

# 新息图法状态估计

周苏荃, 柳焯

(哈尔滨工业大学电气系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出了基于新息图的状态估计方法, 可以快速地检测识别出拓扑错误, 进行状态估计, 提供电力系统状态。

**关键词:** 状态估计; 拓扑错误; 新息向量; 新息图

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)04-0001-05

## 1 引言

在电力系统运行调度领域中, 状态估计具有基础性意义。电力系统自动化程度的提高, 需要有一个可靠的能快速反映电力系统变化的实时数据库。这就对为其提供数据的状态估计软件提出更高的要求: 一个是可靠, 另一个是快速。

目前, 一般状态估计的周期是 5min, 文<sup>[1]</sup>提出把状态估计的周期提高到秒的数量级, 在一般情况下没有拓扑结构变化时, 5min 的周期可以反映系统负荷以及系统状态的变化过程, 没有必要加快周期。而且, 由于文<sup>[1]</sup>中技术措施没有到位, 使得其可行性难以有说服力。在特殊情况下, 当系统的拓扑结构变化时, 我们希望根据开关变化立即启动状态估计计算程序, 提供反映系统变化的实时数据。可是, 若表明开关变化的拓扑信号出现问题, 拓扑变化没有反映出来, 也就无法启动状态估计跟踪系统状态的变化了。在一般 5min 为周期的状态估计中, 电网拓扑错误识别问题一直是一个有相当难度的前沿课题, 近年来发表的识别方法<sup>[2-5]</sup>, 对测量系统要求较高, 一般偏于烦琐, 往往需要进行几次状态估计计算, 计算时间较长, 难于在 SCADA 的测量周期 3s 内进行。

我们提出的新息图法状态估计, 以 SCADA 的测量量采集周期 3s 为计算周期, 采用新息图检测识别拓扑结构的变化, 当系统拓扑结构发生变化时, 启动状态估计程序, 而没有发生拓扑变化时进行状态估计的周期仍为 5min。由于新息图识别拓扑结构变化的能力强, 速度快, 这样可以使得状态估计快速跟

踪系统的变化, 提供快速可靠的实时数据。

这一方法的核心是新息图。新息图可以识别单一或多种拓扑错误, 可以识别坏数据, 并且在测量系统中存在和拓扑错误相关的坏数据的条件下仍可把拓扑错误以及坏数据识别出来<sup>[6]</sup>, 而且对测量量的要求低, 特别是计算速度快, 占用计算机资源少, 可以在 SCADA 的周期内进行, 而不会影响其它监控程序的运行。因而本文提出的新息图法状态估计可以快速地提供一个排除了拓扑错误和坏数据的实时状态。

## 2 新息图法识别拓扑错误和测量坏数据

### 2.1 新息向量和新息图

图 1 为表明一个具有预报功能的状态估计框图, 它由静态状态估计和负荷预报组成。当新的测量值到来时, 即可以计算出新息向量:

$$z_{k+1} = z_{k+1} - h(\tilde{x}_{k+1})$$

这里  $h(k+1/k)$  是在  $k$  时刻作出的对  $k+1$  时刻的预报向量。新息向量提供了识别不正常数据的有效途径。

文<sup>[5]</sup>中我们用线性系统的置换原理和叠加原理推出了新息图, 在其上拓扑错误可以容易地确定出来。建立新息图的假设条件为:

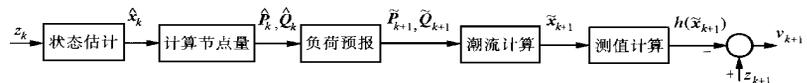


图 1 具有预报功能的状态估计的一个框图

1) 网络中发生拓扑结构变化前后各节点注入功率不变。我们假设当线路突然断开时, 只是系统中支路潮流发生变化, 而发电机节点注入功率没有发生变化, 负荷功率也没有发生变化, 这是基本符合实际情况的。

2) 发电机和负荷的注入功率等值为电流源。由于在电力系统中, 电压幅值接近于其额定值, 且变

收稿日期: 1999-11-17

作者简介: 周苏荃(1958-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统状态估计。

化不大,其标么值近似为 1pu,我们把节点注入功率等值为电流源。

3) 我们先不计测量和预报误差,即假设测量值除了坏数据外是精确的,节点注入预报值也是精确的,最后再计及误差的影响。

对于任意一条支路,用图 2 的一般形式表示,即用一个附加电压源  $V_{i-j}$  和其线路阻抗  $z_{i-j}$  来表示。若这条支路是闭合的,可以看成是附加一个电压为零的电压源,  $V_{i-j} = 0$ ; 而对于断开的支路,由置换原理,可用一个值为其开路电压的电势  $V_{i-j}$  代替这条支路,而且,由于断开支路中电流是等于零的,我们可以在替代支路中加入其线路的阻抗  $z_{i-j}$  而不影响系统电压电流分布。

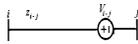


图 2 一般支路模型

对于图 3(a) 所示电路,假设  $i-j$  支路断开,用一个值为其开路电压为  $V_{i-j}$  的电势和阻抗  $z_{i-j}$  代替这条支路,如图 3(b) 所示。根据叠加原理,把图 3(b) 的电源分为两组:图 4(b) 所示的电势源单独作用和图 4(a) 所示的其他的代表节点注入功率的电源共同作用。那么图 4(b) 的结果应为图 3(b) 的结果减去图 4(a) 的结果。

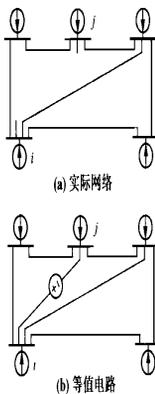


图 3 实际网络及其等值电路

图 3(a) 或图 3(b) 所示的是实际的状态,由实时遥测来描述。图 4(a) 所示的是预报结果:节点注入和实际值相同,因为假设预报值是精确的;支路潮流值是完整的网络,因为预报时不知道无报告的断开线路。那么图 4(b) 正代表着新息向量的状态:测量值减去预报值。我们把图 4(b) 叫做新息图 (Innovation Graph)。

在新息图中,拓扑错误识别问题转化为电势源

位置的确定,这也就是拓扑错误支路的位置。在单一拓扑错误场合,在新息图中只有一个电势,该有源支路的电流以及有功潮流都是最大的。

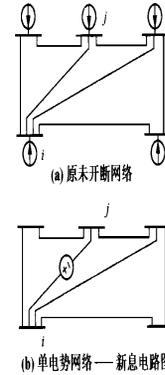


图 4 叠加原理的应用

## 2.2 扩展新息向量

在新息图中,如果给定完整的网络结构和若干新息向量表示的一些支路电流,所有其它的支路电流都可以计算出来。这里我们采用直流模型,用有功功率代替电流进行计算。在我们假设的条件下,即节点注入预报值和实际值相同,在新息图中注入量为零。这样应用基于 KCL 的独立回路来计算支路功率比较容易,因为独立回路可以根据树的结构系统地形成。

如果我们选择一个树和其连支有功功率已知的独立回路,我们就可以计算出新息图中所有的支路新息功率

$$P_{\text{branch}} = C P_{\text{loop}}$$

这里  $C$  是回路关联矩阵,  $P_{\text{loop}}$  是连支上的真实新息值,  $P_{\text{branch}}$  是计算出来的对于所有支路的扩展新息值。在直流模型中,忽略了线路功率损耗,所得结果仅为近似的。

找出扩展新息向量  $P_{\text{branch}}$  中的最大元素后,拓扑错误的位置也就确定下来了:它就位于功率最大的支路处。

## 2.3 检测坏数据的存在

当拓扑错误和测量坏数据混合在一起时,坏数据是否影响拓扑错误的辨识过程,取决于坏数据的位置。位于树支上的坏数据不影响拓扑错误识别过程,因为我们的辨识是基于从连支遥测集合中推出

根据节点负荷预报由潮流计算得到的支路潮流值反映的不是系统的真实运行状态,因为开关信号没有反映拓扑结构变化,有拓扑错误存在,支路潮流是从没有断线的网络结构下计算出来的,使得新息向量不为零。

的扩展新息向量;相反,位于连支上的坏数据会影响拓扑错误辨识。

当只存在拓扑错误时,不论单一或多个,新息向量在新息图上遵循电路的分布定律。而坏数据和拓扑错误同时发生时,坏数据并不遵循电路定律。因为由回路法从连支集合推出的扩展新息向量是具有一致性的数据集,当它们和那些纯粹从测量值减预报值得到的真实新息数据相比较时,差别即会显露出来。我们把新息向量和扩展新息向量的差叫做差别向量。如果有一个或一些差别向量的元素绝对值较大,那么至少存在一个坏数据。

#### 2.4 不良回路的概念

当一个坏数据出现在树支上时,只在和这条支路相应的位置产生一个较大的差别向量元素;当其出现在连支上时,尽管该连支的差别向量元素和其他连支一样是等于零的,但在若干树支的位置上都会出现较大的差别向量元素,这些大元素刚好位于和这个坏数据所在的连支形成回路的那些树支上。我们把这一回路称为不良回路。

这样我们可以区别以下这两种情况:当较大的差别向量元素处于随机分布状态时,坏数据位于相应树支上;而当它们出现在一个回路中除了连支以外的所有测量的支路上时,这个连支上的遥测值一定是一个坏数据。

#### 2.5 改变树的结构以排除坏数据的影响

当坏数据出现于连支上从而检测出不良回路时,这个连支可以移到树内,代替不良回路中的一个树支。这样坏数据被移到树支上,从而不再干扰拓扑错误的识别。这时再根据新的连支集合重新计算扩展新息向量和差别向量,不良回路将不再存在。在排除了坏数据的干扰以后,拓扑错误被正确地识别出来了。

总之,在新息电路图中,一个停运的线路以一个值为其开路电压的电势源表现出来,所以拓扑错误可以由图中功率最大的支路所确定;树和回路的选择,提供了一个系统的计算扩展新息向量的途径;借助于扩展新息向量,可以确定拓扑错误线路;由真实新息向量减去扩展新息向量得到的差别向量,可借助于不良回路的概念区别坏数据的场合;通过把连支移动到树内,可识别坏数据,并排除他们对拓扑错误识别的干扰。

从电路理论和 IEEE-30 节点以及 IEEE-118 节点系统的验算,都表明了其正确性。这一方法是在新息图上选回路,应用科西霍夫电流定律计算扩展信

息向量,从而确定拓扑错误的。它不需要象其他状态估计的方法那样进行分解因子表,也不需要迭代计算,所以这一方法的计算速度很快,在识别功能和计算速度上都明显优于其他方法。这为进行快速状态估计提供了先决条件。

### 3 估计潮流值和状态估计

#### 3.1 估计潮流

在推出新息图时,借用了动态状态估计中新息向量的概念。实际上,这一方法并不一定要用状态预报的方法来得到新息图。在我们这里,预报状态只是提供了一个比较的依据。在进行计算时,我们采用运行模式代替预报值来得到新息向量,产生更接近于实际的比较基准。

在排除了坏数据以后,我们把扩展信息向量和运行模式值相加,得到一个估计潮流值;

$$\tilde{P}_{ij} = P_{\text{branch-}ij} + P_{\text{oper-}ij}$$

其中,  $P_{\text{branch-}ij}$  为扩展新息向量,  $P_{\text{oper-}ij}$  为运行模式值,  $\tilde{P}_{ij}$  即为潮流估计值。

因为采用的是排除了拓扑错误并且排除了测量坏数据的扩展新息向量,最终得到的估计潮流值是一个没有不正常数据的包含各支路潮流的估计值。

#### 3.2 节点电压相角和幅值计算

电力系统的相角和有功功率关系密切,可以由有功功率计算出相角来。在直流模型中,支路两端的相角差为:

$$ij = xP_{ij}$$

式中,  $ij$  为支路两端相角差,  $P_{ij}$  为支路首端节点  $i$  流入支路的有功功率,  $x$  为支路的电抗。

在进行坏数据和拓扑错误识别时,我们已经选好了的树。现在,选择一个相角为零的参考点后,根据树支有功测量(对于无测量支路用估计潮流代替),很快地把各节点的电压相角计算出来,得到直流状态估计的结果。我们把它作为状态估计的一个结果。

这一结果是数目较小的连支量演化而来的,但这并不是说仅仅有连支测量可以得到大于连支数目且可靠的状态估计结果,在计算过程中,利用了运行模式和其它的测量值。采用运行模式产生新息向量,由包含了大量的历史信息运行模式值作为基础,使得产生的新息向量更为可靠。类似动态状态估计采用前一时刻的状态解决缺少测量值的可观测性问题,新息图中采用运行模式提供了一个基本运

行状态。这样,我们在判断拓扑错误时,只需要准确连支量即可。实际上,测量值是带有误差的,甚至还会出现大误差的坏数据。为了检测坏数据,需要有冗余的连支或树支潮流测量值,使得坏数据是可检测的。在改变树的结构来识别坏数据的过程中,更需要冗余的树支潮流测量值,把坏数据识别出来,保证计算出的扩展新息向量以及状态估计结果的正确性。

这一方法是在新息图上选回路,应用克西霍夫电流定律计算扩展新息向量,从而确定拓扑错和测量坏数据的。它不需要象其他状态估计的方法那样进行分解因子表,也不需要迭代计算,所以这一方法的计算速度快,可以进行 SCADA 速度的状态估计计算。

我们提出的方法是:以一般的状态估计时间间隔(例如 5min)运行一次传统的状态估计程序,得到较为准确的状态结果。每次(3s) SCADA 数据到来时,即可进行检测。对于已经选好的树,只需对数量

少的连支测量数据进行计算,就可以由差别向量判断测量坏数据,由扩展新息向量判断拓扑错误,得到有功潮流的估计值,根据树支修正后的有功潮流测量计算节点电压相角,加上每节点都存在的电压幅值,和无功测量得到完整的状态估计结果。如没有检测到坏数据和拓扑错误,程序退出;检测到拓扑错误,转而进行传统状态估计计算,得到更为精确的结果。这时的估计计算速度也较快,因为送入状态估计程序的数据,是经过新息图法检测和识别以后的不含坏数据和拓扑错误的的数据,所以不必再进行这些费时的处理工作了。

#### 4 实例

以 IEEE-30 节点系统为例。IEEE-30 节点系统有 41 条支路,其中树支 29 条,连支为 12 条。每次测量数据到来时,只需要对这 12 个数据点进行检测,即可知道测量数据的正确与否,进而决定是否需要进行进一步的识别过程以及状态估计计算。

表 1 识别连支拓扑错误(27-28 开断)过程中有关新息向量和差别向量元素的变化

位置	给定数据		初始计算结果			变换树以后的结果		
	测值	模式值	真实新息	扩展新息量	差别向量	扩展新息量	差别向量	估计潮流
6-28	4.34	18.84	- 14.50	- 14.50	0.00	- 14.50	0.00	4.34
8-28	4.37	0.43	3.94	14.50	17.6	- 1.71	2.23	2.14
6-8	25.97	28.75	- 2.78	14.50	- 17.28	- 1.71	- 1.07	27.04
6-10	20.94	16.86	4.07	- 12.14	16.21	4.07	0.00	20.94
10-21	23.93	16.59	7.34	- 11.15	18.49	7.64	- 0.30	24.23
21-22	-	- 0.98	-	- 11.15	-	7.64	-	6.66
22-24	- 19.68	- 6.80	- 12.88	- 5.91	- 18.79	12.88	- 0.00	- 19.68
24-25	17.83	- 0.10	17.93	0.00	17.93	16.21	1.71	16.12
25-27	13.71	- 4.15	17.86	0.00	17.86	16.21	1.64	12.06
27-28	- 18.12	- 18.12	0.00	0.00	0.00	16.21	- 16.21	- 1.91

表 1 为进行识别坏数据和拓扑错误过程中有关支路上的计算结果。假定支路 27-28 为一拓扑错误的地点:支路 27-28 已经切除,但表明开关状态的信号没有发生变化。而且我们还假定这条支路上的测量值是坏数据:没有根据拓扑结构变化而作相应的变化,仍保持原来的非零值。从表中结果可以看到,真实新息向量中有一些元素的值较大,说明有两种可能:存在拓扑错误或者是大量的坏数据。由于支路 27-28 的测量值为坏数据,使得其新息值较小,若采用一般的按新息向量元素大小排队的收索方法,难于把它排到可疑支路中去。新息图法采用连支数

据初步计算出的差别向量列于表 1 的第 4 列,表明连支 27-28 所在的回路为不良回路,说明可能有坏数据存在于连支 27-28 上。把这条支路变换成树支后的结果见表中的最后三列数据所示:差别向量确定了坏数据的位置,扩展新息向量表明拓扑错误存在于 24-25,25-27 和 27-28 三条串联支路中。从列于最后一列的估计潮流,我们可以确定在这三条线路中,27-28 为拓扑错误所在的地方,因为 27-28 的估计潮流在这三条支路中是最小的一个。采用估计潮流较小而不是估计潮流为零作为判断的条件,是考虑到测量误差和预报误差的影响使得其估计值不再等于零。

表2 IEEE 30 节点系统节点相角的计算结果

节点	$k$ 时刻	$k+1$ 时刻	3s 后 真值	直流模型	状态
	估计值	模式值		估计值	估计值
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-5.43	-5.51	-5.23	-5.62	-5.22
3	-7.96	-8.18	-7.77	-9.23	-7.68
4	-9.68	-9.87	-9.37	-9.94	-9.32
5	-14.18	-14.27	-13.55	-14.84	-13.55
6	-11.17	-11.46	-10.77	-11.72	-10.75
7	-13.03	-13.12	-12.41	-13.75	-12.42
8	-11.76	-12.07	-11.29	-12.35	-11.27
9	-13.77	-14.79	-14.67	-15.94	-14.64
10	-15.76	-16.59	-16.84	-18.19	-16.76
11	-12.78	-14.82	-14.67	-15.96	-14.71
12	-14.86	-15.76	-15.76	-17.19	-15.71
13	-14.86	-15.78	-15.75	-17.20	-15.71
14	-15.90	-16.75	-16.85	-18.49	-16.80
15	-16.01	-16.84	-17.05	-18.76	-16.99
16	-15.53	-16.43	-16.05	-19.07	-16.44
17	-15.90	-16.77	-16.96	-18.55	-16.88
18	-16.67	-17.52	-17.71	-19.46	-17.65
19	-16.86	-17.72	-17.90	-19.62	-17.84
20	-16.65	-17.50	-17.70	-19.33	-17.63
21	-16.41	-17.06	-17.56	-19.22	-17.47
22	-16.39	-17.04	-17.62	-19.31	-17.55
23	-16.62	-17.21	-18.00	-20.08	-17.98
24	-16.83	-17.30	-18.93	-21.34	-18.93
25	-15.95	-16.98	-21.86	-24.69	-21.89
26	-15.43	-17.49	-22.39	-25.50	-22.43
27	-15.66	-16.44	-23.62	-26.33	-23.67
28	-11.65	-12.05	-10.91	-11.85	-10.98
29	-16.83	-15.78	-25.33	-27.79	-25.38
30	-17.86	-14.79	-26.58	-28.78	-26.64

表2为根据测量值做出的估计结果。 $k$ 时刻作状态估计得到的节点相角列于第2列,选择 $k+1$ 时刻(5min后)的运行模式可得节点相角,列于第3列。若 $k$ 时刻以后3s时,发生拓扑变化,支路27-28退出运行,系统中支路潮流发生变化,相应节点的相角发生较大变化,相角真值如表2的第4列所示。这时 $k$ 时刻的估计值和 $k+1$ 时刻的模式值不能反映系统的真实运行情况。拓扑变化后的一个SCADA遥测量传送周期(3s)之内,测量数据到达,由表1所示的计算过程,识别出支路27-28的拓扑变化和坏数据。排除拓扑错误和坏数据后由树支支路测量值或树支估计潮流计算出的节点相角估计值列于表2的第5列。和 $k$ 时刻的估计值以及 $k+1$ 时刻的模式值相比,快速估计结果跟踪系统状态变化的效果更好,而这时启动状态估计的计算结果(列于最后

这里相关指的是坏数据和拓扑错误发生在同一条支路上。

一列)就更加真实地反映了系统的运行状态。

新息图法可以进行如下三种情况的辨识:(1)单个拓扑错误;(2)相关的多个拓扑错误;(3)拓扑错误和相关的坏数据同时发生。不论坏数据发生在拓扑错误的地方,还是发生在其它地方,这一方法可以把它检测识别出来并排除其影响。正因为这一方法只依赖于连支上的有功潮流测量值,它只需要一般的测量冗余度。对于IEEE-30节点系统,它须要12个潮流测量值来形成连支集合,也就是说12个测量值是关于拓扑错误识别“可观测的”。采用少于状态变量的测量,可以检测到整个系统的拓扑错误,是由于新息向量中含有的模式值,提供了所需要的信息。当然,为了检测在拓扑错误情况下的一个坏数据,这一方法需要在坏数据所在的回路中有一个树支测量值。为了识别一个坏数据,需要在这一回路中有两个树支遥测值。它具有很清楚的可检测、可识别性。

从算例可见,识别拓扑错误和坏数据只涉及加减运算和比较判断。而且,树和回路可以预先选好,当 $k+1$ 时刻的测量值到达计算机时,只要把连支测量的有功功率减去模式确定的相应有功功率,可得用新息值表示的回路功率,由加减运算得到所有支路的有功功率的扩展新息值。再由真实新息和扩展新息相减得到差别相量后,即可以识别坏数据和拓扑错误了。排出拓扑错误和坏数据后,由修正后的树支有功潮流测量值或估计潮流值,和对应的树支电抗相乘,即可计算出各节点电压相角来。计算过程中没有迭代计算,计算速度很快,可很快确定是否进行状态估计计算。在32兆内存,IBM233 CPU计算机上,对于IEEE-30节点系统进行状态估计计算的时间为0.5s,而计算真实新息向量、扩展新息向量、差别向量、估计潮流以及直接判断拓扑错误的时间为0.0014s,在有连支坏数据,需要变换树以后再行识别的情况下,其计算时间小于 $2 \times 0.0014s$ ,直流模型计算相角时间小于0.000001s。

## 5 结论

本文提出的新息图状态估计方法,可提供排除了不正常数据情况的快速反映电力系统运行状态的数据。其检测识别拓扑错误和坏数据的计算速度快,可在3s的周期进行。这样,它为调度中心提供可靠的、快速反映电力系统变化的实时数据库,有益于提高电力系统运行的安全性和经济性。

本文系清华大学电力系统国家重点实验室开放基金资助项目的课题。  
(下转第23页)

## 参考文献:

- [1] 陈德树等. 采样值电流差动微机保护的一些问题. 电力自动化设备. 1996, (4).
- [2] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 尹项根, 张哲. 采样值电流差动保护原理的研究. 电力自动化设备, 2000, (1).
- [3] 袁荣湘, 陈德树, 马天皓, 尹项根, 张哲. 基于故障分量的采样值电流差动保护研究——原理分析. 继电器, 2000, (3).
- [4] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第一版). 北京: 中国电力出版社, 1996, 1.

### Study on the current differential protection based on sampled values using fault component ——Setting scheme

YUAN Rong-xiang<sup>1,2</sup>, CHEN De-shu<sup>1</sup>, MA Tian-hao<sup>2</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, YIN Xiang-gen<sup>1</sup>

(1. Central China University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Zhongxing Telecom Ltd., Shenzhen 518004, China)

**Abstract:** In this paper, the setting scheme of the current differential protection based on sampled values using fault component is investigated. The setting schemes of the resistance coefficient and the least trip differential current are discussed in detail. The probable protection setting values for the HV transmission lines are described. It testifies the feasibility for the applications of the protection to the HV transmission lines.

**Keywords:** current differential protection; sampled value; fault component

(上接第 5 页)

## 参考文献:

- [1] Beiler G and H-T Neisius et al. SCADA oriented state estimation. IFAC / CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants, 1997, 9:400-445
- [2] Clements K A and Costa A S. Topology error identification using lagrange multipliers. IEEE Transaction on Power Systems, 1998, 13(2) :347-353.
- [3] Abur A, H Kim, and M Celik. Identifying the unknown circuit breaker status's in power networks. IEEE Transaction on Power Systems, 1995, 10(4) :2029-2073.
- [4] Alvarado. Network topology determination using least absolute value state estimation. IEEE Transaction on Power Systems, 1995, 10(3) :1159-1165.
- [5] Souza J C S, A M Leite da Silva and A P Alves da Silva. Data debugging for real-time power system monitoring based on pattern analysis. 96 WM IEEE, 1996.
- [6] Zhou Suquan. An approach to single or multi topology error Identification. IFAC / CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants, 1997, 9:433-439.

### A power system state estimation method based on innovation graph

ZHOU Su-quan, LIU Zhuo

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This paper presents a state estimation method based on the Innovation Graph. It can rapidly detect and identify topology error, proceed state estimation and provide an electric power system state free of bad data and topology error.

**Keywords:** state estimation; topology error; innovation vector; innovation graph