

基于自适应免疫粒子群优化算法的配电网状态估计

黄若霖, 王宽, 詹开翅

(福州电业局, 福建 福州 350003)

摘要: 考虑了配电网中的一些设备如分布式发电机的非线性特性和配电网的量测配置特点, 结合粒子群优化算法(PSO)的特点, 提出了采用自适应免疫 PSO 算法来进行配电网状态估计。该算法解决了配电网状态估计中的非线性特性, 引入免疫系统的免疫信息处理机制和自动调整动量系数的自适应因子的粒子群算法, 克服了基本 PSO 算法容易陷入局部最优解的缺点, 增强了全局搜索能力, 而且收敛速度和精度都很理想。算例证实了算法的有效性, 并通过和基本粒子群算法比较显示其优越性。

关键词: 配电网; 状态估计; 粒子群优化算法

State estimation based on optimization algorithm of adaptive immune particle swarm for distribution system

HUANG Ruo-lin, WANG Kuan, ZHAN Kai-chi

(Fuzhou Electric Power Industry Bureau, Fuzhou 350003, China)

Abstract: This paper proposes an adaptive immune particle swarm optimization for a practical distribution state estimation considering a few equipment's nonlinear characteristics in the distribution such as distributing generator and measurement configuration and combining with PSO's characteristic. The proposed method solves the nonlinear characteristics of the distribution. Making use of particle swarm optimization with transacting mechanism of immune information in immune system and an adaptive factor with an ability of adjusting momentum coefficient automatically, the method conquers the disadvantage that in the original particle swarm optimization the solution is often the best in the local area and expands the ability of searching in the full area. The method also has good convergent speed and convergent precision. The applicability of the proposed method is demonstrated through the distribution model and compared with an original particle swarm optimization it shows its superiority.

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

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0054-04

0 引言

电力系统配电网的地位越来越重要, 为了配电系统运行的安全性和经济性, 并能够进行正确的分析与决策, 首先必须能够正确而全面地掌握配电网系统的运行状态。配电状态估计就是利用配电量测信息估计出高精度的、完整的、可靠的配电系统状态。配电网状态估计的结果用于配电自动化很多方面, 例如短路电流计算、网络重构、电压/无功控制等。同时状态估计减小了数据的误差, 修正了数据的错误, 提高了数据的精度, 可用于检查负荷数据, 并对负荷模型、负荷数据加以校正。目前配电网状态估计的算法很多, 最经典的方法是基本加权最小二乘法(WLS)^[1]。文献[2]提出基于三相的状态估计算法, 以节点电压的幅值和相角作为状态变量, 推导出支路功率和电流、节点注入功率和电流的量测

方程。该算法需要建立量测量的雅克比矩阵, 计算量很大。在此基础上文献[3]以支路电流为状态变量, 在实现时有着配电潮流计算类似的前推/回推计算过程, 效率很高, 但是节点电压幅值量测不能利用。文献[4]提出了基于支路估计的方法, 将整个配电网的 WLS 估计方法分解成单支路的 WLS 估计, 有效利用了配电网的特点, 但根节点电压的正确性将严重影响计算结果。文献[5]提出基于牛顿法的三相配电网状态估计算法。该算法充分利用辐射配电网的特点, 计及三相不平衡, 采用分解形式的 Jacobi 矩阵, 每步迭代时不需要重新分解。本文算法以各个节点的负荷和分布式发电机的输出作为配电网状态估计的状态量。算例表明此算法有效。

1 配电网状态估计

1.1 系统量测

(1) 实时量测

实时量测是利用数据采集与监控(SCADA)系统,从装设在馈线上的测量装置采集实时数据。配电网中可以测量到的量测量有:根节点电压、根节点注入功率、负荷功率、支路功率、支路电流幅值和节电电压等。在本算法中量测量主要来自两个方面:子变电站的二次侧母线的电压和电流的幅值以及远程控制单元(RTU)的量测电压和电流的幅值。同时采用如下几点假设。

① 子变电站的二次侧母线的发端和每个断面的功率因数都是已知的。

② 如果分布式发电机的输出是固定的,分布式发电机的输出和功率因数就能被得到;如果分布式发电机的输出是变化的,那么分布式发电机的平均输出和功率因数能被得到。

③ 每个负荷断面的约束值都是已知的。

基于以上假设,可利用图1所示的量测量进行配电网状态估计。

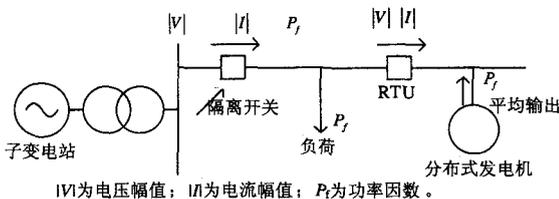


图1 量测数据配置

Fig.1 Measurement data configuration

(2) 伪量测

伪量测主要来自各用户负荷的历史数据。由于整个系统实时量测冗余度非常小,而为数众多的伪量测信息对于确定无实时量测点的状态起着至关重要的作用,所以能够决定配电网状态估计结果的有效性。

1.2 基本算法

算法采用的目标函数:

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i [z_i - h_i(x)]^2 \quad (1)$$

式(1)中: x 为状态变量(负荷的有功值和分布式发电机的有功输出); ω_i 为量测量 i 的权重; z_i 为量测量 i (电压和电流)的量测值; h_i 为量测函数。

本算法的目标函数和常规的状态估计的目标函数是一样的,不同之处是常规的状态估计的状态变量是节点的电压和电流。而在此处假设负荷的功率因数是固定不变的,因此状态变量是负荷的有功值和分布式发电机的有功输出。当分布式发电机的功

率输出值恒定不变时,分布式发电机的输出值就不能再作为状态变量。每一个状态变量都应该满足如下的约束条件:

$$x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max} \quad (2)$$

式(2)中: $x_{i,\min}$ 为状态变量 i 的最小值; $x_{i,\max}$ 为状态变量 i 的最大值。

采用前推/回代潮流计算方法来得到配电网状态估计所需的电压和电流。由于配电网的一些非线性因素,使得目标函数呈非线性,故传统的状态估计算法已经不能适应这种情形,所以必须采用新的算法。

2 自适应免疫粒子群算法

粒子群算法最初是由Kennedy和Eberhart于1995年受人工生命研究结果启发,在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为时提出的一种基于群体智能的演化计算技术^[6]。该算法可以并行处理,具有较好的鲁棒性和全局寻优能力,且计算效率比传统随机方法高。该方法最大的优势在于简单易实现、收敛速度快,而且有深刻的智能背景,既适合科学研究,又适合工程应用。在PSO算法中,用粒子的位置表示待优化问题的解,每个粒子性能的优劣程度取决于待优化问题目标函数确定的适应值,每个粒子由一个速度决定其飞行方向和速率大小^[7]。在一个 n 维的解搜索空间中,PSO初始化为一群随即粒子(m 个),称为粒子群。其中,第 i 个粒子在 n 维空间的位置用向量 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$ 表示,第 i 个粒子的个体最优解(即到当前迭代次数为止所历经的最好位置)表示为 $p_{besti} = [p_{besti1}, p_{besti2}, \dots, p_{bestin}]$,全局最优解(即整个粒子群在历代搜索中到当前代数所历经的最好位置)表示为 $g_{bestk} = [g_{bestk1}, g_{bestk2}, \dots, g_{bestkn}]$;而 x_i 的第 k 此迭代的修正量(粒子移动的速度)表示为

$v_i^k = [v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{in}^k]$,其计算公式如下

$$v_{id}^k = \omega \times v_{id}^{k-1} + c_1 \times rand_1 \times (p_{besti} - x_{id}^{k-1}) +$$

$$c_2 \times rand_2 \times (g_{best} - x_{id}^{k-1})$$

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (3)$$

式(3)中, $i=1,2,\dots,m$; $d=1,2,\dots,n$,其中, m 为粒子群中粒子的个数; n 是解向量的维数。 c_1 和 c_2 分别是两个正常数,一般都取2.0; $rand_1$ 和 $rand_2$ 是两个独立的、介于 $[0,1]$ 之间的随机数; ω 是动量项系

数,调整其大小可以改变搜索能力的强弱,一般在0.9~0.1之间。

粒子群算法需要用户确定参数较少,而且操作简单,但在计算后期收敛较慢,且容易陷入局部最优解。因此,作者把免疫系统的免疫信息机制和动态调整动量系数的自适应因子引入到粒子群算法中,以提供PSO跳出局部最优和加速收敛的能力。

免疫系统具有抗体多样性和自我调节能力^[8]。在免疫调节中,那些与抗原亲和力大并且浓度较低的抗体会受到促进,而与抗原亲和力小或浓度较高的抗体将会受到抑制,以此保证抗体的多样性;自我调节能力是免疫系统具有的维持免疫平衡的机制,通过对抗体的抑制和促进作用,能自我调节产生适当数量的必要的个体,即免疫系统在进化过程中一旦发现最优个体,在兼顾群体多样性的同时,类似个体亦将大量繁殖。把这种抗体多样性和自我调节能力特性引入到PSO算法中,可提高算法的全局搜索能力而不致陷于局部解。本文的选择策略是结合免疫机制中抗体间基于浓度的相互抑制作用,引入浓度因子调整个体的选择几率 $P_s(x_i)$ 。总的目标是抑制浓度过高抗体,同时保证适应度高的个体被选中的概率大。因为抗体的浓度过高,则在进化过程中容易因早熟而陷入局部最优。具体方法为

$$P_s(x_i) = \alpha \times C \times \left(1 - \frac{F(x_i)}{F(g_{best})}\right) + \beta \times \frac{F(x_i)}{F(g_{best})} \quad (4)$$

式(4)中 α, β 为0~1之间的可调参数; $F(x_i)$ 为第 i 个粒子(抗体)的适应度; $F(g_{best})$ 为全局最优解的适应度,即粒子(抗体)的最大适应度; C 为抗体浓度,定义为具有相近适应度的抗体个数与群体中抗体总数的比值。

由上式可以看出:对高浓度的 t 个粒子(抗体),其中适应度较高的抗体被选中的概率反而较低;若抗体的浓度不高,则上式也可保证高适应度的粒子(抗体)有较大的被选中概率。

由于动量项系数 ω 决定了算法的搜索能力的强弱,所以在算法运行过程中应根据进化速度自动调整动量项系数以使得粒子群在进化过程中拥有较强的泛化能力和收敛速度。因此,本文定义了一个反映了粒子群进化速度的自适应因子 b

$$b = \frac{|F(g_{best,k+1}) - F(g_{best,k})|}{|F(g_{best,k}) - F(g_{best,k-1})|} \quad (5)$$

式(5)中: $F(\bullet)$ 表示适应度函数。开始时 b 值较小,进化速度较快;当经过了一定的进化过程后, b

值趋向于1,则断定算法停滞或者找到了最优解。即 ω 应该随着进化速度的降低而减小,故可以把 ω 表示为如下形式:

$$\omega = \omega_{init} - b \cdot \omega_b \quad (6)$$

式(6)中: ω_{init} 为 ω 的初始值,一般可以取1; ω_b 为动量修正量基值,一般取0.5左右。

综上所述,引入了基于浓度选择策略的免疫系统的免疫处理机制和根据进化速度自动调整动量项系数的自适应因子后,PSO算法可以有效地避免陷入局部最优并能够加快进化速度。另外,粒子群的规模对计算结果的精度也有很大的影响。一般来说,规模越大获得全局最优的可能性越大,但相应的计算时间也将会增加。所以,为了综合考虑计算速度和精度,一般规模在50左右即可。

3 自适应免疫粒子群算法在配电网状态估计中的应用

在配电网状态估计中引入自适应免疫PSO算法,可克服由于配电网中非线性元件存在而引起的目标函数非线性导致传统状态估计不能应用的缺点。把分布式发电机的输出和负荷功率值作为状态估计的状态量,具体步骤如下:

(1) 输入参数。读取系统的网络数据,包括网络结构和线路阻抗、量测量等等;参照第3节的原则设置算法的各种参数,主要包括群体规模、最大迭代次数、初始动量系数 ω_{init} 、动量修正量基值 ω_b 、常数 c_1 和 c_2 以及粒子更新速度等等;

(2) 粒子群初始化。根据控制变量的变化范围随即生成 M (粒子群规模)个粒子(抗体) x_i 及其“飞行”速度 v_i ($i=1,2,\dots,M$),形成初始粒子(抗体)群 P_0 ;

(3) 生产免疫粒子(抗体)。计算当前粒子(抗体)群 P_k 中粒子(抗体)的适应度值及 $p_{best,i}$ ($i=1,2,\dots,M$), $g_{best,k}$,并把 $g_{best,k}$ 作为免疫粒子(抗体)存入记忆库中,判断是否满足结束条件,如果满足结束条件,则停止运行并输出结果,否则,继续;

(4) 新粒子(抗体)的生成:新粒子(抗体)的产生主要基于以下两个步骤:

① 由式(5)动态调整动量项系数 ω ,再按式(3)进行计算产生 N 个新粒子(抗体);

② 随机产生 N_0 个新粒子(抗体)。

(5) 基于浓度的粒子(抗体)选择:用式(4)

计算步骤(4)中生成的 $N + N_0$ 个新粒子(抗体)的选择概率, 依概率大小选择 N 个粒子(抗体)形成粒子(抗体)群 IP_k ;

(6) 粒子(抗体)群更新: 将记忆库中的免疫记忆粒子(抗体)替换粒子(抗体)群 IP_k 中适应度较差的若干粒子(抗体), 形成新一代粒子(抗体)群体 P_{k+1} , 然后, 转步骤(3)。

分析上述算法, 它具有全局搜索能力, 而且兼顾收敛速度和收敛精度。配电网状态估计将能很好的收敛到一个最优解。如果状态变量中出现不切合实际的解, 那么可以指出量测量中存在不良数据。

4 算例分析

为了检验自适应免疫 PSO 算法在配电网状态估计中的有效性和估计效果, 采用如下系统进行试验^[9], 比较 PSO 与本算法的准确性。如图 3 所示, 此系统中有 1 个功率输出恒定的分布式发电机和 2 个静态电压调整变压器, 使得目标函数非线性。仿真结果见表 1 和表 2。

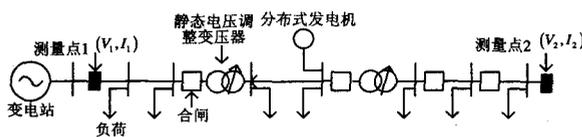


图 2 配电网模型

Fig.2 Distribution power grid model

表 1 对目标函数计算结果的影响

Tab.1 Impact on the outcome of the objective function

采用方法	第 1 次仿真	第 2 次仿真	第 3 次仿真	平均计算时间/s
自适应免疫 PSO 算法	0.000 109	0.000 090	0.000 113	31
基本 PSO 算法	0.000 179	0.000 181	0.000 172	23

表 2 两种方法状态估计结果比较

Tab.2 State estimation results comparison of two methods

量测点	量测值	自适应免疫 PSO 算法	基本 PSO 算法
I_1/A	150.00	150.03	150.56
V_2/V	6500	6505	6534
I_2/A	0.00	0.00	0.00

由仿真结果可得:

(1) 2 种方法的目标函数值比较中, 自适应免疫 PSO 算法明显优于基本 PSO 算法, 在差不多的收敛速度下, 自适应免疫 PSO 算法可以体现出高精度;

(2) 量测量(电压和电流)与 2 种方法估计值的比较中, 自适应免疫粒子群优化算法的估计值更加接近量测值。但是如果量测量中出现坏数据, 那么在坏数据的估计上两者的效果差不多, 本文没有列举说明;

(3) 自适应免疫 PSO 算法的计算时间稍长一些, 如果应用于实际的大系统, 则计算时间还会加长, 大约为 100 s, 在时间上不占优势, 但是优化的效果是很好的。

5 结论

自适应免疫粒子群优化算法, 由于其引入免疫系统的免疫信息处理机制和自动调整动量系数的自适应因子, 增强了全局搜索能力, 收敛速度和收敛精度都很高, 并且能够处理问题的非线性特性, 所以能够在配电网状态估计中得到应用。算例结果表明, 自适应免疫粒子群优化算法在配电网状态估计中的应用是有效的, 但是在坏数据的检测和辨识处理上还有待进一步研究。

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, Kelley A W. State Estimation for Real-time Monitoring of Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1601-1609.
- [3] 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.
- [4] Deng Y M, He Y, Zhang B M. Branch-Estimation-Based State Estimation for Radial Distribution Systems[A]. In: Power Engineering Society Winter Meeting 2000 IEEE[C]. 2000. 2351-2356.
- [5] 卫志农, 顾桦, 鞠平, 等. 三相辐射配网状态估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 84-87.
WEI Zhi-nong, GU Chu, JU Ping, et al. A Three-phase Radial Distribution System State Estimation Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 84-87.
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia): 1995. 1942-1948.
- [7] 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 on Application of Particle Swarm Optimization to Electric Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19.

(下转第 94 页 continued on page 94)

行指数化, 可得出可靠性的综合评价结果。

表 4 综合评价结果

Tab.4 Comprehensive evaluation result

指标	权重	2006	2007
故障总时间 I1	0.079 7	1	0.482 7
平均故障时间 I2	0.079 7	1	0.482 0
故障次数 I3	0.173 5	1	0.272 7
平均故障次数 I4	0.173 5	1	0.273 9
平均运行率 I5	0.243 8	1	1
光端机故障 I6	0.081 3	1	1.5
光纤通道断 I7	0.065 6	1	1.285 7
光电接口缺陷 I8	0.042 2	1	1.285 7
接触不良 I9	0.042 2	1	1.142 9
其他缺陷 I10	0.018 7	1	0.789 5
全网可靠性综合指数		1	0.739 1

由表 4 可知, 全网可靠性综合指数 2006 年为 1, 2007 年呈下降趋势。从中可以具体看出各指标的变动情况, 从而采取相应措施加以改善。可靠性综合指数的增长取决于各指标的综合改善程度, 是各指标改善与劣化的动态体现; 只有各个指标都呈现增长趋势, 才会最大限度地促进可靠性综合指数的增长。

4 结论

文章详细描述了综合评价中权重的确定方法, 并通过实例建立指标模型, 用 Matlab 软件进行程序仿真, 计算指标权重, 排序, 得出可靠性的综合评价结果。

参考文献

[1] 邢宁哲, 鲍捷. 继电保护通道的发展与安全策略[J]. 电力系统通信, 2004, (1): 10-14.

(上接第 57 页 continued from page 57)

[8] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74-78.
WANG Lei, PAN Jin, JIAO Li-cheng. The Immune Algorithm[J]. ACTA Electronica Sinica, 2000, 28(7): 74-78.
[9] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

收稿日期: 2008-03-14; 修回日期: 2009-03-25

XING Ning-zhe, BAO Jie. The Development and Safety Strategies of Relay Protection Channel[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2004, (1): 10-14.

[2] 高会生, 孙逸群, 冉静学. 电力光纤保护通道安全风险指标的研究[J]. 继电器, 2007, 35(3): 61-65.
GAO Hui-sheng, SUN Yi-qun, RAN Jing-xue. Research of the Security Risk Evaluation Indices for Electric Power Optical Fiber Relay Protection Cchannel[J]. Relay, 2007, 35(3): 61-65.
[3] 梁雄健, 孙青华. 通信网可靠性管理[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
LIANG Xiong-jian, SUN Qing-hua. The Reliability Management of Communication Network[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004.
[4] 缪以扬, 聂一雄. 基于层次分析法的电力用户综合评判[J]. 广东电力, 2007, 20(3): 31-33
MIU Yi-yang, NIE Yi-xiong. Comprehensive Evaluation Based on Synalytic Hierarchy Process for Consumers of Electric Power[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20(3): 31-33.
[5] 周开利, 邓春晖. MATLAB 基础及其应用教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
ZHOU Kai-li, DENG Chun-hui. The Foundation and Application Course of Matlab[M]. Beijing: Beijing University Press, 2007.

收稿日期: 2008-07-17; 修回日期: 2008-08-06

作者简介:

石征 (1985-), 女, 硕士研究生, 从事电力通信网研究; E-mail: kanoneigo@163.com
侯思祖 (1962-), 男, 教授, 从事电力通信网研究。

作者简介:

黄若霖 (1977-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备故障诊断等领域的研究和管理工作;
王宽 (1981-), 男, 硕士, 主要从事电力系统继电保护、电力系统运行与控制等领域的研究工作; E-mail: fjiwanghuan@163.com
詹开翅 (1980-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备故障诊断等领域的研究和维护工作。