

## 电力系统 PMU 安装地点选择优化算法的研究

沙智明, 郝育黔, 郝玉山, 杨以涵

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 将进化衰减因子引入了遗传算法, 构造了一种新的自适应遗传算法。新算法在进化过程中能够同时根据个体适应度和进化时间的变化自动调整交叉与变异概率, 克服了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。精英个体保留策略保证了整个算法的全局收敛性。算法约束条件处理采用了不可行解启发性修复方法, 保证了全部优化结果都被严格限定在了满足约束条件的解空间内。基于图论的深度优先搜索方法用于系统可观性分析。将新的自适应遗传算法应用于优化 PMU 安装地点选择, 实现了安装地点最少, 而整个系统可观的目标。该算法已在某省电网 PMU 安装地点选择优化计算中得到了实际应用。

**关键词:** 相量测量装置; 可观性; 自适应遗传算法; 最优化

**中图分类号:** TM744; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)07-0031-06

### 0 引言

在大电网中, 基于 GPS 的同步相量测量装置 PMU (Phasor Measurement Unit) 的作用日益突出<sup>[1,2]</sup>。在所有的变电站与发电厂都安装 PMU, 将大大改善电力系统的监控水平<sup>[3]</sup>。但由于目前 PMU 价格昂贵, 这样做会增加系统的一次性投资, 而分阶段安装 PMU 比较现实, 即在初期先安装一定数量的 PMU, 以保证系统可观, 以后再逐步增加 PMU 安装数量, 以提高测量冗余度。

在保证系统可观的前提下, 在哪些节点安装 PMU, 才能既保证测量系统可观又使 PMU 安装数量最少, 就涉及到了组合优化的问题。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。枚举法的效率比较低, 在空间规模较大时会出现组合爆炸。启发式算法效率较高, 但针对不同的问题需要找出其特定的规则, 不具通用性。搜索算法使用了某种规则随机搜索最优解, 可以同时求解的质量与效率上达到好的平衡, 已被广泛应用于各种优化计算中<sup>[4]</sup>。

Baldwin 最先研究了在电网中安装最少数量的 PMU 并保证系统可观的问题<sup>[5]</sup>。他采用了修正的二分搜索方法 (Bisecting Search) 和模拟退火方法 (Simulated Annealing) 相结合的双搜索算法, 来求解 PMU 安装数量的最小子集。但由于此方法的计算量过大, 影响了其在较大规模系统中的应用。Ki-Seon Cho 分别采用改进的模拟退火法、直接组合法 (Direct Combination) 和禁忌搜索法 (Tabu Search) 研

究此问题<sup>[6]</sup>。由于改进的模拟退火法只是针对不同的解集合对算法的初始温度及冷却过程等方面进行了改进, 在本质上并没有摆脱模拟退火法收敛慢的弱点。直接组合法可大大减小搜索空间, 从而避免了模拟退火法的计算时间长的问题, 但需要根据不同的问题制定相应的启发性规则。禁忌搜索法通过在算法中定义一个禁忌列表来记录历史搜索结果, 来保证不发生重复搜索, 以减小搜索空间, 加快搜索速度。但该算法对初始解有较强的依赖性, 而且禁忌列表的长度对算法性能有显著影响。若列表长度过短, 会造成重复搜索, 从而导致算法收敛太慢。若列表长度过长, 会造成算法早熟<sup>[7]</sup>。文献 [6] 是针对不同的问题, 通过反复尝试的方法来确定列表的长度, 虽然提高了寻优过程的计算速度, 但通用性仍较差。

针对上述问题, 本文提出了一种新的自适应遗传算法, 在遗传算法中引入了进化参数衰减因子, 使得算法能够同时根据个体适应度变化和进化时间自动调整交叉与变异概率, 提高了解的多样性, 克服了算法早熟, 加快了寻优速度。在遗传算法的约束条件处理时, 采用了不可行解启发性修复方法, 保证了全部优化结果都被严格限定在满足约束条件的解空间内。基于图论的深度优先搜索方法用于 PMU 测量系统的可观性分析。新的自适应遗传算法具有良好的通用性, 在 IEEE14 节点系统、IEEE39 节点系统的优化计算中取得了满意效果, 并在某省电网 46 节点系统的优化计算中得到了实际验证与应用。

## 1 电力系统可观性分析方法

### 1.1 电力系统可观的定义<sup>[8,9]</sup>

考察一个系统是否可观,可以从两个角度来分析,即代数可观 (Algebraically observable) 与拓扑可观 (Topologically observable)。

#### 1) 代数可观

一个  $N$  节点,有  $m$  个测量量的电力系统,可以用下面的线性化测量方程来描述:

$$z = Hx + v \quad (1)$$

其中:  $z$  为  $m$  维测量向量,  $H$  为  $m \times (2N - 1)$  维测量雅可比矩阵,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,则系统是拓扑可观的。

### 1.2 虚拟测量

由于 PMU 可同时测量节点电压与支路电流相量,安装 PMU 的节点电压与支路电流可被直接测量,而未安装 PMU 的节点电压与支路电流可以经虚拟测量来获得。虚拟测量 (Pseudo - measurement) 是一种不通过直接测量,而是利用与待测量相关的测量量经计算而得出待测量的方法<sup>[10]</sup>。在电网中,虚拟测量有以下三种类型<sup>[5]</sup>:

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;

2) 已知支路两端节点电压,则支路电流被虚拟测量;

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。

### 1.3 基于图深度优先搜索的可观性分析方法

分析电力系统的可观性的过程,就是构造系统测量生成树 (Measurement Spanning Tree) 的过程。本文根据系统网络邻接矩阵所确定的节点之间的连通关系,采用深度优先搜索 (Depth First Search) 技术<sup>[11]</sup>,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,然后再

从这些电压节点通过电流支路继续向外扩张,在所有节点扩张完成后会生成一棵测量树。若这棵树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树上,则系统不完全可观,且这些节点也不可观。

若有一个  $n$  节点的电力系统,需要在  $m$  个节点处安装 PMU,以实现系统可观测,其可观性的具体判断算法如下:

算法调用将从所有安装 PMU 的节点开始,向不可观测节点扩张搜索。

1) 将当前节点标记为电压可观测;

2) 若当前节点安装了 PMU,则将与当前节点关联的各支路电流标记为可观测;

3) 若当前节点没有安装 PMU,则搜索当前节点是否存在 2.2 中的第 2 类虚拟测量电流支路;

4) 若当前节点是无负荷节点,则搜索当前节点是否存在 2.2 中的第 3 类虚拟测量电流支路;

5) 确定子节点的搜索方向。原则为:子节点没有安装 PMU、或支路连通且可观测、或子节点不可观测。如果存在多个搜索方向,则先按节点序号小的方向搜索;

6) 根据上一步确定的搜索方向,从步骤 1 开始进行递归调用,遍历所有可扩张子节点;

7) 根据搜索结果,生成测量树。若测量棵树包含了所有系统节点,则系统是可观的,否则列出不可观测节点,输出结果。

## 2 改进的自适应遗传算法

遗传算法是一种搜索能力很强的全局优化算法。它不依赖于具体问题,对目标函数及约束条件既不要求连续,也不要求可微,对优化设计的限制较少,因而在很多领域取得了广泛应用<sup>[4]</sup>。在遗传算法中,交叉概率与变异概率的取值对算法的性能有着至关重要的作用。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。交叉概率取较大值会加快新个体的产生,与此同时也会迅速破坏优良个体,取较小值又会使得算法搜索停滞不前。变异运算是产生新基因的方法,它决定了算法的局部搜索能力。变异概率取值过大会使算法退化为随机搜索,取值过小将难以产生新基因,造成算法早熟<sup>[12]</sup>。

### 2.1 传统的自适应遗传算法

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),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<sup>[13]</sup>,如下式:

$$P_c = \begin{cases} K_1 \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f > f_{\text{avg}} \\ K_3, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} K_2 \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f > f_{\text{avg}} \\ K_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $f_{\text{avg}}$  为群体平均适应度,  $f_{\max}$  为群体最大适应度,  $f$  为参与交叉的两个体适应度的较大值。他同时建议  $K_1, K_3$  取 1.0,  $K_2, K_4$  取 0.5,这意味着低于平均适应度的个体会全部参与交叉并以较大概率进行变异运算,以产生新解和引入新基因;而高于平均适应度的个体将减小交叉和变异的机会,而不受到破坏。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,而且进化结果的多样性也优于标准遗传算法。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。在进化初期,群体的最大适应度与优良个体的适应度之差接近或等于 0,使得优良个体的交叉与变异的概率近似为 0,从而造成了优良个体处于一种不交叉和不发生变异的状态。而此时的优良个体不一定是全局最优解,这造成了算法容易陷入局部最优<sup>[14]</sup>。

## 2.2 改进的自适应遗传算法

为了提高算法摆脱局部最优的能力,应该使进化早期与中期的优良个体保持一定的交叉与变异概率。另外,从群体的整个进化过程来看,在进化初期与中期个体交叉和变异的概率的取值应该大一些,以便开拓新的搜索空间,并防止早熟。在进化晚期,个体交叉与变异概率的取值要小一些,以保护全局最优解不被破坏。个体交叉和变异的概率在总体上应随着进化代数的增加而动态地逐步减小。

为此,本文提出了一种改进的自适应遗传算法 IAGA (Improved Adaptive GA),该算法可同时根据个体的适应度与进化时间的变化自动调整交叉与变异的概率。新算法如下式所示:

$$P_c = \begin{cases} F(t) \cdot [K_0 + (K_1 - K_0) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f > f_{\text{avg}} \\ K_1, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (4)$$

$$P_m = \begin{cases} F(t) \cdot [K_2 + (K_3 - K_2) \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}], & f > f_{\text{avg}} \\ K_3, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $F(t) = e^{-\frac{t}{T}}$  为进化衰减因子,  $t$  为进化时间,  $T$  为总进化代数,  $\alpha, T, \beta$  等参数共同决定了衰减因子的作用幅度与下降速度。图 1 是衰减因子在不同参数下的衰减曲线。其中参数  $\alpha = 1$ 。从图中可看出,衰减因子  $F(t)$  随时间变化的衰减程度,在进化初期与中期基本没有衰减,而在接近进化结束时,衰减会十分剧烈,衰减倍数随着进化代数的增加迅速下降到 0。

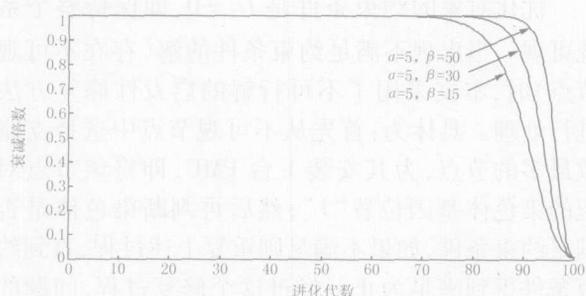


图 1 不同参数时的衰减因子

Fig 1 Attenuation factors with different parameters

通过对公式 (4)、(5) 的分析可知:在进化初期与中期,取  $\alpha = 1$  时,衰减因子  $F(t) = e^{-\frac{t}{T}} \approx 1$ ,衰减因子的衰减作用并不明显,高于平均适应度的个体的交叉与变异概率可以根据适应度变化自动调整,调整的范围分别为  $K_0 \sim K_1$  和  $K_2 \sim K_3$ 。由于高于平均适应度的优良个体保持的最小的交叉与变异概率分别为  $K_0$  和  $K_2$ ,使得算法在总体上保持了较高的交叉与变异概率,能够抑制算法早熟,并有利于新个体产生。随着进化的进行,群体趋向于最优化,变异与交叉的概率将缓慢减小。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。

算法还采用了精英个体 (Elitist) 保留策略,在进化过程中一定数量的精英个体将不参加交叉和变异操作,而是被直接复制到下一代,从而保证了整个算法的全局收敛性<sup>[15]</sup>。

## 3 相量测量装置安装地点选择的优化算法

### 3.1 优化算法的数学模型

EMU 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:

$$\begin{aligned} \text{Min } J &= m & (6) \\ \text{s.t. } U_i &= 0, i=1, \dots, N \end{aligned}$$

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 染色体编码

染色体采用二进制编码, 染色体长度等于系统节点数  $N$ , 每个基因位值由下式确定:

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 安装了 PMU} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 未安装 PMU} \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $i=1, \dots, N$

### 3.3 适应度函数与约束条件处理

优化对象的约束条件是  $U_i = 0$ , 即保持整个系统可观。当出现不满足约束条件的解 (存在不可观节点) 时, 本文采用了不可行解的启发性修复方法进行处理。具体为: 首先从不可观节点中选择支路数最多的节点, 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的可行解空间内。

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:

$$f = C_{\max} - C_1 \cdot \sum_{i=1}^N X_i \quad (8)$$

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  $C_{\max} = 50$ ,  $C_1 = 1$ 。

经过对比测试, 不可行解的启发性修复方法的效果要优于遗传算法普遍采用惩罚函数等处理方法。

### 3.4 遗传操作

遗传操作主要包括选择、交叉与变异等运算过程。选择运算是模拟自然界生物进行优胜劣汰的过程, 选择算子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 (Stochastic Tournament) 等<sup>[4]</sup>。本文算法采用随机联赛法类型的选择算子, 联赛规模取 2, 同时算法保留精英个体。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。交叉算子用式 (4) 确定的自适应交叉概率  $P_c$  进行两点交叉操作, 即随机选取两个交叉点, 以概率  $P_c$  交换两点之间的基因。变异运算是产生新基因的方法, 它决定了算法的局部搜索能力。本文变异算子采用式 (5) 确定的自适应变异概率  $P_m$  进行两点变异操作。

### 3.5 算法主要步骤

- 1) 产生规模为  $M$  的初始群体, 设定进化代数  $T$ ;
- 2) 自适应交叉与自适应变异;
- 3) 可观性分析及不可行解修复;
- 4) 计算个体适应度;
- 5) 随机联赛法选择及精英个体保留, 产生新一代群体;
- 6) 如果没有达到进化代数转第 2 步, 否则程序结束。

## 4 算例分析

本文应用在 Matlab 6.5 软件下开发的自适应遗传算法、PMU 测量网络可观性分析及 PMU 安装地点选择优化程序, 分别对以下算例进行了验证。

### 4.1 算例 1

IEEE14 节点系统如图 2 所示, 其中节点 7 为无负荷节点<sup>[10]</sup>。使用改进的自适应遗传算法, 取群体规模  $M = 40$ , 进化代数  $T = 30$ , 即可收敛到最优解。计算结果为, 在 2、6、9 节点安装测量装置即可使全系统可观。

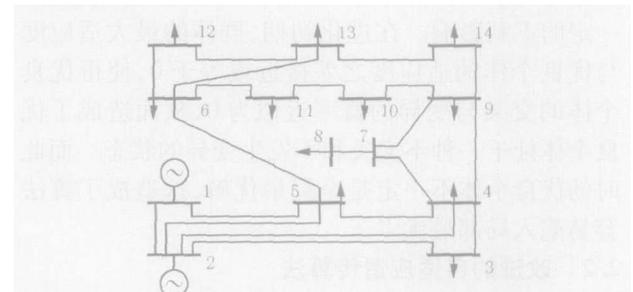


图 2 IEEE14 节点系统

Fig 2 IEEE14-bus system

### 4.2 算例 2

图 3 为 IEEE39 节点系统, 其中 1、2、5、6、9、10、11、13、14、17、19、22 节点为无负荷节点。使用改进的自适应遗传算法, 取群体规模  $M = 100$ , 进化代数  $T = 60$ 。计算结果为, 只需安装 9 台 PMU 即可使全系统可观, 并找到多种安装方案。表 1 是其中的几种优化结果。

表 1 IEEE39 节点系统的优化方案

Tab 1 Optimal scheme of IEEE39-bus system

序号	安装地点方案								
1	2	3	8	10	16	20	23	25	29
2	2	3	8	12	16	23	29	34	37
3	3	6	10	16	20	23	25	29	39
4	3	8	12	16	23	25	29	34	39
5	6	10	18	20	21	23	29	37	39

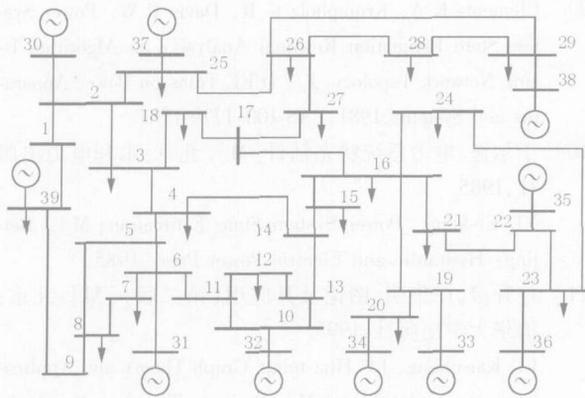


图 3 IEEE39节点系统  
Fig 3 IEEE39-bus system

#### 4.3 算例 3

图 4是某省电网的结构图,本文分别使用标准遗传算法 SGA (Standard GA)、文献 [13]的自适应遗传算法 (AGA)和改进的自适应遗传算法 (IAGA)进行了安装地点的选择优化计算。每种算法均取群体规模 100,进化 100代,各算 10次。优化计算对三种算法的全局收敛性、解的多样性和收敛速度等方面做了比较,计算结果如表 2所示。

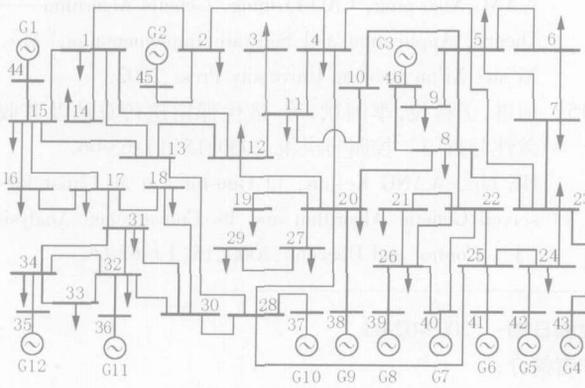


图 4 某省电网结构图  
Fig 4 A 46-bus system in one province

表 2 三种算法性能的比较

Tab 2 Performance comparison of IAGA, AGA and SGA

算法	收敛到全局最优次数	收敛到局部最优次数	最优解多样性
IAGA	7	3	21种
AGA	4	6	12种
SGA	1	9	1种

由表 2的结果可以看出:在全局收敛性方面,IAGA收敛到全局最优的次数最多,达到了 7次,AGA收敛到全局最优的次数为 4次,而 SGA很难收敛到最优解;在解的多样性方面,IAGA总共找到了

21种最优解,AGA只找到了 12种,而 SGA只找到 1种;在收敛速度方面,由于平均适应度上升程度反映了群体的优化速度,从图 5的平均适应度的变化曲线可知,IAGA和 SGA的平均适应度上升的速度较快,AGA的上升速度要慢一些,这说明 IAGA和 SGA比 AGA收敛速度快。上述结果表明,IAGA在整体性能上要优于 AGA和 SGA。

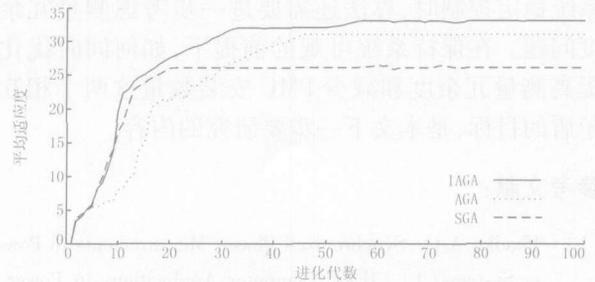


图 5 不同算法的平均适应度比较  
Fig 5 Comparison of average fitness value for IAGA, AGA and SGA

本文使用 IAGA算法进行 PMU安装地点优化过程中,在未考虑某些节点在系统中的重要程度的情况下,IAGA在 10次计算中找到了 21种最优解,结果均为只需要在系统中安装 13台 PMU就可以使全系统电压可观。如果要考虑某些节点在系统中的重要程度,则可依据节点的重要性为其设置不同的权值,并作为启发性规则加入到优化算法中。这样,重要的变电站、发电厂就可配置 PMU,直接测量其母线电压相量,可得到表 3中的优化结果。

表 3 优化的安装地点方案

Tab 3 Optimized PMU locations in the 46-bus system

序号	安装地点方案												
1	1	5	11	15	20	23	24	26	27	32	35	45	46
2	2	5	9	11	14	15	20	26	27	32	34	42	43
3	2	3	5	8	14	15	20	24	26	29	32	34	43
4	6	9	11	14	15	20	23	24	26	29	32	35	45

## 5 结论

新的自适应遗传算法可在进化过程中同时根据个体适应度和进化时间的变化自动调整交叉与变异概率,克服了原有自适应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。将新算法应用于 PMU安装地点的优化选择,达到了在保证全系统可观的前提下,使 PMU的安装数量最少的目标。在某省 46

节点系统的优化计算中,该算法的优化结果是,只需安装 13 台 PMU 就可使全系统可观,PMU 数量为系统节点数的 28%。

目前,国内的 PMU 的应用尚处于起步阶段,PMU 一般只用于系统状态量的监视,本文算法只从可观性与经济性角度来考虑 PMU 的安装地点选择问题是可行的。但当 PMU 大规模安装,特别是用于系统稳定控制时,算法还需要进一步考虑测量冗余度问题。在保持系统可观的前提下,如何同时优化提高测量冗余度和减少 PMU 安装数量这两个相互矛盾的目标,是本文下一步要研究的内容。

### 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] Bumett R O, et al Synchronized Phasor Measurements of a Power System Event[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.
- [3] Phadke AG, Thorp JS, Karimi K State Estimation with Phasor Measurements [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, PWRs-1(1): 233-241.
- [4] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用 [J].北京:国防工业出版社,1999. 6  
ZHOU Ming, SUN Shu-dong The Principle and Application of Genetic Algorithms[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [5] Baldwin T L, Mili L, et al Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 707-715.
- [6] Cho Ki-Seon, et al Optimal Placement of Phasor Measurement Units with GPS Receiver[A]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2001. 258-262.
- [7] Mori H, Goto Y. A Parallel Tabu Search Based Method for Determining Optimal Allocation of FACTS in Power Systems[A]. International Conference on Power System Technology 2000. 1077-1082.
- [8] Krumpholz G R, Clements G R, Davis P W. Power System Observability: a Practical Algorithm Using Network Topology[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99: 1534-1542.
- [9] Clements K A, Krumpholz G R, Davis P W. Power System State Estimation Residual Analysis: an Algorithm Using Network Topology[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 1779-1787.
- [10] 于尔铿.电力系统状态估计 [M].北京:水利电力出版社,1985.  
YU Er-keng Power System State Estimation [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [11] 卢开澄,卢华明.图论及其应用(第二版) [ ].北京:清华大学出版社,1995.  
LU Kai-cheng, LU Hua-ming Graph Theory and Applications, Second Edition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [12] Cao Y J, Wu Q H. Convergence Analysis of Adaptive Genetic Algorithms [A]. GALESIA 97 Second International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications 1997. 85-89.
- [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,2002.  
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming Genetic Algorithm——Theory, Application and Software Implementation [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press, 2002.
- [15] 何琳,王科俊,李国斌,等.最优保留遗传算法及其收敛性分析 [J].控制与决策,2000,15(1): 63-66.  
HE Lin, WANG Ke-jun, LI Guo-bin, et al Elitist Preserved Genetic Algorithm and Its Convergence Analysis [J]. Control and Decision, 2000, 15(1): 63-66.

收稿日期: 2005-02-03

作者简介:

沙智明(1972-),博士研究生,主要从事电力系统稳定、电力系统通信及进化计算等方面的研究; E-mail: domore@vip.sina.com

郝育黔(1968-),博士研究生,主要从事电力系统稳定、电力系统通信等方面的研究;

杨以涵(1927-),教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与控制、人工智能等方面研究。

### A new algorithm for PMU placement optimization in power system

SHA Zhiming, HAO Yu-qian, HAO Yu-shan, YANG Yi-han  
(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(下转第 58 页 continued on page 58)

基波电压;基波电流;电压偏差;2~25次谐波电压含有率;2~25次谐波电流含有量;频率;三相电压不平衡度;功率因数;基波有功功率;基波无功功率;基波视在功率;视在功率;电压总畸变率;电压长时闪变值;电压短时闪变值。以上指标均提供最大值、最小值、平均值、95%概率值、合格率。此外还包括:超标波形分析结果;基波及谐波阻抗报表。

#### 4 结论

PQDIF是一种平面文件结构,由各记录链接而成,通过标记元素结构将数据的物理属性和逻辑属性分离,具有良好的扩展性和压缩性,它的功能类似于中间件,使多数据源具有良好的兼容性,便于实现数据的共享,它为分析电网的电能质量问题以及实现电能质量管理和分析系统提供一种很好的平台。采用PQDIF格式的数据压缩技术已经在电能质量监测系统中得到了应用,实践表明,该算法能够满足电能质量在线监测技术的要求。

#### 参考文献:

- [1] 王宾,潘贞存,赵建国,等. 电能质量监测数据的同步处理与装置设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 45-49.  
WANG Bin, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo, et al. Data Synchronous Processing and Device on the Monitoring of

- Electric Power Quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(11): 45-49.  
[2] 艾欣,禹超,郭学艳,等. DataSocket技术在电能质量网络化监测系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 79-82.  
AI Xin, YU Chao, GUO Xue-yan, et al. Application of DataSocket Technology in a Web-based Power Quality Monitoring System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 79-82.  
[3] 张鹏展,艾欣. 应用PcAnywhere的电能质量在线监测研究[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(3): 9-12.  
ZHANG Peng-zhan, AI Xin. Study on Power Quality Online Monitoring Applied PcAnywhere[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(3): 9-12.  
[4] IEEE P1159. 3 Draft, Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data[S].  
[5] Implementing PQDIF Version1. 5[Z].  
[6] RFC 1950 ZLIB Compressed Data Format Specification Version 3.3[Z].

收稿日期: 2004-07-14; 修回日期: 2004-09-17

#### 作者简介:

丁屹峰(1971-),男,博士研究生,研究方向为电力负荷预测和电能质量;E-mail: dingyf\_2001@sjtu.edu.cn  
程浩忠(1962-),男,博士生导师,主要从事电网规划、电压稳定、电能质量、电力市场等方面的教学科研工作。

### A data compression model for power quality based on PQDIF format

DING Yi-feng<sup>1</sup>, CHENG Hao-zhong<sup>1</sup>, ZHAN Yong<sup>1</sup>, SUN Yi-bin<sup>2</sup>

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Urban Power Supply Company, Shanghai 200080, China)

**Abstract:** Standard data solution is the basis for realizing inter-operation and information sharing with many vendors. The main format of PQDIF (Power Quality Data Interchange Format) is introduced and power quality data transmission, data object modeling and data compression based on Zlib algorithm are analysed in the following. Power quality monitoring and analysis system based on Web and these data models has been employed in engineering application.

**Key words:** power quality; PQDIF; data compression

(上接第 36 页 continued from page 36)

**Abstract:** This paper introduces the evolution attenuation factor into traditional adaptive genetic algorithm, which enables the genetic algorithm to adjust the possibilities of crossover and mutation adaptively according to both the individual fitness and evolution generations. The new adaptive genetic algorithm overcomes the shortcomings of traditional adaptive genetic algorithm, including premature and relatively slowly searching speed in the solution space. Elitist strategy guarantees the global convergency of the new genetic algorithm. Infeasible solution heuristically repairing process is used in the restriction of algorithm. The proposed algorithm is applied to PMU placement optimization problem and fulfills the requirement of minimizing the number of PMUs in the system while keeping all nodes voltage phasor observable. A graph-theoretic procedure based on depth first search is to analyze the system observability. Illustrative results on the IEEE14-bus system, IEEE39-bus system and a provincial 46-bus system are provided.

**Key words:** phasor measurement units; observability; adaptive genetic algorithm; optimization