

电网 PMU 优化配置中 IGASA 算法的研究

缙新科¹, 刘 箫¹, 刘 峻²

(1. 兰州理工大学 电气与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省电力科学研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在函数的全局优化算法中, 模拟退火算法和遗传算法的结合可较好地改善算法的性能. 基于这个思想将适合全局搜索的遗传算法(GA)和适合局部搜索的模拟退火算法(SA)相结合, 提出改进的遗传模拟退火混合算法(IGASA)来解决电力系统 PMU 优化配置问题. 该算法用于遗传算法中选择概率的计算以增强算法的收敛性, 在交叉和变异概率的选取上也进行了改进, 以进一步改善算法的稳定性和收敛性, 并提高了收敛速度和防止种群早熟现象. 5 个仿真试验验证了该算法的可行性和有效性.

关键词: 电网; 混合算法; PMU 优化; 可观性

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1004-0366(2008)02-0112-04

Study of IGASA Algorithm in PMU's Optimized Scheme of Power System Network

GOU Xin-ke¹, LIU Xiao¹, LIU Jun²

(¹. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China;

². Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Among the global optimization algorithms of functions, hybrid SAGA can improve the performance of algorithms. Since the SA is suitable for global searching and the GA is suitable for local searching, we propose an ISAGA to solve the PMU placement of the power system. The selective probability, cross probability and mutation probability of the proposed algorithm are improved to enhance algorithm stability and convergence as well as its search efficiency and its capability to converge to good global optimum. Five simulation tests show that the IGASA is feasible and effective.

Key words: power network, hybrid algorithm, PMU optimization, observability

现代电网受电力市场化变革的影响以及来自环境、经济和技术方面的制约, 越来越接近于其极限运行状态, 这使得电网缺乏灵活的调节能力, 现有的 SCADA 系统及其为基础的各种应用系统不足以支持电力系统安全稳定运行. 近年来, 国内外学者致力于研究的相角测量单元 PMU (Phasor Measurement Unit, PMU). 及其为基础的广域测量系统^[1,2] WAMS (Wide-Area Measurement System, WAMS). 使得在更精细的时间尺度上对电力系统进行同步观测以及利用这些精细数据对电力系统进行全新的分析成为可能, 从而弥补了 SCADA 系统

的不足.

针对确定配置 PMU 的最小数目和最佳位置以达到电网结构可观测性的 PMU 最优配置问题, 采用 IGASA (改进的遗传模拟退火混合算法) 求解该问题. 该算法证明了用于电网 PMU 配置的可行性, 它利用改进的遗传算法中交叉与变异概率, 克服了传统的遗传算法易早熟的缺点, 提高了最优解的多样性, 加快了算法寻优速度, 有效地保护了最优解不被破坏, 而改进的模拟退火算法可使多样性解退火成单一的最优解, 使 PMU 安装在最优位置, 实现了 PMU 的最优配置.

1 电力系统可观性分析方法

1.1 电力系统可观性

(1) 代数可观 一个 N 节点, 有 m 个测量的电力系统, 可以用下面的线性化测量方程描述^[3]

$$Z = Hx + v,$$

其中 Z 为 m 维测量向量, H 为 $m \times (2N-1)$ 维测量雅可比矩阵, x 为 $2N-1$ 维电压状态向量, v 是 m 维测量噪声向量. 如果测量雅可比矩阵 H 是满秩和良态的, 即满足 $\text{Rank}(H) = 2N-1$, 则这个系统是代数可观的.

(2) 拓扑可观 从图论的角度, 可以将电力系统看作是一个由 N 个顶点 b 条边构成的图 $G = (V, E)$, V 表示图的顶点集合, E 表示图的边集合, 它们分别对应于系统的母线与支路的集合. 测量网络构成了一个测量子图 $G' = (V', E')$, 并有 $V' \subseteq V, E' \subseteq E$. 如果测量子图 G' 与图 G 的关系满足 $V \subseteq V'$, 即子图 G' 包含了图 G 的所有顶点, 则这个系统是拓扑可观的^[4].

1.2 生成树测量方法

在电力系统中 PMU 的配置有一个新概念——生成树测量^[5]. 一个电网是由许多节点和连接这些节点的支路所构成, 而一个大电网可分成许许多多的小子网, 这些小子网就构成许多测量子树, 在这些测量子树中心(也就是该区域出线度最大节点)配置 PMU, 然后根据 DFS (Depth First Search)^[6] 遍历, 直到这些小电网完全可观为止, 再将 these 测量子树按下述方法扩展到整个生成树, 进而使全网可观. 生成树测量方法在这个测量过程中覆盖了所有的节点, 这就意味着生成测量树的存在.

1.3 电力系统可观性分析

生成树将所有的节点分成如图 1 所示的 3 类:



图 1 节点类型

第 1 类是 PMU 安装节点, 即直接测量点; 第 2 类是与 PMU 安装节点直接相连的节点和通过线路潮流计算出来的节点; 第 3 类是除了上述 2 类之外的所有节点. 也就是说前 2 类是可观的, 第 3 类是不可观的. 根据这些分类就可以利用生成树原理对电网进行初始配置, 由于 PMU 所在子网从该节点到其边缘都是可观的, 要想使电网的可观性范围扩大

就需要另一个 PMU 来实现, 为了获得最大的覆盖区域, 每一个新的 PMU 被配置在出线度(即连接的支路)最大的节点上, 这样就可以利用 PMU 的功能测量出该点电压和与该节点相连的支路电流, 重复这个过程直至全网完全可观为止.

这种方法显然不是最优的配置方案, 因为当一个新的 PMU 被配置时, 所有已配的 PMU 要被重新分配, 已使它们的覆盖面积更大. 为了解决这个问题, 以下将利用一种新方法: 改进的遗传模拟退火混合算法来进行 PMU 最优配置.

2 改进的遗传模拟退火混合算法

2.1 遗传算法与模拟退火算法

遗传算法 GA (Genetic Arithmetic, GA)^[7] 是一种通用的优化算法, 其编码技术和遗传操作比较简单, 优化不受限制性条件的约束, 而其 2 个最显著的特点是隐含并行性和全局解空间搜索, 由于该算法采用随机选择, 对搜索空间无特殊要求, 无需求导, 具有运算简单、收敛速度快等优点, 尤其适用于处理传统搜索方法难以解决的复杂和非线性问题. 它是一种全局搜索能力很强而局部搜索能力不足的算法.

模拟退火算法 SA (Simulated Anneal, SA)^[8] 是基于 Monte Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法, 其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性, 模拟退火算法在某一初温下, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局最优解, 该算法可以克服优化过程陷入局部极小和对初值依赖性问题, 但是在实际应用中会出现算法计算时间过长, 效率比较低的缺点.

2.2 改进的遗传模拟退火混合算法

针对 GA 在局部搜索能力方面的不足和 SA 在全局搜索能力方面的不足, 将二者有机结合, 优势互补, 发挥 GA 全局搜索能力和 SA 局部搜索能力, 克服 GA 局部搜索能力差及其早熟现象和 SA 全局搜索能力差及效率不高的问题, 构造出混合 GASA 算法. 但是传统的遗传退火算法在继承了遗传模拟退火算法优点的同时, 仍然难以完全克服遗传算法及模拟退火算法的缺点, 如搜索效率不高, 可能出现早熟等, 所以就对算法加以改进. 算法主要在种群的选取概率、退火温度、交叉和变异概率做了修改, 而且在文献^[8]中已验证能有效地克服算法的上述问题.

2.3 算法改进的参数选择

(1) 种群的选取概率 设当前种群为 G , 从中随机独立地选取 n 个个体作为父代群体 F_n 中个体 B_i 的适应值为 $f(B_i)$, $B_i \in G$ 则 B_i 被选取的概率为

$$P_s(B_i) = \frac{e^{f(B_i)/T_k}}{\sum_{B_j \in G} e^{f(B_j)/T_k}}$$

(2) 退火温度

$$T_k = T_0 \frac{(\ln 2)^{\alpha-1}}{(\ln(1+k))^{\alpha-1} k^{2-\alpha}}, \begin{cases} K = 1, 2, 3, \dots \\ \alpha = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases} \end{cases}$$

式中 T_k 为渐趋于 0 的退火温度, T_0 为初始退火温度, 可选择较大的温度作为 T_0 的值, $T_0 = 100$, α 是根据适应度函数的变化由系统自适应地选取, 当适应度函数变化较大时, α 取 1, 此时为快速模拟退火, 以提高算法的收敛速度; 当适应度函数变化较小时, α 取 2, 此时为经典模拟退火, 使算法以概率 1 收敛到全局最优值。

(3) 交叉概率

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f < f_{avg} \end{cases}$$

式中 f_{max} 为群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体的平均适应度值; f 为要交叉的 2 个个体中较大的适应度值; $P_{c1} = 0.95$; $P_{c2} = 0.45$ 。

(4) 变异概率

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f < f_{avg} \end{cases}$$

式中 f_{max} 和 f_{avg} 与上式中的含义相同; f 为要变异个体的适应度值; $P_{m1} = 0.1$; $P_{m2} = 0.002$ 。

2.4 算法设计^[9,10]

步骤 1 初始化: 初始种群规模 G_0 , 退火初始温度 T_0 , $k = 0$ 。

步骤 2 对 P_k 中各个体进行 SA 搜索: 首先利用 SA 状态产生函数产生新个体; 然后计算新、旧个体的目标函数值之差 ΔC ; 其次计算接受概率

$$P_r = \min[1, \exp(-\Delta C/T_k)];$$

若 $P_r > \text{Random}[0, 1)$, 用新个体取代旧个体; 否则, 旧个体不变。

步骤 3 对候选种群进行选择, 交叉和变异, 产生下一代种群 P_{k+1} 。

步骤 4 利用退温函数进行退温。

步骤 5 若连续进化 n 代而个体无任何改进, 算

法停止; 否则修改种群的退火温度, 转步骤 2。

3 PMU 配置建模及配置方法

3.1 优化算法的数学模型

PMU 的安装地点选择是一个组合优化的问题, 可用以下数学模型描述

$$\begin{aligned} \min J &= m, \\ \text{st. } U_i &= 0, i = 1, \dots, N \end{aligned}$$

其中 m 为 PMU 安装数量, U_i 表示第 i 个节点不可观, N 为系统节点数。

3.2 PMU 优化配置方法

(1) 染色体编码 染色体采用二进制编码: 染色体长度 L 等于系统节点数 N , 每个基因位值由下式确定: 当 $X_i = 1$ 时, 节点 i 安装了 PMU, 当 $X_i = 0$ 时, 节点 i 未安装 PMU, 其中 $i = 1, \dots, N$ 。

(2) 初始种群的产生 初始种群就是算法初始选择的 PMU 数量以及它们所配置的位置。按照生成树测量方法和染色体编码定义初始配置。

(3) 适应度函数的确定 由于经过处理的所有染色体都满足约束条件, 适应度函数可定义为

$$f = C_{max} - \sum_{i=1}^n X_i,$$

其中 C_{max} 为一个较大的数以保证适应度函数值 > 0 , C_{max} 根据系统节点数来确定。

(4) 遗传操作 主要是通过修改选择概率、交叉概率和变异概率来改进种群中的个体性能。

(5) 模拟退火 主要是通过修改退火初温度 T 来改进种群中的个体性能。

(6) 流程图 见图 2。

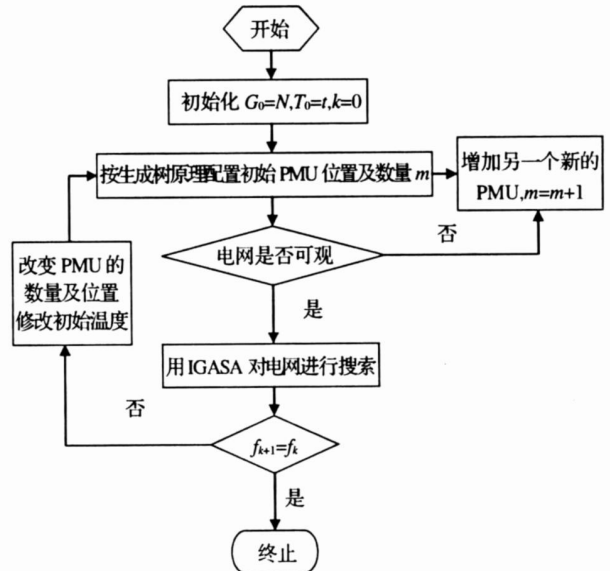


图 2 PMU 最优配置算法流程

4 仿真结果

利用 Matlab 将该算法分别对 IEEE11 节点系统、IEEE14 节点系统、18 节点系统、IEEE30 节点系统、IEEE57 节点系统上进行仿真试验。通过与其他文献[11~14]算法结果的比较,也验证此算法的有效性和准确性。

该算法通过父代(横向)竞争,不仅可以保证算法的收敛,而且有较快的收敛速度,具有更强的逃脱局部极值的全局优化能力,为进一步改善算法的收敛性,文中主要在算法中的选择、交叉、变异概率以及退火温度作了改进,增强了算法搜索能力和突跳能力,因而大大缩短了算法的搜索过程,提高了优化效率和优化质量,并且使多样性解趋于单一。

IEEE11 节点系统, IEEE14 节点系统, IEEE30 节点系统, IEEE57 节点系统, 其节点参数及图见文献[15], 18 节点系统见图 3。仿真结果见表 1。

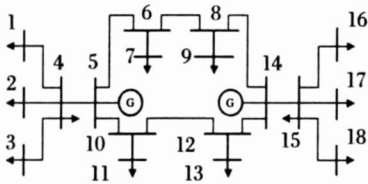


图 3 18 系统节点

表 1 仿真结果

系统类型	安装个数	安装地点
IEEE11	2	3, 8
IEEE14	3	2, 6, 9
18 节点	4	4, 5, 14, 15
IEEE30	7	1, 5, 10, 12, 19, 23, 27
IEEE57	13	1, 6, 9, 19, 24, 28, 30, 32, 38, 46, 50, 53, 56

目前,国内的 PMU 研究正处于起步阶段,上述研究可对我国电网的稳定控制提供重要的理论依据,由于我们仅从经济性角度出发,用改进的遗传模拟退火混合算法实现 PMU 的最优配置,没有考虑冗余度的问题,如果其中 1 台 PMU 出现故障将会使相关虚拟测量失效,电网将变得动态不可观,因此

作者简介:

续新科 (1966-)男,甘肃省天水人,1994 年毕业于西安交通大学电子系,获工学硕士学位,现任兰州理工大学电气与信息工程学院教授,主要从事振动控制和电力系统稳定方面的教学与研究。

PMU 配置的可靠性问题将是下一步的主要研究内容。

参考文献:

- [1] Phadke A G. Synchronized Phasor Measurements in Power Systems[J]. IEEE Computer Applications in Power. 1993, 6(2):10-15.
- [2] Mao A J, Yu J X, Guo Z Z. PMU Placement and Data Processing in WAMS that Complements SCADA[J]. IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2005, 1(12-16): 780-783.
- [3] Krumpolz GR, Clements GR, Davis PW. Power System Observability: a Practical Algorithm Using Network Topology [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1980, PAS-99(3): 1 534-1 542.
- [4] Clements KA, Krumpolz GR, Davis PW. Power System State Estimation Residual Analysis: an Algorithm Using Network Topology [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1981, PAS-100(4):1779-1787.
- [5] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, R. Adapa. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems. 1993, 8(2): 707-715.
- [6] 宋文, 吴晟, 杜亚军. 算法设计与分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001, 146-150.
- [7] 田东平, 迟洪钦. 混合遗传算法和模拟退火法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 22: 63-65.
- [8] 黄宜军, 章卫国, 刘小雄. 一种新的自适应退火遗传算法[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(5): 571-575.
- [9] 王凌. 智能优化算法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社. 2001, 178-179.
- [10] 刘勇, 康立山, 陈毓屏, 等. 非数值并行遗传算法(第二册)遗传算法[M]. 北京: 科学出版社. 1995, 178-182.
- [11] 王晓兰, 王玮冬, 张万宏. 一种求解 H_2/H_{∞} 控制问题的局部正交多目标遗传算法[J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(4): 81-84.
- [12] 蔡田田, 艾芊. 电力系统中 PMU 最优配置的研究[J]. 电网技术, 2006, 7: 32-37.
- [13] 沙智明, 郝育黔, 郝玉山, 等. 电力系统 PMU 安装地点选择优化算法的研究[J]. 继电器, 2005, 33(7): 31-36.
- [14] 彭疆南, 孙元章, 王海风. 考虑系统完全可观测性的 PMU 最优配置方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 10-16.
- [15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社. 1996, 309-313.