一种新型电网拓扑错误辨识方法

马 静,张侯妤,马 伟,王增平
(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:提出一种基于道路–回路方程的拓扑错误辨识方法。利用网络拓扑约束与基尔霍夫定律,并借助相量测量单元(PMU)提供的同步电气量信息,建立道路–回路方程,计算支路电流。在此基础上,考虑各种拓扑错误及不良数据并存的情况,根据计算值与量测值间的差值,对拓扑信息及支路电流量测值进行校验。IEEE 9 与 IEEE 39 节点系统仿真结果表明所提方法具有较好的适应性、可靠性及容错能力。

关键词:道路–回路方程;拓扑错误辨识;相量测量单元;不良数据;拓扑;容错
中图分类号:TM 711.1 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006–6047.2016.01.012

0 引言

电力系统拓扑分析数据主要由开关量组成,然而在开关量采集过程中,由于设备或网络等原因,难免造成信息损坏或偏差,致使拓扑信息出现错误[1-4]。

目前,国内外学者针对电力系统拓扑错误辨识提出了诸多方法,如残差法[4-5]、规则法[6-7]、最小信息损失法[8]、信息图法[9-11]、转移潮流法[12-14]等。这些方法或将状态估计与拓扑分析相结合,在状态估计的过程中排除拓扑错误信息;或利用不良数据的特点,单独进行拓扑错误辨识,可有效辨识拓扑错误并修改不良数据。但传统方法数据来源较单一,大多仅通过数据采集与监视控制 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)系统,采用潮流来进行分析,无法保证信息来自同一时间断面[15],且计算过程较复杂。

随着智能电网的发展,同步相量测量技术及其相应的广域测量系统 WAMS(Wide-Area Measurement System)[16-18]为电力系统拓扑分析提供了新的技术手段。为此,本文借助相量测量单元 PMU(Phasor Measurement Unit)提供的同步电气量信息,提出了一种基于道路–回路方程的拓扑错误辨识方法。该方法首先利用网络的拓扑约束与基尔霍夫定律建立道路–回路方程,计算支路电流;在此基础上,考虑各种拓扑错误及不良数据并存的情况,根据计算值与量测值间的差值对拓扑信息和支路电流量测值进行校验;最后,通过 IEEE 9 与 IEEE 39 节点系统对该方法进行了仿真验证,结果表明即使存在诸多拓扑错误及不良数据,也能实现准确、可靠的网络拓扑辨识。

收稿日期:2015–05–25;修回日期:2015–09–25
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014-ZZD02);北京市科技新星支持计划(Z141101001814012);霍英东教育基金资助项目(141057)
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014ZZD02),Beijing Metropolis Nova Program(Z141101001814012) and the Fund of Fok Ying Tung Education Foundation(141057)

1 道路–回路方程

1.1 道路矩阵[19]

电网中,道路是有方向的树支,表示电流流向,故道路以树的顶点为起点,经支路流向树的根。道路矩阵 $\boldsymbol{T}$($l\times n$ 阶,l 为支路数,n 为节点数)中元素为:

$$t_{ik}=\begin{cases}1 & \text{道路到达支路 } i \text{ 时经过节点 } k\\ 0 & \text{道路到达支路 } i \text{ 时未经节点 } k\end{cases} \tag{1}$$

以图 1 所示的电网为例,选取支路 L_9 作为连支,其他支路为树支,并以母线 B_1、B_3、B_6 作为树的顶点,母线 B_2 作为树的根,道路用箭头标示。

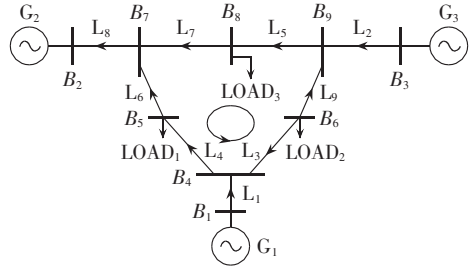


图 1 IEEE 9 节点系统道路–回路标记图
Fig.1 Road-loop mark map of IEEE 9-bus system

由式(1)可得道路矩阵如式(2)所示。其中,与连支对应的部分 $\boldsymbol{T}_L$ 为零矩阵。

$$\boldsymbol{T}=\begin{array}{c}\\ L_1\\ L_2\\ L_3\\ L_4\\ L_5\\ L_6\\ L_7\\ L_8\\ L_9\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccccccccc}B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 & B_7 & B_8 & B_9\end{array}\\ \begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&1&0&0&0\\1&0&0&1&0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0&0&1\\1&0&0&1&1&1&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0&1&1\\1&0&1&1&1&1&1&1&1\\0&0&0&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix}\end{array} \tag{2}$$

根据基本回路各树支电流与支路电流方向,列写回–支关联矩阵 $\boldsymbol{B}$($L\times l$ 阶矩阵,L 为基本回路数),

规定连支正方向为回路正方向,则 $\boldsymbol{B}$ 元素为:

$$b_{Li}=\begin{cases}1 & \text{支路 } i \text{ 在回路 } L \text{ 内,且两者方向相同}\\ -1 & \text{支路 } i \text{ 在回路 } L \text{ 内,且两者方向相反}\\ 0 & \text{支路 } i \text{ 不在回路 } L \text{ 中}\end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得,图 1 中的回-支关联矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为:

$$\boldsymbol{B}=[0\ \ 0\ \ -1\ \ -1\ \ 1\ \ -1\ \ 1\ \ 0\ \ 1] \quad (4)$$

1.2　道路-回路方程

支路电流由两部分组成:一是节点注入电流对本支路的贡献,二是回路电流对回路中支路的贡献。若节点注入电流为 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}$,连支电流为 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$,则支路电流为 $\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}$("′"代表其为计算值),其可由道路-回路方程表示为:

$$\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}} \quad (5)$$

对于节点数目较多,且接线复杂大电网的局部网络,道路-回路方程依然适用。假设节点 i 为局部网络内道路的起点,而支路 k 与支路 t 分别以节点 i 为终点和起点,则支路 t 的电流为:

$$\begin{aligned}&i_{lt}=\boldsymbol{T}_t\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}_t\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\\&[\boldsymbol{T}_k\ \ 0\ \cdots\ 0\ \ \overbrace{1}^{\text{第 } i \text{ 个元素}}\ \ 0\ \cdots\ 0]\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}_t\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\\&\boldsymbol{T}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}+i_{\mathrm{N}i}-\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}+\boldsymbol{B}_t\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\\&(i_{lk}+i_{\mathrm{N}i}-\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}})+\boldsymbol{B}_t\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}\end{aligned} \quad (6)$$

其中,$i_{\mathrm{N}i}$ 为节点 i 的注入电流;$\boldsymbol{T}_t$ 表示道路矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的第 t 行;$\boldsymbol{B}_t$ 和 $\boldsymbol{B}_k$ 分别表示回-支关联矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的第 t 行和第 k 列。

由式(6)可得,对于局部网络道路的起点 i,其等值节点注入电流 $i'_{\mathrm{N}i}$ 等于以该节点为终点的支路电流 i_{lk} 与该节点外加电流 $i_{\mathrm{N}i}$ 之和,减去支路 k 回路电流 $\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$ 的结果。根据式(6)依次算出局部网络起点的等值注入电流,与其他内部节点的注入电流即可构成局部网络的 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}$,代入式(5)可得局部网络中支路电流 $\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}$。

2　拓扑错误与不良数据对支路电流的影响

根据道路-回路方程求出支路电流后,再利用下述原则检测系统拓扑错误和不良数据。

原则 1:不存在拓扑错误与不良数据时,任一条支路电流的计算误差 $|i_{\mathrm{L}k}-i'_{\mathrm{L}k}|<\varepsilon_1$。其中,$\varepsilon_1$ 取最大支路电流绝对值的 0.3%[20],即 $\varepsilon_1=0.3\%\times|\max\{i_{\mathrm{L}k}\}|$。

原则 2:节点注入电流之和满足 KCL,即 $|\sum i_{\mathrm{B}i}|<\varepsilon_2$,$\varepsilon_2=k_{\mathrm{r}}\times n_{\mathrm{s}}\times 0.2\%\times\max\{|i_{\mathrm{B}i}|\}$。其中,$k_{\mathrm{r}}$ 为由实际测量装置的允许误差确定的可靠系数[20](本文取 1);n_{s} 为求和节点数;0.2%为 PMU 量测量的相对误差[21];$\max\{|i_{\mathrm{B}i}|\}$为求和节点注入电流最大绝对值。

原则 3:若支路电流值 $|i_{\mathrm{L}k}|>\varepsilon_3$,则判断支路为闭合,否则为断开。其中,$\varepsilon_3$ 取 40% 的支路额定电流[22],即 $\varepsilon_3=0.04I_{\mathrm{LN}}$。

根据上述原则,利用道路-回路方程进行拓扑错误辨识和不良数据的分析。在求解过程中,将电源电流和负荷电流视为节点注入电流。同时,计及支路对地导纳,并将等值 π 型支路对地导纳的电流均归算为支路末端母线的注入电流。

2.1　拓扑错误的影响分析

电力网络拓扑错误,一般分为开关状态闭合而实际断开、开关状态断开而实际闭合,以及双母接线判断错误 3 种情况。

设节点 i 为拓扑错误支路 k 的末端节点,$i_{\Delta k}$ 为该支路对地导纳电流。将 $\boldsymbol{T}$ 中节点、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}$ 中的节点电流以及支路按照距离道路根部的远近程度排序。若道路中节点 i 排在 m 个节点之后,则支路 k 排在 $m-1$ 条支路之后。

(1)开关状态闭合而实际断开。

当某条支路开关状态闭合而实际断开时,求取该支路末端节点注入电流将增大 $i_{\Delta k}$,此时道路-回路方程可表示为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}=&\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{(m-1)\times m} & \boldsymbol{T}_{m\times(n-m)}\\ \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times m} & \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}[i_{\mathrm{B}1}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}k}+i_{\Delta k}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}n}]^{\mathrm{T}}+\\&\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{(m-1)\times m} & 0\\ \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times m} & \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}+\\&\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{(m-1)\times m} & 0\\ \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times m} & \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}\left[\underbrace{0\ \cdots\ 0}^{m}\ \ i_{\Delta k}\ \ \underbrace{0\ \cdots\ 0}_{n}\right]^{\mathrm{T}}=\\&\boldsymbol{I}_{\mathrm{b}}+[0\ \ \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}]\left[\underbrace{0\ \cdots\ 0}^{m}\ \ i_{\Delta k}\ \ \underbrace{0\ \cdots\ 0}_{n}\right]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可知,支路开关状态为闭合而实际为断开的情况下,拓扑错误支路的电流小于 ε_3,且道路中该支路之后的支路电流均不满足原则 1,且电流差值与拓扑错误支路的对地导纳电流有关。

(2)开关状态断开而实际闭合。

当某支路开关状态为断开而实际为闭合时,该支路末端节点注入电流将减小 $i_{\Delta k}$,由式(8)得,拓扑支路出现错误后支路电流均不满足原则 1,且差值与拓扑错误支路电流及其对地电流有关。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}=&\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{(m-1)\times m} & 0\\ 0 & \boldsymbol{T}'_{(l+1-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}[i_{\mathrm{B}1}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}k}-i_{\Delta k}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}n}]^{\mathrm{T}}+\\&\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\left(\boldsymbol{T}-\begin{bmatrix}0 & 0\\ \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times m} & \Delta\boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}\right)\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}+\\&\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{(m-1)\times m} & 0\\ 0 & \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}\left[\underbrace{0\ \cdots\ 0}^{m}\ \ -i_{\Delta k}\ \ \underbrace{0\ \cdots\ 0}_{n}\right]^{\mathrm{T}}=\\&\boldsymbol{I}_{\mathrm{b}}-[\boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times m}\ \ \Delta\boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}]\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\\&[0\ \ \boldsymbol{T}_{(l+1-m)\times(n-m)}]\left[\underbrace{0\ \cdots\ 0}^{m}\ \ -i_{\Delta k}\ \ \underbrace{0\ \cdots\ 0}_{n}\right]^{\mathrm{T}}\end{aligned} \quad (8)$$

若闭合连支的拓扑状态为断开,矩阵 $\boldsymbol{B}$ 受影响,导致回路中支路电流不满足原则 1,该差值与连支电

流有关;此外,连支末端节点注入电流将受到影响,且道路中位于回路后的支路电流出现较小差值,仍不满足原则1,该差值与连支对地导电流有关。

(3)双母接线判断错误。

对于双母连接的厂站出线,若母线连接判断错误:设节点 i 与节点 u 之间可以进行倒闸操作,其出线为 k,且两母线间有 s 条支路。开关状态为支路 k 与节点 u 连接,而实际支路 k 与母线 i 连接,根据式(9)可知,两母线间的支路电流计算值与量测值之间均出现差值,且差值与支路 k 对地导纳电流及其所在回路电流有关。

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}=&\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{m\times m} & \boldsymbol{T}_{m\times(n-m)}\\ \boldsymbol{T}'_{s\times m} & \boldsymbol{T}'_{s\times(n-m)}\\ \boldsymbol{T}_{(l-s-m)\times m} & \boldsymbol{T}_{(l-s-m)\times(n-m)}\end{bmatrix}\\
&[i_{\mathrm{B}1}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}k}-i_{\Delta k}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}u}+i_{\Delta k}\ \cdots\ i_{\mathrm{B}n}]^{\mathrm{T}}+\\
&[\boldsymbol{B}_{L\times(m-1)}\ \boldsymbol{B}'_{L\times s}\ \boldsymbol{B}_{L\times(l+1-s-m)}]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\\
&\left(\boldsymbol{T}-\begin{bmatrix}0 & 0\\ \Delta\boldsymbol{T}_{s\times m} & \Delta\boldsymbol{T}_{s\times(n-m)}\\ 0 & 0\end{bmatrix}\right)\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\\
&\begin{bmatrix}0 & \cdots & 0\\ \vdots & \overbrace{\boldsymbol{T}_{s\times(u-k)}}^{\text{第 }m+1\text{ 行,}m+1\text{ 列起}} & \vdots\\ 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}\left[\underbrace{\overbrace{0\ \cdots\ 0}^{m}\ -i_{\Delta k}\ 0\ \cdots\ 0}_{n}\right]^{\mathrm{T}}+\\
&\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}-\left[\overbrace{0}^{m\text{ 列}}\ \Delta\boldsymbol{B}_{L\times s}\ 0\right]^{\mathrm{T}}\right)\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}=\\
&\boldsymbol{I}_{\mathrm{b}}+\begin{bmatrix}0 & \cdots & 0\\ \vdots & \boldsymbol{T}_{s\times(u-k)} & \vdots\\ 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}\left[\underbrace{\overbrace{0\ \cdots\ 0}^{m}\ -i_{\Delta k}\ 0\ \cdots\ 0}_{n}\right]^{\mathrm{T}}-\\
&\begin{bmatrix}0 & 0\\ \Delta\boldsymbol{T}_{s\times m} & \Delta\boldsymbol{T}_{s\times(n-m)}\\ 0 & 0\end{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}-[0\ \Delta\boldsymbol{B}_{L\times s}\ 0]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}
\end{aligned}\tag{9}$$

2.2 不良数据的影响分析

为了进一步提高拓扑错误辨识能力,还需有效识别不良数据,并对其进行修正。由于道路-回路方程中包含连支电流和节点电流,因此需先验证节点注入电流是否正确。首先,根据原则2,若节点注入电流出现不良数据,则节点注入电流之和大于等于 ε_2。根据式(7),出现不良数据节点的支路电流计算值与量测值之间均存在差值,差值恰好为不良数据误差且可根据原则2修正节点注入电流。

若连支电流出现不良数据,由式(10)可得,回路中的支路电流计算值与量测值之间均出现差值,差值恰好也为不良数据误差(其中,Δi 为不良数据的误差,$\boldsymbol{B}_k$ 为 $\boldsymbol{B}$ 的第 k 列)。

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}=&\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}[i_{\mathrm{L}1}\ \cdots\ i_{\mathrm{L}k}+\Delta i\ \cdots\ i_{\mathrm{L}t}]^{\mathrm{T}}=\\
&\boldsymbol{T}\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}+\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}+\boldsymbol{B}_k^{\mathrm{T}}\Delta i=\boldsymbol{I}_{\mathrm{b}}+\boldsymbol{B}_k^{\mathrm{T}}\Delta i
\end{aligned}\tag{10}$$

若树支电流出现不良数据,不影响计算值的求取,可直接利用计算值对量测值进行修改。

3 基于道路-回路方程的拓扑错误辨识方法

根据第2节中的分析,可进行开关量与电气量一致性校验:首先对拓扑信息进行错误辨识,再对不良数据进行修正。具体步骤如下。

步骤1:根据电力网络形成 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$,利用道路-回路方程求取 $\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}$,判断所有支路电流是否均满足原则1与原则3。

步骤2:若出现差值,判断是否有拓扑错误。

a. 若某连支断开,但其电流量测值大于 ε_3,且该回路中的支路电流不满足原则1,则该连支实际为闭合;若某树支断开,但其电流计算值大于 ε_3,且道路上该树支末端节点后的全部支路电流均不满足原则1,则该树支实为闭合。

b. 若支路闭合,但其计算值小于 ε_3,且系统道路中该支路后的全部支路电流不满足原则1,则该支路实为断开。

c. 若支路闭合,其计算值小于 ε_3,但将其支路对地导纳电流减去后,节点电流之和增大,该支路拓扑信息正确,支路轻载。

d. 对于可进行倒闸操作的支路,若其计算值与量测值大于 ε_3 且闭合,但两母线间的支路电流不满足原则1,则该支路母线连接判断错误。

根据上述方法检测支路拓扑,出现错误进行修改,更新 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{N}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$,计算 $\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}$,再次判断是否存在拓扑错误。

步骤3:无拓扑错误或拓扑错误已修正后,判断是否存在不良数据。

a. 求取系统节点注入电流之和,若不满足原则2,且系统道路中某一电源或负荷节点后的支路电流均不满足原则1,则该节点注入电流出现不良数据,根据原则2或根据差值进行修正。

b. 若某一回路中的支路电流不满足原则1,则该回路连支电流出现不良数据,根据差值对连支电流进行修正。

c. 个别树支电流不满足原则1,即可用计算出的树支电流对量测值进行修正。

对不良数据修正后,继续计算 $\boldsymbol{I}'_{\mathrm{b}}$,直至所有支路电流满足原则1。

步骤4:拓扑错误辨识与不良数据修正完成。

4 算例分析

4.1 IEEE 9节点系统

基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建了图1所示的IEEE 9节点系统模型,并假设母线 B_2 与 B_7 可以倒闸操作。其中,系统电源100 MV·A、220 kV,支路

对地导纳均为 1.623×10^{-4} S,则 $I_{LN}=0.223+j0.138$ kA,$\varepsilon_3=0.00893+j0.00556$ kA。节点注入电流如式(11)所示,回路电流为 $i_{L9}=-0.43628+j0.216385$ kA,依式(5)可得各支路电流计算结果如表 1 所示。

$$\boldsymbol{I}_N=\begin{bmatrix}0.79557\\0.82650\\0.79387\\0.05474\\-0.84991\\-0.87182\\0.04408\\-0.84595\\0.05471\end{bmatrix}+j\begin{bmatrix}0.455630\\0.451280\\0.457780\\-0.013094\\-0.442770\\-0.434290\\-0.017930\\-0.443160\\-0.013036\end{bmatrix}(\text{kA}) \qquad (11)$$

表 1 IEEE 9 节点系统中支路电流

Table 1 Branch currents of IEEE 9-bus system

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
L_1	0.7956	0.4556	0.7955	0.4556	0	0
L_2	0.7939	0.4578	0.7939	0.4578	0	0
L_3	−0.4363	−0.2164	−0.4355	−0.2179	0.000760	0.0015
L_4	0.4145	0.2261	0.4148	0.2246	0.000260	0.0014
L_5	0.4138	0.2269	0.4123	0.2284	0.001500	0.0015
L_6	−0.4352	−0.2167	−0.4351	−0.2181	0.000096	0.0014
L_7	−0.4359	−0.2164	−0.4337	−0.2148	0.002300	0.0016
L_8	−0.8261	−0.4507	−0.8247	−0.4509	0.001400	0.0013
L_9	−0.4363	−0.2164	−0.4363	−0.2164	0	0

由表 1 可以看出,系统各支路电流均满足原则 1,即不存在拓扑信息错误和不良数据。

(1)开关闭合而实际断开的情况。

以图 1 所示系统中支路 L_6 为例,假设支路两端的断路器均闭合,但 L_6 实际处于断线状态。当系统中支路均闭合时,其 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$ 矩阵分别如式(2)、(4)所示,节点注入电流如式(12)所示。

$$\boldsymbol{I}_N=\begin{bmatrix}0.93109\\0.56411\\0.76264\\0.05181\\-0.65728\\-0.83773\\0.04707\\-0.89700\\0.05501\end{bmatrix}+j\begin{bmatrix}0.43963\\0.33174\\0.44141\\-0.01239\\-0.21800\\-0.42081\\-0.01549\\-0.54075\\-0.01254\end{bmatrix}(\text{kA}) \qquad (12)$$

依据式(5),各支路电流计算结果如表 2 所示。ε_1 和 ε_2 分别取值为 $\varepsilon_1=(2.793+j1.324)\times10^{-3}$ kA,$\varepsilon_2=(1.676+j0.9734)\times10^{-2}$ kA。由表 2 可知,支路 L_6 的量测值与计算值均小于 ε_3,且其末端节点后支路电流不满足原则 1,因此判断支路 L_6 实为断开。

修改支路 L_6 的拓扑信息后,系统道路如图 2 所示,根据式(1)、(3)形成矩阵 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$,节点注入电流为

表 2 支路均闭合情况下各支路电流

Table 2 Branch currents when all branches are closed

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
L_1	0.9311	0.43963	0.9311	0.43960	0.000012	0.000031
L_2	0.7626	0.44140	0.7626	0.44140	0.000040	0.000011
L_3	−0.3262	−0.20910	−0.3243	−0.20830	0.001850	0.000780
L_4	0.6571	0.21810	0.6586	0.21890	0.001500	0.000830
L_5	0.3065	0.21700	0.3042	0.21640	0.002300	0.000640
L_6	0	0	0.0013	0.00092	0.001300	0.000920
L_7	−0.5903	−0.32380	−0.5928	−0.32440	0.002500	0.000630
L_8	−0.5644	−0.33170	−0.5444	−0.33890	0.019980	0.007180
L_9	−0.5134	−0.21250	−0.5134	−0.21250	0.000020	0

式(13),各支路电流计算结果如表 3 所示。分析表 3 可知,拓扑信息与量测量均正确。

$$\boldsymbol{I}_N=\begin{bmatrix}0.93109\\0.56411\\0.76264\\0.04891\\-0.67487\\-0.81724\\0.02574\\-0.89700\\0.05501\end{bmatrix}+j\begin{bmatrix}0.4396300\\0.3317400\\0.4414100\\-0.0121900\\-0.2096900\\-0.4293300\\-0.0007883\\-0.5407500\\-0.0125400\end{bmatrix}(\text{kA}) \qquad (13)$$

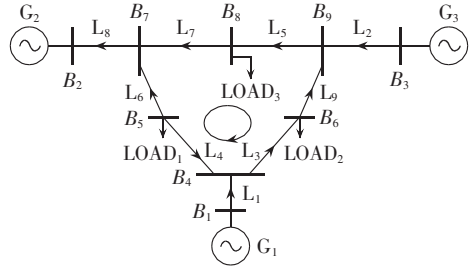


图 2 L_6 断开后系统道路–回路标记图

Fig.2 Road-loop mark map with L_6 opened

表 3 L_6 断开后各支路电流

Table 3 Branch currents when L_6 is opened

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
L_1	0.9311	0.43963	0.9311	0.43963	0	0
L_2	0.7626	0.44140	0.7626	0.44140	0	0
L_3	−0.3262	−0.20910	0.3051	0.21780	0.000380	0.000093
L_4	−0.6749	−0.20970	−0.6749	−0.20970	0.000005	0.000005
L_5	0.3065	0.21700	0.3055	0.21730	0.000960	0.000250
L_6	0	0	0	0	0	0
L_7	−0.5903	−0.32380	−0.5915	−0.32350	0.001100	0.000320
L_8	−0.5644	−0.33170	−0.5657	−0.33130	0.001300	0.000380
L_9	−0.5134	−0.21250	−0.5121	−0.21160	0.001300	0.000920

(2)双母线接线判断错误情况。

若系统拓扑结构如图 3 所示,根据定义形成矩阵 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$,节点注入电流为式(14),各支路电流计算结果如表 4 所示。

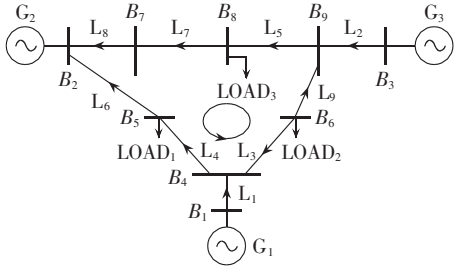


图3 L_6 与 B_2 相连后道路–回路标记图

Fig.3 Road-loop mark map with L_6 and B_2 connected

$$\boldsymbol{I}_N=\begin{bmatrix}0.79557\\0.84854\\0.79387\\0.05474\\-0.84991\\-0.87182\\0.02204\\-0.84595\\0.05471\end{bmatrix}+\mathrm{j}\begin{bmatrix}0.455630\\0.442320\\0.457780\\-0.013094\\-0.442770\\-0.434290\\-0.008962\\-0.443160\\-0.013036\end{bmatrix}(\mathrm{kA}) \quad (14)$$

表4 L_6 与 B_2 相连后计算结果

Table 4 Calculative results when L_6 and B_2 are connected

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
L_1	0.7956	0.4556	0.7956	0.4556	0.000030	0.00003
L_2	0.7939	0.4578	0.7939	0.4578	0.000030	0.00002
L_3	−0.4363	−0.2164	−0.4355	−0.2179	0.000790	0.00150
L_4	0.4145	0.2260	0.4148	0.2246	0.000280	0.00140
L_5	0.4138	0.2268	0.4123	0.2284	0.001536	0.00160
L_6	−0.4352	−0.2167	−0.4351	−0.2181	0.000130	0.00140
L_7	−0.4360	−0.2164	−0.4372	−0.2148	0.001300	0.00160
L_8	−0.8261	−0.4507	−0.4349	−0.2159	0.391200	0.23480
L_9	−0.4363	−0.2164	−0.4363	−0.2164	0	0

分析表4可知，支路 L_6 符合原则3，但 L_6 之后可进行倒闸操作的两母线 B_2 和 B_7 间的支路 L_8 电流不符合原则1，其差值与支路 L_6 所在回路以及该线路对地导纳电流差接近，判断 L_6 母线连接拓扑信息错误。修改拓扑信息，更新后的矩阵 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$ 以及节点注入电流如式(2)、(4)、(11)所示，各支路电流计算结果如表1所示，可知拓扑信息与量测值均正确。

4.2 IEEE 39节点系统

基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建IEEE 39节点系统进一步验证本方法的正确性和有效性。系统结构与道路标记如图4所示，其中“▲”箭头标记为连支，其余支路为树支。取支路的最小额定值为 0.2693+j0.1617 kA，则 ε_3=0.01077+j0.00647 kA。

对于节点数目较多、接线复杂的网络，可进行局部拓扑错误辨识，本文仅以图4所标记的2个局部网络(区域1和区域2)为例。

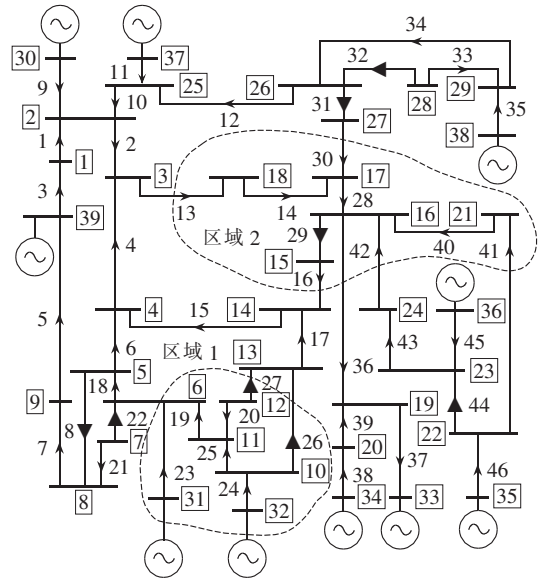


图4 IEEE 39节点系统道路–回路标记图

Fig.4 Road-loop mark map of IEEE 39-bus system

(1)多处不良数据存在的情况。

以节点 6 为终点的局部网络(区域1)如图5所示。根据式(1)、(3)形成矩阵 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$，并根据式(6)分析，节点注入电流可用节点其余支路电流之和与该节点注入电流等值(如在回路中，除去其所在回路电流影响)，则该局部网络等值节点注入电流如式(15)所示，且连支电流 i_{26}=0.6675+j0.9609 kA，i_{27}=−(0.2943+j0.2441) kA，各支路电流计算结果如表5所示。

$$\boldsymbol{I}_N=\begin{matrix}6\\10\\11\\12\\31\\32\end{matrix}\begin{bmatrix}0.070275\\0\\0.038359\\-0.330690\\2.150670\\1.953600\end{bmatrix}+\mathrm{j}\begin{bmatrix}-0.010483\\0\\-0.004950\\-0.258280\\3.217290\\3.517940\end{bmatrix}(\mathrm{kA}) \quad (15)$$

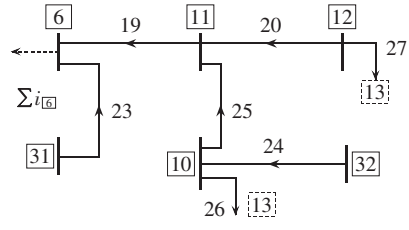


图5 以节点 6 为终点的局部网络道路–回路标记图

Fig.5 Partial road-loop mark map with Bus 6 as end

根据式(15)与表5，ε_1 和 ε_2 分别取值为 ε_1=(6.452+j9.652)×10^{-3} kA、ε_2=(4.3+j6.4)×10^{-2} kA，节点 6 总的输出电流 $\sum i_{\boxed{6}}$=2.5127+j4.5255 kA，全部支路电流均满足原则3，无拓扑错误。

同时，根据局部网络KCL，$\sum i_{\boxed{6}}+i_{26}+i_{27}$ 与节点注入电流之和的绝对差值大于 ε_2，支路19、20、25电流均不满足原则1。其中，节点 10 既不是负荷节点，也

表 5　图 5 网络计算结果

Table 5　Calculative results of fig.5

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
19	0.2900	1.3187	1.2881	2.5379	0.998 200 00	1.219 200 00
20	−0.3671	−0.2724	−0.0364	−0.0142	0.330 700 00	0.258 300 00
23	2.1507	3.2173	2.1507	3.2173	0.000 000 48	0.000 000 38
24	1.9536	3.5179	1.9536	3.5180	0	0
25	0.6187	1.5961	1.2861	2.5570	0.667 500 00	0.960 900 00
26	0.6675	0.9609	0.6675	0.9609	0	0

不是电源节点,则判断节点 12 注入电流出现差值。考虑连支电流也可能有错误,不能直接用 KCL 修正节点注入电流。比较造成各线路电流差值的因素,可得支路 19 差值减去支路 25 差值,即为节点 12 注入电流的误差值,运用该差值对注入电流进行修正得 $i_{12}=-(0.6614+j0.5166)$ kA,各支路电流计算结果如表 6 所示。

表 6　节点 12 注入电流不良数据修正后计算结果

Table 6　Calculative results after bad current data of Bus 12 are corrected

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
19	0.2900	1.3187	1.2881	2.5379	0.998 200 00	1.219 200 00
20	−0.3671	−0.2724	−0.0364	−0.0142	0.330 700 00	0.258 300 00
23	2.1507	3.2173	2.1507	3.2173	0.000 000 48	0.000 000 38
24	1.9536	3.5179	1.9536	3.5180	0	0
25	0.6187	1.5961	1.2861	2.5570	0.667 500 00	0.960 900 00
26	0.6675	0.9609	0.6675	0.9609	0	0
27	−0.2943	−0.2441	−0.2943	−0.2441	0.000 003 70	0.000 001 80

由表 6 可以看出,与连支 26 相关的树支电流均不满足原则 1,且局部网络节点注入电流仍不满足原则 2,但两者差值相等。初步判断支路 26 电流错误,运用支路 19 的电流差值对其修正得 $i_{26}=1.334\,95+j1.92\,183$ kA。然后,运用修正后的量测值进行计算,结果如表 7 所示,电气量均满足原则 1—3,无拓扑错误与不良数据。

表 7　支路 26 电流不良数据修正后计算结果

Table 7　Calculative results after bad current data of Bus 26 are corrected

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
19	0.2900	1.3187	0.290 00	1.3187	0	0
20	−0.3671	−0.2724	−0.367 10	−0.2725	0.000 003 70	0.000 038 00
23	2.1507	3.2173	2.150 67	3.2173	0.000 000 48	0.000 000 38
24	1.9536	3.5179	1.953 60	3.5179	0	0
25	0.6187	1.5961	0.618 70	1.5961	0.000 004 30	0.000 003 20
26	1.3349	1.9218	1.334 90	1.9218	0	0
27	−0.2943	−0.2441	−0.294 30	−0.2441	0.000 003 70	0.000 001 80

对于疑似不良数据,可通过扩大区域范围,加入受不良数据影响的支路,进一步提高拓扑错误辨识与不良数据修正的准确性。

(2)开关状态断开而实际闭合的情况。

图 6 为 IEEE 39 节点系统中局部网络(区域 2)。图中,支路 29 断开。根据定义形成矩阵 $\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{B}$ 且该局部网络节点注入电流如式(16)所示,各支路电流计算结果如表 8 所示。

$$\boldsymbol{I}_N=\begin{matrix}15\\16\\17\\18\\21\end{matrix}\begin{bmatrix}-2.00428\\0.62621\\-0.41452\\0.58427\\0.80161\end{bmatrix}+\mathrm{j}\begin{bmatrix}-1.72399\\-0.16704\\-1.67187\\1.02429\\1.98273\end{bmatrix}(\mathrm{kA}) \tag{16}$$

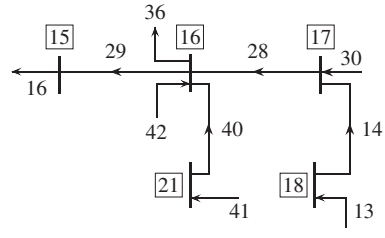


图 6　IEEE 39 节点系统中局部网络道路–回路标记图

Fig.6　Partial road-loop mark map of IEEE 39-bus system

表 8　图 6 网络计算结果

Table 8　Calculative results of fig.6

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
14	−0.7907	−0.3045	−2.3882	−1.4724	1.597 500 00	1.167 890 0
28	0.1698	−0.6476	−1.4278	−1.8155	1.597 500 00	1.167 840 0
29	1.5975	1.1679	0	0	1.597 500 00	1.167 890 0
40	0.8421	1.3808	0.8421	1.3808	0.000 000 95	0.000 001 2

根据图 6 可知节点 15 为道路起点,与本区域其他节点无关,需要单独进行 KCL 校验。该区域 $\varepsilon_1=(7.988+j6.904)\times10^{-3}$ kA;对于节点 15,$\varepsilon_2=(4.01+j3.45)\times10^{-3}$ kA,其余节点求和阈值 $\varepsilon_2=(0.64+j1.59)\times10^{-2}$ kA。分析表 8,可知连支 29 的量测值大于 ε_3,与拓扑信息不符,且该回路中的支路电流均不满足原则 1,因此,判断支路 29 拓扑错误。将矩阵 $\boldsymbol{B}$ 修改后,各支路电流计算结果如表 9 所示。

表 9　支路 29 电流不良数据修正后计算结果

Table 9　Calculative results after bad current data of Bus 29 are corrected

kA

支路	量测值		计算值		差值	
	实部	虚部	实部	虚部	实部	虚部
14	−0.7907	−0.3045	−2.3882	−1.4724	1.597 500 00	1.167 890 0
28	0.1698	−0.6476	−1.4278	−1.8155	1.597 500 00	1.167 840 0
29	1.5975	1.1679	0	0	1.597 500 00	1.167 890 0
40	0.8421	1.3808	0.8421	1.3808	0.000 000 95	0.000 001 2

从表 9 可以看出,其支路电流符合原则 1、3,且该局部网络节点注入电流符合原则 2。此时,该局部网络中不存在拓扑错误和不良数据。

5 结论

本文提出一种基于道路-回路方程的拓扑错误辨识方法。该方法利用网络拓扑约束和基尔霍夫定律,借助PMU提供的同步电气量信息,建立道路-回路方程,计算支路电流。在考虑多种拓扑错误及不良数据的情况下,根据计算值与量测值间的差值对拓扑信息及支路电流量测值进行校验。基于IEEE 9和IEEE 39节点系统的仿真结果均表明,该方法不受拓扑错误与不良数据双重因素的影响,辨识结果的准确性及可靠性高。

参考文献:

[1] CLEMENT S K A,COSTA A S. Topology error identification using lagrange multipliers[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13(2):347-353.

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

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

[4] 赵俊博,张葛祥,黄彦全. 含新能源电力系统状态估计研究现状和展望[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):7-20,34.
ZHAO Junbo,ZHANG Gexiang,HUANG Yanquan. Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(5):7-20,34.

[5] 张伯明,王世缨,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 Shiying,XIANG Niande. Anomaly processing in power system dynamic state estimation[J]. Proceedings of the CSEE,1993,13(3):52-58.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(18):1-5
SUN Hongbin,GAO Feng,ZHANG Boming. Application of minimum information loss based state estimation to topology error identification[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):1-5.

[9] 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 totopology error identification[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(4):23-27.

[10] 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.

[11] 周苏荃,李昌,柳焯. 利用回路新息相角差代数和识别拓扑结构变化[J]. 电力自动化设备,2002,22(6):26-28.
ZHOU Suquan,LI Chang,LIU Zhuo. Indentification of topology change by algebraic sum of innovation angle differences in a loop[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(6):26-28.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 苏慧玲,李扬. 基于准稳态功率转移分布因子的电力系统复杂网络特性分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):47-53.
SU Huiling,LI Yang. Analysis of complex network characteristics based on quasi-steady PTDF for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):47-53.

[15] 薛辉,贾清泉,王宁,等. 基于PMU量测数据和SCADA数据融合的电力系统状态估计方法[J]. 电网技术,2008,32(14):44-49.
XUE Hui,JIA Qingquan,WANG Ning,et al. A novel power system state estimation method based on merging PMU-measured data into SCADA data[J]. Power System Technology,2008,32(14):44-49.

[16] 肖晋宇,谢小荣,李建,等. 电网广域动态安全监测系统及其动态模拟试验[J]. 电网技术,2004,28(6):5-9.
XIAO Jinyu,XIE Xiaorong,LI Jian,et al. Wide-area dynamic security monitoring system for power network and its dynamic simulation[J]. Power System Technology,2004,28(6):5-9.

[17] 蔡运清,汪磊,MORISO K,等. 广域保护(稳控)技术的现状及展望[J]. 电网技术,2004,28(8):20-25.
CAI J Y,WANG Lei,MORISO K,et al. Current status and prospect of wide-area protection(dynamic stability control) technologies[J]. Power System Technology,2004,28(8):20-25.

[18] PHADKE A G,THORP J S,KARIMI K J,et al. State estimation with phasor measurements[C]//Power Industry Computer Application Conference PICA 85. San Fransisco,USA:[s.n.],1985:233-241.

[19] 张伯明,陈寿孙,严正,等. 高等电力系统分析[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2007.

[20] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社,1985:85-89.

[21] 熊小伏,刘晓放. 基于WAMS的继电保护静态特性监视及其隐藏故障诊断[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):6-10.
XIONG Xiaofu,LIU Xiaofang. Monitoring of static characteristics and diagnosis of hidden failures in protection system based on WAMS[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):6-10.

[22] 陈建国,徐长宝,高吉普,等. 数字化变压器保护电子式互感器的应用与研究[J]. 南方电网技术,2012,6(5):105-109.

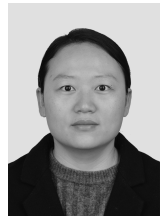
(下转第96页 continued on page 96)

[19] 刘东霞. 基于随机子空间法的梁桥模态参数辨识[D]. 成都:西南交通大学,2008.
LIU Dongxia. Modal parameter identification of girded bridge based on stochastic subspace agorithm[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2008.

作者简介:

高 洁(1985—),女,湖北随州人,博士研究生,研究方向为电力系统稳定分析以及信号处理在电力系统中的应用(**E-mail**:406623439@qq.com);

李群湛(1957—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为牵引供电理论、电能质量控制等;


高 洁

汪 佳(1985—),男,山西侯马人,工程师,硕士,主要从事电能计量及用电信息采集研究;

王 燕(1985—),女,重庆人,博士研究生,主要研究方向为电能质量分析、图像信号处理与分析;

周 阳(1987—),男,四川泸州人,博士研究生,研究方向为电能质量分析、供变电技术。

Comparison of low-frequency oscillation identification between NExT-ERA and SSI-DATA ambient excitation methods

GAO Jie[1],LI Qunzhan[1],WANG Jia[2],WANG Yan[1],ZHOU Yang[1]
(1. School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China;
2. Sichuan Electric Power Company & Measuring Center,Chengdu 610045,China)

Abstract: Along with the application of wide-area measurement system,it is of good application prospect to apply the noise-like signals measured by the phasor measurement units under ambient excitation to online identify the modes of low-frequency oscillation. The performances of low-frequency oscillation identification based on NExT-ERA and SSI-DATA ambient excitation methods are assessed. The basic principles of two corresponding algorithms are briefly reviewed,different assessment criteria are set according to their key parameters and simulation conditions,their performances are compared based on the simulative results of modal parameter identification,and their merits and applicability are summarized.

Key words: low-frequency oscillation; ambient excitation; online modal identification; NExT; ERA; SSI-DATA

(上接第88页 continued from page 88)

CHEN Jianguo,XU Changbao,GAO Jipu,et al. Application and research of the electronic transformer for the digital transformer protection[J]. Southern Power System Technology,2012,6(5):105-109.

作者简介:

马 静(1981—),男,山西阳泉人,副教授,博士后,研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:hdmajing@aliyun.com);

张俣妤(1988—),女,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统广域继电保护(**E-mail**:yutou1221@163.com);

马 静

马 伟(1989—),男,陕西渭南人,硕士研究生,研究方向为电力系统广域继电保护(**E-mail**:jnyz-mawei@163.com);

王增平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究(**E-mail**:wangzp1103@aliyun.com)。

Topology error identification of power grid

MA Jing,ZHANG Yuyu,MA Wei,WANG Zengping
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: A method of topology error identification based on the road-loop equation is proposed,which uses the constraints of network topology and Kirchhoff laws to establish the road-loop equation and calculate the branch current according to the synchronous electrical measurements provided by PMU (Phasor Measurement Unit). With the consideration of various topological errors and bad data,the topological information and the branch current measurements are verified according to the difference between derived and measured values. The simulative results of IEEE 9-bus system and IEEE 39-bus system show that,the proposed method has good adaptability,reliability and fault-tolerance capability.

Key words: road-loop equation; topology error identification; PMU; bad data; topology; fault tolerance