

基于新息图法的电力系统负荷突变辨识

毛志强¹, 蔡中勤¹, 周苏荃¹, 李碧君², 李 雷², 龚成明²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省哈尔滨市 150001;

2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 负荷突变会引起系统运行状态的突然变化, 在有预报功能的状态估计中会对不良数据的识别产生不良影响。结合工程实际应用, 对新息图法状态估计识别负荷突变的方法进行了深入研究, 提出了突变路径和突变子网的概念以及识别负荷突变的方法。在确定节点注入新息偏大的可疑节点后, 通过寻找这些可疑节点之间是否存在突变路径, 确定能否形成突变子网, 以识别由多台发电机给突变负载提供功率的情况。节点新息和支路新息差在识别过程中相互检验, 解决了负荷突变和不良数据同时存在时的识别问题。以 IEEE 30 节点系统为例详述了利用突变子网识别负荷突变的方法, 该方法已在工程实际中得到验证。

关键词: 状态估计; 新息图; 负荷突变; 不良数据

0 引言

一般所讲的电力系统不正常事件包括负荷突变、不良数据和拓扑错误等 3 类^[1], 在静态状态估计中, 不良数据和负荷突变常引起较大的残差。对于不良数据和拓扑错误的辨识, 已有很多研究^[2-5], 对负荷突变的研究则相对较少, 负荷突变辨识仍然未得到很好的解决方案。

文献[6]不采用原来的自适应指数平滑预报方法的参数调整过程, 直接取最新的状态估计值作为一步向前的预报, 并记下模型中的倾斜分量, 当突变之后再重新启动预报过程。文献[7-9]所述方法都是采取一些手段, 在运行状态突然变化的时间断面上, 将动态状态估计退化为静态状态估计, 虽然避开了负荷突变, 但丧失了动态状态估计的优越性, 且不能有效解决负荷突变和不良数据同时存在的问题。

新息图法^[10]结合了静态状态估计和动态状态估计的优点^[11], 在多重拓扑错误^[12-13]、相关不良数据同时存在时^[14]都有很好的辨识效果。文献[15]给出了新息图法识别负荷突变的原理, 研究了负荷突变、不良数据和拓扑错误同时存在时的识别问题。

在实际运行网络中, 当负荷突变发生时, 一般是由几台发电机共同承担负荷突变的功率变化, 这时往往找不到文献[15]所述的突变节点与参考节点之

间的突变回路, 导致负荷突变识别失败。本文针对这种情况, 对新息图理论识别负荷突变进行了更深入的研究, 使其更加实用化。

本文主要研究发电机节点与负荷节点之间存在负荷突变时电气量的特征, 提出在发电机与负荷节点之间寻找突变路径来识别负荷突变。而当发电机和负荷中存在多个突变节点时, 多条突变路径形成突变子网, 由此, 可对负荷突变加以识别和修正。

1 利用突变回路识别负荷突变

负荷突变是指节点注入功率发生不可预测的突然变化时引起的系统运行状态的突然变化。负荷突变的存在会使新息差网络中出现突变回路^[15]。

图 1 是突变回路示意图, 节点 4 是负荷突变节点。负荷突变的存在, 使突变节点注入功率的测量值和预报值相差较大。在新息图中, 表明此节点注入的新息值明显偏大, 而在计算连支推算新息时, 默认节点注入新息为 0, 连支推算新息并没有包含负荷突变的影响, 所以在新息差图中, 相应树支上新息差元素明显偏大且绝对值相近。新息差值明显偏大的支路 1-3, 3-4, 连同新息值较大的参考节点 1 和突变节点 4 的接地支路, 构成了由突变节点 4 到参考节点 1 之间的突变回路。

在实际运行网络中, 负荷突变可能不是由参考节点承担, 往往由其附近的几台发电机共同承担, 这时会有多个负荷突变同时发生。此时, 由于找不到参考节点与突变节点间的突变回路, 负荷突变无法识别, 影响新息图和动态状态估计结果。

收稿日期: 2010-10-16; 修回日期: 2011-02-28。

国家自然科学基金资助项目(50177006, 50977017); 国家电网公司科技项目“新息图参数辨识和状态估计的拓展及应用研究”; 已申请国家发明专利(申请号: 201010591225.0)。

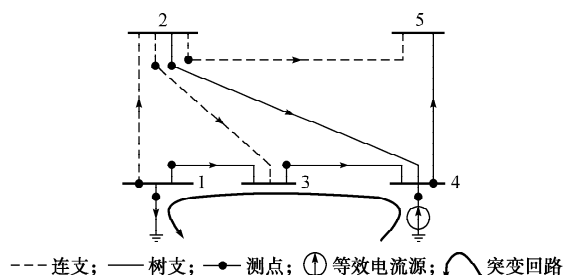


图1 突变回路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sudden change loop

2 突变子网

由于在电力网络中,负荷突变往往是由突变节点附近的多个发电机来承担。本节在不考虑不良数据和拓扑错误存在的情况下,提出突变路径和突变子网的概念,对负荷突变的识别方法进行分析。

2.1 突变路径的形成

在图2所示的5节点系统图中,假设在节点4负荷突然增加,发生负荷突变,由发电机节点5来承担这部分功率变化,发电机输出功率增加。按照前述负荷突变的识别方法,由于节点4的负荷发生变化,在节点4到参考节点1之间存在一个突变回路,如图2中虚线①所示。节点5处发电机输出突然增加,同样存在节点5到参考节点1的突变回路,如图2中虚线②所示。

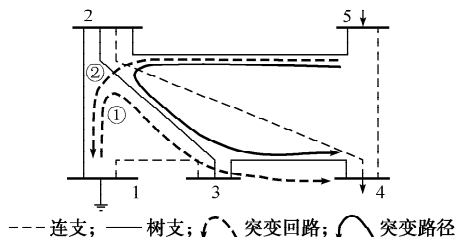


图2 突变路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sudden change route

若节点4负荷增量为 ΔP_L ,发电机节点5有功增量为 ΔP_G ,不考虑网损,有

$$\Delta P_G = \Delta P_L \quad (1)$$

由于节点4的注入有功增量 ΔP_4 为一 ΔP_L ,突变回路中实际新息流向为参考节点到节点4。发电机节点5注入有功增量 ΔP_5 为 ΔP_G ,突变回路中实际新息流向为节点5到参考节点。因此,在这2个突变回路的公共支路1-2和参考节点对地支路上,其新息差矢量元素相互抵消,使得公共支路上得到的新息差矢量绝对值很小。2个突变回路中的其他支路的新息差矢量元素仍然较大,形成了图2中实线所示回路,构成了另一种突变回路的存在形式,称

为突变路径,即由发电机节点连通到负荷节点的、由新息差矢量绝对值偏大的树支构成的连通路程。

在突变路径中,各个支路的新息差绝对值明显偏大,而其他支路新息差近似为0。据此特征,可以把突变的发电机节点和负荷节点辨识出来。

2.2 突变子网的建立

一般情况下,负荷突变由多台发电机来承担,如图3所示。

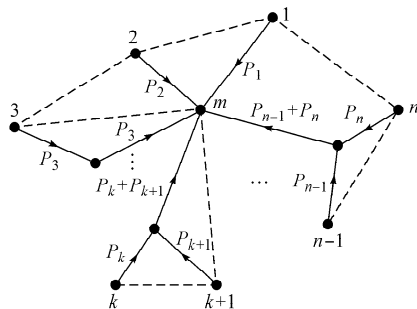


图3 突变子网示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sudden change subnet

假设一个节点 m 负荷增加,增加量为 ΔP_{Lm} ,此负荷突变由 n 个发电机来承担。各个发电机有功增加量分别为 $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_k, \Delta P_{k+1}, \dots, \Delta P_n$,若考虑实际网损,它们近似满足:

$$\Delta P_{Lm} \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (2)$$

即节点负荷注入的增加量与其余 n 个发电机节点有功功率的增加量相等。

根据2.1节可以推出,在新息差网络中,由新息差矢量偏大的树支形成一个以节点 m 为中心的辐射状子网,称之为突变子网,即从负荷节点 m 到其余 n 个发电机节点之间存在由新息差矢量偏大的树支组成的连通路程,各通路中的新息满足式(2)。

若 n 个发电机节点中包含参考节点,则突变子网中也包含参考节点。

更一般的情况,如果发生多个负荷突变,且由多台发电机承担,则可采用同样的辨识思路,只是式(2)改写为:

$$\sum_{i=1}^k \Delta P_{Li} \approx \sum_{j=1}^n \Delta P_j \quad (3)$$

式中: k 为负荷突变节点数; n 为承担负荷突变的发电机数目。

2.3 连支推算新息的修正

由于在计算连支推算新息时没有考虑节点注入的突然变化,当负荷突变存在时,节点新息不为0,应对连支推算新息进行修正^[15]。

在图3中,检测到支路新息差矢量明显偏大的

支路构成突变子网,证明有负荷突变存在,突变子网由多条突变路径组成,即负荷节点 m 到每个发电机节点之间的通路都是突变路径,在每个突变路径的每条树支上都加上该突变路径所对应的发电机节点的注入新息,就能得到计及负荷突变影响的连支推算新息。修正后的新息差网络中,突变子网消失,树支的新息差都近似为 0。

当连支推算新息修正之后,若突变路径中所有树支的新息差矢量都近似为 0,则表明负荷突变的识别是正确的。

3 负荷突变和不良数据共存时的识别问题

不良数据的存在,会使新息差矢量中出现绝对值偏大的元素,而负荷突变也会造成许多树支的新息差矢量明显偏大,二者相互影响。

若不良数据存在的树支属于突变回路,则不良数据的存在会影响突变路径的判断,如图 4 所示。

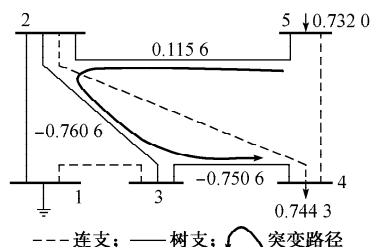


图 4 负荷突变和不良数据共存的情况
Fig. 4 Case under coincidence of sudden load change and bad data

假设节点 4 处发生负荷突变,支路 5-2 上的量测量为不良数据。没有不良数据时,突变路径为 5-2,2-3,3-4。不良数据的存在使支路 5-2 的新息值减小,其新息差矢量数值也相应减小,则支路 5-2 不在突变路径中显现。检测到的突变路径为新息差绝对值较大且数值接近的支路 2-3,3-4,突变节点有可能为节点 2 和 4,而不是实际的节点 4 和 5。

此时,可以利用节点注入新息识别不良数据。如果节点 2,4 的节点注入有功量测是正确的,节点 2 的有功注入新息差值近似为 0,而节点 5 的有功注入新息差的绝对值近似与突变路径树支上的新息差值相等。由此可知,节点 4 和 5 发生了负荷突变,支路 2-5 上存在不良量测数据。

在上述识别过程中,当负荷突变和不良数据同时存在时,利用节点注入新息矢量辨识可增加识别能力。这时支路量测和节点量测可以相互检验:

一方面,可利用节点注入量测识别支路不良数据和负荷突变,即当节点注入量测准确时,负荷突变可辨识,而且通过突变路径中树支的新息差矢量,可

以辨识突变路径中的树支上是否存在不良数据。

另一方面,在节点注入量测较差而成为不良数据时,可以利用支路量测来识别负荷突变和节点注入量测的不良数据。即当节点注入量测是不良数据,导致节点注入新息为不良新息时,不能反映出负荷突变的发生,此时如果支路量测准确,则可以从新息差网络中检测到由负荷突变引起的突变路径,进而在识别出负荷突变的同时也能将节点注入量测中存在的不良数据排除。

4 算例分析

下面在负荷突变与不良数据同时存在时说明负荷突变辨识过程。以图 5 所示 IEEE 30 节点系统为例,说明突变路径和突变子网识别负荷突变的方法,节点 1 为参考节点。设节点 10 有一个 1.74 的负荷突变增量,由节点 2,5,8,11 的发电机承担,承担量分别为 0.24,0.50,0.50,0.50,并设置节点 11 的有功注入量测和支路 6-7 有功量测为不良数据。

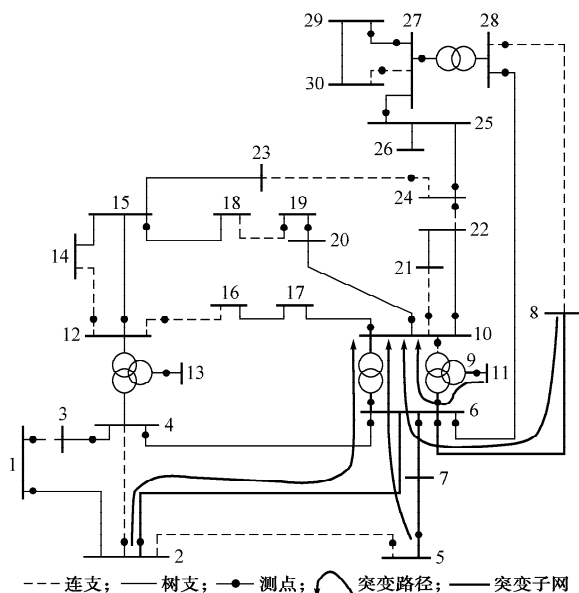


图 5 IEEE 30 节点系统
Fig. 5 IEEE 30-bus system

负荷突变和不良数据同时存在时的新息差结果见表 1,新息差矢量明显偏大的支路在表 1 中加粗显示。

辨识过程如下:

1)考察节点新息,寻找可疑突变节点。节点 2,5,8,10 的注入新息超过门限值。虽然不良数据的存在使得这些节点新息不满足式(3)所示条件,但由于存在上述新息值偏大的节点,仍可以确定负荷突变的存在。

2)考察支路新息差,初步确定突变路径。节点

10 与节点 2,8,11 之间存在新息差偏大的树支构成 3 条突变路径。节点 10 与节点 2 之间的突变路径 1 由树支 10-6,6-2 构成;支路 10-6,6-8 构成了节点 10 与节点 8 之间的突变路径 2;支路 10-6,6-9,9-11 构成节点 10 与节点 11 之间的突变路径 3。

表 1 负荷突变与不良数据共存时的计算结果
Tab.1 Results under coincidence of sudden load change and bad data

支路/ 节点	量测值	预报值	真实新息 矢量	连支推算 新息矢量	新息差 矢量
2-6	0.542 7	0.380 6	0.162 1	-0.080 3	0.242 4
5-7	-0.138 8	-0.128 8	-0.010 0	0.492 4	-0.547 4
6-7	0.173 8	0.361 1	-0.187 3	0.184 9	-0.002 4
6-8	-0.411 3	-0.011 7	-0.399 6	0.095 5	-0.495 2
6-9	0.540 3	0.147 2	0.393 1	0.890 8	-0.497 8
6-10	0.456 9	0.123 5	0.333 4	-1.371 9	1.705 3
9-11	-0.678 6	-0.179 3	-0.499 3	0	-0.499 3
2	0.876 0	0.576 0	0.300 0	0	0.300 0
5	0.746 0	0.246 0	0.500 0	0	0.500 0
8	0.850 0	0.350 0	0.500 0	0	0.500 0
10	-1.858 0	-0.058 0	-1.800 0	0	-1.800 0
11	0.278 6	0.179 3	0.099 3	0	0.099 3

由于不良数据的存在,还要考察节点与突变路径之间的关系,以排除不良数据的影响,确定突变子网。

3)排除节点注入不良数据影响。第 3 条路径中,支路 6-9,9-11 的新息差绝对值相差不大,在 0.5 附近,但节点 11 的注入新息仅为 0.099,与路径新息差不匹配。节点 11 是发电机节点,负荷突变应由此发电机提供,因此可以判定节点 11 的注入有功新息是不良数据,其实际值应该与支路 6-9,9-11 的新息差绝对值相等,为 0.499 3。

4)确定突变子网。节点 2,5,8,11 与节点 10 的新息满足式(2),就可以确定在节点 10 与节点 2,5,8,11 之间存在突变子网,如表 2 所示。该突变子网是由负荷节点 10 与发电机节点 2,5,8,11 之间的 4 条突变路径组成。

表 2 突变子网构成表
Tab.2 Composing of sudden change network

突变路径	树支
1	2-6,6-10
2	8-6,6-10
3	11-9,9-6,6-10
4	5-7,7-6,6-10

5)排除支路量测的不良数据。在节点 10 与节点 5 之间的突变路径 4 是由支路 10-6,6-7,7-5 组成的,第 2 步没有找到这条路径是因为支路 6-7 的量测值是不良数据。支路 6-7 的新息差应当与支路

5-7 的新息差以及节点 5 的新息近似,为-0.542 4。

6)突变节点识别之后,要对连支推算新息加以修正。从发电机节点开始,依次对每条突变路径进行修正,每条突变路径中树支的连支推算新息矢量都加上与该突变路径对应的发电机节点的注入新息值,从而在连支推算新息中计及了负荷突变带来的影响,修正后得到的计算结果如表 3 所示。从修正后的新息差可以看到,在没有负荷突变影响时,不良数据将显现出来。支路 6-7 的新息差矢量明显偏大,而且位于树支上,说明支路 6-7 的量测是不良数据,与上述判断一致。

表 3 修正节点量测和连支推算新息后的计算结果
Tab.3 Results after verifying bad data and link reckoning vector with bad data

支路/ 节点	量测值	预报值	真实新息 矢量	连支推算 新息矢量	新息差 矢量
2-6	0.542 7	0.380 6	0.162 1	0.219 7	-0.057 6
5-7	-0.138 8	-0.128 8	-0.010 0	0.007 6	-0.017 6
6-7	0.173 8	0.361 1	-0.187 3	0.315 1	-0.502 4
6-8	-0.411 3	-0.011 7	-0.399 6	-0.404 5	0.004 9
6-9	0.540 3	0.147 2	0.393 1	0.390 8	0.002 3
6-10	0.456 9	0.123 5	0.333 4	0.428 1	-0.094 7
9-11	-0.678 6	-0.179 3	-0.499 3	-0.499 3	0
2	0.876 0	0.576 0	0.300 0	0.300 0	0
5	0.746 0	0.246 0	0.500 0	0.500 0	0
8	0.850 0	0.350 0	0.500 0	0.500 0	0
10	-1.858 0	-0.058 0	-1.800 0	-1.800 0	0
11	0.678 6	0.179 3	0.499 3	0.499 3	0

通过以上算例,说明新息图法能够准确辨识负荷突变,以及负荷突变和不良数据相交叠情况下两者的识别问题,而且节点新息和支路新息差在识别过程中可以相互检验,虽然量测冗余度较单独识别负荷突变时稍有增加,但较之普通的静态状态估计和动态状态估计对量测冗余的要求,新息图法对量测冗余度的要求仍然较低。新息图法在恶劣条件下的识别优势依然十分明显。

利用上述方法,对 2010 年 11 月 14 日 9 时的某省网运行数据进行了状态估计实验。该时刻,由于一台发电机退出运行(相当于一个负的注入功率突变),其承担的负荷由附近相关 3 台机组提供,这 4 个负荷突变节点被有效识别出来,验证了方法的准确性和实用性。

负荷突变和不良数据的准确辨识,使得状态估计结果更加符合实际运行状态,有利于促进动态状态估计的实用化。

参 考 文 献

[1] 张伯明,王世纆,相年德. 电力系统动态状态估计中不正常事件

- 的处理[J]. 中国电机工程学报,1993,13(3):52-58.
ZHANG Boming, WANG Shiyong, XIANG Niande. Anomaly processing in power system dynamic state estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(3): 52-58.
- [2] 李碧君,薛禹胜,顾锦汶. 基于权函数的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(8):32-34.
LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jinwen. Weight function based power system state estimation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 32-34.
- [3] 钱峰,龚庆武. 基于 IGG 法的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):36-39.
QIAN Feng, GONG Qingwu. State estimation of power system based on IGG method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 36-39.
- [4] SINGH D, PANDEY J P, CHAUHAN D S. Topology identification, bad data processing, and state estimation using fuzzy pattern matching[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(3): 1570-1579.
- [5] HUANG S J, LIN J M. Enhancement of anomalous data mining in power system predicting-aided state estimation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 610-619.
- [6] 张伯明,王世纛,相年德. 电力系统实时运行状态的估计和预报[J]. 中国电机工程学报,1991(增刊 1):68-74.
ZHANG Boming, WANG Shiyong, XIANG Niande. Estimation and forecasting of real-time power system operation states[J]. Proceedings of the CSEE, 1991(Supplement 1): 68-74.
- [7] NISHIYA K, HASEGAWA J, KOIKE T. Dynamic state estimation including anomaly detection and identification for power systems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, 129(5):192-198.
- [8] SOUZA J C S, LEITE da SILVA A M, ALVES da SILVA A P. Online topology determination and bad data suppression in power system operation using artificial neural networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 796-803.
- [9] 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[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1592-1599.
- [10] 周苏荃,柳焯. 新息图法状态估计[J]. 继电器,2000,28(4): 1-5.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. A power system state estimation method based on innovation graph[J]. Relay, 2000, 28(4): 1-5.
- [11] 周苏荃,柳焯. 新息图的智能特征[J]. 电力系统自动化,2000, 24(13):15-17.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. The intellectual characteristic of the innovation graph [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 15-17.
- [12] 周苏荃,柳焯. 新息图法拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化, 2000,24(4):23-27.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. An innovation graph approach to topology error identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 23-27.
- [13] 周苏荃,柳焯. 新息图法识别多重网络结构动态变化[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):67-72.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. Identification of multiple dynamic network structure changes by the innovation graph approach [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 67-72.
- [14] 张艳军,刘海珊,周苏荃. 新息图拓扑可观测性及不良数据可辨识性分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(6):55-58.
ZHANG Yanjun, LIU Haishan, ZHOU Suquan. Topology observability and bad data identifiability analysis of the innovation graph technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 55-58.
- [15] 周苏荃,柳焯. 负荷突变与拓扑错误及坏数据三者交叠情况下的识别问题[J]. 中国电机工程学报,2002,22(6):6-10.
ZHOU Suquan, LIU Zhuo. The identification of three simultaneous anomalies of sudden load change and topology error and bad data [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 6-10.

毛志强(1988—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统状态估计。E-mail: fxqhyuan@126.com
蔡中勤(1974—),女,博士,讲师,主要研究方向:电力系统的运行与控制。E-mail: liumingji2006@126.com
周苏荃(1958—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统状态估计。E-mail: zhousq@hit.edu.cn

Identification of Sudden Load Changes Based on Innovation Graph Approach

MAO Zhiqiang¹, CAI Zhongqin¹, ZHOU Suquan¹, LI Bijun², LI Lei², GONG Chengming²

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: A sudden load change may bring a sudden change to operating state of a power system and has serious impacts on the bad data identification in the state estimation with predicting functions. Considering engineering practices, an innovation graph approach based identification method for sudden load change is further studied. The concepts of sudden change route and sudden change subnet are proposed and the identification method for sudden load change is presented. After successful identification of the suspicious nodes with large injecting innovation values, sudden change routes can be found among the nodes. These sudden change routes can make up a sudden change subnet and all the sudden change nodes can be identified in cases when multi generators are supplying a sudden change load. The nodes injection innovation and branches innovation difference can be used for cross validation to identify the bad data occurring simultaneously with the sudden load changes. The IEEE 30-bus system example is shown to explain the identification process by sudden change subnet. This method has also been validated in practice.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50177006, No. 50977017) and State Grid Corporation of China.

Key words: state estimation; innovation graph; sudden load change; bad data