

系统可观测同步相量测量单元最优配置和分阶段配置

刘杰¹, 李建华¹, 焦莉², 刘东晖²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 陕西省电力调度中心, 710040, 西安)

摘要: 以电力系统配置同步相量测量单元(PMU)个数最少为目标, 全网可观测、系统有最大量测冗余度为约束, 提出 PMU 最优配置模型. 针对 PMU 价格昂贵, 很难一次性安装上所有所需 PMU 的实际问题, 提出系统不可观测度的概念, 以每阶段安装相同个数的 PMU 能够最大限度地提高系统量测冗余度和最终完成安装后满足系统可观测的最优配置为约束条件, 提出 PMU 分阶段的最优配置模型. 在此基础上, 采用改进自适应遗传算法求解此模型, 保证全局最优. 在陕西 49 节点实际电网的 PMU 安装地点优化计算中, 基于文中模型的算法不仅给出了 14 个 PMU、120 个量测量的最优配置方案, 而且给出了优化的三阶段安装步骤, 目前此方案已在实际电网中得到应用.

关键词: 电力系统; 相量测量单元; 系统不可观度

中图分类号: TM734 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0959-05

Optimal Location and Staged Installation of Phasor Measurement Unit for Complete Observability

Liu Jie¹, Li Jianhua¹, Jiao Li², Liu Donghui²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Electric Power Dispatching Center, Xi'an 710040, China)

Abstract: Taking the full network observability of power system operation state, maximum state measurement redundancy and minimum number of PMU as objectives, an optimal PMU placement(OPP) scheme is proposed. Furthermore, aiming at the high price of PMU and limitations in the availability of communication facilities around the network, a novel concept of depth of unobservability is introduced, and its impact on the number of PMU placement is explained. Taking the maximum state measurement redundancy in every stage during installation and the OPP problem of total location of PMU as objective function, a staged optimal PMU placement(SOPP) model and an adaptive genetic algorithm for OPP and SOPP problems are presented. The algorithm based on this model provides a 14 PMUs plan with 120 measurements as well as three optimal steps during installation in Shaanxi 49-bus system. This optimal location of PMU has been applied practically.

Keywords: power system; phasor measurement unit; depth of unobservability

基于全球定位系统(GPS)的同步相量测量单元(PMU)是一种电力系统的新型装置^[1-2], 该装置利用 GPS 高精度的受时信号可以精确地测量测点的电压幅值、相角、电流等电气量. 在实现电力系统广

域实时监控的要求日益迫切的情况下, 首要条件是建立一套完备的量测系统, 以达到系统完全可观测. 因此, 如何优化 PMU 的配置以达到系统完全可观测成为研究热点^[3-5]. 文献[3]采用模拟退火法求解

最优,但其可观判断方法采用数值计算方法,使得计算量过大,而且受数值精度的影响,同时SA收敛速度过慢.文献[4]给出了具体的基于状态增广关联矩阵的系统可观测性拓扑分析方法,并用禁忌搜索法实现求解最优,但该算法对初始解有较强的依赖性,并且禁忌列表的长度对算法性能有显著的影响.文献[5]将进化衰退因子引入自适应遗传算法求解组合最优,但是在PMU最优配置上没有考虑到系统量测冗余度因素.

针对上述问题,本文提出一种PMU最优配置模型,并用改进自适应遗传算法求解,保证全局最优.同时针对目前PMU的价格昂贵,一次性投资使系统达到完全可观很难实现的现状,提出了分阶段最优配置PMU的思想.

1 电力系统可观测的PMU最优配置

1.1 电力系统可观性分析

电力系统可观测分析方法^[6]在引入PMU后成为如何合理地配置PMU的位置,使其能测量出足够的量测量,从而估计出电力系统的状态的问题.由于PMU高精度的测量功能,在安装了PMU的母线处电压幅值和相角可以直接精确测量,这些母线称为直接观测点.同时PMU可以精确测量支路电流,因此利用直接观测点的电压和支路电流可以计算出其他相邻节点的状态量,这些节点成为动态观测点.

根据PMU的特点,引入PMU后,系统可观测点的判定条件可归纳为4条基本原则^[7].根据该原则,采用拓扑可观分析,提出系统可观测的分析方法和系统量测冗余度的计算方法:根据网络关联矩阵确定的节点之间的连通关系,对系统从配置PMU的母线节点开始,依次利用可观性分析的4条原则搜索系统动态可观测的节点和支路,同时在搜索过程中记录下所有可观测节点和支路的可观测次数作为最终系统量测冗余度大小的判断指标.

对一个 N 个节点、 b 条支路的系统,在 M 处安装PMU以实现系统的可观测.分析此系统可观测性的算法如下,其中 O_V 为电压相量量测冗余度函数, O_I 为电流相量量测冗余度函数.

(1)配置PMU的节点 i 直接置为可观测,同时设置电压相量量测冗余度函数 $O_V(i)++$.

(2)搜索与节点 i 相关联的支路 k ,设置电流相量量测冗余度函数 $O_I(k)++$.

(3)搜索与直接可观测点 i 相连的节点 j ,置 j

属于第1批动态可观测点 $R(j)$,且 $O_V(j)++$.

(4)扫描 $R(j)$,将它们之间关联的支路 k' 置为动态可观测,且 $O_I(k')++$.

(5)扫描系统中 $O_V(i) \neq 0$ 的未配置PMU的零注入节点.当其相关支路满足只有一条支路 k'' 为不可观测时,设置该支路动态可观测,且设置量测冗余度函数 $O_I(k'')++$,同时设置该支路的对端节点 j' 属第2批动态可观测节点 $R(j')$,且 $O_V(j')++$.重复上述过程,直到没有新的动态可观测测量出现.

(6)扫描集合 $R(j)$ 和 $R(j')$,将 $R(j')$ 内部之间、 $R(j)$ 和 $R(j')$ 之间的关联支路 k''' 置为动态可观测,且 $O_I(k''')++$.

(7)重复第5步和第6步,直到没有新的动态可观测测量的出现.

1.2 PMU最优配置问题的模型

PMU最优配置问题的数学模型可以描述如下.目标函数为配置的PMU个数最少和系统量测冗余度最大

$$K = \min(P(n_m)); \quad \max(M_{\text{aboud}}(P(n_m)))$$

约束条件为系统完全可观

$$S_{\text{sysob}}(P(n_m)) = 1$$

式中: $S_{\text{sysob}}(P(n_m))$ 是 N 节点、 b 支路系统的可观函数,其值为1表示系统可观测,为0表示系统不可观测; $P(n_m)$ 表示 N 节点系统中的 m 个PMU配置的位置组合.那么系统总的电压量测冗余度函数

$$M_{V\text{aboud}}(P(n_m)) = \sum_{i=1}^n O_V(i)$$

系统总的电流量测冗余度函数

$$M_{I\text{aboud}}(P(n_m)) = \sum_{i=1}^b O_I(i)$$

系统总的量测冗余度函数

$$M_{\text{aboud}}(P(n_m)) = M_{V\text{aboud}}(P(n_m)) + M_{I\text{aboud}}(P(n_m))$$

本文采用改进的自适应遗传算法,在 $[0, n]$ 空间内寻找最少个数的PMU配置的位置组合 $P(n_m)$,使其在约束条件下达到目标函数最优.

1.3 改进自适应遗传算法寻求最优解

1.3.1 染色体编码 本文采用二进制编码

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个节点配置 PMU} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 个节点未配置 PUM} \end{cases}$$

每个染色体的长度等于系统的节点数,而染色体上的每一个基因则代表系统的每一个节点.每个基因可取2个值,取1表示该节点配置PMU,取0则表示该节点未配置PMU.

1.3.2 染色体适应度的计算 本文旨在寻找

PMU 个数最少、量测冗余度最大、系统完全可观测的组合,因此适应度函数的设置应该让能够满足系统要求的组合具有较高的适应值.本文采用的适应度函数为

$$f = N - k_1 \sum_{i=1}^n X_i + k_2 M_{\text{about}}(P(n_m))$$

式中: k_1 和 k_2 分别是系统 PMU 个数和系统量测冗余度的系数.

对于不可观测的 PMU 位置配置组合,本文采用启发式修复的方法来修复不可观测的染色体(修复不可行解),使其达到系统可观测.具体操作如下:搜索系统出线度最大并且没有配置 PMU 的节点 i ,令 $X_i=1$,然后判断其可观测性,如果系统仍不可观测则重复上述步骤,直到系统达到可观测为止.

1.3.3 改进自适应遗传算法及算法流程 本文所采用的改进自适应遗传算法的交叉率和变异率如下^[8]

$$P_C = \begin{cases} P_{C1} - \frac{P_{C1} - P_{C2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}(f' - f_{\text{avg}}) & f' \geq f_{\text{avg}} \\ P_{C1} & f' < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

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

其中取 $P_{C1}=0.9, P_{C2}=0.6, P_{m1}=0.1, P_{m2}=0.001$.

在改进自适应遗传算法中,对应于群体中最大适应度值的个体交叉率和变异率分别取为 P_{C2} 和 P_{m2} ,这就相应地提高了群体中表现优良的个体的交叉率和变异率,使得它们不会处于一种近似停滞不变的状态.为了保证每一代中的优良个体不被破坏,采用精英个体保留方法,使它们直接复制到下一代中.算法流程如下:

(1)随机产生初始群体,调用可观测判断函数检查其可观性,对于不可观测的初始群体要用启发式修复方法修复,计算每个染色体的适应度值;

(2)自适应交叉和变异;

(3)修复不可行解,计算适应度值;

(4)采用轮盘赌的方法选择下一代,同时保留精英个体;

(5)判断是否到达预定代数,如果没有则返回步骤 2 继续求解.

2 电力系统分阶段配置 PMU

2.1 问题的产生

当电力系统的所有节点都配置 PMU 时,系统

状态估计就变成了状态测量.但是,由于 PMU 昂贵的价格以及配套技术的限制,目前不可能在系统的所有节点均装设 PMU,即一次性装上电力系统完全可观测所需要的 PMU 是很难实现的.

针对这样的现实问题,本文在解决了系统完全可观测的 PMU 最优配置问题的基础上,提出了如何优化每一阶段 PMU 安装的问题,使得每阶段安装 PMU 的个数既满足电力公司经济和技术的允许,又分布在系统中最合理的位置,使此时系统已安装的 PMU 能够为系统提供最多的量测信息.

2.2 电力系统不可观度

当电力系统中已经安装的 PMU 的个数和配置的位置不能使得整个系统可观测时,系统中就存在不可观测节点,不可观测节点的紧密程度就涉及到电力系统不可观测度^[9].

在图 1 中,两台 PMU 分别配置在 B、F 节点处,根据本文前面的介绍,可知 B、F 为直接观测点, A、C、E、G 为动态观测点, D 为不可观测点,定义图 1 中系统的不可观度为 1. 在图 2 中,两台 PMU 分别配置在 B、G 节点处,此时 D、E 均为不可观测点,定义图 2 中系统的不可观测度为 2.

此外从图 1 和图 2 中我们还可以看出,在同一个系统中,安装相同台数的 PMU,虽然系统都达不到完全可观测,但相同台数的 PMU 为系统提供的量测信息的个数却不相同,图 1 中的两台 PMU 比图 2 中的两台 PMU 为系统多提供了一个节点电压和一个支路电流的量测信息.

2.3 电力系统不可观区域

电力系统中由相关联的不可观节点组成的区域叫不可观区域,如图 1 中 D 组成的不可观测区域以及图 2 中 D、E 组成的不可观测区域.电力系统的不可观度为 k ,就是指系统中的最大不可观测区域中包含 k 个相关联的不可观节点.

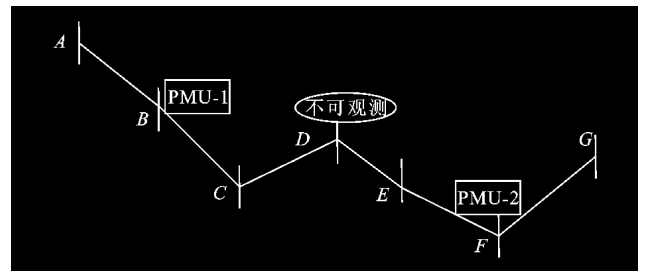


图 1 B、F 节点配置 PMU 图

系统中每个不可观测区域都产生一棵不可观测树,覆盖了这个不可观测区域的所有不可观节点,树的节点数等于该不可观测区域所包含的节点数.本

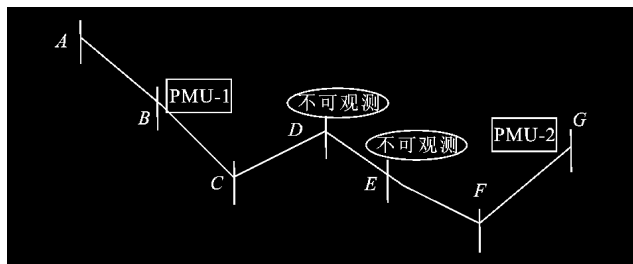


图2 B、G节点配置PMU图

文采用深度优先的搜索技术,随机从系统的一个没有访问过的不可观测节点开始,通过网络关联矩阵所确定的连通关系向外搜索相邻的不可观测节点,每访问过一个节点就将该节点置“已访问”,当搜索完成后就得到该生成树的大小,也就是该不可观测区域的大小.重复上述搜索过程,直到系统的所有不可观测节点都被访问过.

2.4 分阶段最优解的求解思想

由于经济和技术条件的限制,每阶段系统都只能安装一定数量的PMU.因此,为了使每阶段系统在PMU个数相同的情况下都能够获得最多的PMU量测信息,本文提出了以系统不可观测度逐渐减少为依据,实现分阶段优化安装PMU的观点.例如,一个 N 节点的系统,若根据实际的经济和技术能力,决定分成 V 个阶段来完成系统完全可观测的PMU安装,则第1阶段安装后,系统的不可观测度为 $V-1$ (系统可以有多个大小是 $V-1$ 的不可观测区域);第 k 个阶段后,系统的不可观测度为 $V-k$;第 V 步完成后,系统的不可观测度为0,即系统完全可观测,安装完成.

为了使每阶段完成安装后系统配置PMU的位置都不会和上一阶段配置PMU的位置相冲突,本文提出了反方向求解每阶段的最优解的思想,即先求出第 k 阶段的最优解 $P_{\text{step}}(n_m^k)$,将此最优解随机去掉某些位置的PMU后得到的组合空间 $S(k-1)$ 称为第 $k-1$ 阶段最优解的搜索空间,然后在此空间内寻找第 $k-1$ 阶段的最优解 $P_{\text{step}}(n_m^{k-1})$.对于整个安装过程而言,就是要求从系统完全可观测的最优解开始,逐步提高系统的不可观测度来求最优解,直到算出初始阶段配置PMU的最优解.这样处理就可以将每一阶段的最优解都严格限制在该阶段的搜索空间内.

2.5 PMU分阶段安装模型的建立

由上述分析我们可以建立第 i 阶段安装PMU的数学模型如下

$$\begin{cases} K_i = \max(M_{\text{aboud}}(P_{\text{step}}(n_m^i))) \\ \text{s. t. } P_{\text{step}}(n_m^i) \subset P_{\text{step}}(n_m^{i+1}) \end{cases}$$

第 i 阶段安装的目标函数是此阶段系统的量测冗余度最大,也即是要求安装后系统的不可观测度为 $V-i$,也可以写成

$$S_{\text{unOb}}(n_m^i) = V - i$$

式中: $S_{\text{unOb}}(n_m^i)$ 就是第 i 阶段的系统不可观测度.

第 i 阶段安装的约束条件是此阶段PMU配置的位置必须和下一阶段PMU配置的位置没有冲突,表示为

$$P_{\text{step}}(n_m^i) \subset P_{\text{step}}(n_m^{i+1})$$

式中: $P_{\text{step}}(n_m^i)$ 是第 i 阶段安装后系统PMU的位置集合.

2.6 改进自适应遗传算法求解最优

分阶段最优解的求解过程分 V 次计算完成,因此需要产生 V 次初始种群.计算第 $k-1$ 步最优解的初始群体是在第 k 步最优解的基础上通过染色体某些基因位由1变成0后得到.

适应度函数的设置:在此阶段能够安装PMU个数的经济能力和技术条件允许的范围内,使此阶段系统的量测冗余度最大.鉴于此,本文采用的第 k 阶段适应度函数是

$$f_K = M - k_1 \sum_{i=1}^n X_i - k_2 \Psi_k$$

式中: $\sum_{i=1}^n X_i$ 是此阶段系统所配置的PMU的台数.PMU的配置不满足此阶段系统所要求的不可观测度的惩罚函数为

$$\Psi_k = \sum_{\forall S_{\text{unOb}}^j \subseteq (S_{\text{unOb}}^k)} [\max(0, D(S_{\text{unOb}}^j) - V)]^2$$

式中: S_{unOb}^k 是第 k 阶段配置PMU后系统所有不可观测区域的集合; S_{unOb}^j 是第 j 个不可观测区域; $D(S_{\text{unOb}}^j)$ 是该不可观测区域所包含的不可观测节点数; M 是一个足够大的正数,以保证适应度函数的值为正.对于不同的系统,合理地调整系数 k_1 和 k_2 ,就可以计算出每阶段的最优解.

因为每阶段的最优解必须在上一阶段的最优解的基础上产生,所以在进行遗传变异操作时,只能在染色体中为1的基因上发生由1到0的变异.这样就能保证寻求第 $k-1$ 阶段的最优解的空间被严格限制在空间 $S(k-1)$ 内.

3 算例分析

算例:采用陕西省49节点实际电网结构图,有一个零注入节点在36号.本文的改进自适应遗传算法求出的最优解和相应的分阶段安装的方案如图3

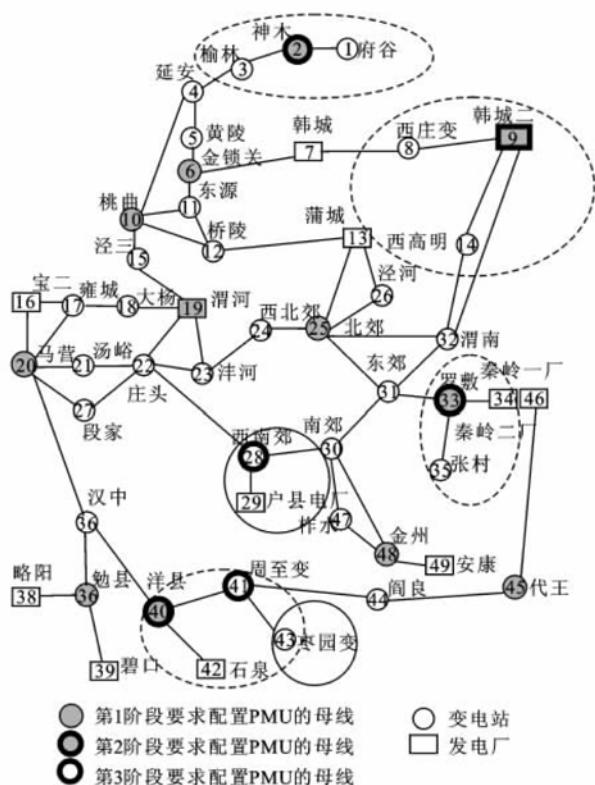


图3 陕西省49节点系统PMU配置图

所示。

设置群体规模为100,进化代数数为150,计算10次。有8次收敛到在系统完全可观测前提下PMU个数最少(14个)的解,为系统提供了8种配置方案,但各自量测冗余信息不一样,其中在2、6、9、10、19、20、25、28、33、37、40、41、45、48节点配置PMU的方案系统量测冗余度最大,为120个量测量。因此,基于此种方案展开的分阶段配置方案如下。

第1阶段安装后,系统的不可观测度为3,系统不可观测节点个数为15个,不可观测区域有5个(如图3中虚线圆圈所示),每个区域的不可观测节点个数分别为3、3、2、3、4个,此阶段PMU为系统提供的量测量为81个。

第2阶段系统新增加4台PMU,系统的不可观测度为2,系统不可观测节点个数为3个,不可观测区域有2个(如图3中实线圆圈所示),每个区域不可观测节点个数为2、1,此阶段PMU为系统提供的量测量信息为109个。

第3阶段系统增加1台PMU,此时系统不可观测度为1,不可观测节点1个(第43号节点),此阶段PMU为系统提供的量测量为116个。

最后阶段,增加一台PMU完成安装,此时系统配置14台PMU,提供120个量测量信息,达到系统完全可观测的最优配置。

当然,系统也可以从实际情况出发,在当前经济和技术能力的许可范围内,将其中的几个阶段合并成一个阶段,如将第3阶段和第4阶段合并,系统同时增加2台PMU。对于其他7种14个PMU的配置方案,同样也可以使用分阶段最优配置算法,得出其每阶段配置PMU的最佳位置和PMU给系统提供的测量数据个数。

4 结 论

本文引入了系统量测量约束条件,使得算法能够在相同个数PMU配置方案中选出量测冗余度最大的方案,同时针对实际情况提出了分阶段最优配置PMU的观点,并用算法实现,保证全局最优。本文还从实际情况出发,通过修改不可行解的修复方法,实现了当实际系统中要求某些母线节点必须安装PMU进行监控时,系统完全可观测的最优化和分阶段最优化的PMU配置方案。

参考文献:

- [1] Phadke A G. Synchronized phasor measurements in power system [J]. IEEE Computer Application in Power, 1993, 6(2): 10-15.
- [2] Burnett R O Jr, Butts M M, Sterlina P S. Power system application for phasor measurement units [J]. IEEE Computer Application in Power, 1994, 7(1): 8-13.
- [3] 卢志刚,许世范,史增洪,等. 部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 42-44.
Lu Zhigang, Xu Shifan, Shi Zenghong, et al. State estimation of voltage phasors based on parts of voltage and current phasors measurements [J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(1): 42-44.
- [4] 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 System, 2003, 27(4): 10-16.
- [5] 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, 4(7): 31-36.
Sha Zhiming, Hao Yuqian, Hao Yushan, et al. A new algorithm for PMU placement optimization in power system [J]. Relay, 2005, 4(7): 31-36.
- [6] Monticelli A. State estimation in electric power sys-

- tems: a generalized approach [M]. Norwell, USA: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [7] 王宗义, 郭志忠. PMU 配置不完全可观测系统状态计算[J]. 继电器, 2005, 4(8): 10-12.
Wang Zongyi, Guo Zhizhong. Power system state calculation of PMU placement based on incomplete observability[J]. Relay, 2005, 4(8): 10-12.
- [8] 段玉倩, 贺家李. 遗传算法及其改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 3(1): 39-51.
Duan Yuqian, He Jiali. Genetic algorithm and its modification [J]. Proceedings of the CSU-EPSA. 1998, 3(1): 39-51.
- [9] Reynaldo F N, Phadke A G. Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 11(4): 2381-2388.
- (编辑 杜秀杰)