

基于动态惯性权重粒子群算法的配电网状态估计

尹 专, 刘天琪, 江东林

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 配电网单条馈线节点少、支路少, 常采用加权最小二乘法对配电网各条馈线分别进行状态估计。但由于牛顿法对初值要求高, 易发散, 为此采用动态惯性权重粒子群算法对配电网进行状态估计。该算法能自动调节搜索步长, 加快收敛速度, 弥补了基本 PSO 算法易陷入局部最优、算法不稳等不足。4 节点算例证明该算法可稳定快速收敛, 即使初值偏离真值较远也能有效、快速收敛; IEEE 33 节点算例证明了该算法运用于配电网状态估计时收敛速度快、精度高。

关键词: 惯性权重; 粒子群优化; 状态估计; 配电网

Abstract: The feeder of distribution network has less node and branch, so the state estimation of each feeder in distribution network often adopts the weighted least squares method respectively. But Newton's law requires high initial values and it is prone to divergence, so the particle swarm algorithm with a dynamic inertia weight is adopted for state estimation of distribution network. This algorithm can automatically adjust the search step length, speed up the convergence rate, and make up the defects of the basic particle swarm optimization (PSO) algorithm which is unstable and easily plunge into the local optimum. 4-node examples show that the algorithm can be stable and fast convergence, even if the initial value deviates from the true value. IEEE 33-bus examples show that the algorithm has a fast convergence rate and high accuracy when applying to the state estimate of distribution network.

Key words: inertia weight; particle swarm optimization; state estimation; distribution network

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)06-0023-04

0 引 言

随着电力工业的迅速发展, 电力系统的结构和运行方式日趋复杂, 电力系统调度中心的自动化水平也由低级向高级发展。调度中心要实现对电网的监测、跟踪以及分析和实时处理需要全面、准确的电网运行数据, 高质量的状态估计是实现调度中心高级功能的保障。

配电网与输电网不同, R/X 较大, 这就让很多适用于输电网的状态估计算法无法直接运用于配电网, 如 PQ 分解法。而且配电网没有配置 PMU、无功角量测量, 且量测点配置不足。常有的量测量有节点电压幅值、节点注入功率、支路电流幅值、支路功率, 在量测量不满足计算需要时还会补充预测负荷数据等伪数据。

目前已有些针对配电网特点的算法^[1-3], 常用的有加权最小二乘法、量测量变换法、支路功率法等

方法。文献 [1] 是经典的加权最小二乘法 (weighted least square, WLS), 该方法能最大限度地利用量测量, 而且计算小网络的速度快, 估计质量高。文献 [2] 将支路电流作为状态量, 其他非电流量测量都转换为电流量测量, 且可三相解耦, 计算效率很高, 但是节点电压幅值量测不能利用, 要求 P 和 Q 成对出现, 在目前, 中国配电自动化配置中不易满足。文献 [3] 根据配电网辐射状层次结构的特点将配电网辐树状结构分解为多条树枝, 然后进行单条支路 WLS 估计, 但根节点电压的正确性将严重影响计算结果。文献 [4] 提出了基于基本粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 的状态估计, 该算法使用最小残差模型进行计算, 克服了牛顿迭代对初值要求较高的弱点, 能有效迭代收敛。文献 [5] 对 PSO 算法进行改进, 引入了自适应免疫算法, 加强 PSO 的全局搜索能力, 但由于复杂的操作过程增加不少计算时间。

这里采用动态改变惯性权重粒子群算法^[6]求

解带约束的最小残差模型,仍以节点电压幅值和电压相角为状态量,对每条馈线分别进行估计,以克服对迭代初值要求高的弱点,大大改善了粒子群算法的收敛性。4 节点算例说明改进后的 PSO 能在初值偏差真值很远的条件下快速有效收敛,并且性能稳定;IEEE 33 节点算例说明改进后的 PSO 用于配电网计算中,收敛迅速,精度高。

1 配电网状态估计

1.1 状态估计模型

在给定网络结构、支路参数和量测系统的条件下,反应其相互关系的量测方程为

$$z = h(X) + v \quad (1)$$

其中, z 为量测量,包括电压量测、节点注入功率量测、支路功率量测等; x 为状态变量,这里采用节点电压幅值和相位角; v 为量测误差。由于测量装置的误差,量测量往往精度不够,数据不能相容,不能直接运用于计算分析,需要进行状态估计。

1.2 基于加权最小二乘法的状态估计

配电网有多条馈线,每条馈线可以单独作为一个小网络分别进行状态估计。工程上考虑小型机速度快、内存大且计算网络小,采用加权最小二乘法进行配电网状态估计,算法编程简单,收敛可靠,充分使用量测量,计算速度快、估计质量高^[1]。该算法的目标函数如下。

$$\min: J(x) = w [z(x) - h(x)]^2 \quad (2)$$

由于 $h(x)$ 为 x 的非线性矢量函数,无法直接算出 x ,采用牛顿法迭代求解。得到迭代公式如下。

$$x^{(l+1)} = x^{(l)} + [H^T(x^{(l)}) R^{-1} H(x^{(l)})]^{-1} H^T(x^{(l)}) R^{-1} [z - h(x^{(l)})] \quad (3)$$

其中, $H(x)$ 为量测雅克比矩阵; R 为权重矩阵; z 为量测量矩阵; $h(x)$ 为状态量测量矩阵。

但牛顿法求解对迭代初值要求较高,如果初值离正确值相差太远则不能准确收敛,甚至发散^[2]。

2 粒子群算法

2.1 基本粒子群算法

粒子群算法(PSO)^[3] 是一种进化计算技术,1995 年由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士提出,源于对鸟群捕食的行为研究。粒子通过自身寻找和相互

间传递信息,在适应度的引导下寻找到最优解。粒子群优化算法通过迭代找到最优解,在每一次迭代中,粒子通过跟踪个体最优值和全局最优值来更新自己。

粒子更新速度 v 和位置 x 分别为

$$v_i^{t+1} = \omega \times v_i^t + c_1 \times r_1 \times (pbest_i^t - x_i^t) + c_2 \times r_2 \times (gbest^t - x_i^t) \quad (4)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (5)$$

式中, ω 是加速项的惯性权重; c_1 、 c_2 叫做学习因子,为非负常数; r_1 、 r_2 是介于 $[0,1]$ 之间的随机数; $pbest$ 为个体最优极值; $gbest$ 为全局最优极值。

2.2 动态改变惯性权重的粒子群算法

采用粒子群算法进行计算虽然对计算初值要求不高,但基本粒子群算法在计算早期收敛速度很快,算法后期收敛速度缓慢,局部搜索能力差,求解精度不高。经改进后的粒子群算法可以稳定可靠收敛,使估计质量得到提高。

粒子群算法中的 ω 使微粒保持运动惯性,具有扩展搜索空间的趋势,并且有探索新的区域的能力;较大的惯性权值有利于全局开发,而较小的惯性权值有利于局部探测。

有研究提出在运算中采用惯性权值递减策略,使得搜索步长逐渐减小,迭代慢慢收敛到极值点,这种方法的优点是能在搜索初期保持粒子的全局搜索能力,而在搜索过程中加强粒子的局部搜索能力,能在一定程度上加快收敛速度并改善收敛精度,但是对于多峰函数,这种算法一旦进入到局部极值点邻域就很难跳出来,极易收敛到局部极值点。

采用文献[10]的动态改变惯性权重的策略改进 PSO 算法,使 w 随着搜索位置动态改变而不是简单地随着搜索过程线性递减,充分利用目标函数信息,增强搜索方向的引导作用。通过动态改变权重实现粒子速度的调节,控制粒子的搜索范围,既不影响粒子的全局搜索能力又能提高粒子的局部搜索能力。

迭代公式中增加权重的迭代公式为

$$\omega^t = e^{-a^t/a^{t-1}} \quad (5)$$

$$a^t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f(X_i^t) - f(X_{\min}^t)| \quad (6)$$

式中, a^t 是判断目标函数的平整度,每次迭代都根据目标函数值进行变化,跟粒子所处位置有关。 a^t/a^{t-1} 反应粒子群整体的收敛性,比值大于 1 时说明

处于发散状态,而此时的 ω' 会比较小,搜索步长较小,促使算法快速收敛;如果比值小于 1 说明处于收敛状态,比值越小 ω' 越接近 1,而搜索步长越长, a' 减小得越快,说明收敛速度越快,而此时保持较长的步长可以使算法不易陷入局部极值。

改进后的粒子群算法应用于状态估计,可以在计算开始时加速搜索全局最优值,在靠近极值时通过调整惯性权重可以缩小搜索步长实现精细搜索,这样计算得到的状态估计结果质量高、速度快。

3 基于改进粒子群算法的配电网状态估计

这里以节点电压幅值 V 和相角 θ 为状态量,求解目标函数 $J(x)$ 。粒子群算法中粒子 x_i 代表状态量 V 和 θ ,速度 v_i 代表迭代过程中状态量的修正量,全局极值 g_{best} 代表目标函数 $J(x)$ 。求解过程的流程图如图 1 所示。

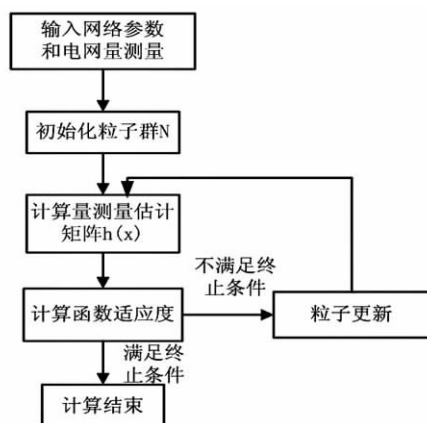


图 1 基于改进粒子群算法的流程图

具体求解步骤如下。

(1) 输入网络参数,进行电网拓扑分析;输入电网量测量;

(2) 初始化粒子群 N ,粒子位置 x_i 的每一维分别代表节点电压幅值 V 和相角 θ (参考节点只有电压幅值参与迭代),代表电压幅值的取网络的节点电压量测量,如果某个没有节点电压测量数据则以电网额定电压代替,电压相角的初始值为 0,粒子速度 v_i 随即初始化;

(3) 根据粒子的位置 x_i 计算估计量测量矩阵 $h(x)$;

(4) 计算函数适应度,求出当前全局最优值 g_{best} ,如果满足阈值或者迭代次数超过设定值则结束迭代,不满足要求则更新粒子的惯性权重 ω' 和粒

子的速度 v_i 、位置 x_i ,进入迭代循环。

4 算例分析

首先采用文献 [1] 中 4 节点算例比较 PSO 算法和改进后的 PSO 算法进行状态估计的性能,以牛顿法迭代初始化的电压幅值 112.15 kV、电压相角 0 初始化基本 PSO 和改进 PSO 的粒子群,计算结果见表 1。

表 1 两种算法收敛时间比较

算法	第 1 次	第 2 次	第 3 次	百次平均计算时间
基本 PSO	0.216	0.217	0.407	0.253
改进 PSO	0.188	0.191	0.159	0.185

可见基于动态惯性常数的 PSO 算法在收敛速度上比基本 PSO 算法优越很多。文献 [4] 已分析牛顿法对迭代初值的要求很高,此处分析在初值不合理的情况下基本 PSO 和改进 PSO 算法性能的比较,设置最大迭代次数调为 5 000 次,初始化时将粒子群的所有粒子代表的电压值由 112.15 kV 降至 80 kV,代表的电压相角依然为 0。估计结果如表 2(表中采用初值为 112.15 kV 的牛顿法作为参考)。

表 2 两种算法结果及计算时间比较

	牛顿法	基本 PSO	改进 PSO
节点 1 电压幅值	111.47	111.71	111.59
节点 2 电压幅值	110.34	110.58	110.46
节点 2 电压相角	-0.006 9	-0.007 0	-0.007 0
节点 3 电压幅值	111.70	111.97	111.85
节点 3 电压相角	0.0141	0.0143	0.0143
节点 4 电压幅值	112.32	112.75	112.68
节点 4 电压相角	0.1379	0.1405	0.1399
迭代时间 /s	—	0.289	0.223

节点 1 为参考节点,其相角不参加迭代。由表 1 可见,改进后的 PSO 算法状态估计结果比基本 PSO 的结果更接近牛顿法结果,精度高;收敛速度也比基本 PSO 快。

采用 IEEE 33 节点算例进行配电网状态估计,评估计算配电网的精度和收敛速度。

前推回代法计算得到的数据只有电压幅值,没有电压相角。基于动态改变惯性权重的粒子群算法可以更为精确地得到配电网数据,计算结果包括节点电压幅值和电压相角。

图2是改进粒子群算法状态估计后和前推回代法计算得到的各节点电压偏差比较。图3是关于改进粒子群算法状态估计结果中的节点电压幅值。图4是改进粒子群算法每次迭代函数适应度的曲线。

由图2可得改进粒子群算法得到的状态估计结果与前推回代法得到的各节点电压偏差并不大,说明该算法状态估计质量高。之所以会出现偏差是因为状态估计时结果会计算出各节点电压相角,而传统的前推回代法是忽略相角变化,所以本算法结果更加精确。

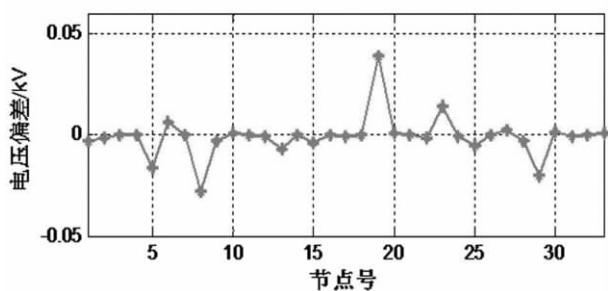


图2 各节点电压偏差比较

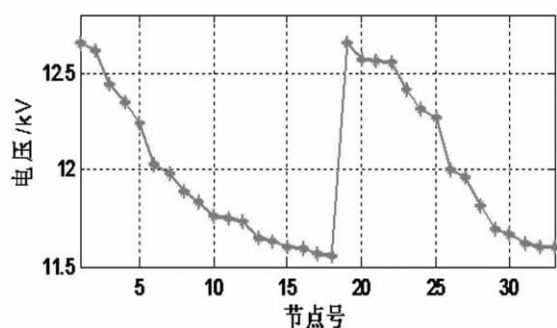


图3 各节点电压幅值

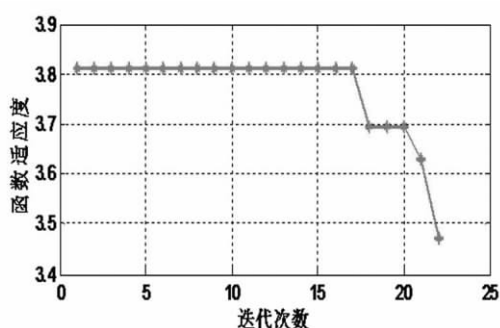


图4 函数适应度曲线

图3中各个点代表各节点的电压,是基于动态惯性权重粒子群算法进行状态估计后的结果。

由图4可得在迭代初期粒子群处于发散状态,当搜索到极值的正确方向后,粒子群迅速收敛,迭代次数不到25次。抽样100次实验中,改进后的粒子群算法能在迭代40次内收敛,而基本粒子群算法迭

代1000次都不能完成收敛,可见改进后的粒子群算法在收敛速度和计算精度方面表现都非常好,完全优于基本粒子群算法。

5 结 语

(1) 基于动态惯性权重的粒子群算法能根据粒子的位置和目标函数的性质而动态改变粒子的搜索步长,能加快收敛速度,使迭代次数大幅减小;同时有利于函数摆脱局部极值,搜索全局最优点;

(2) 改进后的粒子群算法对初值并不敏感,能有效搜索到全局最优点;

(3) 对于配电网,改进 PSO 可以在极短时间内完成搜索过程,相对于基本粒子群算法,在收敛速度和精度方面都非常优越,提高了粒子群算法的状态估计质量;

(4) 改进后的粒子群算法仍需要进一步完善。有不良数据的存在时,计算结果依然不能满足要求。这是因为状态估计模型以最小残差为目标,如果存在坏数据,为了降低残差只能以牺牲其他数据的准确度换取整体残差降低。粒子群算法无法智能识别坏数据。

参考文献

- [1] Li K. State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impacts [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 911-916.
- [2] Baran M E, Keley A W. A Branch-current-based State Estimation Method for Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 483-491.
- [3] Deng Y M, He Y, Zhang B M. Branch-estimation-based State estimation for radial Distribution Systems [C]. In: Power Engineering Society Winter Meeting IEEE [C]. 2000; 2351-2356.
- [4] 闫丽梅, 张士元, 任伟建, 等. 基于粒子群进化算法的电力系统状态估计研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 86-90.
- [5] 黄若霖, 王宽, 詹开翔. 基于自适应免疫粒子群优化算法的配电网状态估计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 54-58.
- [6] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 基于支路功率的配电状态估计方法 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 12-16.
- [7] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电匹配潮流技术及其在配

(下转第35页)

被迫从电网吸收了谐波功率,虽然谐波功率对于线性负载而言是不希望并且有害的,但是计量时线性负载从电网吸收的总功率是其吸收的基波功率和吸收的谐波功率之和,计量功率增大。所以,这种计量方式下,使非线性负载的谐波源用户由于向电网注入了谐波功率而少交电费,线性负载用户由于被迫从电网吸收了谐波功率而多交了电费,显然是不合理的,变相地鼓励了谐波源用户,使计量不公平。

3 电网谐波下电能计量模式的探讨

从前面的分析知道,在电网电压和电流发生畸变存在谐波成分时,不仅存在基波功率,还有谐波功率,而谐波功率流向可能与基波功率流向相同,也可能相反。为了能准确真实地反应各种负载消耗的电能,在电网存在谐波情况下,应该对基波电能和谐波电能都要进行计量。这要求电能表不仅要能计量基波电能,还要能计量谐波电能,同时还要能显示谐波电能的流向,这样电力系统可以区分谐波源用户和非谐波源用户,按照相关政策法规要求谐波源用户采取相应的谐波抑制措施,保证供电质量。

但是目前的大多数电能表技术水平,无法区分基波电能和谐波电能,也无法判定谐波电能的流向。在这种情况下,可以采取基波电能表和全波电能表结合的方式进行电能计量。由于全波电能表能计量基波电能和全部谐波电能,基波电能表能计量基波电能,全波电能表和基波电能表的计量差值,即为谐波电能值。如果二者差值为正,表明该用户为非谐波源用户,它从电网吸收了有害的谐波;如果差值为负,表明该用户为谐波源用户,它向电网注入了有害

的谐波。

当然,这种办法无法消除谐波对电能表本身造成的计量误差,所以最根本的办法是根据计量情况,要求谐波源用户进行谐波治理,消除电网中的谐波。

4 结 语

非线性负载接入电路,将引起电路电压和电流波形畸变,产生谐波。对谐波在线路和负载上产生的附加谐波功率进行了分析,讨论了谐波对感应式和电子式电能表的计量精度影响,以及由谐波引起的不公平计量问题,并提出了目前谐波情况下提高电能计量精度的措施。

参考文献

- [1] 李军浩,胡泉伟,吴磊,等. 电网谐波对电能计量影响的仿真分析 [J]. 陕西电力,2011(6):1-5.
- [2] 张鹏,向铁元,余志华. 谐波对感应式电能表计量影响的分析及控制对策的研究 [J]. 仪器仪表用户,2004(2):4-6.
- [3] 沈华. 基于 LabVIEW 的谐波电能计量与分析系统的研究 [J]. 电测与仪表,2010,47(1):47-50.
- [4] 张卓,骆盛军. 对谐波影响下的电能计量方式的探讨 [J]. 广东电力,2002,15(4):55-57.
- [5] 卿柏元,李俊健,吴晓明,等. 非线性负荷下电能计量的实用化技术探讨 [J]. 广西电力,2010,33(5):6-9.

作者简介:

黄冰心(1979),女,工程师,主要从事电力系统生产、运行与管理工作。

(收稿日期:2012-06-15)

(上接第 26 页)

电状态估计中的应用 [J]. 电力系统自动化,1988,22(7):18-22.

[1] 高赐威,孔峰,陈昆薇. 一种配电网状态估计实用算法的探讨 [J]. 电网技术,2003,27(2):80-83.

[2] 徐得超,李亚楼,吴中习. 稀疏技术在电力系统状态估计中的应用 [J]. 电网技术,2007,31(8):32-36.

[3] 王启付,王战江,王书亭. 一种动态改变惯性权重的

粒子群优化算法 [J]. 中国机械工程,2005,16(11):945-948.

[1] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京:水利电力出版社,1995.

[2] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [J]. In: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, Perth(Australia):1995:1942-1948.

(收稿日期:2012-06-15)