

基于改进粒子群算法的 PMU 装置 数量增加过程中的最优配置方法

李川江, 邱国跃

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 针对现有电力系统相量测量装置 (PMU) 在系统中的最优配置问题, 进一步考虑了系统发展过程中 PMU 数量增加的最优配置问题。以电力系统线性量测模型为基础, 通过拓扑分析方法, 以全系统可观为约束, 以系统最大冗余度为目标, 并使用改进的粒子群算法进行计算, 实现 PMU 数量增加过程中的最优配置。通过算例证明了算法的有效可靠。

关键词: 可观性分析; 相量测量单元; 粒子群算法

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)12-0052-06

0 引言

随着电力系统的发展, 现代电网需要有更高的实时监控精度, 采集的数据需要带有标, 以适应时间同步化的要求。将一定数量 PMU 配置在网络中, 并将采集的数据实时传送到调度中心, 就能够实现整个系统的实时监控。如果在所有的变电站都安装 PMU, 可以极大地提高系统的监控水平和安全稳定性能^[1]。但是, 由于目前 PMU 价格昂贵, 短期内难以实现全面大范围的安装, 所以只能逐步提高配置数量。为了保证有限的投资获得最大收益, 可以考虑通过某种方法, 来保证在配置过程中配置方案始终保持最优性, 这具有重要的经济和现实意义。

针对该问题本身的特点, 本文采用改进的粒子群算法 (EPSO) 进行求解。粒子群算法 (PSO) 是一种进化算法, 源于对鸟群行为的研究。它同遗传算法类似, 都是基于叠代的优化工具, 但没有遗传算法中的交叉和变异的过程, 而是粒子在解空间追随最优的粒子进行搜索。相比之下, PSO 更容易实现, 且需要调整的参数较少。考虑到在 PMU 安装的开始阶段难以知道所需装置的最少数, 本文提出了在闭合解空间中引入降维的方法, 以构造一种改进的粒子群算法。通过不断降低粒子所在空间的维数即 PMU 的数量, 寻找出不同维数空间中的最优粒子, 最终实现了 PMU 数量增加过程中的最优配置。

1 电力系统可观性分析方法

电力系统可观性是指系统的量测集及分布足够用以求解系统当前的状态。电力系统是否可观,

可以通过两个角度分析——代数可观和拓扑可观。代数可观主要通过检查信息矩阵三角分解是否出现零主元来判断可观性。如果测量雅可比矩阵是满秩且良态的, 则这个系统是代数可观的。对于大规模复杂结构的电网, 代数可观实现困难, 运算量大, 积累误差影响运算精度及结果。

因此, 本文的优化设计程序以拓扑可观为设计基础, 着重介绍了以改进的粒子群算法为基础的拓扑可观在优化过程中的实现方法。

1.1 拓扑可观

电力系统可以看作一个由 N 个节点和 e 条边构成的图 $G = (V, E)$, V 表示顶点集合, E 表示边的集合, 分别对应系统的节点和支路集合。测量网络构成测量子图 $G' = (V', E')$, 其中 $V' \subseteq V, E' \subseteq E$, 如果 G 与 G' 满足 $V \subseteq V'$ 则系统是拓扑可观的。系统拓扑可观的核心思想是检查配置的量测集能否建立满秩的支撑树以覆盖全网所有节点^[2]。

1.2 测量方法

电力系统的节点电压和支路电流可以通过直接测量或虚拟测量的方式获得。其中虚拟测量^[3]是利用与其相关的测量量经计算而得出待测量的方法。根据测量方法的不同可知有以下几条测量规则。

对于直接测量:

规则一 安装 PMU 的节点, 其节点电压和与该节点相关的支路电流可知。

对于虚拟测量:

规则二 如果支路两端的电压可知, 则该支路电流可知。

规则三 如果零注入节点未配置 PMU 且仅一条相关支路电流未知,则该支路电流可知。

规则四 如果零注入节点未配置 PMU 且所有相邻节点电压已知,则该节点电压可知。

规则五 如果支路电流和一端电压可知,则该支路的另一端的电压可知。

考虑系统测量的冗余度:

规则六 如果支路及支路两端节点的可观测次数不同,则最小观测次数可改为与次小观测次数相等。

根据以上六条规则,如果 PMU 的位置和数量合理,则一定可以发现使整个系统可观的配置方案,但结果未必是最优解。

2 改进的粒子群算法

传统 PSO 中每个粒子包含两类变量——位置和速度。位置参数决定粒子在解空间中的位置,速度参数决定粒子运动的方向和距离。通过一个特定的目标函数决定粒子的适应值,粒子们就追随最优粒子在空间中搜索。当位置超过搜索的范围的时候,就将边界值赋予位置。

本文针对求解问题对 PSO 进行了一定的改进。首先,将解空间设为闭合离散空间,即当搜索范围超过网络节点数目的时候通过对位置号求绝对值取余加随机数的方法将位置号重新映射回解空间。实现解空间的闭合,保证了粒子每一维的位置不重复。其次,引入了降维方法。对于解空间,本文将每一种配置的方案考虑为一个粒子在多维离散解空间中的位置。粒子所在空间的维数由 PMU 配置的个数决定,粒子在空间中每一维的位置,就是每台 PMU 所在的网络节点位置。通过降维不断降低 PMU 的数量,以寻找不同数量的最优解。优化问题的目标就是在系统完全可观条件下求得具有最大冗余度的配置方案。

算法的过程是,首先将系统最大可能配置 PMU 的数量设定为初始计算维数,然后在解空间中寻找完全可观且冗余度最大的配置方法。发现最优方案后,保存结果并降维,以减少 PMU 的配置的个数。当规定次数内无法发现更优秀方案的时候,停止优化计算。为保证计算有效性,减少计算次数,在粒子空间位置初始化及计算的过程中,应始终确保粒子的每一维的位置不同,即 PMU 的配置的位置没有重复。这样就可以减少粒子搜索范围,降低计算时间,提高程序效率。

3 基于 EPSO 的数学模型

3.1 建立网络拓扑结构矩阵

网络拓扑结构矩阵 $C = [K, L]$ 。其中 $K = [k_1, \dots, k_N]$ 为网络节点类型矩阵, $k_i = 1$ 表示节点类型为无发电机无负荷的零注入节点, $k_i = 0$ 表示其它类型节点。

$L = \begin{bmatrix} l_{11} & \dots & l_{1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ l_{N1} & \dots & l_{NN} \end{bmatrix}$ 为网络结构矩阵, $l_{ij} = 1$ 表示 i, j 节点连通, $l_{ij} = 0$ 表示 i, j 节点无连通, 设 $l_{ii} = 0$ 节点自身无连通。 N 为网络节点数。其中 $i, j = 1, \dots, N$ 。

3.2 建立网络观测矩阵

设定粒子数目为 M , 则第 m 个粒子的观测矩阵为 $S_m = [P_m, V_m, I_m]$, 其中 $P_m = [p_{m1}, \dots, p_{mN}]$ 为 PMU 位置矩阵, 标识 PMU 所在节点位置, $p_{mi} = 1$ 表示 i 节点安装 PMU, $p_{mi} = 0$ 表示 i 节点未安装 PMU。 $V_m = [v_{m1}, \dots, v_{mN}]$ 为节点电压观测矩阵, v_{mi} 表示第

i 个节点电压可观测的次数。 $I_m = \begin{bmatrix} i_{m11} & \dots & i_{m1N} \\ \dots & \dots & \dots \\ i_{mN1} & \dots & i_{mNN} \end{bmatrix}$ 为支

路电流观测矩阵, i_{mij} 表示连接 i, j 节点的支路电流的可观测次数。在实际计算中 L 和 I_m 矩阵可以利用稀疏矩阵压缩存储技术提高计算速度, 减少存储空间。

3.3 可观性及冗余度计算

设 $P = [P_1, \dots, P_M]$ 为 PMU 配置方案矩阵, 根据 EPSO 中设定的粒子个数产生 M 个配置方案。其中, 第 m 个粒子对应的配置方案为 P_m 。设配置方案中 PMU 的配置个数为 k , 初始方案设 $k = N - 1$ 。

根据观测规则一

$$\begin{cases} v_{mi} = v_{mi} + p_{mi} \\ v_{mj} = v_{mj} + v_{mi} & l_{ij} (j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, N) \\ i_{mij} = i_{mij} + p_{mi} & l_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

根据观测规则二

$$\begin{aligned} & \text{if } i_{mij} = 0 \\ & i_{mij} = v_{mi} - v_{mj} \end{aligned} \quad (2)$$

根据观测规则三

$$\begin{aligned} & \text{if } i_{mix} = 0 \\ & \text{and } \sum_{j=1}^N (i_{mij} - l_{mij}) = \sum_{j=1}^N l_{mij} - 1 \\ & i_{mix} = k_i - l_{mix} \end{aligned} \quad (3)$$

根据观测规则四

$$\text{if } v_{mi} = 0$$

$$\text{and } \sum_{j=1}^N (v_{mj} \quad l_{mj}) = \sum_{j=1}^N l_{mj}$$

$$v_{mi} = k_i \quad (4)$$

根据观测规则五

$$\text{if } v_{mi} = 0$$

$$v_{mi} = \sum_{j=1}^N (l_{ij} \quad v_{mj}) \quad (5)$$

根据观测规则六

$$\text{min}(v_{mi}, \dot{i}_{mij}, v_{mj}) = \text{id}(v_{mi}, \dot{i}_{mij}, v_{mj}) \quad (6)$$

在计算过程中, 执行 (1) 后, 重复执行 (2) 至 (5), 当 v_{mi} 和 \dot{i}_{mij} 无更改时, 重复执行 (6), 直到 v_{mi} 和 \dot{i}_{mij} 再次无更改时停止可观性计算。

第 i 个方案的目标函数计算

$$t_m = \begin{cases} kg, & sl < al \text{ or } sp < N \\ kg + ry, & sl = al \text{ and } sp = N \end{cases}$$

$$sl = \sum_{i < j} (\dot{i}_{mij} \quad 1) \quad sp = \sum_{i=1}^N (v_i \quad 1)$$

$$al = \sum_{i < j} l_{ij}$$

$$srl = \sum_{i < j} \dot{i}_{mij} \quad srp = \sum_{i=1}^N v_i \quad (7)$$

$$kg = sl/al + sp/N$$

$$ry = (srl - al) / al + (srp - N) / N$$

其中: sl 为支路电流可观测总数, srl 为支路电流可观测次数总数, sp 为节点电压可观测总数, srp 为节点电压可观测次数总数, al 为网络支路总数, N 为网络节点总数, kg 为网络可观性, ry 为网络冗余度。当 $kg = 2$ 时网络完全可观, 目标函数开始考虑网络的冗余度。

3.4 改进的粒子群算法 (EPSO)

设 $T = [t_1, \dots, t_M]$ 为粒子群目标函数矩阵, M 为设定的方案的个数, t_m 为第 m 个方案的目标函数值。设 $pb_m = \max(t_m^{(n)}, t_m^{(n-1)})$ 为第 m 个方案的个体最优值。 $P_{mb} = [p_{mb1}, \dots, p_{mbN}]$ 为第 m 个方案的个体最优函数对应的 PMU 配置方案。 $gb = \max(pb_1, \dots, pb_M)$ 为全局最优值。 $P_g = [p_{g1}, \dots, p_{gN}]$ 为全局最优值对应的配置方案。设 $VP_m = [vp_{m1}, \dots, vp_{mN}]$ 为第 m 个粒子第 i 维对应的速度。

EPSO 算法的计算公式

$$\text{if } p_{mi} = 1$$

$$p_{mi} = 0$$

$$vp_{mi}^{(n)} = \text{int} [vp_{mi}^{(n-1)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{gi} - p_{mi}^{(n-1)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{mbi} - p_{mi}^{(n-1)})]$$

$$m \dot{i}^{(n)} = m \dot{i}^{(n-1)} + vp_{mi}^{(n)} \quad (8)$$

$$\text{if } m \dot{i} < 1 \text{ or } N < m \dot{i}, m \dot{i}^{(n)} = \text{int}(m \dot{i}^{(n)} / N + r_3 \cdot (N - 1))$$

$$p_{mi} = 1$$

其中: vp_{mi} 为第 m 个粒子在第 i 维所对应的速度, $m \dot{i}$ 为第 m 个粒子第 i 维位置分量在解空间的位置即所在的网络节点, c_1, c_2 为学习因子, 通常设 $c_1, c_2 = 2$, r_1, r_2, r_3 为随机数。

由初始 PMU 的配置数目 k 开始, 不能再发现更优秀方案的时候降维 $k = k - 1$ 。当不能发现完全可观的方案时停止计算, 取 $k = k + 1$ 。最后方案为 PMU 的初始最优配置方案, k 为初始最优 PMU 配置数目。改进粒子群算法的程序流程图见图 1。

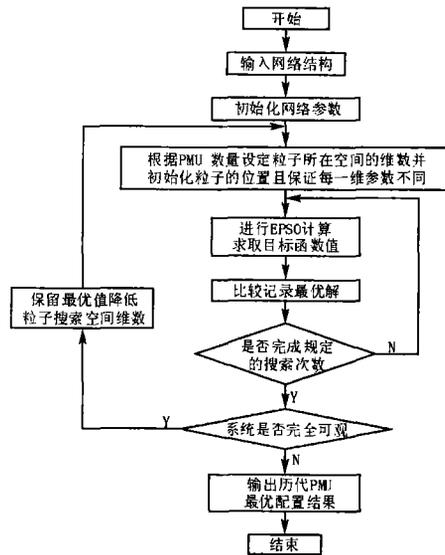


图 1 改进粒子群算法的程序流程图

Fig 1 Structure of flow chart of modified EPSO

随着电力系统的发展, PMU 的配置数量将不断的增加。不同维数最优配置方案可以为以后系统 PMU 的配置提供参考, 以保证每一次实际增加 PMU 都能够实现最优配置。

4 算例

4.1 算例 1 (见图 2)

以 IEEE14 节点系统为例: 14 个节点, 20 条边, 1 个零注入节点。选取优化开始 PMU 数目为 13。最小配置数目可以减少到 3。冗余度为 3。

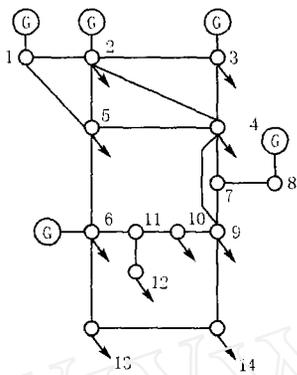


图 2 IEEE14节点系统网络结构

Fig 2 Structure of IEEE14 power system

4. 1. 1 IEEE14节点系统初始 PMU 最优配置

PMU 配置数量为 3, PMU 配置位置 为节点 2, 6, 9, 可观测节点电压数目为 14, 可观测支路电流数目为 20, 节点电压观测次数为 16, 支路电流观测次数为 21, 冗余度为 3。

4. 1. 2 程序结果 (见表 1)

4. 2 算例 2 (见图 3)

以 IEEE39 节点系统为例: 39 个节点、46 条边、12 个零注入节点。选取优化开始的 PMU 数目为 38, 最小配置数目可以减少到 8, 冗余度为 3。

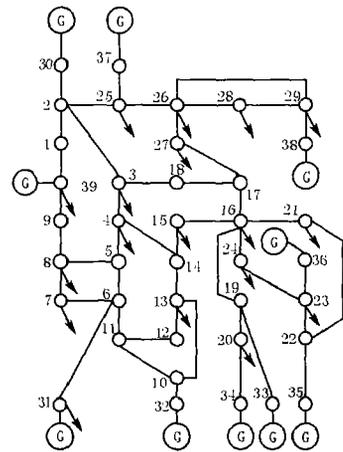


图 3 IEEE 39 节点系统网络结构图

Fig 3 Structure of IEEE 39 power system

4. 2. 1 程序结果 (见表 2)

表 2 IEEE39节点系统最优配置结果

Tab 2 The optimal configuration of IEEE39 power system

节点数	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
21																
22																
23																
24																
25																
26																
27																
28																
29																
39																

目标函数值 4. 102 564 4. 335 563 4. 550 725 4. 805 463 5. 154 961 5. 413 601 5. 624 861 5. 792 642 5. 960 423 6. 193 422 6. 382 943 6. 615 942 6. 874 582 6. 991 081 7. 158 863 7. 370 122

续表 2

节点数	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
29															
30															
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															

目标函数值 7.512 263 7.676 143 7.840 022 8.094 760 8.193 422 8.288 183 8.430 324 8.546 823 8.688 963 8.761 985 8.809 364 8.856 745 8.882 385 8.908 027 8.933 668

5 结论与展望

本文以系统完全可观为约束,以系统观测的最大冗余度为目标。计算求解出初始最优配置方案,并保证了不同数量的 PMU 都能达到最优配置。通过算例证明该方法实现了优化目标。在文献 [2] 的 IEEE39 节点系统算例中发现的 PMU 最优配置结果为 10 台,冗余度为 17。通过本文的算法,发现了更加优秀的 8 台 PMU 的配置方案,且本文计算出的 10 台 PMU 的配置方案的冗余度为 23 更为可靠。

参考文献:

- [1] Phadke A G, Thorp J S, Karimi K. State Estimation with Phasor Measurements [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 233-241.
- [2] 彭锋南,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 Jiang-nan, SUN Yuan-zhang, WANG Hai-feng. An Optimal PMU Placement Algorithm for Full Network Observability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 10-16
- [3] Baldwin TL, Mili L, et al. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 707-715.
- [4] 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 Zhi-ming, HAO Yu-qian, HAO Yu-shan, et al. A New Adaptive Genetic Algorithm and Its Application in Optimizing Phasor Measurement Units Placement in Electric Power System [J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 107-112

- [5] 郑相华,米增强,赵洪山,等. 基于 PMU 的状态估计的研究 [J]. 继电器, 2004, 32(17): 16-19.
ZHENG Xiang-hua, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan, et al. Research on State Estimation Based on PMU [J]. Relay, 2004, 32(17): 16-19.
- [6] 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): 41-46
LU Zhi-gang, HAO Yu-shan, KANG Qing-ping, et al. Phasor Measurement and Its Applications in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(4): 41-46
- [7] 郭志忠,王宗义. PMU 配置不完全可观测系统状态计算 [J]. 继电器, 2005, 33(8): 10-12
GUO Zhi-zhong, WANG Zong-yi. Power System State Calculation of PMU Placement Based on Incomplete Observability [J]. Relay, 2005, 33(8): 10-12
- [8] 闵勇,丁仁杰,任勇,等. 电力系统全网同步监测系统 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(7): 86-88
MIN Yong, DING Ren-jie, REN Yong, et al. Investigation of Global Synchronized Monitoring System in Power Systems [J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 1997, 37(7): 86-88

(下转第 68 页 continued on page 68)

- tion [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.
- [11] Graham R. Power System Oscillations [M]. Norwell (USA): Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [12] Kunder P. Power System Stability and Control, Reprint [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [13] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序 PSASP6.1 小干扰稳定分析用户手册 [Z]. 北京: 中国电力科学研究院.
Electric Power Research Institute. Synthetical Procedure for Power System Analysis PSASP6.1 Small Disturbance Stability Analysis [Z]. Beijing: Electric Power Research

Institute

收稿日期: 2005-12-13; 修回日期: 2005-12-31

作者简介:

王青 (1974 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析; E-mail: wangqing03@mails.tsinghua.edu.cn

闵勇 (1963 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制;

张毅威 (1961 -), 女, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。

Mechanism analysis of ultra low frequency inter-area oscillation

WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yi-wei

(State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: During the process of the interconnection of Northeast China Power Grid, North China Power Grid, Central China Power Grid and Chuan-Yu Power Grid, there appeared ultra low frequency inter-area oscillation. The mechanism of this phenomenon is studied in this paper. Eigenvalue sensitivity with respect to inter-area transfer admittance is defined and deduced, which manifests the influence of the power grid interconnection tightness on inter-area oscillation frequency. Moreover, the effect of system installation capacity on inter-area transfer admittance is analyzed. The giant system installation capacity of the above four power grids makes the inter-area transfer admittance much smaller, which puts the inter-area oscillation frequency lower and leads to the appearance of ultra low frequency oscillation. Two illustrative examples, i.e. four-generator two-area system and the interconnection system of the above four major power grid, are adopted to verify the validity of the theoretical analysis.

Key words: inter-area oscillation; ultra low frequency; eigenvalue sensitivity; small signal stability

(上接第 56 页 continued from page 56)

- [9] 王克英, 穆钢, 韩学山, 等. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 14-19.
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): 14-19.
- [10] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. 一种基于 PMU 的线路自适应故障测距算法 [J]. 继电器, 2004, 32(10): 6-9.

LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. An Adaptive Fault Location Algorithm Based on PMU for Transmission on Line [J]. Relay, 2004, 32(10): 6-9.

收稿日期: 2005-10-27; 修回日期: 2006-03-20

作者简介:

李川江 (1982 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: albertlcj@163.com

邱国跃 (1958 -), 男, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统运行与控制及人工智能等。

Optimal placement algorithm of PMU based on enhanced particle swarm optimization during the increase of PMUs

LI Chuan-jiang, QIU Guo-yue

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: Aiming at the existing optimal placement problem of PMU in the power system, this paper further considered the condition that the number of PMUs increase in the development of power system. Taking the observability of whole system as constraint condition and maximal measurement redundancy of measured quantities as the objectives, by using a topological analysis method, the optimization model of placement of PMU was formed based on linear measurement model of power system. Moreover, adopting the enhanced particle swarm optimization (EPSO), the optimal placement of PMU was achieved in the process of the increase of installation number. The numerical examples show that the algorithm is effective and reliable.

Key words: observability analysis; phasor measurement unit (PMU); particle swarm optimization (PSO)