

负荷建模中实测数据选取研究

唐永红¹, 郑晓雨², 马进²

(1. 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072;
2. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 为确定用怎样的数据建立起的模型具有较强的泛化能力, 对负荷建模中实测数据的选取进行了研究, 对不同电压扰动强度的数据进行了辨识, 对得到的参数进行了轨迹灵敏度分析, 在分析灵敏度结果的基础上提出扰动强度大的数据辨识出的模型的泛化能力较强的观点, 并通过小扰动条件下感应电动机的静态特征系数对此结论进行了解释, 进一步总结了不同扰动强度数据的大致适用范围, 为实测建模中数据的选取提供了借鉴。

关键词: 负荷建模; 实测数据选取; 参数辨识; 轨迹灵敏度分析; 模型泛化; 静态特性系数

Selection of the field data selection in measurement-based load modeling

TANG Yong-hong¹, ZHENG Xiao-yu², MA Jin²

(1. Sichuan Electric Power Test & Research Institutes, Chengdu 610072, China; 2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to know what kind of data can be utilized to derive the model parameters with strong generalization capabilities, the research on field data selection in load modeling is carried out. The model parameters are first derived by identifying the data with different voltage disturbances, then, the trajectory sensitivity analysis is utilized. After the investigation of the parameter sensitivity, it is proposed that the models built from the data with larger disturbances have better generalization capabilities. This viewpoint is also supported by the static characteristic coefficients analysis of induction motor under small disturbances. Finally, the application of the data with different disturbances is summarized which provides the guidance for the data selection in load modeling practice.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50707009 and No. 50595410).

Key words: load modeling; field data selection; parameter identification; trajectory sensitivity analysis; model generalization; static characteristic coefficient

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0043-05

0 引言

负荷模型对电力系统仿真的结果有着重要的影响^[1-4], 在负荷建模当中实测负荷建模法^[5-10]由于自身的优点而被广泛采用, 这种方法的研究对象是实测数据, 以前由于人们对负荷的认识程度不高和技术装备落后的原因, 可用于负荷建模的数据非常有限, 每条数据都非常宝贵, 因此, 所有的数据都会应用到负荷建模当中, 而对数据的有效性则很少关心, 但是近来随着人们对负荷的重视以及负荷记录

装置的增加, 积累的可用于负荷建模的数据也越来越多, 但扰动有大有小, 数据的电压扰动往往从1%到80%甚至更大, 面对大量的数据, 是否有必要用所有的数据来建立负荷模型, 因为小的扰动数据是很容易获得所以是否可以用很小的扰动数据进行建模, 所建立的负荷模型的泛化能力究竟怎么样, 如果不好究竟是什么原因造成的, 多大扰动的数据适合用来建立负荷模型, 对于这些问题目前没有深入地研究。本文首先用不同扰动数据来证实由小扰动数据得出的参数的泛化能力明显弱于由大扰动数据辨识出的参数, 然后从感应电动机参数对负荷吸收功率的轨迹灵敏度和感应电动机静态特性两个方面来对以上结果进行解释, 最终给出了适合本模型的数据适用范围。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50707009和50595410); 教育部博士学位青年教师基金(20070079014); 北京市科技新星计划; 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2004CB217901); “111”引智计划(B08013)

1 负荷模型

近年来, 感应电动机并联 ZIP 结构的负荷模型得到了广泛的应用, 本文中所用到的负荷模型为 TVA 负荷模型^[5-8], 其基本结构如图 1。

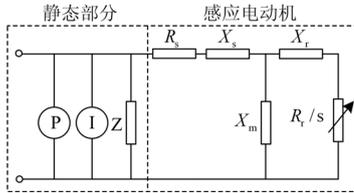


图 1 TVA 负荷模型结构

Fig.1 TVA load model structure

TVA 负荷模型结构中的动态部分为三阶感应电动机, 其动态特性可以由以下微分代数方程描述:

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_d + (X - X')I_q] - (\omega - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'} [E'_q - (X - X')I_d] + (\omega - 1)E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H} [(A\omega^2 + B\omega + C)T_0 - (E'_d I_d + E'_q I_q)] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_d = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)] \\ I_q = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(U_q - E'_q) - X'(U_d - E'_d)] \end{cases} \quad (2)$$

其中: $T' = \frac{X_r + X_m}{R_r}$, $X = X_s + X_m$
 $X' = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$, $A + B + C = 1$

式中: R_s 、 X_s 、 R_r 、 X_r 、 X_m 分别是等值电动机的定子电阻、定子漏抗、转子电阻、转子漏抗和电动机激磁电抗。 H 为转子惯性时间常数, ω 为转子转速。文献[6-8]就此模型有关变量的定义和模型特性进行了详细说明。本文将以此(1)和式(2)为基础, 研究感应电动机参数对吸收功率的轨迹灵敏度。

2 轨迹灵敏度

轨迹灵敏度^[11-14]法可以计算参数对负荷动态响应的灵敏度, 与静态灵敏度只计算某一给定稳态点的灵敏度不同, 轨迹灵敏度可以计算沿系统运行轨迹的灵敏度, 轨迹灵敏度方法在电力系统动态安全分析中得到广泛应用。文献[6]将轨迹灵敏度的方法用于参数的简化当中。本文以负荷模型 (1) - (2) 式中感应电动机参数为例求取它对负荷功率的动态灵敏度。因为负荷特性的一般表达式可写成:

$$\begin{cases} \dot{x}(t, p_0) = f(x(t, p_0), y, p_0) \\ 0 = g(x(t, p_0), y, p_0) \end{cases} \quad (3)$$

或者
$$\begin{cases} \dot{x}(t, p_0) = F(p_0) \\ 0 = G(p_0) \end{cases} \quad (4)$$

其中: x 为状态向量, 本文中 $x = [\omega, E'_q, E'_d]^T$; y 为代数向量, 本文中为 $y = [I_d, I_q]^T$; p_0 代表参数, 这里指感应电动机的参数, 假定在参数 p_0 处有一小扰动 ε , 扰动后的参数为 p , $p = p_0 + \varepsilon$

定义:
$$\begin{cases} v(p) = v(p_0 + \varepsilon) = \dot{x}(t, p) \\ F(p) = F(p_0 + \varepsilon) = f(x(t, p), y, p) \\ G(p) = G(p_0 + \varepsilon) = g(x(t, p), y, p) \end{cases} \quad (5)$$

式 (3) 可以写成
$$\begin{cases} v(p_0 + \varepsilon) = F(p_0 + \varepsilon) \\ 0 = G(p_0 + \varepsilon) \end{cases} \quad (6)$$

将式 (6) 在 p_0 处泰勒级数展开并忽略二次项得:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial v}{\partial p} \right|_{p=p_0} = \left. \frac{\partial F}{\partial p} \right|_{p=p_0} \\ 0 = \left. \frac{\partial G}{\partial p} \right|_{p=p_0} \end{cases} \quad (7)$$

因为
$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial p} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial p} + \frac{\partial f}{\partial p} \\ \frac{\partial v}{\partial p} = \frac{\partial \dot{x}(t, p)}{\partial p} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial x(t, p)}{\partial p} \right) \\ \frac{\partial G}{\partial p} = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial p} + \frac{\partial g}{\partial p} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式 (7) 得到参数 p 对动态响应的轨迹灵敏度, 令 $S = \frac{\partial x(t, p)}{\partial p}$, 则轨迹灵敏度的迭代公式为:

$$\begin{cases} \dot{S} = \frac{\partial f}{\partial x} S + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial p} + \frac{\partial f}{\partial p} \\ 0 = \frac{\partial g}{\partial x} S + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial p} + \frac{\partial g}{\partial p} \end{cases} \quad (9)$$

因为稳态时 S 为常数, 所以 S 和 $\partial y / \partial p$ 的初始值可以由下面公式得到:

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial f}{\partial x} S + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial p} + \frac{\partial f}{\partial p} \\ 0 = \frac{\partial g}{\partial x} S + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial p} + \frac{\partial g}{\partial p} \end{cases} \quad (10)$$

通过式 (9) 和 (10) 就可以迭代求解参数对动态响应的轨迹灵敏度。

3 负荷数据采用策略研究

当系统中发生故障或者扰动且达到一定条件时, 负荷测点的记录装置就会启动, 记录下可以用来建模的数据, 由于系统中的扰动有大有小, 且离负荷记录点有近有远, 所以记录下的电压扰动有大有小, 而且随着记录时间的增长, 记录的数据也越来越多, 究竟用怎样的数据建立负荷模型就成了人们关心的问题, 因为系统中经常有小的扰动比如电容的投切、变压器分接头切换等, 小电压扰动数据很容易获得, 所以人们总是希望用尽量小的扰动数据进行建模, 用此模型来描述大电压扰动的情况, 这也叫做模型的泛化能力, 但是小的扰动数据是否适合用来建立模型呢, 实际表明电压扰动小的数据辨识出的模型的泛化能力较差, 另一方面从参数轨迹灵敏度上看, 由小扰动数据辨识出来的参数的轨迹灵敏度比从大扰动数据辨识出来的参数的轨迹灵敏度小很多, 比如图 2~5 分别是电压扰动为 1.1%、5.1%、9.9% 和 17% 的数据的轨迹灵敏曲线。

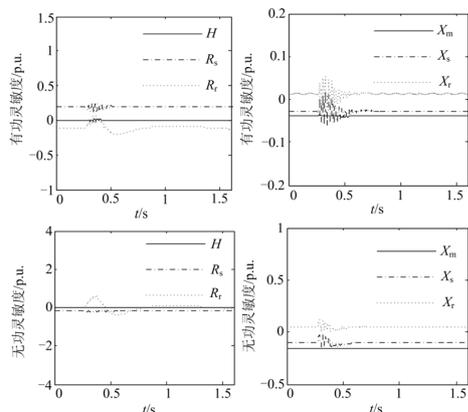


图 2 扰动 1.1% 数据的轨迹灵敏度

Fig.2 Trajectory sensitivity of the data with 1.1% disturbance

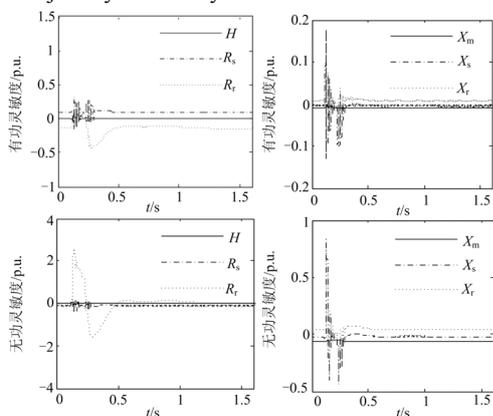


图 3 扰动 5.1% 数据的轨迹灵敏度

Fig.3 Trajectory sensitivity of the data with 5.1% disturbance

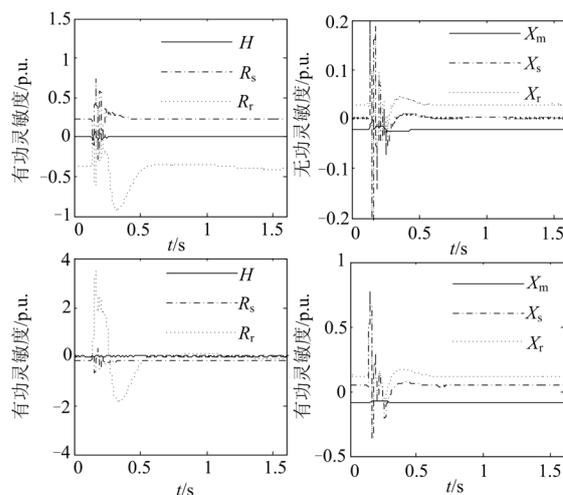


图 4 扰动 9.9% 数据的轨迹灵敏度

Fig.4 Trajectory sensitivity of the data with 9.9% disturbance

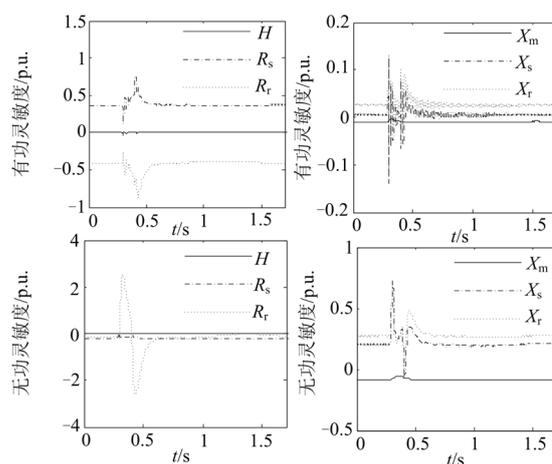


图 5 扰动 17% 数据的轨迹灵敏度

Fig.5 Trajectory sensitivity of the data with 17% disturbance

从上图可以看出, 当电压扰动非常小如 1.1% 时, 参数的灵敏度非常小, 而当扰动大于 5% 后, 参数的灵敏度就很大, 而且数值上差不多, 这说明当数据扰动大于 5% 时, 数据是容易辨识的。另外作为负荷当中最重要的动态元件感应电动机, 在小扰动的时候可以线性化为静态模型, 在稳态条件下感应电动机的功率为:

$$P = \frac{U^2}{X_1} \frac{1}{s/s_{cr} + s_{cr}/s} \quad (11)$$

$$Q = \frac{U^2}{X_1} \frac{X_1/X_\mu + (s/s_{cr})^2 [1 + (X_1/X_\mu)]}{1 + (s/s_{cr})^2} \quad (12)$$

其静态特征系数为:

$$p_u = 2[1 - \xi(s_{cr}^2 - s^2)], q_u = 2[1 - 2\cot\phi_{cr}s\zeta]$$

其中参数的具体含义见参考文献[15], 除此之

外文献 [15-17]还列出了风扇、泵等含感应电动机的器件的静态特性系数。例如工业电动机的有功和无功静态特征系数分别为 0.07 和 2.5。由此可看出感应电动机元件在小扰动情况下可以线性化为静态模型，比如某负荷中感应电动机含量为 40%，当用静态模型来描述电压扰动强度为 1.1%的数据时误差为 0.006 177，用感应电动机+ZIP 进行拟合时误差为 0.007 418，也就是说含有大量感应电动机的负荷在小扰动下它的感应电动机特性是非常不明显的（可以用静态模型来描述），不能体现感应电动机的动态；而当电压扰动增大时，感应电动机的动态特性变得越来越明显，不能再用静态描述，因为这样的数据当中已经包含了明显的感应电动机动态特性，例如当用静态模型来描述一条电压扰动为 17%的数

据时误差为 0.033 392，而当用动态模型来描述时误差为 0.014 499。因此如果用感应电动机特性不明显的小扰动数据辨识出的参数来描述大的扰动数据将产生很大的误差，所以必须用有一定扰动强度的包含明显感应电动机动态的数据辨识出的参数来描述大扰动数据。就是说同一负荷的两条扰动数据，用大扰动数据进行辨识的结果更接近负荷的本质。实践表明电压扰动 4%以上的数据就能够较好地体现感应电动机的动态特性。

4 算例分析

用电压扰动为 1.1%、4.7%、17%、49.7%、77%的数据的辨识参数对各种电压扰动的数据进行仿真，其仿真结果如表 1。

表 1 各种电压扰动数据的仿真结果

Tab.1 The simulation of the data with different disturbance

编号	电压扰动	1.1%	4.7%	17%	49.7%	77%
1	2.0%	0.008 788	0.008 593	0.008 464	0.008 223	0.007 874
2	5%	0.016 439	0.016 008	0.015 377	0.014 943	0.014 003
3	10.5%	0.026 690	0.013 214	0.012 335	0.010 830	0.007 490
4	33.80%	0.054 386	0.025 313	0.028 453	0.025 105	0.018 743
5	60.70%	0.065 617	0.061 378	0.046 907	0.041 457	0.031 523
6	85%	0.133 18	0.110 681	0.093 01	0.085 725	0.058 049
7	100%	0.499 537	0.445 939	0.324 628	0.288 748	0.185 930

从上面可以看出用电压扰动为 1.1%的数据辨识出来的参数对大电压扰动的数据进行仿真的时候误差比用电压扰动为 4.7%、17%、49.7%、77%的数据辨识出来的参数仿真的误差大，而且随着所描述负荷数据电压扰动的增大这个趋势越来越明显，仿真结果变得不可以接受。从上表还可以看出用电压扰动越大的数据获得的参数的泛化能力越强，描述各种电压扰动尤其是大电压扰动时的误差越小。当要描述数据的电压扰动小于 30%的时候用电压扰动为 4.7%、17%、49.7%、77%的数据辨识出来的参数进行仿真时的误差相差不多，但是当所描述的电压扰动大于 30%时，用电压扰动越大的数据获得的参数进行仿真的误差越小。这说明，如负荷测量点的电气系统非常强，很难测到大于 4%以上的扰动数据，那么也可以用测到的 2%~4%左右的数据进行辨识，但是这时如果要用于电网仿真，则这个模型最好只用于扰动比较小的仿真情况，如果扰动比较大，则仿真的可信度是比较低的，如果有扰动强度大于 5%而小于 15%的数据，则应该用此数据来建模，此时可以用来仿真电压扰动 30%左右的扰动，如果要仿真电压扰动大于 30%的情况，则必须用更

大的电压扰动数据辨识出来的参数，因为在大的电压扰动情况下有很多特性是小扰动数据所不包含的，因此所辨识数据的大致采用原则如表 2。

表 2 数据采用原则

Tab.2 Principle of the data application

参数来源	所描述数据电压扰动情况		
	2%~10%	10%~30%	30%~100%
1%~2%	误差很大	不可接受	不可接受
2%~4%	效果可以	误差较大	不可接受
4%~15%	效果较好 (推荐)	效果较好 (推荐)	误差较大
15%~100%	效果较好	效果较好 (推荐)	效果较好 (推荐)

5 结论

本文对实测负荷数据的应用范围进行了研究，扰动强度小的数据辨识出的参数由于其灵敏度小所以不容易体现负荷的本质特性，而扰动强度大的数据辨识出的参数的灵敏度较大，在辨识过程中更容易辨识到理想值，所以在负荷建模当中尽量采用扰

动强度大的实测数据进行建模。另外本文还通过对小扰动下感应电动机静态特征系数的研究, 从理论上说明了小扰动数据不宜用于建立动态模型的原因, 最后在此基础提出了适合本模型的不同扰动强度数据的大致适用范围, 实例表明了结论的正确性。

参考文献

- [1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation[J]. IEEE Trans Power Syst, 1995, 10(1): 523-538.
- [2] Jin M, Renmu H, Hill D J. Load Modeling by Finding Support Vectors of Load Data from Field Measurements[J]. IEEE Trans Power Syst, 2006, 21(2): 726-735.
- [3] 鞠平, 马大强. 电力负荷模型的机理式集结模型[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(3): 34-41.
JU Ping, MA Da-qiang. Physically Based Composite Models of Electric Power Loads[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(3): 34-41.
- [4] 李欣然, 贺仁睦, 章健, 等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 26-30.
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian, et al. Effects of the Load Characteristic on Power System Stead-state Voltage Stability and the Practical Criterion of Voltage Stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 26-30.
- [5] Renmu H, Jin M, Hill D J. Composite Load Modeling via Measurement Approach[J]. IEEE Trans Power Syst, 2006, 21(2): 663-672.
- [6] MA Jin, HAN Dong, HE Ren-mu, et al. Reducing Identified Parameters of Measurement-Based Composite Load Model[J]. IEEE Trans Power Syst, 2008, 23(1): 76-83.
- [7] 石景海, 贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 85-90.
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Load Time-variant Characteristic Study in Dynamic Load Modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 85-90.
- [8] 石景海, 贺仁睦. 基于量测的负荷建模-分类算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 78-82.
SHI Jing-hai, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling-sorting Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 78-82.
- [9] 李欣然, 林舜江, 刘杨华, 等. 基于实测响应空间的负荷动特性分类原理与方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 39-44.
LI Xin-ran, LIN Shun-jiang, LIU Yang-hua, et al. A New Classification Method for Aggregate Load Dynamic Characteristics Based on Field Measured Response[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 39-44.
- [10] Shi J H, HE Ren-mu. Measurement-based Load Modeling Model Structure[A]. in: 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference[C]. Bologna(Italy): 2003.
- [11] Laufenberg M J, Pai M A. Sensitivity Theory in Power Systems: Application in Dynamic Security Analysis[A]. in: Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications[C]. Dearborn(Michigan): 1996. 738-734.
- [12] Laufenberg M J, Pai M A. A New Approach to Dynamic Security Assessment Using Trajectory Sensitivities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 953-958.
- [13] Hiskens I A, Pai M A. Trajectory Sensitivity Analysis of Hybrid Systems Part I: Fundamental Theory and Applications[J]. IEEE Trans Circuit Syst, 2000, 47(2): 204-220.
- [14] Hiskens I A, Alseddiqui J. Sensitivity, approximation, and Uncertainty in Power System Dynamic Simulation[J]. IEEE Trans Power Syst, 2006, 21(4): 1808-1820.
- [15] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008. 119-124.
JU Ping, MA Da-qiang. Load Modeling of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. 119-124.
- [16] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [17] Taylor C W. Power System Voltage Stability[M]. New York: Mc-Graw-Hill, 1994.

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2009-10-25

作者简介:

唐永红(1965-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与仿真; E-mail: ttttyyhhh2003@yahoo.com.cn

郑晓雨(1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统负荷仿真与建模;

马进(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为负荷建模、电力系统动态分析。