

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.029

## 基于电流序分量的多源配电网故障定位方法

苑吉河<sup>1</sup>, 张曦<sup>1</sup>, 黄虎<sup>1</sup>, 张豪<sup>2</sup>, 朱金龙<sup>2</sup>

(1. 国网重庆市电力公司市南供电分公司, 重庆 400060;  
2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

**摘要:**为了克服传统配电网故障定位方法对分布式电源接入的适应性较差,且需要在馈线中配置大量测量装置导致成本增加的缺点,提出了一种基于电流序分量相关系数的多源配电网故障区段定位方法。首先利用叠加法分析了多端电源配电网故障点电流特征及定位原理,然后通过电源端口测量装置获取故障前后电源输出电流幅值差,再假设不同位置发生故障并计算此时各电源输出故障电流理论值,最后利用相关分析法计算理论与实测数据的相关系数,并提取相关系数最大的2个相邻节点实现区段定位。通过 ETAP 电力系统仿真平台搭建改进的 IEEE 33 节点模型模拟测量值,利用 Matlab 编程进行相关分析,所得结果验证了该方法的正确性。

**关键词:**配电网;分布式电源;故障定位;电流序分量;短路计算

中图分类号:TM744

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)05-0204-07

### 0 引言

分布式电源(distributed generation, DG)逐步接入配电网,会影响故障时短路电流的方向和大小,对继电保护造成不同程度的影响,导致基于保护动作情况的传统故障定位方法不能实现准确定位。研究能适应 DG 接入情况下的故障定位新方法对未来大力发展新能源技术具有重要意义。

文献[1]提出重整开关过流阈值,使开关在最严峻条件下能够区分系统提供的最小短路电流和 DG 提供的最大反向短路电流,从而沿用传统故障定位策略,但该方法需对 DG 接入容量和供电半径进行限制,与新能源发展趋势相悖;文献[2]提出主动断开故障上下游开关,观察保护返回情况进行判断的方法,简单易行,但影响了电网稳定性和开关寿命。随着配电自动化技术的成熟,大量馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)分散接入配网,利用其在检测到故障时上传的故障过流信息的方法又可以分为矩阵法和人工智能算法。文献[3—6]提出的改进矩阵算法原理简单、运算量小;文献[7—11]建立开关函数和适应度函数,利用人工智能算法搜索对开关信息和线路状态信息的最佳解释结果实现区段定位。但该类方法易受 FTU 上传信息消失或畸变影响,定位结果可信度不高。文献[12]基于双端电气量推导新的定位函数,利用函数幅值特性和线路等分法定位,但双端法不适合 DG 多端接入的情况。文献[13—14]利用暂态行波进行定

位,而配电网拓扑复杂、分支众多,行波信号衰减严重,不易提取波头,且需要精准时钟对时,不易实现;文献[15—18]借助电能质量检测系统建立节点电压暂降数据库,对故障后节点压降进行分析实现故障定位,但 DG 接入影响电压会使定位误差较大。

针对上述问题,文中提出一种仅利用变电站和 DG 端口测量的电流信息量的故障定位方法。通过测量装置记录各电源故障前后实际输出电流幅值差,经理论计算得到假设每个节点故障时各电源输出故障电流分量的理论值,利用相关分析法对实测值与理论计算值进行相关性分析,相关系数最高且相邻的2个节点所关联的区段即为故障区段。最后通过仿真验证了该方法对多 DG 接入有较强的适应性。

### 1 多电源接入下故障点注入电流分析

当系统中有多多个 DG 接入时,故障后各电源均会对故障点输出额外的故障电流,以图 1 所示单线图供电网络为例对故障点电流进行分析。图中 DG<sub>1</sub> 为变流器型; DG<sub>2</sub> 为电机型;  $\dot{E}_m$ ,  $\dot{E}_p$ ,  $\dot{E}_n$  和  $\dot{I}_{mf}$ ,  $\dot{I}_{pf}$ ,  $\dot{I}_{nf}$  分别为主电源、DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub> 的电源电势和故障时输出的电流;  $Z_1—Z_7$  为线路等效阻抗;  $I_f$  为故障点电流;  $R_f$  为过渡电阻。根据叠加原理,可将多电源等值电路简化为多个单电源等值电路,各等值电路中,其他电压源为短路,其他电流源为开路,分别计算各电源对故障点的注入电流,等值电路如图 2 所示。图中  $Z_m$ ,  $Z_p$ ,  $Z_n$  和  $\dot{I}_{f,m}$ ,  $\dot{I}_{f,p}$ ,  $\dot{I}_{f,n}$  分别为主电源、DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub> 的电源等效阻抗及其单独作用下的故障点电流。

收稿日期:2020-03-07;修回日期:2020-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877181)

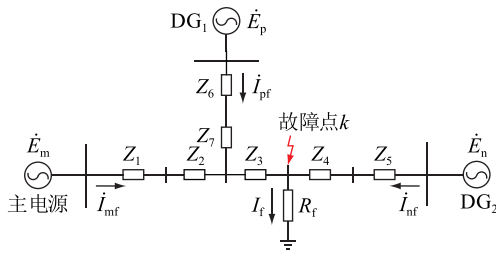


图1 多电源接入的故障情况

Fig.1 Multiple power supply failure conditions

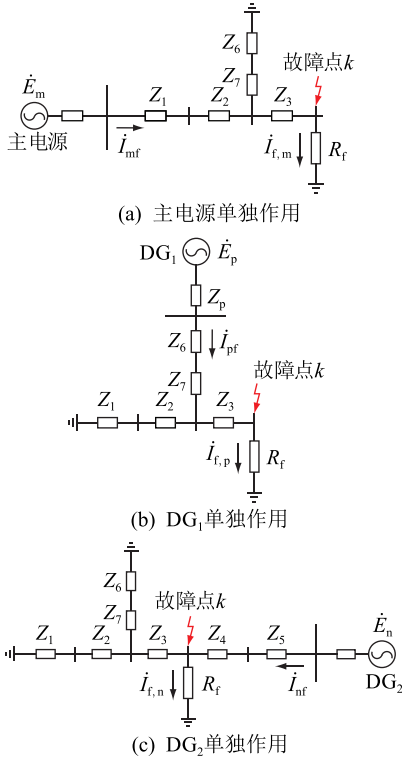


图2 各电源单独作用等效图

Fig.2 Equivalent diagram of each power supply alone

### 1.1 主电源短路电流贡献分析

主电源单独作用对故障点电流的贡献  $I_{mf,k}$  为:

$$I_{mf,k} = I_{mf,k}^* I_b = \frac{E_{m,PS}^*}{X_{m,k}^*} I_b \quad (1)$$

式中:  $E_{m,PS}^*$  为电压标么值,主电源通常取 1.05 p.u., 上标 \* 代表标么值;  $I_b$  为基准电流,根据基准容量和基准电压确定;  $X_{m,k}^*$  为主电源 m 到短路点 k 之间的等效阻抗,计算如下:

$$X_{m,k}^* = Z_m + Z_1 + Z_2 + \frac{Z_6 + Z_7}{Z_6 + Z_7 + Z_3} + R_f \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),则可以得到 k 点故障下主电源对短路电流的贡献。

确定了基准容量和基准电压后,基准电流确定,而主电源的电压标么值通常也是确定的,故主电源对故障点 k 的短路电流贡献主要取决于电源到

k 点的阻抗及其相连支路阻抗。

### 1.2 变流器型 DG 短路电流贡献分析

由于 DG 接入位置的电压一般不是基准电压,在计算 DG 短路电流贡献时,应利用 DG 容量和内阻抗进行计算<sup>[20]</sup>。DG<sub>1</sub>对短路电流的贡献  $I_{pf,k}$  为:

$$I_{pf,k} = X_{p,k}^* I_{sc,DG1}^* I_b \quad (3)$$

$$I_{sc,DG1}^* = k_{oc} I_{N,DG1}^* = k_{oc} \frac{P_{N,DG1}}{S_b} \quad (4)$$

$$X_{p,k}^* = Z_p + Z_6 + Z_7 + \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3} + R_f \quad (5)$$

式中:  $I_{sc,DG1}^*$  为 DG<sub>1</sub>的短路电流标么值;  $X_{p,k}^*$  为 p 电源(DG<sub>1</sub>)到短路点 k 之间的等效阻抗;  $P_{N,DG1}$  为 DG<sub>1</sub>的最大有功功率;  $S_b$  为基准容量;  $k_{oc}$  为变流器型 DG 的限流倍数,通常取 1.2~1.5;  $I_{N,DG1}^*$  为 DG<sub>1</sub>根据  $P_{N,DG1}$  计算得到能够提供的最大故障电流标么值。

### 1.3 电机型 DG 短路电流贡献分析

DG<sub>2</sub>单独作用对短路电流的贡献  $I_{nf,k}$  为:

$$I_{nf,k} = X_{n,k}^* I_{sc,DG2}^* I_b \quad (6)$$

$$I_{sc,DG2}^* = \frac{1}{X_{DG2}''} \frac{S_{N,DG2}}{S_b} \quad (7)$$

$$X_{n,k}^* = Z_n + Z_4 + Z_5 + R_f \quad (8)$$

式中:  $I_{sc,DG2}^*$  为 DG<sub>2</sub>的短路电流标么值;  $S_{N,DG2}$  为 DG<sub>2</sub>的额定容量;  $X_{DG2}''$  为 DG<sub>2</sub>的次暂态电抗;  $X_{n,k}^*$  为 n 电源(DG<sub>2</sub>)到短路点 k 之间的等效阻抗。

设故障前后系统各电源和负荷数量、容量、拓扑结构均不变,此时计算各电源对故障点电流的贡献仅与电源到短路点 k 的等效阻抗和过渡电阻有关。故障点 k 发生位置不同,各电源对故障点注入的电流会随着 k 点与各电源的相对距离变化而变化。利用这一特征,综合分析各端电源输出故障电流序分量大小,可以实现故障区段定位。

## 2 基于电流序分量的故障定位方法

### 2.1 定位方法流程

文中所提基于电流序分量的故障定位方法流程如图 3 所示。步骤如下:

(1) 首先需获取系统参数并应保证各元件等值参数的合理性和准确性,形成网络节点阻抗矩阵。

(2) 在网络中假设节点 k 发生故障并计算此时各电源输出各序电流理论值。

(3) 通过测量系统可采集到各电源端故障情况下输出的故障电流大小,并进行对称分解得到各序分量。

(4) 对系统实测值和理论计算值进行相关性分析,并遍历系统所有节点。

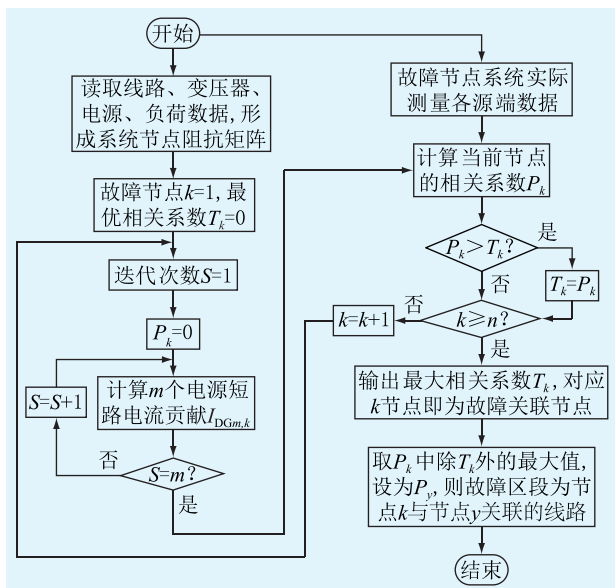


图3 故障定位流程

Fig.3 Flow chart of fault location

(5) 对比计算结果, 相关系数最高的节点即为故障节点。

### 2.2 系统实测量提取

由于故障前后的幅值差明显区别于负荷变化引起的幅值差, 且所需实测数据仅为电流幅值差, 故不要求各端测量装置在时间上的精确同步。通过测量装置提取故障后各电源端输出故障电流分量, 以三相电流为例, 故障分量为:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{abc,i,f} = \mathbf{I}_{abc,i,f}(t+T) - \mathbf{I}_{abc,i}(t) \\ \mathbf{I}_{abc,i,f} = [I_{ai,f} \quad I_{bi,f} \quad I_{ci,f}]^T \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{I}_{abc,i,f}$  为电源  $i$  的三相故障电流分量;  $I_{ai,f}$ ,  $I_{bi,f}$ ,  $I_{ci,f}$  分别为电源  $i$  的 a, b, c 相故障电流分量;  $\mathbf{I}_{abc,i,f}(t+T)$  为故障后  $T$  时刻电源输出故障电流有效值;  $\mathbf{I}_{abc,i}(t)$  为  $t$  时刻电源输出正常负荷电流有效值。分解序分量, 得到  $3 \times m$  个电源端实测值矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{fm,j,0} = [I_{DG1,j,0} \quad \cdots \quad I_{DGi,j,0} \quad \cdots \quad I_{DGm,j,0}]^T \\ \mathbf{I}_{fm,j,1} = [I_{DG1,j,1} \quad \cdots \quad I_{DGi,j,1} \quad \cdots \quad I_{DGm,j,1}]^T \\ \mathbf{I}_{fm,j,2} = [I_{DG1,j,2} \quad \cdots \quad I_{DGi,j,2} \quad \cdots \quad I_{DGm,j,2}]^T \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $m$  为电源数量; 0, 1, 2 分别为正序, 负序, 零序;  $j$  为故障位置且未知。

### 2.3 理论值计算

文中定位方法的重要影响因素是阻抗的准确计算, 电源及负荷的等效阻抗计算见附录 A。为了计算方便快捷, 引用文献[19]提出的含 DG 配电网的短路计算方法, 分别计算各电源接入点相连支路电流, 然后在 DG 并网处运用基尔霍夫电流定律算出故障时 DG 对故障点电流的贡献值, 如图 4 所示。

以正序网络为例,  $I_{f,DG1}$  计算如式(11)所示。

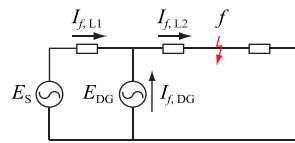


图4 DG 并网示意

Fig.4 DG grid connection schematic diagram

$$I_{f,DG} = I_{f,L2} - I_{f,L1} \quad (11)$$

式中:  $I_{f,DG}$  为  $f$  点故障时, DG 提供的短路电流;  $I_{f,L1}$ ,  $I_{f,L2}$  分别为 DG 接入点上游及下游的支路电流。计算支路电流时 DG 对系统向故障点提供短路电流的影响已经存在, 计算所得即为受影响之后的值。

在短路计算模型中分别以每一个节点故障为例, 计算各节点分别故障时各电源输出的短路电流, 得到故障电流矩阵, 如式(12)所示。

$$\mathbf{I}_{m,n,s} = \begin{bmatrix} I_{DG1,1,s} & \cdots & I_{DG1,k,s} & \cdots & I_{DG1,n,s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{DGx,1,s} & \cdots & I_{DGx,k,s} & \cdots & I_{DGx,n,s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ I_{DGm,1,s} & \cdots & I_{DGm,k,s} & \cdots & I_{DGm,n,s} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: 第  $k$  列向量的数据表示  $k$  节点故障时各电源对短路电流的贡献值;  $n$  为系统节点数;  $k$  为假设的故障节点;  $s=0, 1, 2$ , 分别为正序、负序、零序分量。

### 2.4 相关分析匹配度

相关分析考察了 2 个时域信号之间的相关程度, 文中将其应用于对 2 个一维矩阵中的元素进行相关分析, 并做归一化处理, 相关系数定义如下:

$$\rho_{j,k} = |\rho_{j,k}| = \sum_{k=1}^n \left| \frac{\sum_{M=1}^m \mathbf{j}(M) \mathbf{k}(M)}{\sqrt{\sum_{M=1}^m \mathbf{j}^2(M) \sum_{M=1}^m \mathbf{k}^2(M)}} \right| / N \quad (13)$$

式中:  $\rho_{j,k} \in (0, 1)$ ;  $\mathbf{j}(M)$  为实测向量组;  $\mathbf{k}(M)$  为式(12)中第  $k$  列向量。当  $\rho_{j,k} = 1$  表示 2 个数组完全相关, 说明  $k$  节点即为故障点;  $\rho_{j,k}$  越小, 表示  $k$  节点距离故障点电气距离越远。

将配电网中各节点按顺序编号并分别设置为故障节点, 结合深度优先搜索, 逐节点计算各序分量相关系数  $\rho_0, \rho_1, \rho_2$ , 然后求三序分量相关系数平均值。理想情况下, 若真实故障点发生在节点上, 则必定存在某一点故障电流计算值序分量与实际测量值相等, 其相关系数约等于 1。由于实际故障多发生在线路上以及过渡电阻和实际影响因素的

存在,将各个节点相关系数进行排序,相关系数最大的两相邻节点关联的区段即认为是故障区段。

### 3 IEEE 33 标准节点系统分析

文中采用改进的 IEEE 33 节点系统进行分析,系统结构如图 5 所示,额定电压为 12.66 kV,系统短路容量取 200 MV·A,系统中性点不接地。采用 ETAP 电力系统仿真平台搭建仿真模型,DG 接入类型和容量如表 1 所示。

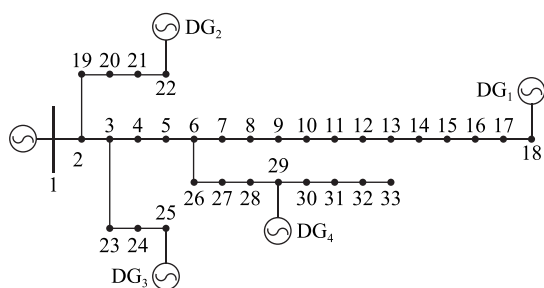


图 5 修改后 IEEE 33 节点系统

Fig.5 Modified IEEE 33 node system

表 1 DG 接入情况

Table 1 DG access situation

编号	接入节点	接入容量/(MV·A)	接口类型
DG <sub>1</sub>	18	0.4	电机型
DG <sub>2</sub>	22	0.3	变流器型
DG <sub>3</sub>	25	0.4	电机型
DG <sub>4</sub>	29	0.5	电机型

设节点 3 发生三相金属性故障,在仿真模型中记录各电源输出前后电流幅值差,在短路计算程序中计算所有节点分别故障后各电源端理论幅值差,将各电源的计算值与仿真值进行相关性分析,结果如图 6 所示。

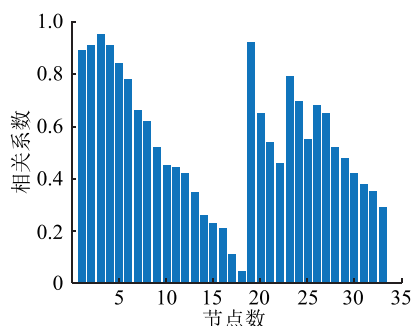


图 6 节点 3 三相故障定位结果

Fig.6 Node 3 three-phase fault location results

由图 6 可以看出,在所有节点的相关系数中,节点 3 的相关系数最高,可判断节点 3 为故障关联节点。观察与节点 3 相邻节点的相关系数,其中节点 2、节点 4、节点 23 的相关系数分别为 0.91,0.90,

0.79,故判断故障区段为节点 2、节点 3 关联的区段。以三相故障类型验证所有节点,定位结果准确率为 100%。

由于配电网多为小电流接地系统,单相接地故障电流微弱,为了验证文中方法在小电流接地系统单相接地故障情况下的定位能力,以节点 27 发生单相接地故障为例进行仿真,计算结果如图 7 所示。

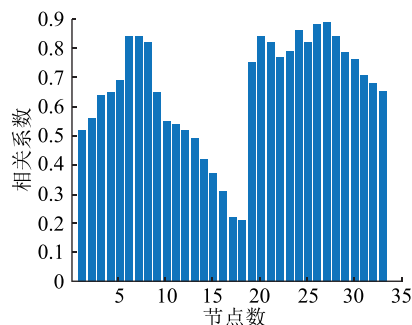


图 7 节点 27 单相接地故障定位结果

Fig.7 Node 27 single-phase ground fault location results

图 7 中节点 27 相关系数最高,可正确判断节点 27 发生故障,验证了方法在小电流接地系统中的有效性。以单相接地故障类型验证所有节点后,定位准确率为 87.9%,不能准确定位的节点处在多分支节点处。

依旧以节点 3 为例,分别设置不同过渡电阻情况,定位结果如图 8 所示。可以看出,在不同过渡电阻情况下,各节点相关系数存在较小的变化,但依然可以清晰判断出节点 3 的相关系数是最大的,验证了文中方法具有良好的抗过渡电阻能力。

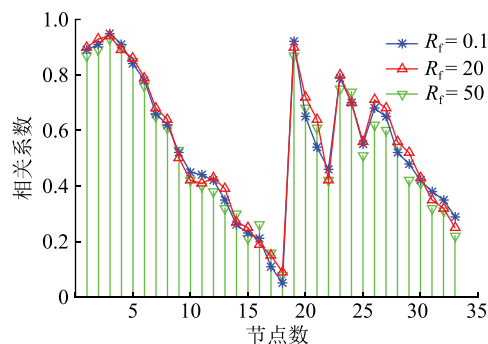


图 8 节点 3 两相短路接地故障定位结果

Fig.8 Node 3 two-phase short-circuit ground fault location results

该方法虽避免了各端测量的同步误差影响,但在采集的数据中提取电流幅值差时会存在时间窗选择导致误差的问题。当故障电流趋于稳定后,从中提取出稳定的故障电流幅值,与变化前的正常负荷电流求差。由于系统中过渡电阻及非线性元件等因素的影响,可能导致故障后故障电流进入稳态值的时间变长,截取的稳态值并非最终的稳态值,

从而导致误差。为了分析提取时间窗选择不同引起的误差对定位结果的影响,在仿真输出的理想稳态值上分别叠加 1%,5%,10%的误差,模拟故障过程在进入理想稳态之前提取幅值差引起的误差。选取节点 2,6,13,18,25,29,设置三相金属性故障进行定位误差的分析,结果如图 9 所示。

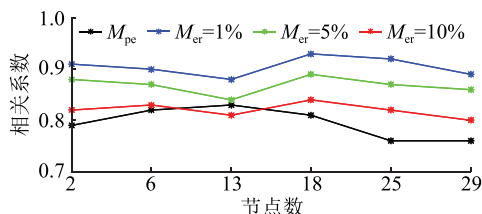


图 9 误差分析  
Fig.9 Error analysis

图中,  $M_{pe}$  为各节点保证定位准确的前提下所能承受的最大误差;  $M_{er}$  为误差百分数;黑色曲线为最大误差下对应的最小相关系数。由图 9 可知,节点 13 在 10%测量误差下会定位失败,其余节点的容差能力均大于 10%。说明在未达到稳态前提取幅值差引起的误差对方法的影响较小。

表 2 列出了不同故障类型发生在线路中点,经不同过渡电阻时的定位情况。

表 2 线路中点故障的定位结果  
Table 2 Line midpoint faults location results

故障线路	故障类型	故障距离/p.u.	过渡电阻/ $\Omega$	主关联节点	次关联节点	定位结果
2—3	BCG	0.5	10.0	2(0.91)	3(0.88)	准确
	BCG	0.5	15.0	2(0.87)	3(0.86)	准确
	AG	0.5	10.0	2(0.89)	3(0.78)	准确
	AG	0.5	15.0	2(0.84)	19(0.79)	错误
2—19	BC	0.5	20.0	2(0.86)	19(0.79)	准确
	BC	0.5	30.0	2(0.83)	19(0.74)	准确
	BCG	0.5	5.0	2(0.91)	19(0.88)	准确
	BCG	0.5	10.0	2(0.84)	19(0.81)	准确
6—7	ABC	0.5	0	7(0.98)	6(0.97)	准确
	ABC	0.5	20.0	6(0.91)	7(0.88)	准确
	BC	0.5	20.0	6(0.87)	7(0.84)	准确
	BC	0.5	50.0	6(0.79)	7(0.77)	准确

注:BCG 为 BC 两相短路接地故障;AG 为 A 相接地故障;BC 为 BC 相间故障;ABC 为 ABC 三相短路

从 2—3 线路中点发生两相短路接地故障可以看出,过渡电阻会在一定程度上影响关联系数的大小,但节点的相关系数变化趋势是同增同减,并不影响节点间相关系数的大小关系。设 2—3 线路发生单相接地,由于 2—19 线路阻抗较 2—3 线路小,当存在较大过渡电阻时,容易出现分支线路的误判。设线路 6—7 线路中点发生经较大过渡电阻的

两相短路时,判断结果准确。

由此可知,文中方法的定位准确率较高,对于后果较严重的短路故障均可准确定位故障线路,仅在单相接地故障且经较大过渡电阻时定位结果容易偏离到其他分支线路,此时应采取扩大定位范围的措施,即判断故障位于相关系数中前 3 个最大的相邻节点所关联的 2 条线路。

#### 4 结语

随着分布式发电技术的成熟,配电网将呈现出多源的发展趋势,对配电网故障定位技术提出了严峻的挑战。文中方法在双端阻抗法的原理之上,综合多端故障电流幅值差来映射故障距离,并采用相关分析方法定位故障区段。仿真结果显示该方法能够适应 DG 高渗透率接入的情况,且仅检测故障前后电流幅值差,无需在网络中装配大量测量装置,实现方便。

利用 DG 接入后增加的多端数据进行定位的方法顺应了未来配电网多源发展的趋势,但目前 DG 整体渗透率较低,数据维度较低,且 DG 出力不稳定,这些重要难点亟待解决。

本文得到四川省教育厅项目(18ZB0566)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 刘健,张小庆,同向前,等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):36-42.  
LIU Jian,ZHANG Xiaoqing,TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):36-42.
- [2] 孙景钉,陈荣柱,蔡轼,等. 含分布式电源配电网的故障定位新方案[J]. 电网技术,2013,37(6):1645-1650.  
SUN Jingliao,CHEN Rongzhu,CAI Shi, et al. A new fault location scheme for distribution system with distributed generations [J]. Power System Technology,2013,37(6):1645-1650.
- [3] 田果,黄小莉. 含光伏电源配电网的改进矩阵保护算法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):79-83.  
TIAN Guo,HUANG Xiaoli. An improved matrix protection algorithm with distribution network including photovoltaic power[J]. Power System Protection and Control,2014,42(17):79-83.
- [4] 黄佳乐,杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.  
HUANG Jiale,YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network [J]. Power System Protection and Control,2014,42(11):41-45.
- [5] 李开文,袁荣湘,邓翔天,等. 含分布式电源的环网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(12):62-68.  
LI Kaiwen,YUAN Rongxiang,DENG Xiangtian, et al. Improved

- matrix algorithm for fault location in ring distribution system with distributed generations [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(12):62-68.
- [6] 马腾飞,高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7):64-68.  
MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7):64-68.
- [7] 钟建伟,朱润枫,黄秀超,等. 基于双态二进制粒子群优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3):29-34.  
ZHONG Jianwei, ZHU Jianfeng, HAUNG Xiuchao, et al. Fault location in distribution network based on BBPSO algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3):29-34.
- [8] 吴凡,赵晋泉,朱斌,等. 基于MOPSO的含分布式光伏配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6):46-53.  
WU Fan, ZHAO Jinquan, ZHU Bin, et al. Faulty section location based on MOPSO for distribution networks with distributed photovoltaic generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6):46-53.
- [9] 张志文,刘军,周冠东,等. 基于改进二进制万有引力算法的含DG配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(4):30-34.  
ZHANG Zhiwen, LIU Jun, ZHOU Guandong, et al. Fault location in distribution network with distributed generations based on improved binary gravitational search algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(4):30-34.
- [10] 张颖,周韧,钟凯. 改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(1):224-228.  
ZHANG Ying, ZHOU Ren, ZHONG Kai. Application of improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1):224-228.
- [11] 陈奎,张云,王洪寅,等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24):57-62.  
CHEN Kui, ZHANG Yun, WANG Hongyin, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24):57-62.
- [12] 李澄,袁磊平,严慧,等. 基于函数幅值和线路等分法的两端故障定位研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(4):126-131.  
LI Cheng, YUAN Leiping, YAN Hui, et al. Two-terminal fault location method based on amplitude of function and line equal partition[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4):126-131.
- [13] 侯丽钢,汤向华,江辉,等. 应用于含有线-缆混合线路配电网的行波故障测距新方法[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2):117-122.  
HOU Ligang, TANG Xianghua, JIANG Hui, et al. A novel traveling wave fault location method applied to distribution networks with hybrid line composed of overhead line and cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2):117-122.
- [14] 邓丰,李欣然,曾祥君,等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15):4399-4409, 4640.  
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15):4399-4409, 4640.
- [15] 周超,田立军,侯燕文,等. 基于监测点优化配置的电压暂降故障点定位估计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16):102-107.  
ZHOU Chao, TIAN Lijun, HOU Yanwen, et al. Fault location estimation based on optimal voltage sag monitoring program[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16):102-107.
- [16] 刘颖英,王同勋,冯丹丹,等. 基于多重判据的电压暂降故障源定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1):103-111.  
LIU Yingying, WANG Tongxun, FENG Dandan, et al. Multiple criterions based voltage sag location method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1):103-111.
- [17] 赵晨雪,陶顺,肖湘宁. 基于电能质量检测系统电压暂降信息的故障定位估计方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2):642-648.  
ZHAO Chenxue, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. Fault location estimation based on voltage sag information of PQMS[J]. Power System Technology, 2016, 40(2):642-648.
- [18] 谭丹,杨洪耕,曲广龙. 基于故障距离分布函数的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2012, 36(10):119-124.  
TAN Dan, YANG Honggeng, QU Guanglong. Fault location for distribution network based on fault distance distribution function[J]. Power System Technology, 2012, 36(10):119-124.
- [19] 杨杉,同向前,刘健,等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7):1977-1982.  
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7):1977-1982.

---

#### 作者简介:



苑吉河

苑吉河(1977),男,博士,高级工程师,从事输变电运检管理工作(E-mail:897098610@qq.com);

张曦(1977),男,硕士,高级工程师,从事配电网安全性与智能化研究工作;

黄虎(1974),男,硕士,高级工程师,从事变电运行管理工作。

附录 A

A1 DG 等效阻抗模型

将 DG 等效为如图 A1 所示模型。

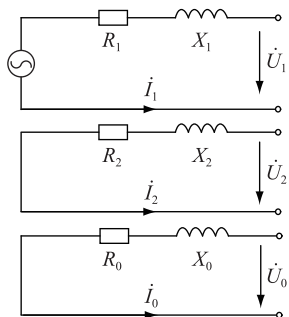


图 A1 DG 序分量等效图

Fig.A1 DG order component equivalent diagram

图中 DG 等效正序、负序和零序阻抗利用电源端测量装置电压电流分解序分量进行估算,计算结果为故障时刻 DG 的等效模型,避免了 DG 出力随机性大的影响,即:

$$Z_{m,1} = \Delta \dot{U}_{m,1} / \Delta \dot{I}_{m,1} \quad (A1)$$

$$\Delta \dot{U}_{m,1} = \dot{U}_{mF,1} - \dot{U}_L \quad (A2)$$

$$\Delta \dot{I}_{m,1} = \dot{I}_{mF,1} - \dot{I}_L \quad (A3)$$

$$Z_{m,2} = - \frac{\dot{U}_{mF,2}}{\dot{I}_{mF,2}} \quad (A4)$$

$$Z_{m,0} = - \frac{\dot{U}_{m,0}}{\dot{I}_{m,0}} \quad (A5)$$

式中:  $\dot{U}_L, \dot{I}_L$  分别为故障前的电压和电流;  $Z_{m,s}$  为电源等效内阻抗序分量;  $\dot{U}_{mF,s}, \dot{I}_{mF,s}$  分别为故障后的电源电压、电流,  $s=1,2,0$ , 分别为正、负、零序分量;  $\Delta \dot{U}_{m,1}, \Delta \dot{I}_{m,1}$  分别为故障前后电压和电流差值的正序分量;  $m$  为电源数。

A2 负荷等效模型

负荷恒阻抗模型可通过负荷额定有功功率  $P_{L,S}$  和负荷额定无功功率  $Q_{L,S}$  计算得到,如式(A6)所示。

$$Z_{L,S} = \frac{U_{N,S}^2 (P_{L,S} + jQ_{L,S})}{P_{L,S}^2 + Q_{L,S}^2} \quad (A6)$$

式中:  $U_{N,S}$  为  $S$  相负荷两端标称电压,  $S = a, b, c$ 。

Multi-source distribution network fault location method based on current sequence component

YUAN Jihe<sup>1</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>, HUANG Hu<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>2</sup>, ZHU Jinlong<sup>2</sup>

- (1. Shinan Power Supply Branch Company of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400060, China;
- 2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** In order to overcome the problem that the traditional distribution network fault location method has poor adaptability to distributed power generation (DG) access, and the need to configure a large number of measuring devices in the feeder to cause cost increase, a fault location method for multi-source distribution network based on correlation coefficient of current sequence component is proposed. Firstly, the superposition method is used to analyze the current characteristics and positioning principle of the fault point of the multi-terminal power distribution network. Then, the power terminal measurement device is used to obtain the amplitude difference of the output current of the power supply before and after the fault, and then assume that the fault occurs at different positions and calculate the theoretical value of the fault current of each power supply output. Finally, the correlation analysis method is used to calculate the correlation coefficient between the theoretical and measured data, and extract the two adjacent nodes with the largest correlation coefficient to achieve segment location. The improved IEEE 33 node model simulation measurement value is built by ETAP power system simulation platform. The Matlab programming is used to analyze the correlation. The result verifies the correctness of method.

**Keywords:** distribution network; distributed generation; fault location; current sequence component; short-circuit calculation

(编辑 方晶)