

# 采样数据对综合负荷模型参数辨识的影响

徐强<sup>1</sup>, 梁伟<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 在实际工程应用中, 经典的综合负荷模型(CLM)目前在电网中得到了广泛的应用与发展。采用总体测辨法的负荷参数辨识策略, 以计及频率特性的 CLM 为研究对象, 基于瞬时的三相交流电压和电流采样数据, 采用具有较强全局寻优的蚁群算法来辨识负荷模型参数。通过仿真和计算, 对比分析不同时间长度的采样数据对负荷模型参数辨识结果的影响, 同时分析同一时间长度的采样数据对负荷模型曲线拟合效果的影响。

**关键词:** 综合负荷模型; 蚁群算法; 参数辨识; 瞬时交流数据; 时间长度

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)05-0053-04

电力负荷模型对电力系统的潮流计算、暂态计算、电压稳定和电力系统安全分析等均有一定的影响。因此建立相对准确的负荷模型以及确立其模型参数是极其必要的。文献[1-5]介绍了近年来国内外研究机构和学者在负荷建模领域取得的成果。在诸多典型负荷模型结构中, 综合负荷模型(CLM)在电力工程实际当中得到了广泛的应用。CLM 一般由静态负荷和感应电动机负荷并联组成。其中感应电动机的三阶暂态方程是由其五阶 Park 方程简化推导而来, 常被称之为感应电动机的三阶实用模型, 其中感应电动机输入电压中的直轴电压分量或者交轴电压分量是被忽略的, 不妨称之为单分量负荷模型<sup>[6]</sup>。随着电气测量条件的发展, 人们计及感应电动机推导过程中的忽略条件, 得到了双分量负荷模型。而且随着新能源的不断接入, 功率波动可能会影响系统频率变化。因此, CLM 需要考虑频率的影响。

在负荷建模领域, 总体测辨法是一种运用极其广泛的负荷建模方法, 但该方法主要关注负荷模型方程、负荷模型结构、负荷节点的采样数据的组成成分以及参数的辨识精度等, 对负荷节点采样数据的时间尺度很少关注。文中在 Matlab/Simulink 中搭建仿真系统, 等效考虑综合负荷, 进行仿真得到综合负荷母线处的三相交流电压、电流和功率的采样数据, 采用总体测辨法的负荷参数辨识策略, 利用蚁群优化算法寻求全局最优解, 得到 CLM 的参数辨识结果, 并研究了采样数据长度对负荷模型参数辨识结果的影响。

## 1 电力负荷模型和结构

### 1.1 电力负荷模型

文中采用 CLM, 其中感应电动机可以采用详细的 Park 模型。感应电动机的 Park 模型为计及频率特性的五阶模型, 由磁链方程和转子运动方程组成<sup>[7,8]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{ds}}{dt} = -R_s i_{ds} + f\psi_{qs} + u_{ds} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -R_s i_{qs} - f\psi_{ds} + u_{qs} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + (f - \omega_r)\psi_{qr} \\ \frac{d\psi_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - (f - \omega_r)\psi_{dr} \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{\omega_b T_j} (T_e - T_m) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\psi_{ds}, \psi_{qs}$  分别为定子的直轴磁链和交轴磁链;  $\psi_{dr}, \psi_{qr}$  分别为转子的直轴磁链和交轴磁链;  $R_s, R_r$  分别为定子电阻和转子电阻;  $u_{ds}, u_{qs}$  分别为定子的直轴电压和交轴电压;  $T_j$  为惯性时间常数, 单位为 s;  $T_e, T_m$  分别为转子的电磁转矩和机械转矩;  $\omega_b$  为角速度的基准值, 单位为 rad/s;  $\omega_r$  为转子角速度。而角速度的标么值和频率的标么值是相等的,  $\omega$  由  $f$  替代, 其余为标么值。

电流方程为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $L_s, L_r, L_m$  分别为定子电感、转子电感和定子与转子间的耦合电感;  $i_{ds}, i_{qs}$  分别为定子的直轴电流和交轴电流;  $i_{dr}, i_{qr}$  分别为转子的直轴电流和交轴电流。

负荷模型中的静态部分的功率方程为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} P_s = P_{s0} \left(\frac{U}{U_0}\right)^{p_s} \left[1 + L_{fp} \frac{(f_0 - f)}{f_0}\right] \\ Q_s = Q_{s0} \left(\frac{U}{U_0}\right)^{q_s} \left[1 + L_{fq} \frac{(f_0 - f)}{f_0}\right] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $U = \sqrt{U_{ds}^2 + U_{qs}^2}$ ;  $U_0 = \sqrt{U_{d0}^2 + U_{q0}^2}$ 。  $L_{fp}, L_{fq}$  分别为与有功功率相关的频率关联系数和与无功功率相关的

频率关联系数; $p_u, q_u$ 分别为与有功功率相关的电压关联指数和与无功功率相关的电压关联指数; $P_s, Q_s$ 分别为静态负荷的有功功率和无功功率; $P_{s0}, Q_{s0}$ 分别为静态负荷的有功功率初值和无功功率初值; $U$ 为静态负荷的端电压; $U_0$ 为端电压初值。

## 1.2 电力负荷模型结构

在实际应用中,CLM等效接在系统的110 kV母线处,其基本结构如图1所示。

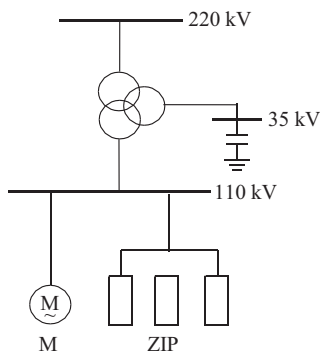


图1 CLM结构

## 2 综合负荷模型的参数辨识

### 2.1 蚁群算法

蚁群优化算法是受自然界中真实蚁群集体觅食行为的启发而发展起来的一种基于群体的模拟进化算法。该算法采用具有记忆的人工蚂蚁,通过个体之间的信息交换与相互协作来找到从蚁穴到食物源的最短路径,而且能够迅速适应环境的变化,将该方法应用到参数优化过程,则表现为系统向着最优解的方向趋近。

电力负荷模型的参数是在连续空间内分布的,文中将蚁群优化算法用于连续空间内负荷参数辨识的寻优求解,其基本步骤如下<sup>[10]</sup>:

(1) 将蚁群在解空间内按照一定的方式进行初始分布,一般采用均匀分布。

(2) 根据蚁群所处解空间位置的优劣,决定当前蚁群信息量分布。

(3) 根据当前蚁群散布的总信息量分布情况和上一循环过程中信息量的遗留和挥发情况,决定各轴各子区间内及其左右子区间应有的蚂蚁数分布。

(4) 根据各轴各子区间内及其左右子区间应有的蚂蚁数和当前实际蚂蚁数之间的差别,按照一定规则决定该子区间内蚂蚁的移动方向,并加以移动。

蚁群作完一次整体移动后,可回到第二步,进行相应的初始化,计算信息量分布,决定新的移动操作,如此循环,最终使解空间趋向一个很小的定义域,取各参数轴定义域中点组成的多维空间点为参数的最优解。

### 2.2 综合负荷参数的辨识策略

基于感应电动机 Park 模型的综合负荷模型中参

数有16个待确定的参数,其中独立参数有14个。文献[11]采用辨识重点参数的策略,确立了重点辨识参数为: $P_{mp}, L_s, K_L, L_{fp}, L_{fq}$ 。其中 $P_{mp}$ 为CLM中的感应电机比例, $K_L$ 为感应电机的初始负载率。

## 3 数据长度对负荷模型参数辨识的影响

### 3.1 仿真系统和负荷参数设定

为了得到负荷模型参数辨识用的三相电压和功率等数据,在 Matlab/Simulink 中搭建系统,即由同步发电机组和风力发电机组组成供电端,中间由双回线路来连接,综合负荷接在母线处。系统结构如图2所示。

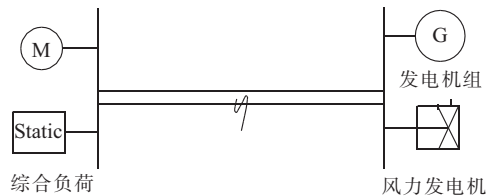


图2 仿真系统示意图

通过设置静态负荷参数,感应电动机参数以及不同的故障扰动,测量得到该单机无穷大系统下的负荷侧的三相瞬时电压、三相瞬时电流和功率等数据<sup>[12]</sup>。

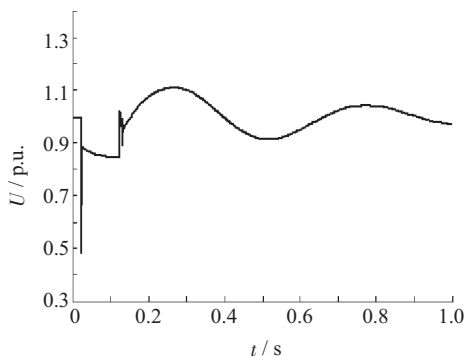
表1 综合负荷模型参数设定

参数	设定值	参数	设定值	参数	设定值
$p_u$	2.0	$R_r / \text{p.u.}$	0.02	$A$	0.85
$q_u$	2.0	$L_r / \text{p.u.}$	0.18	$C$	0.15
$R_s / \text{p.u.}$	0.005	$L_m / \text{p.u.}$	3.5	$T_f$	2.0

注: $A, C$ 为转矩系数,文中取为常数。

### 3.2 不同时间长度的采样数据对参数辨识的影响

为了对比不同时间长度的数据对负荷模型参数的影响,采取以下仿真策略。在0.02 s时,一回线路中间处发生三相短路故障,故障持续时间为0.1 s,仿真时间步长选为0.001 s,通过仿真得到1 s数据,3 s数据和5 s数据。且它们的数据点数分别为1001点,3001点,5001点。图3给出了1 s数据的电压和频率变化曲线,以准确模型仿真得到的结果作为“实测值”,据此进行参数辨识。采用蚁群优化算法,进行参数辨识研究,结果如表2所示。



(a) 电压曲线

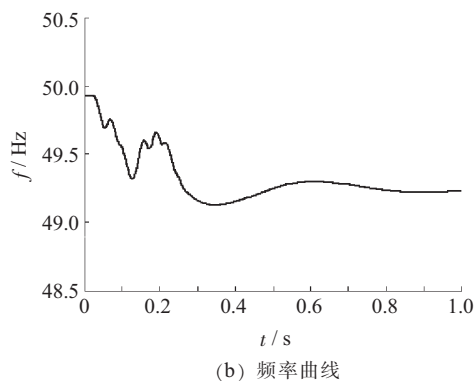


图3 电压和频率曲线

表2 不同时间长度参数辨识结果和平均偏差

负荷参数	$P_{np}$	$L_s$	$K_L$	$L_p$	$L_{q1}$	参数的平均偏差
真值	0.743 5	0.180 0	0.746 8	-0.400 0	0.600 0	—
1 s 数据	0.719 4	0.182 5	0.824 4	-0.441 3	0.647 6	5.01%
3 s 数据	0.717 0	0.185 9	0.789 3	-0.427 6	0.574 9	4.18%
5 s 数据	0.716 0	0.185 9	0.789 2	-0.429 1	0.575 5	4.22%

表格中参数的平均偏差计算公式为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^m \left| \frac{\theta_i - \theta_{i0}}{\theta_{i0}} \right|}{m} \quad (4)$$

式中: $m$ 为待辨识参数的个数; $\theta_i$ 为第 $i$ 个参数的辨识得到的结果; $\theta_{i0}$ 为第 $i$ 个参数的真值(即设定值)。

从表2可见:采用不同时间长度的数据(比如1s,3s和5s)对该CLM参数的辨识结果是相近的,符合实际应用要求。从参数辨识误差的角度来看,采样数据的长度(比如1s,3s和5s)对辨识结果影响不大,误差大小是接近的。

### 3.3 相同步长的采样数据对曲线拟合的影响

如上节所述,在采用相同步长的仿真中,分别获得了1s,3s,5s数据。采用蚁群优化算法,得到了负荷模型参数的辨识结果,同时也得到了节点有功功率和无功功率的拟合曲线,如图4—6所示。

平均误差 $J$ 的计算公式:

$$J = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_{mk} - y_{sk})^2}{N}} \quad (5)$$

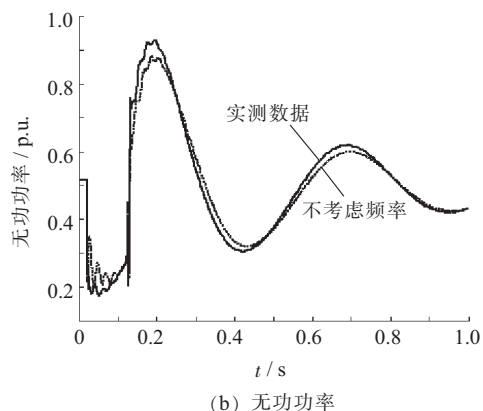
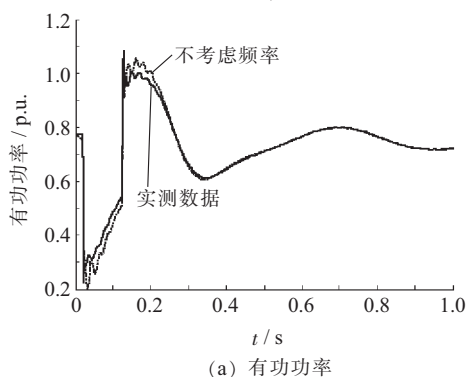


图4 1s采样数据下的拟合曲线

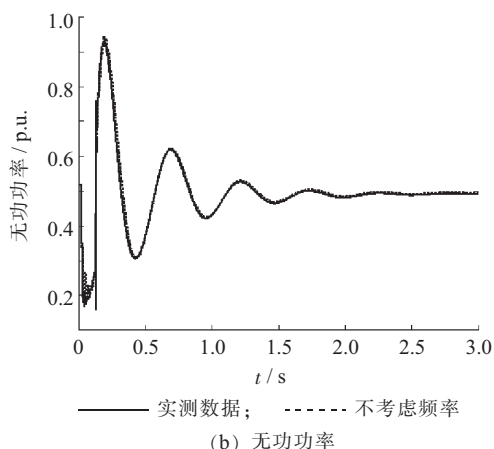
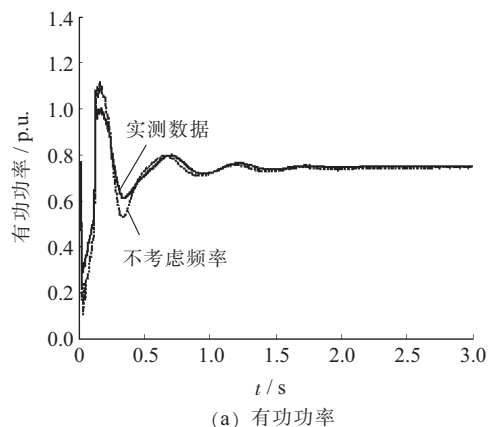
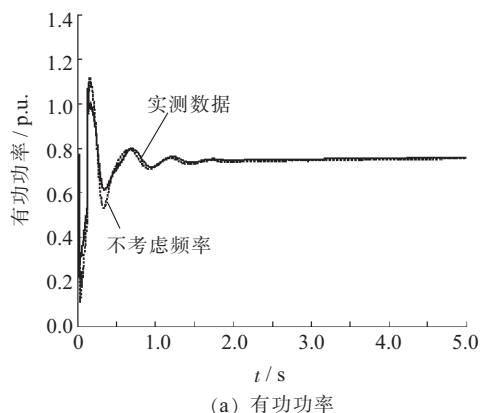


图5 3s采样数据下的拟合曲线



式中: $N$ 为数据点数; $y_{mk}$ , $y_{sk}$ 分别为实测量和拟合量。由于采样数据长度不同,分别计算3种情况下前1s数

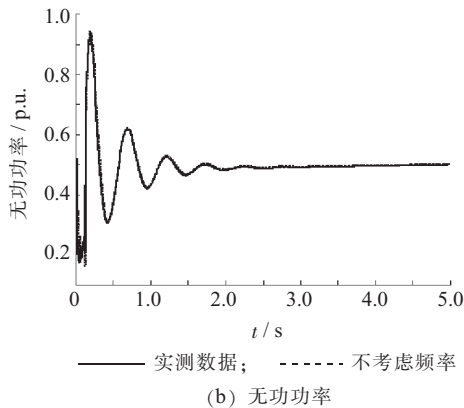


图6 5 s采样数据下的拟合曲线

据的拟合误差,然后进行比较,结果如表3所示。

表3 不同时间长度曲线拟合的平均偏差

时间长度 /s	有功功率拟合误差	无功功率拟合误差
1	0.022 9	0.030 3
3	0.025 0	0.032 4
5	0.024 3	0.033 7

可见,考虑频率特性的CLM的曲线拟合效果满足实际运行要求,可以模拟负荷的动态变化过程。1 s, 3 s, 5 s数据下曲线拟合效果相差不大,说明采样数据的长度对负荷模型参数辨识的影响是不大的。

#### 4 结束语

以计及负荷频率特性的感应电动机的详细五阶Park负荷模型为研究对象,通过系统仿真得到不同时间长度的采样数据,通过负荷参数的辨识结果和曲线拟合的效果,综合分析得到不同时间长度的采样数据对参数辨识结果的影响以及相同步长的采样数据对曲线拟合的影响。综合所述的采样数据对负荷模型参数辨识的影响,笔者建议在实际运用CLM进行仿真分析时,根据电力系统采样单元的实际情况,选择合适的

采样步长,兼顾数据存储容量,选择合适的采样数据长度即可。

#### 参考文献:

- [1] 胡浩,马进. 负荷模型对电力系统动态分析的影响浅析[J]. 华东电力, 2013, 41(10): 2080-2083.
- [2] 颜庆国,薛溟枫,范洁,等. 有序用电用户负荷特性分析方法研究[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(6): 48-51.
- [3] CHOIB K, CHANG HD, LI H, et al. Measurement-based Dynamic Load Models: Derivation, Comparison and Validation [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2006, 21(3): 1276-1283.
- [4] 吴奕,万真理,张玉林,等. 配电网潮流计算方法在工程应用中的分析[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(4): 10-13.
- [5] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等. 考虑配电网的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
- [6] 孙冉,刘利国,黄桦,等. 考虑电压相位的实用负荷模型参数辨识[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(2): 10-15.
- [7] 梁伟,鞠平,余一平. 考虑频率特性的感应电动机负荷模型的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 132-137.
- [8] 贺仁睦,叶静,徐欢,等. 计及频率特性的实测负荷建模[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 165-170.
- [9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002: 28.
- [10] 汪镭,吴启迪. 蚁群算法在系统辨识中的应用[J]. 自动化学报, 2003, 29(1): 102-109.
- [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: 35.
- [12] 徐伟华,艾芊,陈陈,等. 基于非对称扰动的负荷建模新方法及其工程应用[J]. 电力系统及其自动化, 2009, 33(13): 27-31.

#### 作者简介:

徐强(1962),男,浙江慈溪人,高级工程师,从事电力生产及管理工作;

梁伟(1988),男,河南驻马店人,硕士,从事电力系统分析、输电线路复合外绝缘技术研究等工作。

## Effects of Sampling Data on Parameter Identification of Composite Load Model

XU Qiang<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>2</sup>

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In the real practice applications, classical composite load model (CLM) is widely used and developed in the power grid. In this paper, CLM considering frequency characteristics was interested in. With instantaneous sampling data of alternating current voltage and current, the CLM's parameters were identified by load parameter identification strategy based on measurement-based method ant colony algorithm with stronger capability of global optimization. Through simulation and calculation, the impact of sampling data with different length of time on parameter identification results of load model was comparatively analyzed. The impact of sampling data with the same time length on the curve fitting results of load model was also analyzed.

**Key words:** composite load model; ant colony algorithm; parameter identification; instantaneous alternating current data; length of time