

DOI: 10.7667/PSPC151853

基于有限 PMU 的电网故障在线识别算法研究

童晓阳¹, 王睿晗¹, 王洪彬², 连文超¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 为了实现有限 PMU 布局方式下的快速有效电网故障检测, 研究了电网故障线路在线识别算法。根据 PMU 布局将电网划分为多个区域。分析了故障发生时流入故障区域的正序、负序和零序电流明显增大的特性, 研究了基于边界 PMU 的故障区域搜索方法。基于虚拟节点构建了纯故障等值模型及其故障分量电压方程。利用一个区域的各边界节点电气量, 构造故障分量电压的超定方程组, 采用最小二乘法求解故障线路的故障点位置, 准确检测故障区域内的故障线路。IEEE14 节点系统上大量仿真实验验证了该算法的有效性, 它不受故障位置、故障类型、过渡电阻的影响。仿真实验也表明了采用最小二乘法求解的故障点精度能够满足要求。

关键词: 电网故障; 有限 PMU; 虚拟节点; 在线识别; 最小二乘法

Online detection algorithm of power system fault using limited PMUs

TONG Xiaoyang¹, WANG Ruihan¹, WANG Hongbin², LIAN Wenchao¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Co. Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: In order to detect power system fault using limited PMU quickly and effectively, a novel online fault detection algorithm is proposed. The power grid is divided into different zones by the placement strategy of limited PMUs. The character that the sum magnitudes of positive, negative and zero sequence currents entering one zone increase evidently is analyzed. An identification method of faulted zone is given. The pure fault equivalent model is constructed, as well as the fault component voltage equation based on virtual nodes. Using PMU electrical variables from boundary nodes of the zone, the fault component voltage over-determined equations are derived. The fault position of faulted line is obtained using the least square method. Then fault line in faulted zone is correctly detected. The effectiveness of proposed algorithm is illustrated by the simulation tests on IEEE 14-bus system. It is not affected by fault position, type and transition resistance. The fault position accuracy using least square method can meet the requirements.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377137).

Key words: power system fault; limited PMUs; virtual node; online detection; least square method

0 引言

随着电力系统发展, 电网结构变得越来越复杂, 传统后备保护的整定变得困难^[1-4], 近些年发展的广域后备保护与电网故障在线检测, 利用广域保护或电气量做信息融合, 综合检测与快速切除故障, 无需时间配合, 克服了传统后备保护整定困难、动作时间长、易扩大故障范围等缺点。主要利用广域保护动作开关量检测故障元件^[3-5], 或利用多点电流信

号进行广域差动^[6-7]。近几年相量测量单元 PMU (Phasor Measurement Unit) 发展为电网在线检测故障研究提供了新信号源^[8-13]。出于 PMU 布置的经济性考虑, PMU 最优配置得到研究^[10-13], 有必要研究在有限 PMU 布局下电网故障在线识别算法。

文献[14]提出基于线路两端布有 PMU 的故障定位算法。文献[15]利用 PMU 量测量计算得到视在阻抗, 调整保护整定值使其具有良好的可靠性与灵敏性。文献[16]将故障电压比较和多信息融合相结合进行广域后备保护在线故障检测。文献[17]提出利用同步电压相量进行输电网络故障定位新方法, 只需故障线路远处布有 PMU, 但需要全网拓扑结

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377137); 国网重庆市电力公司 2015 年科技项目(编号 2015 渝电科技管 11 号)

构, 计算量较大。文献[18]提出广域多重故障识别新算法, 求得非相邻双重故障的疑似组合, 再采用故障确信度确定故障线路。文献[19]研究基于保护元件与 PMU 数据多源信息融合的故障检测算法, 但需全网布置 PMU。在利用有限 PMU 电气量实现快速准确在线识别故障方面, 仍需进一步研究。

本文提出了一种基于有限 PMU 的电网故障在线识别算法。由已有 PMU 优化布局策略将电网划分为多个区域, 利用流入故障区域的正序、负序或零序电流明显增大的特点, 识别故障区域。针对故障区域, 利用各配置 PMU 边界节点实测的电压故障分量, 构造各区域的故障分量电压方程组, 求解线路的故障点位置, 进而检测出故障线路。

1 基于有限 PMU 的故障区域搜索方法

依据文献[10-13]的电网间隔母线布置 PMU 或优化布置策略, 由全网分布 PMU 将电网分成多个子区域, 即每个子区域边界母线节点上布置一个 PMU。实时测量边界 PMU 流进某区域的电流。图 1 为 IEEE14 节点系统一个局部电网拓扑结构。

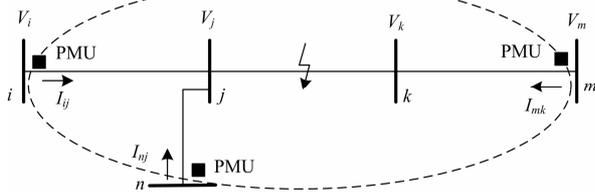


图 1 IEEE14 节点系统的一个局部拓扑结构

Fig. 1 Partial topology structure of IEEE14 testing system

当某区域内部发生故障时, 流入该区域边界节点上的正序、负序、零序电流之和会比故障前有显著增大, 把各边界节点的正序、负序、零序电流分别相加, 获得各自的电流和幅值, 大于预设阈值, 可判断该区域是否为故障区域。

对于正序电流, 定义一个正序比值变量 d_1 = 当前各边界节点的正序电流之和幅值 $I_{ent}^{(1)}$ / 正常时各边界节点的正序电流之和幅值 $I_{ent,nml}^{(1)}$ 。当 d_1 大于正序阈值 $d_{1,set}$, 则判定该区域内部发生故障, 见式(1)。

$$d_1 = \frac{I_{ent}^{(1)}}{I_{ent,nml}^{(1)}} = \frac{\left| \sum_{r=1}^l I_r^{(1)} \right|}{I_{ent,nml}^{(1)}} > d_{1,set} \quad (1)$$

式(1)中, l 为某区域边界 PMU 节点的总个数。

对于负序、零序电流, 因为故障前正常电流在理论上不存在负序和零序分量, 所以不便直接给出负序和零序的阈值。计算某区域的负序和零序电流

标么值之和 $I_{ent}^{(2)} = \left| \sum_{r=1}^l I_r^{(2)} \right|$ 、 $I_{ent}^{(0)} = \left| \sum_{r=1}^l I_r^{(0)} \right|$, 当它们大于对应的负序和零序阈值 $I_{2,set}$ 、 $I_{0,set}$, 则认为该区域可能发生故障, 与式(1)配合来判断故障区域。首先针对正序电流, 按照式(1)判断该区域是否发生故障, 如果式(1)不满足, 则再检查 $I_{ent}^{(2)}$ 是否大于 $I_{2,set}$ 、 $I_{ent}^{(0)}$ 是否大于 $I_{0,set}$, 如果后两种有一种满足, 则判定该区域故障。

图 1 中区域 1 的 l 为 3, 获得 $I_{ent}^{(1)}$ 、 $I_{ent}^{(2)}$ 、 $I_{ent}^{(0)}$, 再计算 d_1 , 依照上述方法能够判断出故障区域。

2 有限 PMU 下的故障线路识别算法

2.1 基于虚拟节点的故障分量电压方程的构建

系统的节点电压方程为

$$U = ZI \quad (2)$$

式(2)中, U 、 Z 、 I 分别为系统的节点电压向量、节点阻抗矩阵、节点电流向量。可列出图 1 中所有节点的电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{U}_j \\ \dot{U}_k \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} & Z_{ik} & Z_{im} & Z_{in} \\ Z_{ji} & Z_{jj} & Z_{jk} & Z_{jm} & Z_{jn} \\ Z_{ki} & Z_{kj} & Z_{kk} & Z_{km} & Z_{kn} \\ Z_{mi} & Z_{mj} & Z_{mk} & Z_{mm} & Z_{mn} \\ Z_{ni} & Z_{nj} & Z_{nk} & Z_{nm} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \\ \dot{I}_k \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)中可得到子区域的各配置 PMU 边界节点 i, m, n 的电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} & Z_{ik} & Z_{im} & Z_{in} \\ Z_{mi} & Z_{mj} & Z_{mk} & Z_{mm} & Z_{mn} \\ Z_{ni} & Z_{nj} & Z_{nk} & Z_{nm} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \\ \dot{I}_k \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

当系统发生故障时, 故障点有故障电流注入, 将该故障点 f 当作一个虚拟节点, 如图 2 所示。

设 a 为故障点距离节点 k 占线路 jk 总长的百分比, 为系统增加一个虚拟节点 f , 故式(4)修改为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_i \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{ij} & Z_{ik} & Z_{im} & Z_{in} & Z_{if} \\ Z_{mi} & Z_{mj} & Z_{mk} & Z_{mm} & Z_{mn} & Z_{mf} \\ Z_{ni} & Z_{nj} & Z_{nk} & Z_{nm} & Z_{nn} & Z_{nf} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \\ \dot{I}_k \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_n \\ \dot{I}_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)中, 节点阻抗矩阵中除了 Z_{if} 、 Z_{mf} 、 Z_{nf} 外的其他阻抗值都由故障前建立的节点阻抗矩阵求得, 在图 2 中, Z_{if} 、 Z_{mf} 、 Z_{nf} 可表示为

$$\begin{cases} Z_{if} = Z_{ik} + (Z_{ij} - Z_{ik})\alpha \\ Z_{mf} = Z_{mk} + (Z_{mj} - Z_{mk})\alpha \\ Z_{nf} = Z_{nk} + (Z_{nj} - Z_{nk})\alpha \end{cases} \quad (6)$$

系统在发生不同类型故障时, 根据叠加原理, 将故障后等值模型等效分解为故障前稳态等值模型和纯故障等值模型。在图 2(b)纯故障等值模型中, 只有故障点 f 有注入电流, 其他节点的注入电流为 0, 即

$$\dot{I}_i = \dot{I}_j = \dot{I}_k = \dot{I}_m = \dot{I}_n = 0 \quad (7)$$

将式(6)、式(7)代入纯故障等值模型的式(5), 整理后得到 3 个边界节点的故障分量电压方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_i \\ \Delta\dot{U}_m \\ \Delta\dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ij} - Z_{ik} & Z_{ik} \\ Z_{mj} - Z_{mk} & Z_{mk} \\ Z_{nj} - Z_{nk} & Z_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha\dot{I}_f \\ \dot{I}_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, $\Delta\dot{U}_i$ 为节点 i 在故障分量电压列向量中元素, 即节点 i 在故障发生前后电压值之差, $\Delta\dot{U}_m$ 、 $\Delta\dot{U}_n$ 的含义与 $\Delta\dot{U}_i$ 类似。

由此建立子区域各边界节点 i, m, n 的故障分量电压方程组。其中, $\alpha\dot{I}_f$ 、 \dot{I}_f 为未知量, 有待求解。 $\alpha\dot{I}_f$ 表示线路 jk 的故障点位置 α 和故障点注入电流 \dot{I}_f 的乘积, 在整体上是一个变量。

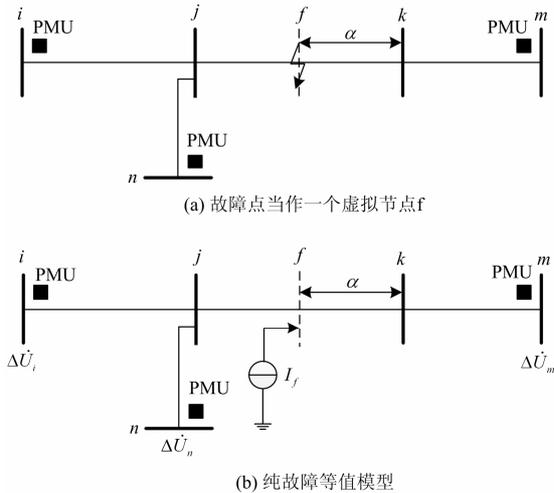


图 2 加入虚拟节点的故障区域

Fig. 2 Fault section with the adding of virtual node

2.2 利用边界 PMU 节点电量的故障线路识别

利用某区域的各边界节点 i, m, n 的故障分量, 联立得到该区域边界节点的故障分量电压方程组。

式(8)的方程组, 有 3 个方程, 2 个未知数, 即 $\alpha\dot{I}_f$ 和 \dot{I}_f , 它为一个超定方程组。

$$\text{设 } A = \begin{bmatrix} Z_{ij} - Z_{ik} & Z_{ik} \\ Z_{mj} - Z_{mk} & Z_{mk} \\ Z_{nj} - Z_{nk} & Z_{nk} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_i \\ \Delta\dot{U}_m \\ \Delta\dot{U}_n \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \alpha\dot{I}_f \\ \dot{I}_f \end{bmatrix}$$

$$B = AC \quad (9)$$

采用最小二乘法, 求解这个超定方程组, 得到

$$C = (A^T A)^{-1} (A^T B) \quad (10)$$

解得向量 C 后, 得到含有未知量 $\alpha\dot{I}_f$ 和 \dot{I}_f 的向量, 采用下式可求出故障线路的故障点位置 α :

$$\alpha = (\alpha\dot{I}_f) / \dot{I}_f \quad (11)$$

当某线路发生故障时, 求得故障线路的故障点 α , 满足 $\alpha \in [0, 1]$ 。对于正常线路, 可采用式(11)计算得到相应的故障点位置, 是伪值, 即 $\alpha \notin [0, 1]$ 。

3 算法流程

(1) 对电网拓扑结构进行区域划分, 保证各区域边界节点均布有 PMU。计算系统阻抗矩阵。

(2) 当集中式控制中心收集与发现某线路及两侧保护有启动信号时, 启动基于有限 PMU 的故障区域搜索, 或者实时收集各 PMU 测得的流入该区域的正序、负序和零序电流, 在线搜索故障区域。计算该区域的各序电流之和幅值, 其值大于设定阈值, 则判定该区域为故障区域, 其中包含故障线路。

(3) 针对故障区域中每条线路, 分别建立纯故障等值模型下各边界节点的故障分量电压方程。将各边界节点上有限 PMU 的电气量, 代入各故障分量电压方程, 联立形成该区域的超定方程组。

(4) 采用最小二乘法, 分别求取故障区域中各条线路的故障点位置。将其中故障点位置介于 $[0, 1]$ 之间的线路判为故障线路。

基于有限 PMU 的电网故障在线识别算法的流程图如图 3 所示。

4 算例验证

本文在 IEEE14 节点系统(如图 4 所示)上做仿真实验对所提算法进行验证。将整个系统分为五个区域, 节点 2、4、5、8 布置有 PMU。各区域包含的线路如表 1 所示。比如区域 1 包含线路 L12、L14、L15、L9, 其边界节点为节点 4、5、8。

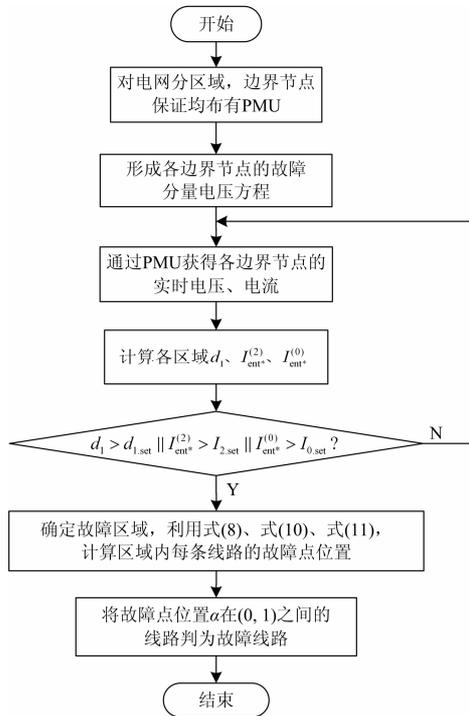


图3 基于有限PMU的故障在线识别算法流程图
Fig. 3 Flow chart of online fault detecting algorithm based on limited PMUs

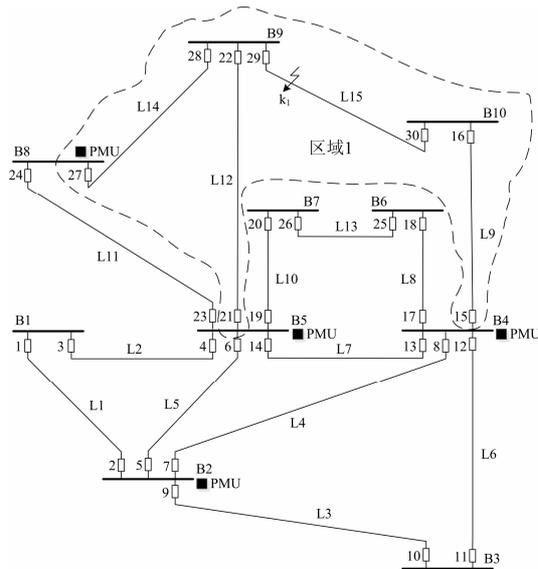


图4 IEEE14测试系统
Fig. 4 IEEE14 testing system

在仿真实验中, 考虑为系统正常运行时流入各区域的正序、负序和零序电流幅值之和留有一定的裕度, 将式(1)中正序阈值 $d_{1.set}$ 设为 3, 即正序故障电流之和为故障前正序电流之和的 3 倍。系统正常运行时不存在零序和负序分量, 将负序和零序阈值 $I_{2.set}$ 、 $I_{0.set}$ 设为 0.3。

表1 各保护区域包含的线路

划分区域	包含的线路
区域 1	L12、L14、L15、L9
区域 2	L1、L2、L11
区域 3	L10、L13、L8
区域 4	L3、L5、L6
区域 5	L4、L7

4.1 不同故障类型的仿真实验

算例 1 设线路 L15 在距离变电站 10 的 30%处故障, 故障类型有 AG、AB、ABG、ABCG。接地故障均为金属性接地。实验结果分别见表 2 和表 3。 \dot{I}_{89} 、 \dot{I}_{59} 、 \dot{I}_{49} 分别为布有 PMU 的节点 8、5、4 处测得的线路电流。

表2 线路 L15 发生故障时故障区域的搜索

故障类型	区域	d_1	$I_{ent}^{(2)}$	$I_{ent}^{(0)}$
AG	1	1.193 0	0.376 7	0.397 7
	2	0.986 9	0.012 6	0.005 1
	3	0.229 2	0.001 6	0.004 3
	4	0.441 0	0.055 5	0.059 0
	5	1.789 0	0.126 5	0.135 9
AB	1	4.190 0	0.916 4	0
	2	1.019 0	0.135 9	0
	3	0.470 0	0.010 5	0
	4	2.458 0	0.222 1	0
	5	2.386 0	0.237 8	0
ABG	1	4.949 0	0.782 9	0.286 8
	2	1.024 0	0.115 6	0.036 8
	3	0.461 0	0.008 8	0.006 9
	4	2.711 0	0.260 5	0.134 7
	5	2.564 0	0.263 0	0.098 0
ABCG	1	9.283 0	0.014 3	0
	2	1.053 0	0.005 0	0
	3	0.972 5	0.001 3	0
	4	2.875 0	0.005 2	0
	5	2.734 0	0.004 4	0

表 2 中, 对于各种故障类型, 求出流入各区域的正序、负序和零序电流之和的幅值。对于区域 1, $I_{ent}^{(1)} = |\dot{I}_{89}^{(1)} + \dot{I}_{59}^{(1)} + \dot{I}_{49}^{(1)}| = 0.2113$, 是故障前正序电流的 1.193 倍, 即 $d_1=1.193$, 它小于正序阈值 $d_{1.set}$ 。 $I_{ent}^{(2)} = |\dot{I}_{89}^{(2)} + \dot{I}_{59}^{(2)} + \dot{I}_{49}^{(2)}| = 0.3767$, $I_{ent}^{(0)} = |\dot{I}_{89}^{(0)} + \dot{I}_{59}^{(0)} + \dot{I}_{49}^{(0)}| = 0.3977$, 均大于预设阈值 0.3, 虽然正序比值变量 d_1 没有大于正序阈值, 但是根据负序和零序电流之和幅值能够找出包含故障线路

L15 在内的区域 1, 判为故障区域。表 2 中 $I_{ent}^{(0)}$ 为零, 表示零序电流非常微小, 近似等于零。类型故障的故障区域判别方法类似。

针对故障区域 1, 设置其包含的线路 L15、L14、L9、L12 的故障点位置依次为 α 、 β 、 γ 、 λ 。对每条线路分别建立如式(8)的方程组, 采用式(11)求取各线路的故障点位置。如表 3 所示。

表 3 故障区域内各线路故障点计算结果(L15-30%)

Table 3 Fault positions of lines in fault section

故障类型	线路	各线路的故障点位置
AG	L15	$\alpha=0.2865$
	L14	$\beta=-0.2660$
	L9	$\lambda=1.8530$
	L12	$\gamma=1.3740$
AB	L15	$\alpha=0.2955$
	L14	$\beta=-0.2629$
	L9	$\gamma=1.3858$
	L12	$\lambda=1.8795$
ABG	L15	$\alpha=0.2979$
	L14	$\beta=-0.2624$
	L9	$\gamma=1.3890$
	L12	$\lambda=1.8782$
ABCG	L15	$\alpha=0.3002$
	L14	$\beta=-0.2624$
	L9	$\gamma=1.3921$
	L12	$\lambda=1.8782$

由表 3 可看到, 对于各类故障, 求得线路 L15 的故障点位置 α 均在 $[0, 1]$ 之间。对于故障区域 1 中正常线路, 求得的故障点位置值均为伪值, 即不在 $[0, 1]$ 之间。因此判别 L15 为故障线路。

在 AG 故障时 L15 的故障点位置 $\alpha=0.2865$, 在 AB、ABG、ABCG 故障时, α 分别为 0.2955、0.2979、0.3002。4 种故障类型下故障点位置误差分别为 4.5、1.5、0.7、0.07%, 均很小。可见基于有限 PMU 采用最小二乘法求得的故障点位置, 能够满足要求。

4.2 不同过渡电阻下的仿真实验

算例 2 设线路 L15 在距离变电站 10 的 20% 处发生单相接地故障, 过渡电阻 R_f 分别为 $10\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 。故障区域的搜索和各线路故障点位置见表 4 和表 5。

表 4 中, 对于区域 1, AG 故障、过渡电阻 R_f 为 $10\ \Omega$ 时, 流入区域 1 的正序电流之和幅值是故障前的 1.195 倍, $d_1=1.195$, 而负序、零序电流之和分别为 0.3672、0.3876, 均大于预设阈值 0.3, 因此可判定区域 1 为故障区域。过渡电阻 R_f 改为 $100\ \Omega$, 仍能判定区域 1 为故障区域。故障类型、过渡电阻下故障区域的判别结果类似。

表 4 线路 L15 在不同过渡电阻下发生 AG 故障时故障区域的搜索(20%)

Table 4 Fault section searching under AG fault on L15 with two kinds of transition resistances

故障类型	区域	d_1	$I_{ent}^{(2)}$	$I_{ent}^{(0)}$
AG $R_f=10\ \Omega$	1	1.1950	0.3672	0.3876
	2	0.9982	0.0515	0.0460
	3	0.7352	0.0044	0.0095
	4	1.9980	0.1687	0.1814
	5	1.1490	0.1377	0.1470
AG $R_f=100\ \Omega$	1	1.1030	0.3443	0.3578
	2	0.9995	0.0343	0.0306
	3	1.1370	0.1296	0.1372
	4	0.6756	0.1122	0.1206
	5	0.8092	0.0916	0.0978

表 5 线路 L15 在不同过渡电阻下对故障区域内各线路故障点位置计算结果(20%)

Table 5 Fault positions of lines in fault section with two kinds of transition resistances

故障类型	线路	故障点位置
AG $R_f=10\ \Omega$	L15	$\alpha=0.1966$
	L14	$\beta=-0.3002$
	L9	$\gamma=1.2560$
	L12	$\lambda=2.1490$
AG $R_f=100\ \Omega$	L15	$\alpha=0.1856$
	L14	$\beta=-0.3102$
	L9	$\gamma=1.2280$
	L12	$\lambda=2.2410$

表 5 中, 当 AG 故障, $R_f=10\ \Omega$ 时, 求得线路 L15 的故障点位置为 0.1966, 在 $[0, 1]$ 之间, 而对于区域 1 中其他 3 条线路, 求得的故障点位置均为伪值。因此判定 L15 为故障线路。在过渡电阻分别为 $10\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 时, L15 的故障点位置分别为 0.1966、0.1856。不同过渡电阻下求的故障点位置误差分别为 1.7、7.2%, 误差满足故障线路在校识别算法的要求。

5 基于最小二乘法求解故障位置的精度分析

还可利用所有边界节点的电压故障分量, 通过不同边界 PMU 组合给出多个方程组来求解。例如故障区域 1 有 3 个边界节点布置 PMU, 共形成 3 种 PMU 组合, 即节点 8 和 4、8 和 5、5 和 4, 分别列出 3 个方程组, 它们各有两个方程、两个未知量, 可正常求解, 分别求得 3 种 PMU 组合下的故障点位置为 α_1 、 α_2 、 α_3 。将算例 1、算例 2 中 3 种 PMU 组合计算得到的故障点位置 α_1 、 α_2 、 α_3 和由式(10)、式(11)以最小二乘法求得的故障点位置 α_4 进行对比, 如表 6 所示。

表 6 三种 PMU 组合与最小二乘法求得故障点位置的对比
Table 6 Fault position comparisons among three PMU combinations and least squares method

算例	故障类型	不同 PMU 求解结果	误差/%
算例 1 30%	AG	$\alpha_1=0.286\ 2$	4.6
		$\alpha_2=0.289\ 1$	3.6
		$\alpha_3=0.283\ 1$	5.6
		$\alpha_4=0.286\ 5$	<u>4.5</u>
	AB	$\alpha_1=0.295\ 5$	1.5
		$\alpha_2=0.294\ 6$	1.8
		$\alpha_3=0.296\ 4$	1.2
		$\alpha_4=0.295\ 5$	<u>1.5</u>
	ABG	$\alpha_1=0.298\ 4$	0.5
		$\alpha_2=0.292\ 7$	2.4
		$\alpha_3=0.303\ 9$	1.3
		$\alpha_4=0.297\ 9$	<u>0.7</u>
ABCG	$\alpha_1=0.300\ 8$	0.3	
	$\alpha_2=0.294\ 4$	0.6	
	$\alpha_3=0.307\ 0$	2.3	
	$\alpha_4=0.300\ 2$	0.07	
算例 2 20%	AG	$\alpha_1=0.178\ 2$	10.9
		$\alpha_2=0.189\ 6$	5.2
		$\alpha_3=0.205\ 5$	2.8
		$\alpha_4=0.196\ 6$	0.2
	$R_f=10\ \Omega$	$\alpha_1=0.178\ 2$	10.9
		$\alpha_2=0.179\ 0$	10.5
		$\alpha_3=0.208\ 4$	4.2
		$\alpha_4=0.185\ 6$	<u>7.2</u>

注：表 6 中字体加粗表示误差最小项，加下划线表示采用最小二乘法计算得到的结果。

由表 6 可看到，故障点位置误差最小值既可能是 3 种 PMU 组合计算值，也可能是最小二乘法求得解。故障点位置误差最大值只会出现在前 3 种 PMU 组合中，采用最小二乘法计算的故障点位置不会是误差最大值，有时是误差最小值，其精度更高。因此有限 PMU 下最小二乘法求得的故障点位置参与故障识别，其计算误差完全满足算法要求。

6 结论

本文研究了一种有限 PMU 下电网故障线路在线识别算法。根据故障发生时流入故障区域的正序、负序和零序电流明显增大特性，建立故障区域搜索方法。利用一个区域布置 PMU 边界节点的电气量，采用最小二乘法求解各线路的故障点位置，准确判

断出故障线路。IEEE14 节点系统上大量仿真实验验证了算法的有效性，不受故障位置、故障类型、过渡电阻的影响，求解的故障点位置精度能够满足算法要求。本算法较为简单，仅利用每个区域各边界节点的 PMU 电气量，计算量较小，相应的通信流量不会给广域通信网络带来过大负担。

参考文献

- [1] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 集中决策式广域后备保护的分区模型与优化算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 212-219.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Partition model and optimization algorithm for wide-area backup protection based on centralized decision-making mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 212-219.
- [2] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 基于证据理论融合的广域后备保护新方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 246-255.
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A new algorithm of wide area backup protection based on evidence theory fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 246-255.
- [3] TAN J C, CROSSLEY P A, KIRSCHEN D, et al. An expert system for the back-up protection of a transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 508-514.
- [4] 王晓茹, HOPKINSON K M, THORP J S, 等. 利用 Agent 实现新的电网后备保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 50-54.
WANG Xiaoru, HOPKINSON K M, THORP J S, et al. Developing a novel backup protection system for the electric power grid using Agents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 50-54.
- [5] 田聪聪, 文明浩. 具有高信息冗余的广域后备保护系统[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 214-219.
TIAN Congcong, WEN Minghao. A wide-area backup protection system with high information redundancy[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 214-219.
- [6] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 297-303.
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 297-303.
- [7] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-13.

- CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-13.
- [8] 王英涛, 印永华, 蒋宜国, 等. 我国实时动态监测系统的发展现状及实施策略研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 44-48.
WANG Yingtao, YIN Yonghua, JIANG Yiguo, et al. Study on current development situation and implementation strategy of real-time dynamic monitoring system in power systems in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 44-48.
- [9] 段刚, 严亚勤, 谢晓冬, 等. 广域相量测量技术发展现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 1-8.
DUAN Gang, YAN Yaqin, XIE Xiaodong, et al. Development status quo and tendency of wide area phasor measuring technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 1-8.
- [10] AZIZI S, DOBAKSHARI A S, SARMAADI S A N, et al. Optimal PMU placement by an equivalent linear formation for exhaustive search[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 174-182.
- [11] 徐岩, 鄧静. 基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 55-62.
XU Yan, ZHI Jing. Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 55-62.
- [12] 李虹, 李卫国, 彭书涛, 等. WAMS 中的 PMU 最优配置新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 415-419.
LI Hong, LI Weiguo, PENG Shutao, et al. New method of optimal PMU placement in WAMS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 415-419.
- [13] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 船舶电力系统相量测量单元多目标优化配置问题[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1267-1273.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Optimal phasor measurement units placement considering multi-objectives in shipboard power system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1267-1273.
- [14] LIAO Y. Fault location for single-circuit line based on bus-impedance matrix utilizing voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 609-617.
- [15] 谷松林. 基于广域保护系统的距离后备保护整定方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 40-47.
- GONG Songlin. A distance backup protection setting scheme based on wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 40-47.
- [16] 李珊, 何怡刚, 项胜, 等. 基于故障电压比较与多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 92-98.
LI Shan, HE Yigang, XIANG Sheng, et al. A wide backup protection algorithm based on fault voltage comparison and multi-information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 92-98.
- [17] 王波, 江全元, 陈晓刚, 等. 基于同步电压相量的故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 33-37.
WANG Bo, JIANG Quanyuan, CHEN Xiaogang, et al. Novel fault locating method based on synchronized voltage phasor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 33-37.
- [18] 马静, 许冬, 王桐, 等. 基于故障确信度的广域多重故障识别新算法[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 88-93.
MA Jing, XU Dong, WANG Tong, et al. A novel wide-area multiple-fault location algorithm based on fault confirming degree[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 88-93.
- [19] 童晓阳, 王睿, 孙明蔚. 基于保护元件与 PMU 数据多源的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 11-16.
TONG Xiaoyang, WANG Rui, SUN Mingwei. Wide-area backup protection algorithm based on multi-source data of protection elements and phasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 11-16.

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2016-03-01

作者简介:

童晓阳(1970-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电网故障诊断、广域后备保护、智能变电站;
E-mail: xyotong@swjtu.cn

王睿(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为广域后备保护;

王洪彬(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护;

连文超(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为广域后备保护。

(编辑 魏小丽)