基于多点PMU电压推算的广域后备保护故障线路识别算法

为了在有限PMU下实现快速准确地识别故障线路，研究了一种利用多点电压推算的广域后备保护故障判别算法。采用母线间隔配置PMU策略，以未布置PMU节点为中心，从多个相邻PMU节点向中心节点分别进行正序、负序和零序电压的推算，得到中心节点的各序多个推算电压值及其差异值。建立故障线路的各序故障识别判据。选取差异值最大值对应的序分量来判断故障线路。基于电压推算值，求解故障点位置，辅助区分单一故障或相邻线路复故障。该方法的原理简单，计算量小，通信量较小，不受故障类型、故障点位置及过渡电阻的影响。IEEE 14节点系统的多组算例验证了该方法的有效性。

王洪彬[1] 王睿晗[2] 童晓阳[2] 黄 飞[1] 连文超[2]/1.国网重庆市电力公司电力科学研究院 2.西南交通大学电气工程学院

王洪彬/工程师

关键词/Keywords
广域后备保护·
序电压·
电压推算·
故障点位置·
故障识别·

0 引言

随着电网结构和规模日益扩大，传统后备保护的整定复杂、动作时延长，灵敏性和可靠性难以兼顾，潮流转移时易引发连锁事故，不能适应电网的安全运行要求。近几年，随着同步测量系统（Wide-Area Measurement System，WAMS）的快速发展[1-3]，基于PMU（Phasor Measurement Unit）的广域后备保护算法引发了国内外学者的兴趣，取得了许多研究成果[4-8]。文献[4]研究从线路一侧电压电流推算另一侧电压，根据推算值与实测值之比大于阈值判断故障线路，但其要求全网配置PMU。文献[5]研究一种基于线路保护相关矩阵的广域后备保护算法。文献[6]研究了基于相对保护熵与名义过渡电阻的电网故障在线检测方法，采用一条线路两侧电压电流计算名义过渡电阻。文献[7]研究了一种基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法，在不对称故障发生时，根据获得的关联域内负序功率方向和动作策略，可快速确定故障位置并切除故障。

但已有的故障识别算法大多要求每条线路两端布置有PMU，这在经济上不太可能。需要研究有限PMU布局下的广域后备保护算法，虽然有文献研究利用有限PMU的广域后备保护算法[8]，但是其主要针对单一故障检测，目前对相邻线路复故障检测的文献并不多见。因此还需要进一步研究有限PMU下的故障线路快速识别方法。

本文在已有研究成果基础上，针对有限PMU间隔布局方式，以未布有PMU节点为中心节点，根据故障时正序电压推算值幅值比实测值小、负序和零序电压推算值比实测值大的特点，从多个PMU节点的实测电压/电流信号向中心节点推算，得到多个推算各序电压。建立故障线路的各序故障识别判据。对于可能存在的相邻线路复故障，先通过电压推算判据检测最可能的故障线路，然后利用已有的故障点位置求取方法辅助判断复故障。

1 基于多点PMU的故障线路识别算法

1.1 电压推算的基本原理

考虑分布参数的线路，如图1所示。

国家自然科学基金项目（51377137）。

中国知网 https://www.cnki.net

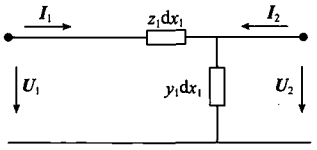

图1　均匀分布参数电路

线路两端的电压电流有以下关系[9]

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh \gamma l & -Z_c \sinh \gamma l \\ \dfrac{\sinh \gamma l}{Z_c} & -\cosh \gamma l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中，l为线路全长；Z_c、γ分别为分布参数电路的特性阻抗和传播系数，线路一端的电压电流可由另一端推算得到。

本文采用间隔母线布置PMU的策略[3]，即未布有PMU节点与布有PMU节点相连。如图2所示，1节点、3节点和4节点均布有PMU。

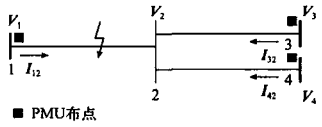

图2　有分支的简单线路

用$V_{21}^{(1)}$、$I_{21}^{(1)}$分别表示由节点1推算到节点2的正序电压、电流，线路1－2的电压电流方程如下，即

$$\begin{cases} V_{21}^{(1)} = \cosh(\gamma l) V_1^{(1)} - Z_c \sinh(\gamma l) I_{12}^{(1)} \\ I_{21}^{(1)} = \sinh(\gamma l) V_1^{(1)} / Z_c - \cosh(\gamma l) I_{12}^{(1)} \end{cases} \quad (2)$$

相应地，由节点1推算得到节点2的负序、零序电压、电流，即

$$\begin{cases} V_{21}^{(2)} = \cosh(\gamma l) V_1^{(2)} - Z_c \sinh(\gamma l) I_{12}^{(2)} \\ I_{21}^{(2)} = \sinh(\gamma l) V_1^{(2)} / Z_c - \cosh(\gamma l) I_{12}^{(2)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_{21}^{(0)} = \cosh(\gamma l) V_1^{(0)} - Z_c \sinh(\gamma l) I_{12}^{(0)} \\ I_{21}^{(0)} = \sinh(\gamma l) V_1^{(0)} / Z_c - \cosh(\gamma l) I_{12}^{(0)} \end{cases} \quad (4)$$

同理可由节点3推算到节点2的各序电压、电流为$V_{23}^{(1)}$、$I_{23}^{(1)}$，$V_{23}^{(2)}$、$I_{23}^{(2)}$，$V_{23}^{(0)}$、$I_{23}^{(0)}$；由节点4推算到节点2的各序电压、电流为$V_{24}^{(1)}$、$I_{24}^{(1)}$，$V_{24}^{(2)}$、$I_{24}^{(2)}$，$V_{24}^{(0)}$、$I_{24}^{(0)}$。

当线路正常运行时，$V_{21}^{(1)}$、$V_{23}^{(1)}$和$V_{24}^{(1)}$均近似于节点2的实际电压V_2。

但是当线路1－2发生故障时，配置PMU的节点1测得的测量电压、电流，仍将线路1－2当做正常线路，将它们代入式（1），由节点1推算得到节点2的正序、负序和零序电压推算值$V_{21}^{(1)}$、$V_{21}^{(2)}$和$V_{21}^{(0)}$，它们就与节点2的实际各序电压$V_2^{(1)}$、$V_2^{(2)}$和$V_2^{(0)}$有较大的差距。从节点1、节点3向节点2的各序电压推算值与实际值对比，如图3所示。

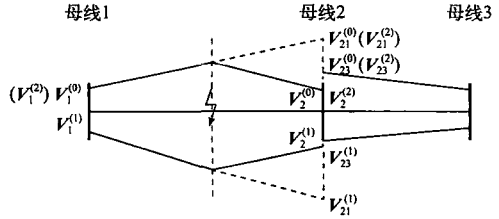

图3　从节点1、节点3向节点2的各序电压推算值与实际值

由图3可见，节点2正序电压的推算值幅值比实测值小，而负序和零序电压的推算值幅值则比实测值大[9]。通过分析可知，故障线路上的正序推算电压$V_{21}^{(1)}$比各相邻正常线路上的正序实测电压$V_{23}^{(1)}$、$V_{24}^{(1)}$小，故障线路上的负序（零序）推算电压$V_{21}^{(2)}$（$V_{21}^{(0)}$）比各相邻正常线路上的负序（零序）实测电压$V_{23}^{(2)}$、$V_{24}^{(2)}$（$V_{23}^{(0)}$、$V_{24}^{(0)}$）都大。这是检测线路1－2故障的依据。

为了衡量节点2来自两侧的序电压各推算值是否接近，分别求取正序、负序和零序各电压推算值之间差值二次方的平均值δ，当满足式（5）时，认为该点的几个同序推算值在误差允许值σ内接近，否则判定它们不接近。根据仿真试验结果，并考虑一定的裕度，给出式（5）中σ为0.5。

$$\begin{cases} \delta_{(1)} = \dfrac{\left|V_{21}^{(1)} - V_{23}^{(1)}\right|^2 + \left|V_{21}^{(1)} - V_{24}^{(1)}\right|^2 + \left|V_{23}^{(1)} - V_{24}^{(1)}\right|^2}{3} < \sigma \\ \delta_{(2)} = \dfrac{\left|V_{21}^{(2)} - V_{23}^{(2)}\right|^2 + \left|V_{21}^{(2)} - V_{24}^{(2)}\right|^2 + \left|V_{23}^{(2)} - V_{24}^{(2)}\right|^2}{3} < \sigma \\ \delta_{(0)} = \dfrac{\left|V_{21}^{(0)} - V_{23}^{(0)}\right|^2 + \left|V_{21}^{(0)} - V_{24}^{(0)}\right|^2 + \left|V_{23}^{(0)} - V_{24}^{(0)}\right|^2}{3} < \sigma \end{cases} \quad (5)$$

当系统正常运行时，节点2的几个正序电压推算值均和节点2的实际电压值接近，而负序、零序很小，即满足各序差异值$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$均小于σ。

当系统发生故障时，$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$中至少有一个会大于σ，这时需要启动故障线路识别判据。

定义未布有PMU的节点i的各序推算电压最小值（或最大值）分别为$V^{(1)}$、$V^{(2)}$和$V^{(0)}$，即

$$V^{(1)} = \min\{V_{ij}^{(1)}, V_{ik}^{(1)}, V_{im}^{(1)}, \cdots, V_{in}^{(1)}\} \quad (6)$$

中国知网　https://www.cnki.net

$$V^{(2)}=\max\{V_{ij}^{(2)},V_{ik}^{(2)},V_{im}^{(2)},\cdots,V_{in}^{(2)}\} \quad (7)$$

$$V^{(0)}=\max\{V_{ij}^{(0)},V_{ik}^{(0)},V_{im}^{(0)},\cdots,V_{in}^{(0)}\} \quad (8)$$

式中，j、k和m等为i点相邻布有PMU的节点；n为与i节点相连线路数量。

i点的几个正序电压推算值中最小值$V^{(1)}$对应的推算路径所在线路即为故障线路，作为故障线路识别的正序判据。

如图2中线路1－2发生故障，线路2－3、2－4正常，$V_{23}^{(1)}$、$V_{24}^{(1)}$都接近于节点2的电压真实值，而$V_{21}^{(1)}$明显比$V_{23}^{(1)}$和$V_{24}^{(1)}$都小，是所有正序推算电压中的最小值，则将$V_{21}^{(1)}$对应的线路1－2判为故障线路。

故障线路负序的推算电压值比实际值大，将i点的几个负序推算电压值中的最大值$V^{(2)}$对应的推算路径所在线路判为故障线路，作为故障线路识别的负序判据。如图3中$V_{21}^{(2)}$比实际值大，明显比$V_{23}^{(2)}$和$V_{24}^{(2)}$都大，是所有负序推算电压值中最大值，则将$V_{21}^{(2)}$对应线路1－2判为故障线路。同理，建立零序判据，其与负序判据类似。

根据电力系统分析相关知识，发生非对称接地故障时正序、负序和零序分量同时存在，而正常运行和发生三相对称短路只有正序分量，因此本文同时做某中心节点i的正序、负序和零序电压推算，求取各序推算电压幅值的各自差异值$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$。如果它们均大于σ或者有一个大于σ，那么差异值最大项是变化最明显的序分量，按照差异值最大值对应的序判据来判断故障线路。

考虑可能存在相邻两条线路同时发生故障情形（三条及以上同时发生故障的概率很小，不予考虑），在开始识别故障线路时，并不知道是单一故障还是相邻线路复故障，因此本文针对单一故障和相邻复故障，增加了故障点位置求解的辅助判据来加以区分。

1.2 单个线路故障的判别

采用正序分量计算故障点位置，如图4所示。节点1、节点3布有PMU，α为故障点位置，根据文献[6]得到某线路的故障点位置α，即

$$\dot{\alpha}=\frac{\operatorname{arctanh}}{\gamma l}\left\{\frac{V_1-\cosh(\gamma l)V_2+Z_c\sinh(\gamma l)I_{21}}{Z_cI_{12}+Z_c\cosh(\gamma l)I_{21}-\sinh(\gamma l)V_2}\right\} \quad (9)$$

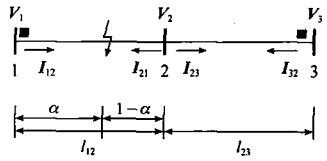

图4 单个线路故障位置的求取

式（9）基于故障点电压推导得出，理论上不受过渡电阻影响。

假设线路1－2发生故障、线路2－3正常运行。根据KCL，有$\boldsymbol{I}_{21}=-\boldsymbol{I}_{23}$。节点2的电流$\boldsymbol{I}_{23}$、电压$\boldsymbol{V}_2$可由节点3的实测电压、电流推算得到，再将节点1的实测值$\boldsymbol{I}_{12}$、$\boldsymbol{V}_1$代入式（9），可求得线路1－2的故障点位置α。

再假设线路2－3发生故障、线路1－2正常运行。有$\boldsymbol{I}_{23}=-\boldsymbol{I}_{21}$。相应地$\boldsymbol{I}_{21}$、$\boldsymbol{V}_2$由节点1推算得到，这样也可求得线路2－3的故障点位置β。

当线路1－2发生故障、线路2－3正常运行时，存在$\alpha\in(0,1)$，而非故障线路2－3存在$\beta\notin(0,1)$。

对于没有分支的线路来说，未布有PMU的节点2只有左右两个推算值，必然为一大一小，因此直接求取故障点位置来判断故障线路。

对于有分支的线路来说，按照相应各序判据，先判断出一条故障线路。将其跳开后，针对各相邻线路，运用式（9），计算它们的故障点位置，如果这些故障点位置都不在（0,1）之间，即判断只有一条线路发生故障。

举例说明单一线路故障的识别。图5为IEEE 14节点测试系统。设线路L_{15}靠近变电站9的10%处发生单相金属性接地故障。

分别求取线路L_{15}的节点9的正序、负序和零序电压推算值幅值的3个差异值为$\delta_{(1)}=1.201$，$\delta_{(2)}=4.858$，$\delta_{(0)}=15.43$，三者均大于σ，$\delta_{(0)}$最大，因此选用零序判据来判断故障线路。

节点9的各零序推算电压分别为47.10 kV、54.55 kV和56.10 kV，最大零序推算电压为，$V^{(0)}=V_{9.10}=56.10$ kV，对应的电压推算路径所在线路L_{15}为故障线路。但是尚不知道相邻线路是否仍有故障。在断开线路L_{15}后，再依次计算相邻线路L_{12}的故障点$\alpha=1.320$，相邻线路L_{14}的故障点$\beta=-0.078\ 7$，两条线路的故障点均不在（0,1）之间，

中国知网 https://www.cnki.net

故判定只有线路L_{15}发生故障。

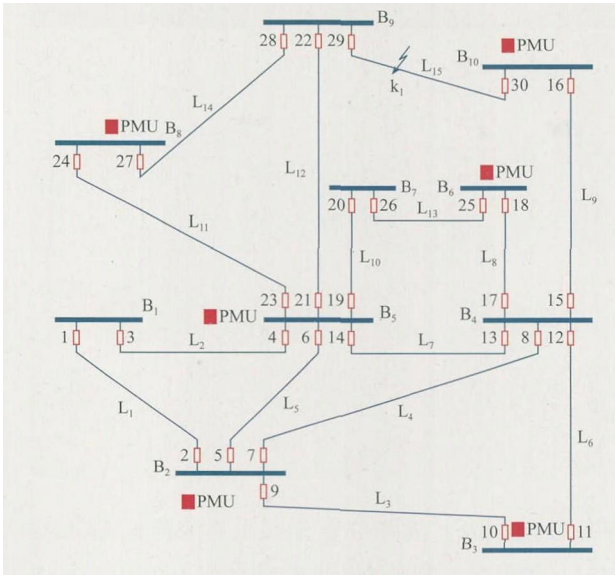

图5　IEEE 14节点测试系统

1.3　相邻线路复故障的判别

当相邻线路同时发生故障时，两条线路的电压变化会互相影响。先做正序、负序和零序电压推算，然后计算各序电压推算值的差异值$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$，其中最大值对应的序分量为变化最明显的序分量，按照其序判据先判别出一条故障线路。将其跳闸断开，再针对其余各线路，运用式（9）分别求取它们的故障点位置，如果某线路的故障点位置值在（0,1）之间，则该线路为另一条故障线路。

2　算法步骤

1）当线路主保护出现至少一侧未动作、两侧其他保护有动作的情况时，就起动该故障线路识别算法。以未布有PMU节点为中心，从相邻布有PMU节点向中心节点分别作正序、负序和零序的电压推算。计算各序推算电压值的差异值$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$，当其中至少有一个大于σ时进入下一步骤。

2）选取$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$中最大差异值对应的序分量，按照其序判据，将序电压推算值幅值中最小值（或最大值）对应的线路判为故障线路。

3）将上一步判断出的故障线路跳闸断开，然后计算各相邻线路的故障点位置。如果这些故障点位置均不在（0,1）之间，则判断只有一条线路发生故障。如果各相邻线路中还有一条线路的故障点位置在（0,1）之间，则判断有两条相邻线路发生复故障。

4）对于没有分支的简单线路，按照式（9）所述的求解方法，依次对各线路计算出各自的故障点位置来判断故障线路。

3　仿真验证

通过IEEE 14节点仿真试验对文中的故障线路识别算法进行验证。

3.1　单条线路发生金属性短路的仿真试验

分别设线路L_{15}靠近变电站9的10%和70%处发生各种单一故障，接地故障均为金属性短路接地故障，其仿真结果如表1所示。

表1中，线路L_{15}靠近节点9的10%处发生AB故障，先分别求出各序电压差异值$\delta_{(1)}$、$\delta_{(2)}$和$\delta_{(0)}$。$\delta_{(0)}$小于σ，表示零序分量变化很小，实际情况中发生两相短路时零序电流几乎不存在，可不考虑。$\delta_{(2)}$最大，因此按照负序判据初步判断出故障线路是L_{15}。当断开L_{15}后，计算相邻线路L_{12}的故障点为

表1　单条线路发生故障的识别结果

故障情况	各序差异值	序判据	初步判定故障线路	剩余线路的故障点	故障线路
$L_{15}-10\%-AB$	$\delta_{(1)}=12.16$ $\delta_{(2)}=27.97$ $\delta_{(0)}=0.273\ 1$	$V^{(2)}=V_{9,10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.045$ L_{14}：$\beta=-0.021\ 2$	L_{15}
$L_{15}-10\%-ABG$	$\delta_{(1)}=35.36$ $\delta_{(2)}=20.45$ $\delta_{(0)}=0.681$	$V^{(1)}=V_{9,10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.163$ L_{14}：$\beta=-0.018\ 6$	L_{15}
$L_{15}-10\%-ABC$	$\delta_{(1)}=51.49$ $\delta_{(2)}=0.015$ $\delta_{(0)}=0.209$	$V^{(1)}=V_{9,10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.201$ L_{14}：$\beta=-0.069\ 7$	L_{15}

中国知网 https://www.cnki.net

（续）

故障情况	各序差异值	序判据	初步判定故障线路	剩余线路的故障点	故障线路
$L_{15}-70\%-AG$	$\delta_{(1)}=103.7$ $\delta_{(2)}=115.3$ $\delta_{(0)}=111.5$	$V^{(2)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.335$ L_{14}：$\beta=-0.123\ 1$	L_{15}
$L_{15}-70\%-AB$	$\delta_{(1)}=647.1$ $\delta_{(2)}=674.7$ $\delta_{(0)}=0.308\ 3$	$V^{(2)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.118$ L_{14}：$\beta=-0.042\ 4$	L_{15}
$L_{15}-70\%-ABG$	$\delta_{(1)}=853.5$ $\delta_{(2)}=491.9$ $\delta_{(0)}=50.41$	$V^{(1)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.095$ L_{14}：$\beta=-0.019\ 1$	L_{15}
$L_{15}-70\%-ABC$	$\delta_{(1)}=5.238$ $\delta_{(2)}=0.019\ 0$ $\delta_{(0)}=0.268\ 8$	$V^{(1)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.292$ L_{14}：$\beta=-0.108\ 4$	L_{15}

$\alpha=1.045$，相邻线路L_{14}的故障点为$\beta=-0.021\ 2$，故判断只有线路L_{15}发生故障。

由表1看出，在发生三相短路故障时，负序、零序电压变化很小，根据正序判据，并结合故障点位置计算都能最终判断出故障线路L_{15}。

3.2 单条线路在不同过渡电阻下的仿真试验

为了检验在不同过渡电阻下本算法的有效性，设过渡电阻分别为10 Ω、50 Ω和100 Ω下发生单相接地故障，故障位置分别设为线路L_{15}靠近变电站10的30%、80%处，试验结果如表2所示。

从表2中可以看出，当发生高阻接地故障时（如$R_f=100\ \Omega$），各正序差异值$\delta_{(1)}$均很小，这表示发生高阻接地故障时，正序电压的变化很不明显，但是此时负序、零序电压变化较明显，零序电压的变化尤其突出。此时根据各序差异值中零序差异，采用零序判据，并结合故障点位置求解，仍能最终判别出故障线路。

表2 单条线路在不同过渡电阻下发生单相接地故障的判别结果

故障情况	各序差异值	序判据	初步判定故障线路	剩余线的故障点	故障线路
$L_{15}-30\%AG$ （$R_f=10\ \Omega$）	$\delta_{(1)}=90.99$ $\delta_{(2)}=88.17$ $\delta_{(0)}=385.7$	$V^{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.334$ L_{14}：$\beta=-0.119\ 6$	L_{15}
$L_{15}-30\%AG$ （$R_f=50\ \Omega$）	$\delta_{(1)}=44.01$ $\delta_{(2)}=79.43$ $\delta_{(0)}=279.3$	$V^{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.212$ L_{14}：$\beta=-0.075\ 6$	L_{15}
$L_{15}-30\%AG$ （$R_f=100\ \Omega$）	$\delta_{(1)}=0.027\ 3$ $\delta_{(2)}=48.50$ $\delta_{(0)}=171.4$	$V^{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.253$ L_{14}：$\beta=-0.102\ 6$	L_{15}
$L_{15}-80\%AG$ （$R_f=10\ \Omega$）	$\delta_{(1)}=9.431$ $\delta_{(2)}=14.35$ $\delta_{(0)}=75.97$	$V^{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.288$ L_{14}：$\beta=-0.104\ 5$	L_{15}
$L_{15}-80\%AG$ （$R_f=50\ \Omega$）	$\delta_{(1)}=3.172$ $\delta_{(2)}=9.170$ $\delta_{(0)}=17.91$	$V^{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.240$ L_{14}：$\beta=-0.087\ 7$	L_{15}
$L_{15}-80\%AG$ （$R_f=100\ \Omega$）	$\delta_{(1)}=0.106\ 7$ $\delta_{(2)}=4.984$ $\delta_{(0)}=5.310$	$V^{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=1.277$ L_{14}：$\beta=-0.075\ 6$	L_{15}

中国知网 https://www.cnki.net

3.3 相邻线路发生复故障的仿真试验

设线路L_{12}和线路L_{15}同时发生AG故障，$R_f=100\ \Omega$，具体故障位置和试验结果如表3所示。

由表3可以看出，线路L_{15}靠近变电站6的10%处发生AG故障，线路L_{12}靠近变电站9的50%发生AG故障时，$\delta_{(0)}$最大，所以按照零序判据初步判断故障线路为L_{15}。将其跳闸断开后，再计算相邻线路L_{12}的故障点位置$\alpha=0.095$，相邻线路L_{14}的故障点位置$\beta=1.254$，于是进一步判断故障线路是L_{12}和L_{15}，其他情况处理方法类似。

表3　相邻线路发生复故障的判别结果

故障情况	各序差异值	序判据	初步判别故障线路	剩余线路的故障点计算	故障线路
L_{12}－靠近变电站6－10% L_{15}－靠近变电站9－50%	$\delta_{(1)}=6.808$ $\delta_{(2)}=16.21$ $\delta_{(0)}=45.37$	$V_{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=0.095\ 0$ L_{14}：$\beta=1.254$	L_{15}、L_{12}
L_{12}－靠近变电站6－50% L_{15}－靠近变电站9－50%	$\delta_{(1)}=6.135$ $\delta_{(2)}=13.85$ $\delta_{(0)}=56.22$	$V_{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=0.484\ 3$ L_{14}：$\beta=1.340$	L_{15}、L_{12}
L_{12}－靠近变电站6－90% L_{15}－靠近变电站9－10%	$\delta_{(1)}=0.086\ 9$ $\delta_{(2)}=0.682\ 4$ $\delta_{(0)}=18.73$	$V_{(0)}=V_{9.10}$	L_{15}	L_{12}：$\alpha=0.866\ 6$ L_{14}：$\beta=1.088$	L_{15}、L_{12}

4　结束语

研究了一种基于电压推算的故障线路识别算法。针对PMU母线间隔布局方式，利用一个区域内有限PMU，以未布有PMU节点为中心，其周围布有PMU的节点分别向中心节点做正序、负序和零序的电压推算，分别求取各序推算电压幅值的差异值。建立各序故障判据。在判断出一条故障线路，将其跳开后，再采用故障点位置求取方法，辅助判断是否发生复故障线路。该算法的原理简单，计算量小，通信量较小，并且不受故障位置、故障类型和过渡电阻的影响。IEEE 14节点测试系统仿真试验验证了该算法的有效性。

参考文献

[1] Phadke A G, Thorp J S. Synchronized phasor measurements and their application [M]. New York: Springer Science Business Media, 2008.

[2] De La ReeJ, Centeno V, Thorp J S, et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1 (1): 20-27.

[3] Phadke A G, Voslkis H, MoraesD, et al. The wide world of wide-area measurement [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6 (5): 52-65.

[4] He Zhiqin, Zhang Zhe, Chen Wei, et al. Wide-Area backup protection algorithm based on fault component voltage distribution [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (4): 2752-2760.

[5] 王睿，王晓茹，黄飞，等. 基于相关矩阵的电网广域后备保护算法 [J]. 电力系统自动化，2013，37 (4)：69-74.

[6] 童晓阳，王晨，罗孝辉，等. 基于相对保护熵与名义过渡电阻的电网故障在线检测方法 [J]. 电力系统自动化，2015，39 (10)：144-150.

[7] 金恩淑，汪有成，王红艳，等. 基于负序功率方向比较原理的广域继电保护算法 [J]. 电力系统保护与控制，2013，41 (22)：1-6.

[8] Hassan Khorashadi-Zadeh, Li Zuyi, et al. A novel PMU-based transmission line protection scheme design [C]. North American Power Symposium, 2007: 13-19.

[9] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京：中国电力出版社，2007.

（收稿日期：2015－09－08）EA

中国知网 https://www.cnki.net