

DOI: 10.7500/AEPS20130802005

基于不确定性推理的变电站拓扑错误辨识

张 婷^{1,2}, 翟明玉¹, 张海滨¹, 齐苗苗¹, 龚成明¹, 李 雷¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106)

摘要:采用基于确定因子的不确定性推理方法,文中提出一种变电站拓扑错误辨识方法。在规则法的基础上,根据规则采用的数据类型和关系的不同,将规则分为四大类进行阐述。然后根据不确定性推理方法,对各类拓扑错误辨识规则建立了不精确模型,利用不确定性推理的传播算法和合成算法,计算出每个断路器和刀闸的综合可信度,从而判断断路器和刀闸的开合状态。该方法利用变电站内三相多源数据,冗余度高,提高了对刀闸的辨识能力,解决了规则冲突的问题。算例结果表明,该算法能够对多个不良数据和拓扑错误同时存在的情况进行有效辨识。

关键词:状态估计;不确定性推理;智能变电站;拓扑错误辨识;多源冗余数据

0 引言

电力系统状态估计利用实时量测系统的冗余度来提高数据精度,自动排除随机干扰所引起的错误信息,估计或预报系统的运行状态,是能量管理系统的基础和核心环节^[1]。传统的状态估计、不良数据辨识以及结线分析都是建立在电力系统开关遥信量均为正确的基础上^[2]。如果在有拓扑错误的网络模型上进行状态估计,将会导致状态估计结果不可信,进而影响到其他基于网络分析实时模型的高级应用^[3]。目前提出的拓扑错误辨识方法主要有规则法^[3-5]、新息图法^[6]、广义状态估计法^[7-9]、转移潮流法^[10]、最小信息损失法^[11]等。其中规则法早在 20 世纪 90 年代就已在欧洲电网中得到应用,该方法快速、简单、适应性好,不存在收敛失败的问题,是一种有效的拓扑错误辨识方法。

随着智能电网的发展,智能变电站已在国内得到推广建设,智能变电站拥有功能更加强大的计算机监控系统和种类更丰富的量测数据,有利于实现变电站拓扑错误辨识。近年来,变电站拓扑错误辨识方面的研究受到了广泛关注。变电站模型小、数据冗余度高,有利于进行拓扑错误辨识。文献[12]建立了变电站三相物理模型,在此基础上提出了一系列不良数据辨识和拓扑错误辨识的通用规则,但没有充分利用多源数据,也没有给出解决规则间冲

突的方法。文献[13]针对配电网变电站提出了简单的拓扑错误辨识规则,但没有考虑三相模型、多源数据,且规则过于简单,对复杂错误的辨识存在困难。文献[14]归纳了元件、间隔、电压等级等多空间尺度的关联性规则,考虑了多时间断面的关联规则,提出了基于多源多时空规则的变电站拓扑检错方法,但没有考虑各种数据和规则的可信度不同的问题,且对接线方式不同的变电站模型的适应性较差。

本文利用变电站多源冗余数据,根据不确定性推理方法,对拓扑错误辨识规则建立了一个不精确推理模型,赋予每个数据和规则相应的可信度,通过不确定性推理的传播算法和合成算法得到每个开关的可信度值,从而辨识出拓扑错误。

1 不确定性推理

不确定性推理方法自 20 世纪 70 年代提出以来得到了广泛研究。不确定性推理是指从不确定性的初始证据出发,通过运用不确定性的知识,最终推理出具有一定程度的不确定性、但是又合理或者似乎合理的结论的思维过程^[15]。

本文将不确定性推理引入状态估计领域。变电站拓扑错误辨识的证据及规则都具有不确定性,利用普通的规则法时,忽视了这种不确定性,因而得到的结果不一定可靠。因此,利用不确定性推理方法对变电站拓扑错误辨识建模,可以推理出合理的变电站拓扑结构。本文采用的基于确定因子的不确定性推理是美国斯坦福大学 Shortliffe 等人提出的一种不确定性推理方法。

收稿日期: 2013-08-02; 修回日期: 2013-11-19。

江苏省软件产业发展专项引导资金重点资助项目“智能电网调变一体化技术支持系统”;已申请国家发明专利(申请号: 201310234055.4)。

1.1 规则的不确定性表示

本文中的知识就是拓扑错误辨识的规则,可以表示为^[16]:

$$\text{IF } E \text{ THEN } H \quad F(H,E) \quad (1)$$

式中: E 表示证据; H 表示结论; $F(H,E)$ 为该规则的强度,称为可信度因子。

$F(H,E)$ 的作用域为 $[-1,1]$; $F(H,E)>0$ 表示该证据增加了结论为真的程度; $F(H,E)<0$ 表示该证据增加了结论为假的程度; $F(H,E)=0$ 表示证据 E 和结论 H 没有关系。一般情况下, $F(H,E)$ 的值要由领域专家根据经验给出。

1.2 证据的不确定性表示

拓扑错误辨识中的证据就是变电站内的多源冗余数据。证据的不确定性用证据的可信度 $F(E)$ 表示。初始证据的可信度由用户在系统运行时提供,中间结果的可信度由不精确推理算法求得。证据的可信度 $F(E)$ 的取值范围同规则可信度一样,也是 $-1\leq F(E)\leq 1$ 。

当组合证据为多个单一证据的合取时:
 $E=E_1 \text{ AND } E_2 \text{ AND } \cdots \text{ AND } E_n$
则有

$$F(E)=\min\{F(E_1),F(E_2),\cdots,F(E_n)\} \quad (2)$$

当组合证据是多个单一证据的析取时:
 $E=E_1 \text{ OR } E_2 \text{ OR } \cdots \text{ OR } E_n$
则有

$$F(E)=\max\{F(E_1),F(E_2),\cdots,F(E_n)\} \quad (3)$$

1.3 不确定性的传播算法

结论的不确定性通过不确定性推理的传播算法求出。若已知规则如式(1)所示,且证据的可信度为 $F(E)$,则结论的可信度 $F(H)$ 为:

$$F(H)=F(H,E)\max\{0,F(E)\} \quad (4)$$

如果两条不同规则推出同一结论,但可信度各不相同,则可用合成算法计算综合可信度。若已知两条规则推出的结论可信度为 F_1 和 F_2 ,则其综合可信度 $F_{1,2}$ 为:

$$F_{1,2}=\begin{cases} F_1+F_2-F_1F_2 & F_1\geq 0,F_2\geq 0 \\ F_1+F_2+F_1F_2 & F_1<0,F_2<0 \\ \frac{F_1+F_2}{1-\min\{|F_1|,|F_2|\}} & F_1F_2<0 \end{cases} \quad (5)$$

2 基于不确定性推理的规则建模

变电站自动化系统采集的有来自测控装置、保护装置和相量测量单元(PMU)的三相多源遥测和遥信数据。这些量测数据之间存在着大量的电气约

束和运行约束。根据规则使用的数据类型及关系,将变电站拓扑错误辨识的规则划分为四大类。本节根据不确定性推理,对规则进行描述归纳。下文中的规则强度只作为举例说明,应用中可根据实际情况进行调整。

本文以3/2断路器接线方式为例,阐述具体的规则和相关概念。典型的3/2断路器接线方式如图1所示。图中:TL为输电线路;PL为支路,本文中支路是指包含一个断路器和两端刀闸的一段线路;S为支路刀闸;CB为断路器;GS为接地刀闸。

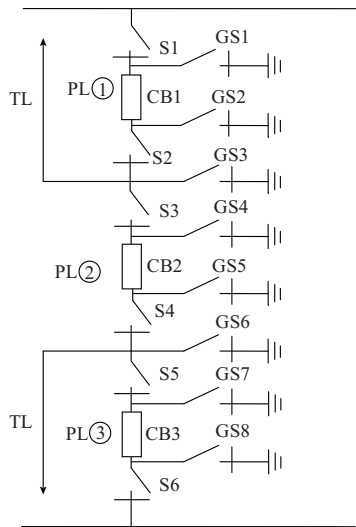


图1 典型3/2断路器接线方式
Fig.1 A typical connection mode of breaker-and-a half

2.1 基于实时数据与设备状态关系的规则

2.1.1 遥测数据

某一支路上,如果电流有功/无功量测大于门槛值,则该支路为闭合,且该支路上的断路器和刀闸都应闭合状态;某一支路上,如果电流/有功/无功量测小于门槛值,则该支路有可能是断开的,因此,该规则的可信度应该是一个小于1的正数。

根据不确定性推理,以上规则可以描述成表1的形式。

表1 基于遥测数据规则		
Table 1 Rules based on telemeter data		
规则 (H,E)	规则强度 $F(H,E)$	
IF $I_\theta^\phi > z_I$ OR $P_\theta^\phi > z_P$ OR $Q_\theta^\phi > z_Q$	1	
THEN $C^\phi=1, S^\phi=1$		
IF $I_\theta^\phi < z_I$ OR $P_\theta^\phi < z_P$ OR $Q_\theta^\phi < z_Q$ THEN $C^\phi=1$	-0.5	

表中: I, P, Q 分别为电流、有功和无功量测; C 和 S 分别为待求的当前断面的断路器、刀闸状态,状态为1时表示闭合;上标 ϕ 为相别,取A,B,C;下

标 θ 为数据来源,取 1,2,3 时分别表示测控、保护、PMU; z 为小正数的阈值,各个公式中的阈值根据具体情况而有所不同。

为了便于之后的合成算法,假设所有断路器和刀闸的状态均为闭合,每条规则都用来推理设备状态为闭合的可信度,因此,表 1 中的第 2 条规则的强度是负数。

2.1.2 遥信数据

遥信数据包括断路器、支路刀闸以及接地刀闸的开合状态,遥信值为 0 时的开关状态为断开,为 1 时的开关状态为闭合。

根据不确定性推理理论,可以描述成表 2 的形式。表中: $\tilde{C}, \tilde{S}, \tilde{G}$ 分别为断路器、支路刀闸和接地刀闸的遥信位置信息; G 为待求的当前断面接地刀闸的状态。

表 2 基于遥信数据规则

Table 2 Rules based on tele signalling data

规则(H,E)	规则强度 F(H,E)
IF $\tilde{C}_\theta^\# = 1$ THEN $C^\# = 1$	1
IF $\tilde{S}_\theta^\# = 1$ THEN $S^\# = 1$	1
IF $\tilde{G}_\theta^\# = 1$ THEN $G^\# = 1$	1
IF $\tilde{C}_\theta^\# = 0$ THEN $C^\# = 1$	-1
IF $\tilde{S}_\theta^\# = 0$ THEN $S^\# = 1$	-1
IF $\tilde{G}_\theta^\# = 0$ THEN $G^\# = 1$	-1

对于某一断路器或刀闸,若某一来源的遥信既有总位置也有各相位置信息,则只利用分相遥信去判断各相位置;若对某一断路器或刀闸,某一来源的数据只有总位置信息,则判定该断路器或刀闸各相开合状态与总遥信一致。

2.2 基于相邻设备间关系的规则

由于刀闸没有灭弧装置,需要与断路器配套使用,必须避免其带负荷合闸或拉闸。因此,对于某一条支路,若断路器为闭合状态,则刀闸也应该在闭合状态;若刀闸在断开状态,则断路器也应该在断开状态。

支路刀闸和接地刀闸匹配时(如图 1 中一条支路上的刀闸与支路所连接的接地刀闸之间属于匹配关系),根据变电站防误操作的规定,接地刀闸必须在相应支路刀闸分闸之后才能进行合闸操作,在支路刀闸合闸之前进行分闸操作,即两者不可能同时处于闭合状态。

在检修状态下,相邻设备的状态可能会不满足上述规则,因此在判断此类规则前,应先检测相关间隔或设备是否在检修状态。如果在检修状态,则跳过这段规则。

以上两条规则描述如表 3 所示。

表 3 基于相邻设备关系的规则

Table 3 Rules based on relationships of adjacent switches

规则(H,E)	规则强度 F(H,E)
IF $\tilde{C}_\theta^\# = 1$ THEN $S^\# = 1$	1
IF $\tilde{S}_\theta^\# = 0$ THEN $C^\# = 1$	-1
IF $\tilde{S}_\theta^\# = 1$ THEN $G^\# = 1$	-1
IF $\tilde{G}_\theta^\# = 1$ THEN $S^\# = 1$	-1

2.3 基于断面关系的规则

由于运行方式的约束,电力系统的运行状态在时间序列上具有连续性。当前运行状态是由上一时间断面的状态转移过来的,只可能是某几种固定的状态。而上一断面的数据是经过拓扑错误辨识过的,因此可信度较高,利用上一断面和当前断面的数据进行比较,可归纳出以下规则。

1)与上一断面比较,如果支路上的电流(功率)没有明显改变,而断路器状态却发生改变,则断路器状态可疑。

2)对于一条支路,若上一断面断路器和两个刀闸的状态均为断开,当前断面断路器遥信为闭合,刀闸遥信为断开,则断路器状态错误,应该为断开;若上一断面 3 个设备状态均为闭合,当前断面断路器遥信为闭合,刀闸遥信为断开,则刀闸遥信错误,刀闸状态应该为闭合。

规则如表 4 所示。其中 $\dot{I}, \dot{C}, \dot{S}$ 分别为上一断面遥测的电流值、通过拓扑错误辨识处理后的断路器和支路母线刀闸位置。利用断面关系时,由于遥信和遥测不同步,可能存在中间态。例如:开关状态已经改变,遥信将改变后的状态采集上传,但遥测却是改变前的数据。此时,要多考虑几个断面,根据前后两断面的数据对过渡态进行判断。

表 4 基于断面关系的规则

Table 4 Rules based on time dependent relationship

规则(H,E)	规则强度 F(H,E)
IF $\dot{I}_\theta^\# < z_I$ & $I_\theta^\# < z_I$ & $\dot{C}^\# = 0$ & $\tilde{C}_\theta^\# = 1$ THEN $C^\# = 1$	-0.5
IF $\tilde{C}_\theta^\# = 1$ & $\dot{C}^\# = 1$ & $\dot{S}^\# = 1$ & $\tilde{S}_\theta^\# = 0$ THEN $S^\# = 1$	1
IF $\tilde{S}_\theta^\# = 0$ & $\dot{S}^\# = 0$ & $\dot{C}^\# = 0$ & $\tilde{C}_\theta^\# = 1$ THEN $C^\# = 1$	-1

2.4 基于三相状态的规则

输电网很少非全相运行,本文针对高电压等级的输电网,假设正常运行时都是全相的。对于任一开关,若其中两相的状态一致,那么第三相也应该是一致的,否则第三相状态可疑。此规则只应用于有分相开关遥信的开关,对只有总位置遥信的开关则无法判断。规则如表 5 所示。

表 5 基于三相状态的规则
Table 5 Rules based on three-phase relationship

规则 (H,E)	规则强度 F(H,E)
IF $\tilde{C}_\theta^1=1 \ \& \ \tilde{C}_\theta^2=1 \ \& \ \tilde{C}_\theta^3=0$ THEN $C^3=1$	1
IF $\tilde{S}_\theta^1=1 \ \& \ \tilde{S}_\theta^2=1 \ \& \ \tilde{S}_\theta^3=0$ THEN $S^3=1$	1
IF $\tilde{G}_\theta^1=1 \ \& \ \tilde{G}_\theta^2=1 \ \& \ \tilde{G}_\theta^3=0$ THEN $G^3=1$	1
IF $\tilde{C}_\theta^1=0 \ \& \ \tilde{C}_\theta^2=0 \ \& \ \tilde{C}_\theta^3=1$ THEN $C^3=1$	-1
IF $\tilde{S}_\theta^1=0 \ \& \ \tilde{S}_\theta^2=0 \ \& \ \tilde{S}_\theta^3=1$ THEN $S^3=1$	-1
IF $\tilde{G}_\theta^1=0 \ \& \ \tilde{G}_\theta^2=0 \ \& \ \tilde{G}_\theta^3=1$ THEN $G^3=1$	-1

3 拓扑错误辨识流程

典型的变电站接线方式有 3/2 断路器、双母线、单母线、双母线带旁路等,不同接线方式的规则也会有所区别,但拓扑错误辨识的步骤是相同的。拓扑错误辨识的流程如图 2 所示。

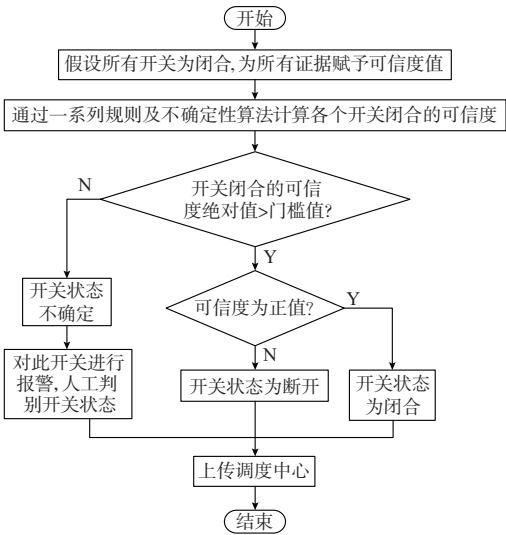


图 2 变电站拓扑错误辨识流程
Fig.2 Flow chart of substation topology error identification

具体实现步骤如下。

- 1)假设所有开关状态都为闭合,此时所有状态都还没有经过证据和规则的判断,可信度为 0。
- 2)为所有遥测量和遥信量赋予一个可信度值。
- 3)利用不确定性推理知识依次对每个开关进行不确定性计算,具体方法如下。

①如果对于某一开关,其所在支路的同一类型数据的遥测及开关遥信等数据满足某一条规则的条件,首先利用式(2)或式(3)计算证据的可信度,然后根据不确定性的传播算法(式(4))计算该条规则所得结论的可信度。

②将该可信度和该开关原来的可信度通过不确定性的合成算法(式(5))进行累加,并进入下条推理

知识。所有规则判断完毕后,得到该开关的综合可信度。然后,对下一个开关进行同样的判断。

4)将最终得到的每个开关闭合状态的可信度,与可信度门槛值进行比较。在不确定性推理中,当结论可信度为 0 时,表示无法判断结论是否正确。因此,如果开关闭合的可信度的绝对值小于门槛值,则无法判断开关闭合状态是否正确,处于不确定状态;如果可信度绝对值超过门槛值,且可信度为正时,则表示开关闭合状态可信,假设成立;如果可信度绝对值高于门槛值,且为负数时,则开关闭合状态不可信,开关的真实状态应该为断开。

5)将辨识后的正确开关状态上传到调度中心,列出采集结果和辨识结果不一致的开关,对不确定的拓扑状态进行报警,利用人工判别开关状态,上传人工辨识结果,若无人工辨识,则上传其测控装置采集的原始遥信状态并进行可疑标记。

4 问题讨论

在变电站拓扑错误辨识的实现过程中,会遇到一些实际问题,讨论如下。

1)本文提出的规则实例是 3/2 断路器接线间隔,对于其他类型的间隔,该方法同样适用,但需要对模型有所改动,如支路和支路刀闸等会存在一些差异。

2)对于不同配置的变电站,证据的可信度有所不同,要根据变电站实际情况进行初始化。有时甚至规则的可信度也会不同,如对于电压等级低的输电网可能不是处于全相运行,此时应当调低其第 4 类规则的规则强度。

3)开关闭合状态可信度的门槛值是经验值。不同的接线方式、量测冗余度,或者不同的证据可信度配置,都会影响门槛值的确定。在实际应用中,可首先利用几组试验结果,判定确定状态和不确定状态间的临界可信度,以确定门槛值。

4)基于断面的规则需要多个断面数据,相对比较复杂,在一些设施简陋的变电站可能不具备几个断面的数据,就可以跳过这部分规则。多断面的规则本文列出了一部分,还有其他可以继续深入研究的规则,可以在后续实践中对其进行补充。

5 算例分析

5.1 算例设计

采用图 1 所示的 3/2 接线变电站物理模型进行算例研究。该段间隔内共包括 3 个断路器、6 个支路刀闸、8 个接地刀闸和 3 条支路、2 条出线线路。

令所有断路器和支路刀闸三相均闭合,所有接

地刀闸三相均断开,支路上均有电流流过。对于量测配置,令测控有各条支路上的电流、有功功率、无功功率的三相数据,断路器三相位置和总位置信息,以及刀闸的总位置信息。令 PMU 有各条支路上的电流三相数据。令保护装置有各条支路上的电流三相数据和断路器的三相位置信息。上一断面的 $\dot{I}$, $\dot{C}$, $\dot{S}$ 全部为真。给定各类遥测数据的可信度为 0.6, 各类遥信数据的可信度为 0.5。

假设 CB1 的测控 A 相位置存在拓扑错误,遥信为断开,支路①上的测控电流三相量测为坏数据,均为 0。刀闸 S3 和 S4 的测控遥信错误,为断开。CB3 的测控 B 相、C 相遥信错误,为断开,支路③上保护三相电流为坏数据,均为 0。

5.2 结果分析

利用本文的变电站拓扑错误辨识方法,首先对 CB1 的可信度进行计算。

CB1 所在支路有测控的电流、有功功率、无功功率三相数据,PMU 的电流三相数据,以及保护的电流三相数据。一条规则对同类数据只判断一次,利用表 1 中的规则判断完毕后,CB1 的 A,B,C 三相开关闭合的可信度分别为 0.909,0.909,0.909。

CB1 有测控的三相遥信和保护三相遥信,利用表 2 中的规则判断完毕后,CB1 的 A,B,C 三相的开关合可信度分别为 0.909,0.977,0.977。CB1 上的数据不满足表 3 至表 5 的规则,跳过表 3 至表 5,利用 5.1 节的三相状态规则对 CB1 进行判断,得到最终 CB1 的 A,B,C 三相的开关合综合可信度分别为 0.955,0.977,0.977。故 CB1 的三相状态应该全为闭合。

对其他的开关进行拓扑错误辨识,得到的结果如表 6 所示。本算例的可信度门槛值设定为 0.7。辨识状态中 1 代表闭合,0 代表断开,−1 表示状态不确定。

表 6 拓扑错误辨识结果

Table 6 Results of topology error identification

设备	CB1			CB2		
	A	B	C	A	B	C
可信度值	0.955	0.977	0.977	0.968	0.968	0.968
辨识状态	1	1	1	1	1	1

设备	CB3			S1,S2		
	A	B	C	A	B	C
可信度值	0.8	0.6	0.6	0.984	0.992	0.992
辨识状态	1	−1	−1	1	1	1

设备	S3,S4			S5,S6		
	A	B	C	A	B	C
可信度值	0.992	0.992	0.992	0.98	0.98	0.98
辨识状态	1	1	1	1	1	1

从辨识结果可以看到,在拓扑错误和坏数据同时存在的情况下,本文方法辨识出了所有的拓扑错误。对于 CB3 的 B 相和 C 相,与之相关的证据有多个错误,利用这些证据很难判断其真实状态,因此,状态估计结果显示其状态不确定,需人工辨识。

6 结语

本文提出了基于不确定性推理的变电站拓扑错误辨识方法,利用变电站内来自测控装置、保护装置和 PMU 的多源冗余数据,建立针对变电站拓扑错误辨识规则的不精确模型,根据不确定性算法,实现了快速、准确的变电站拓扑错误辨识功能。该方法提高了开关的辨识能力,通过计算综合可信度值,有效解决了规则冲突的问题。变电站是各种数据的源头,数据实时性和同步性高,有利于拓扑错误辨识的实现。利用本文方法可在变电站内剔除拓扑错误,为调度中心状态估计提供正确的网络拓扑,从而提高状态估计结果的可靠性,为其他高级应用和电网安全稳定运行提供基础保障。

在后续的研究中,将进一步分析可信度门槛值的设定方法,以及对基于断面关系的规则进行补充。

参考文献

[1] 李青芯,孙宏斌,王晶,等.基于零阻抗支路模型的变电站三相非线性状态估计方法[J].中国电机工程学报,2011,31(25):73-80.
LI Qingxin, SUN Hongbin, WANG Jing, et al. Zero impedance branch based substation three-phase nonlinear state estimation method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 73-80.

[2] 于尔铿,王世纛,相年德,等.电力系统状态估计[M].北京:水利电力出版社,1985.

[3] SINGH N, GLAVITSCH H. Detection and identification of topological errors in online power system analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 324-331.

[4] ASSADIAN M, GODDARD R J, HONG H W, et al. Field operational experiences with online state estimator[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 50-58.

[5] 黄滔,卢建刚,张辉.广东省调提高状态估计计算精度的措施[J].电网技术,2004,28(16):78-81.
HUANG Tao, LU Jiangang, ZHANG Hui. Measures to improve state estimation calculation accuracy in Guangdong Provincial Power Dispatching Centre [J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 78-81.

[6] 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.

[7] 陈芳,韩学山,康凯.一种识别闭合开关元件信息错误的状态估计方法[J].电力系统自动化,2011,35(1):50-54.
CHEN Fang, HAN Xueshan, KANG Kai. State estimation

algorithm with identification of closed breakers information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 50-54.

[8] LOURENCO E M, COSTA A S, CLEMENTS K A. Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1206-1215.

[9] COSTA A S, LOURENCO E M, COLZANI L. Reduced anomaly zone determination for topology error processing in generalized state estimation[C]// 2007 IEEE Lausanne Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 137-142.

[10] 陈艳波,周京阳,于尔铿,等.转移潮流法拓扑错误辨识[J].电力系统自动化,2010,34(1):20-24.
CHEN Yanbo, ZHOU Jingyang, YU Erkeng, et al. Transfer power flow approach to topology error identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 20-24.

[11] SUN Hongbin, GAO Feng, STRUNZ K, et al. Analog-digital power system state estimation based on information theory: Part I-II [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(3): 1640-1655.

[12] JAKOVLJEVIC S, KEZUNOVIC M. Advanced substation data collecting and processing for state estimation enhancement [C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 25, 2002, Chicago, IL, USA: 201-206.

[13] LEE H, LEE K, LIM C. Identification of topology error in double-bus double-breaker substation[C]// 12th International Middle-East Power System Conference, March 12-15, 2008, Seoul, Korea: 24-28.

[14] 王晶,葛敏辉,孙宏斌,等.基于多源多时空规则的变电站拓扑检错[J].电网技术,2012,36(5):166-172.
WANG Jing, GE Minhui, SUN Hongbin, et al. A comprehensive rule based method for substation topology error identification[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 166-172.

[15] 张文修,梁怡.不确定性推理原理[M].西安:西安交通大学出版社,1996:114-167.

[16] 蔡自兴,徐光祐.人工智能及其应用[M].北京:清华大学出版社,2010.

张 婷(1989—),女,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: tingandbo@hotmail.com
翟明玉(1969—),男,博士,硕士研究生导师,主要研究方向:电网调度自动化技术。E-mail: zhaimingyu@sgepri.sgcc.com.cn

张海滨(1976—),男,高级工程师,主要研究方向:变电站自动化技术。E-mail: zhanghaibin@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Substation Topology Error Identification Based on Uncertainty Reasoning

ZHANG Ting^{1,2}, ZHAI Mingyu¹, ZHANG Haibin¹, QI Miaomiao¹, GONG Chengming¹, LI Lei¹
(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China;
2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: A substation topology error identification method based on uncertainty reasoning is proposed. Topology error identification rules are divided into four categories according to different data types and relationships used by each rule. An inaccurate model for each of the data in substation and topology error identification rules is developed. The integrated certainty factor value of each circuit breaker and switch is calculated by using the transfer algorithm and synthetic algorithm of uncertainty reasoning. The results are used to determine the status of each circuit breaker and switch. This substation topology error identification method has high redundancy using the three-phase multi-source data in substation and has improved the ability of identifying the switch status and solved the problem of conflicts between rules. Simulation for the multiple topology errors with multiple bad data has validated its effectiveness and high reliability.

This work is supported by Jiangsu Economic and Information Technology Commission.

Key words: state estimation; uncertainty reasoning; smart substation; topology error identification; redundant multi-source measurements