

# 自适应遗传—禁忌搜索混合算法在 PMU 最优配置中的应用

李新振, 滕 欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**针对 PMU 最优配置问题, 提出一种结合自适应遗传算法与禁忌搜索算法的混合算法。通过初始配置原则, 缩小了算法的寻优范围。充分利用两种算法各自的特点, 结合自适应遗传算法并行计算特性与禁忌搜索算法跳出局部最优解的能力, 使得该混合算法寻得全局最优解的同时, 提高了算法的优化效率, 增强了算法的鲁棒性。最后利用 IEEE 14、IEEE 39、IEEE 57 节点系统对该混合算法与其他两种遗传算法进行了对比验证。

**关键词:**同步相量测量单元 (PMU); 最优配置; 自适应遗传算法; 禁忌搜索算法; 自适应遗传—禁忌搜索混合算法

**Abstract:** A new hybrid algorithm integrated adaptive genetic algorithm with Tabu search is presented for solving the optimal PMU placement problem. It can minimize the searching scope by initial placement rules. By taking fully advantage of the characteristics of the two algorithms and combined the parallel computing feature of adaptive genetic algorithm and the capacity of avoiding local optimal solution of Tabu search algorithm, the optimization efficiency and robustness of the algorithm are improved simultaneously when the hybrid algorithm finds the optimal solution of the overall situation. The contrast and verification between the hybrid algorithm and the other two genetic algorithms are carried out by the numerical calculation of IEEE 14-bus, IEEE 39-bus and IEEE 57-bus system, respectively.

**Key words:** phasor measurement unit (PMU); placement optimization; improved adaptive genetic algorithm; Tabu search; hybrid adaptive genetic algorithm—Tabu search algorithm

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0056-05

相量测量单元 PMU 在电力系统中的应用, 为电网实时监控和在线闭环控制提供了有效的手段。在电网的所有节点上都安装 PMU, 将大大改善电力系统的监控水平, 但由于目前 PMU 价格昂贵, 如何在保证电力系统可观测性的基础上, 安装最少数量的 PMU (OPP—optimal PMU placement) 成了国内外学者广泛关注的问题之一<sup>[1~6]</sup>。

在哪些节点安装 PMU, 才能即保证测量系统可观又使 PMU 安装数量最少, 涉及到组合优化问题:

$$\begin{aligned} J &= \min \{K\} \\ x &\in S \\ \text{Subject to } Nu &= 0 \end{aligned}$$

其中 S 为解空间, K 为 PMU 安装的数量, Nu 为所有不可观测母线数。求解这类最优化问题主要有三种方法: 枚举法、启发式算法和搜索算法。枚举法不适用于空间规模较大的情况。启发式算法效率较高, 但针对不同的问题需要找出特定规则, 通用性不强。搜索算法使用某种规则随机搜索最优解, 在解的质量和效率上能取得好的平衡, 已广泛应用于优化计算

中。

在以系统状态完全可观测为目标的 PMU 配置研究方面, Baldwin 开创性的将修正的二分搜索法和模拟退火方法相结合的双搜索法用于此问题的求解<sup>[4]</sup>, 但模拟退火法中采用的配置模型和调整方法比较简单, 不适用于较大规模系统。禁忌搜索算法<sup>[9, 10]</sup>通过禁忌列表来减少搜索空间, 加快搜索速度, 但该算法对初始解依赖性较强。遗传算法是基于“适者生存”的一种高度并行、随机和自适应的优化算法。文献 [5] 提出了一种改进的自适应遗传算法, 在算法中加入了进化参数衰减因子, 克服了遗传算法早熟的缺点, 但算法易陷入局部最优解, 且未充分利用系统拓扑结构, 解空间未作优化, 对大系统适应性不强。混合优化策略<sup>[10]</sup>将不同的算法组合起来, 各取所长, 近年来得到广泛应用, 取得了理想的效果。

基于混合优化思想, 提出了一种结合禁忌搜索与自适应遗传算法的混合算法, 并利用初始配置原则, 在配置初期, 给出了必须配置 PMU 节点和无需配置 PMU 的节点。在进化过程中, 保留了精英个体, 这些

个体被直接复制到下一代。禁忌搜索算法随机选取一定数量的当前个体,利用领域解产生规则生成当前个体的若干领域个体,并利用禁忌列表和藐视准则选择合适的个体繁殖到下一代,在避免遗传算法陷入局部最优解的同时加快了遗传算法的鲁棒性。自适应遗传一禁忌搜索混合算法具有的较好的有效性和通用性,在 IEEE 14 节点系统、IEEE 39 节点系统、IEEE 57 节点系统的优化配置计算中取得了满意的效果。

## 1 电力系统可观测性分析理论

### 1.1 系统可观测性分析理论

在电力系统中,电压相量可测或可求出的节点称为可观测节点,否则为不可观测节点,若系统的所有节点均为可观测节点,则系统为完全可观测系统;反之,为不可观测系统。电力系统的可观测性可以从两个角度来分析,即:代数可观测和拓扑可观测。

#### 1.1.1 代数可观测

对于一个  $N$  个节点  $m$  个量测量的电力系统,可以用下面的线性化量测方程来描述:

$$z = Hx + v$$

其中:  $z$  为  $m$  维量测相量;  $H$  为  $m \times (2N-1)$  维量测雅克比矩阵;  $x$  为  $2N-1$  维电压状态相量;  $v$  为  $m$  维量测噪声相量。

如果量测雅克比矩阵  $H$  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测的。

#### 1.1.2 拓扑可观测

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集合。测量网络构成了一个测量子图  $G'=(V', E')$ , 并有  $V'$  包含于  $V$ ,  $E'$  包含于  $E$ 。如果测量子图  $G'$  与图  $G$  的关系满足  $V'$  包含于  $V$ , 即子图  $G'$  包含了图  $G$  的所有顶点,则系统是拓扑可观测的。值得指出的是:代数可观测性意味着拓扑可观测性,反之不然。

### 1.2 系统可观测性判断原则

由 Ohm 定律和 Kirchhoff 定律,可得出如下节点可观测性的判定原则:

- 1) 已知支路一端节点电压和支路电流,则支路另一端节点电压被虚拟测量(图 1A)。
- 2) 已知支路两端的节点电压,则支路电流被虚

拟测量(图 1B)。

3) 节点除一条支路外,其余支路电流都已知,则未知电流支路的电流被虚拟测量(图 1C)。

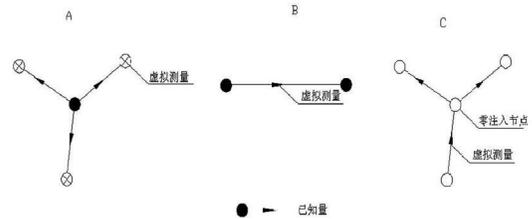


图 1 虚拟量测量分类

### 1.3 系统可观测性分析方法

根据系统网络邻接矩阵所确定的节点之间的连通关系,从安装 PMU 的节点开始,通过测量或虚拟测量的电流支路,扩张到虚拟测量的电压节点,然后从观测性未知的节点开始(按节点编号由小到大扫描),反复利用 1.2 节的可观测判定三原则,扫描生成虚拟测量,直到无新增虚拟测量为止,在扫描完成后会生成一个测量矩阵。若矩阵包含了所有系统节点,则整个系统就是拓扑可观的。若某些系统节点没有包含在测量矩阵中,则系统不完全可观。

## 2 自适应遗传一禁忌搜索混合算法

### 2.1 算法总览

PMU 最优配置问题实际是组合优化问题, GA、TS 是解决组合优化问题的有效手段,各有所长。针对 PMU 最优配置问题,充分利用遗传算法和禁忌搜索算法各自的特点,提出了自适应遗传一禁忌搜索混合算法。

图 2 为算法流程图。算法的主要步骤简述如下。

- 1) 根据初始配置原则,分析系统节点关联矩阵,确定必须安装 PMU 和不必要安装 PMU 的节点集合  $S_{pm}$ ,  $S_{p0}$ 。
- 2) 初始化自适应遗传一禁忌搜索混合算法的参数,将剩下的  $k_{other}$  个节点编码,随机生成  $m$  个初始解,并利用解修复原则修复不可行解。
- 3) 执行遗传算法的交叉、变异操作。
- 4) 在当前种群中,随机选取一定数量的个体,将禁忌搜索算法产生的  $k_s$  个新个体加入到当前种群中。
- 5) 精英保留策略保留当前种群中的优良个体,利用无回放余数选择方法选择除优良个体外的其他个体,产生新的种群。

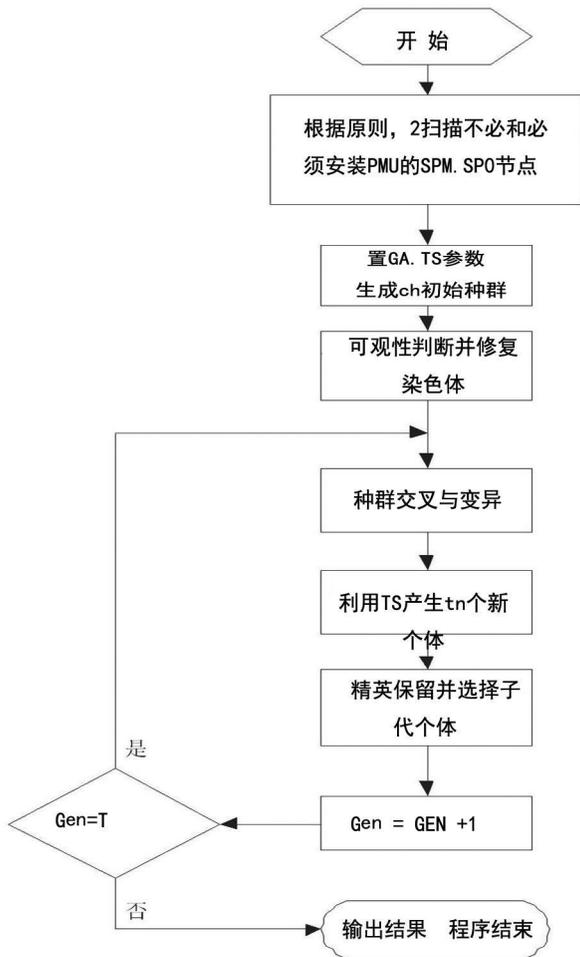


图 2 IAGA-TS混合算法流程图

## 2.2 改进的自适应遗传算法

标准遗传算法对交叉与变异概率的取值一般是凭经验和反复试验来确定,而且是针对不同的问题取不同的值,数值通常也是固定的。为此, Srinivas提出了一种自适应遗传算法 AGA (Adaptive GA) [7],其交叉概率与变异概率会随着个体适应度变化而自动调整。自适应遗传算法在一定程度上改善了标准遗传算法因参数选取不当而引起的早熟现象。但此方法对于群体处于进化后期相对有利,而对进化初期存在一定的不利影响,算法容易陷入局部最优。

针对 Srinivas提出的自适应遗传算法的不足,文献 [5]、[8]提出了改进的自适应遗传算法,算法可同时根据个体的适应度与进化时间的变换自动调整交叉与变异概率,使得进化初期保持较高的交叉与变异概率,能抑制算法早熟,并有利于新个体的产生。在进化晚期,个体的交叉与变异概率在衰减因子作用下迅速减小,从而可以有效保护最优解不被破坏。文献 [5]中的算法未充分利用电力系统的网络拓扑信息,

N个节点均参加染色体编码,初始解空间较大,算法收敛较慢,不适用于较大的系统。

针对文献 [5]、[8]提出的自适应遗传算法的不足,为了有效的减少解的搜索空间,针对 PMU 最优配置这一实际问题,利用初始配置原则,将电力系统节点划分为必须配置 PMU 的节点、不需配置 PMU 的节点  $k_{no}$  和其它未配置 PMU 的节点  $k_{other}$ , 初始配置原则如下:

1) 邻接节点数为 1 的节点及邻接节点数为 2 的零注入节点无需配置 PMU [6]。

2) 若某节点与邻接节点数为 1 的节点相邻,且该节点为负荷或发电机节点,则该节点需要预先配置 PMU [6]。

这样以来,染色体长度由 N 缩减为  $K_{other}$ , 有效地减少了解的搜索空间,加快了算法的收敛速度。值得指出的是,仿真结果表明文献 [7]中预处理原则 3 并不适用,如 IEEE 57 节点系统仿真中,节点 10、49 为 2T 节点的相邻节点,节点 53 为 3T 节点的中间节点,按文献 [6]的原则 3 需安装 PMU,这样需要 15 台 PMU,而实际只需 12 台便可使系统可观测。

### 2.2.1 染色体编码

染色体采用二进制编码,染色体长度等于  $k_{other}$ , 每个基因位值由下式确定:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 安装了 PMU} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 未安装 PMU} \end{cases}$$

其中:  $i=1, \dots, k_{other}$

### 2.2.2 适应度函数

适应度函数如下式所示:

$$f = C_{max} - C_1 \cdot \sum_{i=1}^{k_{other}} X_i$$

其中:  $C_{max}$  为一个较大的数以保证适应度函数值大于 0,  $C_1$  为比例系数。取  $C_{max} = N$ , 即节点数;  $C_1 = 1$ 。

### 2.2.3 遗传操作

遗传操作主要包括选择、交叉与变异等运算过程。选择运算将适应度高的个体以较大机率复制到下一代,而淘汰适应度低的个体。选择算子有很多种,如 Roulette 轮盘赌法、排序法、随机联赛法、无回放余数随机选择等 [10]。采用无回放余数随机选择,这种选择操作方法可确保适应度比平均适应度大的一些个体一定能被遗传到下一代群体,选择误差比较小,同时算法保留精英个体,将精英个体直接复制到

下一代群体。仿真结果表明文献 [5] 的  $P_c$ 、 $P_m$  计算算法较文献 [8] 优, 故采用文献 [5] 中  $P_c$ 、 $P_m$  的计算算法。 $P_c$ 、 $P_m$  计算公式如下式所示:

$$P_c = \begin{cases} F(t) \cdot [k_0 + (k_1 + k_0) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_1, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} F(t) \cdot [k_2 + (k_3 - k_2) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_3, & f < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

其中  $F(t) = \lambda e^{-\beta(t/T)^\alpha}$ , 参数取值为:  $k_0 = 0.5$ ,  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 0.5$ ,  $k_3 = 1$ ,  $\alpha = 5$ ,  $\beta = 30$ ,  $\lambda = 1$ 。

### 2.2.4 不可行解修复机制

遗传算法的交叉、变异运算可能破坏原本满足系统可观性限制条件的解, 故遗传运算作用后的解需要引入修复机制, 具体为: 首先从不可观节点中选出线数最大的节点, 为其安装 1 台 PMU, 即将该节点对应的染色体基因位置“1”; 然后再判断染色体是否满足约束条件, 如果不满足则重复上述过程, 直到约束条件得到满足为止。经过这个修复过程, 问题的解就被严格限定在了满足约束条件的可行解空间内。

### 2.3 禁忌搜索算法

禁忌搜索 (Tabu Search, 简称 TS) 算法是对局部领域搜索的一种扩展, 是一种全局逐步寻优算法, 是对人类智力过程的一种模拟。TS 算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过藐视准则来激活一些被禁忌的优良状态, 进而保证多样化的有效搜索以最终实现全局优化。

文中禁忌搜索算法相关方面详述如下。

#### 2.3.1 领域解产生规则

兼顾算法收敛速度和全局解搜寻能力, 即禁忌算法作用强度, 只随机选取当前群体 10% ~ 15% 的个体。由于是搜寻 PMU 最小配置个数, 所以针对当前选中个体, 随机选取 1~2 个安装了 PMU 的节点, 也就是染色体编码为“1”的节点, 将其置为零 (必要时需修复机制修复), 太多的变换将使算法退化为随机搜索算法。

#### 2.3.2 禁忌列表

禁忌列表长度是禁忌搜索算法的主要参数之一, 权衡参考文献 [9] 和仿真实验结果, 这里取禁忌列表长度为 6。

#### 2.3.3 藐视准则

采用“Best So far”准则, 即选取目前适应度最高

的个体, 保证算法全局解搜寻能力。

## 3 算例分析

应用在 Matlab 7.1 软件下开发的 IAGA-TS 混合算法、PMU 量测网络可观性分析及 OPP 优化程序, 分别对 IEEE 14、39、57 节点算例进行了验证, 并对比了文献 [5] 中的自适应遗传算法, 加入初始配置原则的自适应遗传算法和文中的算法。

### 3.1 IEEE 14、39、57 节点系统 PMU 配置仿真

#### 3.1.1 IEEE 14 节点系统

按照预处理原则, 节点 8 不需要配置 PMU, 染色体长度为 13, 计算结果为, 在 2、6、9 三个节点安装 PMU 装置即可使全系统完全可观。

#### 3.1.2 IEEE 39 节点系统

按照预处理原则, 节点 1、9、30、31、32、33、34、35、36、37、38 不需要配置 PMU, 节点 20、23、25、29 需要配置 PMU, 染色体长度为 24, 计算结果为, 在 3、8、12、16、20、23、25、29 八个节点安装 PMU 装置即可使全系统完全可观。

#### 3.1.3 IEEE 57 节点系统

按照预处理原则, 节点 21、26、33、34、39、40、45、46 不需要配置 PMU, 节点 32 需要配置 PMU, 染色体长度为 48, 计算结果为, 在 1、6、13、19、27、30、32、38、51、52、54、56 十二个节点安装 PMU 装置即可使全系统完全可观。

### 3.2 算法分析对比

提出的 IAGA-TS 混合算法与文献 [5] 中的 IAGA 算法及加入初始配置原则的 IAGA 算法在 OPP 问题中的应用仿真结果对比如图 3~图 5 所示。其中 IAGA1 为文献 [5] 的算法, IAGA2 为加入初始配置原则的 IAGA 算法, IAGA-TS 为本文提出的算法, 图表横坐标为进化代数, 纵坐标为各代寻得的最小 PMU 配置数。从图中可以看出, 提出的 IAGA-TS 混合算法在收敛速度及全局最优解搜寻上均优于前述的两种算法。IAGA-TS 混合算法在 IEEE 14、39、57 节点系统的 OPP 问题仿真取得了较满意的效果。

## 4 结论

随着 PMU 在电力系统中的广泛应用, 如何以最少的数量配置 PMU 使得电力系统状态可观已成为

一个十分重要的课题。提出了一种自适应遗传—禁忌搜索 ( IAGA—TS)混合算法,算法改进了文献 [5] 提出的 IAGA 算法,缩小了解搜索空间,加快算法寻优速度及鲁棒性,形成了一种快速、准确的 OPP 问题解决方法,算例仿真结果证明了该方法的有效性。

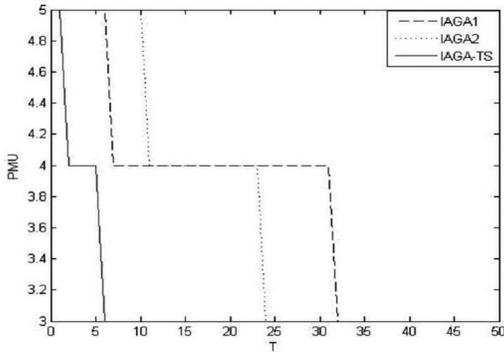


图 3 IEEE 14 节点系统仿真结果对比

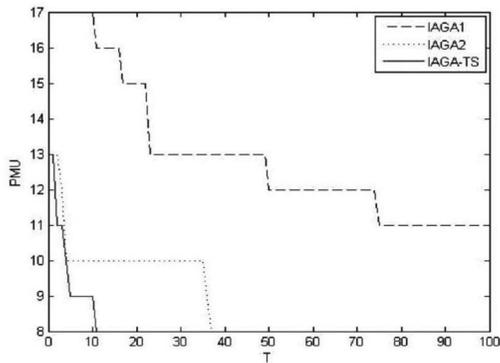


图 4 IEEE 39 节点系统仿真结果对比

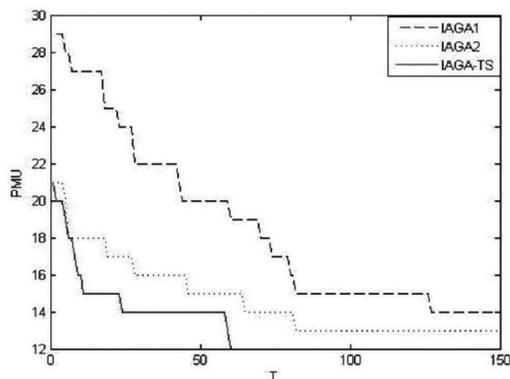


图 5 IEEE 57 节点系统仿真结果对比

### 参考文献

[1] 许树楷,谢小荣,辛耀中.基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景 [J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44—49.

[2] Marin F J Garcia-Lagos F, Joya G, et al Genetic algorithms for optimal placement of phasor measurement units in electrical networks [J]. IEEE electronics Letters 2003, 39(19): 1403—1405.

[3] Nuqiu R F, Phadke A G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2005, 20(4): 2381—2388.

[4] Baklwin T L, Mili L, Boisen M B, et al Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Trans on Power Systems 1993, 8(2): 707—715.

[5] 沙明智,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—37.

[6] 李强,于尔铿,吕世超,等.一种改进的相量测量装置最优配置方法 [J]. 电网技术, 2005, 29(12): 57—61.

[7] Srinivas M, Patnaik LM. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics 1994, 24(4): 656—667.

[8] 王小平,曹立明.遗传算法——理论、应用与软件实现 [M]. 西安交通大学出版社, 2000.

[9] A. H. Mantawy, Youssef L, Abdel-Magid, Shokri Z, Selim. Integrating Genetic Algorithms Tabu Search and Simulated Annealing for the unit commitment problem // IEEE Trans on Power Systems 1999, 14(3): 829—836.

[10] 王凌.智能优化算法及其应用 [M]. 清华大学出版社, 2001.

### 作者简介:

李新振 (1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度及其自动化。

滕欢 (1965—),女,高级工程师,长期从事电力系统调度自动化科研、教学及工程实践工作。

(收稿日期: 2008—12—15)

(上接第 43 页)

单相电路谐波检测方法,通过预设正余弦信号的基频和初相角,不要锁相环就能准确地检测出谐波和无功电流。该方法算法简单,硬件电路容易实现。

### 参考文献

[1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功补偿 [M]. 北

京:机械工业出版社, 1998, 209—238.

[2] 张厥盛,郑继禹,万心平.锁相技术 [M]. 西安电子科技大学出版社, 1994, 1—18.

(收稿日期: 2008—12—26)