

电力系统非机理负荷模型的可辨识性^{*}

鞠 平 李德丰 陆小涛

(河海大学电气工程学院 南京 210098)

摘 要 主要研究了 IEEE 工作组公布的常用电力负荷非机理模型的可辨识性问题——这些模型的参数能否根据测量数据唯一获得. 对每一种模型都得出了明确结果. 结果表明, 一些常见负荷模型是不可辨识的, 必须采用统计综合法或增加附加信息. 研究结果对今后进一步的研究和应用工作具有重要的参考价值.

关键词 电力系统; 负荷模型; 可辨识性

中图号 TM712

国内电网对电力系统四大参数测试的要求日益迫切, 尤以对负荷建模的呼声更高. 人们对电力负荷建模已进行了大量的研究工作, 但都集中于对模型结构和参数辨识的分析和研究. 在研究中经常会遇到参数变化较大, 而不同参数模型的动态响应却相差不大, 且与实测的结果也吻合甚好的情况. 这证明该负荷模型是能描绘负荷动态行为的有效模型, 但也有可能有若干组不同的参数能产生同样的输入-输出动态响应, 或者根据输入-输出动态响应可以获得不同的参数. 这是人们所不希望的, 也是人们经常感到困惑的一个问题. 这就是电力系统负荷模型的可辨识性问题, 应该受到广泛重视, 但直到最近才开始得到研究^[1, 2]. 文献 [1] 研究了电力负荷可辨识性的概念、定义、分类等问题. 电力负荷模型分为机理(物理)负荷模型和非机理负荷模型. 文献 [2] 着重对电力系统中最重要机理负荷模型——感应电动机综合模型的可辨识性问题进行了分析, 获得了明确而重要的结论. 本文则对电力系统的常用非机理负荷模型的可辨识性进行研究. 模型主要来源于 IEEE 工作组列出的模型^[3].

1 负荷模型可辨识性定义^[1]

针对模型中的某个参数 Z_i :

- 唯一(全局)可辨识: 根据输入-输出动态响应模型存在唯一解;
- 局部可辨识: 据输入-输出动态响应模型存在有限数目(≥ 1)个局部解; 若解的数目大于 1, 称为非唯一可辨识;
- 0 不可辨识: 据输入-输出动态响应模型不存在解;
- ∞ 不可辨识: 据输入-输出动态响应模型存在无穷多个解;
- 区间可辨识: 它从属于 ∞ 不可辨识, 但可确定参数的上下限 $Z_i^{\min}$ 和 $Z_i^{\max}$, 参数区间表示为 $\Delta Z_i = Z_i^{\max} - Z_i^{\min}$;
- 准可辨识(后验解): 如果模型是区间可辨识的, 且 ΔZ_i 小到足以得到一个近似唯一解.

0 不可辨识和 ∞ 不可辨识是两个不同的概念, 应加以区分. 同时应注意可辨识性不但与模型结构有关, 有时还与输入信号的形式有关.

2 负荷模型参数可辨识性分析方法

非线性模型的可辨识性分析是一个非常困难的问题, 到目前为止, 还没有一种能分析所有模型可辨识性

的通用方法,必须根据具体模型区别对待.本文简要介绍三种分析负荷模型可辨识性的方法.

2.1 输出量的高阶求导方法

对于非线性模型,若其输出信号作一定程度的变化,则理论上可以作出其随时间变化的曲线,并且可以求出它在各时刻的一阶、二阶及高阶导数,但在实际辨识过程中并不一定用这种方法进行参数辨识.同样,可认为输入信号及其各阶导数可以求出.这样,在所有关于模型参数的信息都利用了仍不能判别模型参数是否可以辨识的时候,根据输出信号的高阶导数已知这一前提对模型方程求导,通常可获得参数的新的信息,从而有可能“解析”出其中的参数以论证其可辨识性.

2.2 线性化方法

当非线性模型的输入-输出信号偏离正常值不太大时,可将模型线性化,从而得到其线性化模型.对于线性系统,其模型结构较为简单,一般用传统辨识方法的辨识过程即可判断模型参数的可辨识性.例如,将模型转化为差分方程的形式,根据各阶变化量前的参数在输入-输出信号作一定程度的波动的条件下通常是可辨识的规律来确定模型参数的可辨识性.然后分析线性模型参数与非线性模型参数的关系,从而判断非线性模型参数的可辨识性.最后应用非线性模型进行数字仿真研究,以验证结果的正确性.这是作者在文献[2]中提出的一种有效的方法,但对于输入信号变化太大的场合,可能不完全合适.

2.3 等高线方法

文献[1]提出了这种方法,它引入并衍生了地理学中等高线的概念,用数值方法来研究可辨识性问题.

3 非机理负荷模型的可辨识性研究

由于文章篇幅的限制,这里不加证明地给出可辨识性结论,详细证明见文献[4].对于不可辨识的情况,只能采用统计综合法确定其模型参数.

3.1 静态负荷模型的可辨识性

定理 1 IEEE Task Force^[3]于 1994 年提出的模型

$$\frac{P}{P_{frac}P_0} = P_{pz}\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + P_{pi}\left(\frac{V}{V_0}\right) + P_{pc} + P_{pf1}\left(\frac{V}{V_0}\right)^{npv1}(1 + K_{pf1}\Delta f) + P_{pz2}\left(\frac{V}{V_0}\right)^{npv2}(1 + K_{pf2}\Delta f) \quad (1)$$

$$P_{pz} = 1 - (P_{pi} + P_{pc} + P_{p1} + P_{p2})$$

$$\frac{Q}{Q_{frac}Q_0} = Q_{qz}\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + Q_{qi}\left(\frac{V}{V_0}\right) + Q_{qc} + Q_{qf1}\left(\frac{V}{V_0}\right)^{nqv1}(1 + K_{qf1}\Delta f) + Q_{qz2}\left(\frac{V}{V_0}\right)^{nqv2}(1 + K_{qf2}\Delta f) \quad (2)$$

$$Q_{qz} = 1 - (Q_{qi} + Q_{qc} + Q_{q1} + Q_{q2})$$

是不可辨识的.其中 P, Q ——有功功率和无功功率; V, f ——电压和频率;带下标 0 的——稳态值,其余均为负荷特性系数.以下各模型中类似.在实际应用中,往往根据分析问题的具体情况选择此模型中的一些重要项,而派生出一些实用模型.

定理 2 EPRI Report^[5]于 1987 年提出的一种实用于居民、商业、工业负荷的静态负荷模型

$$P = P_0\{p_{a1}\left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{pa}}[1 + K_{pf1}(f - f_0)] + (1 - p_{a1})\left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{pa2}}\} \quad (3)$$

$$Q = Q_0\{q_{a1}\left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{qa}}[1 + K_{qf1}(f - f_0)] + (1 - q_{a1})\left(\frac{V}{V_0}\right)^{K_{qa2}}[1 + K_{qf2}(f - f_0)]\} \quad (4)$$

是不可辨识的.

定理 3 幂指数负荷静态模型^[6,7]

$$P = P_0V^\alpha \quad Q = Q_0V^\beta \quad (5)$$

是唯一可辨识的.

定理 4 静态负荷模型^[8](适用于居民负荷、商业负荷、工业负荷)

$$P = P_0V^{n_p} \quad Q = Q_0 + K_n(\Delta V)^{n_q} \quad (6)$$

通常是唯一可辨识的.

定理 5 居民负荷模型^[9]

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0(1 + p_1\Delta V) \\ Q &= 0.5P_0[1 + q_1\Delta V + q_2(\Delta V)^2] + (Q_0 - 0.5P_0)[1 + 2\Delta V + (\Delta V)^2] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

通常是唯一可辨识的.

定理6 IEEE Task Force^[10]于1988年提出的计及负荷频率的静态负荷模型

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\gamma_p} [1 + K_p(f - f_0)] \quad Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\gamma_q} [1 + K_q(f - f_0)] \quad (8)$$

通常是唯一可辨识的.

3.2 动态负荷模型的可辨识性

当节点负荷包含大量的工业负荷,研究的问题又是在扰动后短时间内负荷对系统影响时,一般应采用动态负荷模型来描述负荷.过去,人们提出了几种非线性或线性的非机理动态负荷模型,也就是将整个负荷群当作一个从该节点看进去的“黑箱”或“灰箱”,用一个非机理模型来描述其输入-输出特性.下面研究几种主要动态负荷模型的可辨识性.

定理7 Sabir 等^[7]于1982年提出的工业负荷动态模型

$$\Delta P(t) = \Delta P_f(t) + \Delta P_v(t) \quad \Delta Q(t) = K_4 \Delta V(t) \quad (9)$$

是唯一可辨识的.其中 $\Delta P_f(t)$ $\Delta P_v(t)$ 分别为负荷公式中的频率有关部分和电压有关部分,其传递函数模型如下:

$$\frac{\Delta P_f(s)}{\Delta f(s)} = K_2(1 + sT_F) \quad (10)$$

$$\frac{\Delta P_v(s)}{\Delta V(s)} = K_5 \frac{(s + b)(s + a)}{(s + b)^2 + \omega^2} \quad (11)$$

定理8 Welfonder 等^[11]于1989年提出的工业负荷传递函数模型

$$\left. \begin{aligned} \Delta P(s) &= \frac{K_{pf} + T_{pf}s}{1 + T_1s} \Delta f(s) + \frac{K_{pv} + T_{pv}s}{1 + T_1s} \Delta V(s) \\ \Delta Q(s) &= \frac{K_{qf} + T_{qf}s}{1 + T_1s} \Delta f(s) + \frac{K_{qv} + T_{qv}s}{1 + T_1s} \Delta V(s) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

是唯一可辨识的.

定理9 Hilf^[12]于1993年提出的工业负荷综合模型

$$P_d = P_0 + K_{pv}(\Delta V + T_{pv}V) \quad Q_d = Q_0 + K_{qv}\Delta V \quad (13)$$

有阶跃电压干扰下是唯一可辨识的.

定理10 Meyer 等^[13]于1982年提出的状态方程负荷模型

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta I_R \\ \Delta I_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_3 & \alpha_4 \\ \alpha_5 & \alpha_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_7 & \alpha_8 \\ \alpha_8 & \alpha_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_I \end{bmatrix} \quad (15)$$

是唯一可辨识的.

定理11 Karlsson 等^[14]于1994年提出的电压负荷模型

$$\left. \begin{aligned} P &= P_v + P_t \\ T_p P_v + P_v &= P_s - P_t \quad P_v(0) = 0 \\ P_s &= P_0 \left(V/V_0 \right)^{\gamma_s} \quad P_t = P_0 \left(V/V_0 \right)^{\gamma_t} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在阶跃电压干扰下是唯一可辨识的.

定理12 Xu 等^[15]于1994年提出的电压负荷模型

$$\left. \begin{aligned} P &= \chi P_{t2}(V) \quad P_{t2}(V) = (V/V_0)^{\gamma_t} \\ T_p \chi + \chi P_{t2}(V) &= P_s(V) \quad \chi(0) = P_0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

在阶跃电压干扰下是唯一可辨识的.

定理13 Ju 等^[6,16]1989年提出、1995年扩展的电压负荷模型

$$\left. \begin{aligned} P &= P_v + P_s \quad T_p P_v + P_v = T_p g_v \\ P_s &= P_0 \left(V/V_0 \right)^{\gamma_s} \quad g_v = P_0 [b_p (V/V_0) + c_p (V/V_0)^2] \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

在阶跃电压干扰下是不可辨识的,在斜坡或恢复型电压干扰下是唯一可辨识的.

4 结 论

一些常见负荷模型是不可辨识的,必须采用统计综合法或增加附加信息.研究电力负荷辨识乃至电力系统其它辨识问题首先应该研究其可辨识性.

参 考 文 献

1 Ju P, Handschin E. Identifiability of load models. IEE Proc-Gener Trans Distrib, 1996, 143(6): 45 ~ 49

2 李德丰 鞠平. 电力系统综合负荷模型的可辨识性研究. 电力系统及其自动化, 1997, 21(7): 10 ~ 14

3 IEEE Task Force. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Tran on Power System, 1995, 10(1): 523 ~ 527

4 李德丰. 电力系统负荷模型的可辨识性及辨识方法研究 [学位论文]. 南京: 河海大学, 1997

5 EPRI Report. Load modeling for power flow and transient stability computer studies. EPRI Final Report EI-5003, 1987

6 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模. 北京: 水利电力出版社, 1995. 54 ~ 56, 160 ~ 169

7 Sabir S A Y, Lee D C. Dynamic load models derived from data acquired during system transients. IEEE Trans PAS, 1982, 101(9): 3365 ~ 3372

8 Dias L G, El-Hawary M E. Nonlinear parameter estimation experiments for static load modeling in electric power system. IEEE Proc-C, 1989, 136(2): 68 ~ 77

9 Frants T, Gentile T, Ihara S, et al. Load behavior observed in LILIO and RG & E system. IEEE Trans PAS, 1984, 103(4): 819 ~ 831

10 IEEE Task Force Report. Load representation for dynamic performance analysis. IEEE Trans PWRS, 1988, 3(1): 134 ~ 148

11 Welfonder E, Weber H, Hall B. Investigations of the frequency and voltage dependence of load part systems using a digital self-acting measuring and identification system. IEEE Trans PWRS, 1989, 4(1): 19 ~ 25

12 Hill D J. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies. IEEE Trans PWRS, 1993, 8(1): 166 ~ 176

13 Meyer F J, Lee K Y. Improved dynamic load model for power systems stability studies. IEEE Trans PAS, 1982, 101: 3303 ~ 3309

14 Karlsson D, Hill D J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems. IEEE Trans PWRS, 1994, 9(1): 157 ~ 166

15 Xu W, Mansour Y. Voltage stability analysis using general dynamic load models. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 479 ~ 493

16 Ju P, Handschin E, Karlsson D. Nonlinear dynamic load modelling: model and parameter estimation. IEEE Trans PWRS, 1996, 11(4): 1689 ~ 1697

Identifiability of Usual I/O Load Models in Power Systems

Ju Ping Li Defeng Lu Xiaotao

(College of Electrical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract This paper studies the identifiability problems of the usual I/O load models recognized by IEEE Task Force, i.e. whether the parameters of the models are uniquely identifiable. Each model is studied, and the results show that some models are not identifiable and new information should be added. The study is beneficial to further research.

Key words power system; load models; identifiability