

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.016

基于二阶灵敏度的电力负荷参数辨识方法

左萍¹,李威¹,秦川²,陈汹¹,赵浚婧²,鞠平²,赵潞翔¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 210003;
2. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心,江苏南京 210098)

摘要: 利用牛顿法收敛性强的优点,将一阶灵敏度和二阶灵敏度引入牛顿法,得到基于二阶灵敏度的牛顿参数辨识法,并将其应用于电力负荷参数辨识。采用仿真算例将该方法与粒子群算法的参数辨识结果进行对比验证,结果表明牛顿参数辨识法的辨识精度高、辨识计算量小、辨识鲁棒性好。
关键词: 电力负荷参数;参数辨识;指标灵敏度;牛顿法;粒子群算法
中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)05-0460-05

Parameter identification of electric loads based on second-order sensitivity

ZUO Ping¹, LI Wei¹, QIN Chuan², CHEN Xiong¹, ZHAO Junjing², JU Ping², ZHAO Luxiang¹
(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210003, China;
2. Engineering Research Center of Renewable Power Generation Technologies,
Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the advantage of strong convergence of the Newton method, we introduce the first-order sensitivity and second-order sensitivity to the method, and propose the Newton parameter identification method based on the second-order sensitivity. We applied the proposed method to parameter identification of electric loads. Through simulation, we compared the proposed method with the PSO algorithm. The results show that the proposed method has higher identification precision, utilizes a smaller amount of calculation, and is more robust.
Key words: electric load parameter; parameter identification; index sensitivity; Newton method; PSO algorithm

电力负荷建模是电力系统研究中的一个重要课题,原因在于电力负荷模型对电力系统规划、运行与控制具有重要的影响^[1]。同时,电力负荷建模也是电力系统研究的一个难题,受到国内外电力学者和工程技术人员的关注^[2-5]。

电力负荷建模的一个重要途径是采用测量辨识方法^[6-10],其辨识精度、辨识速度和辨识鲁棒性是人们所关注的几个主要方面。以往采用爬山类方法进行参数优化辨识时,一般都采用基于梯度(一阶灵敏度)的方法,这种方法的优点是初始收敛速度快、程序简单、存储量小、每次迭代的计算量小,缺点是越靠近极值点收敛速度越慢(呈锯齿状收敛)。实际上,爬山类方法中还有基于二阶导数(二阶灵敏度)的方法,比如牛顿法、修正牛顿法等,这些方法的优点是收敛速度快、局部二次收敛,缺点是计算量比较大、存储量大。由于电力负荷建模中需要优化的参数数目少,随着计算机技术的发展,计算量和存储量已经不成问题,所以人们更加关注收敛性问题。

本文提出基于二阶灵敏度进行电力负荷参数的优化辨识方法,给出电力负荷参数辨识的二阶灵敏度计算公式,以此为基础采用牛顿法优化辨识参数,目的在于探索一种精度高、计算量小、鲁棒性好的电力负荷参数辨识方法。

1 电力负荷综合模型

中国电力科学研究院近年来提出并且推广考虑配电网支路的综合负荷模型^[11] (synthesis load models, SLM), 其结构如图 1 所示。该模型中除模拟了等值静态负荷和等值电动机负荷外, 还新考虑了等值配电网以及电容补偿。在中间设置了一个虚拟母线, 虚拟母线与实际负荷母线之间是(输)配电网的等值阻抗。

感应电动机的电势方程为

$$\frac{dE'_{Ld}}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0L}} [E'_{Ld} + (X - X')I_{Lq}] - (\omega_r - 1)E'_{Lq} \quad (1)$$

$$\frac{dE'_{Lq}}{dt} = -\frac{1}{T'_{d0L}} [E'_{Lq} - (X - X')I_{Ld}] + (\omega_r - 1)E'_{Ld} \quad (2)$$

其定子电流方程为

$$I_{Ld} = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(V_{Ld} - E'_{Ld}) + X'(V_{Lq} - E'_{Lq})] \quad (3)$$

$$I_{Lq} = \frac{1}{R_s^2 + X'^2} [R_s(V_{Lq} - E'_{Lq}) - X'(V_{Ld} - E'_{Ld})] \quad (4)$$

其转子运动方程为

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_E - T_M) \quad (5)$$

$$T_E = E'_{Ld}I_{Ld} + E'_{Lq}I_{Lq} \quad (6)$$

$$T_M = (A\omega_r^2 + B\omega_r + C)T_0 \quad (7)$$

$$\omega_r = 1 - S_L \quad (8)$$

式中各变量含义见文献[6]。

根据以往文献的研究^[12], 需要重点辨识的 3 个参数为电动机比例 P_{MP} 、初始负载率 K_L 以及定子电抗 X_s , 其余参数取典型值。

2 二阶灵敏度计算

指标灵敏度是反映系统中某一参数发生微小变化时指标函数的变化程度, 能反映指标函数值与参数的相互关系。

通常采用的指标函数是观测变量仿真曲线误差的平方和, 即

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^K [Y(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_m(k)]^T [Y(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_m(k)] \quad (9)$$

式中: $\mathbf{Y}$ ——观测变量组成的向量; $\boldsymbol{\theta}$ ——负荷模型中待辨识的 3 个参数组成的向量; m ——测量值; K ——测量点总数。

指标函数对于参数的一阶灵敏度为

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} = 2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [Y_i(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_{im}(k)] \frac{\partial Y_i(\boldsymbol{\theta}, k)}{\partial \theta_j} \quad (10)$$

式中: I ——观测变量总数; θ_j ——待辨识的参数, 本文中 $j=1, 2, 3$ 。

由于负荷模型的目标函数与参数之间不可能写出解析公式, 所以近似地通过式(11)进行数值计算来获得。

$$\frac{\partial J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \approx 2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [Y_i(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_{im}(k)] \frac{Y_i(\theta_j + \Delta\theta_j, k) - Y_i(\theta_j - \Delta\theta_j, k)}{2\Delta\theta_j} \quad (11)$$

指标函数对于参数的二阶灵敏度为

$$\frac{\partial^2 J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j^2} = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \left\{ 2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K [Y_i(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_{im}(k)] \frac{\partial Y_i(\boldsymbol{\theta}, k)}{\partial \theta_j} \right\} =$$

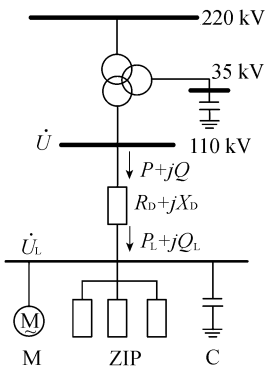


图 1 SLM 模型结构
Fig. 1 Structure of SLM

$$2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left\{ \left[Y_i(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_{im}(k) \right] \frac{\partial^2 Y_i(\boldsymbol{\theta}, k)}{\partial \theta_j^2} + \left[\frac{\partial Y_i(\boldsymbol{\theta}, k)}{\partial \theta_j} \right]^2 \right\}$$

(12)

近似地通过式(14)进行数值计算来获得。

$$\frac{\partial^2 J(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j^2} \approx 2 \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \left\{ \left[Y_i(\boldsymbol{\theta}, k) - Y_{im}(k) \right] \frac{\left[Y_i(\theta_j + \Delta \theta_j, k) - 2Y_i(\boldsymbol{\theta}, k) + Y_i(\theta_j - \Delta \theta_j, k) \right]}{(\Delta \theta_j)^2} + \right. \\ \left. \left[\frac{Y_i(\theta_j + \Delta \theta_j, k) - Y_i(\theta_j - \Delta \theta_j, k)}{2\Delta \theta_j} \right]^2 \right\}$$

(13)

3 基于二阶指标灵敏度的参数优化辨识

基于二阶指标灵敏度的参数辨识牛顿法迭代公式如下^[13]：

$$\boldsymbol{\theta}_{l+1} = \boldsymbol{\theta}_l + \alpha_l \boldsymbol{p}_l = \boldsymbol{\theta}_l - \alpha_l \boldsymbol{H}_l^{-1} \boldsymbol{g}_l$$

(14)

式中： l ——迭代次数； α_l ——步长因子； $\boldsymbol{p}_l$ ——牛顿方向。

参数优化辨识牛顿法的基本步骤如下：

步骤1 置 $l=0$ ，给定初始值 $\boldsymbol{\theta}_0 = [P_{PM0} \quad K_{L0} \quad X_{S0}]^T$ 。

步骤2 计算一阶灵敏度 $\boldsymbol{g}$ 。

$$\boldsymbol{g} = \left[\frac{\partial J}{\partial P_{MP}} \quad \frac{\partial J}{\partial K_L} \quad \frac{\partial J}{\partial X_S} \right]^T$$

(15)

式中： P_{MP} ——电动机比例； K_L ——初始负载率； X_S ——定子电抗。

步骤3 计算二阶灵敏度矩阵 $\boldsymbol{H}_l$ ，并求 $\boldsymbol{H}_l^{-1}$ ：

$$\boldsymbol{H}_l = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 J}{\partial P_{MP}^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial P_{MP} \partial K_L} & \frac{\partial^2 J}{\partial P_{MP} \partial X_S} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial K_L \partial P_{MP}} & \frac{\partial^2 J}{\partial K_L^2} & \frac{\partial^2 J}{\partial K_L \partial X_S} \\ \frac{\partial^2 J}{\partial X_S \partial P_{MP}} & \frac{\partial^2 J}{\partial X_S \partial K_L} & \frac{\partial^2 J}{\partial X_S^2} \end{bmatrix}$$

(16)

步骤4 求 $\boldsymbol{p}_l = -\boldsymbol{H}_l^{-1} \boldsymbol{g}_l$ 。

步骤5 进行一维搜索，求 α_l ，使得 $\min_{\alpha_l} J(\boldsymbol{\theta}_l + \alpha_l \boldsymbol{p}_l)$ 。

步骤6 计算 $\boldsymbol{\theta}_{l+1} = \boldsymbol{\theta}_l + \alpha_l^* \boldsymbol{p}_l$ 。

步骤7 检查迭代终止条件，若满足则输出并且停止计算，否则转步骤8。

步骤8 置 $l=l+1$ ，转步骤2。

4 仿真算例

选取 IEEE-9 节点系统作为算例系统，如图2所示。节点5、6、8为负荷节点，均采用SLM，其参数如下：电动机比例 $P_{MP}=0.5$ ，初始负载率 $K_L=0.468$ ，定子电抗 $X_S=0.18$ ，转子电阻 $R_r=0.02$ ，转子电抗 $X_r=0.12$ ，激磁电抗 $X_m=3.5$ ，惯性时间常数 $T_j=0.5\text{ s}$ ，转矩方程常数 $A=0.85$ 、 $B=0$ 。除了惯性时间常数外，其余均为标么值。

系统扰动为：节点8和9之间线路的中点发生瞬时性三相短路故障，0.06 s之后消失。

选取负荷节点5的 P_{MP} 、 K_L 、 X_S 为待辨识参数，取值范围分别为0.07~0.20、0.1~0.8、0.25~0.80。参数辨识采用基于二阶灵敏度的牛顿法，在步骤2和步骤5均需调用BPA程序计算观测变量的动态仿真曲线。取不同的参数初始值，所得辨识结果如表1所示。

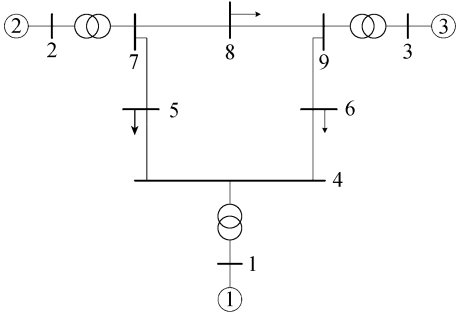


图2 算例系统示意图

Fig. 2 Sketch map of calculation system

表 1 牛顿法参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results of Newton method

序号	参数	初值	辨识值	偏差/%	调用 BPA 次数	序号	参数	初值	辨识值	偏差/%	调用 BPA 次数
1	P_{MP}	0.10	0.490	-2.00	288	5	P_{MP}	0.80	0.490	-2.00	290
	K_L	0.25	0.462	-1.28	288		K_L	0.25	0.461	-1.50	290
	X_S	0.07	0.173	-3.94	288		X_S	0.07	0.173	-3.94	290
2	P_{MP}	0.10	0.490	-2.00	290	6	P_{MP}	0.80	0.490	-2.00	289
	K_L	0.25	0.461	-1.50	290		K_L	0.25	0.461	-1.50	289
	X_S	0.20	0.173	-3.94	290		X_S	0.20	0.173	-3.94	289
3	P_{MP}	0.10	0.510	2.00	286	7	P_{MP}	0.80	0.510	2.00	287
	K_L	0.80	0.477	1.92	286		K_L	0.80	0.477	1.92	287
	X_S	0.07	0.177	-1.44	286		X_S	0.07	0.177	-1.44	287
4	P_{MP}	0.10	0.510	2.00	296	8	P_{MP}	0.80	0.510	2.00	295
	K_L	0.80	0.473	1.07	296		K_L	0.80	0.473	1.07	295
	X_S	0.20	0.187	3.83	296		X_S	0.20	0.187	3.83	295

注:迭代次数均为 7 次。

由表 1 可见:(a)采用基于二阶灵敏度的牛顿法进行参数辨识,所得参数偏差均在 4% 以内,表明该方法精度高;(b)表 1 中参数初值均为对应参数取值范围中的上限或下限,应该说与真值差距较大,而基于二阶灵敏度的牛顿法都能够获得好的结果,表明该方法鲁棒性好;(c)在参数辨识过程中调用 BPA 进行动态计算的时间占据了整个辨识算法计算时间的 90% 以上,而基于二阶灵敏度的牛顿法调用 BPA 的次数少,表明该方法所需的计算时间短。

下面进一步与粒子群算法^[14-15]进行对比。粒子群算法取粒子数为 5,辨识单参数的结果如表 2 所示。由于粒子群参数辨识法在辨识时所得的结果不稳定,表 2 中第 1 组为辨识出的最好结果,第 2 组为辨识出的普通结果。

对比表 2 和表 1 结果可以看出:(a)从辨识精度来看,粒子群算法的最好结果好于牛顿法的最好结果;(b)从鲁棒性来看,粒子群算法的辨识结果时好时差,而牛顿法的辨识结果比较稳定;(c)从计算量来看,牛顿法的迭代次数和调用 BPA 次数比粒子群算法少得多,由于调用 BPA 进行动态计算的时间占据了整个辨识计算时间的 90% 以上,这就意味着牛顿法可以显著减少计算时间。

5 结 语

采用数值方法计算电力负荷参数的一阶和二阶灵敏度,并将其引入牛顿法进行电力负荷参数辨识。算例结果表明,采用基于二阶灵敏度的牛顿参数辨识法:无论参数初值与真值偏差大还是小,所得参数偏差均在 4% 以内,其辨识鲁棒性优于粒子群算法;在参数辨识计算量方面,迭代次数和调用 BPA 次数明显小于粒子群算法,从而可以显著减少计算时间。

参考文献:

[1] KOSTEREV D N,TAYLOR C W,MITTELSTADT W A. Model validation for the August 10,1996 WSCC system outage[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(3):967-979.

[2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New york: McGraw-Hill Inc,1994.

[3] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1988.

[4] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

[5] 鞠平,谢会玲,陈谦. 电力负荷建模研究的发展趋势[J]. 电力系统自动化,2007;31(2):1-4. (JU Ping, XIE Huiling, CHEN Qian. Research tendencies of electric load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems,2007;31(2):1-4. (in

Chinese))

[6] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模[M].2 版 北京: 水利电力出版社, 2008.

[7] 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 Jinghai,HE Renmu. Measurement-based load modeling:sorting algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(2):78-82. (in Chinese))

[8] MA Jin,HE Renmu,HILL D J. Load modeling by finding support vectors of load data from field measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems,2006,21(2):726-735.

[9] BYOUNG K C, HSIAO D C, YINHONG L, et al. Measurement based dynamic load models: derivation, comparison, and validation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21 (3):1276-1283.

[10] 张红斌,汤涌,张东霞,等. 基于总体测辨法的电力负荷建模系统[J]. 电网技术,2007,31(4):32-35. (ZHANG Hongbin, TANG Yong, ZHANG Dongxia, et al. Load modeling system founded on measurement-based method [J]. Power System Technology,2007,31(4): 32-35. (in Chinese))

[11] 汤涌,张红斌,侯俊贤,等. 考虑配电网络的综合负荷模型[J]. 电网技术,2007,31(5):34-38. (TANG Yong, ZHANG Hongbin,HOU Junxian,et al. A synthesis load model with distribution network[J]. Power System Technology,2007,31(5):34-38. (in Chinese))

[12] 周海强,茆超,蔡敏,等. 考虑配电网络的综合负荷模型的可辨识性分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):16-19. (ZHOU Haiqiang,MAO Chao,CAI Min,et al. Identifiability analysis of a synthesis load model with considering distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(16):16-19. (in Chinese))

[13] 袁亚湘,孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

[14] 李丽,牛奔. 粒子群优化算法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

[15] 袁晓辉,王乘,张勇传,等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术. 2004, 28 (19): 14-19. (YUAN Xiaohui, WANG Cheng, ZHANG Yongchuan, et al. Appliactions of partical swarm optimization algorithms to power systems [J]. Power Network Technoligy, 2004, 28 (19): 14-19. (in Chinese))

· 简讯 ·

第六届江苏水论坛将在南京市召开

经江苏省水利学会八届常务理事会第二次会议研究决定,由江苏省水利学会主办的第六届江苏水论坛将于2014年11月1日在南京市召开。论坛主题:新型城镇化与水美乡村。论文撰写领域主要包括:创建水美乡村实践与思考、深化农村水利体制改革、现代农田水利建设、农村水利现代化评价、灌区管理现代化、供水工程技术与管理、农业节水关键技术、乡村河道水生态修复与环境保护、典型示范区的工程实践与管理经验总结。

会议电子文件请浏览网站:www.meeting.edu.cn(中国学术会议在线)。
(本刊编辑部供稿)