

基于增广状态估计的厂站拓扑错误辨识研究

提出了一种改进的增广状态估计模型,用以进行厂站拓扑错误辨识。该模型将厂站内的开关和刀开关的遥信约束增广为状态估计的约束条件,目标函数取为遥测残差和遥信残差的加权绝对值之和,从而把厂站拓扑错误辨识问题转化为一个线性规划问题。利用该模型在两次加权最小二乘估计之间可以快速地进行厂站拓扑错误辨识,然后再运行加权最小二乘估计,则可以提高状态估计的准确度。最后通过算例验证了所提出的方法的有效性和良好的工程应用前景。

石 光 赵 军 孔圣立 韩 伟/国网河南省电力公司电力科学研究院



石 光/高级工程师

正确的电网拓扑结构对于状态估计的运行是很重要的,拓扑错误经常导致状态估计结果不可用或者状态估计不收敛^[1]。为了提高状态估计的准确度,必须进行拓扑错误的检测和辨识。拓扑错误包括支路型拓扑错误和厂站拓扑错误^[2],支路型拓扑错误经常是由厂站拓扑错误引起的。目前辨识拓扑错误的方法主要有规则法^[3-4]、人工神经网络(ANN)法^[5-6]、残差法^[7-10]、新息图法^[11-13]、最小信息损失(MIL)法^[14-15]、转移潮流法^[16]以及基于转移潮流的状态估计模型法^[17]。规则法简单、快速,它在状态估计运行之前辨识支路型和厂站型拓扑错误,应用较为广泛,但是对于大规模电网,规则的制定比较麻烦,且在辨识厂站拓扑错误时,它具有一定的局限性。ANN法对大规模且变化频繁的网络的适应能力差,它要求有足够多的训练样本,难以用于实际系统中,而且ANN方法只能辨识支路型拓扑错误,无法辨识厂站拓扑错误。残差法本身难以区分由不良数据和拓扑错误引起的残差,且其是在状态估计运行之后辨识的,即使得到了正

确的拓扑辨识结果,也必须再次运行状态估计,才能得到电网状态正确的估计值。新息图法对于单一支路拓扑错误和单一不良相交叠的情况可以有效辨识,然而其无法有效辨识厂站拓扑错误。MIL法把拓扑错误辨识问题转化为一个混合整数规划问题,可以辨识厂站拓扑错误,但是此法的建模和求解都较为复杂。转移潮流法和基于转移潮流的状态估计模型法在加权最小二乘状态估计运行之前(WLS)运行,可以有效辨识支路型拓扑错误和多个不良数据同时发生的情况,但是它们还不能辨识厂站拓扑错误。

在辨识厂站拓扑错误时,一般先在计算模型下找出拓扑错误的支路,再深入到支路关联的厂站,采用物理模型找出具体的拓扑错误的开关和刀开关。基于此,文献[18]提出了二阶段法采用加权最小绝对值估计(WLAV)来辨识厂站拓扑错误,但是其在第一阶段结束认为得到的大的残差仅仅对应于拓扑错误的厂站,显然大的残差也可能是由不良数据引起的,而且此法无法与现有的已经被实践检验过的WLS相结合,因此在工程中无法得以应用。

本文在转移潮流法^[16]和基于转移潮流的状态估计模型法^[17]的基础上,采用所改进的增广状态估计模型来辨识厂站拓扑错误,即首先利用以上两种方法得到计算模型下的支路拓扑错误和不良数据的估计值,然后应用本文提出的增广状态估计模型来辨识厂站拓扑错误。一旦得到了正确的网络拓扑和量测数据,再

关键词/Keywords

拓扑错误辨识·
转移潮流法·
加权最小二乘估计·
加权最小绝对值估计·
状态估计·

运行WLS，则其准确度可以得到很大的提高。为了降低增广状态估计的状态变量和约束条件的数目，本文借鉴了文献[19]中提出的简化变电站模型的方法。

增广状态估计

1. 一般模型

在增广状态估计模型中，量测方程可写为

$$\mathbf{z}_g = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{M}\mathbf{f} + \boldsymbol{\delta} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{z}_g$ 为广义量测矢量，包括遥测量和遥信量； $\mathbf{x}$ 为包含电压幅值和相角的状态变量； $\mathbf{h}$ 为状态量的非线性函数； $\mathbf{M}$ 为量测—支路关联矩阵； $\mathbf{f}$ 为通过开关/刀开关的有功功率和无功功率矢量； $\boldsymbol{\delta}$ 为量测偏差矢量。

传统的状态变量和通过开关/刀开关的有功功率和无功功率矢量一起构成了新的状态变量为： $\mathbf{x}_g = [\mathbf{x}^T \mathbf{f}^T]^T$ 。运用增广状态估计进行厂站拓扑错误辨识时，应该考虑下面的三种“广义量测”量。

(1) 传统的遥测量

由下式描述

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_g) + \boldsymbol{\delta} \quad (2)$$

(2) 开关/刀开关状态约束

即若开关/刀开关支路km的遥信状态为闭合，则有 $V_k - V_m = 0$ ， $\theta_k - \theta_m = 0$ ；若是打开的，则有 $p_{km} = 0$ ， $q_{km} = 0$ 。对所有的开关和刀开关，这两种线性约束可以写为统一的形式为

$$\mathbf{A}_0 \mathbf{x}_g + \boldsymbol{\delta}_0 = 0 \quad (3)$$

式中， $\boldsymbol{\delta}_0$ 是考虑遥信误差而产生的。

(3) 结构约束

由厂站连接关系所决定。例如对于厂站内的一个零功率注入节点，有

$$\mathbf{c}(\mathbf{x}_g) = 0 \quad (4)$$

去掉下标，则增广状态估计可写为下列形式

$$\begin{aligned} & \text{Min } J(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{r} = \mathbf{z} \\ \mathbf{A}_0 \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{r}_0 = 0 \\ \mathbf{c}(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $J(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ 为残差的函数，既可以取残差的加权平方和，也可以取残差的加权绝对值之和； $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{r}_0$

分别为传统遥测和开关/刀开关遥信状态约束的残差； $\hat{\mathbf{x}}$ 为广义状态变量的估计值，包括电压幅值、相角以及通过开关/刀开关的有功功率和无功功率。

模型(5)是交流模型，容易得出其对应的有功子模型，有功子模型与直流模型是等价的。由于目标是在两次WLS之间辨识拓扑错误，因此本文利用直流模型以提高效率。

2. 状态变量和约束条件

任何一个厂站都包括母线、内部开关/刀开关、外部支路以及注入功率支路。图1给出了一个厂站示意图，当然对于具体的某个厂站，一些线路量测可能不存在。

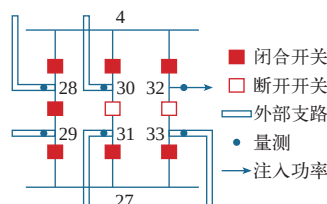


图1 某厂站示意图

若通过文献[16-17]的方法找出这个厂站内的拓扑可疑，则此时的增广状态变量为

$$\mathbf{x} = [\theta_4, \theta_{27}, \theta_{28}, \theta_{29}, \theta_{30}, \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, p_{4-28}, p_{28-29}, p_{29-27}, p_{4-30}, p_{30-31}, p_{31-27}, p_{4-32}, p_{32-33}, p_{33-27}, \mathbf{x}_e]^T \quad (6)$$

式中， $\mathbf{x}_e$ 为外部拓扑节点的相角； e 为外部网络。

此时遥测约束为

$$\begin{cases} p_{32} = -p_{4-32} + p_{32-33} + \delta_{32} \\ p_{28-e} = p_{4-28} - p_{28-29} + \delta_{28-e} \\ p_{29-e} = p_{28-29} - p_{29-27} + \delta_{29-e} \\ p_{30-e} = p_{4-30} - p_{30-31} + \delta_{30-e} \\ p_{31-e} = p_{30-31} - p_{31-27} + \delta_{31-e} \\ p_{33-e} = p_{32-33} - p_{33-27} + \delta_{33-e} \end{cases} \quad (7)$$

开关/刀开关遥信状态约束为

$$\begin{cases} \theta_4 - \theta_{28} = 0, \theta_{28} - \theta_{29} = 0, \theta_{29} - \theta_{27} = 0 \\ \theta_4 - \theta_{30} = 0, \theta_{31} - \theta_{27} = 0, \theta_{33} - \theta_{27} = 0 \\ \theta_4 - \theta_{32} = 0, p_{30-31} = 0, p_{32-33} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其他结构约束为

$$\begin{cases} p_{4-28} + p_{4-30} + p_{4-32} = 0 \\ p_{29-27} + p_{31-27} + p_{33-27} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

常规状态估计是采用计算模型的，它通过接

线分析把图1所示的厂站等效为一个计算节点；增广状态估计是采用物理模型的，它把其内的开关作为“支路”来处理，从而状态变量和约束条件都增加了很多。

厂站简化模型

上述给出了增广状态估计模型，并以一个具体的厂站为例给出了用于增广状态估计的状态变量和约束条件。由于状态变量和约束条件的数目是比较多的，从而影响了增广状态估计的效率。通过建立厂站简化模型^[19]，状态变量和约束条件的数目将大大减少。

1. 简化模型中状态变量的选取

由增广状态估计模型（5）将得到一个解，这个解满足尽可能多的约束，不满足的约束就对应于拓扑错误的开关/刀开关或者不良数据点。

任何一个厂站都可认为由 $n+1$ 个节点组成： n 个内部节点再加上一个虚拟节点代表外部网络， n 个内部节点被 s 个开关支路所连接，此外厂站还包含 n_z 个外部支路以及 n_i 个注入功率支路，假设遥信显示的闭合的开关数目为 s_c ，打开的开关数目为 s_o 个，当厂站内开关遥信都具备时，满足 $s=s_c+s_o$ 。厂站可用图来表示出来，称此图为厂站图。设厂站图的连支数目为 l ，则 $l=s+n_i+n_z-n$ 。以下通过图论来分析状态变量和约束条件。

根据基尔霍夫电压定律，任何闭合的开关约束（ $\theta_{ij}=0$ ）都可用一棵树的树支节点相角来表示，称这棵树为电压树。因此对于一个厂站，不管存在几个开关， n 个内部节点的相角都应该包含在状态变量中。

根据基尔霍夫电流定律，任何打开的开关约束（ $p_{ij}=0$ ）都可以用一棵树的连支的功率来表示，把这棵树称为功率树。注意到，外部支路的功率量测可以表示为已经包含进状态变量中的相角（ n_z 个）的函数，因此所需要的功率树的状态变量的数目可以从 $l=s+n_i+n_z-n$ 减少为 $s+n_i-n$ 个，即把这 $s+n_i-n$ 个支路当作功率树的连支（即外部支路属于电压树而不属于功率树）。

从而此时需要的状态变量的数目总共为 $s+n_i$

个，而不是 $s+n$ 个（简化前），可见采用简化模型后，状态变量的数目减少了 $n-n_i$ 个。

在以上分析中，认为 $n_i \geq 1$ ，当 $n_i=0$ 时，功率树将不与外部网络发生电气联系，这时可以增加一个虚拟的厂站零注入功率支路，则以上所有的分析结果仍然适用。

下面给出电压树和功率树的形成方法。形成了电压树和功率树，就可得到简化模型的状态变量。

电压树的形成方法如下：

- 1) 将厂站中 n_z 个外部支路作为树支。
- 2) 把尽可能多的闭合开关支路作为树支。
- 3) 完成此树。

则由电压树提供的状态变量可以表示为 $[(\theta_{tc(v)})^T, (\theta_{oth(v)})^T]^T$ 。其中， $\theta_{tc(v)}$ 为电压树中的闭合开关的相角差矢量， $\theta_{tc(v)} \in \mathbf{R}^{(n-n_z)}$ ； $\theta_{oth(v)}$ 为电压树中的对应于外部支路的节点相角矢量， $\theta_{oth(v)} \in \mathbf{R}^{n_z}$ 。

电压树提供的状态变量数目为 n 个。

功率树的形成方法如下。

- 1) 将厂站中 n_z 个外部支路作为连支。
- 2) 将一个注入功率支路作为树支，其余 n_i-1 个注入功率支路作为连支。
- 3) 包含尽可能多的打开的开关作为连支。
- 4) 完成此树。

则由功率树提供的状态变量可以表示为 $[(p_{lo(p)})^T, (p_{oth(p)})^T]^T$ 。其中， $p_{lo(p)}$ 为功率树中的打开的开关的有功矢量， $p_{lo(p)} \in \mathbf{R}^{(s-n+1)}$ ； $p_{oth(p)}$ 为功率树中的注入功率连支的有功矢量，则 $p_{oth(p)} \in \mathbf{R}^{(n_i-1)}$ 。功率树提供的状态变量数目为 $s+n_i-n$ 个。

则简化模型中的状态变量可以表示为

$$\mathbf{x}=[(\theta_{tc(v)})^T, (\theta_{oth(v)})^T, (p_{lo(p)})^T, (p_{oth(p)})^T, (\theta_e)^T]^T \quad (10)$$

为了下面分析的方便，把简化模型中的状态变量重新排序为下面的形式

$$\mathbf{x}=[(\theta_{tc(v)})^T, (p_{lo(p)})^T, (\theta_{oth(v)})^T, (p_{oth(p)})^T, (\theta_e)^T]^T \quad (11)$$

厂站对应的电压树和功率树如图2所示。

由图2的电压树， $\theta_{tc(v)}=[\theta_{28-4}, \theta_{29-27}, \theta_{32-4}]^T$ ， $\theta_{oth(v)}=[\theta_{28}, \theta_{29}, \theta_{30}, \theta_{31}, \theta_{33}]^T$ ；由功率树可得， $p_{lo(p)}=[p_{30-31}, p_{32-33}]^T$ ， $p_{oth(p)}=\emptyset$ 。

则由简化模型得到的状态变量为

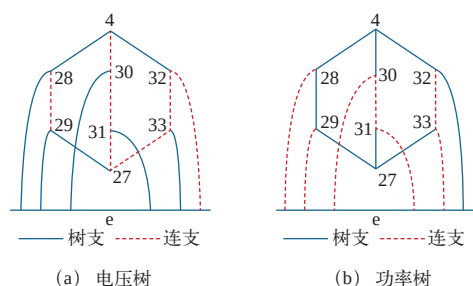


图2 厂站对应的电压树和功率树

$$\mathbf{x} = [\theta_{28-4}, \theta_{29-27}, \theta_{32-4}, p_{30-31}, p_{32-33}, \theta_{28}, \theta_{29}, \theta_{30}, \theta_{31}, \theta_{33}, \theta_e]^T \quad (12)$$

比较式(6)和式(12)可见,采用厂站简化模型后状态变量的数目减少了7个。

2. 简化模型中的约束条件

上述已经给出了增广状态估计的三类约束条件,下面来分析采用简化模型时的约束条件的具体形式。

此时,式(3)中关于开关/刀开关状态约束的线性部分可表示为下面的形式。

$$\mathbf{A}_0 \mathbf{x} = \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{tc}(v)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{lo}(p)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{-\text{tc}(v)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{-\text{lo}(p)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & * & 0 & 0 \\ 0 & * & * & * & * \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\theta}_{\text{tc}(v)} \\ \mathbf{p}_{\text{lo}(p)} \\ \boldsymbol{\theta}_{\text{oth}(v)} \\ \mathbf{p}_{\text{oth}(p)} \\ \boldsymbol{\theta}_e \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{tc}(v)}$ 为电压树中的树支闭合开关相角差约束, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{tc}(v)} \in \mathbf{R}^{(n-n_e)}$; $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{lo}(p)}$ 为功率树中的连支断开开关的有功约束, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{lo}(p)} \in \mathbf{R}^{(s-n+1)}$; $\boldsymbol{\varepsilon}_{-\text{tc}(v)}$ 为未包含进电压树树支的闭合开关相角差约束, $\boldsymbol{\varepsilon}_{-\text{tc}(v)} \in \mathbf{R}^{(s_e-n+n_e)}$; $\boldsymbol{\varepsilon}_{-\text{lo}(p)}$ 为未包含进功率树连支的断开开关的有功约束, $\boldsymbol{\varepsilon}_{-\text{lo}(p)} \in \mathbf{R}^{(s_e-s+n-1)}$; $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^s$; $\mathbf{A}_0 \in \mathbf{R}^s$; *表示对应的位置有非零元。

可见,采用简化模型时仍然包含所有的开关状态约束。

此时,厂站量测约束可以表示为下面的形式

$$\mathbf{z}_{\text{sub}} = \mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}_{\text{sub}} = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_z \\ \mathbf{z}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{pmatrix} \mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}_{\text{sub}} \quad (14)$$

式中, $\mathbf{z}_{\text{sub}}$ 为厂站的外部支路以及注入功率量测矢量; $\mathbf{z}_z$ 为厂站外部支路量测矢量; $\mathbf{z}_i$ 为厂站注入功率量测矢量; *为对应的位置有非零元; $\mathbf{x}$ 为式(11)中的状态变量; $\boldsymbol{\gamma}_{\text{sub}}$ 为厂站量测误差矢量。

当采用简化模型时,由于所有变量都是独立的,因此已经不需要式(4)描述的结构约束了。即采用简化模型时,厂站的约束条件由式(13)和式(14)给出。显然采用简化模型后,约束条件减少了。

增广状态估计的最终模型和算法

上述首先给出了增广状态估计的一般模型,然后介绍了厂站简化模型。下面给出采用厂站简化模型后的增广状态估计的模型。

模型(5)给出了增广状态估计的一般模型。采用简化模型后,厂站内约束条件为式(13)和式(14),把目标函数取为加权最小绝对值之和最小,由于厂站内由遥信报告的开关状态是有错误的,因此应该像处理遥测量一样,把开关状态约束表示为带有误差的形式,从而可以得到此时增广状态估计模型为

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i=1}^{s+m} w_i |\gamma_i| \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}_c = 0 \\ \mathbf{B}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}_{\text{sub}} = \mathbf{z}_{\text{sub}} \\ \mathbf{H}\mathbf{x} + \boldsymbol{\gamma}_e = \mathbf{z}_e \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

式中,目标函数为遥测和遥信残差的加权绝对值之和最小; $\mathbf{x}$ 为由式(11)确定的状态变量; m 为遥测的数目, s 为可疑厂站内开关的数目; $\mathbf{A}_0$ 同式(13); $\mathbf{B}, \mathbf{z}_{\text{sub}}, \boldsymbol{\gamma}_{\text{sub}}$ 同式(14)中定义相同; $\boldsymbol{\gamma}_c \in \mathbf{R}^s$ 为厂站内开关遥信误差矢量; $\mathbf{H}$ 为厂站外量测雅可比矩阵; $\boldsymbol{\gamma}_e$ 为厂站外量测误差矢量; $\mathbf{z}_e$ 为厂站外量测矢量。

模型(15)等价于求解下列线性规划问题

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{i=1}^{s+m} w_i (u_i + v_i) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \mathbf{A}_0(\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_v) + \mathbf{u}_c - \mathbf{v}_c = 0 \\ \mathbf{B}(\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_v) + \mathbf{u}_{\text{sub}} - \mathbf{v}_{\text{sub}} = \mathbf{z}_{\text{sub}} \\ \mathbf{H}(\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_v) + \mathbf{u}_e - \mathbf{v}_e = \mathbf{z}_e \\ \mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v, \mathbf{u}_c, \mathbf{v}_c, \mathbf{u}_{\text{sub}}, \mathbf{v}_{\text{sub}}, \mathbf{u}_e, \mathbf{v}_e \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $\mathbf{x}_u - \mathbf{x}_v = \mathbf{x}$ 为增广状态变量; $\mathbf{u}_c - \mathbf{v}_c = \boldsymbol{\gamma}_c$ 为厂站内开关的遥信误差矢量; $\mathbf{u}_{\text{sub}} - \mathbf{v}_{\text{sub}} = \boldsymbol{\gamma}_{\text{sub}}$ 为外部支路量测误差; $\mathbf{u}_e - \mathbf{v}_e = \boldsymbol{\gamma}_e$ 为厂站以外量测误差矢

量； z_e 为厂站以外量测矢量。
显然模型（15）是一个线性规划问题，可以用单纯形法或者内点法求解。

从而辨识厂站拓扑错误的方法为：首先利用转移潮流法^[16]或者基于转移潮流的状态估计模型方法^[17]得到计算模型下的支路拓扑错误和不良数据的估计值，然后应用模型（15）来辨识厂站拓扑错误。一旦得到了正确的网络拓扑和量测数据，再运行WLS，且可以把模型（15）得到的状态量作为WLS的初值，则其准确度和速度可以得到很大的提高。

算例分析

1. IEEE 14节点算例

以IEEE 14节点系统为例进行试验。其量测配置如图3所示，当前量测中支路1-2、2-3、2-5和7-9上有不良数据，同时支路2-4发生突然断开的支路拓扑错误，它是由厂站拓扑错误引起的。IEEE14节点系统详细的物理模型如图4所示。由于支路2-4附近的量测不齐全，规则法无法辨识这一拓扑错误。利用转移潮流法^[16]或者基于转移潮流的状态估计模型^[17]可以辨识出所有的不良数据和支路2-4已经断开，进一步利用本文提出的方法进行厂站拓扑错误辨识。通过建立厂站2和

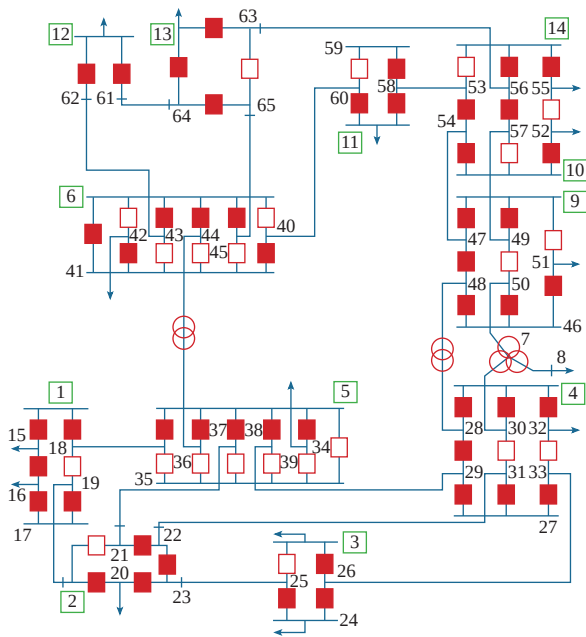


图4 IEEE 14节点系统的详细的物理模型

厂站4的电压树和功率树，可以得到增广状态估计的状态变量和约束条件，利用模型（15）最终估计出厂站2和厂站4的状态量分别如表1和表2所示。

表1 厂站2的状态量的估计值

状态量	估计值(°)	状态量	估计值(°)
θ_{20-23}	-0.425 1	θ_{21}	-0.944 0
p_{2-21}	0	θ_{22}	-1.197 5
θ_2	-2.048 4	θ_{23}	-1.197 5

表2 厂站4的状态量的估计值

状态量	估计值(°)	状态量	估计值(°)
θ_{28-4}	-0.023 1	θ_{28}	-4.475 0
θ_{29-27}	0	θ_{29}	-4.864 5
θ_{32-4}	0	θ_{30}	-4.452 0
p_{30-31}	0	θ_{31}	-1.197 5
p_{32-33}	0	θ_{33}	-5.100 4

从而可得厂站2和厂站4中各个开关状态的最终估计结果，分别如表3和4所示。

表3 厂站2内各个开关状态的估计结果

开关	相角差	通过有功功率/MW	实际状态	遥信正误
2-20	-0.425 8	60.594 7	闭合	✓
2-21	-1.104 4	0	打开	✓
20-23	-0.425 1	68.636 5	闭合	✓
21-22	0.253 5	-26.968 0	闭合	✓
22-23	0	-26.968 0	闭合	✓

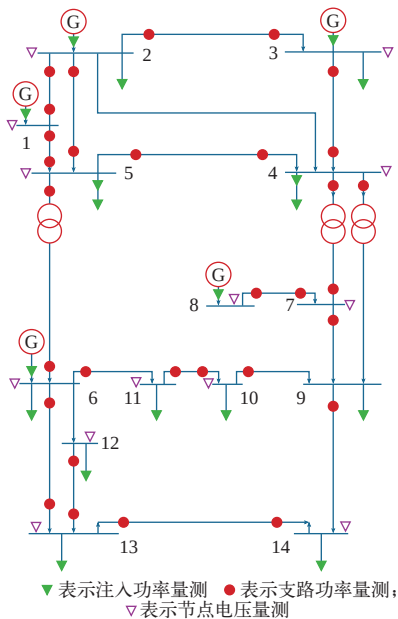


图3 IEEE 14节点系统量测配置示意图

表4 厂站4内各个开关状态的估计结果

开关	相角差	通过有功功率/MW	实际状态	遥信正误
4-28	0.023 1	-41.513 9	闭合	✓
28-29	0.389 5	-42.780 9	闭合	✓
29-27	0	8.412 5	闭合	✓
4-30	0.000 1	6.286 1	闭合	✓
30-31	-3.254 5	0	打开	✓
31-27	3.667 0	0	打开	×
4-32	0	47.8	闭合	✓
32-33	0.648 5	0	打开	✓
33-27	-0.235 9	-8.412 5	闭合	✓

由最终的辨识结果可知，开关31-27的实际状态是打开的，它的遥信是错误的。可见本文提出的增广状态估计模型可以有效地进行厂站拓扑错误辨识。

2. 实际系统算例

某省电网有339个计算节点，704条支路（双绕组变压器等效为一条支路。三绕组变压器等效为三条支路）。采用2009年5月18日11点18分29秒的SCADA断面来验证本文所提出的方法的有效性。当时英洛变电站的SCADA断面如图5所示。图5中，箭头方向表示潮流正方向，上、下两个箭头旁边的数据分别表示有功功率和无功功率遥测量。其中等效负荷2的开关和刀开关的遥信出现了错误，同时代英线的刀开关出现了错误。

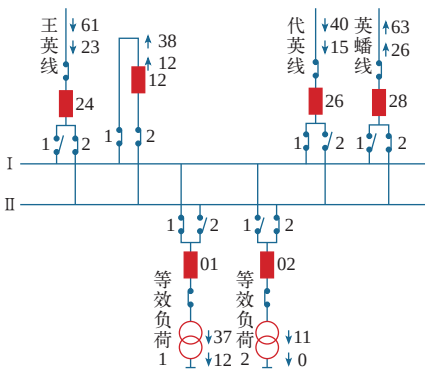


图5 英洛变电站SCADA画面

对于此问题，基于规则法的预校验没有能够辨识出拓扑错误，结果导致了状态估计的结果中这个变电站线路量测的残差均较大。采用转移潮流法可以辨识出等效负荷2上有不良数据，同时等效负荷2的线路的实际状态是断开的。接着运用本

文的增广状态估计方法来辨识此问题。由于母联功率量测数据良好，在增广状态估计中可以用到此数据。对于开关通过两个刀开关并联于两条母线时，当开关的两个刀开关的实际状态都是打开时，开关也是打开的；当开关的两个刀开关中有一个闭合时，开关也是闭合的。当单独的开关和刀开关串联时，开关和刀开关的实际状态总是一样的。因此在辨识时，可以只对刀开关的状态进行估计，对于并联的两个刀开关当作两条支路来处理，而对于串联的开关和刀开关则当作一条支路来处理。最终的辨识结果如表5所示。

表5 英洛变电站各个开关/刀开关状态的估计结果

开关/刀开关	相角差	通过有功功率/MW	实际状态	遥信正误
01-1	0.069 2	37	闭合	✓
01-2	0.129 0	0	打开	✓
02-1	不定	0	打开	✓
02-2	不定	0	打开	×
24-1	0.121 1	0	打开	✓
24-2	0.061 3	61	闭合	✓
12	0.059 8	38	闭合	✓
26-1	0.139 8	0	打开	×
26-2	0.080 0	40	闭合	×
28-1	0.059 8	0	打开	✓
28-2	0	63	闭合	✓

由表5可得，等效负荷2的开关和刀开关都是断开的，同时代英线的26-1刀开关实际上是打开的，而26-2刀开关实际上是闭合的，其余开关和刀开关的状态都是正确的。这就说明了本文提出的辨识厂站拓扑错误的方法具有良好的工程应用前景。

结束语

本文提出了一种增广状态估计模型用以厂站拓扑错误辨识，通过厂站简化模型的建立，减少了增广状态估计的状态变量和约束条件的数目。在所提出的模型中，目标函数取遥测残差和遥信残差的加权绝对值之和最小，为了提高估计的效率，采用直流模型，可以把该模型转化为一个线性规划问题。利用本文提出的方法在WLS运行之前快速地辨识出拓扑错误和有功不良数据，然后

再运行WLS, 可以提高状态估计的准确度和合格率。

参考文献

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] Ali Abur, Antonio Gomez. Power system state estimation: theory and implementation [M]. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [3] Sing N, Glavitsch H. Detection and identification of topological errors in online power system analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6 (2): 324-331.
- [4] Sing N, Oesch F. Practical experience with rule-based on-line topology error detection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (2): 841-847.
- [5] 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 Transactions on Power Systems, 1998, 13 (3): 796-803.
- [6] 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 Transactions on Power Systems, 1996, 11 (3): 1592-1599.
- [7] Felix F Wu, Wen Hsiung, Liu E. Detection of topology errors by state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4 (1): 176-183.
- [8] Alsac O, Vempati N, Stott B. Generalized state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (3): 1069-1075.
- [9] Ali Abur, Hongrae Kim. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (4): 2029-2037.
- [10] Mili L, Steeno G, Dobraca F. A robust estimation method for topology error identification [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (4): 1469-1474.
- [11] 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.
- [12] 周苏荃, 柳焯. 新息图法的智能特征 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (13): 15-19.
- [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.
- [14] 孙宏斌, 高峰, 张伯明. 最小信息损失状态估计中潮流和拓扑统一估计的通用理论 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (17): 1-4.
- [15] 孙宏斌, 高峰, 张伯明. 最小信息损失状态估计在拓扑错误辨识中的作用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (18): 1-5.
- [16] 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.
- [17] 陈艳波, 周京阳, 于尔铿, 等. 基于转移潮流的状态估计模型 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (2): 39-42.
- [18] Li Abur A, Hongrae. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (4): 2029-2037.
- [19] Antonio Gomez Exposito, Antonio de la Villa Jaen. Reduced substation model for generalized state estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16 (4): 839-846.

(收稿日期: 2015-02-10) EA