

基于 Lemke 优化算法的负荷静态模型参数辨识

李培强, 李欣然, 刘艳阳

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 在分析传统优化算法不足的基础上, 提出了基于二次规划的 Lemke 优化算法的负荷静态模型参数辨识新方法。详细描述了最小二乘法、拉格朗日乘数法及 Lemke 3 种算法的原理。通过对电力负荷元件进行静态故障模拟, 在系统辨识原理的基础上, 运用最优化理论的 Lemke 辨识算法, 对实验故障数据进行负荷建模和参数辨识, 并列出了日光灯、电风扇、空调及三者组合的静态特征参数。分析结果表明: 由于电器设备的制造工艺不同, 不能照搬国外软件提供的参数, 而应采用实测参数; 基于 Lemke 的优化算法拟合效果较理想, 避免了局部最优, 且辨识时间少; 基于 Lemke 的优化算法避免了辨识参数的分散性, 参数结果与初值选择无关。

关键词: 负荷建模; 静态模型; 参数辨识; Lemke 算法

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)08-0012-03

负荷模型对小干扰稳定、电压稳定和网络传输极限都有不同程度的影响^[1-4]。大量的计算与实验结果表明^[5-7], 静态负荷模型对电力系统的潮流计算、无功补偿装置规划、电压稳定、频率稳定及长期动态过程的分析等较大的影响。在临界情况下, 还有可能从根本上改变定性的结论^[8-10]。因此, 负荷建模研究是电力系统运行与控制中的基础性课题, 既具有非常重要的理论意义, 又具有十分显著的工程实用价值。

1 综合负荷的静态模型

电力仿真计算中, 将变电站母线或线路供电的所有用户的集合称为综合负荷。综合负荷从电网吸收的功率随母线电压和系统频率而变化的关系称为综合负荷特性, 描述这种特性的数学方程组即为负荷静态模型, 通常描述为如下所示多项式模型:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left[A_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + B_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + C_p \right] \left[1 + \left(\frac{\partial P}{\partial f} \right)_{f_0} \Delta f \right] \\ Q &= Q_0 \left[A_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + B_q \left(\frac{U}{U_0} \right) + C_q \right] \left[1 + \left(\frac{\partial Q}{\partial f} \right)_{f_0} \Delta f \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 U 为实际电压; U_0 为基值电压; P 、 Q 为实际有功、无功功率; P_0 、 Q_0 为基值功率, 即电压和频率为额定值的功率; A_p 、 B_p 、 C_p 、 A_q 、 B_q 、 C_q 为负荷静态模型的系数。

在忽略频率特性的情况下, 即只计及负荷特性时, 多项式模型可简化为

$$\begin{aligned} P &= P_0 \left[A_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + B_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + C_p \right] \\ Q &= Q_0 \left[A_q \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + B_q \left(\frac{U}{U_0} \right) + C_q \right] \end{aligned} \quad (2)$$

将式(2)以额定电压、额定功率为基准标么化:

$$P = A_p U^2 + B_p U + C_p, \quad Q = A_q U^2 + B_q U + C_q \quad (3)$$

该模型可以看成是恒阻抗、恒电流、恒功率模型的组合, 此时, A_p 、 B_p 、 C_p 则分别表示恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷在总有功中所占的比重, 而 A_q 、 B_q 、 C_q 则分别表示恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷在总无功中所占的比重。因此, 计及系数的物理意义时, 可得:

$$A_p + B_p + C_p = 1, \quad A_q + B_q + C_q = 1 \quad (4)$$

式中 $A_p, B_p, C_p \geq 0; A_q, B_q, C_q \geq 0$ 。

2 多项式模型参数辨识

2.1 传统负荷参数辨识方法

2.1.1 最小二乘法

负荷静态建模实践中, 用于辨识的有功和无功数据的时间跨度很小, 所以频率变化也很小, 故通常不计频率变化。式(3)模型中, U 为已知输入信号; P 、 Q 为已知输出信号; A_p 、 B_p 、 C_p 和 A_q 、 B_q 、 C_q 为 2 组待求的模型参数。现以有功为例说明辨识过程。

设 U_k 、 P_k 为实测的第 k 个输入、输出信号, 则有功误差为

$$e_{Pk} = P_k - (A_p U_k^2 + B_p U_k + C_p) \quad (5)$$

以最小二乘法作为辨识准则, 则目标函数为

$$J_p = e_{P1}^2 + e_{P2}^2 + \cdots + e_{Pn}^2 = \sum_{k=1}^n e_{Pk}^2 \quad (6)$$

目标函数 J_p 的驻点可求解如下线性方程组得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_p}{\partial A_p} &= -2 U_k^2 \sum_{k=1}^n P_k - (A_p U_k^2 + B_p U_k + C_p) = 0 \\ \frac{\partial J_p}{\partial B_p} &= -2 U_k \sum_{k=1}^n P_k - (A_p U_k^2 + B_p U_k + C_p) = 0 \\ \frac{\partial J_p}{\partial C_p} &= -2 \sum_{k=1}^n P_k - (A_p U_k^2 + B_p U_k + C_p) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

通过式(7)可以求得目标函数 J_p 的唯一驻点,即最优解 A_p, B_p, C_p 。

2.1.2 拉格朗日乘数法

负荷辨识的拉格朗日乘数法实际上是在最小二乘法的基础上添加了一个约束函数:

$$A_p + B_p + C_p = 1 \quad (8)$$

定义拉格朗日函数形式为

$$L(\theta_p, \lambda) = J_p - \lambda(A_p + B_p + C_p - 1) \quad (9)$$

模型辨识的过程就是通过求 $L(\theta_p, \lambda)$ 的驻点即可求得最优解 A_p, B_p, C_p 。

2.2 Lemke 负荷参数辨识算法

Lemke 算法是一种很实用的求解二次规划的方法^[11]。它的基本思想是把线性规划的单纯性方法加以修改,再用来求二次规划的 K-T 点。

Lemke 算法的标准问题:

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= 1/2x^T Hx + c^T x \\ \text{Subject to } Ax &\geq bx \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 H 是 n 阶对称矩阵; c 是 n 维列向量; A 是 $m \times n$ 矩阵, A 的秩为 m ; b 是 m 维列向量。

引入乘子 y 和 u , 定义拉格朗日函数为

$$L(x, y, u) = 1/2x^T Hx + c^T x - y^T(Ax - b) - u^T x \quad (11)$$

再引入松弛变量 $v \geq 0$, 使 $Ax - v = b$ 成立。则问题的 K-T 条件写成:

$$\begin{aligned} u - Hx + A^T y &= c, \quad v - Ax = -b \\ u^T x &= 0, \quad v^T y = 0, \quad u, v, x, y \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

把式(12)改写为矩阵形式为

$$w - Mz = q, \quad w, z \geq 0 \quad (13)$$

$$w^T z = 0 \quad (14)$$

$$w = \begin{bmatrix} H & -A^T \\ A & 0 \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} c \\ -b \end{bmatrix}$$

式中 w, q, z 均为 $m+n$ 维列向量; M 为 $m+n$ 阶矩阵。

式(13)(14)称为线性互补问题, 求出线性互补问题的基本可行解即可得到最优解。Lemke 算法的负荷模型辨识参数的目标函数同式(6), 增加约束式(15):

$$A_p + B_p + C_p = 1, \quad A_p, B_p, C_p \geq 0 \quad (15)$$

将其化成 Lemke 算法的标准问题:

$$\min f([A_p \ B_p \ C_p]^T) = \frac{1}{2} [A_p \ B_p \ C_p] \times$$

$$\begin{bmatrix} 2\sum U_i^4 & 2\sum U_i^3 & 2\sum U_i^2 \\ 2\sum U_i^3 & 2\sum U_i^2 & 2\sum U_i \\ 2\sum U_i^2 & 2\sum U_i & 2n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p \\ B_p \\ C_p \end{bmatrix} -$$

$$[2\sum U_i^2 P_i \ 2\sum U_i P_i \ 2\sum P_i] [A_p \ B_p \ C_p]^T$$

$$\text{Subject to } \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p \\ B_p \\ C_p \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$A_p, B_p, C_p \geq 0$$

引入乘子 y 和 u 以及松弛变量 $v \geq 0$, 得到该

辨识问题的 K-T 条件:

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2\sum U_i^4 & 2\sum U_i^3 & 2\sum U_i^2 & -1 & 1 \\ 2\sum U_i^3 & 2\sum U_i^2 & 2\sum U_i & -1 & 1 \\ 2\sum U_i^2 & 2\sum U_i & 2n & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix} =$$

$$[-2\sum U_i^2 P_i \ -2\sum U_i P_i \ -2\sum P_i \ -1 \ 1]^T; w, z \geq 0 \quad (17)$$

$$w^T z = 0 \quad (18)$$

然后利用单纯性列表法可求解线性互补问题式(17)和(18)的基本可行解 $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$, 则 $A_p = z_1, B_p = z_2, C_p = z_3$ 。

2.3 辨识原理

辨识原理如图 1 所示。

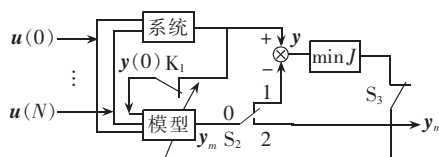


图 1 辨识原理示意图

Fig.1 The principle of identification

以系统输入向量 $u(t)$ 的时间序列 $u(0), u(1), \dots, u(N)$ 作为被辨识的实际系统和等效模型系统的输入; 同时将实际系统在 $t=0$ 时刻的输出 $y(0)$ 反馈给模型系统作为其附加输入, 以保证模型输出满足实际系统的初始稳态条件。辨识过程分 2 步进行。

a. 参数辨识。 开关 S_2 之 0-1 接通, 0-2 断开, 同时开关 S_3 接通, 辨识模型参数。

b. 模型检验。 开关 S_2 之 0-1 断开, 0-2 接通, 同时开关 S_3 断开, 由系统输入向量 $u(t)$ 的时间序列求解模型响应。

3 建模实例和结果分析

3.1 实验数据的获取

在实验室利用自主开发的负荷特性记录装置对日光灯、白炽灯、电风扇和感应电动机等用电设备进行了静态模拟实验, 采用人为干扰采集负荷特性数据, 记录了不同程度电压扰动情况的实验数据进行建模。实验接线如图 2 所示。

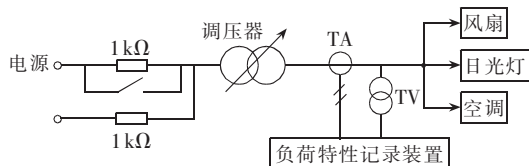


图 2 实验接线图

Fig.2 The wiring of test

3.2 辨识结果

在一般的电力系统机电暂态过程中, 电网的频率变化很小, 因此通常只有在计算大干扰下的长时期的动态稳定过程中才考虑负荷频率特性的影响,

而在稳定计算中只考虑负荷功率随电压变化的特性,故本文忽略频率参数的测定,只考虑电压有关的负荷特性参数。按照 2.3 节的辨识原理和 3.1 节实验接线,得到负荷元件和模拟实际系统不同用电情况的负荷元件组合的静态参数辨识结果。限于篇幅,本文列出了日光灯、电风扇、空调和三者组合的静态特征参数,如表 1 所示。有功和无功功率的实测和模型拟合曲线如图 3 所示(N 为采样点数)。

表 1 实验模型辨识参数结果

Tab.1 Parameters identified for test model

用电设备	A_p	B_p	C_p
日光灯	0.169 603	0.830 398	0
电风扇	0.866 754	0.133 195	0
空调(制热)	0	0.169 593	0.830 290
空调+灯+风扇	0.999 224	0	0
用电设备	A_q	B_q	C_q
日光灯	0.368 255	0.631 745	0
电风扇	0.949 498	0	0.050 461
空调(制热)	0.999 999	0	0
空调+灯+风扇	0.837 973	0	0.162 027

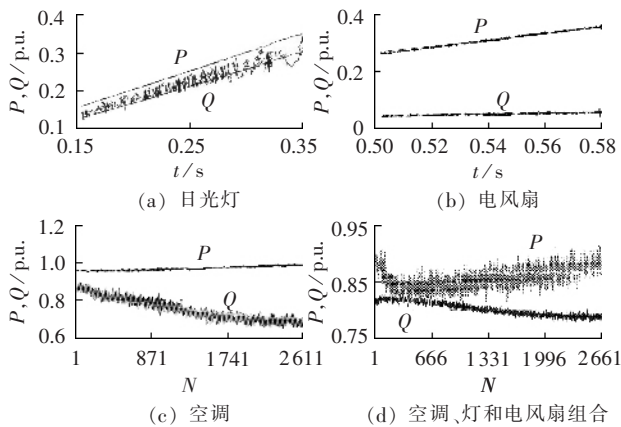


图 3 用电设备有功和无功的实测与模型响应

Fig.3 Measured and modeled active power and reactive power of electric appliances

对以上辨识结果分析如下:

a. 实验数据的电压是在 60 % 和 105 % 的额定电压之间缓慢变化,其目的是为了拟合静态负荷模型的运行工况,表 1 中有功和无功的负荷特性参数均 ≥ 0 ,这与负荷特性参数的物理意义是吻合的;

b. 辨识结果与美国 LOADSYN 软件提供的数据比较,我国的参数偏小,由此可见,由于电器设备的制造工艺不同,照搬 LOADSYN 软件的参数不符合我国国情,需采用上述方法实测其负荷特性参数;

c. 从实测和模型的拟合结果看,基于 Lemke 优化算法的拟合效果是比较理想的,因为它避免了在局部最优的可能,而且辨识时间比传统方法短,最小二乘法和拉格朗日乘数法的辨识时间在 10 秒级,而 Lemke 算法的在 0.1 秒级;

d. 与最小二乘法和拉格朗日乘数法相比,基于 Lemke 的优化算法避免了辨识参数的分散性,参数的结果与初值选择无关。

4 结语

建模实践表明了本文就负荷静态模型参数的测定所提新方法的可行性和有效性。它在计及参数物理意义的基础上较好地拟合了负荷的功率曲线,同时也较好地克服了参数分散性问题,对负荷静态多项式模型及其参数意义的研究进行了有益的探索,为建立适合我国国情的负荷静态模型参数库提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [2] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [3] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [4] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [5] 张红斌. 电力系统负荷模型结构与参数辨识的研究[D]. 北京:华北电力大学,2003.
- ZHANG Hong-bin. The studies on identification of electric load model[D]. Beijing:North China Electric Power University,2003.
- [6] 李欣然,贺仁睦,周文. 一种具有全电压范围适应性的综合负荷模型[J]. 中国电机工程学报,1999,19(5):71-75.
- LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHOU Wen. Synthesis load model suiting for voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(5):71-75.
- [7] 李欣然,贺仁睦,章健. 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的广义实用判据[J]. 中国电机工程学报,1999,19(4):27-30.
- LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian. Effect of load characteristics of power system steady state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(4):27-30.
- [8] 贺仁睦,魏孝铭,韩民晓. 电力负荷特性实测建模的外插内推[J]. 中国电机工程学报,1996,16(3):151-154.
- HE Ren-mu, WEI Xiao-ming, HAN Min-xiao. Power system dynamic load modeling basic on the measurements in the field[J]. Proceedings of the CSEE, 1996,16(3):151-154.
- [9] 张伶俐,周文. 面向综合的电力负荷特性建模[J]. 中国电机工程学报,1999,19(9):36-45.
- ZHANG Ling-li, ZHOU Wen. The synthesis of dynamic load characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(9):36-45.
- [10] 史真惠,朱守真,郑竟宏,等. 改进 BP 神经网络在负荷动态比例确定中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):25-30.
- SHI Zhen-hui, ZHU Shou-zhen, ZHENG Jing-hong, et al. Application of improved back propagation neural network for identification of the percentage of dynamic component in composite load[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(7):25-30.
- [11] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

李培强(1975-),男,山西忻州人,讲师,博士研究生,主要从事电力系统负荷建模研究(E-mail:lpqcs@yahoo.com.cn);
李欣然(1957-),男,湖南涟源人,系主任,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统运行与控制的研究和教学。

Parameter identification of static load model based on Lemke optimal algorithm

LI Pei-qiang, LI Xin-ran, LIU Yan-yang
(Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract : Lemke optimal algorithm is used to identify parameters of static load model to improve the performance of traditional optimization algorithms. Principles of the least square method, Lagrange method and Lemke method are described. Static faults of electric power load elements are simulated. With fault data, the load modeling and parameter identification are performed based on Lemke optimal algorithm. Static characteristic parameters of the lamp, the fan, the air conditioner and their combination are listed. The result analysis shows that: adopt measured parameters and never copy those supplied by foreign software because manufacturing techniques are different; fitting results by Lemke optimization algorithm are better, avoiding local optimum and costing less time; Lemke optimization algorithm avoids decentralization of identification parameters and makes identified parameters independent of initial values.

Key words: load modeling; static model; parameter identification; Lemke optimal algorithm