

# 考虑潮流方程直接可解的 PMU 最优配置

李新振, 滕欢

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对使电力系统潮流直接可解的 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 (IAGA-TS) 的混合算法。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 IEEE14、IEEE30、IEEE57、IEEE 118 节点系统对该混合算法与其它两种算法进行了对比验证, 结果表明混合算法是有效的。

**关键词:** 同步相量测量单元 (PMU); 潮流方程; 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

## Optimal configuration of PMU considering direct solvable power flow

LI Xin-zhen, TENG Huan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** According to the concept of direct solvable power flow with the optimal configuration of PMU, this paper presents a new algorithm based on integrating adaptive genetic algorithm and tabu search. By taking fully advantage of the characteristics of the two algorithms, the combination of adaptive genetic algorithm's parallel computing feature and tabu search algorithm's capacity of avoiding local optimal solution enable the hybrid algorithm find the optimal solution of the overall situation, and, at the same time, improve the optimization efficiency and robustness of the algorithm. The effectiveness and contrast between the hybrid algorithm and the other two methods are verified by the numerical calculation of IEEE 14-bus, IEEE 30-bus, IEEE 57-bus and IEEE 118-bus system respectively.

**Key words:** phasor measurement units (PMU); power flow equation; 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: 1674-3415(2009)16-0063-05

## 0 引言

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潮流直接可解的基础上, 安装最少数量的 PMU 成了国内外学者广泛关注的问题之一<sup>[1-11]</sup>。

在哪些节点安装 PMU, 才能既保证系统潮流直接可解又使 PMU 安装数量最少, 涉及到组合优化问题:

$$\begin{aligned} J &= \min_{x \in S} \{K\} \\ \text{Subject to } N_u &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $S$  为解空间,  $K$  为 PMU 安装的数量,  $N_u$  为电压

不可解节点数。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。

文献[6]提出了系统潮流方程直接可解的概念; 文献[7]提出了动态关联度的概念, 并在此基础上提出了基于动态关联度配置 PMU 的静态和半动态优化算法, 基于动态关联度的方法在求解速度上有一定优势, 但算法寻优结果单一且易陷入局部最优解; 文献[8]给出了标准遗传算法<sup>[12-14]</sup>在该问题中的应用, 解的多样性有了提高, 但未能摆脱标准遗传算法易早熟的缺点。

针对上述问题, 基于混合优化思想<sup>[15,16]</sup>, 本文提出了一种结合禁忌搜索与自适应遗传算法的混合

算法。自适应遗传算法较标准遗传算法加入了进化参数衰减因子,克服了标准遗传算法早熟的缺点。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收敛速度。自适应遗传-禁忌搜索混合算法的有效性和通用性在 IEEE14、IEEE30、IEEE57、IEEE118 节点系统的优化配置计算中得到了验证。

### 1 基于 PMU 的电力系统潮流方程直接可解概念

电力系统的潮流方程可以采用注入功率的形式表达:

$$\tilde{S}_i = \dot{U}_i (\sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j)^* \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

式中:  $\tilde{S}_i = P_i + jQ_i$  为节点  $i$  的注入功率;  $\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i$  为节点  $i$  的电压相量;  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  为节点导纳矩阵  $Y$  的元素;  $n$  为系统的节点总数。

适当配置 PMU 使前  $i-1$  个方程能求解,则在求解第  $i$  个功率方程式(3)右端最多只有一个未知节点电压相量  $\dot{U}_k$ , 则有:

$$\dot{U}_k = \frac{1}{Y_{ik}} [(\frac{\tilde{S}_i}{\dot{U}_i})^* - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n Y_{ij} \dot{U}_j] \quad (3)$$

若从  $i=1$  到  $i=n-1$  个方程均能实现上述条件,则潮流方程可直接求解。潮流方程直接可解的概念可描述为:在确定平衡节点的前提下,通过给定一组初始条件(包括平衡节点),无需迭代就可求解其余状态变量。以 IEEE 5 节点系统为例,系统的功率方程为:

$$\tilde{S}_1 = \dot{U}_1 (Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2 + Y_{13} \dot{U}_3)^* \quad (4)$$

$$\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 (Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2 + Y_{23} \dot{U}_3 + Y_{24} \dot{U}_4)^* \quad (5)$$

$$\tilde{S}_3 = \dot{U}_3 (Y_{31} \dot{U}_1 + Y_{32} \dot{U}_2 + Y_{33} \dot{U}_3 + Y_{35} \dot{U}_5)^* \quad (6)$$

$$\tilde{S}_4 = \dot{U}_4 (Y_{42} \dot{U}_2 + Y_{44} \dot{U}_4)^* \quad (7)$$

$$\tilde{S}_5 = \dot{U}_5 (Y_{53} \dot{U}_3 + Y_{55} \dot{U}_5)^* \quad (8)$$

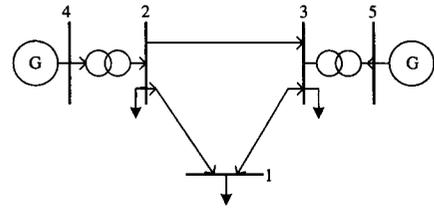


图1 IEEE 5 节点系统

Fig.1 IEEE 5-bus system

其中:节点 4 为平衡节点,节点 5 为 PV 节点,其余节点为 PQ 节点。在平衡节点外的 4 个节点配置 PMU 可使潮流方程直接可解,但这并不是最优配置。通过穷举分析可知,实现 IEEE5 节点系统潮流方程直接可解的 PMU 最少配置数目为 2,称之为最优 PMU 配置,如在节点 1、2 配置 PMU,则由式(4)可以直接求解  $\dot{U}_3$ ,进而由式(5)解出  $\dot{U}_4$ ,这样的配置便可使系统的潮流方程直接可解。

当系统规模很大时,通过穷举法求解潮流直接可解的 PMU 最优配置方案将面临“组合爆炸”问题。

## 2 自适应遗传-禁忌搜索混合算法

### 2.1 算法总览

使系统潮流直接可解的 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,本文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-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) 读取系统的节点关联矩阵,置平衡节点、PV、PQ 节点;
- 2) 初始化自适应遗传-禁忌搜索混合算法的参数,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  $t_n$  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。

### 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

$$C_1=1.$$

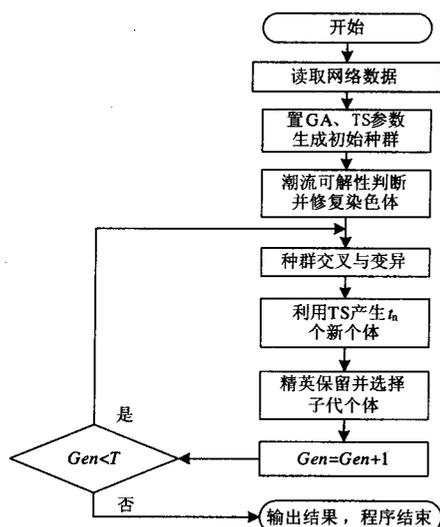


图 2 IAGA-TS 混合算法流程图

Fig.2 Flow chart of hybrid IAGA-TS algorithm

了一种自适应遗传算法 AGA(Adaptive GA)<sup>[13]</sup>, 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。

本文采用文献[11]提出的改进的自适应遗传算法。该算法一定程度上克服了 Srinivas 提出的自适应遗传算法的不足。算法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。

#### (1) 染色体编码

染色体采用二进制编码, 染色体长度为除平衡节点外的  $N-1$  个节点, 每个基因位的值由式 (9) 确定:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 安装了 PMU} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 未安装 PMU} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $i=1, \dots, N-1$ 。

#### (2) 适应度函数

适应度函数如式 (10) 所示:

$$f = C_{\max} - C_1 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} x_i \quad (10)$$

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。本文取  $C_{\max} = N$ , 即节点数;

#### (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、无放回余数随机选择等<sup>[14]</sup>。本文采用无放回余数随机选择, 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。交叉运算是遗传算法产生新个体的主要方法, 它决定了遗传算法的全局搜索能力。交叉、变异算子  $P_c$ 、 $P_m$  的计算算法如式 (11)、(12) 所示:

$$P_c = \begin{cases} F(t) \cdot [k_0 + (k_1 - k_0) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_1, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_m = \begin{cases} F(t) \cdot [k_2 + (k_3 - k_2) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_3, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

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

#### (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潮流直接可解限制条件的解, 故遗传运算作用后, 需要引入解修复机制, 具体为: 首先从潮流不可解节点中选择出线数最小的节点, 为其安装 1 台 PMU, 即将该节点对应的染色体基因位置“1”, 然后再判断解是否满足约束条件, 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 TS (Tabu Search) 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。

在本文提出的 IAGA-TS 混合算法中, TS 算法从 IAGA 算法生成群体中随机选择一定数量个体,

并产生相应个体的领域解。利用 TS 算法的特性，提升 IAGA 算法收敛速度、全局寻优力及鲁棒性。

本文中禁忌搜索算法相关方面详述如下：

(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，本文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) 禁忌列表

禁忌列表长度是禁忌搜索算法的主要参数之一，本文取禁忌列表长度为 6。

(3) 藐视准则

本文采用“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

本文应用在 Matlab7.1 开发环境下开发的 IAGA-TS 混合算法、潮流直接可解的 PMU 最优配置分析优化程序，分别对 IEEE14、30、57、118 节点算例进行了测试。各个测试算例中，均置遗传算法的群体规模  $m$  为 50，进化代数  $T$  为 100 代。表 1 为测试系统参数，表 2 为文献[7]中的半动态优化算法与本文的 IAGA-TS 混合算法的 PMU 配置结果(不包含平衡节点)。图 3 为文献[8]中的标准遗传算法(SGA)与本文的 IAGA-TS 混合算法在 IEEE57 节点和 IEEE118 节点系统测试的收敛曲线。

表 1 IEEE 测试系统参数

Tab.1 Parameters of IEEE systems

测试系统	平衡节点	PV 节点
IEEE 14 节点系统	1	2,3,6,8
IEEE 30 节点系统	1	2,5,8,11,13
IEEE 57 节点系统	1	2,3,6,8,9,12 1,4,6,8,10,12,15,18,19,24,25,26, 27,31,32,34,36,40,42,46,49,54,55,
IEEE 118 节点系统	69	56,59,61,62,65,66,70,72,73,74,76, 77,80,85,87,89,90,91,92,99,100, 103,104,105,107,110,111,112,113,116

由表 2 可见，本文提出的 IAGA-TS 混合算法的 PMU 最优配置结果明显优于文献[7]的优化算法。算法在寻得全局最优解的同时，在解的多样性方面也优于文献[7]的算法；图 3 表明，文献[8]的标准

遗传(SGA)算法易陷入局部最优解且收敛速度不及本文的 IAGA-TS 混合算法。

表 2 两种算法的 PMU 配置结果

Tab.2 Results of optimal PMU placement by two methods

测试系统	方法	PMU 配置节点号	PMU 配置总数
IEEE 14 节点系统	文献[7]方法	5,7,10,11,12	5
	IAGA-TS	2,3,4,6,11	5
IEEE 30 节点系统	文献[7]方法	3,9,14,16,23,24,26,29	8
	IAGA-TS	2,3,12,17,22,25,29	7
IEEE 57 节点系统	文献[7]方法	10,15,16,21,23, 31,33,37,43,44,52	11
	IAGA-TS	2,3,5,7,13, 25,30,37,42,45	10
IEEE 118 节点系统	文献[7]方法	2,3,7,9,13,14,16,20, 21,28,29,30,33,35,38 等	57
	IAGA-TS	1,2,5,7,10,13,16,18, 19,21,24,25,28,30,33 等	55

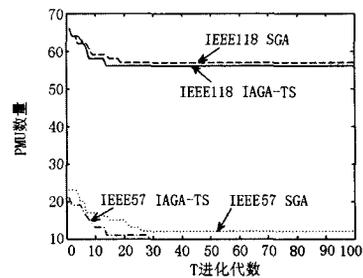


图 3 IAGA-TS 与 SGA 算法 IEEE 系统收敛曲线

Fig.3 Convergence curve of hybrid IAGA-TS and SGA algorithm

### 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 使得电力系统潮流直接可解已成为一个十分重要的课题。本文提出的自适应遗传-禁忌搜索 (IAGA-TS) 混合算法在寻得 PMU 最优配置的同时，兼顾寻优速度及鲁棒性。算例仿真结果证明了该方法的有效性。

### 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.  
XU Shu-kai, XIE Xiao-rong, XIN Yao-zhong. Present Application Situation and Development Tendency of Synchronous Phasor Measurement Technology Based Wide Area Measurement System[J]. Power System

- Technology, 2005, 29(2): 44-49.
- [2] 高厚磊, 江世芳, 贺家李, 等. 利用卫星时间作为基准的电力系统同步相量测量[J]. 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(4): 33-39.  
GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang, HE Jia-li, et al. Synchronized Phasor Measurement in Power System Using Satellite Time Reference [J]. Proceedings of the EPSA, 1995, 7(4): 33-39.
- [3] 卢志刚, 郝玉山, 康庆平, 等. 电力系统相角测量和应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4): 41-43.  
LU Zhi-gang, HAO Yu-shan, KANG Qing-ping, et al. Phasor Measurement and Its Application in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(4): 41-43.
- [4] Marin F J, Garcia-Lagos F, Joya Get al. Genetic Algorithms for Optimal Placement of Phasor Measurement Units in Electrical Networks[J]. IEEE Electronics Letters, 2003, 39(19): 1403-1405.
- [5] 谢小荣, 李红军, 吴京涛, 等. 同步相量技术应用于电力系统暂态稳定性控制的可行性分析[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 10-14.  
XIE Xiao-rong, LI Hong-jun, WU Jing-tao, et al. Feasibility Study on Using Synchrophasor Technology for Power System Transient Stability Control [J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 10-14.
- [6] 王克英, 穆钢, 韩学山, 等. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 14-17.  
WANG Ke-ying, MU Gang, HAN Xue-shan, et al. Placement of Phasor Measurement Unit for Direct Solution of Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 14-17.
- [7] 邢洁, 韩学山, 武鹏. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方法的改进[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 30-34.  
XING Jie, HAN Xue-shan, WU Peng. Improvement of Optimal PMU Placement for Analytical Solution of Power Flow Node by Node[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 30-34.
- [8] 卫志农, 孙国强, 常宝立, 等. 考虑电力系统潮流直接可解的同步相量测量单元最优配置[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 65-68.  
WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang, CHANG Bao-li, et al. Optimal Configuration Of Synchronous Phasor Measurement Unit Considering Direct Solvable Power Flow[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 65-68.
- [9] 卫志农, 常宝立, 孙国强, 等. 一种新的考虑电力系统潮流直接可解的 PMU 最优配置[J]. 继电器, 2005, 33(21): 36-40.  
WEI Zhi-nong, CHANG Bao-li, SUN Guo-qiang, et al. A New Optimal Configuration of Synchronous Phasor Measurement Unit Considering Direct Solvable Power Flow [J]. Relay, 2005, 33(21): 36-40.
- [10] Cho Ki-Seon, Shin Joong-Rin, Seung Ho Hyun. Optimal Placement of Phasor Measurement Units with GPS Receiver[A]. in: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2001. 258-262.
- [11] 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.  
SHA Ming-zhi, HAO Yu-qian, HAO Yu-shan, et al. A New Algorithm for PMU Placement Optimization in Power System[J]. Relay, 2005, 33(7): 31-37.
- [12] 蔡兴国, 初状. 用遗传算法解算机组组合的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 36-39.  
CAI Xing-guo, CHU Zhuang. Unit Commitment Based on Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 36-39.
- [13] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.
- [14] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [15] Mantawy A H, Abdel-Magid Y L, Selim S Z. Integrating Genetic Algorithms, Tabu Search, and Simulated Annealing for the Unit Commitment Problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 829-836.
- [16] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

收稿日期: 2008-09-03; 修回日期: 2008-12-16

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; E-mail: lxz-cc@sohu.com

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。