

新息图的智能特征

周苏荃, 柳 焯

(哈尔滨工业大学电气工程系, 哈尔滨 150001)

摘要: 新息图是根据测量向量和预报向量之差的新息向量推出来的, 是新息向量和图论的结合。新息图对于识别坏数据和拓扑错误很有价值。现有的新息向量未考虑元素间有物理定律约束的内在联系。文中定义了反映新息向量元素间内在联系的新息图, 给出了计算实例, 并从认识论和方法论的角度论述了新息图的智能特性。

关键词: 电力系统; 状态估计; 新息向量; 新息图; 智能特征

中图分类号: TM 732

0 引言

具有预报功能的状态估计, 即动态状态估计, 可利用测量值和相应预报值之差的新息向量来检测、识别坏数据和拓扑错误等不正常事件。由于新息向量包含了过去的信息, 所需要的测量冗余度比静态状态估计低, 为正确识别提供了条件。

文献[1]利用标准残差和新息向量来搜索和处理动态状态估计中的不正常事件, 包括: ①量测数据中的不正常数据(坏数据); ②注入功率发生突然变化引起的系统运行状态的突然变化; ③预报模型的不精确; ④网络拓扑结构错误; ⑤以上①, ②两项事件同时发生的情况, 取得了优于静态状态估计的结果。文献[2]把新息向量元素作为神经网络的输入, 采用模式分析的方法在状态估计滤波前识别拓扑错误, 加快了识别的速度, 并在区分无坏数据的拓扑错误和伴随状态突变的坏数据的基础上, 结合加权残差在状态估计的滤波过程中识别不良数据和状态突变。

采用新息向量(即测量值减去预报值)作为判断依据, 相当于把预报值(或运行模式的值)作为比较的基准。基准的引用, 模拟了人的直觉。而预报值或运行模式, 亦是通过对归纳总结、模式分析等智能途径得到的。

然而, 在上述文献中, 新息向量的元素是以个体形式出现的, 没有利用这些元素间的内在联系, 不能区分和处理拓扑错误与坏数据(或者状态突变)两者并存时的不正常事件。在静态状态估计中识别拓扑错误时, 不仅需要很高的测量冗余度, 而且在识别

2 个拓扑错误^[3], 或者坏数据和拓扑错误并存^[4,5]的文献中, 2 个拓扑错误之间, 或者拓扑错误和坏数据之间都有一定的电气距离。

本文根据新息向量和网络图论重新定义的新息图具有与电力系统相同的结构, 但不需在其上进行如潮流或稳定那样复杂的迭代计算。新息图是新息向量的载体, 新息图的智能特性主要在于能清楚地表明新息元素间由物理定律约束的内在联系, 能有层次、简捷地解决坏数据和多个拓扑错误以及状态突变同时并存的难题。5 节点的算例表明, 新息图可以识别发生在有坏数据及没有测量值的 2 条共母线支路上的拓扑错误, 识别能力很强。

1 新息图

由静态状态估计和负荷预报组成具有预报功能的状态估计^[6]中, 采用的新息向量的测量值和预报值之差:

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

式中 v_{k+1} 为新息向量; z_{k+1} 为 $k+1$ 时刻的测量向量; $\tilde{x}_{k+1}$ 是在 k 时刻做出的对 $k+1$ 时刻状态量的预报值; $h(\tilde{x}_{k+1})$ 是对应 $k+1$ 时刻测量的预报向量。

新息图是文献[7,8]提出来的, 为了说明其智能特征, 有必要对其概念做比较详细的界定, 本文给出更为清楚的定义。对任意一条支路 $i-j$, 用图 1(a) 所示的一般形式表示, 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, 由线性电路置换原理, 可用一个值为其开路电压 V_{i-j} 的电源代替这条支路, 而且, 由于断开支路中电流是等于零的, 可以在替代支路中加入其线路阻抗 z_{i-j} 而不影响系统电压、电流分布。在下

面的论述中,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,这基本符合实际情况。由于在电力系统中,节点电压幅值接近其额定值,且变化不大,其标么值近似为1,并把节点注入功率等值为电流源。

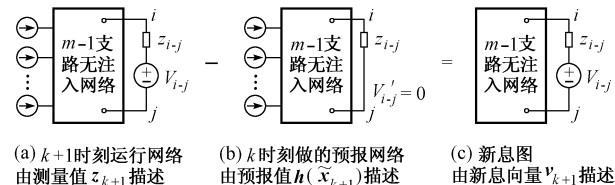


图1 新息图的定义

Fig. 1 The definition of the innovation graph

这样,图1(a)所示 n 节点 m 支路的电力系统,可以看成是 $k+1$ 时刻实际运行的网络结构状态,由实时遥测 z_{k+1} 来描述。

对于预报值所对应的状态,用图1(b)来表示。根据 k 时刻的网络结构和在 k 时刻对 $k+1$ 时刻预报的负荷数据进行潮流计算,得到线路功率的预报值。由于在 $k+1$ 时刻,可能发生拓扑变化, k 时刻预报状态的拓扑结构可能和 $k+1$ 时刻实际运行的结构有所不同,用上述一般的支路形式表示时,反映在支路的附加电压源的值 V_{i-j}' 和 $k+1$ 时刻实际运行网络中的 V_{i-j} 不同。若反映开关状态的遥信量没有给出这种结构变化,则发生了拓扑错误。此时预报的支路潮流值只能是由错误的网络结构计算出来的,因为此时开关信息是错误的。

对于新息向量 v_{k+1} 描述的状态,也用图来表示,称之为新息图,如图1(c)所示。新息图具有和电力系统相同的结构,且在不计测量误差和预报误差影响的前提下,图中电流(在实用计算时取直流模型中的有功功率)满足式(1),即图1(a)的运行值减去图1(b)的预报值。由于不考虑测量误差和预报误差,节点注入预报值等于实际运行值,在没有状态突变时,新息图中节点注入为零,图中电源只有图1(a)和图1(b)中因为开断和闭合状态不同的支路上存在的附加电源之差。若考虑状态突变时,可加上反映节点注入变化的电流源。新息图是新息向量的载体,其作用在于借助新息图来表明新息向量元素间符合物理规律的内在联系。以 k 时刻线路闭合, $k+1$ 时刻线路断开,且开断信息未送到估计器,这种较难识别的闭合拓扑错误为例说明新息图的2个性质。

性质1 新息图中电流、电压和运行网络及预报网络中电流、电压间满足线性电路的叠加原理。把式(1)移项变换后可得:

$$z_{k+1} = h(\hat{x}_{k+1}) + v_{k+1} \quad (2)$$

k 时刻支路闭合,图1(b)中附加电压源 $V_{i-j}' = 0$, $k+1$ 时刻线路断开,图1(a)中附加电压源 $V_{i-j} \neq 0$ 。从叠加原理的角度看,图1(a)所示的所有电源共同作用的结果等于图1(c)所示的附加电源作用的结果加上图1(b)所示其余电源共同作用的结果,即测量值等于预报值加新息值,和式(2)一致。

性质2 新息图中电压源的所在位置是发生拓扑变化的元件。

图1(c)中的电源是因为图1(a)和图1(b)中支路 $i-j$ 的开断和闭合状态不同而产生的。如果没有发生拓扑变化,支路 $i-j$ 在 k 和 $k+1$ 时刻皆为开断或闭合的状态,图1(c)中电压源的值为零。

新息图把拓扑错误识别问题转化为电压源位置的确定问题,使得拓扑错误识别问题变得较为简单,可以由网络结构和电压源支路的特点找出拓扑错误。在最简单的单一拓扑错误场合,相应的新息图中只有一个电压源,该有源支路的有功功率新息值是最大的。因此只需要在新息图上,采用系统的方法,根据电路定律计算出各支路有功功率,再找出其中最大的一个,即是要寻找的拓扑错误所在。对于多个拓扑错误、坏数据以及状态突变,可以根据下述识别逻辑逐一识别。

2 新息图的一系列识别逻辑

新息图具有和电力系统相同的结构,但并不需在其上进行如潮流或稳定那样复杂的迭代计算,它是新息向量的载体。新息图的智能特性主要在于其表示了新息向量元素间符合物理规律的内在联系。以此为基础,可形成一系列逻辑规则,以识别电力系统状态估计中的不正常现象,如坏数据、拓扑错误、状态突变及二三种不正常现象同时发生的场合。

2.1 识别坏数据

新息图的主要功能之一是识别坏数据。在排除了坏数据的影响(尤其是连支坏数据的影响)之后,才可以进行其他项目的识别。值得高兴的是,借助新息图可以得到在拓扑错误或是状态突变情况下出现坏数据的标志,并由此把坏数据检测、识别出来。

为说明问题,这里简述扩展新息向量和差别向量。在新息图上,选定一个树,可由连支确定独立回路。只要连支存在有功功率测量,就可以依据连支上的新息元素集合,根据回路矩阵算出所有支路的新息向量,即扩展新息向量。而差别向量是新息向量和扩展新息向量对应元素之差。

2.1.1 检测

在新息图中出现坏数据的标志是差别向量的元

素不为零。在正常测量值的条件下,不论是否存在拓扑错误,差别向量是等于零的。当差别向量不为零时,说明有坏数据存在。

2.1.2 识别和修正

对不等于零的差别向量元素进行逻辑判断,以区分坏数据出现的场合,即确定坏数据是位于树支上还是连支上。坏数据位于相应的树支上的标志是较大的差别向量元素是随机、零散地分布于网络中;相反,坏数据出现在连支上则出现不良回路,即在计算扩展新息向量所选定的由该连支所对应的回路中,除了连支以外的全部有测点的树支上的差别向量元素绝对值较大。

对于树支上的坏数据,不影响拓扑错误的识别,不必对其修正,因为辨识是根据连支上的真实新息向量计算出来的扩展新息向量。反之,位于连支上的坏数据,若不加以修正的话,会使得拓扑错误辨识得出不正确的结果。所以必须首先排除位于连支上坏数据的影响,即修正不良量测量。

当坏数据位于树枝上,若对其修正,可以用估计潮流值代替:

$$P_{\text{mea}} = P_{\text{est}} = P_{\text{ext}} + P_{\text{pre}} \quad (3)$$

式中 P_{mea} 为该支路修正后正确的测量值; P_{est} 为其估计潮流值; P_{ext} 为其扩展新息元素值; P_{pre} 为其预报值。

在确定连支上出现坏数据的情况下,改变树的结构,即把该连支和不良回路中的一个树支互换,把连支改选为树支,树支变为连支。由于坏数据所在的支路被选为树支,再根据新的连支集合重新计算扩展新息向量和差别向量,不等于零的差别向量元素不再构成回路,因此不良回路将消失。不良回路消失说明换树正确,这时坏数据位于树支上,可按式(3)进行修正。

2.2 识别拓扑错误

在新息图中,识别拓扑错误的判据是:①扩展新息向量中潮流值大;②对于闭合拓扑错误,估计潮流小且估计潮流值和预报值之比小;对于开断拓扑错误,估计潮流和预报值之比大。

2.3 区分状态突变和拓扑错误

对于具有预报功能的状态估计算法来说,还应该区分拓扑错误和状态突变。状态突变和拓扑错误引起的结果都是有大量较大的新息向量元素值,当两者同时出现时,识别更为困难。

在新息图中,单纯状态突变时回路中的新息相角和等于零。根据新息相角和可以区分单纯由状态突变或拓扑错误引起的大量新息向量元素值增大。

由差别向量和新息相角可识别状态突变。在状态突变发生在距拓扑错误线路的电气距离较远,且两者不相关时,可直接识别拓扑错误;而当两者相关时,可对有功扩展新息向量进行修正,识别状态突变情况下的拓扑错误。当然,识别状态突变要求增加有功测量的冗余度。

这一方法只利用了有功测量值识别拓扑错误,且对同时进行坏数据和状态突变检测与识别所要求的冗余度较低。

3 算例

在电力系统中,发生在小系统中的拓扑错误往往更难以识别。以图2所示5节点系统为例来说明新息图识别拓扑错误的能力。图2系统有7条支路,假设和节点2邻接的2条支路2-3和4-2同时发生拓扑错误,并且支路2-3无测量值,支路4-2的测量值是一个坏数据,其测量值和拓扑遥信信号一样,仍保持拓扑变化以前的值,没有随网络拓扑的变化而变化。支路2-3为树支,支路4-2为连支,其上的坏数据为连支坏数据。

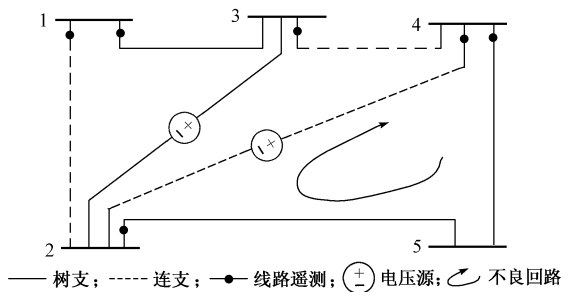


图2 IEEE-5节点例题
Fig. 2 IEEE-5 bus example

k 时刻做出的7条支路全部运行时5节点系统的预报值列于表1的第3列, $k+1$ 时刻的测量值和新息值列于第2列和第4列。由于两个拓扑错误离得近,都发生在和节点2相连的支路上,两个电压源共同作用的结果使得连接于节点2的另外2条支路2-1和2-5的有功新息元素值较大。相反,拓扑错误在支路4-2和2-3上,由于坏数据或无测量,新息向量中相应元素很小或不存在,如采用根据新息元素的大小确定拓扑错误的搜索方法,则找不到排在最后的拓扑错误支路。

采用新息图法时,扩展新息向量补充了2-3支路的新息值,差别向量中对应支路2-5和4-5的元素值较大,表明它们与相应连支4-2形成了不良回路。

表 1 拓扑错误位于树支 2-3 及坏数据连支 4-2 时的初始计算结果

Table 1 The initial results of topology errors on twig 2-3 and link 4-2

位置	测值	预报值	真实新息	扩展新息向量	差别向量
4-5	-48.1	-16.3	-31.88	4.67	-36.55
2-5	57.6	22.6	34.96	-4.67	39.64
4-2	-36.6	-36.6	0.06	0.06	0
3-4	26.3	21.5	4.74	4.74	0
1-2	46.0	83.0	-37.05	-37.05	0
2-3		33.7		-32.31	
1-3	88.4	46.1	42.39	37.05	5.34

表 2 中把连支 4-2 变换为树支后的计算结果表明,不良回路消失,说明 4-2 的测量值为连支坏数据。变换树后,4-2 成为树支,树支坏数据不影响拓扑错误的识别。由表 2 所示变换树后的计算结果,根据满足扩展新息元素值较大及估计潮流值较小(或估计潮流和预报值之比小)2 条原则进行判断,支路 2-3 和 4-2 是拓扑错误的位置。以估计潮流值较小而不是零作为判据,已考虑了误差的影响。

表 2 支路 4-2 变换为树支后的计算结果
Table 2 The final results after branch 4-2 becoming a twig

位置	测值	预报值	真实新息	扩展新息向量	差别向量	估计潮流	估计预报比
4-5	-48.1	-16.3	-31.88	-34.96	3.09	-51.23	3.14
2-5	57.6	22.6	34.96	34.96	0.0	57.60	2.54
4-2	-36.6	-36.6	0.06	39.70	-39.64	3.06	-0.08
3-4	26.3	21.5	4.74	4.74	0.0	26.28	1.22
1-2	46.0	83.0	-37.05	-37.05	0.0	45.97	0.55
2-3		33.7		-32.31		1.38	0.04
1-3	88.4	46.1	42.39	37.05	5.34	83.11	1.82

采用新息图法时,只进行加减计算就得到新息向量、扩展新息向量和差别向量,并进行逻辑判断确定是否需要变换树和识别拓扑错误,但不需要进行迭代计算,因此计算速度快。

4 新息图的智能特征

从识别坏数据和拓扑错误的功能来看,新息图有如下智能特征:

a. 反映了新息元素间由物理定律约束的内在联系。

有经验的调度人员能够把现场由于不正常事件引起的潮流变化和正常时的运行情况进行比较,找出不正常事件。新息图中采用新息向量,即测量值减去预报值作为判断的依据,也就是把预报值(或采用运行模式值)作为比较的基准。这个基准实际上模拟了人的直觉。而预报值或运行模式的产生,亦是通

过归纳总结、模式分析等智能途径得到的。

在电力系统中,根据系统中量测量的配置情况,测量向量元素可以是电压幅值、节点注入功率,更多的是支路功率。在正常情况下,这些量测量基本满足基尔霍夫定律。基于节点预报,借助潮流计算得到的支路预报值,自然是满足电路基本定律的。新息向量元素是测量值和相应预报值之差,由图 2 和叠加原理可知,新息向量元素间有一定的电路上的联系,新息图借助图来清晰地表明新息向量元素间的这种由物理定律约束的内在联系。因而可以应用网络理论的方法,根据各种不正常事件所具有的特点,将其逐一识别。

b. 简捷地解决了坏数据、状态突变和拓扑错误并存情况下的区分问题。

在拓扑错误和坏数据同时出现的情况下,拓扑错误和坏数据引起的结果是类似的,即在动态状态估计中引起新息向量中的元素值增大(在静态状态估计中则引起残差的增加),因此很难区分。在动态状态估计中,状态突变也会引起大量新息元素增大。将三者加以区别十分困难。新息图法根据不正常事件的特点,采用差别向量和新息相角识别坏数据和状态突变,排除其影响后,根据扩展新息向量和估计潮流把拓扑错误正确识别出来。通过这种方式,新息图可以简捷地解决坏数据、拓扑错误以及状态突变同时并存情况下的识别问题。

由简到繁,抓主要因素是新息图方法的又一特点。不正常事件引起新息元素值增加,测量噪声、节点注入预报误差也会使新息向量元素不为零,影响新息图中逻辑规律的建立。我们在先不计误差的情况下推出主要结果,之后再考虑噪声及误差的影响,对结果进行修正。

5 结语

新息图根据标志进行清晰的序列逻辑判断。这一方法只依赖于连支上的有功潮流测值进行识别拓扑错误,而且同时进行坏数据和状态突变的检测和识别所要求的冗余度较低。

新息图可以看成是面向电力系统问题的一种专门的人工智能方法,作为新息向量载体的新息图利用图论建立新息元素间由物理定律约束的内在联系,能简捷地解决坏数据和拓扑错误以及状态突变并存时的识别问题,为电力系统状态估计中不正常事件的处理提供了新的途径。

参 考 文 献

- 1 张伯明,王世纓,相年德(Zhang Boming, Wang Shiyang, Xiang Niande). 电力系统动态状态估计中不正常事件的处理(Anomaly Processing in Power System Dynamic State Estimation). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),1993,13(3):52~58
- 2 Souza J C S, Leite da Silva A M, Alves da Silva A P. Data Debugging for Real-Time Power System Monitoring Based on Pattern Analysis. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1592~1599
- 3 Singh H, Alvarado F L. Network Topology Determination Using Least Absolute Value State Estimation. IEEE Trans on Power Systems. 1995, 10(3): 1159~1165
- 4 Abur A, Kim H, Celik M. Identifying the Unknown Circuit Breaker Statuses in Power Networks. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (4): 2029~2073
- 5 Clements K A, Costa A S. Topology Error

- Identification Using Lagrange Multipliers. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 347~353
- 6 Rousseaux P, Van Cutsem T, Dy Liacco T E. Whither Dynamic State Estimation. Electrical Power & Energy Systems, 1990, 12(2): 104~116
- 7 Zhou Suquan. An Approach to Single or Multi-Topology Error Identification. In: IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants. Beijing: 1997. 433~439
- 8 周苏荃,柳 焯(Zhou Suquan, Liu Zhuo). 新息图法拓扑错误辨识(An Innovation Graph Approach to Topology Error Identification). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000,24(4): 23~27

周苏荃,女,副教授,研究方向为电力系统状态估计。
柳 焯,男,博士生导师,从事电力系统分析与控制方面的研究工作。

THE INTELLIGENT CHARACTERISTICS OF THE INNOVATION GRAPH

Zhou Suquan, Liu Zhuo (Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The innovation graph is deduced from the innovation vector that is formed by the difference of measurement vector and predictive vector. The method is the combination of innovation vector and graph theory. The innovation graph is valuable to identify bad data and topology errors. The present innovation vector does not reflect the inner relationship among the elements of the stipulations of an agreement innovation vector. In this paper the definition of the innovation graph reflecting their inner relationship is given and the artificial intelligent characteristics are described from the views of the epistemology and the methodology.

This project is supported by the State Key Laboratory of Power System in Tsinghua University of China.

Keywords: power systems; state estimation; innovation vector; innovation graph; intelligent characteristic