

基于集合论估计的电网状态辨识 (五)拓扑错误识别

王彬¹, 王治华², 周宁慧³, 董树锋⁴, 何光宇³

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东省广州市 510600;

2. 国网上海市电力公司电力调度控制中心, 上海市 200122;

3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 4. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 电网的拓扑模型是感知电网状态的基础, 错误的拓扑模型将导致状态辨识的结果严重偏离真实的运行状态, 因此拓扑错误的辨识非常关键。目前已有拓扑错误辨识的方法在应用于大规模系统和同时辨识不良数据和拓扑错误等方面存在不足。文中基于最少拓扑错误准则, 建立了拓扑错误识别的混合整数规划模型, 其中测量方程以线性约束和锥约束的形式给出, 并采用混合整数不等式来解耦整数变量和连续变量。该模型可高效求解, 且可有效识别支路拓扑错误和厂站拓扑错误。

关键词: 状态估计; 集合论估计; 支路拓扑错误; 厂站拓扑错误

0 引言

拓扑模型一般是指基于电气设备的物理连接关系、表征断路器和刀闸开关状态的遥信数据等信息, 通过拓扑收缩得到的节点支路模型。相应地, 拓扑错误^[1]主要包含两种类型: ①支路拓扑错误, 即支路的开断与闭合; ②厂站拓扑错误, 即同一厂站内节点的分裂与聚合。若在厂站内的节点间引入零阻抗的虚拟支路, 则厂站拓扑错误问题也可表征为针对该虚拟支路的支路拓扑错误问题。目前, 学者已提出一系列的拓扑错误辨识方法, 例如传统的规则法^[2-3]、残差法^[4-5]、人工神经网络法^[6]以及近年来涌现出的模糊聚类算法^[7]、转移潮流法^[8]、改进转移潮流法^[9]和不确定性推理法^[10]等。

如果在状态辨识模型中存在拓扑错误, 将导致状态辨识的结果严重偏离真实的运行状态, 甚至使其结果为空。因此, 在状态辨识时需首先识别出拓扑错误。如果采用系列文章第4篇^[11]中针对离群点的解决思路, 即识别出所有可能的拓扑错误, 将使得整个问题过于复杂, 具体体现为: ①求解困难, 在识别离群点过程中已经存在组合爆炸的问题, 如果再加上拓扑错误, 将使得整个问题的搜索空间呈指

数级增长, 从而使得计算量大幅增加; ②结果过于保守, 由于离群点和拓扑错误带来的结果, 局部的不相容问题既可能是离群点带来的结果, 也可能是拓扑错误带来的结果, 其两者的组合将使得解空间大幅增加, 使得最终的解集过于保守, 并失去应用价值。

为解决此问题, 应引入更多的信息来简化问题。在实际电网中, 由于开关动作并不频繁, 且操控指令可及时反应到遥测数据中, 因此拓扑错误的比例很小。基于此, 进行拓扑错误辨识时, 应找到拓扑错误数量最少(相比于由遥信数据得到的拓扑模型), 且和测量数据相一致的拓扑模型。称上述准则为最少拓扑错误的识别准则, 这是本文建立拓扑错误辨识模型的基础。文献^[12]在研究综合状态估计时提出了不良数据和拓扑错误之和最少的准则, 但其仅考虑支路型拓扑错误, 且采用非线性模型, 求解困难。

本文基于最少拓扑错误准则, 建立了拓扑错误识别的混合整数规划模型。为实现该模型的高效求解, 对其进行转化。首先, 测量方程和潮流方程采用系列文章第3篇^[13]提出的锥规划模型, 以提高分支定界过程中约束条件的求解效率; 其次, 采用混合整数不等式来解耦整数变量和连续变量, 将两者的乘积形式转化为混合整数线性形式。该模型可综合考虑支路型拓扑错误和厂站型拓扑错误, 在测量误差有界和存在离群点两种情况下均可有效识别拓扑错误。

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-01-05。

上网日期: 2016-02-18。

国家自然科学基金资助项目(51207136)。

1 统一建模

本节基于最少拓扑错误准则以及拓扑集合 $T^{[14]}$, 建立拓扑错误识别的模型。

$$T = \{\tau \mid \tau_k \in \{0, 1\}, \forall k \in \Gamma; \tau_k = \tilde{\tau}_k, \forall k \notin \Gamma\} \quad (1)$$

式中: k 为某一拓扑连接, 比如支路连接; τ_k 为连接 k 的状态, 连通时 $\tau_k = 1$, 断开时 $\tau_k = 0$; $\tilde{\tau}_k$ 为由遥信数据直接得到的初始连接状态; Γ 为可疑拓扑集合。

1.1 测量误差有界的情况

在测量误差有界的情况下, 即测量方程满足

$$\begin{aligned} Z^- &\leq h(x) \leq Z^+ \\ Z^- &= Z - e^+ \\ Z^+ &= Z - e^- \end{aligned} \quad (2)$$

式中: x 为状态变量, $h(x)$ 为量测方程; Z 为量测值向量; e^+ 和 e^- 分别为测量误差的上、下界。

为找到拓扑错误数量最少且和测量数据相一致的拓扑模型, 建立拓扑错误识别模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_{\forall k \in \Gamma} |\tau_k - \tilde{\tau}_k| \\ \text{s.t.} & Z^- \leq h_0(x) + \sum_{\forall k \in \Gamma} \tau_k h_k(x) \leq Z^+ \\ & g_0(x) + \sum_{\forall k \in \Gamma} \tau_k g_k(x) = 0 \\ & \tau_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \Gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h_0(x)$ 和 $g_0(x)$ 分别为排除所有可疑连接后测量方程和潮流方程对应的分量; $h_k(x)$ 和 $g_k(x)$ 分别为 τ_k 对应的连接 k 连通时测量方程和潮流方程对应的分量。

1.2 存在离群点的情况

在存在离群点的情况下, 即存在不满足式(2)的测点。考虑到错误的拓扑将导致测点集合中的离群点数量大为增加(与错误拓扑相关联的测点均可能成为离群点), 因此, 正确的拓扑模型中拓扑错误数量和离群点数量之和往往最少。基于此原则, 建立拓扑错误识别模型如下:

$$\begin{cases} \min \sum_{\forall k \in \Gamma} |\tau_k - \tilde{\tau}_k| + \sum_{i=1}^m \mu_i \\ \text{s.t.} & Z^- - M\mu \leq h_0(x) + \sum_{\forall k \in \Gamma} \tau_k h_k(x) \leq \\ & Z^+ + M\mu \\ & g_0(x) + \sum_{\forall k \in \Gamma} \tau_k g_k(x) = 0 \\ & \tau_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \Gamma \\ & \mu_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ_i 为表征测点 i 是否为离群点的布尔量, 即若 $\mu_i = 0$, 则测点 i 不是离群点, 反之, 若 $\mu_i = 1$, 则测

点 i 是离群点; M 为足够大的正数。

通过求解式(3)或式(4)即可求得可疑拓扑的开关状态 τ_k 。针对这两个模型, 讨论如下。

1) 式(3)和式(4)均需已知可疑拓扑集合 Γ 。如果认为所有的拓扑连接均可疑, 将使得待求变量的规模大幅增加, 尤其对于网络规模和测量数量较多的系统, 此时求解该模型的计算效率将受到严重影响。为解决此问题, 在实际应用时, 可基于系列文章第4篇^[11]所述的多层级精细化网络划分方案, 对单支路层级和单节点层级中的子系统进行测点相容性校验。若某个子系统的测点相容, 则认为该子系统不存在拓扑错误。相应地, 将测点不相容的单支路系统作为可疑支路, 将测点不相容的单节点系统作为可疑节点, 即可形成可疑拓扑集合 Γ 。

2) 式(4)的目标在于识别拓扑错误, 而非识别离群点。实际上, 式(4)得到的离群点仅为系列文章第4篇^[11]所述的某一不相容离群点集合。通过式(4)识别出拓扑错误以后, 对相应的网络拓扑进行修正, 然后再采用系列文章第4篇^[11]所述的方法来识别所有可能的离群点集合。此外, 式(4)中, 如果针对所有的测点, 均引入表征其是否为离群点的布尔变量 μ_i , 也将降低模型的求解效率。与可疑拓扑集合 Γ 类似, 可根据局部区域的测点相容性, 预先确定可疑离群点集合(特指不相容离群点), 即认为测点不相容的区域中存在离群点, 并针对该区域中的所有测点引入布尔变量即可。

3) 式(3)和(4)均为混合整数非线性规划问题, 求解比较困难, 对于较大规模的系统, 计算效率很低。具体来说, 其非线性主要体现在: ①测量方程和潮流方程的非线性, 消除此非线性最直接的方式是采用直流潮流方程, 但直流潮流模型仅可考虑有功功率测量, 将使得用于拓扑错误识别的测量冗余度大大降低, 本文将采用系列文章第3篇^[13]所提的锥优化模型, 以充分利用电压幅值、无功功率等测量; ②混合整数的乘积形式, 文献^[15]提出了基于混合整数不等式的转化方法, 本文借鉴其思想, 采用混合整数不等式来解耦整数变量和连续变量。

下面以式(3)为例, 分别针对支路拓扑错误和厂站拓扑错误, 给出拓扑错误识别模型的具体形式, 并对其中的非线性进行处理, 使之转化为易于求解的混合整数锥规划模型。由于潮流方程和测量方程可采用相同的处理方式, 因此, 为简化起见, 下文的模型均忽略潮流方程 $g(x)$, 仅对测量方程 $h(x)$ 进行描述。

2 支路拓扑错误识别模型

假设可疑的支路集合为 ℓ , 对于任意支路 $l \in \ell$,

定义表征其开断的布尔变量 α_l , 具体含义见图 1。

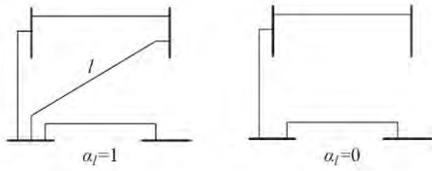


图 1 支路型拓扑错误示意图
Fig.1 Branch topology error illustration

若只考虑支路拓扑错误,且采用系列文章第 3 篇^[13]锥优化模型中定义的状态向量 $\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}$ 和相应的测量向量,则可将支路拓扑错误辨识模型转化为:

$$\begin{cases} \min \sum_{l \in \ell} |\alpha_l - \tilde{\alpha}_l| \\ \text{s.t. } \mathbf{Z}^- \leq \mathbf{h}_0(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) + \sum_{l \in \ell} \alpha_l \mathbf{h}_l(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) \leq \mathbf{Z}^+ \\ \forall l \in \ell: \begin{cases} \text{if } (\alpha_l = 1) U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2 \\ R_l \geq 0 \\ \alpha_l \in \{0, 1\} \end{cases} \\ \forall l \notin \ell: U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2 \quad R_l \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\tilde{\alpha}_l$ 为由遥信数据确定的支路 l 的开断状态; $\mathbf{h}_0(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I})$ 和 $\mathbf{h}_l(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I})$ 均为线性表达式; i 和 j 分别为支路 l 的首末端段节点; $U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2$ 为锥约束, 仅对闭合的支路有效。

式(5)中存在整数变量和连续变量的乘积形式, 以及基于条件判断的约束形式, 需对这两种形式进行转化, 以便于求解。采用混合整数不等式, 对式(5)进行转化。

首先, 定义向量 $\boldsymbol{\gamma}_l = \alpha_l \mathbf{h}_l(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I})$, 则 $\boldsymbol{\gamma}_l$ 亦可表示为:

$$\begin{cases} -\alpha_l \boldsymbol{\psi} \leq \boldsymbol{\gamma}_l \leq \alpha_l \boldsymbol{\psi} \\ (\alpha_l - 1) \boldsymbol{\psi} \leq \boldsymbol{\gamma}_l - \mathbf{h}_l(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) \leq -(\alpha_l - 1) \boldsymbol{\psi} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}$ 为由足够大正数组成的同维列向量。

式(6)中不再包含整数变量和连续变量的乘积形式。同理, 对于条件约束 $\text{if } (\alpha_l = 1) U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2, R_l \geq 0$, 可转化为:

$$\begin{cases} U_i U_j + M \geq R_l^2 + I_l^2 + \alpha_l M \\ R_l + M \geq \alpha_l M \end{cases} \quad (7)$$

此外, 在式(5)中, 若 $\alpha_l = 0$, 则与支路 l 关联的变量 R_l, I_l 将不会出现在任何约束中, 为避免求解过程中导致雅可比矩阵奇异, 此时需将变量 R_l, I_l 置为常数, 即

$$\alpha_l = 0 \Rightarrow R_l = R_{\text{ref}}, I_l = I_{\text{ref}} \quad (8)$$

式中: R_{ref} 和 I_{ref} 为给定常数。

形如式(8)的条件约束同样可转化为如下形式的混合整数不等式。

$$\begin{cases} -M\alpha_l \leq R_l - R_{\text{ref}} \leq M\alpha_l \\ -M\alpha_l \leq I_l - I_{\text{ref}} \leq M\alpha_l \end{cases} \quad (9)$$

将式(6)、式(7)和式(9)代入式(5), 可得到如下的混合整数规划模型:

$$\min \sum_{l \in \ell} |\alpha_l - \tilde{\alpha}_l| \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Z}^- \leq \mathbf{h}_0(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) + \sum_{l \in \ell} \boldsymbol{\gamma}_l \leq \mathbf{Z}^+ \quad (11)$$

$$\forall l \in \ell: \begin{cases} -\alpha_l \boldsymbol{\psi} \leq \boldsymbol{\gamma}_l \leq \alpha_l \boldsymbol{\psi} \\ (\alpha_l - 1) \boldsymbol{\psi} \leq \boldsymbol{\gamma}_l - \mathbf{h}_l(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) \leq -(\alpha_l - 1) \boldsymbol{\psi} \\ U_i U_j + M \geq R_l^2 + I_l^2 + \alpha_l M \\ R_l + M \geq \alpha_l M \\ -M\alpha_l \leq R_l - R_{\text{ref}} \leq M\alpha_l \\ -M\alpha_l \leq I_l - I_{\text{ref}} \leq M\alpha_l \\ \alpha_l \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (12)$$

$$\forall l \notin \ell: U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2 \quad R_l \geq 0 \quad (13)$$

3 厂站拓扑错误识别模型

假设存在可疑拓扑的厂站集合为 κ , 对于任意厂站 $k \in \kappa$, 其内部节点集合为 I_k , 与之相连的支路集合为 ℓ_k , 则认为对于任意支路 $l \in \ell_k$, 可能和任意节点 $i \in I_k$ 相连。针对任意支路 $l \in \ell_k$ 和任意节点 $i \in I_k$, 定义布尔变量 β_l^i , 若 $\beta_l^i = 1$, 则说明支路 l 和节点 i 相连, 见图 2。

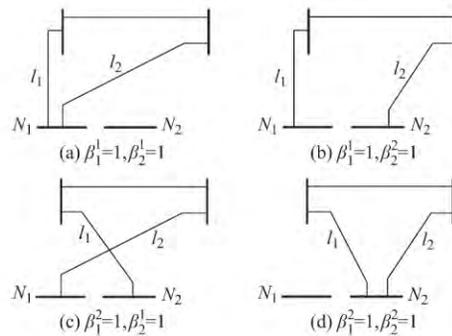


图 2 节点型拓扑错误示意图
Fig.2 Bus topology error illustration

对于节点 i , 可能不存在任何支路与其相连, 但对于支路 l , 且仅与厂站内的某一个节点相连, 因此 β_l^i 满足:

$$\sum_{i \in I_k} \beta_l^i = 1 \quad \forall l \in \ell_k \quad (14)$$

需要说明的是, 此处所述厂站和电网实际中的

发电厂、变电站并不完全对应,而仅对应于其相同电压等级且存在电气关联的一部分。厂站的节点集合 I_k 可根据母线的接线方式来确定,比如若为双母线接线方式,则 I_k 包含 2 个节点,若为双母线分段接线方式,则 I_k 可能包含 4 个节点。

若只考虑厂站拓扑错误,且采用系列文章第 3 篇^[13] 锥优化模型中定义的状态向量 $\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}$ 和相应的测量向量,则可将厂站拓扑错误辨识模型转化为:

$$\min \sum_{k \in \kappa, l \in \ell_k} |\beta_l^{O_k} - \tilde{\beta}_l^{O_k}| \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Z}^- \leq \mathbf{h}_0(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) + \sum_{k \in \kappa, i \in I_k, l \in \ell_k} \beta_l^i \mathbf{h}_l^i(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) \leq \mathbf{Z}^+ \quad (16)$$

$$\forall k \in \kappa, i \in I_k, l \in \ell_k: \begin{cases} \text{if}(\beta_l^i = 1 \& \beta_l^j = 1): U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2 \\ R_l \geq 0 \\ \sum_{i \in I_k} \beta_l^i = 1 \\ \beta_l^i \in \{0, 1\} \end{cases}$$

$$\text{其他线路: } U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2 \quad R_l \geq 0 \quad (17)$$

式中: $\mathbf{h}_l^i(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I})$ 为支路 l 与节点 i 相连时在测量方程中对应的分量; O_k 为集合 I_k 中的第一个元素。

由于任一支路与且仅与厂站内的某一个节点相连,因此目标函数中仅包含该支路和 I_k 中某一个节点对应的布尔变量即可,式(17)中选择 I_k 中的第一个节点对应的布尔变量即可,式(17)中选择 I_k 中的第一个节点对应的布尔变量 $\beta_l^{O_k}$,而 $\tilde{\beta}_l^{O_k}$ 为初始连接状态下该布尔变量的取值。同样需对式(17)中的混合整数乘积形式和条件约束进行转化。

定义变量 $v_l^i = \beta_l^i \mathbf{h}_l^i(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I})$,则 v_l^i 可用混合整数不等式表示为:

$$\begin{cases} -\beta_l^i \boldsymbol{\Psi} \leq v_l^i \leq \beta_l^i \boldsymbol{\Psi} \\ (\beta_l^i - 1) \boldsymbol{\Psi} \leq v_l^i - \mathbf{h}_l^i(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) \leq -(\beta_l^i - 1) \boldsymbol{\Psi} \end{cases} \quad (18)$$

条件约束 $\text{if}(\beta_l^i = 1 \& \beta_l^j = 1): U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2, R_l \geq 0$,可转化为

$$\begin{cases} U_i U_j + 2M \geq R_l^2 + I_l^2 + (\beta_l^i + \beta_l^j)M \\ R_l + 2M \geq (\beta_l^i + \beta_l^j)M \end{cases} \quad (19)$$

如果对于节点 i ,不存在任何支路与其相连,则与之关联的变量 U_i 将不会出现在任何约束中,为避免求解过程中导致雅可比矩阵奇异,需将变量 U_i 置为常数。定义布尔变量 λ_i ,若不存在任何支路与节点 i 相连,则 $\lambda_i = 1$,反之, $\lambda_i = 0$ 。因此需增加约束:

$$\lambda_i = 1 \Rightarrow U_i = U_{\text{ref}} \quad (20)$$

式中: U_{ref} 为给定常数。

形如式(20)的条件约束同样可转化为如下形式的混合整数不等式:

$$-M(1 - \lambda_i) \leq U_i - U_{\text{ref}} \leq M(1 - \lambda_i) \quad (21)$$

变量 λ_i 和 β_l^i 满足

$$\sum_{l \in \ell_k} \beta_l^i = 0 \Leftrightarrow \lambda_i = 1 \quad (22)$$

式(22)可进一步转化为:

$$\begin{cases} \lambda_i - (1 - \beta_l^i) \leq 0 \quad \forall l \in \ell_k \\ \sum_{l \in \ell_k} (1 - \beta_l^i) + \lambda_i \leq c(\ell_k) - 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $c(\ell_k)$ 为集合中元素的个数。

将式(18)、式(19)、式(21)和式(23)代入式(15)一式(17)中,可得到如下的混合整数锥规划模型:

$$\min \sum_{k \in \kappa, l \in \ell_k} |\beta_l^{O_k} - \tilde{\beta}_l^{O_k}| \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{Z}^- \leq \mathbf{h}_0(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) + \sum_{k \in \kappa, i \in I_k, l \in \ell_k} v_l^i \leq \mathbf{Z}^+ \quad (25)$$

$\forall k \in \kappa, i \in I_k, l \in \ell_k:$

$$\begin{cases} -\beta_l^i \boldsymbol{\Psi} \leq v_l^i \leq \beta_l^i \boldsymbol{\Psi} \\ (\beta_l^i - 1) \boldsymbol{\Psi} \leq v_l^i - \mathbf{h}_l^i(\mathbf{U}, \mathbf{R}, \mathbf{I}) \leq -(\beta_l^i - 1) \boldsymbol{\Psi} \\ U_i U_j + 2M \geq R_l^2 + I_l^2 + (\beta_l^i + \beta_l^j)M \\ R_l + 2M \geq (\beta_l^i + \beta_l^j)M \\ -M(1 - \lambda_i) \leq U_i - U_{\text{ref}} \leq M(1 - \lambda_i) \\ \lambda_i - (1 - \beta_l^i) \leq 0, \forall l \in \ell_k \\ \sum_{l \in \ell_k} (1 - \beta_l^i) + \lambda_i \leq c(\ell_k) - 1 \\ \sum_{i \in I_k} \beta_l^i = 1 \\ \beta_l^i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (26)$$

$$\text{其他线路: } U_i U_j \geq R_l^2 + I_l^2 \quad R_l \geq 0 \quad (27)$$

相比于直流潮流模型只能考虑有功功率测量,本文所提锥规划模型可考虑所有测量,从而引入了更多的信息用于拓扑错误识别。

4 算例测试

分别针对测量误差有界和存在离群点的两种情况,对本文所提拓扑错误识别方法的有效性和计算效率进行测试。测试中将节点看作厂站,若某节点发生厂站型拓扑错误,则认为该节点可能分裂为两个节点,此时在原有系统上增加一个虚拟节点,并认为与原节点相关联的支路可能与原节点和新增虚拟节点中的任一节点相连。本文使用 IBM

WebSphere ILOG CPLEX 来求解二阶锥规划问题。测试环境为个人电脑,CPU 为 Intel(R)Core(TM) i7,主频为 2.0 GHz,内存为 2.00 GB,所有算法均采用 Java 实现。

4.1 测量误差有界情况下的测试

以 IEEE 14 节点系统为例,通过在潮流结果的基础上添加幅值为 2% 的均匀分布的误差,形成测量数据。相应地,测量误差的界设定为 $[-0.02z_i, 0.02z_i]$,其中 z_i 为潮流解。在测试中,变量的参考值设置为:

$$R_{\text{ref}} = 1, I_{\text{ref}} = 0, U_{\text{ref}} = 1 \quad (28)$$

首先,针对给定测量断面进行测试。IEEE 14 节点系统的节点和支路编号见图 3。

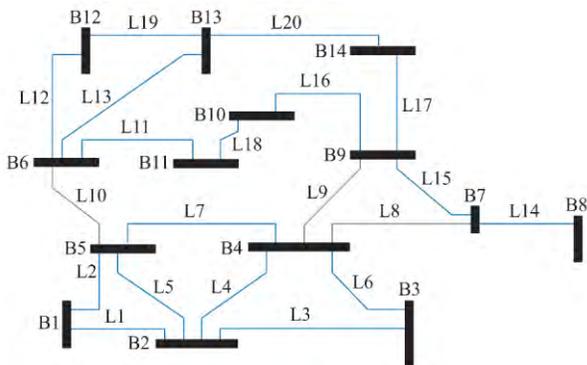


图 3 IEEE 14 节点系统节点和支路编号

Fig.3 Bus and branch numbers of IEEE 14-bus system

在给定算例中,可疑支路包括支路 1 和支路 6,相应地引入变量 α_1 和 α_6 ;可疑节点为节点 6,即该节点可能分裂为两个节点,引入虚拟节点 15,则可疑节点集 $I = \{6, 15\}$ 。与节点 6 相连的支路包括支路 10、支路 11、支路 12 和支路 13,因此引入变量 $\beta_{10}^6, \beta_{11}^6, \beta_{12}^6, \beta_{13}^6, \beta_{10}^{15}, \beta_{11}^{15}, \beta_{12}^{15}, \beta_{13}^{15}$ 。在初始状态下,认为支路 1 闭合,支路 6 断开,支路 10 和节点 15 相连,即各变量的初始值为

$$\begin{cases} \tilde{\alpha}_1 = \tilde{\beta}_{10}^{15} = \tilde{\beta}_{11}^6 = \tilde{\beta}_{12}^6 = \tilde{\beta}_{13}^6 = 1 \\ \tilde{\alpha}_6 = \tilde{\beta}_{10}^6 = \tilde{\beta}_{11}^{15} = \tilde{\beta}_{12}^{15} = \tilde{\beta}_{13}^{15} = 0 \end{cases} \quad (29)$$

求解本文所提模型,得到的结果为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha_6 = \beta_{10}^6 = \beta_{11}^6 = \beta_{12}^6 = \beta_{13}^6 = 1 \\ \beta_{10}^{15} = \beta_{11}^{15} = \beta_{12}^{15} = \beta_{13}^{15} = 0 \end{cases} \quad (30)$$

说明支路 1 和支路 6 均闭合,支路 10、支路 11、支路 12 和支路 13 均与节点 6 相连,没有支路和节点 15 相连,与正确的拓扑一致,从而说明拓扑错误被正确地识别。

其次,随机模拟多个测量断面。针对不同数量的可疑支路和可疑节点,分别模拟了 100 个两侧断面。在测试时,对于可疑支路和可疑节点,随机选择

其中的部分支路和节点,修改其初始连接状态,使其对应的连接状态发生错误。此外,对于可疑节点,引入新的虚拟节点与原节点组成可疑节点集。

表 1 给出了拓扑错误识别结果的统计,从表中可以看出,当可疑支路和可疑厂站数量从 1 增加到 4,所提模型均可正确辨识出拓扑错误,识别正确率为 100%。表 2 给出了针对不同数量可疑支路和可疑节点的算例的计算时间。随着可疑支路和可疑厂站数量的增加,计算时间有所增加,但均可在 0.1 s 级完成。

表 1 测量误差有界情况下 IEEE 14 节点系统拓扑错误识别结果统计

Table 1 Statistical results of IEEE 14-bus system topology error identification when measurement error is bounded

算例类型	可疑拓扑数量		算例数量	辨识正确率/%
	可疑支路数量	可疑厂站数量		
A	1	1	100	100
B	2	2	100	100
C	3	3	100	100
D	4	4	100	100

表 2 测量误差有界情况下 IEEE 14 节点系统拓扑错误识别计算时间统计

Table 2 Statistical computation time of IEEE 14-bus system topology error identification when measurement error is bounded

算例类型	计算时间/ms		
	平均时间	最大时间	最小时间
A	69	243	33
B	77	254	33
C	96	401	42
D	108	236	47

通过将上述过程应用于 IEEE 118 节点系统,可验证所述结论对较大系统依然有效。由于篇幅所限,此处略去 IEEE 118 节点系统的对比结果。

4.2 考虑离群点情况下的测试

与 4.1 节的测试方法类似,随机模拟 100 个测量断面。针对每个测量断面,在随机选择测量类型和测量位置的情况下设置 2 个离群点(在潮流数据基础上添加 5% 的误差)。表 3 和表 4 分别给出了拓扑错误识别的结果和计算时间的统计。

表 3 存在离群点情况下 IEEE 14 节点系统拓扑错误识别结果统计

Table 3 Statistical results of IEEE 14-bus system topology error identification when outliers exist

算例类型	可疑拓扑数量		算例数量	辨识正确率/%
	可疑支路数量	可疑厂站数量		
A	1	1	100	99
B	2	2	100	97
C	3	3	100	97
D	4	4	100	95

表 4 存在离群点情况下 IEEE 14 节点系统拓扑错误识别计算时间统计
Table 4 Statistical computation time of IEEE 14-bus system topology error identification when outliers exist

算例类型	计算时间/ms		
	平均时间	最大时间	最小时间
A	134	1 510	57
B	282	934	60
C	573	1 604	97
D	1 010	3 452	113

在四类算例中,均存在少部分算例,没有正确识别其拓扑错误,且随着可疑支路和可疑节点数量增加,识别正确率有所下降,但识别正确率均在 95% 以上。拓扑错误识别均在 1 s 级完成,相比测量误差有界情况下的拓扑错误识别,计算时间有所增加。

通过将上述过程应用于 IEEE 118 节点系统,可发现识别正确率下降至 92%,拓扑错误识别的计算时间达到了分钟级。由于篇幅所限,此处略去 IEEE 118 节点系统的具体对比结果。

在考虑离群点的情况下,存在没有正确识别拓扑错误的情况,其原因主要包括:①部分支路的潮流很小,接近于 0,若该部分支路发生拓扑错误,则无法正确辨识,实际上该部分支路的拓扑错误并不会对后续的状态辨识等产生较大影响;②部分辐射状支路或末端节点同时发生拓扑错误和测量离群点,此时从测量信息中得不到关于正确拓扑的信息,因此此处的拓扑无法正确识别。对于后者,可建立更为详细的厂站内拓扑模型,比如包含所有断路器的厂站模型,从而引入更多的测量信息,比如母联的功率测量、不同母线的电压测量等。

此外,存在离群点的情况下,拓扑错误识别的计算时间有所增加,主要原因在于模型中增加了表征测点是否为离群点的布尔变量,使得待求变量的规模变大,进而使得模型的求解时间相应增加。当网络规模较大时,可分区域进行拓扑错误识别,以降低模型的维数和求解时间。

5 结语

本篇是系列论文的最后一篇。基于最少拓扑错误的识别准则,本文建立了拓扑错误辨识的混合整数规划模型。为实现模型的高效求解,在模型中引入了线性化的测量方程和锥约束,并采用混合整数不等式来解耦整数变量和连续变量。本文所提模型可综合考虑支路拓扑错误和厂站拓扑错误,在测量误差有界情况下可精确识别拓扑错误,正确率达到 100%;存在离群点时尚有一定比例的拓扑错误不能

正确识别。

针对不能正确识别拓扑的情况,可通过建立更为详细的厂站内拓扑模型、引入更多的测量信息的方式来解决,这将是下一步研究的方向。

本系列论文是对基于集合论估计的状态辨识方法的探索和尝试。但将研究成果应用于工程实际,尚有许多工作需要开展,例如:

1)如何在状态辨识模型中引入更多的信息。引入的信息越多越准确,越有助于定位系统的真实运行状态,越有利于识别可能的离群点和拓扑错误。可引入的信息包括 PMU 测量、厂站内的多源数据、厂站内的开关拓扑模型等。

2)如何进一步提高状态辨识求解算法的计算效率。相比于求解单一估计结果,求解可行集合的状态辨识问题在计算效率方面面临更大的挑战。对求解算法进行并行化和分布式处理是进一步提高计算效率的有效途径。

下一步工作将对以上问题进行深入研究,并结合工程实际,以期实现所提方法在大规模电网中的应用,真正为电力系统闭环自动控制所用。

参考文献

- [1] ABUR A, GOMEZ EXPOSITO A. Power System State Estimation: Theory and Implementation[M]. New York: Marel Dekker, 2004.
- [2] SING N, GLAVITSCH H. Detection and identification of topological errors in online power system analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 324-331.
- [3] SING N W, OESCH F. Practical experience with rule-based on-line topology error detection [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 841-847.
- [4] WU F F, LIU W E. Detection of topology errors by state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 176-183.
- [5] ABUR A, HONGRAE K, CELIK M K. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2029-2037.
- [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 Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1592-1599.
- [7] 卢志刚,李爽.基于直接神经动态规划的电网状态估计及理论线损计算[J].电网技术,2008,32(23):50-55.
LU Zhigang, LI Shuang. Power system state estimation and theoretical line loss calculation based on direct neural dynamic programming[J]. Power System Technology, 2008, 32(23): 50-55.
- [8] 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.
- [9] 陈艳波,何光宇,周京阳,等.基于改进转移潮流法的拓扑错误辨识方法[J].电网技术,2012,36(3):95-100.
- CHEN Yanbo, HE Guangyu, ZHOU Jingyang, et al. An improved power flow transfer approach with enhanced ability to identify topology error and bad data [J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 95-100.
- [10] 张婷,翟明玉,张海滨,等.基于不确定性推理的变电站拓扑错误辨识[J].电力系统自动化,2014,38(6):49-54.DOI:10.7500/AEPS20130802005.
- ZHANG Ting, ZHAI Mingyu, ZHANG Haibin, et al. Substation topology error identification based on uncertainty reasoning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 49-54. DOI: 10.7500/AEPS20130802005.
- [11] 周宁慧,王彬,王治华,等.基于集合论估计的电网状态辨识:(四)离群点识别[J].电力系统自动化,2016,40(8):22-28.DOI:10.7500/AEPS20150529016.
- ZHOU Ninghui, WANG Bin, WANG Zhihua, et al. Power system state identification based on set theoretic estimation; Part four outlier identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 22-28. DOI: 10.7500/AEPS20150529016.
- [12] IRVING M R. Robust algorithm for generalized state estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1886-1887.
- [13] 王彬,王治华,董树锋,等.基于集合论估计的电网状态辨识:(三)基于优化模型的求解方法[J].电力系统自动化,2016,40(7):49-53.DOI:10.7500/AEPS20150529015.
- WANG Bin, WANG Zhihua, DONG Shufeng, et al. Power system state identification based on set theoretic estimation; Part three solving method based on optimization model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 49-53. DOI: 10.7500/AEPS20150529015.
- [14] 何光宇,常乃超,董树锋,等.基于集合论估计的电网状态辨识:(一)建立模型[J].电力系统自动化,2016,40(5):25-31.DOI:10.7500/AEPS20150529012.
- HE Guangyu, CHANG Naichao, DONG Shufeng, et al. Power system state identification based on set theoretic estimation; Part one modelling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 25-31. DOI: 10.7500/AEPS20150529012.
- [15] HASSAINE Y, DELOURME B, SIDORKICWICZ M, et al. Identification of the topology of the power system network via mixed integer inequalities [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, Denver, USA: 1-6.
- 王 彬(1987—),男,博士,主要研究方向:电力系统状态估计、优化分析。E-mail: sswz968@163.com
- 王治华(1977—),男,高级工程师,主要研究方向:智能电网与智能调度。E-mail: wangzh@sh.sgcc.com.cn
- 周宁慧(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统状态估计、优化分析。E-mail: nhzhou@139.com
- 何光宇(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统经济运行及优化理论在电力系统中的应用。E-mail: gyhe@sju.edu.cn

(编辑 杨松迎)

Power System State Identification Based on Set Theory Estimation Part Five Topology Error Identification

WANG Bin¹, WANG Zhihua², ZHOU Ninghui³, DONG Shufeng⁴, HE Guangyu³

- (1. Electric Power Dispatching Control Center of GPGC, Guangzhou 510600, China;
2. Shanghai Electric Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Shanghai 200122, China;
3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
4. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract : The topology model of a power grid is the basis of the perception of power grid state. An erroneous topology model will lead to serious deviation of the results of state identification from the actual state of power grid. Thus, topology error identification is of utmost importance. Existing topology error identification methods have inadequacies when applied to large-scale systems and when used to identify bad data and topology error at the same time. Based on the minimum topology error criterion, a mixed-integer programming model is formulated to identify topology error. In the model, the measurement functions are denoted as linear constraints and conic constraints. The products of binary variables and continuous variables are linearized by transforming them to mixed integer inequalities. After linearization, the model can be efficiently solved. Both the branch topology error and the substation topology error can be identified correctly.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207136).

Key words : state estimation; set theory estimation; branch topology error; substation topology error