

基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置

徐岩, 邳静

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 为了利用最少数目的相量测量单元 (PMU) 保证电力系统在正常运行时和线路 $N-1$ 故障时都能完全可观, 提出一种基于改进自适应遗传算法 (IAGA) 的 PMU 优化配置方法。将 PMU 配置分为两个阶段: 第一阶段以 PMU 安装数目最少和正常运行时系统完全可观为目标配置 PMU; 第二阶段在已有配置结果的基础上继续安装 PMU, 以保证线路 $N-1$ 故障时系统仍完全可观。修改 IAGA 中交叉概率和变异概率的计算公式, 克服了当群体最大适应度值与平均适应度值相等时进化停滞的缺点, 优化了进化过程, 同时方便了数学计算; 对每一代个体进行防早熟操作, 消除了由交叉运算和变异运算的偶然性及随机性导致的进化早熟。算例分析结果表明, 该方法在 PMU 配置数目、配置方案种类、收敛性及实用性上有显著优势, 证明了该方法的正确性和优越性。

关键词: 电力系统; 相量测量单元 (PMU); 遗传算法; 防早熟操作; $N-1$ 故障

Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm

XU Yan, ZHI Jing

(State key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: For the purpose of using the least number of phasor measurement unit (PMU) to ensure the power system complete observability under the normal circumstances and with an $N-1$ fault of transmission line, an optimal PMU configuration method based on improved adaptive genetic algorithm (IAGA) is put forward. The configuration of PMU is divided into two stages. The first stage takes the minimum number of installed PMUs and the system observability under the normal circumstances as targets to configure PMU. The second stage continues to install PMU in order to ensure the system observability with an $N-1$ fault of transmission line. The calculation formulas of crossover probability and mutation probability of IAGA are modified, which overcome the shortcoming of evolutionary stagnation when the largest fitness value and the average fitness value in the group are equal. Besides, it optimizes the evolutionary process and makes the mathematical calculations convenient. The preventing premature operation is employed on each individual to eliminate the premature convergence resulting from the chance and randomness of the crossover and mutation. The results show that this method has significant advantages in the installed PMU number, the diversity of solution, the astringency and the practicability. The correctness and superiority of the method are verified.

Key words: power system; phasor measurement unit (PMU); genetic algorithm; preventing premature operation; $N-1$ fault

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0055-08

0 引言

实时准确地监测电网信息, 对系统的运行状态进行动态分析和控制是对现代电网的重要要求。相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU) 不仅能精确测量节点电压相量和支路电流相量, 还能实时监控母线电压和发电机功角, 对电力系统的状态估计^[1-2]、参数辨识^[3-4]、暂态稳定控制^[5]、电压监控^[6]等有重大意义。

全网所有母线都配置 PMU 可以极大地提高电力系统的监测水平^[7], 但由于 PMU 价格昂贵且实际电网的运行情况限制着 PMU 的安装地点, 目前还不能在所有母线都配置 PMU。如何利用最少的 PMU 使电力系统完全可观具有不可估量的重要性。同时, 仅以完全可观为目标的 PMU 量测网络非常薄弱, 一旦发生线路 $N-1$ 故障, 系统将变得不完全可观, 这极不利于故障处理及对系统的动态分析。从电网运行实际情况出发, 分阶段安装 PMU 是一

种很好的方法：第一阶段以 PMU 安装数目最少和系统完全可观为目标；第二阶段在第一阶段得到的配置结果的基础上继续安装 PMU 以保证系统在发生线路 $N-1$ 故障时仍完全可观。

目前，解决 PMU 优化配置问题的主要方法有枚举法、启发式算法和搜索算法，其中，枚举法的效率比较低，启发式算法不具通用性，搜索算法可以兼顾解的质量与求解效率，被广泛使用^[8]。遗传算法利用目标函数变量的编码进行进化，不受函数约束条件(如连续性、导数存在等)的限制，不需要辅助信息，这使得遗传算法几乎可以处理任何问题，并且具有很高的搜索效率^[9]。

传统遗传算法中，交叉概率和变异概率均取定值，算法容易早熟。文献[10]提出的自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, AGA)中，交叉概率和变异概率的取值随适应度值改变，该算法在进化后期比较合适，但在进化初期，利用该算法得到的最大适应度个体的交叉概率和变异概率接近为零，易导致进化停滞，陷入局部最优。文献[11]将进化参数衰减因子引入到遗传算法优化过程中，其交叉概率和变异概率能够同时根据个体适应度和进化时间的变化自动调整，改善了算法的全局收敛能力，但是该算法在 PMU 配置过程中没有考虑线路 $N-1$ 故障时的系统可观性。文献[12]提出了一种改进的自适应遗传算法(Improved Adaptive Genetic Algorithm, IAGA)，该算法根据个体的适应度值计算交叉概率和变异概率，但是其计算公式存在一定缺陷，导致当群体最大适应度值与平均适应度值相等时进化停滞。

本文在 IAGA 的基础上，修改了交叉概率和变异概率的计算公式，改善了该算法的全局搜索能力。将修改后的算法与防早熟操作结合，考虑电网实际运行情况对 PMU 配置地点的限制，分两个阶段配置 PMU，以最少数目的 PMU 分别在正常情况下和线路 $N-1$ 情况下使电力系统保持完全可观。仿真结果验证了该方法的正确性和优越性。

1 电力系统可观性及 PMU 预配置准则

1.1 电力系统可观性

电力系统中，如果一个节点的电压相量可测量或可求出(间接测量)，则称该节点是可观测节点，否则是不可观测节点^[13]。如果一个系统中的所有节点都可观测，则称该系统完全可观。

PMU 的输入通道数决定了能够被其直接测量的支路的数量，电力系统中 PMU 的输入通道数能够保证其直接测得安装节点的电压相量以及与该节

点直接相连的各支路的电流相量，即如果某节点安装了 PMU，那么该节点的电压相量以及与该节点直接相连的各支路的电流相量都可以直接测量，利用电路定律(基尔霍夫定律、欧姆定律等)、网络参数和 PMU 量测特性，可以计算出与该节点相关联的其他节点的电压相量^[14-15]。

根据以上分析，得出 PMU 安装的两个测量结论：

(1) 若某节点安装了 PMU，则该节点及其各邻接节点均可观测。

(2) 若某节点是零功率注入节点，其邻接节点个数为 N ，那么在这 $N+1$ 个节点中，其中任意 N 个节点可观测，则第 $N+1$ 个节点也可观测。

1.2 PMU 预配置准则

实际电网的运行情况限制着 PMU 的安装地点：为了方便实时监控全网的运行，电网的枢纽节点或电气薄弱节点上必须配置 PMU，同时，在一些环境条件或技术条件不允许的地区无法配置 PMU。考虑以上问题，本文采用了文献[16]中的 PMU 预配置准则。

2 对 IAGA 的改进

2.1 传统的 IAGA

交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的选择是影响遗传算法性能的关键因素。 P_c 决定了遗传算法的全局搜索能力，当 P_c 过小时，搜索速度过于缓慢；当 P_c 过大时，优良个体的结构很容易被破坏。 P_m 决定了遗传算法的局部搜索能力，当 P_m 过小时，不易产生新的个体结构；当 P_m 过大时，遗传算法就变成了随机搜索算法。

文献[12]中，IAGA 的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 计算公式为

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{av}}} \cdot (f_{\text{bigger}} - f_{\text{av}}) & (f_{\text{bigger}} \geq f_{\text{av}}) \\ P_{c1} & (f_{\text{bigger}} < f_{\text{av}}) \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{P_{m1} - P_{m2}}{f_{\max} - f_{\text{av}}} \cdot (f - f_{\text{av}}) & (f \geq f_{\text{av}}) \\ P_{m1} & (f < f_{\text{av}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： P_{c1} 、 P_{c2} 分别为交叉概率上、下限，且 $P_{c1}=0.9$ 、 $P_{c2}=0.6$ ； f_{bigger} 为参与交叉运算的两个个体中适应度值较大的值； f_{av} 为群体的平均适应度值； f_{\max} 为群体中最大适应度值； P_{m1} 、 P_{m2} 分别为变异概率的

上、下限,且 $P_{m1}=0.1$ 、 $P_{m2}=0.01$; f 为当前进行变异运算的个体的适应度值。

IAGA 存在一定缺陷:由式(1)可知,当群体的最大适应度值与平均适应度值相等,即 $f_{\max}=f_{\text{av}}$ 时,交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的计算公式中分母都变成了0,这在数学中无法计算。并且, $f_{\max}=f_{\text{av}}$ 代表群体中的所有个体具有相同的基因组成,这很有可能是局部最优解,该算法容易使进化停滞不前,无法得到全局最优解。

2.2 改进的 IAGA

针对 IAGA 的缺点,将交叉概率和变异概率的计算公式修改为

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{av}}} \cdot (f_{\text{bigger}} - f_{\text{av}}) & (f_{\text{bigger}} \geq f_{\text{av}}, f_{\max} > f_{\text{av}}) \\ P_{c1} & \text{其他} \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{P_{m1} - P_{m2}}{f_{\max} - f_{\text{av}}} \cdot (f - f_{\text{av}}) & (f \geq f_{\text{av}}, f_{\max} > f_{\text{av}}) \\ P_{m3} & (f_{\max} = f_{\text{av}}) \\ P_{m1} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{m3}=0.07$;其他符号取值与式(1)相同。

如式(2)所示,在交叉概率的计算式中,当 $f_{\max}=f_{\text{av}}$ 时,交叉概率取 P_{c1} ,虽然此时交叉运算不能改变个体的基因组成,对种群的进化没有帮助,但是方便了数学计算;在变异概率的计算式中,当 $f_{\max}=f_{\text{av}}$ 时,变异概率取 P_{m3} ,保证在所有个体基因组成一致时,种群依旧保持一定的变异概率,防止进化停滞不前,同时也方便了数学计算。

3 PMU 配置流程

3.1 第一阶段的 PMU 配置

3.1.1 PMU 配置的目标

在第一阶段,PMU 优化配置的目标是在系统完全可观的前提下安装的 PMU 数目最少,即

$$\begin{aligned} & \text{Min } m \\ & \text{s.t. } U_i = 1 \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

式中: m 为系统安装的 PMU 数目; $U_i = 1$ 表示第 i 个节点可观; n 为系统节点数。

3.1.2 染色体编码

本文在进化过程中采用二进制编码,每个个体的染色体长度为系统节点数 n ,即

$$X_i = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个节点配置 PMU} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个节点未配置 PMU} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (4)$$

3.1.3 PMU 预配置的处理

根据 PMU 预配置准则,在随机产生种群后,在种群中每一个染色体的相应节点位置上,需要安装 PMU 的节点处基因值取 1,不需安装 PMU 的节点处基因值取 0。

3.1.4 对不可行解的修复

为了保证得到的最优解能够使系统完全可观,本文对不能使系统完全可观的染色体进行修复^[11]。步骤如下:计算各个不可观节点的支路数,为其中支路数最多的节点安装 1 台 PMU,即将染色体上该节点所对应的基因位置的值为“1”,判断该染色体能否使系统完全可观,如果不能则重复上述过程,直到该染色体能够使系统完全可观为止。经过上述处理后,算法得到的解都能使系统完全可观。

3.1.5 适应度函数

适应度函数定义为

$$f = n - \sum_{i=1}^n X_i \quad (5)$$

式中: n 为系统节点总数; $\sum_{i=1}^n X_i$ 为系统安装的 PMU 总数。

3.1.6 遗传操作

遗传算法中主要包括选择运算、交叉运算和变异运算。本文中,选择运算采用赌轮盘算法^[17]。交叉运算和变异运算分别用式(2)确定的自适应交叉概率 P_c 和自适应变异概率 P_m 进行运算。

为了满足实际电网对 PMU 配置地点的约束,本文算法对必须要求安装 PMU 的节点和无法安装 PMU 的节点不允许进行变异操作。

本算法采用最优个体保留策略,将每一代的精英个体保留下来,这样既保留了优良个体,又方便观察种群进化的进程。

3.1.7 防早熟操作

遗传算法中,交叉运算和变异运算的发生具有偶然性和随机性,这导致算法得到的结果有时会与最优解相差很小,但最终没有得到最优解。举例说明如下:假设某电力系统有 16 个节点,在节点 3、6、8、10 四个节点上安装 PMU 即可使系统完全可观,定义该方案为方案一;利用遗传算法得到要配置 PMU 的节点为节点 3、6、8、10 和 15,共要安装五个 PMU,定义该方案为方案二;比较方案一和方案二,可以得到节点 15 不用安装 PMU 就可使系统完全可观,但是在进化过程中,当种群的最优个体进化到方案二后,为了得到最优方案即方案一,需要该个体在节点 15 发生交叉或者变异运算,由于交叉和变异的发生具有偶然性和随机性,方案二有

可能进化不到方案一，算法最终得到的只是局部最优解。

为了减少由交叉运算和变异运算的偶然性和随机性导致的进化早熟，对每一代个体在变异运算后进行防早熟操作。具体操作过程如下：

(1) 对于一个能够使系统完全可观的染色体，寻找其安装了 PMU 的节点；

(2) 按照序号从小到大的顺序，将 PMU 装置拆除，即将染色体上该节点所对应的基因位置的值改为“0”，判断该染色体能否使系统完全可观，如果不能，则恢复该点的 PMU 配置，即将染色体上该节点所对应的基因位置的值重新置为“1”，如果能使系统完全可观则保留该节点对应的基因值为“0”；重复以上过程，直到拆除任一点的 PMU，染色体都不能使系统完全可观为止；

(3) 按照序号从大到小的顺序，重复第(2)步。

上例中，对进化到方案二的个体进行防早熟操作：该个体能够使系统完全可观，其安装了 PMU 的节点是节点 3、6、8、10 和 15，染色体编码为“001001010100001”，按照序号从小到大的顺序，首先将节点 3 的 PMU 装置拆除，即将该个体的染色体编码改为“000001010100001”，判断该染色体能否使系统完全可观，如果能，则节点 3 没有必要安装 PMU，可以将该点的 PMU 装置拆除，如果不能，则恢复节点 3 的 PMU 配置，该个体的染色体编码重新变为“001001010100001”，继续对节点 6、8、10 和 15 按顺序分别重复以上操作；再按照序号从大到小的顺序，重复以上过程。该例中，当分别拆除节点 3、6、8、10 的 PMU 装置时，剩下的四个节点都不能使系统完全可观，当拆除节点 15 的 PMU 装置时，剩下的节点 3、6、8、10 依旧可以使系统完全可观，因此，节点 15 没有必要安装 PMU，该个体进化为“001001010100000”，即方案一。对进化到方案一的个体重新进行防早熟操作，因为拆除节点 3、6、8、10 的任意一个节点的 PMU 装置，都会使该个体不再满足系统完全可观的条件，因此，方案一即为全局最优解。

3.1.8 第一阶段的 PMU 优化配置算法流程图

第一阶段 PMU 优化配置的算法流程图如图 1 所示。

3.2 第二阶段的 PMU 配置

电力系统发生线路 $N-1$ 故障时，确保系统完全可观尤为重要。文献[18]指出在线路 $N-1$ 故障情况下，某节点依旧保持可观需要至少满足以下两个条件之一。

(1) 该节点安装了 PMU(图 2(a))。

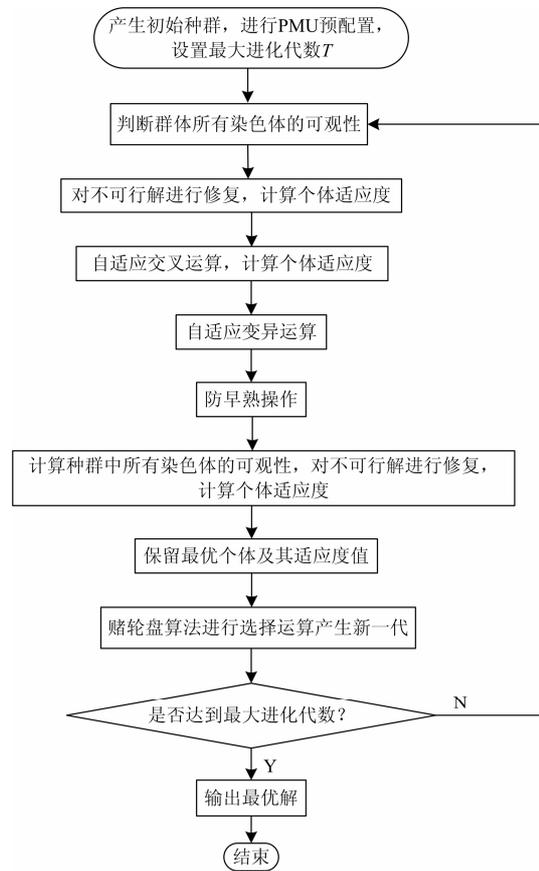


图 1 第一阶段算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart of the first stage

(2) 该节点没有安装 PMU，但与该节点直接相连的节点中，至少有两个节点安装了 PMU(图 2(b))。

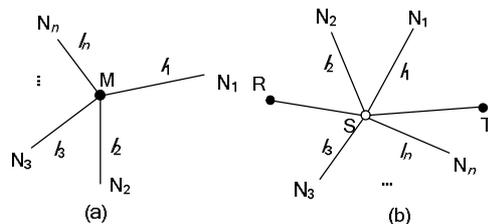


图 2 线路 $N-1$ 故障时节点保持可观示意图

Fig. 2 Node kept considerable schematic diagram with an $N-1$ fault of transmission line

图 2(a)中节点 M 安装了 PMU，该节点的电压相量由 PMU 直接测量， l_1, l_2, \dots, l_n 是与节点 M 直接相连的线路，其中任意一条线路发生故障断开，节点 M 都能保持可观；即若某节点安装了 PMU，任意一条线路发生故障时，该节点都能保持可观。图 2(b)中节点 S 没有安装 PMU，与其直接相连的节点中，节点 R 和 T 安装了 PMU，在正常运行或者线路 l_1, l_2, \dots, l_n 中任意一条线路发生故障断开时，节点 S 的电气量由节点 R 和 T 处的 PMU 间接测量

得到,节点 S 保持可观;当线路 R-S(或 T-S)发生故障时,节点 S 的电气量由节点 T(或节点 R)处的 PMU 间接测量得到,节点 S 保持可观;即若某节点没有安装 PMU,但与该节点直接相连的节点中,至少有两个节点安装了 PMU,那么系统中任意一条线路发生故障时,该节点依旧保持可观。

以上两个条件不适用于只通过一条线路与系统相连的节点(定义为孤岛节点),如图 3 所示,图中实心圆代表安装了 PMU 的节点,空心圆代表没有安装 PMU 的节点,节点 E 和节点 F 为孤岛节点,当线路 B-E(或 C-F)发生故障断开时,节点 E(或节点 F)将变得不可观测,但除去该节点的系统依旧完全可观,此时孤岛节点不再影响系统的运行情况,本文不再考虑孤岛节点的可观性。图 3 中,线路 A-C、A-B、C-D、B-D 中的任一条线路发生故障被切除,都不影响系统的完全可观性。

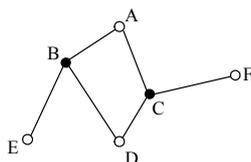


图 3 线路 $N-1$ 故障时的 PMU 配置示意图

Fig. 3 PMU configuration sketch map with an $N-1$ fault of transmission line

依次假设电力网络中的线路为被切除的故障线路,即模仿电力系统发生线路 $N-1$ 故障,以保证系统完全可观为目标,在第一阶段得到的 PMU 配置方案的基础上继续配置 PMU。

4 算例分析

分别在 IEEE14、IEEE39 和 IEEE118 节点系统中进行 PMU 配置,验证算法的正确性和优越性。

4.1 第一阶段的 PMU 配置

(1) IEEE14 节点系统的 PMU 优化配置

IEEE14 节点系统中,节点 7 是零功率注入节点。根据 PMU 预配置准则,需要预配置 PMU 的节点有节点 6、9(2-T 型接线的两端节点)。利用文中算法,得到配置 PMU 的节点为 2、6、9。

将本文方法与传统深度优先搜索算法^[15]和模拟退火算法^[15]在 IEEE14 节点系统的 PMU 配置数目进行比较,如表 1 所示。

(2) IEEE39 节点系统的 PMU 优化配置

IEEE39 节点系统中共有 12 个零功率注入节点,分别是节点 1、2、5、6、9、10、11、12、14、

表 1 IEEE14 节点系统的 PMU 配置结果

Table 1 PMU configuration results in IEEE14 bus system

方法	PMU 配置数目
传统深度优先搜索算法	6
模拟退火算法	4
本文算法	3

17、19、22。根据 PMU 预配置准则,无需预配置 PMU 的节点有:节点 1、9(零功率注入节点且邻接节点数为 2),节点 30、31、32、33、34、35、36、37、38(邻接节点数为 1 的节点)。需要预配置 PMU 的节点有节点 20、23、25、29(与邻接节点数为 1 的节点相邻且该节点带有负荷)。利用本文的算法,得到配置 PMU 的节点为 3、8、10、16、20、23、25、29。

将本文方法与传统深度优先搜索算法^[15]、禁忌搜索法^[19]、带有进化衰减因子的自适应遗传算法^[20]、最大测量树法^[21]、自适应遗传算法和禁忌搜索混合算法^[22]在 IEEE39 节点系统的 PMU 配置数目进行比较,如表 2 所示。

表 2 IEEE39 节点系统中 PMU 配置结果

Table 2 PMU configuration results in IEEE39 bus system

方法	PMU 配置数目
传统深度优先搜索算法	16
禁忌搜索法	10
带有进化衰减因子的自适应遗传算法	9
最大测量树法	9
自适应遗传算法和禁忌搜索混合算法	9
本文算法	8

(3) IEEE118 节点系统的 PMU 优化配置

IEEE118 节点系统中,节点 9、30、38、63、64、68、71、81 是零功率注入节点。根据 PMU 预配置准则,无需预配置 PMU 的节点有:9、63、81(零功率注入节点且邻接节点数为 2),10、73、87、111、112、116、117(邻接节点数为 1 的节点)。需要预配置 PMU 的节点有节点 12、86、110(与邻接节点数为 1 的节点相邻且该节点带有负荷或发电机),3、12、27、31、32、34、45、49、56、75、77、89、92、100、105、110(2-T 型接线的两端节点),21(3-T 型接线的中间节点)。利用本文算法,得到 PMU 安装数目为 31,PMU 优化配置方案数为 9。因篇幅有限,详细结果不再列出。

将本文方法在 IEEE118 节点系统中得到的

PMU 配置结果与最大测量树法^[21]、自适应遗传算法和禁忌搜索混合算法^[22]、深度优先算法^[23]、图论方法(Graph theoretic procedure, GTP)^[23]进行比较, 如表 3 所示。

表 3 IEEE118 节点系统中 PMU 配置结果

Table 3 PMU configuration results in IEEE118 bus system

方法	PMU 配置数目	方案数
最大测量树法	34	1
自适应遗传算法和禁忌混合算法	31	1
深度优先算法	41	1
GTP	39	1
本文算法	31	9

4.2 第二阶段的 PMU 配置

IEEE14 节点系统中, 节点 8 是孤岛节点; IEEE39 节点系统中, 节点 30、31、32、33、34、35、36、37、38 是孤岛节点; IEEE118 节点系统中, 节点 9、10、73、87、111、112、116、117 是孤岛节点。IEEE14 和 IEEE39 节点系统在第二阶段的 PMU 配置结果如表 4 所示。

表 4 线路 N-1 故障时 IEEE14 和 IEEE39 节点系统的 PMU 配置结果

Table 4 PMU configuration results in IEEE14 and IEEE39 bus system with an N-1 fault of transmission line

系统	种类	PMU 配置数目	安装 PMU 的节点
IEEE14	1	8	1、2、3、6、7、9、10、13
		18	3、5、7、8、10、14、16、17、20、21、23、25、27、28、29、30、31、39
IEEE39	2	18	1、3、5、7、8、9、10、14、16、17、20、21、23、25、27、28、29、31
		18	16、17、20、21、23、25、27、28、29、31

IEEE118 节点系统中, 第一阶段得到了 9 种 PMU 配置方案, 在此基础上进行第二阶段的 PMU 配置, 将其配置结果与递归安全算法^[18]、单发安全算法^[18]比较, 如表 5 所示。

将本文算法收敛到全局最优解的概率与模拟退火混合遗传算法^[14]、带有进化衰减因子的自适应遗传算法^[20]进行比较, 如表 6 所示。

观察表 1~表 6, 可得本文方法在 PMU 配置数目、配置方案种类、收敛性上都有显著优势。同时, 由于本文方法将 PMU 配置过程分为两个阶段, 并且考虑了实际电网对 PMU 安装地点的限制, 很符合对实际电网规划建设的要求, 因此本文方法的实用性很强。

表 5 线路 N-1 故障时 IEEE118 节点系统 PMU 配置结果

Table 5 PMU configuration results with an N-1 fault of transmission line in IEEE118 bus system

方法	PMU 配置数目	种类
递归安全算法	63	6
单发安全算法	72	1
本文算法	58	1
	59	3
	60	3
	61	2

表 6 不同方法的收敛性

Table 6 Convergence of different methods

方法	收敛到全局最优解的概率
模拟退火混合遗传算法	87%
带有进化衰减因子的自适应遗传算法	70%
本文算法	94%

5 结论

本文结合电网的实际情况, 把 PMU 配置分为两个阶段, 以最少数目的 PMU 分别在正常情况下和线路 N-1 情况下使电力系统保持完全可观。

文中方法有以下两大特点:

(1) 修改了 IAGA 中交叉概率和变异概率的计算公式, 克服了当种群最大适应度值与平均适应度值相等时进化停滞的缺点, 优化了进化过程, 同时方便了数学计算;

(2) 防早熟操作有效消除了由交叉运算和变异运算的偶然性和随机性导致的进化早熟。

在 IEEE14、IEEE39 和 IEEE118 节点系统中进行验证分析, 证明了该方法的正确性和优越性。通过与其他方法对比, 该方法在 PMU 配置数目、配置方案种类、收敛性及实用性上有显著优势。

参考文献

- [1] 韩美玉, 王艳松, 张丽霞. 基于粒子群算法的电力系统非线性谐波状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 98-102.
HAN Meiyu, WANG Yansong, ZHANG Lixia. Research on non-linear harmonic state estimation in power system based on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 98-102.
- [2] 李虹, 李卫国, 熊浩清. WAMS 中计及量测函数非线性项的电力系统自适应动态状态估计[J]. 电工技术学

- 报, 2010, 25(5): 155-161.
- LI Hong, LI Weiguo, XIONG Haoqing. Adaptive dynamic state estimation including nonlinearities of measurement function in WAMS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 155-161.
- [3] 孙昊, 王茂海, 齐霞. 基于PMU实测数据的同步发电机参数在线辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 31-36.
- SUN Hao, WANG Maohai, QI Xia. Synchronous generator parameters identification based on PMU data[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 31-36.
- [4] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于多时段同步测量信息的T接线路参数在线测量[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 238-244.
- NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, ZHANG Jianhua, et al. Online measurement of t-connection transmission line parameters based on multi-interval synchronized measurement information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 238-244.
- [5] 黄弘扬, 徐政, 华文, 等. 基于广域测量系统的发电机强励控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 49-56.
- HUANG Hongyang, XU Zheng, HUA Wen, et al. Forced excitation control scheme based on wide-area measurement system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 49-56.
- [6] 顾伟, 万秋兰. 广域电压监控的线性稳定指标[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 110-115.
- GU Wei, WAN Qiulan. Linearized voltage stability index for wide-area voltage monitoring and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 110-115.
- [7] PHADKE A G, THORP J S, KARIMI K J. State estimation with phasor measurements[J]. IEEE Power Engineering Review, 1986, 6(2): 233-241.
- [8] 罗毅, 赵冬梅. 电力系统PMU最优配置数字规划算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 20-24.
- LUO Yi, ZHAO Dongmei. Optimal PMU placement in power system using numerical formulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 20-24.
- [9] 段玉倩, 贺家李. 传算法及其改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(1): 39-52.
- DUAN Yuqian, HE Jiali. Genetic algorithm and its modification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1998, 10(1): 39-52.
- [10] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.
- [11] 沙智明, 郝育黔, 郝玉山, 等. 基于改进自适应遗传算法的电力系统相量测量装置安装地点选择优化[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 107-112.
- SHA Zhiming, HAO Yuqian, HAO Yushan, et al. A new adaptive genetic algorithm and its application in optimizing phasor measurement units placement in electric power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 107-112.
- [12] 任子武, 伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 41-66.
- REN Ziwu, SAN Ye. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 41-66.
- [13] 刘新东, 江全元, 曹一家. N-1条件下不失去可观测性的PMU优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 47-51.
- LIU Xindong, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Optimal PMU placement to guarantee observability under N-1 condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 47-51.
- [14] 兰华, 万旺经, 王韵然, 等. 基于模拟退火混合遗传算法的电力系统相量测量装置优化配置[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 114-117.
- LAN Hua, WAN Wangjing, WANG Yunran, et al. An optimal PMUs placement in power systems based on the simulated annealing and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 114-117.
- [15] 蔡田田, 艾芊. 电力系统中PMU最优配置的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 32-37.
- CAI Tiantian, AI Qian. Research on optimal PMU placement in power systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 32-37.
- [16] 张作鹏, 陈刚, 白茂金. 基于动态规划算法的PMU优化配置[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 52-56.
- ZHANG Zuopeng, CHEN Gang, BAI Maojin. PMU optimal placement based on dynamic programming[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 52-56.
- [17] 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.
- [18] DENEGRI G B, INVERNIZZI M, MILANO F. A security

- oriented approach to PMU positioning for advanced monitoring of a transmission grid[C] // International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002.
- [19] 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.
PENG Jiangnan, SUN Yuanzhang, WANG Haifeng. An optimal PMU placement algorithm for full network observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 10-16.
- [20] 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.
SHA Zhiming, HAO Yuqian, HAO Yushan, et al. A new algorithm for PMU placement optimization in power system[J]. Relay, 2005, 33(7): 31-36.
- [21] 孙旻, 熊俊杰, 张杰, 等. 基于最大测量树法的电力系统 PMU 优化配置[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 73-76.
SUN Min, XIONG Junjie, ZHANG Jie, et al. Optimal PMU disposition in power system based on maximal measurement tree[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8): 73-76.
- [22] 郭佩英, 郝红艳, 邓颖, 等. 考虑测量冗余度最大的电力系统 PMU 最优配置[J]. 东北电力大学学报, 2010, 30(2): 31-35.
GUO Peiying, HAO Hongyan, DENG Ying, et al. Optimal configuration of PMU in power system considering the biggest measurement redundancy[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2010, 30(2): 31-35.
- [23] 路志刚, 刘俊勇, 谢连芳. 广域测量系统中 PMU 优化配置方法的比较[J]. 现代电力, 2009, 26(3): 19-22.
LU Zhigang, LIU Junyong, XIE Lianfang. Analysis and comparison of algorithms of optimizing PMU placement in WAMS[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(3): 19-22.

收稿日期: 2014-04-14; 修回日期: 2014-08-15

作者简介:

徐 岩 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与安全控制、新能源发电和智能电网;

邗 静 (1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与安全控制。E-mail: zj1217@139.com