

配电系统测点布置方法研究

李慧^{1,2}, 倪小华¹, 杨明皓¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京机械工业学院计算机与自动化系, 北京 100085)

摘要: 提出了一种配电系统测点布置的新方法。该算法在基于支路电流的状态估计方法的基础上, 定义了测量量对测量误差总方差的“灵敏度因子”, 通过比较其大小, 得到了配电网测点布置的方案, 即能以较少的测量点获得较高的估计精度, 且计算量少。文中利用 IEEE33 节点的配电系统进行仿真试验, 证明了算法的正确性和合理性。从而, 为应用于实际规模的网络提供了一个新途径。

关键词: 状态估计; 测点布置; 灵敏度因子

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0031-05

0 引言

随着我国国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高, 用户对电能的可靠性和电能质量提出了更高的要求, 迫切希望实现配电自动化。为实现配电自动化, RTU (遥测终端单元) 装置被越来越多地安装于低压侧用户进行数据采集, 并将采集到的数据传送到配电 SCADA 系统, 应用于配电系统高级软件进行状态估计计算等。若每个负荷节点都安装 RTU, 势必增加量测冗余, 提高了估计精度, 但却加大了设备投资。如果寻找一种方法, 让部分负荷节点利用安装的 RTU 测量负荷数据, 而其余负荷点采用短期负荷预测的方法得到其负荷数据, 就能够满足状态估计精度要求的话, 这将大大缩小投资费用。因此, 量测系统测点布置问题越来越受到人们的关注。

量测系统测点布置是电力系统状态估计的基本课题之一。关于量测系统, Clements 等^[1] 给出下面四项评价指标: ① 费用; ② 精确度; ③ 可靠性; ④ 数值稳定性。选择一个最优测点布置并不是一件容易的事情, 它不仅与所研究问题的大小有关, 而且还与四个指标之间的相互制约有关。针对配电网, 测点布置的任务就是决定在哪里安装测量仪器, 因此它可以用 0-1 整数规划来求解。但是, 配电网往往比较复杂, 负荷节点多, 使状态估计需要大量的量测集, 最终很难得到精确的结果。因而, 70 年代以来, 关于这方面的研究, 进展很小。直到 90 年代, 国外的学者提出了一种基于启发式的方法^[2,3] 综合考虑了四项指标要求, 但是不适合解决我国配电网的测点布置问题。文献[4] 在进行电力系统可观察性分析的基础上, 提出线性相关法以寻找满足 (M-1) 级

安全等级的最优测点布置方案, 但该方法仅适用于输电系统。

研究表明, 在以精度为目标的量测配置方法中, 删除型算法^[5] 有最好的结果。但现有的删除型算法耗费机时, 主要原因是删去过程是试探性的。如果在删除每一量测之前, 就确定出应被删除的量测, 使删除过程确定化, 以大大减少机时, 就成为将删除性算法应用于实际规模网络的关键^[6]。

本文研究的实际问题中, 量测类型仅有出线功率量测和负荷功率量测, 并非一个完备的量测系统, 冗余度很低, 因而评价指标暂只考虑费用和精确度两项。本文在基于支路电流的配电网状态估计方法的基础上, 通过分析测量误差灵敏度矩阵, 定义了“灵敏度因子”的概念, 提出了一种配电网测点布置的新方法。

1 测量误差灵敏度矩阵分析

电力系统状态估计的测量方程, 经线性化, 可表示为

$$\hat{z} = \hat{H}x + \hat{v} \quad (1)$$

其中: x 是 n 维状态向量, \hat{z} 是 m 维测量向量 ($m > n$), \hat{v} 是 m 维测量噪声, $E[\hat{v}] = 0$, $Cov[\hat{v}] = R$ (R 为测量误差方差阵); \hat{H} 是 $m \times n$ 阶雅可比矩阵, $Rank[\hat{H}] = n$ 。

为便于分析, 对上式进行规格化, 即令 $z = \sqrt{R^{-1}}\hat{z}$, $H = \sqrt{R^{-1}}\hat{H}$, $v = \sqrt{R^{-1}}\hat{v}$, 则式(1)变为 $z = Hx + v$, $Cov[v] = 1$ 。

运用最小二乘估计, 可得测量量的估计误差

$$\delta z = \hat{H}(\hat{x} - x) = \hat{H}[(H^T H)^{-1} H^T z - x] = \hat{H}(H^T H)^{-1} H^T v \quad (2)$$

我们称 $D = \tilde{H}(H^T H)^{-1} H^T$ 为测量误差灵敏度矩阵,它具有如下性质:

1) D 阵第 i 行的行元素平方和等于测量误差方差阵 Q 中第 i 个对角元素——测量误差方差,即

$$q_{ii} = \sum_{j=1}^m (d_{ij})^2 \quad (3)$$

其中: $Q = \tilde{H}(H^T H)^{-1} \tilde{H}^T$, q_{ii} 是 Q 阵第 i 个对角元, d_{ij} 是 D 阵的第 i 行第 j 列元素。

证明:

$$DD^T = [\tilde{H}(H^T H)^{-1} H^T][\tilde{H}(H^T H)^{-1} H^T]^T = \tilde{H}(H^T H)^{-1} \tilde{H}^T = Q$$

故证毕。

2) 由式(3)推知, D 阵全部元素的平方和恰为测量误差总方差 $\sum z$ 。即

$$\sum z = \sum_{i=1}^m (q_{ii})^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (d_{ij})^2 \quad (4)$$

3) 若 D 阵的列向量为 d_1, d_2, \dots, d_m , 则展开式(2),有

$$\delta \hat{z} = Dv = d_1 v_1 + \dots + d_j v_j + \dots + d_m v_m \quad (5)$$

式中: d_j 是 D 阵的第 j 个列向量。上式表明, d_j 决定了测量误差 v_j 对测量值估计误差的散布。而根据

$$\delta \hat{z}_i = \sum_{j=1}^m d_{ij} v_j \quad (6)$$

d_{ij} 可视为第 j 个测量误差 v_j 在测量量 z_i 上造成的估计误差的比例因子。 D 阵则反映了测量误差在测量量上造成的估计误差的确定加权散布规律。

在工程应用中,常用测量误差方差阵来衡量测量量的估计值与真值的差异,若 $\text{diag}(Q) < R$, 表示状态估计可以提高数据的精度;也可理解为, $\sum z$ 愈小,估计精度越高。对于测点布置问题来说,目的就是删除哪一个量测,以求最低限度地导致 $\sum z$ 上升。

若将测量误差灵敏度矩阵 D 的第 j 个列向量 d_j 的欧氏范数记为 s_j , 即

$$s_j = \|d_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (d_{ij})^2} \quad (7)$$

则可得到:

$$\sum z = \sum_{j=1}^m (s_j)^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sum z}{\partial s_j} = 2s_j$$

由此, s_j 可视为 $\sum z$ 对于第 j 个测量的灵敏度,称为第 j 个测量对总方差的灵敏度因子。进一步

地,我们得到

$$\min \frac{\partial \sum z}{\partial s_j} = \min(2s_j) \quad (9)$$

上式表明,总方差对具有最小灵敏度因子的测量量最不敏感。因而,在给定的量测系统中,删除最小灵敏度因子对应的实时量测,能最低限度地导致总方差上升。

若将各测量量对应的灵敏度因子从小到大地排列,便可得到各测量量对测量误差总方差影响轻重的顺序表,称为灵敏度因子表。每次将灵敏度因子表中第一个测量量删除,存入到表 F 中,重新计算灵敏度因子,生成新的灵敏度因子表,以此类推。按这种方法,每次删除一个测量量,将其存入表 F 中,同时得到一系列灵敏度因子表。设预先给定的 $\sum z$ 精度指标为 Max , 当删除过程进行到 $\sum z^{(k+1)} > \text{Max}$, $\sum z^{(k)} < \text{Max}$ 时,该量测系统满足精度指标,删除停止。此时, F 表中记录了不需安装测量装置的负荷点,而剩余的负荷点处则需安装测量装置。

2 基于支路电流的状态估计法^[7,8]

采用支路电流作为状态变量可以简化量测方程 $h(x)$, 从而减少了状态估计问题计算的复杂度,这一点对辐射型系统尤为显著。

状态量:

$$I_{bi} = I_{bn} + jI_{bxi} \quad i = 1, 2, \dots, l$$

其中: l 为支路数。

2.1 量测变换

前面提到,进行配网测点布置,实际能够利用的量测类型只有功率量测。这里只考虑将功率量测转化为相应的电流矢量量测。

(1) 负荷功率量测:包括实际负荷功率量测以及伪负荷功率量测。它们可以转化为等值的负荷电流量测,该电流量测通过每次迭代的电压估计值得。

$$I_{in}^M + jI_{ix}^M = \left(\frac{P_{li}^M + jQ_{li}^M}{U_i^{(k)}} \right) \cdot \quad (10)$$

式中: I_{in}^M 为节点 i 的等效负荷电流实部; I_{ix}^M 为节点 i 的等效负荷电流虚部; $i = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为负荷节点数; $U_i^{(k)}$ 为第 k 次迭代过程中对应于功率量测点的节点电压幅值;上标 M 表示测量的意思。

(2) 支路功率量测:它们可以转化为支路电流量测,同样,该电流量测通过每次迭代的电压估计值得。

$$I_{bj}^M + jI_{bxj}^M = \left(\frac{P_{bj}^M + jQ_{bj}^M}{U_i^{(k)}} \right) \cdot \quad (11)$$

式中: I_{bj}^M 为支路 j 中电流的实部; I_{bxj}^M 为支路 j 中电流的虚部; $j=1, 2, \dots, b$, 其中 b 为支路功率量测数; $U_i^{(k)}$ 为第 k 次迭代过程中对应功率量测所在支路 j 的首节点电压幅值。

2.2 权重的变换

利用间接量测的误差传递规律, 若 x_1, x_2, \dots, x_n 独立, $\delta_1^2, \delta_2^2, \dots, \delta_n^2$ 分别为其方差, $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则 y 的方差近似为:

$$\delta_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \delta_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \delta_n \right)^2 \quad (12)$$

由于各节点电压彼此也是独立量, 从式(1)、(2)可得到等效电流量测的方差为:

$$\begin{aligned} \delta_r^2 &= [e^2/(e^2+f^2)^2] \delta_p^2 + [f^2/(e^2+f^2)^2] \delta_q^2 \\ \delta_x^2 &= [e^2/(e^2+f^2)^2] \delta_p^2 + [f^2/(e^2+f^2)^2] \delta_q^2 \end{aligned} \quad (13)$$

其中: δ_r^2, δ_x^2 分别为电流实部和虚部的等效方差, δ_p^2, δ_q^2 分别为功率的测量方差。若 P, Q 为负荷功率, 则 e, f 分别是负荷功率所在的节点电压实部与虚部; 若 P, Q 为支路功率, 则 e, f 分别是支路功率所在支路的首节点电压实部与虚部。

于是, 得到等效电流实部和虚部的权重分别为 $(\delta_r^2)^{-1}, (\delta_x^2)^{-1}$ 。

2.3 量测函数

经过量测变换, 功率量测均转化为对应的电流量测矢量, 即 $I_{lr}^M, I_{lx}^M, I_{br}^M$ 和 I_{bx}^M 。取 I_{br}, I_{bx} 为状态量, 结合配电网的辐射状结构可以得到以状态量表示的负荷电流和支路电流的量测函数。

(1) 负荷电流量测

$$I_{lr}^C + jI_{lx}^C = h_{lr}(I_{br}) + jh_{lx}(I_{bx}) \quad (14)$$

(2) 支路电流量测

$$I_{br}^C + jI_{bx}^C = h_{br}(I_{br}) + jh_{bx}(I_{bx}) = I_{br} + jI_{bx} \quad (15)$$

式中: h_{lr}, h_{lx} 分别为支路电流实部和虚部的线性函数, 即满足基尔霍夫电流定律; I_{lr}^C, I_{lx}^C 分别为负荷电流矢量的实部和虚部; I_{br}^C, I_{bx}^C 分别为支路电流矢量的实部和虚部; 上标 C 表示计算的意思。由此, 得到量测函数对应的雅可比矩阵

$$H = \frac{\partial h_r(I_{br})}{\partial I_{br}} = \frac{\partial h_x(I_{bx})}{\partial I_{bx}}$$

为仅包含 1、-1 和 0 的常数阵。

2.4 目标函数

最小二乘法作最优估计就是求一组状态向量

\hat{x} , 使测量方程的计算值与实际测量值的误差(残差)最小。即目标函数为

$$\min J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m R_{ii}^{-1} [z_i - h_i(\mathbf{x})]^2 = [\mathbf{z} - h(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - h(\mathbf{x})] \quad (16)$$

式中: \mathbf{R} 为测量误差向量 $\mathbf{v}=[v_1, v_2, \dots, v_m]^T$ 的协方差阵, 由于测量误差可以看作相互独立的随机变量, 所以 \mathbf{R} 为对角阵, 对角元为测量误差的方差 σ_i^2 。

3 仿真试验

引言中提到, 配电网中常见的实时功率量测仅有出线功率和部分负荷功率量测, 冗余度低。为保证系统的可观察性, 测点布置的目的并非删除实时量测, 而是将实时量测替换成伪量测, 以求最低限度地导致测量误差总方差上升。为了得到最优方案, 采用本文提出的方法, 将依次计算得到最小因子对应的实时测量点(即灵敏度因子表中第一个测量点)替换成伪量测点, 直到满足精度指标的要求即可。由于测量误差总方差的精度指标无法选定, 这里我们选用测量量估计值与真值的相对误差均满足 $\pm 10\%$ 以内作为终止计算的判据。下面具体介绍计算步骤和仿真试验。

3.1 计算步骤

将基于支路电流的估计方法与本文提出的测点布置方法结合起来, 算法流程图如图 1 所示。

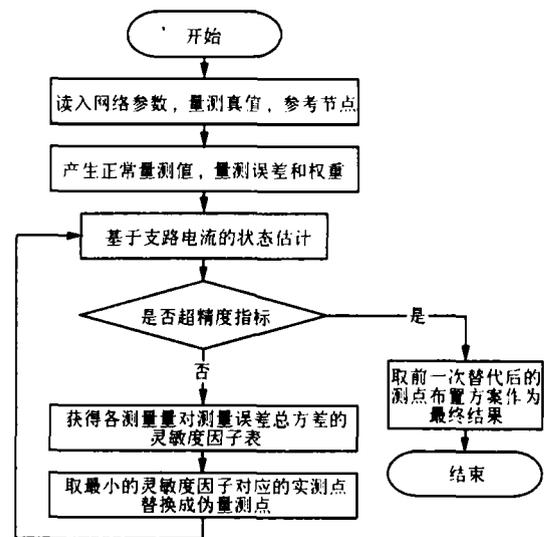


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

3.2 算例仿真

采用 IEEE33 节点网络^[9]进行试验, 如图 2 所示。图中箭头表示输出负荷功率, 方框表示出线功

率。以该系统已知的潮流分布作为真值,根据文献[10]介绍的方法将服从正态分布的随机误差与真值叠加产生实时测量值。算法中用到的伪量测生成方法是:在真值的基础上叠加了15%的误差,这个百分比是根据文献[11]中的统计结果得出的。由于伪量测的精度低于实际测量装置的精度,模拟中权重取为0.1。

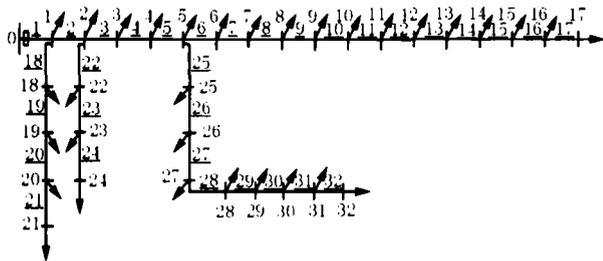


图2 IEEE33节点量测系统图
Fig. 2 Measurement configuration of IEEE 33-bus system

通过计算发现,依次被替换的测量量与它在第一个灵敏度因子表中的次序一致。这是因为根据测量误差灵敏度矩阵的表达式,实测量对应的灵敏度因子大小顺序与实测量方差和网络结构有关,对给定的量测系统,替换实测量前,后者均未发生改变;而替代后的伪量测精度最低,相应的方差较大,对测量误差总方差的影响最大,必定排在灵敏度因子表的末尾。因此,我们只需在开始的时候计算一次灵敏度因子表,便可知道所需替换的实测量顺序。

由于采用基于支路电流的状态估计法,可以使法方程实部和虚部解耦,简化计算。因此,依次考虑解耦的实部和虚部的测量误差灵敏度矩阵,观察各自测点布置的结果,从而得到全网的结果。以电流实部为例,按照灵敏度因子由小到大排列的测点顺序,得到第一个灵敏度因子表,如表1。

表1 以电流实部为例的灵敏度因子表

Tab. 1 Sensitivity gene list of branch current real part

顺序	测点号	顺序	测点号	顺序	测点号
1	10	12	14	23	3
2	4	13	18	24	28
3	5	14	15	25	13
4	25	15	16	26	30
5	26	16	19	27	6
6	8	17	20	28	7
7	27	18	21	29	29
8	9	19	2	30	31
9	11	20	22	31	23
10	12	21	1	32	24
11	32	22	17		

按照最大限度地满足精度指标,实验结果是前24个测点号都存入F表中,即只需最后的8个负荷点安装测量装置,占总比例的25%,其余实测点都可替换为伪量测,大大节省了投资。

以电流虚部为例,同样按照灵敏度因子由小到大排列的测点顺序,得到第一个灵敏度因子表,如表2。

表2 以电流虚部为例的灵敏度因子表

Tab. 2 Sensitivity gene list of branch current imaginary part

顺序	测点号	顺序	测点号	顺序	测点号
1	5	12	2	23	3
2	4	13	15	24	28
3	8	14	16	25	30
4	18	15	10	26	13
5	27	16	22	27	6
6	25	17	14	28	7
7	19	18	11	29	31
8	20	19	1	30	23
9	21	20	12	31	24
10	26	21	32	32	29
11	9	22	17		

按照最大限度地满足精度指标,实验结果同样是前24个负荷点都可以替换为伪量测点,即只需后面的8个负荷点安装测量装置。

最终的安装地点应该是上述两种情况下测量装置安装地点的并集,即30,13,6,7,31,23,24,29。仿真算例的结果虽然比较特殊,但并不影响本文方法的正确性。从结果中,我们还得到如下规律:负荷越重,越需安装测量装置;若负荷大小相等,距首节点越远,越需安装测量装置。

4 结论

本文定义了测量量对测量误差总方差的“灵敏度因子”,也即测量误差在各测量量造成的估计误差散布,通过比较它们的大小获得了配电网测点布置的规律。本文提出的方法,替代决策是先验的,即在替代任一量测前,已经知道哪个量测应被替代。因而替代过程是确定的,而且替代后的伪量测对因子表中其余实测量测的次序没有影响,所以只需计算一次灵敏度因子表,便可得到依次需要替换的测量量。这样,大大减少计算量,为应用于实际规模的网络提供了一个新途径。

参考文献:

- [1] Clements K A. State Estimation Measurements System

- Reliability Evaluation—An Efficient Algorithm Based on Topological Observability Theory[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(4):997-1004.
- [2] Baran M E, Zhu J, Zhu H B, et al. A Meter Placement Method for State Estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 19(3):1704-1710.
- [3] Baran M E, Zhu J, Kelley A W. Meter Placement for Real-time Monitoring of Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1):332-337.
- [4] 阎欣,单渊达,沈兵兵,等. 电力系统可观察性分析及测点布置[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 37-40.
YAN Xin, SHAN Yuan-da, SHEN Bing-bing, et al. Network Observability Analysis and Measurement Placement [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 37-40.
- [5] Mori H, Tamura Y. Comparison of Approaches to Meter Placement in Power System Static - state Estimation[J]. International Journal of Energy Systems, 1988, 8(3): 159-163.
- [6] 赵海天. 拓扑方法在电力系统静态状态估计中的应用(博士学位论文)[D]. 北京:清华大学, 1989.
ZHAO Hai-tian. Application of Topology Method in Power System Static State Estimation, Doctoral Dissertation [D]. Beijing: Tsinghua University, 1989.
- [7] Baran M E, Kelley A M. A Branch-current-based State Estimation Method for Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1):483-491.
- [8] 李慧,杨明皓. 基于支路电流的配电网非量测负荷估计[J]. 中国电力, 2003, 36(s):10-14.
LI Hui, YANG Ming-hao. A Branch-current-based State Estimation for Distribution Systems Non-Measurement Loads[J]. Electric Power, 2003, 36(s):10-14.
- [9] Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1406.
- [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] 孟晓丽. 配电网运行分析与诊断(硕士学位论文)[D]. 北京:中国农业大学, 2001.
MENG Xiao-li. Analysis and Diagnosis of Operating Conditions in Distribution System, Thesis [D]. Beijing: China Agriculture University, 2001.

收稿日期: 2004-11-20; 修回日期: 2005-01-06

作者简介:

李 慧(1976-),女,博士研究生,主要研究方向为配电系统状态估计、负荷预测算法研究,小波分析理论及其应用;E-mail: lhbxy21@sina.com

倪小华(1978-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统状态估计算法及应用研究;

杨明皓(1953-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制、配电自动化、电能质量与谐波

Study of meter placement method for distribution systems

LI Hui^{1,2}, NI Xiao-hua¹, YANG Ming-hao¹

(1. Information and Electric Engineering Institution, China Agriculture University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Mechanical Industry College, Beijing 100083, China)

Abstract: The proposed meter placement method was based on branch-current-based state estimation. The sensitivity genes which were formed by measurements in all of measurement error variances were designed. By comparing them, the meter scheme that less meter placements can gain rather better estimation precision at short calculation time was obtained. The test results on IEEE33-bus system proves that the algorithm is valid and rational. In addition, this paper offered a new approach for real networks application.

Key words: state estimation; meter placement; sensitivity gene