

# 一种新的三相状态估计算法

彭世康, 王永刚

(北京许继电气有限公司, 北京 100085)

摘要: 提出了一种新的三相状态估计算法, 并详细地阐述了一种三相状态估计的处理策略。

关键词: 三相; 状态估计; 算法

中图分类号: TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)01-0012-04

## 1 引言

三相状态估计算法较之于单相状态估计算法, 由于其可以处理三相不对称系统, 并能够充分利用量测数据而具有明显的优越性。但是三相系统处理的复杂性又限制了三相状态估计的应用进程。

传统的牛顿-拉夫逊三相状态估计算法(本文的牛顿-拉夫逊三相状态估计算法是指, 把牛顿-拉夫逊三相潮流算法的发电机节点模型<sup>[2]</sup>及它对发电机节点的处理方式<sup>[3]</sup>用于三相状态估计而得到了算法)有以下不足:

(1) 牛顿-拉夫逊三相状态估计中对发电机节点增添了许多基尔霍夫型伪量测, 使得对其修正方程的解算方法要求较高, 必须采用正交变换解算方法;

(2) 牛顿-拉夫逊三相状态估计中抛弃了所有发电机节点的有功、无功负荷实时量测量;

(3) 牛顿-拉夫逊三相状态估计不能进行PQ分解处理, 速度较慢。

针对上述牛顿-拉夫逊三相状态估计算法的不足, 本文在一种新的三相潮流算法<sup>[1]</sup>基础上提出了一种新的三相状态估计算法, 并进而阐述了一种三相状态估计的处理策略。

## 2 原始数据的输入和量测系统的可观测性分析

三相状态估计算法包含三类原始数据: 节点数据、支路数据和实时量测数据。节点数据部分包括三相负荷节点数据和三相发电机节点数据, 它的主要功能是: 统计节点个数, 得到独立节点号, 初始各节点的三相电压幅值和相角, 等等。支路数据部分包括三相线路数据和三相变压器数据, 它的主要功能是: 形成系统导纳矩阵。实时量测量数据部分的主要功能是: 统计量测量个数, 提供整个系统所有三

相实时量测量的类型、相序号、位置、权重和测定值等。

节点数据部分和支路数据部分的读取和处理, 同文献<sup>[1]</sup>的新三相潮流算法中对它们的读取和处理类似, 只是对独立节点必须添加一个基尔霍夫型电压相角伪量测(它的权重取为10000, 测定值取为0.0)。

可观测性分析是进行状态估计计算的前提。如果量测系统不具备可观测性, 那么通过解修正方程式进行状态估计计算, 要么迭代不收敛, 要么迭代收敛到一个异常解, 即量测系统不能进行状态估计计算。

可观测性分析方法<sup>[4]</sup>分为数值可观测性分析方法和拓扑可观测性分析方法, 另外还有一类是数值-拓扑混合可观测性分析方法。新三相状态估计算法采用的是量测量拓扑可观测性分析方法。

对于单相状态估计, 由于每个节点只存在一个电压幅值和一个电压相角, 无功功率量测量用于观测电压幅值, 有功功率量测量用于观测电压相角。因此, 单相状态估计中的某个节点, 只要拥有一个电压幅值量测量或一个无功功率量测量, 则该节点的电压幅值可观测; 只要拥有一个有功功率量测量, 则该节点的电压相角可观测。对于独立节点, 其电压相角作为参考量, 已被指定为零值, 本身就可观测电压相角。

在单相状态估计中, 各实时量测量的归属分配原则为: (1) 支路功率量测量可以属于支路两端的任何一个节点, 但是若支路两端都测了有功(或无功)功率量测量, 这两个有功(或无功)功率量测量只能同时属于支路两端的某一个节点; (2) 节点功率量测量可以属于自身节点, 也可以属于与自身节点有支路连通的任何一个相邻节点; (3) 电压量测量只能属于自身节点, 当作一个无功功率量测量。

可观测性分析程序, 实际上是用来对功率量测

量的归属进行合理的分配,以达到每一个节点的电压幅值和相角均可观测的目的。对于自身量测量不足的节点,先考虑从相连的支路上去借支路功率量测量;如果无支路功率量测量可借,再考虑从相邻的节点上去借节点功率量测量;如果支路功率量测量和节点功率量测量均借不到,则该节点不可观测。

新三相状态估计的可观测性分析与单相状态估计的可观测性分析的不同之处在于,新三相状态估计的任何一个负荷节点存在三相电压幅值和三相电压相角,因此某一个负荷节点拥有的无功功率量测量个数与电压幅值量测量个数之和达到三个以上,才可观测该节点的三相电压幅值;拥有的有功功率量测量个数达到三个以上,才可观测该节点的三相电压相角。新三相状态估计的发电机节点除了存在三相电压幅值和三相电压相角外,还存在一个内部电压幅值和一个内部电压相角,因此某一个发电机节点拥有的无功功率量测量个数与电压幅值量测量个数之和达到四个以上,才可观测该节点各相电压幅值;拥有的有功功率量测量个数达到四个以上,才可观测该节点各相电压相角。对于独立节点,拥有一个基尔霍夫型电压相角伪量测,可以当作一个有功功率量测量看待。

在三相状态估计中各实时量测量的归属分配原则与单相状态估计中的情况基本相同。不同的是:由于三相电网系统的导纳矩阵中含有三相之间的互感,使得  $m$  相 ( $m$  为  $a, b, c$ ) 的功率量测量可以通过三相之间的互感观测到其它任意一相的电压状况;而电压量测量只用来观测本身节点本身相的电压状况。

### 3 修正方程式的组成和状态量的估计计算

新三相状态估计算法中对于发电机节点  $k$  有八个功率量测量,其计算式如下:

$$\left. \begin{aligned} HL_k^p &= - (P_k^p + P_{G,k}^p) \\ QL_k^p &= - (Q_k^p + Q_{G,k}^p) \end{aligned} \right\} p=1,2,3. \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k^\Sigma &= - (P_{G,k}^1 + P_{G,k}^2 + P_{G,k}^3) \\ Q_k^\Sigma &= - (Q_{G,k}^1 + Q_{G,k}^2 + Q_{G,k}^3) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中,  $HL_k^p, QL_k^p$  分别表示发电机节点  $k$  的  $p$  ( $p=1,2,3$ ) 相有功、无功负荷的计算值;  $P_k^p, Q_k^p$  分别表示整个系统网络中发电机节点  $k$  的  $p$  相流出的有功、无功功率的计算值,它们的计算公式与负荷节点  $k$  的  $p$  相流出的有功、无功功率的计算公式形式相同;  $P_{G,k}^p, Q_{G,k}^p$  分别表示发电机节点  $k$  的  $p$

相内部支路流出有功、无功功率的计算值;  $P_k^\Sigma, Q_k^\Sigma$  分别表示发电机节点  $k$  终端的三相总发电有功、无功功率的计算值。  $P_{G,k}^p, Q_{G,k}^p, P_k^\Sigma, Q_k^\Sigma$  的计算公式见文献<sup>[1]</sup>。因此,发电机节点  $k$  的八个功率量测量的偏差为:

$$\left. \begin{aligned} HL_k^p &= (HL_k^p)^{sp} - HL_k^p \\ QL_k^p &= (QL_k^p)^{sp} - QL_k^p \end{aligned} \right\} p=1,2,3. \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k^A &= (P_k^\Sigma)^{sp} - P_k^\Sigma \\ Q_k^A &= (Q_k^\Sigma)^{sp} - Q_k^\Sigma \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3)、式(4)就是新三相状态估计算法中发电机节点的功率量测量残差方程式:  $r = z - h(x)$ , 其中  $(z)^{sp}$  表示由测量仪器测定的实时量测量  $z$  的值。上述八个残差方程式就可以构造发电机节点的八个修正方程式:  $H(x) \cdot x = r$ 。

牛顿-拉夫逊三相状态估计算法中对于发电机节点  $k$  的功率量测量处理如下:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Sigma,k} &= \sum_{p=1}^3 P_k^p \\ Q_{\Sigma,k} &= \sum_{p=1}^3 Q_k^p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} (P_{\Sigma,k})^{sp} &= - \sum_{p=1}^3 (HL_k^p)^{sp} + (P_k^\Sigma)^{sp} \\ (Q_{\Sigma,k})^{sp} &= - \sum_{p=1}^3 (QL_k^p)^{sp} + (Q_k^\Sigma)^{sp} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{\Sigma,k} &= (P_{\Sigma,k})^{sp} - P_{\Sigma,k} \\ Q_{\Sigma,k} &= (Q_{\Sigma,k})^{sp} - Q_{\Sigma,k} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)就是牛顿-拉夫逊三相状态估计算法中发电机节点的功率量测量残差方程式,它用来构造发电机节点的功率量测量修正方程式。由式(6)可知,牛顿-拉夫逊三相状态估计法把发电机节点的三相实时负荷和三相总发电功率累加到一起作为一对功率量测量处理,它不能对发电机节点的某个具体的功率量测量进行估计、检测和辨识。

在新三相状态估计中,修正方程式主要由实时量测量的方程式组成,实时量测量数据库中的所有量测量,包括发电机节点的三相有功、无功负荷量测量,都用于组建修正方程式,一起进行估计、检测和辨识。而牛顿-拉夫逊三相状态估计中,除了大量的实时量测量的方程式,还需要许多基尔霍夫型伪量测的方程式。实时量测量数据库中发电机节点的三相有功、无功负荷量测量被抛弃而不进行估计、检测和辨识。每一个发电机节点产生四个内部电流偏差伪量测,独立节点还产生一个电压相角伪量测,它们都用于组建修正方程式。这些伪量测全部属于基

尔霍夫型伪量测,它们的权重设置为很大的数值(如10000)。因此,新三相状态估计的估计辨识能力比牛顿-拉夫逊三相状态估计的估计辨识能力要强大许多。

在牛顿-拉夫逊三相状态估计中,修正方程式包含实时量测量的方程式和基尔霍夫型伪量测的方程式,两类量测量的权重相差很大( $10^4 \sim 10^6$ 倍),所以按法方程形式求解大大增加了问题的病态性质<sup>[5]</sup>。为了提高状态估计的数值稳定性,改善迭代计算过程的收敛性,必须采用正交变换估计算法;要提高迭代计算速度,改善状态估计的实时性,则可采用改进的Givens(吉文斯)正交变换法,如二乘Givens变换法<sup>[6]</sup>。而新三相状态估计中,由于修正方程式主要由实时量测量的方程式组成,各个量测量之间的权重相差不大,所以状态量的估计计算可以按法方程形式或正交变换估计算法去求解。

#### 4 量测量的检测和量测系统的可辨识性分析

量测量的检测方法<sup>[7]</sup>有:目标函数极值 $J(x)$ 检测方法、加权残差 $r$ 检测方法、标准化残差(或称正则化残差) $r_N$ 检测方法和量测突变检测方法等。这些方法的使用,在三相状态估计中的情况与单相状态估计中的情况是一样的,具体的使用技术请看文献<sup>[7]</sup>。

本文采用的量测量检测方案为:

(1)在状态量的估计计算之前先进行一次量测突变检测;若检测结果说明不存在可疑量测量,则进行非二次准则辨识计算或最小二乘法估计计算,否则进行零残差辨识计算。

(2)对可靠量测数据(即整个实时量测系统中除去那些须进行辨识与修正的不良量测数据后剩下的量测量)进行一次目标函数极值 $J(x)$ 检测过程;如果检测结果说明可靠量测数据中不存在坏量测量,则状态估计计算完毕,直接进行结果数据的输出过程。

(3)如果检测结果说明可靠量测数据中存在坏量测量,则对整个实时量测数据进行标准化残差 $r_N$ 检测过程,找出可疑实时量测量;再进行可辨识性分析、不良数据的辨识与修正等过程。

(4)之后还必须对可靠量测数据进行一次目标函数极值 $J(x)$ 检测过程,如果检测结果说明可靠量测数据中不存在坏量测量,则进行结果数据的输出过程,否则说明量测系统中存在关键坏量测量使得整个量测系统不可辨识,不进行结果数据的输出过

程了。

可辨识性分析和可观测性分析是紧密相关的,有什么样的可观测性分析就有什么样的可辨识性分析。可辨识性分析的功能是:判断除去可疑量测量后剩下的量测系统,是否满足整个电网(或当前计算的子系统)内的所有节点电压状况均可观测的条件;若存在不可观测的节点,则分析需要把哪些可疑量测量恢复成正常量测量处理,才可以观测整个电网(或当前计算的子系统)的所有节点电压状况。为了使某一个不可观测的节点变成一个可观测的节点,可能存在多个可疑量测量,把其中任何一个恢复成正常量测量均可使该节点变成一个可观测的节点,那么实际恢复的应该是这些可疑量测量中标准化残差 $r_N$ 最小的那个可疑量测量。

由于可辨识性分析过程可能需要把一部分可疑量测量恢复成正常量测量,而这部分可疑量测量中可能含有真正的坏量测量。因此,状态估计在经过不良数据的辨识与修正后,还必须对可靠量测数据进行一次目标函数极值 $J(x)$ 检测过程。如果检测结果说明可靠量测数据中不存在坏量测量,则表明状态估计中不良数据的检测、辨识与修正成功;否则表明状态估计中不良数据的检测、辨识与修正失败,这种情况主要是由于可辨识性分析把真正的坏量测量恢复成可靠量测量处理而造成的,它说明量测系统中存在关键坏量测量使得整个量测系统(或当前计算的子系统)不可辨识。

#### 5 不良数据的辨识与修正以及结果数据的输出

新三相状态估计的不良数据的辨识与修正同单相状态估计的处理基本类似。状态估计先通过量测量的各种检测手段,得到可疑量测集;再通过可辨识性分析,修正可疑量测集,修正后的可疑量测集被认定为不良数据。采用估计辨识法<sup>[7]</sup>,对这些不良数据和系统各节点的三相状态量可以进行圆满的修正。

如果通过可辨识性分析后得到的可靠量测集中仍然含有坏量测量,则会发现通过估计辨识法辨识后得到的可靠量测集的目标函数极值 $J(x)$ 仍然大于检测门槛。此情况实际反映了存在关键坏量测量,导致量测系统不可辨识。此时,不需进行结果数据的输出过程而直接结束状态估计处理。

对于结果数据的输出,新三相状态估计与单相状态估计的处理也基本类似。如果量测系统经过状

态量的估计计算和量测量的检测过程后发现全部量测数据可靠,或者虽然存在不良数据但是不良数据的辨识与修正取得成功,则可以进行结果数据的输出处理。

结果数据的输出处理过程主要是,把各实时量测量和各节点状态量的最终估计值输出显示;同时往量测量数据库中写入数据,即把各量测量的估计值、残差、是否为坏量测等情况写入实时量测量数据库的相应域中。另外,由于有了各节点电压状态量的估计值,则可以计算整个系统中各节点的注入功率、注入电流和各支路的支路功率、支路电流,因此还可以产生一个节点输出数据库和一个支路输出数据库。

## 6 算例

为验证本文方法,将其分别应用于多个三相系统。现将5节点、24节点系统的计算结果列于表1。算法采用VC++语言编程,在Pentium-350机型、64M内存的PC机上实现。每一系统的迭代精度均取 $=10^{-5}$ ,均包含3个坏量测量。从算例结果可知,新三相状态估计算法的计算速度明显优于牛顿-拉夫逊三相状态估计算法。

表1 两种三相状态估计算法的比较

电网系统	牛顿-拉夫逊算法		新算法的整体解法		新算法的PQ分解法	
	计算时间	收敛次数	计算时间	收敛次数	计算时间	收敛次数
5节点系统	170ms	8次	160ms	8次	160ms	11次
24节点系统	280ms	8次	220ms	8次	170ms	13次

## 7 结论

本文提出了一种不同于牛顿-拉夫逊三相状态估计算法的新三相状态估计算法,这种方法有以下特点:

(1) 其修正方程式中的量测量几乎全是实时量测量,对修正方程式的求解可以采用各种解算方法;

(2) 它对所有发电机节点的有功、无功负荷实时量测量均进行估计、检测和辨识,其估计辨识能力比牛顿-拉夫逊法要强大得多。

(3) 新方法可以进行PQ分解处理,速度较快。

(4) 新算法的整体解算法在收敛性能方面与牛顿-拉夫逊三相状态估计算法相似。

## 参考文献:

- [1] 彭世康,王永刚.一种新的三相潮流算法.继电器,2000,28(8).
- [2] Tsai Hsiang Chen, Mo Shing Chen, Toshio Inoue, Paul Kotas, Elie A Chebli. Three-Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4).
- [3] Wasley R G, Tech B Sc, M Sc, Ph D, Shlash M A, M Sc. Newton-Raphson algorithm for 3-phase load flow. PROC, IEE, 1974, 121(7).
- [4] 李碧君,薛禹胜,顾锦汶,韩桢祥.电力系统状态估计的研究现状和展望.电力系统自动化,1998,22(11).
- [5] 于尔铿,刘广一,周京阳,等.能量管理系统(EMS).北京:科学出版社,1998.
- [6] 胡锡龙.电力系统正交变换状态估计研究[硕士学位论文].哈尔滨工业大学,1989.
- [7] 于尔铿.电力系统状态估计.北京:水利电力出版社,1985.
- [8] Chen B-K, Chen M-S, Shoultz R R, Liang C-C. hybrid three phase load flow. IEE PROCEEDINGS, 1990, 137(3).

收稿日期: 2000-01-24 改回日期: 2000-06-23

作者简介: 彭世康(1972-),男,大学本科,工程师,从事电力网络分析软件的研究; 王永刚(1970-),男,博士,从事电力网络分析软件的研究。

### A new three-phase state estimation algorithm

PENG Shi-kang, WANG Yong-gang

(Beijing XI Electric Corporation, Beijing 100085, China)

**Abstract:** A new three-phase state estimation algorithm is proposed and its details are presented in this paper.

**Key words:** three-phase; state estimation; algorithm

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告