一种配电网状态估计算法的研究

高赐威 ,陈昆薇 ,何洋

(武汉大学电气工程学院 ,湖北 武汉 430072)

摘要: 针对配电网管理系统开发一种性能优良的状态估计算法。采用配电网潮流算法中较为出色的 ZBUS 法作为基础的潮流算法 ,并以基于负荷电流的量测变换方法来处理量测量 ,使得该算法能快速可靠收敛 ,并方便高效地处理各类量测。仿真表明该算法是有效的。

关键词: 配电网;　状态估计;　量测变换

中图分类号: TM715　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1003-4897(2001)10-0013-03

1　引言

任何一种状态估计程序都是以潮流计算为基础的。所以潮流算法的选取很大程度上影响整个状态估计程序的可靠性和收敛性。在配电网的潮流程序中 ,前推回代法充分利用了配电网的放射性特性 ,基本上没有矩阵运算 ,简化了编程 ,对于网络不太复杂 ,又不考虑多电源点的情况还是很有效的 ,所以在现有的配电网状态估计算法中应用比较广泛。但是 ,现实中配电网一般均较庞大复杂 ,而且在实际中在倒负荷时两条馈线之间通过联络线合环的情况是比较常见的 ,即一般应考虑双电源点的情况 ,综合考虑对多分支情况的处理能力、对双端供电情况的处理能力、算法稳定性 ,ZBUS 法作为基础的潮流程序是一种不错的选择。[1]

对各类量测量的处理能力是评判一种状态估计算法的重要指标。在配电网这一点就更显得重要 ,因为一般配电网本身的量测配置都较输电网要差。配电网中较为常见的量测量有:根结点节点电压量测 ,根结点功率注入量测 ,负荷功率量测 ,支路功率量测 ,支路电流幅值量测 ,以及少量的节电电压量测。在现有的配电网状态估计算法中 ,有一些算法并不能很好地处理电流幅值量测 ,这对于本身配置就不足的配电网来说是不足取的。而节点电压量测在配电网中不是必须的 ,可以不作处理 ,但可用于校核状态估计的效果。我们这里采用负荷电流为状态量 ,运用量测变换使得量测函数与状态量成线性关系 ,这样各种量测都转化为相应的电流值 ,这样就能较方便地处理功率量测、电流幅值量测。

基于以上考虑本文给出了结合量测变换和 ZBUS 法的配电网状态估计算法。

2　基本算法

2.1　建立三相模型

线路模型:

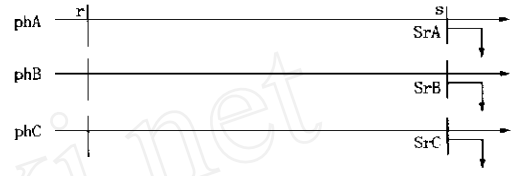

图 1　配网线路三相模型

则:线路电压和电流之间的函数关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} - L \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{ab} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{LA} \\ I_{LB} \\ I_{LC} \end{bmatrix}$$

其中 ,系数阻抗矩阵 Z 是单位长度线路阻抗阵 ,L 为线路长。可写为:

$$\dot{V}_r = \dot{V}_S - Z_L \dot{I}_L , \quad Z_L = L Z$$

负荷模型:

所有母线上所联的配电组件包括负荷、电容补偿器、电容电抗器、无功补偿装置均分三相迭加。

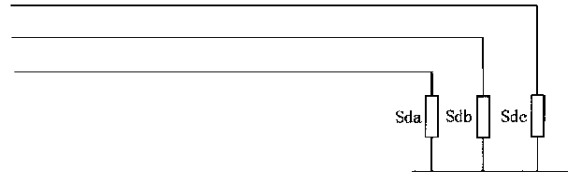

图 2　配网负荷三相模型

2.2　取负荷电流为状态量对配电网系统较为常见的量测量进行量测变换 ,并写出量测变换所得量测量对应的量测函数。

状态量:$\dot{I}_{di} = I_{dri} + jI_{dxi}$, $i = 1,2,3 \cdots n$, n 为节点数。

将所有的量测量都转化为对应的电流量测

(1) 支路功率量测转化为支路电流:

$$I_{lrj} + jI_{lxj} = \left(\frac{P_L^M + jQ_L^M}{\dot{V}_i^K}\right)^* \quad (1)$$

其中 I_{lrj}为支路 j 电流实部，I_{lxj}为支路 j 电流虚部。$j = 1, 2 \cdots m$，m 为支路功率量测数。$\dot{V}_i^K$ 是第 K 次迭代过程中相应于功率量测点的节点电压值。

(2) 负荷功率量测转化为负荷电流：

$$I_{dri} + jI_{dxi} = \left(\frac{P_{di}^M + jQ_{di}^M}{\dot{V}_i^K}\right)^* \quad (2)$$

其中 I_{dri}为负荷电流实部，I_{dxi}为支路电流虚部。$i = 1, 2, 3 \cdots n$，n 为结点数。$\dot{V}_i^K$ 是第 K 次迭代过程中相应于功率量测点的节点电压值。

(3) 支路电流幅值 I_K^M 转化为对应的支路电流实部和虚部：

$$I_{lrk} = I_k^M \cos\varphi,\ I_{lxk} = I_k^M \sin\varphi,\ \varphi = \tan^{-1}\frac{I_{lrk}}{I_{lxk}} \quad (3)$$

$k = 1, 2, 3 \cdots l$，l 为电流幅值量测数。

(4) 节点电压量测：

根节点作为参考节点，其电压量测 V_r 可以认为是精确的，相对于其它量测量来说是不需修正的。而其它的节点电压量测均可不作处理，这是基于电压量测对可观的系统状态估计结果并没有太大影响的结论上的。[2]

经过量测变换，功率量测均能转化为对应的电流量测向量，即：$\dot{I}_{lr}^M$、$\dot{I}_{lx}^M$、$\dot{I}_{dr}^M$、$\dot{I}_{dx}^M$。取负荷电流向量 $\dot{I}_{dr}$、$\dot{I}_{dx}$为状态量，结合配电网的树状结构可得以下量测函数：

(1) 支路电流量测

$$\dot{I}_{lr} = h_{lr}(\dot{I}_{dr})$$

$$\dot{I}_{lx} = h_{lx}(\dot{I}_{dx})$$

h_{lr}、h_{lx}分别为负荷电流实部和虚部的线性函数。$\dot{I}_{lr}$、$\dot{I}_{lx}$ 分别为支路电流向量的实部和虚部。$\dot{I}_{dr}$、$\dot{I}_{dx}$分别为负荷电流向量的实部和虚部。

(2) 负荷电流量测

$$\dot{I}_{dr} = h_{dr}(\dot{I}_{dr}) = \dot{I}_{dr}$$

$$\dot{I}_{dx} = h_{dx}(\dot{I}_{dx}) = \dot{I}_{dx}$$

(3) 第 i 个电流幅值量测

$$|\dot{I}|_i = h_{|I|i}(\dot{I}_{dr}, \dot{I}_{dx}) = \sqrt{h_{|I|ri}^2(\dot{I}_{dr}) + h_{|I|rx}^2(\dot{I}_{dx})}$$

2.3 加权最小二乘求解状态量修正量

目标函数：

$$\min_{\dot{I}_{dr}, \dot{I}_{dx}} J(\dot{I}_{dr}、\dot{I}_{dx}) = \sum_{i=1}^{m} w_i [Z_i - h_i(x)]^2 = [Z - h(x)]^T W [Z - h(x)] = \sum_{i=1}^{ms} w_i [I_{ri}^M - h_{ri}(\dot{I}_{dr})]^2 + \sum_{i=1}^{ms} w_i [I_{xi}^M - h_{xi}(\dot{I}_{dx})]^2 + \sum_{i=1}^{mc} w_i [I_i^M - h_{|I|i}(\dot{I}_{dr}, \dot{I}_{dx})]^2$$

其中 ms 为经量测变换后支路电流和负荷电流量测数之和。mc 为支路电流幅值量测数。I_{ri}^M、I_{xi}^M分别为支路电流量测或负荷电流量测的实部和虚部。$h_{ri}(\dot{I}_{dr})$、$h_{xi}(\dot{I}_{dx})$为对应的量测函数，W 为权系数矩阵。

仅考虑目标函数右侧前两项有：

$$h_r(I_{dr}) = AI_{dr}$$

$$h_x(I_{dx}) = AI_{dx}$$

A 为仅包含 1，-1 和 0 的常数阵，I_{dr}、I_{dx}为状态量向量。$h_r(I_{dr})$、$h_x(I_{dx})$为相应的量测函数向量。

$$\frac{\partial J(\dot{I}_{dr})}{\partial \dot{I}_{dr}} = 0 \Rightarrow GI_{dr} = A^T W I_{dr}$$

$$\frac{\partial J(\dot{I}_{dx})}{\partial \dot{I}_{dx}} = 0 \Rightarrow GI_{dx} = A^T W I_{dx},\ G = A^T W A$$

因为目标函数中右边第三项中电流幅值量测不是状态量的线性函数，使得雅各比矩阵不是常数阵，影响收敛速度。这里可以采用以下办法来处理即：在开始的几步中电流幅值量测不参与迭代，待产生较为稳定的相应的 φ 角后，变做支路电流量测向量参与迭代运算。由于运用了量测变换，使得三相解耦，故在上面的分析中都是从单相来考虑的。以上所有的计算均与线路参数无关。

通过以上分析可以很方便地得到状态量修正量的迭代公式：

$$G\Delta I_d^{(k)} = H^T W[Z - h(I^{(k-1)}{}_d)] \quad (4)$$

$$G = H^T W H$$

很明显 H 阵是仅含 1，-1，0 的常数阵。对于量测变换以后权重的处理可见参考文献[3]，它较好地解决了由于有功无功量测权重不同使得对应电流权重难于选取的困难。对于仅有有功量测或仅有无功量测的测点也可通过补充伪量测来求取对应的电流值。

2.4 基于负荷电流和 ZBUS 法的配网状态估计算法求解步骤

ZBUS 法[4]基于迭加原理。节点 j 上的电压可以通过根节点(松驰节点)在节点 j 上产生的电压和除根节点以外其它节点等值注入电流在节点 j 上产生的电压迭加求得。这里的等值注入电流指的是除根节点以外的其它配电网组件如负荷、电容电抗器、无功补偿器等在它们所联的节点上产生的等值注入电流。

a) 根节点单独作用于整个配网时各节点电压。由于系统中所有接地支路都是以注入电流的形式加到各节点上去的,而此时各节点均认为是断开的,即没有任何接地支路,所以所有节点电压均和根节点电压一致为 V_R。

b) 对各量测量用公式(1)、(2)、(3)进行量测变换将实际量测转化为对应的电流量测。其中各节点的等值注入电流 $\dot{I}_j^{(k)} = \left(\frac{P_j^{(k)} + jQ_j^{(k)}}{\dot{V}_j^{(k)}}\right)^*$, $P_j + jQ_j$ 为节点 j 上的等值负荷,包括连接在节点 j 上的负荷以及电容电抗器和等效在节点 j 的线路对地电容所产生的功率之和。

c) 用状态量修正公式(4)求解负荷电流修正量 $\Delta I^{(K+1)}$,并得修正以后的负荷电流相量 $I^{(K+1)}$。用公式 $P_j^{(k+1)} + jQ_j^{(k+1)} = \dot{V}_j^{(k)}\ \dot{I}_j^{*(k+1)}$ 修正每个一个功率量测量。

d) 计算只有等值注入电流作用时的节点电压。

$U_C^{(k+1)} = ZI^{(k+1)}$

$I^{(k+1)}$ 为等值负荷电流相量。

e) 应用迭加原理

$U^{(k+1)} = U_C^{(k+1)} + V_R$

检验收敛判据 $|U^{(K+1)} - U^{(K)}|$、$|P^{(K+1)} - P^{(K)}|$、$|Q^{(K+1)} - Q^{(K)}|$ 看是否收敛,否则 $k = k + 1$ 转向第二步。

2.5　对环网及分枝线众多情况处理的说明

a) 环网在本质上来说都属于多电源点的情况,受运行方式的限制,配网中一般最多只可能出现两个电源点,在本文所述算法中可以很方便地处理,不需改变数学模型,只是该点的电压模值在迭代过程中保持不变。而配网中常见的前推回代法处理双电源点比较棘手,一般采取迭代联络线潮流的方法,这样就增加了迭代次数和编程复杂性。

b) 由于 ZBUS 法是将网络作为一个整体形成阻抗矩阵所以能很有效地处理网络分枝,而前推回代法一次只能处理一条支路,所以为了求得全网潮流,在一次机算周期中必须分别对每一条支路迭代一次,在网络规模庞大分枝线众多时计算效率下降很快。

c) 由于一般来说收敛阶数越高稳定性越差,所以在稳定性上本文所述算法优于以牛顿法为基础的状态估计程序。

d) 因为本文算法处理量测量时采用了量测变换,所以雅各比阵为常数阵虽然收敛阶数低于牛顿法,但总的计算速度并不比牛顿法低。但从算法稳定性和编程复杂程度来看,本文所述算法较基于牛顿法的状态估计算法有优势。

3　算例及分析

为了便于说明应用本文所述状态估计算法的效果,这里将详细给出一个五节点的简单树状网络计算结果。(均已化做标幺值)

表 1　五节点网络状态估计计算结果

测点	真值	量测值	估计值	量测相对误差 %	估计相对误差 %
P1	0.45	0.4495	0.4479	0.111	0.467
P2	0.1	0.1012	0.101208	1.2	1.208
P3	0.4	0.4002	0.4001	0.05	0.025
P4	0.6	0.6024	0.6028	0.4027	0.6
P5	0.47146	0.4646	0.46786	1.455	0.6
P6	1.12616	1.128081	1.12616	0.541	0.381
Q1	0.15	0.1522	0.15166	1.47	1.104
Q2	0.2	0.19844	0.19936	0.78	0.064
Q3	0.05	0.04945	0.04913	1.1	1.75
Q4	0.1	0.1026	0.1021	2.63	2.07
Q5	0.214375	0.21397	0.2153	0.19	0.43
Q6	0.41603	0.41196	0.4150	1	0.24

由以上数据可以看出估计值在精度上有了较明显提高,通过状态估计起到了滤波的效果。该算例中测量量真值是在潮流计算结果中选取而得,再由真值加上对应的随机量测误差得测量值,其中随机量测误差是均值为零的随机变量,它的选取方法可参见[5]。

下面是 IEEE9 节点和湖北恩施配网(40 节点)应用该算法做状态估计和相应的 ZBUS 法做潮流计算的比较。(均取 0.001 为迭代收敛判据精度要求)

表 2　以 ZBUS 法为基础的潮流算法和状态估计算法迭代次数比较

网络	ZBUS 法做潮流计算所需迭代次数	状态估计所需迭代次数
5 节点	3	3
IEEE9 节点	5	4
40 节点	6	6

可见,对 ZBUS 法做了状态估计处理后由于使数据更接近真实值,使得迭代更易收敛,所以,以量测变换和 ZBUS 法为基础的状态估计算法保留了 ZBUS 法的所有优点,在收敛性方面还有所增强。(关于 Zbus 法和牛顿法的性能比较可参见文[1])用时方面,在计算40节点配网时迭代6次耗时10ms

(下转第 29 页)

明将软硬件两套方案结合起来应用,则可以相互扬长避短,起到更好的效果。

参考文献:

[1] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述. 电力系统自动化,1999,23(3).

[2] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[3] Phadke A G et al. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency. IEEE Trans on PAS, 1983,102(5).

[4] Benmouyal G. An adaptive sampling - interval ge - Nerator for digital relaying. IEEE Trans on PWRD, 1989,4(3).

[5] 16 - bit 80C51XA (eXtended Architecture) Microcontrollers Data Handbook, Philips Semiconductors,1997.

收稿日期: 2001-04-27

作者简介: 樊大伟(1977 -),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统监控,变电站自动化等; 张承学(1953 -),男,教授,硕士,主要从事电力系统稳定的研究。

Adaptive data acquisition of power system based on microcontroller

FAN Da-wei, ZHANG Cheng-xue, DENG Heng, WANG Wei
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To reduce the error of data acquisition and computation resulted from change of frequency of power system, this paper has developed two methods of adaptive data acquisition, one is based on measuring frequency by hardware, the other is based on measuring frequency by recursive Fourier algorithm. The result of digital simulation has showed that the method of adaptive data acquisition which is based on measuring frequency by recursive Fourier algorithms can entirely meet the need of power system automation equipment. Both of the methods have their characteristics, and both can be used to precisely measure frequency, voltage and current of power system.

Keywords: data acquisition; adaptive; recursive Fourier algorithm; frequency tracking; microcontroller

(上接第 15 页)

(雷鸟 750,128M 内存,未包括读写语句),因此,该算法是一种可用于实际性能优异的配电网状态估计算法。

参考文献:

[1] 张学松,柳焯,于尔铿,等. 配电网潮流算法比较研究. 电网技术,1998,(4).

[2] Mesut E Baran. Arthur W Kelley. A Branch-current-based state estimation method for distribution system. IEEE transaction on power system,1995,10(1):483～491.

[3] 程浩忠,袁青山,汪一华,等. 基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法. 电力系统自动化,2000,(7).

[4] Chen T S, Chen M Set al. Distribution system power flow analysis rigid approach. IEEE Trans PWD 1991,6(3):1146-1152.

[5] 于尔铿. 电力系统状态估计. 北京:水利电力出版社, 1985.

收稿日期: 2001-05-17

作者简介: 高赐威(1977 -),男,硕士研究生,从事配电网自动化方面研究; 陈昆薇(1941 -),女,教授,长期从事电力系统运行与控制方面的研究及教学工作; 何洋(1977 -),男,硕士研究生,从事电力市场方面的研究。

A research on state estimation for distribution network

GAO Ci-wei, CHEN Kun-wei, HE Yang
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In connection with the research on DMS (Distribution Network Management System), an excellent SE(State Estimation) approach is presented in this paper. ZBUS method, an excellent algorithm for power flow calculation and the measurement transformation based on load current are adopted in this paper. Those methods guarantee a fast and reliable convergence and can handle various measurements effectively. The simulation testifies validity of the approach.

Keywords: distribution network; state estimation; measurement transformation