

基于蚁群算法的配电网谐波量测点优化配置

王艳松, 孙桂龙

(中国石油大学信息与控制工程学院, 山东青岛 266580)

摘要:谐波量测点的优化配置能有效提高配电网谐波状态估计的可观性和准确性。结合配电网特性,确定配电网量测装置配置原则,基于配电网拓扑数学模型计算系统状态的可观性。综合考虑配电网的节点状态可观度和冗余度建立谐波量测点优化配置的数学模型,提出应用蚁群算法求解达到同一优化目标的多种量测配置优化方案,为规划设计结合现场实际情况择优选择。算例分析结果验证了该算法的有效性,PMU 配置位置的优化减少了节点冗余度,增加了可观节点数目。

关键词:配电网; 蚁群算法; PMU; 观测度; 冗余度

中图分类号:TM 727

文献标志码:A

Optimal placement of harmonic measurement unit based on ant-algorithm for distribution network

WANG Yan-song, SUN Gui-long

(College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: An optimal placement of the harmonic measurement can effectively improve the feasibility and accuracy of the harmonic state estimation for a distribution network. The principle of placing the distribution network harmonic measuring unit is determined based on the characteristics of the distribution network. Using distribution network topology, a mathematical model is derived to calculate the node-voltage-state observability. The PMU optimal placement of the mathematical model is established with comprehensive considerations of the node-voltage-state observability degree and redundancy. Ant-algorithm is proposed to solve the optimal placement problem of the harmonic measuring unit, which can give a variety of schemes to meet the same optimization goal for the planning, and can be designed to choose the optimal solution according to the real situations. The results show that the ant-algorithm is effective for the optimal placement of the harmonic measurement. The redundancy of nodes is effectively reduced and the number of observable nodes is sufficiently increased by the optimal placement of the PMU.

Key words: distribution network; ant-algorithm; phasor measurement unit (PMU); observability degree; redundancy

对配电网进行谐波状态估计可指导谐波治理。谐波状态估计的精度与 PMU 数量和位置有关,研究量测点 PMU 的优化配置对提高谐波状态估计的精度具有重要意义。王家林等^[1-4]以潮流方程直接可解为约束;郭佩英等^[5-6]以系统完全可观和冗余度最大为约束,但 PMU 量测冗余不一定能提高系统的精度^[7];彭春华等^[8-12]研究了正常状态和 $N-1$ 条件下可观测的 PMU 配置方法;Aminifar 等^[13]考虑各种突发情况(包括量测值丢失、线路中断等)规划 PMU

优化问题,也有学者针对 PMU 与 SCADA 系统并存且互为补充的状况^[13-15],提出了 PMU 优化配置方法;蒋正威等^[16-18]则以提高状态估计精度为目标,研究 PMU 最优配置方法。上述研究主要以环式拓扑结构的输电网为研究对象,分别应用遗传算法、免疫算法和模拟退火算法、整数规划法和克隆算法等求解优化模型。笔者结合配电网的辐射状拓扑特性,确定配电网量测装置配置原则,基于配电网拓扑数学模型计算电力系统状态的可观性,提出应用蚁

收稿日期:2013-02-25

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2012EEL20)

作者简介:王艳松(1965-),女,教授,博士,主要从事配电网优化规划、配电网故障诊断和电能质量分析治理的研究。E-mail: wys91517@

163.com。

群算法求解配电网量测配置最优方案。

1 PMU 配置的基本理论

1.1 量测配置原则

配置电能质量的量测装置一般考虑配电网节点类型和负荷类型,不要求配电网全局可观,只要满足一定可观性即可。因此,配置 PMU 原则如下:

(1)安装在某条母线 i 上的同步相量量测单元除可测量该条母线的电压外,还具备量测与该节点相关联的所有支路电流的数据通道。

(2)某条母线 i 装设有 PMU 量测,则与节点 i 相关联的所有节点电压相量可以通过支路欧姆定律计算得到;如果一条支路两端电压都已知,则该支路电流可通过欧姆定律计算得到。

(3)对于无配置 PMU 量测的零功率注入节点,该节点的所有相邻节点电压相量全部已知时,可由节点方程求出该零注入节点电压相量。该节点的相关支路电流仅一个未知,则由 KCL 方程可求出该未知支路电流。

(4)由于配电网的辐射状特性,若某一元素所带子代元素越多,其被选为量测点位置的概率就越大。

(5)对于支路量测来说,应将量测点设置在被量测支路的首端,以保证被量测支路处于量测装置的覆盖范围之内。

(6)配电网只对 PCC 节点安装量 PMU 量测装置。

1.2 可观测度

根据量测配置原则,配电网的可观性分为直接量测可观、直接量测间接可观和间接量测可观。直接量测可观对应着 PMU 安装节点(符合配置原则(1));直接量测间接可观对应着由 PMU 安装节点根据配置原则(2)间接计算可观的节点;间接量测可观对应着配置原则(3)计算可观的节点。

根据配电网的拓扑结构分析量测配置的可观性。如图 1 所示,节点-支路关联矩阵为

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & & & & & & \\ & -1 & 1 & & 1 & & & \\ & & -1 & 1 & & & & \\ & & & -1 & & & & \\ & & & & -1 & 1 & 1 & \\ & & & & & -1 & 1 & \\ & & & & & & -1 & \\ & & & & & & & -1 \end{bmatrix} \end{matrix} .$$

(1)

其稀疏存储格式为按行存非零非对角元素列号 JU;按列存非零非对角元素行号 IU;记录每行第一个非零元列号在 JU 中的位置 IA;记录下一个非零元列号在 JU 中的位置 LINK,对每行最后一个非零元列号的该值赋 0。则在 A 的稀疏存储格式中,JU 表示节点 i 的下游直连支路,IU 表示点 i 的上游直连支路。

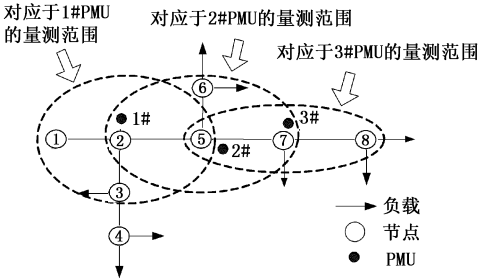


图 1 安装 3 台 PMU 的配网简化图
Fig. 1 Installation of 3 PMUs simplified distribution network diagram

配电网中在某点 i 安装 PMU 量测覆盖范围的节点集合为 P_i ,集合中各节点的可观测值设为 1,可用以下流程体查找在某点 i 安装 PMU 量测覆盖范围的节点集 P_i :

```
p = IU(i)
put p into Pi
k = IA(i)
{
  loop while k ≠ 0
  {
    p = JU(k)
    put p into Pi
    k = link(k)
  }
end loop
```

可观测度是衡量 PMU 系统的全局可观测性能的重要指标,定义为在当前量测配置情况下,所有可量测的节点数目相对于系统所有节点数目的比例。

1.3 冗余度

冗余度是衡量 PMU 量测点优化配置的重要指标,用来描述量测系统中的数据重复量测情况(含直接量测和间接量测)。冗余度定义为在当前量测配置情况下系统中各个节点被重复量测的次数之和,用 $\sum R(i)$ 表示。如图 1 所示,第 2 号节点被重复量测 1 次;第 5 号节点被重复量测 2 次;第 7 号节点被重复量测 1 次。因此,该量测系统的冗余度为 4。

2、5、7 号母线分别安装了 PMU 装置,其量测范围和系统可观测范围如表 1 所示。

表 1 系统可观测度和冗余度

Table 1 Observability and redundancy of system

节点	1#PMU 覆盖	2#PMU 覆盖	3#PMU 覆盖	节点 观测度	节点 冗余度
1	1	0	0	1	0
2	1	1	0	1	1
3	1	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	2
6	0	1	0	1	0
7	0	1	1	1	1
8	0	0	1	1	0

2 量测点优化配置模型

在配电网配置有限个 PMU 可用于状态估计和谐波源定位,首先要考虑量测系统的全局可观测性水平最高,其次要考虑配置有限个 PMU 时,应使被重复观测的节点数目和次数最小。

量测系统的全局可观测性水平最高,可表示为可观测节点数目最多,其目标函数为

$$\max \sum_{i=1}^n F(i) . \tag{2}$$

式中, n 为系统的节点数; $F(i) = 1$ 表示节点 i 可观, $F(i) = 0$ 表示节点 i 不可观。

当存在一部分节点不可观时,应限制另一部分节点被多次重复可观。用 R 描述系统中各节点被重复量测的次数,如 $R(i) = k$ 表示第 i 个节点被重复测量了 k 次。因此,在给定 PMU 配置数量的情况下,应减少量测系统的数据冗余度,即

$$\begin{cases} \min \sum R(i) , \\ \text{s. t. } R(i) \leq 1 . \end{cases} \tag{3}$$

因此,给定 PMU 安装数量,应减少系统可观的冗余度,增大系统可观测度,多目标最优配置数学模型为

$$\begin{cases} \max f = \sum_{i=1}^n F(i) + \left(M - \sum_{i=1}^n R(i) \right) , \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n X(i) - M = 0 , R(i) \leq 1 . \end{cases} \tag{4}$$

式中, n 为配电网的节点数; $X(i) = 1$ 表示节点 i 安装了 PMU, $X(i) = 0$ 表示节点 i 没有安装 PMU; M 为给定的 PMU 量测装置配置数量。

3 量测点优化配置的蚁群算法

3.1 蚁群基本原理

假设有 n 个城市, m 只蚂蚁,城市 i 与城市 j 之间的距离用 d_{ij} 表示, τ_{ij} 表示两城市间的信息素, J_k 表示第 k 只蚂蚁允许访问的城市,第 k 只蚂蚁由城市 i 转移到城市 j 的概率为

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{u \in J_k} \tau_{iu}^\alpha \eta_{ju}^\beta} , j \in J_k ; \\ 0 , \text{其他} . \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$J_k = \{1, 2, \cdots, n\} - \text{tabu}_k .$$

式中, tabu_k 用于记录蚂蚁 k 当前所走过的路径,此集合随着进化过程作动态调节; $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ 为线路 ij 的长度倒数; α 、 β 分别表示蚂蚁在运动过程中所积累的信息素及启发式因子在蚂蚁选择路径中所起作用的大小。

随着时间的推移,各路径上以前留下的信息素逐渐消逝,用 ρ 参数表示信息素消逝程度,即挥发系数,蚂蚁完成一次循环,各路径上的信息素 τ_{ij} 根据下式进行调节:

$$\tau_{ij}(N+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(N) + \Delta\tau_{ij} , \tag{6}$$

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k . \tag{7}$$

式中, $\Delta\tau_{ij}$ 为本次循环中路径 ij 上信息素的增加。

3.2 PMU 配置的蚁群算法

将给定的 PMU 数目作为蚂蚁旅游的阶段数,将配电网所有节点作为蚂蚁的候选城市。根据 PMU 量测配置特点,状态转移和信息素更新原则如下。

3.2.1 状态移动规则

位置 i 的蚂蚁选择下一个节点 j 的公式为

$$j = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k} \{ [\tau_{iu}(N)]^\alpha \cdot [\eta_{iu}]^\beta \} , q \leq q_0 ; \\ \text{依概率 } p_{ij}^k \text{ 选择 } j , \text{其他} . \end{cases} \tag{8}$$

式中, η_{iu} 为节点 u 的可观测度 $F(u)$; $\arg\max\{\}$ 返回的是 $\{\}$ 取最大值时所对应的 u 值; q_0 是一个参数($0 \leq q_0 \leq 1$); q 是 $(0,1)$ 中均匀分布的随机数。每当蚂蚁要选择向哪一个节点转移时,就在 $[0,1]$ 之间产生一个随机数 q 。根据这个随机数确定用哪种方法产生蚂蚁转移方向,然后用对应的方法产生转移。

3.2.2 信息更新规则

信息更新分为局部更新和全局更新。信息素的变化量为

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{f}{R(j)+1} , \text{第 } k \text{ 只蚂蚁在本循环中经过 } ij ; \\ 0 , \text{其他} . \end{cases} \tag{9}$$

式中, f 为 PMU 优化配置的目标函数, $R(j)$ 为节点 j 的冗余度。每一只蚂蚁完成一次旅游,进行局部信息更新;一群蚂蚁完成一次旅游进行全局信息更新,全局更新只对每一次循环中最优解的蚂蚁所记录的

路径进行全局信息更新。

在 PMU 安装数目一定的前提下,寻求一种能够满足系统可观测度最大、量测数据冗余度最小的优化配置蚁群算法的步骤如下:

(1)初始阶段。随机确定 m 只蚂蚁的初始位置,设路径上各支路的信息素都等于一常数 $\tau_{ij}=C$, $\Delta\tau_{ij}=0$ 。

(2)派出蚂蚁阶段。每一只蚂蚁以一种随机策略完成一次旅游,蚂蚁从节点 i 选择下一节点 j 都依据两节点之间的转移概率 p_{ij} 。所有蚂蚁(m 只)重复该过程。

(3)评价阶段。对每只蚂蚁完成一次旅游后进行旅游方案的评价,其评价函数即目标函数,并记录本次旅游的蚂蚁群最优旅游方案即最优解。

(4)更新信息素。按更新规则更新每条边上的信息素,每点上信息素受可观测度和冗余度两个因素影响。

(5)收敛判断。①旅行次数达到预先设定的最大次数;②所有蚂蚁都选择了同一条路径。

4 算例分析

以文献[19]所示的 IEEE37 节点电网为例进行分析,根据量测点配置原则,只以 PCC 节点作为寻优范围来研究 PMU 的优化配置方案。

将 IEEE37 系统中的非公共节点的末端负荷节点进行简化,网络简化后重新进行节点优化编号,如图 2 所示。根据配电网节点数,按经验 PMU 配置数目通常为网络节点数目的 1/3 ~ 1/5,根据配电网节点类型和负荷的性质,不需要完全可观。因此,该算例给定 5 台 PMU,优化算法所求得的最优配置方案结果并非唯一的,但对配电网可观测度均达到 90.9%,如表 2 所示。五种配置方案都在 14 和 18 号节点处配置了 PMU,说明 14 和 18 号节点为枢纽量测点;不同的配置方案虽然实现了相同的最大可观测度,但其量测范围不尽相同,这为电网规划提供了多种选择,可以结合配电网负荷性质和电网的实际框架特点选择一种符合实际的规划方案。

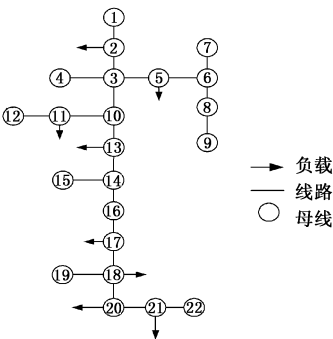


图 2 IEEE37 节点电网的简化拓扑图
Fig.2 Simplified network diagram for IEEE 37-node system

表 2 5 台 PMU 的多种可供选择的配置方案
Table 2 Several alternative optimal allocation results of 5 PMUs

配置 PMU 的节点	可观测范围	可观测度
3,6,14,18,22	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22	90.9%
3,8,14,18,22	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22	90.9%
3,8,14,18,21	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22	90.9%
3,6,14,18,21	2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22	90.9%
2,6,11,14,18	1,2,3,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20	90.9%

5 结 论

(1)根据配电网的节点-支路关联矩阵数学模型的稀疏存储技术,可以分析谐波量测点覆盖的节点可观测性。

(2)以节点可观测度和冗余度为目标建立数学模型,减少节点不必要的可观冗余度,增大可观节点数目。

(3)配电网节点多分支多,各节点用户性质不同,不要求全局可观,给定 PMU 配置经验数目,应用蚁群算法的个体寻优和群体寻优交互进行的优点能得到多个合理的规划方案。算例分析验证了算法的有效性。

参考文献:

[1] 王家林,夏立,吴正国,等. 采用量子遗传算法的电力系统 PMU 最优配置[J]. 高电压技术,2010,36(11): 2838-2842.
WANG Jia-lin, XIA li, WU Zheng-guo, et al. Optimal PMU placement of the power system using quantum genetic algorithm [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36 (11): 2838-2842.

[2] 李新振,滕欢. 考虑潮流方程直接可解的 PMU 最优配置[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16): 63-67.
LI Xin-zhen, TENG Huan. Optimal configuration of PMU considering direct solvable power flow [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 63-67.

- [3] 王家林,夏立,吴正国,等. 船舶电力系统相量测量单元多目标优化配置问题[J]. 高电压技术,2012,38(5):1267-1273.
WANG Jia-lin, XIA li, WU Zheng-guo, et al. Optimal phasor measurement units placement considering multi-objectives in shipboard power system[J]. High Voltage Engineering,2012,38(5):1267-1273.
- [4] 王家林,夏立,吴正国,等. 电力系统 PMU 最优配置新方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(6):1-5.
WANG Jia-lin, XIA li, WU Zheng-guo, et al. New method of optimal PMU placement of the power systems[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and its Automation, 2011,23(6):1-5.
- [5] 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 Pei-ying, HAO Hong-yan, 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.
- [6] CHAKRABARTI S, KYRIAKIDES E. Optimal placement of phasor measurement units for power system observability [J]. IEEE Transactions on Power System,2008,23(3):1433-1440.
- [7] 王艳松,韩美玉,谭志勇. 基于遗传算法的 PMU 配置对谐波状态估计质量影响的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):33-36.
WANG Yan-song, HAN Mei-yu, TAN Zhi-yong. Study on the effect of PMU allocation on the quality of harmonic state estimations[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):33-36.
- [8] 唐岚,吴军基. 基于电网脆弱性和经济性评估的 PMU 最优配置新方法[J]. 电网技术,2012,36(8):260-264.
TANG Lan, WU Jun-ji. A new method for optimal PMU configuration considering vulnerability of power system and economy[J]. Power System Technology, 2012,36(8):260-264.
- [9] 彭春华. 用免疫 BPSO 算法和 N-1 原则多目标优化配置 PMU[J]. 高电压技术,2008,34(9):1971-1976.
PENG Chun-hua. Multi-objective optimization for PMU placement based on immune BPSO algorithm and N-1 reliability test principle [J]. High Voltage Engineering, 2008,34(9):1971-1976.
- [10] 陈刚,唐毅. 基于田口法考虑 N-1 情况的 PMU 优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(13):28-32.
CHEN Gang, TANG Yi. Optimal PMU placement based on Taguchi method considering N-1 condition[J]. Auto-
- ation of Electric Power Systems,2010,34(13):28-32.
- [11] 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 Xin-dong, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Optimal PMU placement to guarantee observability under N-1 condition[J]. Proceedings of the CSE,2009,29(10):47-51.
- [12] 蒋正威,曹一家,孙维真. 基于 01 整数规划的多目标最优 PMU 配置算法[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(21):12-17.
JIANG Zheng-wei, CAO Yi-jia, SUN Wei-zhen. Multi-object PMU optimization placement algorithm based on 01 integer program [J]. Power System Protection and Control, 2008,36(21):12-17.
- [13] AMINIFAR F, KHODAEI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. Contingency constrained PMU placement in power networks[J]. IEEE Transactions on Power System,2010,25(1):516-523.
- [14] 李虹,李卫国. 基于提高系统可观测性和状态估计精度的 PMU 配置[J]. 华北电力大学学报,2011,38(1):31-34.
LI Hong, LI Wei-guo. A new method of PMU placement for improving network observability and state estimation precision[J]. Journal of North China Electric Power University,2011,38(1):31-34.
- [15] 乔立慧,孔红,薛辉,等. 考虑 SCADA 量测的 PMU 优化配置研究[J]. 华北电力技术,2010(4):5-9.
QIAO Li-hui, KONG Hong, XUE Hui, et al. Study on optimal configuration of PMU with SCADA measurements [J]. North China Electric Power,2010(4):5-9.
- [16] 蒋正威,李继红,孙维真. 基于不可观测深度的分阶段 PMU 配置算法[J]. 电网技术,2008,32(16):81-85,90.
JIANG Zheng-wei, LI Ji-hong, SUN Wei-zhen. Staged PMU placement algorithm based on depth of unobservability[J]. Power System Technology,2008,32(16):81-85,90.
- [17] 李虹,李卫国,彭书涛,等. WAMS 中的 PMU 最优配置新方法[J]. 高电压技术,2009,35(2):415-419.
LI Hong, LI Wei-guo, PENG Shu-tao, et al. New method of optimal PMU placement in WAMS[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(2):415-419.
- [18] ABBASY N H, ISMAIL H M. A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2009, 24(2):806-813.