

Load Model Parameter Identification Based on PMU Data in Xinjiang Power Grid

Zhiqiang Zhao, Zhongping Yu, Guokang Yu, Taiping Guo

Institute of Economic and Technological Research, State Grid Xinjiang Electric Power Co. Ltd., Urumqi Xinjiang
Email: 879974517@qq.com

Received: Nov. 27th, 2019; accepted: Dec. 12th, 2019; published: Dec. 19th, 2019

Abstract

According to the characteristics of load in Xinjiang, the integrated load model of the third-order induction motor by static load is determined, and then the parameters of the comprehensive load model are identified by the overall measurement method based on the PMU data in Xinjiang. The active and reactive power of the load node and the typical value of some parameters are replaced into the model; the model output and the actual system response error is the target function, and the parameters of the load model are identified by genetic algorithm. Two aspects of the feasibility of applying PMU data to load modeling are analyzed: first, PMU data needs to extract the mutation quantity to obtain the data to meet the identification requirements, and second, the sampling frequency of PMU data is at least greater than 100 Hz, and the original data needs to be interpolated. Taking the 220 kV Miqan substation and Taiyuan substation of Xinjiang power grid as an example, the parameters of the comprehensive load model are obtained based on PMU data identification, and the validity of parameter identification and load modeling are verified by comparing the actual response of the system.

Keywords

PMU, Parameter Identification, Load Modeling

新疆电网基于PMU数据的负荷模型参数辨识

赵志强, 余中平, 于国康, 郭太平

国家电网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐

Email: 879974517@qq.com

收稿日期: 2019年11月27日; 录用日期: 2019年12月12日; 发布日期: 2019年12月19日

摘要

根据新疆地区负荷特点, 首先确定了由静态负荷并联三阶感应电动机的综合负荷模型, 然后以新疆地区PMU数据为基础, 利用总体测辨法对综合负荷模型的参数进行辨识。将负荷节点的有功功率和无功功率

以及部分参数的典型值代入模型,以模型输出与实际系统响应误差最小为目标函数,采用遗传算法辨识出负荷模型的参数。针对PMU数据应用于负荷建模的可行性做了两方面分析:一是PMU数据需要对突变量进行提取以获得满足辨识要求的数据;二是PMU数据的采样频率至少大于100 Hz,需要对原始数据进行插值处理。以新疆电网220 kV米泉变电站和台远变电站为例,基于PMU数据辨识得到综合负荷模型的参数,通过与系统实际响应的对比,验证了参数辨识及负荷建模的有效性。

关键词

PMU, 参数辨识, 负荷建模

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

研究表明,负荷特性对电力系统分析计算结果有重要影响,其主要表现在负荷模型对电力系统的潮流计算、暂态稳定、电压稳定和小信号动态稳定等方面,一个粗糙的负荷模型会影响电力系统仿真计算结果的可信度,因此,必须根据地区电网的特点和需求建立合适的负荷模型[1]。

新疆电网各地区典型负荷有着明显的区域性,其中,北疆地区以居民用电负荷、城市用电负荷和工业负荷为主,而南疆地区以农业负荷为主,显然,新疆电网整体采用统一参数的负荷模型不能准确反映实际系统的变化。同时,由于冬季电采暖供暖方式的不断推广导致负荷特性进一步改变,因此本文针对新疆电网负荷模型参数辨识的研究更加具有实际意义。

当前,负荷模型参数辨识的方法大致可以分为两类:综合负荷类型、负荷占比以及各类负荷参数进行的统计综合法,和基于负荷侧录波数据进行的总体测辨法。文献[2]从负荷建模原理出发,结合具体的建模实践,提出了一套较为完善的统计综合法负荷建模的基本思路,并得出了不同行业的静负荷参数,对之后负荷建模的实践有着重要的指导意义,但作者并未在实际应用中做出更加深入的探索。文献[3]相比于文献[2]而言,完成了负荷建模平台在实际项目中的搭建,但采用统计综合法进行负荷建模需要的统计数据量过于庞大,涉及多部门工作的协调,因此也无法应用于新疆问题的解决。在总体测辨法领域,文献[4]基于故障录波数据进行的负荷建模实践,由于电力系统的日常运行过程中故障的发生是小概率事件,缺乏对负荷建模需求的足够的支撑,同时,发生故障的线路和站点不一定是待辨识的典型变电站,不具有代表性的结果也会使得辨识结果失去意义。

综上,本文基于PMU数据和总体测辨法对新疆电网进行了参数辨识与负荷建模实践,利用PMU(相量测量装置)数据得到系统发生扰动时负荷所在母线的电压幅值、有功功率和无功功率的暂态变化,经遗传算法(GA)优化辨识后得到满足自适应度函数的参数值,并将辨识结果代入时变自适应负荷模型(TVA模型)中,最终确定新疆电网不同典型区域对应的负荷模型。上述方法既结合了总体测辨法简单、实用的优点,又在PMU数据的提取与处理方面做出了创新。

2. 新疆地区负荷模型

2.1. 新疆电网负荷模型结构

新疆电网参数辨识采用的综合负荷模型由动态部分的三阶感应电动机模型并联静态部分的ZIP模型构成,综合负荷模型的示意图如图1所示[5]。

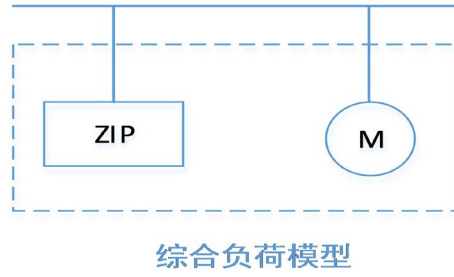


Figure 1. Comprehensive compliance model schematic
图 1. 综合符合模型示意图

图 1 所示三阶感应电动机模型采用典型的机电暂态模型，其状态方程如下[1]:

$$\begin{aligned} \frac{dE'_x}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_x + (X - X')I_y] + sE'_y \\ \frac{dE'_y}{dt} &= -\frac{1}{T'} [E'_y - (X - X')I_x] - sE'_x \\ \frac{ds}{dt} &= \frac{1}{T_j} (T_M - T_E) \\ I_x &= \frac{R_s(U_x - E'_x) + X'(U_y - E'_y)}{R_s^2 + X'^2} \\ I_y &= \frac{R_s(U_y - E'_y) + X'(U_x - E'_x)}{R_s^2 + X'^2} \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} X &= X_s + X_m \\ X' &= X_s + \frac{X_m X_s}{X_m + X_s} \\ T' &= \frac{X_m + X_r}{R_r} \\ T_m &= T_0 [A(1-s)^2 + B(1-s) + C] \\ T_e &= E'_x I_x + E'_y I_y \\ s &= 1 - \omega_r \end{aligned}$$

综合负荷模型共有 14 个独立参数待辨识，这些参数都是归算至感应电动机容量下的标么值，其中三阶感应电动机模型中包含 8 个参数 $[R_s, X_s, X_m, R_r, X_r, T_j, A, B]^T$ ， R_s 、 X_s 分别为感应电动机的定子电阻和定子电抗， X_m 为感应电动机的激磁电抗， R_r 、 X_r 分别为感应电动机的转子电阻和转子电抗， T_j 为惯性常数， A 、 B 、 C 皆为转矩系数[6]。

综合负荷模型的静态部分采用 ZIP 模型，表达式如下[1]:

$$\begin{aligned} P &= P_0'' \times \left[k_{PZ} \times \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + k_{PI} \times \left(\frac{U}{U_0} \right) + k_{PP} \right] \\ Q &= Q_0'' \times \left[k_{QZ} \times \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + k_{QI} \times \left(\frac{U}{U_0} \right) + k_{QP} \right] \end{aligned}$$

上述公式中, P_0'' 和 Q_0'' 分别为静态负荷对应的初始有功功率和初始无功功率, k_{PZ} 、 k_{PI} 、 k_{PP} 为静态负荷有功功率的比例系数, k_{QZ} 、 k_{QI} 、 k_{QP} 为静态负荷无功功率的比例系数, k_{PZ} 、 k_{PP} 、 k_{QZ} 、 k_{QP} 作为综合负荷模型 ZIP 部分的 4 个独立参数, 且静态负荷有功功率的比例系数之和以及无功功率的比例系数之和皆为 1。除上述的 12 个独立参数外, 还定义了两个新的参数 K_{pm} 和 M_{lf} , 其中 K_{pm} 用于求解感应电动机的初始有功功率, M_{lf} 为额定初始负荷率系数。

2.2. 负荷模型参数取值区间的确定

基于 IEEE 提供的典型感应电动机负荷参数, 以及文献[1]、文献[7]、文献[8]中负荷建模参数辨识的经验, 综合考虑西北电网的特殊性, 最终确定新疆电网负荷模型参数辨识取值区间, 如表 1 所示:

Table 1. Value areas of load model parameters

表 1. 负荷模型参数取值区间

| 取值区间 | R_s | X_s | X_m | R_r | X_r | A | B |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 最大值 | 0.35 | 0.50 | 3.80 | 0.08 | 0.18 | 1.00 | 1.00 |
| 最小值 | 0.10 | 0.10 | 2.00 | 0.01 | 0.07 | 0.20 | 0.00 |
| 取值区间 | H | M_{lf} | K_{pm} | k_{PZ} | k_{PP} | k_{QZ} | k_{QP} |
| 最大值 | 1.50 | 0.85 | 0.95 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 4.00 |
| 最小值 | 0.50 | 0.10 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |

3. 负荷模型的参数辨识研究

3.1. 参数辨识流程

本次针对新疆地区负荷观测数据特点选择采用总体测辨法进行负荷建模研究, 根据负荷站点的实测数据来确定负荷模型的各项参数, 通过遗传算法(Genetic Algorithm)辨识得到能够使仿真系统的响应与实际系统响应曲线充分拟合的最优辨识参数, 从而达到准确反映实际系统各类特性的目的。

参数辨识流程如图 2 所示。

3.2. 新疆电网 PMU 数据的提取和处理

故障录波数据记录的原始波形的快速暂态数据量太大, 不可能全天候保存, 只能记录故障前后几秒的原始数据, 对于电网中许多种故障类型都不足以进行分析。而同步相量测量单元(PMU)基于全球定位系统和实时通讯网络构成, 可以将网络中各部分的动态数据实时上传至控制中心, 保证了对电力系统的同步观测[5]。

PMU 数据处理的关键步骤即突变提取环节影响着辨识的最终结果, 在 PMU 数据文件记录的扰动前后的相关数据中, 我们只需要提取发生扰动后的几秒内的数据作为辨识的依据, 因此需要根据实际情况指定一个判定扰动的标准以提取满足要求的暂态数据。

PMU 数据对参数辨识可行性影响最大的方面即数据的采样频率, 因此采用 6 组典型采样频率对数据进行处理, 并对 6 组样本输出的有功功率和无功功率的响应曲线进行了对比和分析, 响应曲线如图 3 和图 4 所示:

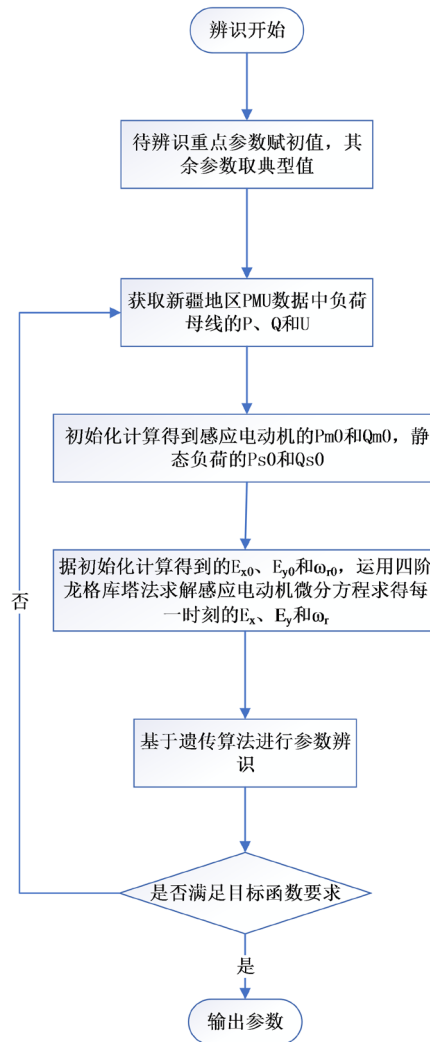


Figure 2. Parameter identification flowchart
图 2. 参数辨识流程图

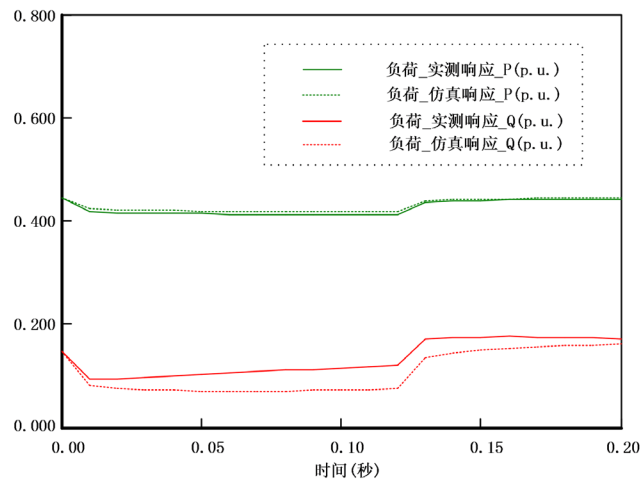


Figure 3. Response curve at 50 Hz sampling frequency
图 3. 50 Hz 采样频率下的响应曲线

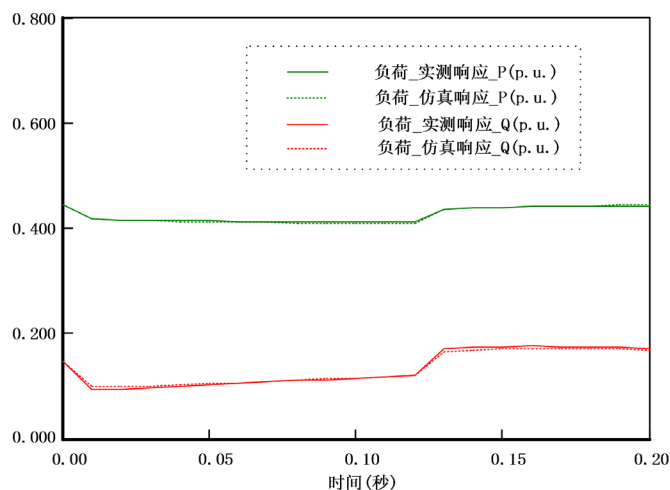


Figure 4. Response curve at 200 Hz sampling frequency

图 4. 200 Hz 采样频率下的响应曲线

经过多次辨识研究和比较, 本文发现, 采样频率为 50 Hz 时得到的系统响应不满足参数辨识下的基本要求, 而 50~100 Hz 下的采样频率所得到的结果表明虽然可以完成基本的参数辨识工作, 但误差较大, 而当采样频率为 200 Hz 时, 最终的系统响应满足工程需要, 参数辨识的结果较为合理[5]。

针对各种采样频率下 PMU 数据对负荷建模参数辨识效果的影响, 本文认为 PMU 数据处理后想要达到参数辨识的要求, 需要满足以下两个基本条件:

- 1) PMU 数据的采样频率要大于 100 Hz, 但同样不能过高, 采样频率过大会导致参数辨识过程中送入仿真系统中的数据量庞大, 可能会影响计算速度和最终结果;
- 2) PMU 数据采集点所在负荷母线的电压等级应为 220 kV 及以下, 且负荷侧没有分布式电源的接入。

新疆电网 PMU 装置装设在 220 kV 变电站处, 其未经处理的 PMU 数据的采样频率通常为 50 Hz, 无法直接用于负荷建模, 需要对原有 PMU 数据进行插值处理, 插值方法有线性插值、拉格朗日插值、抛物线插值等, 本文采用拉格朗日插值方法对 PMU 数据进行处理。

4. 负荷模型参数辨识及其有效性分析

本次针对新疆地区的负荷建模工作中, 综合负荷模型的输入量为电压 U , 输出量为有功功率 P 和无功功率 Q , 模型结构及辨识算法明确后, 便可根据实际需要和实现难度确定目标函数, 本文目标函数采用最小二乘准则, 使所得到的数学模型响应与实际系统响应误差的平方和最小, 定义如下:

$$J = \sum_{k=1}^n \left[(P(k) - P_m(k))^2 + (Q(k) - Q_m(k))^2 \right]$$

其中, n 为工频周期内采集的数据点数, $P(k)$ 、 $Q(k)$ 为实际系统输出的有功功率和无功功率, $P_m(k)$ 、 $Q_m(k)$ 为综合负荷模型根据实测电压数据输出的有功功率和无功功率。此种目标函数可以避免正负误差相抵, 而且便于数学处理, 因而在辨识研究领域应用广泛。

本文选取米泉变和台远变不同时间的 PMU 数据, 送入仿真系统中得到的参数辨识结果如表 2 所示, 利用该组参数建立的负荷模型输出的有功功率响应和无功功率响应与 PSASP 仿真系统输出响应的拟合曲线如图 5 所示, 通过计算得到的有功功率和无功功率的残差平方和分别为 1.0154 和 0.0174, 满足检验指标的要求。因此, 本文提出的 PMU 数据经插值处理后应用于新疆电网负荷建模的方法行之有效, 且辨识结果良好, 较好地反映了实际系统的负荷特性。

Table 2. Load model parameters based on PMU data identification
表 2. 根据 PMU 数据辨识所得的负荷模型参数

| R_s | X_s | X_m | R_r | X_r | A | B |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0.186 | 3.5 | 0.2 | 0.2 | 0.85 | 0 |
| H | M_{if} | K_{pm} | k_{pz} | k_{pp} | k_{qz} | k_{qp} |
| 1 | 0.174 | 0.617 | 0.75 | 0.16 | 0.1 | 2.8 |

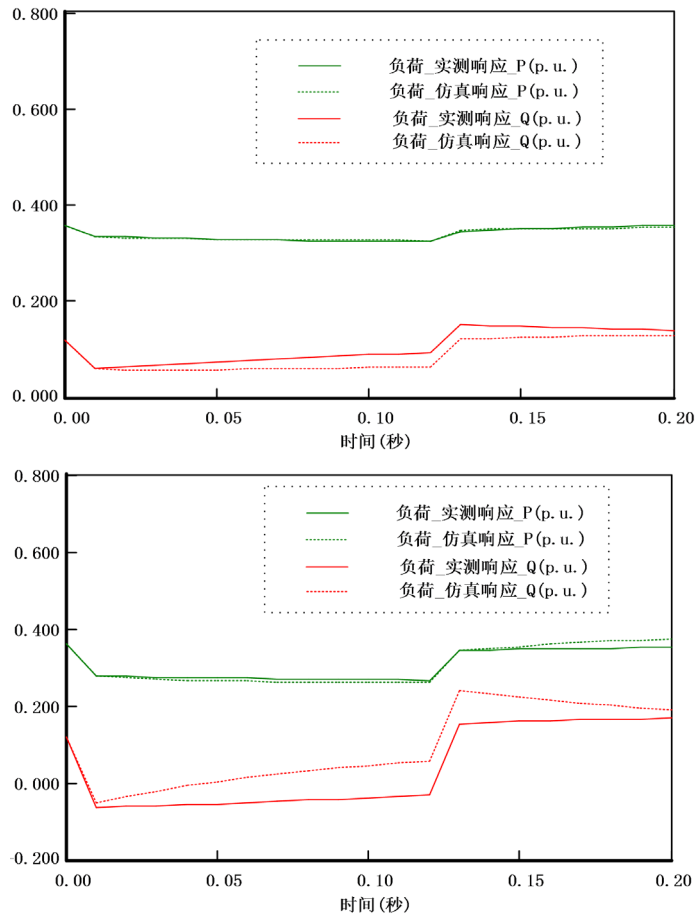


Figure 5. Comparison of active and reactive curve
图 5. 有功、无功拟合曲线对比

5. 结论

本文以连续动态负荷模型并联静态负荷模型为基本结构，建立了考虑新疆电网特点的综合负荷模型，并对 PMU 数据进行了突变提取操作以及插值处理，使之满足参数辨识的需要。

基于 PMU 数据并采用总体测辨法对综合负荷模型进行参数辨识，最终辨识得到三个关键参数的取值，既不影响辨识的最终结果，又能减少计算时间。以模型输出与实际系统响应误差最小为目标函数，利用遗传算法对辨识程序进行编程，根据新疆电网米泉变和台远变的实测 PMU 数据，辨识出满足目标函数要求的模型参数，并利用仿真软件对实测负荷模型响应和系统响应进行对比，验证辨识算法及所建负荷模型的有效性。

目前, 本文采用传统遗传算法对负荷模型参数进行辨识, 还存在着易早熟、收敛速度慢和收敛精度差等缺点, 对最终的辨识结果有一定的影响。在接下来的工作中将对遗传算法进行改进, 提升辨识效率, 改善辨识结果的精度, 更好地适用于负荷模型的参数的辨识。

参考文献

- [1] 汤涌. 电力负荷的数学模型与建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-3.
- [2] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 1-7.
- [3] 吴丽华, 姚国灿, 等. 西北电网负荷模型参数辨识[J]. 中国电力, 2007, 40(3): 32-35.
- [4] 黄文英, 方朝雄, 等. 福建电网负荷在线综合建模系统[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 37-41.
- [5] 李颖, 贺仁睦, 等. 广东电网基于 PMU 的负荷模型参数辨识研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(1): 16-19.
- [6] Karrari, M. and Malik, O.P. (2004) Identification of Physical Parameters of a Synchronous Generator from Online Measurements. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **19**, 407-415. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.822296>
- [7] 马亚辉, 李欣然, 等. PMU 数据处理及其在综合负荷建模中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 6-11.
- [8] Pourbeik, P., Wang, D. and Hoang, K. (2005) Load Modeling in Voltage Stability Studies. 2005 *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco.