式分为两步。

第1步 模型准确性验证。具体方法是将采集的测辨信号数据 $\{\dot{U}, P, Q\}$ 以及真值都带入到测辨模型中以验证测辨模型的理论准确性。

第 2 步 从理论模型和仿真采集到的数据进行辨识,观察在同一算法条件下辨识量接近真值的情况。该步是验证模型是否具有可辨识性。

1) 对于第 1 步,可得表 1:按照滑差的处理方式可分为 5 行,第 1 行采用文 2.2 中生成的 60 s 的 Z+IM 理论模型,第 2 行为绝对值滑差引入算法误差的测辨模型验证情况,第 3~5 行为通过分解滑差互异交换的测辨模型验证情况。纵向按照文 2.1 中的理论仿真数据和软件仿真数据的功率拟合度分别进行验证。

样本可决系数(R-Square)是描述回归模型拟合优劣最常用的数量指标,越接近 1,则表示模型和参数间的差距越小。其描述为可解释(已辨识)离差平方与(已测量)总离差的比值,其中有功功率或无功功率准确性验证表中的拟合度计算方法定义为

$$f = 1 - \frac{(d_p - d)^2}{(d - \text{mean}(d))^2} = 1 - \frac{J}{N \cdot \sigma} \quad (12)$$

式中,  $d_p$ 、 $d$  分别为辨识预测量和测量量;  $J$  的定义见式(10),为对应物理量平方差和的代价;  $\sigma$  为实测有功功率或无功功率的方差;  $N$  为辨识数据段的长度。由式(12)可知,代价(算法适应度)越小,拟合度越接近 100%。第 1 步中理论模型产生的数据和软件生成的数据作为输入分别对应到表 1 中的 1、2 列和 3、4 列。

表 1 模型准确性验证

Table 1		Model accuracy verification form				%
模型	$f_p$	$f_q$	$f_p$	$f_q$		
	(1. 理论)	(1. 理论)	(2. 软件)	(2. 软件)		
Z+IM	100	100	26.94	54.25		
$E'_d(l_{c1}), E'_q(l_{c1})$	100	100	98.92	97.25		
$E'_d(s_{dc}), E'_q(s_{dc})$	100	100	91.09	99.99		
$E'_d(s_{qc}), E'_q(s_{qc})$	100	100	99.99	96.39		
$E'_d(s_{qc}), E'_q(s_{dc})$	100	100	91.09	93.39		

由表 1 可知,对于 Z+IM 理论模型,其功率响应无法验证。其原因有 2 点:第 1 点是由于初始物理量计算方法和式(2)的计算方法与 PSAT 软件存在偏差,导致初始状态无法拟合;第 2 点是由于理论模型的单步方法精度阶数低于 PSAT 模型,而仿真模

型对单步方法相对于解耦模型更敏感,因此理论模型无法参与类噪声测辨。

其余模型(表 2 中第 2~5 行)借助数据离散解耦化后的优势对于 PSAT 生成数据响应普遍较为适应。即测辨模型针对理论数据具有较好的响应能力。

2) 对于第 2 步,由于篇幅有限,本文只针对仿真数据,将以上 10 种测辨模型(顺序为绝对值 1 种—交换 9 种)进行辨识,算法采用差分进化算法<sup>[15]</sup>。辨识量  $\{X, X', T'_{d0}, a_p, a_q\}$  的初始种群范围设置为下限  $[0.01 \times 5]$  和上限  $[5, 5, 10, 1, 1]$ ,控制变量算法迭代次数为 500 代终止,以保证算法条件相同。每个模型试验 10 次,并记录每个模型 10 次平均的最终算法收敛后的适应度如图 8 所示,其中模型 5 算法适应度太低,故没有展示。

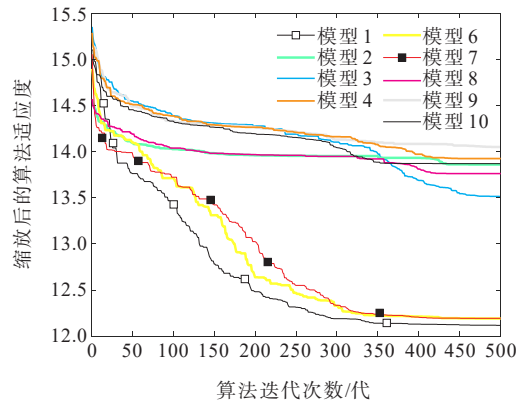


图 8 10 种模型的收敛适应度柱状

Figure 8 Histogram of convergence fitness of 10 models

由图 8 可知,模型 1、5 为较优。该结论也符合表 1 中  $E'_d(s_{qc}), E'_q(s_{qc})$  在真值条件下的有功功率与  $E'_d(s_{dc}), E'_q(s_{dc})$  算得的无功组成的目标函数所对应的模型对仿真数据拟合度高的现象。但研究得出模型 5 的辨识参数情况并不好,这里给出模型 1、5 的辨识参数的箱型如图 9 所示。横坐标顺序为  $\{X, X', T'_{d0}, a_p, a_q\}$ ,对应真值为  $\{3.98, 0.2963, 0.6239, 0.5, 0.2\}$ 。

由图 9 可知,虽然模型 5 的最终适应度小,但存在辨识数据分散性大,并且部分参数聚集在算法给定的初始范围的边界上的问题,说明模型的可解性差。因此可以得出结论,绝对值滑差从算法收敛适



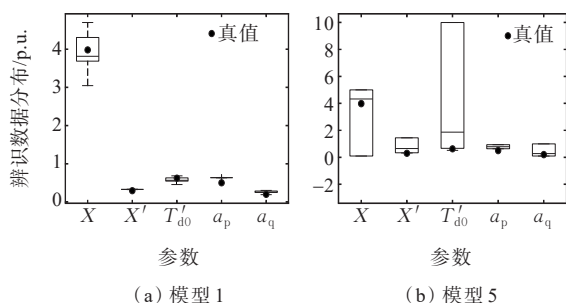


图9 模型1和模型5的辨识参数箱型

Figure 9 Box plots of identification parameters of model 1 and model 5

应度和辨识参数接近真值2个角度综合来说为最优,故文3的实测数据辨识应用选择绝对值滑差模型作为测辨模型。

### 3 实测数据应用

以2020年9月15日的16:28:00—16:29:00的某220 kV变电站1#变压器高压侧PMU/WAMS采集60 s的数据为例进行辨识,采样率为50 Hz/s,采集量为 $\{\dot{U}, P, Q\}$ 。测辨模型采用绝对值滑差模型来观察模型的拟合曲线和最终参数情况。电压基准值为220 kV,功率基准值为10 MV·A。辨识量为 $\{X, X', T'_{d0}, a_p, a_q\}$ ,与之顺序对应的初始范围设置为下限 $[1, 0.01, 0.01, 0.01, -0.5]$ ,上限 $[10, 2, 10, 5, 0.5]$ 。

通过观察实测数据可发现功率因数比较高(接近于1)。而常规电动机的功率因数在0.8左右,故考虑为静负荷可能补偿了部分发电机消耗的无功功率。因此,将静负荷电抗的范围设置在0左右。其拟合曲线、输入电压和辨识滑差如图10所示,实测数据辨识参数及拟合度如表2所示。

由图10、表2可知,在较长时间尺度的辨识过程中,测辨模型辨识出的参数在辨识数据的各个时段都表现出较好的功率响应能力。这体现了解耦测辨模型不依赖于数据迭代和初值影响的优点,并且在日常类噪声数据辨识具有普适性,特别适合于系统的负荷动态参数辨识。其中,静负荷无功系数为负数可能表明变电站节点存在补偿电容或其他无功电源。补偿的负电抗和静负荷电抗并联后的等效电抗可以反映输出无功特性。

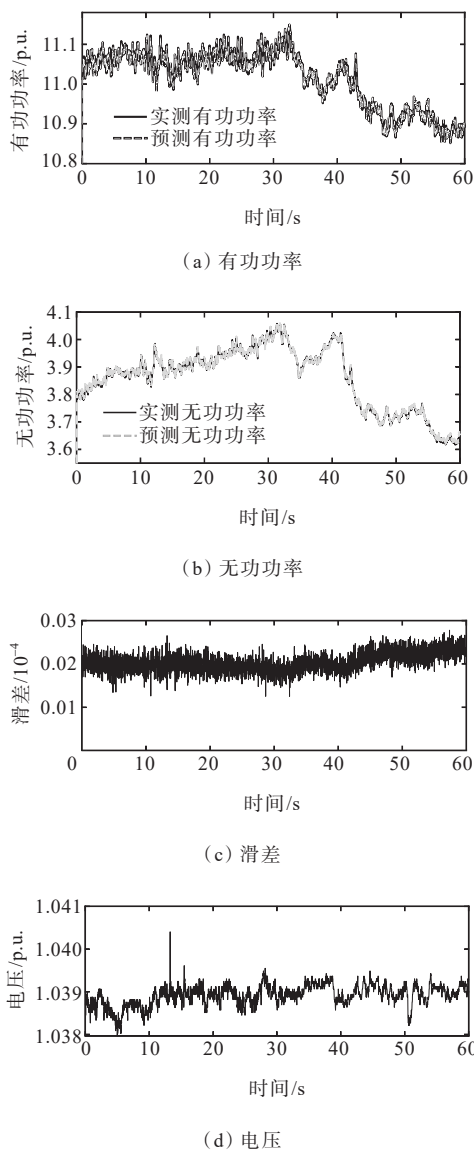


图10 绝对值滑差测辨模型预测功率拟合

Figure 10 Fitting diagram of predicted power of absolute value slip measurement and identification model

表2 实测数据辨识参数及拟合度

Table 2 Identification parameters for measured data and fit

$X$	$X'$	$T'_{d0}$	$a_p$	$a_q$	$f_P$	$f_Q$
1.493 8	0.193 2	9.867 6	1.5220	-0.486 0	97.46%	97.06%

### 4 结语

本文详细解析测辨模型的构建过程。通过分析每个采样数据两端的先验物理量,人为引入滑差误差,间接影响辨识量的算法误差的计算过程。解释了辨识模型如何实现数据解耦来促进辨识效果,并验证了测辨模型在实测数据辨识上的可行性。

然而,测辨模型如何差异化方式精度为几阶效果最好是需要研究的。即便采样率增加到100 Hz/s,其精度离现实情况的瞬间连续状态仍有差距。因此,在现有采样率的基础上,下一步的测辨研究应该考虑以下方向:考虑更高阶数、修正实测数据质量问题、采用更强的算法和解决辨识问题。通过采用这些方向,可以更好地解决现有的测辨问题。

#### 参考文献:

- [1] 洪志鹏,马进,贺仁睦,等.一种新的简化负荷模型结构[J].现代电力,2008,25(3):1-7.  
HONG Zhipeng, MA Jin, HE Renmu, et al. New structure of simplified load model[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(3):1-7.
- [2] 王琦,张文朝,汤涌,等.统计综合法负荷建模中的调查方法及应用[J].电网技术,2010,34(2):104-108.  
WANG Qi, ZHANG Wenchao, TANG Yong, et al. A new load survey method and its application in component based load modeling[J]. Power System Technology, 2010, 34(2):104-108.
- [3] PIERRE J W, TRUDNOWSKI D J, DONNELLY M K. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3):1245-1251.
- [4] 曹一家,李大虎.基于广域测量系统的大区域电网负荷建模的研究[J].电力科学与技术学报,2007,22(2):1-7.  
CAO Yijia, LI Dahu. Study on large-scale grid load modeling based on wide-area measurement system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(2):1-7.
- [5] 陆臣斌,包哲静,于淼,等.基于改进自适应构造区间法的电力负荷区间预测[J].电测与仪表,2022,59(11):34-41.  
LU Chenbin, BAO Zhejing, YU Miao, et al. Power load interval prediction based on improved adaptively constructed interval optimization method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11):34-41.
- [6] ZHANG X, LU C, HAN Y D, et al. Ambient signal based load model parameter identification using optimization method[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, USA, 2015.
- [7] 王淞瑶,张智晟.基于量子加权多层级GRU神经网络的综合能源系统多元负荷短期预测[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):85-93.  
WANG Songyao, ZHANG Zhisheng. Short-term multivariate load forecasting of an integrated energy system based on a quantum weighted multi-hierarchy gated recurrent unit neural network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23):85-93.
- [8] 孙华东,周孝信,李若梅.感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J].电网技术,2005,29(23):1-6.  
SUN Huadong, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(23):1-6.
- [9] 吴小钊,李俊豪,付鲁军,等.C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>环保混合气体在去离子栅式负荷开关中的开断特性[J].高压电器,2021,57(3):48-53.  
WU Xiaozhao, LI Junhao, FU Lujun, et al. Breaking characteristics of eco-friendly C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> gas mixture in splitter arc extinction type load switch[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3):48-53.
- [10] 朱溪,曾博,徐豪,等.一种面向配电网负荷恢复力提升的多能源供需资源综合配置优化方法[J].中国电力,2021,54(7):46-55.  
ZHU Xi, ZENG Bo, XU Hao, et al. An integrated optimal allocation method of multi-energy supply and demand side resources for load resilience enhancement of distribution system[J]. Electric Power, 2021, 54(7):46-55.
- [11] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2008:76-78.  
JU Ping, MA Daqiang. Power system load modeling(second edition) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 76-78.
- [12] 李欣,刘晨凯,郭攀锋,等.考虑拓扑变化的电力系统暂态稳定评估[J].智慧电力,2021,49(12):59-65.  
LI Xin, LIU Chenkai, GUO Panfeng, et al. Transient stability assessment of power system considering change in network topology[J]. Smart Power, 2021, 49(12):59-65.
- [13] 贺强,张轶,刘旸,等.考虑用户舒适度的需求侧负荷转移策略[J].电网与清洁能源,2021,37(5):43-51.  
HE Qiang, ZHANG Yi, LIU Yang, et al. Demand side load transfer strategy considering user comfort[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5):43-51.
- [14] 王金铭,高键.基于PSAT的电力系统时域仿真研究[J].科学技术与工程,2008,8(17):4802-4805.  
WANG Jinming, GAO Jian. Research of power system time domain simulation based on PSAT[J]. Science Technology and Engineering, 2008, 8(17):4802-4805.