基于支路等值的拓扑辨识方法

姬 源[1]，杨 欣[2]，王 燕[3]，顾 全[4]

(1. 贵州电网公司电力调度控制中心，贵州 贵阳 550002；2. 贵州电网兴义供电局，贵州 兴义 562400；
3. 贵州电网遵义供电局，贵州 遵义 563000；4. 南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211100)

摘要：状态估计中拓扑辨识是一个疑难问题，很多拓扑辨识方法把开关状态作为未知量引入估计过程，对量测冗余度和精度提出了较高要求，加大了状态估计辨识可疑数据的难度，工程应用困难。通过支路关联遥测遥信互校，确定运行状态可疑的支路。状态可疑支路在状态估计中作为参数未知支路，只需要引入一个状态变量，从支路参数计算结果就可判断支路运行状态，并给出了支路电导引入信息矩阵方法。正确判断支路运行状态后，利用状态估计节点电压计算支路潮流并修正两端节点注入，就可得到完整的电网运行状态，无需重新状态估计。该方法可以辨识小潮流支路拓扑错误。测试结果表明，由于在常规 PQ 解耦状态估计引入未知量，只增加一维状态量，计算速度快，拓扑辨识结果准确，适合在在线系统中应用。

关键词：状态估计；拓扑辨识；参数估计；等值负荷

A topology estimation method based on branch equivalence

JI Yuan[1], YANG Xin[2], WANG Yan[3], GU Quan[4]

(1. Electric Power Dispatch and Control Center of Guizhou Power Grid Company, Guiyang 550002, China;
2. Xingyi Electric Power Bureau, Xingyi 562400, China; 3. Zunyi Electric Power Bureau,
Zunyi 563000, China; 4. Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: The topology error identification is a puzzle in state estimation, new state variables representing breaker status are introduced in topology estimation, which is rigorous for demanding higher precision of measurements and makes it difficult for bad data identification. Practically, these methods are not suitable for being applied in EMS. A new fast topology estimation method without introducing any new state variables is proposed in state estimation. In this method, all branches (line or transformer winding) with uncertain status are equaled to energy consumers and are identified by verifying the measurement consistency of power flow and associated breaker status. The status of suspected branches could be ascertained from the power flow results of equivalent energy consumers. The criteria of ascertaining branch status are offered. Once the status of a branch is detected, its power flow can be calculated using bus voltages of both sides. After power injections of all buses are modified, the whole states of power system can be achieved without carrying out state estimation again. This method is also effective to light load branches topology errors. The performance of the proposed method is assessed through its application to one of province EMS, considering different types of topology errors and distinct network configurations.

Key words: state estimation; topology estimation; measurement error; equivalent energy consumer

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)10-0129-06

0 引言

电网的决策和控制都依赖于完整准确的电网状态，然而自动化信息不能保证完全准确，很多刀闸没有采集，通道也可能发生故障，遥测遥信具有不同时性等，所有这些都影响了状态估计结果的可靠性，从而直接影响了电网运行控制[1-5]。

拓扑错误是状态估计中最严重的错误，其正确辨识也最困难。状态估计投入运行以来就已经具有拓扑错误辨识功能，在文献[6-8]中提出了通过检查状态估计结果中坏数据的位置和个数判断拓扑错误，但是多个支路拓扑错误和坏数据给正确辨识带

来困难。近十几年来，出现了新的拓扑错误辨识方法[9-12]，这些方法一般通过状态估计的残差分析确定错误开关位置，把支路状态或开关状态作为状态量带入求解方程，在状态估计中引入带约束条件的量测方程或开关状态等式约束[13-15]。这些辨识方法需要在错误拓扑状态基础上状态估计，而文献[16]中把支路潮流或者开关潮流作为状态量，通过支路潮流结果判断支路状态，该方法由于计算中不带入可能错误的拓扑结构而提高了收敛性。通过新增状态估计求解状态量，会降低量测方程的冗余度，在出现可疑数据时往往会造成误检测。而电网操作或者开关事故跳时，由于遥测遥信数据不同时性，很容易出现可疑数据，更容易造成错误辨识。

文献[17]提出通过新息图原理辨识拓扑错误，通过负荷预测和潮流计算预测开关变位后潮流和量测是否一致进行拓扑辨识，该方法需已知一个准确的基本运行方式，并在此基础上连续状态估计，而实际系统很难维持一个准确的电网状态，也不能保证连续状态估计成功，因此在实际 EMS 中应用困难。

本文提出了通过估计支路参数实现拓扑辨识的方法，如果某支路为运行，其支路阻抗为正常值；如果支路为停运，相当于支路的阻抗很大。估计参数可以在状态估计中忽略拓扑错误对计算结果的影响，提高状态估计的可靠性。通过设备遥测遥信关联特征确定状态可疑的支路，只对状态可疑的支路和开关进行拓扑辨识，减少了拓扑辨识范围。通过某省级电网两个拓扑辨识的测试表明，该方法能够处理支路相关遥测遥信全部错误的情况，提高了状态估计拓扑辨识能力，并具有计算速度快，实现简单的优势，状态估计的收敛性不受错误拓扑的影响，因此适合在 EMS 中应用。

1 拓扑辨识基本原理

拓扑错误是由于遥信中存在坏数据，而拓扑错误不能明显辨识出来是由于遥测也存在坏数据。当这种遥测遥信坏数据局部占有优势时，通过最小二乘状态估计原理就不能辨识坏数据，甚至出现错误辨识。例如：某一条线路实际处于运行状态，从遥测上看一端遥测较大，而另一端遥测较小，其中必然有一个可疑数据，再加上两端开关状态错误，正确辨识的难度就很大。拓扑错误的支路带入到状态估计通常会把支路两端节点注入量测辨识为坏数据[15]，引入拓扑错误的支路阻抗，可以提高状态估计的准确性。

对于拓扑状态可疑支路，在支路两端节点（或可能连接节点）等值成负荷，这样就忽略了支路状态对电网其他部分的影响，状态估计结束后可得到支路两端节点等值负荷大小，如果支路没有运行，两个等值负荷值应较小；而如果支路运行，等值负荷值应该和支路投入后的潮流接近。对于拓扑状态可疑节点，在开关两端节点等值成负荷，这样就忽略了母联开关状态对状态估计结果影响。如果开关是断开的，则两个等值负荷大小应较小；如果开关是闭合的，则两个节点上等值负荷应该大小相等方向相反。

通过状态估计结果确定了支路正确运行状态后，计算结果和拓扑状态是一致的，不需要重新状态估计。如果支路停运或者母联开关断开，则无需后续处理；如果确定支路投入，需要根据节点电压计算支路潮流并修正两端母线注入；如果是母联开关闭合，则合并两个节点的注入量。

2 状态可疑设备确定

本文根据不同运行状态下设备的遥测遥信特征把设备分为状态确定设备和运行状态可疑设备。如果设备各侧开关状态和相关遥测值相配匹，则认为设备状态是确定的；如果存在开关状态和遥测值相矛盾的情况，则认为设备状态是可疑的。具体地说，如果设备开关闭合，各侧遥测应大于一个设定门槛，否则认为设备运行状态可疑；同理如果设备停运，开关应该处于分状态，并且各侧遥测应该小于一个设定门槛，否则认为设备状态可疑。从遥测上看，设备各侧遥测是独立采集的，其量测值可能会有矛盾，但都表示了设备的运行状态特征。而设备的有功、无功和电流是一组关联采集，由于有功量测相对准确并且更能代表设备运行状态，因此主要通过有功遥测考察设备状态。当有功遥测较大表示设备可能运行，有功遥测较小表示设备可能停运。

支路状态可疑有三种情况，第一种是从拓扑上支路已经投入运行，而支路各侧有功遥测值较小，如图 1 所示 AB 线；第二种情况是从拓扑上支路处于单端充电状态，而至少一端有功遥测值超过了设定的门槛值，如图 2 中的 AB 线；第三种是从拓扑上支路处于停电状态，而至少一端有功遥测值超过了设定的门槛，如图 3 中的 AB 线。

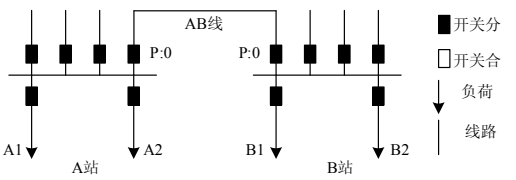

图 1 第一种设备状态可疑相邻厂站网络结构图

Fig. 1 Neighboring substation topology including first type status suspect branch

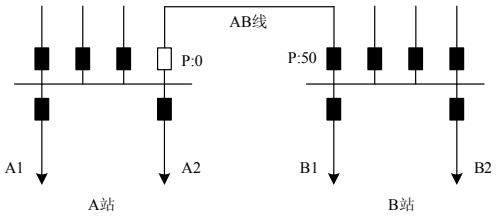

图 2 第二种设备状态可疑相邻厂站网络结构图

Fig. 2 Neighboring substation topology including second type status suspect branch

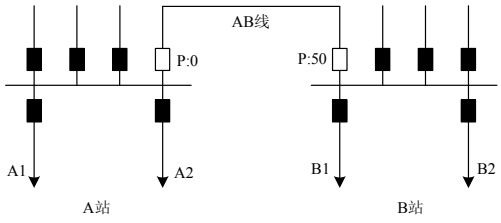

图 3 第三种设备状态可疑相邻厂站网络结构图

Fig. 3 Neighboring substation topology including third type status suspect branch

在实际电网中处于充电或者停电的支路较少，可以把所有停电和单端充电支路作为可疑支路看待，通过状态估计结果判断支路是否运行，以提高拓扑准确性。

节点拓扑错误有两种情况，第一种是母联开关闭合，而有功遥测较小；第二种是母联开关分，而有功遥测较大。

由于高压网正常运行时母线分裂运行方式较少，也可以把造成母线分裂的母联开关都作为状态可疑设备。

3　状态可疑设备等值处理

状态可疑支路和开关由于存在错误的遥测遥信而不适合参加状态估计，为了不影响状态估计中电网其他部分的计算，把状态可疑支路在其连接的节点上等值成负荷。由于等值负荷本身没有量测，就没有等值负荷节点注入量测方程，这样会降低量测冗余度，但是等值负荷量测实际上就是状态可疑的支路或可疑开关量测，而这种量测错误的可能性较大，放弃该量测有利于提高状态估计准确性。

对于停电或者单端充电支路，需要确定支路投入运行后所投入的计算节点，通过检查支路关联开关所连接节点就可以判断出等值负荷所在节点。对于第一种拓扑可疑，如果该线路是两个电气岛的唯一联络线则不适合等值成负荷，其拓扑错误需要人工确认。

图 4 表示支路状态可疑时状态估计网络结构，也就是图 1、图 2、图 3 中的 AB 线等值成负荷后的拓扑结构，AB 线在 A 站和 B 站分别用等值负荷替代。在图 4 拓扑结构基础上进行状态估计，可得到节点注入功率和节点电压。节点注入功率包含了等值负荷大小，如果站内负荷有量测就可以计算出等值负荷大小。通过节点电压可以计算 AB 线运行时的两侧潮流，如果 AB 线实际是运行的，则计算潮流和等值负荷应该是相近的，并且和正确的线路量测相近，它们之间的关系是判断线路运行方式的依据。

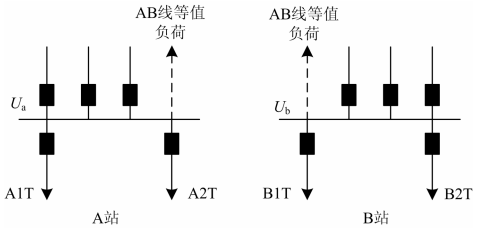

图 4 支路状态可疑拓扑估计网络结构图

Fig. 4 Branch status suspect network introduced in topology estimation

图 5(a)中厂站母联开关状态可疑，图 5(b)表示了状态估计中该母联开关在两侧节点等值成负荷后的厂站结构。状态估计结束后，同样能得到两个等值负荷大小。如果母联开关实际是分的，则两个等值负荷值应接近于 0；如果实际开关合，则两个等值负荷应大小相近方向相反，并且和母联开关正确的采集值相近。

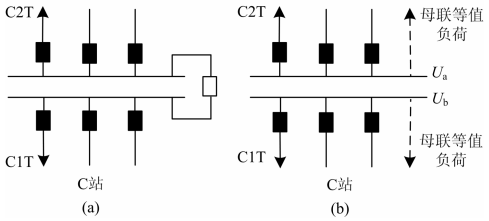

图 5 节点拓扑可疑拓扑估计网络结构图

Fig. 5 Bus configuration suspect network introduced in topology estimation

4　拓扑辨识方法

在图 4 和图 5(b)的拓扑结构基础上状态估计后得到两个节点 A 和 B 母线电压 $U_A\angle\theta_A$ 和 $U_B\angle\theta_B$，同时得到节点 A 和 B 的母线有功、无功注入量 P_A、Q_A 和 P_B、Q_B，这些注入量包含了节点实际负荷和等值负荷大小。

根据两端节点的计算电压可以计算出 AB 线投入时两端潮流为

$$P_{AB}=U_AU_B(G_{AB}\cos\theta_{AB}+B_{AB}\sin\theta_{AB})$$

$Q_{AB}=-U_A^2B_{BB}+U_AU_B(G_{AB}\sin\theta_{AB}-B_{AB}\cos\theta_{AB})$

$P_{BA}=U_AU_B(G_{AB}\cos\theta_{BA}+B_{AB}\sin\theta_{BA})$

$Q_{BA}=-U_B^2B_{AA}+U_AU_B(G_{AB}\sin\theta_{AB}-B_{AB}\cos\theta_{AB})$

式中：G_{AB}和B_{AB}是AB线对节点A和B的互导纳；B_{BB}和B_{AA}是AB线对节点A和B的自导纳。

与线路状态相关的量测包括两端节点实际负荷量测和线路两端潮流量测：P_{MA1}、Q_{MA1}、P_{MA2}、Q_{MA2}为A站负荷量测值；P_{MB1}、Q_{MB1}、P_{MB2}、Q_{MB2}为B站负荷量测值；P_{MAB}、Q_{MAB}、P_{MBA}、Q_{MBA}为线路两端量测。

利用以上量测值可计算线路运行或停运的量测误差，从误差大小就可以判断线路正确运行状态。如果线路投入运行的量测误差较小则线路运行，如果线路停运的量测误差较小则线路停运，而如果投入和停运的量测误差相差不大则线路保持其原有状态。

计算线路运行时有功量测加权误差为

$$\Delta\varepsilon_1=\omega_{PA}|P_A-P_{MA}-P_{AB}|+\omega_{PB}|P_B-P_{MB}-P_{BA}|+\omega_{PAB}|P_{AB}-P_{MAB}|+\omega_{PBA}|P_{BA}-P_{MBA}|$$

式中：ω_{PA}为节点A注入量测权重；ω_{PB}为节点B注入量测权重；ω_{PAB}为线路A端量测权重；ω_{PBA}为线路B端量测权重；P_A和P_B为节点有功计算注入量；P_{AB}和P_{BA}为线路两端计算有功潮流；P_{MA}和P_{MB}为两端节点实际负荷量测总加；P_{MAB}和P_{MBA}为线路两端有功量测。

同理可以计算得到线路停运的有功加权误差为

$$\Delta\varepsilon_0=\omega_{PA}|P_A-P_{MA}|+\omega_{PB}|P_B-P_{MB}|+\omega_{PAB}|P_{MAB}|+\omega_{PBA}|P_{MBA}|$$

根据状态估计计算收敛后平均量测误差设定一个线路投入运行的判断门槛θ，如果$\Delta\varepsilon_0-\Delta\varepsilon_1>\theta$则线路运行，如果$\Delta\varepsilon_1-\Delta\varepsilon_0>\theta$则线路停运。对于运行和停运有功量测加权误差接近的可疑线路，可使用无功加权量测误差进一步判断。

无功量测加权误差计算方法和有功计算方法相同，同时需要设定一个无功量测误差判断门槛，进一步判断线路运行状态。

如果有功、无功加权量测误差都比较接近，可以认为线路状态正确，保持其原来状态。

对于充电功率较大线路，需要判断线路是否处于充电状态，通过有功量测加权误差判断出线路停运的基础上，可增加计算首端充电无功量测加权误差和末端充电无功量测加权误差，这两个量测误差和线路停运无功量测加权误差比较，误差小者为线路正确状态。

由于开关状态和遥测状态具有相关性，开关状态错误时很可能同时伴随着遥测错误，特别是开关在打开状态时，其关联遥测P_{MAB}和P_{MBA}就可能不准确，可使用较小的加权系数。

本文以支路状态可疑为例说明了支路拓扑辨识方法，节点拓扑错误辨识方法类似。

拓扑辨识结束后，无需重新状态估计，只要对计算结果进行简单的修正，就可得到全网运行状态，大大提高了拓扑辨识的效率。对于第一种拓扑错误，支路由运行转为停运，需要拉开支路两端开关，把状态估计计算的两端母线节点注入量分配给厂站内的实际负荷。如果没有拓扑错误，则引入线路计算潮流重新统计两端母线的节点注入量。对于节点A，其注入量修正为P_A-P_{AB}，把该注入量直接分配给厂站内的负荷即可。

5 应用实例

把本文拓扑估计方法应用于某省EMS中，该系统包含300座左右500 kV和220 kV厂站、700条左右500 kV和220 kV线路。应用结果表明，该方法提高了拓扑错误辨识能力，特别是能辨识线路两端遥测遥信全部错误的拓扑错误，进一步提高了状态估计结果的可靠性。

图6是支路拓扑错误辨识的一个实例，董马线检修，而线路两端厂站刀闸都没有采集，董马线两侧刀闸处于闭合状态。董马线检修过程中两侧开关闭合后，由于两侧有功量测都比较小，被列为第一种支路拓扑可疑。

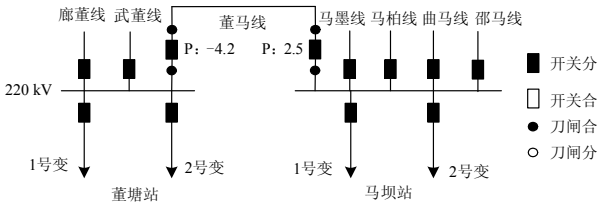

图6 支路拓扑错误接线实例

Fig. 6 Network of branch topology error

状态估计计算结束后，两端节点注入计算值分别为90.2 MW(P_A)和119.6 MW(P_B)，两端母线注入量测分别为94.0 MW(P_{MA})和115.3 MW(P_{MB})，计算出的董马线投运后的潮流分别为−44.4 MW(P_{AB})和45.1 MW(P_{BA})，董马线在董塘站和马坝站采集分别为−4.2 MW(P_{MAB})和2.5 MW(P_{MBA})。利用有功量测加权误差计算公式很容易计算得到线路运行和线路停运的量测误差(假设加权系数都为1.0)为

$$\Delta\varepsilon_1=|90.2-94.0+44.4|+|119.6-115.3-45.1|+|-44.4+4.2|+|45.1-2.5|=164.2$$

$$\Delta\varepsilon_0 = |90.2-94.0|+|119.6-115.3|+$$
$$|-4.2|+|2.5|=14.8$$

由于线路运行量测误差 $\Delta\varepsilon_1$ 远大于线路停运量测误差 $\Delta\varepsilon_0$，所以确定董马线在停运状态，从而正确辨识了该拓扑错误。

图 7 是节点拓扑错误辨识的一个实例，该厂站母联开关由于遥信错误处于打开状态(实际为闭合状态)，采集开关流过功率很小，这时状态估计把该开关列为状态可疑设备。

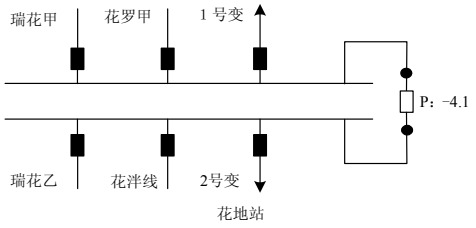

图 7 节点拓扑错误厂站实例

Fig. 7 Network of bus topology error

状态估计中把母联开关在两侧节点等值成负荷，计算出母线注入分别为 123.4 MW 和 62.9 MW，节点注入量测分别为 92.6 MW 和 97.2 MW，分裂母线节点电压分别为 224.6∠−28.0° 和 224.3∠−28.1°。

母联开关打开时两端节点有功注入量测误差分别为

123.4 MW−92.6 MW=30.8 MW

62.9 MW−97.2 MW =−34.3 MW

则母联开关打开时的有功量测误差为

$\Delta\varepsilon_0$ =|30.8|+|−34.3|=65.1 MW

母联开关闭合时的有功注入量测误差为

$\Delta\varepsilon_1$ =|123.4+62.9−92.6−97.2| = −3.5 MW

通过量测误差计算，很容易判断开关应该处于闭合状态，从而正确辨识了该节点拓扑错误。

本方法利用了设备投入和切除引起了量测误差判断设备正确状态，当设备投入和切除的量测误差接近时就不能正确判断，即：不能辨识小潮流线路的拓扑错误和母联开关潮流较小时的拓扑错误。对于不可辨识的拓扑状态，将提示运行人员人工确认。

6　结论

本文根据不同运行方式下设备的遥信和遥测特征把设备分为状态确定设备和状态可疑设备，只对可疑设备进行拓扑辨识，大大减少了拓扑辨识范围。在辨识过程中，对支路拓扑错误和节点拓扑错误使用同一种处理方法，无需引入新的状态变量，仅对状态可疑支路或者开关进行等值处理，不改变状态估计过程。通过状态估计结果结合设备关联的量测对设备运行状态做出判断，通过修正节点注入量得到全网一致的运行状态，无需重新状态估计，提高了运行效率。该方法对量测的冗余度和量测精度没有特别要求，因此适合在线系统中应用。

参考文献

[1] 刘莉, 翟登辉, 姜新丽. 电力系统不良数据检测与辨识方法的现状与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 111-115.
LIU Li, ZHAI Denghui, JIANG Xinli. Current situation and development of the methods on bad-data detection and identification of power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 111-115.

[2] 赵亮, 钱玉春, 顾全, 等. 一种基于等效模型电网动态过程状态估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 10-14.
ZHAO Liang, QIAN Yuchun, GU Quan, et al. State estimation of dynamic process based on equivalent model[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 10-14.

[3] 叶芳, 卫志农, 孙国强, 等. 基于自动微分技术的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 91-95, 100.
YE Fang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. State estimation of power systems with automatic differentiation technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 91-95, 100.

[4] 侯雨伸, 白雪峰, 郭志忠. 计及 AMI 的配网分层状态估计及伪量测计算[J]. 电力系统自动化学报, 2014, 26(8): 71-76.
HOU Yushen, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong. Layered method for distribution system state estimation and pseudo measurement calculation considering AMI[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(8): 71-76.

[5] 田江, 钱科军, 梁锋. 分布式状态估计技术在智能变电站的应用[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(9): 27-31.
TIAN Jiang, QIAN Kejun, LIANG Feng. Application of distributed state estimation in smart substations[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 27-31.

[6] KOGLIN H J, OEDING D, SCHMITT K D. Identification of topological errors in state estimation[C] // IEE International Conference on Power System Monitoring and Control, Durham, 1986: 140-144.

[7] KOGLIN H J, NEISIUS H T. Treatment of topological errors in substations[C] // Proc 10th Power Systems

Computation Conference, Butterworth, Graz, 1990: 1045-1053.

[8] KOGLIN H J, NEISIUS H T. A topology processor based on state estimation[C] // Proc 11th Power Systems Computation Conference, Avignon, 1993: 633-638.

[9] CLEMENTS K A, COSTA A S. Topology error identification using Lagrange multipliers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 347-353.

[10] SINGH H, ALVARADO F L. Network topology determination using least absolute value state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1159-1165.

[11] ABUR A, KIM H, CELIK M. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 2029-2036.

[12] MILI L, STEENO G, DOBRACA F, et al. A robust estimation method for topology error identification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1469-1476.

[13] ABUR A, EXPÓSITO A G. Power system state estimation: theory and implementation[M]. Marcel Dekker, Inc. 2005.

[14] CLEMENTS K A, DAVIS P W. Detection and Identification of topology errors in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1748-1753.

[15] WU F F, LIU W H E. Detection of topological errors by state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 9(2): 176-183.

[16] 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 grapa approach to topology error identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 23-27.

[17] LUGTU R L, HACKETT D F, LIU K C, et al. Power System state estimation: detection of topological error[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(6): 2406-2412.

收稿日期：2014-08-14； 修回日期：2014-11-25

作者简介：

姬 源(1979-)，男， 高级工程师，主要从事电力调度自动化系统建设和管理工作； E-mail: chinajiyuan@aliyun.com

杨 欣(1973-)，男， 工程师，主要从事电力调度自动化系统高级应用功能研究工作; E-mail: 1216583004@qq.com

王 燕(1969-)，女， 高级工程师，主要从事电力调度自动化系统建设和管理工作。E-mail: wy9995@126.com

(编辑 周金梅)