

基于粒子群进化算法的电力系统状态估计研究

闫丽梅^{1,2}, 张士元¹, 任伟建¹, 任爽¹, 薛晨光¹

(1. 东北石油大学电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318;
2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 加权最小二乘法是状态估计的常用方法,但在实际应用中经常会遇到算法发散的问题。为了解决这个问题,提出将改进的粒子群进化算法应用到状态估计当中,使加权最小二乘法的收敛性得到了很好的改善。结合 IEEE5 节点系统,给出了粒子群进化状态估计计算的三点注意事项。经试验得出,对量测点数为 16 的系统而言,计算时间在 50 s 左右,量测点数为 30 的系统的计算时间在 3 min 左右,量测点数为 80 的系统,其计算时间在 15 min 左右。这种算法可以应用在离线状态估计上。

关键词: 粒子群进化算法; 电力系统; 状态估计; 加权最小二乘法; 收敛

Power system state estimation based on particle swarm optimization algorithm

YAN Li-mei^{1,2}, ZHANG Shi-yuan¹, REN Wei-jian¹, REN Shuang¹, XUE Chen-guang¹

(1. School of Electrical Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The least robustness square method is a common method in power system state estimation, but we find that it is difficult to solve the problem of divergence in practical applications. To solve this problem, an improved particle swarm optimization algorithm is applied to state estimation and it can help with the improving of convergence of least robustness square method. Combined with IEEE 5 bus system, three notes are provided in particle swarm optimization algorithm state estimation. The experiment proves that the calculation time is about fifty seconds for sixteen points system and the calculation time is about three minutes for thirteen points system and fifteen minutes for eighty points system. This method can be applied to out-line state estimation.

Key words: particle swarm optimization algorithm; power system; state estimation; least robustness square method; convergence

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0086-04

0 引言

电力系统调度中心需要准确掌握电力系统的运行状态,为下一步的决策提供依据,使电力系统能够安全、稳定运行。建立可靠而完整的实时数据库,通常有两条途径:从硬件的途径可以增加量测设备和远动设备,并提高其精度、速度与可靠性;从软件的途径,可以采用现代的状态估计技术,对数据进行实时处理。但是对量测与远动设备提出过高的要求会导致技术和经济上付出过大的代价。如果在具备一定水平的硬件基础上,采用状态估计技术则能充分发挥已有硬件设备的潜力,提高数据的精度,

补充测点和量测项目的不足,排除偶然的错误信息和数据,提高整个数据系统的质量与可靠性^[1]。

电力系统最小二乘法状态估计的关键是对一组多元非线性方程组进行求解。状态估计方法很多^[2-7],其中最常用的是加权最小二乘法。加权最小二乘法基本原理是找到一组状态量,使其得到的网络功率与量测量的方差的和最小。加权最小二乘法的求解可以看成是对一个目标函数的优化问题,传统方法有牛顿迭代法、最速下降法、共轭梯度法等,一般用牛顿迭代法求解。这些方法的优点是计算速度快,但他们都存在致命的缺点,即对方程组要求有较好的解析性。以牛顿迭代法为例,其算法要求先输入初值,然后通过迭代逐渐得到接近真实值的近似解。当方程组形式复杂,解析性较差时,会出

基金项目: 黑龙江省普通高校骨干教师创新能力资助计划 (1152G003)

现算法发散的问题。由于初值与真实值之间情况复杂, 迭代过程很可能将计算带到远离真实值的方向。如果输入的初值与真实值很接近, 算法才有可能收敛。而在最小二乘法状态估计中, 非线性方程组正符合结构复杂、解析性较差的情况, 因此采用牛顿迭代法对状态估计进行求解有一定的困难。

为了解决此问题, 本文提出利用粒子群进化算法改进收敛性的电力系统状态估计。

1 加权最小二乘法状态估计的发散性

加权最小二乘法是状态估计常用方法, 尤其适用于高压输电网。由于电网中电压的相位角难以测量, 而功率容易测量, 因此电力系统的量测量大多数为节点及支路的有功功率和无功功率, 将其设为 Z , 各节点的电压幅值和相位角称为状态量, 将其设为 X , 量测权重为 w , 是量测精度的反映, 设 $h(X)$ 为节点及支路的功率方程, 状态估计的原理是找到一组状态量 X , 目标函数 $J(X)$ 为

$$J(X) = w(Z(X) - h(X))^2 \quad (1)$$

目的是使目标函数的值最小^[7]。求此函数的最小值可以对目标函数求偏导, 即:

$$\frac{\partial J(X)}{\partial X_i} = 0 \quad (2)$$

这是一个多元非线性方程组, 对其求解常采用牛顿迭代法。

在实际编程求解时发现, 牛顿迭代法对初值的精度有一定的要求。由于状态估计方程组形式较复杂, 这使得牛顿迭代法对初值的要求更加苛刻, 只有在所给的初值和实际值非常接近时迭代才收敛, 偏差稍大就会引起迭代发散, 这是采用牛顿迭代法所不可避免的问题, 状态估计时又不可能不断的试值, 这就要求找到一种更加有效的方法来解决收敛问题, 使算法对初值的敏感度降低。

状态估计的关键是对目标函数的优化问题。粒子群进化算法可以很好地解决目标函数的优化问题, 因此可以在状态估计中采用粒子群进化算法, 使整个算法的收敛性得到提高。

2 粒子群进化算法

粒子群进化算法最早是 1995 年提出的, 其基本思想是受鸟类的群体行为的启发。粒子群进化算法模拟鸟类飞行, 采用“群体”与“进化”的概念, 依据个体的适应值大小进行操作, 能够有效解决目标函数优化问题^[8-12]。此方法对初值要求不高, 将其应用到加权最小二乘法的求解当中, 可以使加权

最小二乘法的收敛性得到改善。

粒子群进化算法的基本思想是: 开始时每一只鸟均无特定目标飞行, 直到有一只鸟飞到栖息地, 当期望栖息比期望留在鸟群中的适应值大时, 每一只鸟都将离开鸟群而飞向栖息地。鸟类使用简单的规则确定飞行方向和飞行速度。当一只鸟飞离鸟群飞向栖息地时, 将导致周围的鸟也飞向栖息地。这些鸟一旦发现栖息地将降落在此, 驱使更多的鸟落在栖息地, 直到整个鸟群落在栖息地^[8-12]。

粒子群进化算法将每个个体看作是在 n 维搜索空间中的一个微粒, 该微粒在搜索空间中以一定的速度飞行。飞行速度由个体和群体的飞行经验进行动态调整。

设 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 为微粒 i 的当前位置; $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 为微粒 i 的当前飞行速度; $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$ 为微粒 i 所经历的最好位置, 粒子群算法的进化方程可描述为:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (3)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (4)$$

其中: c_1 、 c_2 为加速常数, 通常在 0~2 之间取值; r_1 、 r_2 是 0~1 间的随机数; ω 是一非负数, 称动力常量, 控制前一速度对当前速度的影响。 ω 较大时, 前一速度影响较大, 全局搜索能力较强; ω 较小时, 前一速度影响较小, 局部搜索能力较强。通过调整 ω 的大小来跳出局部极小值。

从进化方程可以看出, c_1 调节微粒飞向自身最好位置方向的步长, c_2 调节微粒飞向全局最好位置方向的步长。为减少微粒在进化过程中离开搜索空间的可能性, v_{ij} 通常限定在一定的范围内, 即 $v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ 。

适合电力系统状态估计的粒子群算法的流程如下:

step1, 对粒子群的随机位置和速度进行初始化;

step2, 计算每个微粒的适应值;

step3, 对于每个微粒, 将其适应值与所经历过的最好位置 p_i 的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当前的最好位置;

step4, 对于每个微粒, 将其适应值与全局所经历的最好位置 p_g 的适应值进行比较, 若较好, 则将其作为当前全局的最好位置;

step5, 根据进化方程对微粒的位置和速度进行

进化;

step6, 根据进化方程对式 (3) 的位置和加速度进行进化;

step7, 如未达到结束条件返回 step2。

3 粒子群进化算法在状态估计中的应用

加权最小二乘法的目标函数表示网络状态量与真实量之间的相似度。由于量测系统存在误差, 因此只能得到近似的网络状态量。当一个网络有几十个量测量时, 目标函数是几十个加权差平方后的和。如果这个和很小, 说明此时的状态量以十分接近网络真实状态量。粒子群进化算法中的适应值就是这个和。在算法初始化阶段, 将网络各节点的电压相角和电压幅值的未知量设为微粒的初始位置, 通常电压相角为零, 电压幅值为平衡节点的电压幅值。设置完初始值后开始进行适应值计算、进化。设置算法的结束值, 即当全局最小适应值小于某个值时可视为算法结束。一般可将此值设为 0.05~0.1 之间。以图 1 的 IEEE5 节点系统^[13]为例对此问题进行说明。

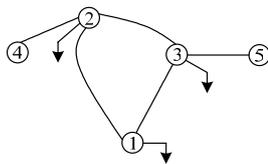


图 1 IEEE5 节点系统

Fig.1 IEEE5 nodes system

如图 1 所示, 1, 2, 3 为 PQ 节点, 各点的负荷分别为: $S_1=1.6+j0.8$, $S_2=2+j1$, $S_3=3.7+j1.3$, 4 为 PV 节点, $P_4=5$, $U_4=1.05$, 节点 5 为平衡节点, 电压幅值为 1.05, 相角为 0。选择 P24、Q24、P23、Q23、P35、Q35、P12、Q12、P13、Q13、P2、Q2、P3、Q3、P1、Q1 作为量测点进行状态估计, 此时系统的状态量个数为 8, 即待求未知量分别为 v_1 , v_2 , v_3 , v_4 , θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 。

初值设定如表 1 所示。

表 1 初值设定

Tab.1 Initial value setting

电压	v_1	v_2	v_3	v_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
标么值	1	1	1	1	0	0	0	0

依据牛顿迭代法原理进行编程调试发现此时算法发散, 程序调试界面如图 2 所示。

IEEE5节点系统状态估计结果				
算法发散! 数据溢出				
节点编号	电压幅值	电压相角	幅值差	相角差
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	1.0500	0.0000	0.0000	0.0000

图 2 牛顿迭代法结果

Fig.2 Result of Newton iterative method

此时调整程序初值, 调整后的初值如表 2 所示。此时再经过调试, 算法得到收敛, 调试界面如图 3 所示。

表 2 调整后的初值

Tab.2 Initial value after adjusting

电压	v_1	v_2	v_3	v_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
标么值	0.86	1.07	1.04	1.032	-0.08	0.32	-0.07	0.38

IEEE5节点系统状态估计结果				
算法收敛! 迭代次数为374次				
节点编号	电压幅值	电压相角	幅值差	相角差
1	0.8625	-0.0827	0.0000	0.0000
2	1.0752	0.3126	0.0000	0.0000
3	1.0362	-0.0752	0.0000	0.0000
4	1.0448	0.3813	0.0000	0.0000
5	1.0500	0.0000	0.0000	0.0000

图 3 调整初值后的结果

Fig.3 Result of adjusting initial value

以上结果与系统的真实值十分接近, 收敛速度较快, 在 2 s 内得到了结果。但在设定初值时经过了许多次试验才使算法收敛, 其实此时的初值已经比较接近真实值了。一般电力系统计算的初值都选取平衡节点的电压幅值和相角, 但在牛顿迭代法状态估计中显然是行不通的。试验发现, 只要设定的初值与真实值偏差超过 0.2, 算法就会发散。

下面应用粒子群进化算法对最小二乘法状态估计进行求解。其原理是将方程组转化为求极值问题。

将初值设定为平衡节点电压幅值和相角如表 3

所示。

表 3 粒子群进化算法初值

Tab.3 Initial value of particle swarm optimization algorithm

电压	v_1	v_2	v_3	v_4	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
标么值	1	1	1	1	0	0	0	0

经过编程调试发现在此初值下可以得到理想的解。程序调试界面如图 4 所示。

该算法得到的结果与真实值十分接近, 是实际的理想结果。

采用粒子群进化算法后, 结果对初值的要求没有牛顿法那么高, 收敛性得到明显改善。该算法的缺点是计算时间长。经试验得出, 对量测点数为 16 的系统而言, 计算时间在 50 s 左右, 量测点数为 30 的系统的计算时间在 3 min 左右, 量测点数为 80 的系统, 其计算时间在 5 min 左右。计算时间会随着量测点数的增长而增加, 但增加趋势平缓。

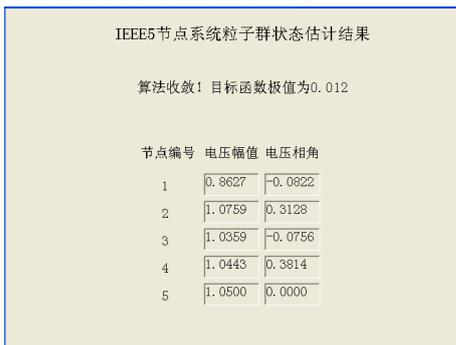


图 4 粒子群进化算法结果

Fig.4 Result of particle swarm optimization algorithm

粒子群进化状态估计想要得到理想的结果, 有几点需要注意。第一, 初始化时不能以随机数作为初始化数据, 如果以随机数作为初始化数据, 会在搜索空间的局部得到解, 那可能不是我们想要的解。要以平衡节点电压幅值和相角作为初始化数据, 这样会得到平衡节点附近的解, 这符合电力系统特点, 得到的是符合实际的理想的解。第二, 种群的规模及进化步数要适宜。一般来说, 种群规模在 100 附近, 进化步数在 500 附近, 这样就可以得到理想的解。第三, 进化程序中的两个加速常数 c_1 和 c_2 的设置要合理。经过试验得到合理的加速常数一般将其设定在 1.8~2.1 之间的任意值。

4 结论

电力系统状态估计本身是一个十分庞大的课题。电力系统状态估计分为在线系统和离线系统。在线系统对计算速度有较高的要求。不管是传统的

最小二乘法还是快速分解法, 算法收敛性都是难点。

(1) 采用粒子群进化算法的状态估计能有效解决算法不收敛的问题, 但计算时间会增加很多。离线系统对计算速度要求相对宽松, 因此目前这种算法可以应用在离线状态估计上。

(2) 给出了适合电力系统状态估计的改进的粒子群进化算法; 结合 IEEE5 节点系统, 给出了粒子群进化状态估计计算的三点注意事项。

参考文献

- [1] 刘辉东, 刘天琪. 电力系统状态估计的研究现状和展望[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (12): 73-77. LIU Hui-dong, LIU Tian-qi. Reliability assessment of wind power generation system based on Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (12): 73-77.
- [2] 蔡昌春, 丁晓群, 王斌. 基于改进最小二乘法的电力系统状态估计[J]. 浙江电力, 2006, 10 (4): 6-9. CAI Chang-chun, DING Xiao-qun, WANG Bin. State estimation of power system based on improved least-squares algorithm[J]. Zhejiang Electric Power System, 2006, 10 (4): 6-9.
- [3] 王冰, 李积捷, 王春瑛, 等. 基于改进 IGGIII 和快速分解法的电力系统状态估计算法[J]. 继电器, 2008, 36 (11): 1-5. WANG Bing, LI Ji-jie, WANG Chun-ying, et al. State estimation algorithm based on the improved method of IGGIII and fast decoupled arithmetic[J]. Relay, 2008, 36 (11): 1-5.
- [4] 华国栋, 应剑烈, 刘耀年, 等. 基于分布式抗差最小二乘法的状态估计[J]. 东北电力大学学报, 2008, 28 (1): 60-66. HUA Guo-dong, YING Jian-lie, LIU Yao-nian, et al. State estimation with the least robustness square method based on distribution[J]. Journal of Northeast Electrical Power University, 2008, 28 (1): 60-66.
- [5] 卫志农, 周奕, 李阳林. 基于信息融合理论的动态状态估计探讨[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 103-108. WEI Zhi-nong, ZHOU Yi, LI Yang-lin. Discussion on dynamic state estimation based on information fusion theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (4): 103-108.
- [6] 李阳林, 卫志农, 万军彪. 一种新的分布式电力系统状态估计算法[J]. 继电器, 2007, 35 (20): 13-17. LI Yang-lin, WEI Zhi-nong, WAN Jun-biao. A new algorithm for the distributed state estimation of power system[J]. Relay, 2007, 35 (20): 13-17.
- [7] 黄彦全. 电力系统状态估计若干问题的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.

(下转第 95 页 continued on page 95)

- conditions[C]. //IEEE PES Transmission and Distribution Conference. 2006.
- [9] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 29-54.
WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui, et al. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 29-54.
- [11] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 小波变换在电能质量分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (23): 55-58.
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Application of wavelet transform in power quality analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (23): 55-58.
- [12] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与MATLAB R2007实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [13] 周文晖, 李青, 周兆经. 采用小波多分辨率信号分解的电能质量检测[J]. 电工技术学报, 2001, 16 (6): 81-84.
ZHOU Wen-hui, LI Qing, ZHOU Zhao-jing. Power quality detection using waveletmultiresolution signal decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16 (6): 81-84.
- [14] 王继东, 王成山. 基于小波变换的电容器投切扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (5): 20-23.
WANG Ji-dong, WANG Cheng-shan. Capacitor switching disturbance source locating based on wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (5): 20-23.
- [15] 熊玲玲, 刘会金, 傅志伟. 基于小波包变换的电压骤降信号分析[J]. 继电器, 2004, 32 (11): 8-12.
XIONG Ling-ling, LIU Hui-jin, FU Zhi-wei. Voltage sag analysis based on wavelet package transform[J]. Relay, 2004, 32 (11): 8-12.

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2009-12-23

作者简介:

杨杰(1966-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高电压技术、电力系统分析与控制;

王金浩(1975-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统、电能质量分析与控制;

章雪萌(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究电能质量的监测与评估。E-mail: zxm0804@163.com

(上接第 89 页 continued from page 89)

- HUANG Yan-quan. Research on some problems of state estimation of power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [8] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6 (5): 87-94.
YANG Wei, LI Qi-qiang. Survey on particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Engineering, 2004, 6 (5): 87-94.
- [9] 陈建华, 李先允, 邓东华, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(23): 77-84.
CHEN Jian-hua, LI Xian-yun, DENG Dong-hua, et al. A review on application of particle swarm optimization in electric power systems[J]. Relay, 2007, 35 (23): 77-84.
- [10] 马豫超, 侯志俭, 蒋传文, 等. 基于粒子群算法求解电力市场发电商最优供给函数模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 35-39.
MA Yu-chao, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen, et al. POS algorithm based optimal supply function model for power producer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 35-39.
- [11] 张振宇, 葛少云, 刘自发. 粒子群优化算法及其在机组优化组合中应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 33-38.
ZHANG Zhen-yu, GE Shao-yun, LIU Zi-fa. Particle swarm optimization algorithm and its application in unit commitment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 33-38.
- [12] 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 Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Yong-chuan, et al. A survey in application of particle swarm optimization to electric power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.
- [13] 杨帮宇, 彭建春, 龚演平, 等. 线路潮流转归分量及其在固定成本分摊中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14): 46-50.
YANG Bang-yu, PENG Jian-chun, GONG Yan-ping, et al. Imputation of branch power flow method and its application in allocation of fixed cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14): 46-50.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2009-11-27

作者简介:

闫丽梅(1971-), 女, 副教授, 博士后, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: yanlimei@yahoo.cn

张士元(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。