

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191169

基于5次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法

韦莉珊, 贾文超, 焦彦军

(华北电力大学(保定)电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 配电网发生单相接地故障后, 故障线路与非故障线路三相对地参数的不对称程度存在显著差异。基于该特征差异定义了线路故障后的导纳不对称度参数, 提出了一种运用导纳不对称度参数作为判据的故障选线方案。该方案配合5次谐波原理, 解决了中性点经消弧线圈接地系统故障线路与非故障线路故障差异消失的问题, 使该判据适用于不同类型的系统。理论分析以及PSCAD仿真结果表明: 该方法无需设置动作门槛, 灵敏性较高, 且导纳不对称度参数抗过渡电阻能力较强, 可作为现有选线判据的有效补充。

关键词: 配电网; 单相接地故障; 故障选线; 导纳不对称度; 5次谐波

Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry

WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: After a single phase-to-ground fault occurs in a distribution network, the asymmetrical degree of three-phase-to-ground parameters between fault line and non-fault line is significantly different. Based on this characteristic difference, an admittance asymmetry parameter is defined and a fault line selection scheme based on it is proposed. By combining the principle of the fifth harmonic, the scheme solves the problem such that the fault difference between fault line and non-fault line disappears in resonant grounding system. This makes the criterion suitable for different types of system. The theoretical analysis and PSCAD simulation result show that the method does not need to set the action threshold and has high sensitivity. The admittance asymmetry parameter also has strong ability to resist transition resistance. It can be used as an effective supplement to the existing line selection criteria.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2016MS87).

Key words: distribution network; single phase-to-ground fault; fault line selection; admittance asymmetry; fifth harmonic

0 引言

我国中低压配电网(3~66 kV)通常以中性点不接地与中性点经消弧线圈接地两种方式为主, 也被称为小电流接地系统。由于单相接地故障在配电网中出现次数最多, 且相间故障大多由单相接地故障发展而来, 因此当发生单相接地故障时, 迅速准确地选出故障线路对于防止故障范围进一步扩大和及时排除故障具有重要意义。

由于配电网电压等级较低, 在发生单相接地故

障时故障电流较小, 给选线增加了不小的难度, 消弧线圈的使用更是直接减小了故障线路与非故障线路的特征差异, 因此故障线路可靠识别一直没有得到圆满解决。

在故障选线方面国内外研究学者主要提出过基于稳态信息量的故障选线原理^[1-3]、基于暂态信息量的故障选线原理^[4-12]以及注入式选线原理^[13]这三大类。其中能有效规避消弧线圈不利影响的方法大多采用的是系统的稳态有功分量、暂态分量以及外加信号这几种方式。在这些方法中, 5次谐波虽然含量少, 易受负荷影响, 但既不用增加额外装置, 也不用考虑暂态分量持续时间短的问题, 是公认的消弧线圈接地系统的代表性选线方法。随着电力系

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084); 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(2016MS87)

统非线性负荷的增加以及电力电子器件和旋转元器件的广泛使用, 电网中谐波含量不断增加, 也为将来 5 次谐波选线真正利用到实际系统中提供了可能。

文献[14]以零序功率为主判据, 5 次谐波相位法为二次判据实现选线方案; 文献[15]利用小波分析法比较各线路零序暂态电流分解系数的模值和极性关系, 并结合 5 次谐波电流幅值和极性比较进行故障选线; 文献[16]通过综合各线路故障相和非故障相的 5 次谐波电流突变量以及本线路和相邻线路故障相的 5 次谐波电流突变量两个判据进行故障选线。

随着保护技术的发展, 相关学者认为故障的本质是网络拓扑结构的变化, 因此可以利用系统结构的变化特征构造选线判据^[17-21]。针对上述情况, 本文提出了一种新的单相接地故障保护方案, 在定义了线路导纳不对称度参数的基础上构建了故障线路和非故障线路的特征差异, 并结合 5 次谐波法消除了消弧线圈对故障选线的不利影响。该保护原理简单、灵敏性高, 且抗过渡电阻能力较强, 可以作为现有判据的有效补充。

1 导纳不对称度参数的提出

1.1 正常运行状况下的导纳不对称度

图 1 是配电网简化等值电路图, 图中已忽略了线路阻抗与线路对地绝缘电阻。

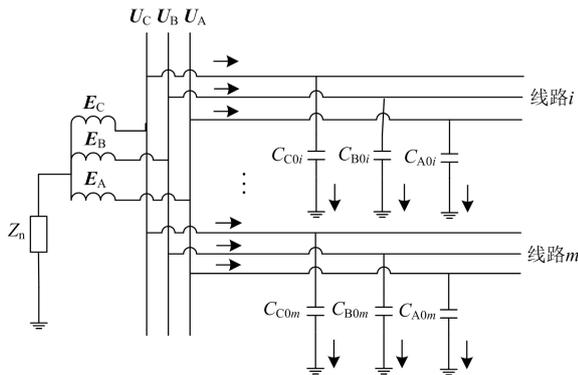


图 1 配电网简化等值电路图

Fig. 1 Simplified equivalent circuit of distribution network

图 1 中: E_A 、 E_B 、 E_C 为系统三相电源; U_A 、 U_B 、 U_C 为系统三相母线电压; U_0 为零序电压; C_{A0i} 、 C_{B0i} 、 C_{C0i} 为第 i ($i=1, 2, \dots, m$) 条线路的三相零序对地电容; Z_n 为中性点接地阻抗。

通常将式(1)中的参数 $K_{i|0}$ 称为正常运行时线路 i 的导纳不对称度 ($a = e^{j120^\circ}$ 为旋转因子)。

$$K_{i|0} = \left| \frac{C_{A0i} + a^2 C_{B0i} + a C_{C0i}}{C_{A0i} + C_{B0i} + C_{C0i}} \right| \quad (1)$$

由于在实际电力系统中, 正常运行时架空线路电网的不对称度约为 0.5%~1.5%, 理论极限达 3.5%^[22], 电缆线路的不对称程度相较于架空线路要小, 因此可以忽略线路三相对地电容的不对称度。此时线路正常运行时的导纳不对称度为 0。

1.2 故障后的导纳不对称度参数

假设系统第 f 条馈线 A 相发生单相接地故障, 则发生单相接地故障时的配电网等效电路如图 2 所示。

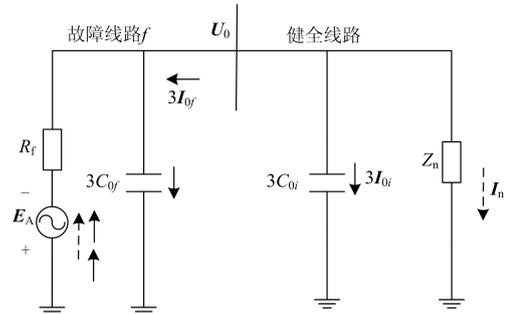


图 2 配电网单相接地故障等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of single phase-to-ground fault in distribution network

图 2 中: R_f 为过渡电阻; C_{0i} 和 C_{0f} 分别表示健全线路 i 和故障线路 f 的各相对地零序电容; $3I_{0i}$ 和 $3I_{0f}$ 分别表示健全线路 i 和故障线路 f 的零序电流; I_n 为流过中性点的电流。

当系统发生单相接地故障后, 非故障线路三相对地导纳并未发生改变, 导纳不对称程度依然为 0。而故障线路某一相增加了一条接地支路, 因此三相对地参数必然出现不对称的情况。

区别于式(1)正常运行状态下线路的导纳不对称度, 将故障后线路导纳不对称度的测量公式定义为

$$\tilde{K}_i = \left| \frac{3I_{0i} - 3j\omega C_{0i} \cdot U_0}{3j\omega C_{0i} \cdot U_0} \right| \quad (2)$$

式中, \tilde{K}_i 为任一线路 i 在故障发生后的导纳不对称度, 比值取绝对值可以在一定程度上减小相位测量误差的影响。

由图 2 知非故障线路 i 的零序电流为

$$3I_{0i} = 3j\omega C_{0i} \cdot U_0 \quad (3)$$

故障线路 f 的零序电流为

$$3I_{0f} = -3j\omega \sum_{i \neq f}^m C_{0i} \cdot U_0 - \frac{U_0}{Z_n} \quad (4)$$

对于中性点不接地系统 ($Z_n = \infty$), 故障线路的零序电流等于所有非故障线路的零序电流之和, 且方

向与非故障线路相反, 代入式(2)中分子不为 0 且幅值上有一定程度的增大。而健全线路在故障前后均满足分子为 0 的情况, 由此可知两者的导纳不对称度参数具有显著差异, 通过比较各线路导纳不对称度参数的大小可以实现故障选线。

但对于中性点经消弧线圈接地系统($Z_n=j\omega L$), 当消弧线圈处于全补偿状态时(脱谐度 $\nu=0$), 故障线路零序电流方向与健全线路相同, 且满足:

$$3I_{0f} = 3j\omega C_{0f} \cdot U_0 \quad (5)$$

代入式(2)后得到故障线路导纳不对称度参数也为 0, 此时故障线路与非故障线路的特征差异完全消失, 判据失效, 因此需加以改进。

2 小电流接地系统的导纳不对称度分析

2.1 基于 5 次谐波的导纳不对称参数选线原理

正常运行时, 由于系统中变压器、发电机等电机设备、电力电子设备以及负荷的非线性特性的影响, 各相电压或多或少含有谐波成分, 相当于在图 1 所示电源上叠加了 5 次谐波电源 $E_{A(5)}$ 、 $E_{B(5)}$ 和 $E_{C(5)}$, 因此线路的对地电容电流中存在谐波分量^[23]。

当系统中发生单相接地故障时, 中性点电压偏移, 零序电压中会出现 5 次谐波电压。而电容容抗会随着频率的增加而减小, 谐波电流含量将比较可观。因此, 单相接地故障时, 零序电流中存在稳定的 5 次谐波电流, 约为基波电流的 2%~8%^[24]。

单相接地故障时, 非故障线路 i 对地电容电流的 5 次谐波分量可表示为

$$\begin{cases} I_{Ai(5)} = 5j\omega C_{0i} \cdot U_{A(5)} \\ I_{Bi(5)} = 5j\omega C_{0i} \cdot U_{B(5)} \\ I_{Ci(5)} = 5j\omega C_{0i} \cdot U_{C(5)} \end{cases} \quad (6)$$

非故障线路的零序电流中 5 次谐波含量为

$$3I_{0i(5)} = I_{Ai(5)} + I_{Bi(5)} + I_{Ci(5)} = 5j\omega C_{0i} \cdot 3U_{0(5)} \quad (7)$$

式中, 下标(5)表示各电气量中提取到的 5 次谐波分量, 下文同理。

由于消弧线圈的电感是在基波条件下整定的, 因此在 5 次谐波的作用下, 一般可以忽略其补偿效果, 此时消弧线圈接地系统具有和中性点不接地系统中零序电流基波相同的特点。

因此, 为了解决上述判据在谐振接地系统中可能失效的情况, 对于中性点经消弧线圈接地系统, 提取测量数据中的稳态 5 次谐波分量计算其导纳不对称度参数。下面对这一方案下的导纳不对称度数值大小进行分析。

2.2 5 次谐波下消弧线圈接地系统的导纳不对称度

在 5 次谐波分量下, 各线路对地容抗减小为

$1/(5\omega C_{0i})$, 而消弧线圈感抗则增大为 $5\omega L$, 非故障线路 i 的零序电流中 5 次谐波分量同式(7), 而故障线路 f 的零序电流中 5 次谐波分量为

$$3I_{0f(5)} = -15j\omega \sum_{i \neq f}^m C_{0i} \cdot U_{0(5)} - \frac{U_{0(5)}}{5j\omega L} \quad (8)$$

相应地, 5 次谐波下的导纳不对称度测量公式应修改为

$$\tilde{K}_{i(5)} = \left| \frac{3I_{0i(5)} - 15j\omega C_{0i} \cdot U_{0(5)}}{15j\omega C_{0i} \cdot U_{0(5)}} \right| \quad (9)$$

已知系统脱谐度 ν 为

$$\nu = \frac{3 \sum_i^m \omega C_{0i} - \frac{1}{\omega L}}{3 \sum_i^m \omega C_{0i}} \quad (10)$$

将式(8)和式(10)代入式(9), 计算得到故障线路与非故障线路 5 次谐波分量下的导纳不对称度 $\tilde{K}_{f(5)}$ 与 $\tilde{K}_{i(5)}$ 分别为

$$\tilde{K}_{f(5)} = \left| \frac{\left(-15j\omega \sum_{i \neq f}^m C_{0i} - \frac{1}{5j\omega L} - 15j\omega C_{0f} \right) \cdot U_{0(5)}}{15j\omega C_{0f} \cdot U_{0(5)}} \right| = \left| \left(-\frac{24}{25} - \frac{\nu}{25} \right) \sum_i^m C_{0i} / C_{0f} \right| \quad (11)$$

$$\tilde{K}_{i(5)} = \left| \frac{15j\omega C_{0i} \cdot U_{0(5)} - 15j\omega C_{0i} \cdot U_{0(5)}}{15j\omega C_{0i} \cdot U_{0(5)}} \right| = 0 \quad (12)$$

在忽略消弧线圈对系统 5 次谐波的补偿作用时 ($L=\infty$, 可视为中性点不接地系统), 脱谐度 $\nu=1$, 此时有

$$\tilde{K}_{f(5)} = \left| \sum_i^m C_{0i} / C_{0f} \right| \quad (13)$$

根据分析可得小电流接地系统导纳不对称度的几个特点。

(1) 在忽略消弧线圈作用时, 健全线路的导纳不对称度参数为 0, 而故障线路的导纳不对称度参数大于 1, 数值上约等于系统总对地电容与故障线路对地电容的比值, 这一数值也反映了中性点不接地系统在基波分量下计算出的导纳不对称度。

(2) 故障线路导纳不对称度参数值理论上与过渡电阻无关, 故障线路的长度越短, 系统规模越大, 则故障差异越明显。

根据这一数值差异, 在单相接地故障发生后, 通过比较各线路 5 次谐波分量下导纳不对称度参数

的大小,即可实现故障选线。

实际上根据式(11),由于系统过补偿度一般设置在 5%~10%,因此系统脱谐度对导纳不对称度的影响较小,即使在全补偿情况下也可以实现故障线路和非故障线路的辨识,很好地避免了基波情况下两者故障差异完全消失的情况。

3 选线方案

根据 2.2 节的分析,确定选线步骤如下。

(1) 以基波零序电压作为启动元件,动作定值为额定电压的 15%,检测系统是否发生单相接地故障。

(2) 采集母线电压和各馈线出口处电气量,借助三相电压、电流的测量量合成对应的零序分量。

(3) 若是中性点不接地系统,直接利用零序电压和零序电流基波分量计算各条线路的导纳不对称度参数 \tilde{K} ; 对于中性点经消弧线圈接地系统,则利用傅里叶变换提取测量量中的 5 次谐波分量计算各条线路的 \tilde{K} 参数。

(4) 综合比较得出导纳不对称度最大的线路为故障线路。考虑到母线故障时通过对比参数大小判定故障线路容易导致误判,因此添加判据:当获得的导纳不对称度参数最大与最小值差异大于 0.5 时才认为是馈线发生故障,否则判定为母线故障。

选线具体流程如图 3 所示。

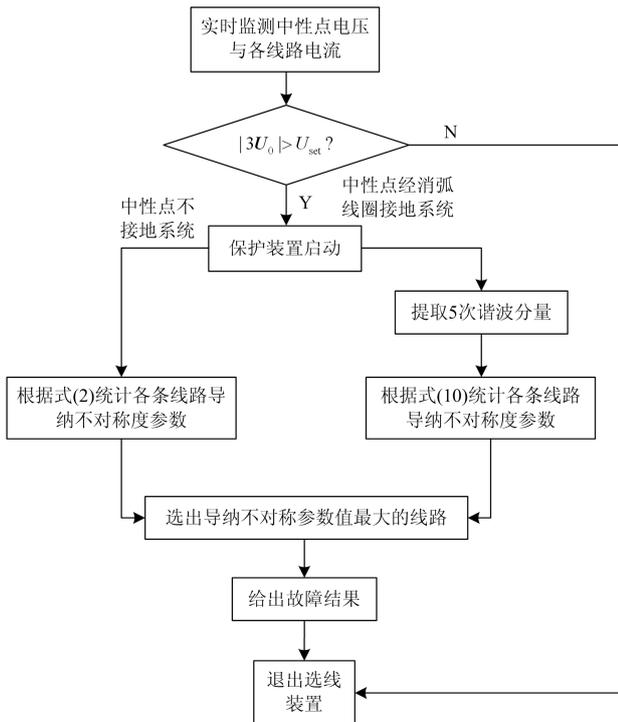


图 3 基于导纳不对称参数的选线方案流程图

Fig. 3 Flow chart of line selection scheme based on admittance asymmetry parameter

其中,保护装置中的线路对地导纳采用实测值进行整定^[25-26]。

对于健全线路,理论上其导纳不对称度参数为 0 或接近于 0,在系统正常运行时即使选线装置因为某些异常原因误启动,但各条线路均满足 \tilde{K} 值等于 0 或接近于 0 的情况,保证了保护装置不误动。

如前所述,本判据无需设置保护动作门槛,通过比较各条线路的 \tilde{K} 值大小即可实现故障选线,健全线路与故障线路 \tilde{K} 值差异明显,而且测量容易获得,不用增加额外测量装置,具有较高的灵敏性。

4 仿真分析和验证

4.1 系统模型

运用 PSCAD 仿真软件建立的仿真算例如图 4 所示。配电系统电压等级为 35 kV,含有 5 条架空出线 L1—L5。

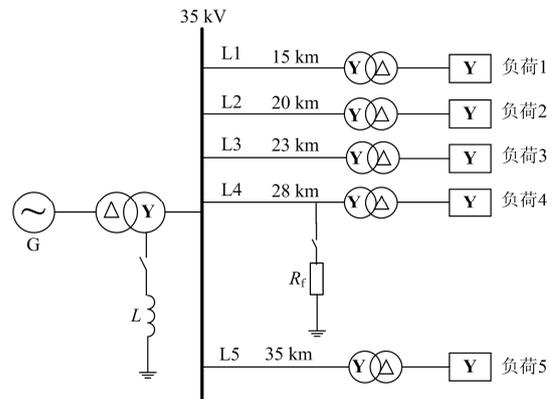


图 4 35 kV 配电系统仿真模型图

Fig. 4 Simulation model of 35 kV distribution system

由于线路较短,因此模型中采用集中参数的 π 型等值电路模型,1—5 号线路的长度如图 4,具体参数设置如下:正序电阻为 0.17 Ω /km,正序电感为 1.21 mH/km,正序电容为 9.12 nF/km;零序电阻为 0.23 Ω /km,零序电感为 5.475 mH/km,零序电容为 6.01 nF/km。单相接地故障发生在架空线路 L4 上,故障距离母线 15 km,改变配电变压器 35 kV 侧中性点开关的状态,分别模拟系统中性点不接地和中性点经消弧线圈接地时经不同过渡电阻发生接地故障的情况。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 中性点不接地系统

设置图 4 仿真模型的中性点开关断开,过渡电阻值依次设置为 0.001 Ω 、100 Ω 、1 000 Ω 和 5 000 Ω ,根据采集到的零序电压和各条线路的零序电流,计算单相接地故障后各条线路的导纳不对称度参数,

得到的统计结果见表 1。

由于中性点不接地系统可以看成中性点经消弧线圈接地系统在 $L = \infty$ 情况下的特例, 根据式(13)得到故障线路导纳不对称度参数理论上等于系统总电容与自身对地电容的比值。由于本文在仿真模型中将所有线路单位长度对地电容设置为统一参数, 因此理论上故障线路的导纳不对称度即为系统总线路长度与自身线路长度的比值, 经计算理论值为 4.321 4。

表 1 中性点不接地系统故障参数识别统计

Table 1 Statistics of fault identification parameters of neutral ungrounded system

过渡电阻 R_f/Ω	导纳不对称度参数					选线结果
	L1	L2	L3	L4(故障)	L5	
0.001	0.001 6	0.001 6	0.002 3	4.321 4	0.004 0	L4
100	0.001 2	0.001 5	0.001 9	4.321 2	0.004 7	L4
1 000	0.001 4	0.001 5	0.001 9	4.321 2	0.004 6	L4
5 000	0.001 5	0.001 9	0.002 0	4.321 0	0.004 5	L4

从表 1 的仿真结果和理论分析结果可以看出:

(1) 中性点不接地系统故障线路的导纳不对称参数约为 4.321 2, 与理论计算值相近; 而健全线路导纳不对称参数为 10^{-3} 数量级, 接近于 0, 两者具有明显差异, 可以实现准确选线。

(2) 在过渡电阻由 0 变化到 5 000 Ω 的过程中, 故障线路的导纳不对称度参数没有明显变化。

4.2.2 中性点经消弧线圈接地系统

闭合中性点处的开关, 调节消弧线圈的电感, 分别模拟脱谐度为 0(全补偿)与-10%(过补偿)时经不同过渡电阻接地故障的情况。根据仿真数据分别计算和统计基波分量和 5 次谐波分量下各条线路的导纳不对称度参数, 仿真结果见表 2。

由表 2 可以看出:

(1) 中性点经消弧线圈接地系统在全补偿情况下, 故障线路与健全线路在基波分量下的导纳不对称度参数数量级相同且均接近于 0, 故障差异消失。

(2) 在过补偿系统中, 以基波分量计算出的非故障线路导纳不对称度参数仍接近于 0, 故障线路则约为 0.43, 虽然从仿真结果来看仍然大于非故障线路, 但两者数值均较小且数量级相近, 再考虑到实际系统中互感器测量误差的存在和保护装置识别精度不佳等不利因素, 因此利用基波分量计算导纳不对称度参数作为判据仍有很大可能失效。

(3) 通过提取测量量的 5 次谐波分量, 计算导纳不对称度参数, 使全补偿系统故障线路的 \tilde{K} 参数由 0.01 增加到 4.22, 过补偿系统故障线路的导纳不对称参数由 0.43 增加到 4.19, 故障线路的特征参数明

表 2 中性点经消弧线圈接地系统故障参数识别统计

Table 2 Statistics of fault identification parameters of neutral grounding system through arc suppression coil

脱谐度	过渡电阻 R_f/Ω	数据分量	导纳不对称度参数					选线结果
			L1	L2	L3	L4 (故障)	L5	
$v=0$	0.001	基波	0.001	0.001	0.002	0.009	0.003	—
		5 次谐波	0.010	0.012	0.015	4.220	0.036	L4
	100	基波	0.001	0.001	0.002	0.008	0.002	—
		5 次谐波	0.010	0.012	0.014	4.219	0.038	L4
	1 000	基波	0.002	0.001	0.002	0.009	0.002	—
		5 次谐波	0.001	0.012	0.015	4.219	0.036	L4
5 000	基波	0.001	0.001	0.001	0.008	0.002	—	
	5 次谐波	0.009	0.011	0.014	4.221	0.036	L4	
$v=-10\%$	0.001	基波	0.003	0.001	0.002	0.431	0.002	—
		5 次谐波	0.009	0.011	0.015	4.194	0.036	L4
	100	基波	0.001	0.001	0.002	0.431	0.002	—
		5 次谐波	0.002	0.007	0.018	4.194	0.039	L4
	1 000	基波	0.001	0.001	0.002	0.430	0.002	—
		5 次谐波	0.009	0.012	0.015	4.190	0.036	L4
5 000	基波	0.001	0.001	0.002	0.428	0.002	—	
	5 次谐波	0.010	0.011	0.015	4.183	0.037	L4	

显增大。虽然非故障线路的 \tilde{K} 参数也有很小程度的增加, 但相较于故障线路的导纳不对称度而言, 数量级很小, 其增大程度可以忽略。

(4) 随着过渡电阻的增大, 故障线路的导纳不对称度参数没有受到明显影响, 证明该算法抗过渡电阻的能力较强。

4.2.3 母线附近故障

为了增加数据对比, 将故障点设置在 L4 距离母线 0.5 km 处, 得到的仿真结果见表 3, 表中仅展示中性点不接地系统以及过补偿度为 10%的系统, 在过渡电阻为 0.001 Ω 以及 1 000 Ω 时的数据。

表 3 母线附近故障参数识别统计

Table 3 Statistics of fault identification parameters near bus

系统类型	过渡电阻 R_f/Ω	导纳不对称度参数					选线结果
		L1	L2	L3	L4	L5	
中性点不接地	0.001	0.002	0.001	0.002	4.321	0.004	L4
中性点经消弧线圈接地	1 000	0.001	0.002	0.002	4.321	0.004	L4
中性点经消弧线圈接地	0.001	0.006	0.010	0.012	4.193	0.029	L4
中性点经消弧线圈接地	1 000	0.007	0.010	0.012	4.190	0.030	L4

由表 3 的仿真结果可以看出, 故障点位置对参数的影响很小, 几乎可以忽略。

5 结论

本文从故障后故障线路与非故障线路三相接地参数的不对称程度存在差异的角度出发, 定义了线

路故障后的导纳不对称度参数，提出了一种运用导纳不对称度参数作为判据的故障选线方案。该方案同时配合 5 次谐波，消除了消弧线圈对故障选线的不利影响。仿真结果表明：

(1) 该算法指标在非故障线路与故障线路上具有明显的故障特征差异，算法具有较高的灵敏性。

(2) 该方案能适用于不同类型接地系统，理论上不受过渡电阻的影响，承受过渡电阻的能力较强，若与其他易受过渡电阻影响的方法配合使用，可以在一定程度上为保护方案提供可靠补充。

但不可否认的是 5 次谐波数量级较小，易受负荷、CT 不平衡电流和过渡电阻的影响，在实际应用中选线效果并不理想，且随着过渡电阻的增大，零序分量的测量受到系统不平衡以及测量误差的影响加大，有可能造成判据失效，因此仍然需要进一步研究改进。

参考文献

[1] CHEN Y Q, FINK O, SANSAVINI G. Combined fault location and classification for power transmission lines fault diagnosis with integrated feature extraction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 561-569.

[2] ZENG Xiangjun, YU Kun, WANG Yuanyuan, et al. A novel single phase grounding fault protection scheme without threshold setting for neutral ineffectively earthed power systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(3): 73-81.

[3] ZENG Xiangjun, LI K K, CHAN W L, et al. Ground-fault feeder detection with fault-current and fault-resistance measurement in mine power systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(2): 2072-2079.

[4] RAFINIA A, MOSHTAGH J. A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55: 261-274.

[5] WU Xiaomin, WANG Dianhong, CAO Weihua, et al. A genetic-algorithm support vector machine and D-S evidence theory based fault diagnostic model for transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4186-4194.

[6] 陈豪威, 王媛媛, 唐夏菲, 等. 基于 S 变换暂态能量与方向的无整定配电网选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 71-78.
CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, TANG Xiafei, et al. A

new fault line selection method for distribution network system based on transient energy and direction of S-transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 71-78.

[7] 姜博, 董新洲, 施慎行. 基于单相电流行波的配电网单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6216-6227.
JIANG Bo, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. A method of single phase to ground fault feeder selection based on single phase current travelling wave for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6216-6227.

[8] 束洪春, 龚振, 田鑫萃, 等. 基于故障特征频带及形态谱的单相接地故障选线[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1041-1048.
SHU Hongchun, GONG Zhen, TIAN Xincui, et al. Single line-to-ground fault line selection based on fault characteristic frequency band and morphological spectrum[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1041-1048.

[9] DEHGHANI M, KHOOBAN M H, NIKNAM T. Fast fault detection and classification based on a combination of wavelet singular entropy theory and fuzzy logic in distribution lines in the presence of distributed generations[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 455-462.

[10] 龙茹悦, 黄纯, 汤涛, 等. 一种谐振接地系统的配电网路接地故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 21-29.
LONG Ruyue, HUANG Chun, TANG Tao, et al. Line selection method for grounding fault in resonant grounding distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 21-29.

[11] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-28.

[12] GARCIA M, CATANACH T, WIEL S V, et al. Line outage localization using phasor measurement data in transient state[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 3019-3027.

[13] 王凤, 康怡. 基于脉冲信号注入法的小电流接地选线技术[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 90-93, 98.
WANG Feng, KANG Yi. Pulse signal injection based faulty line detection for small neutral grounding system[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 90-93, 98.

[14] 徒有锋, 何俊佳, 周志成, 等. 基于零序功率和谐波相位综合法的小电流接地系统微机选线装置[J]. 高压电

- 器, 2006, 42(3): 33-36.
- TU Youfeng, HE Junjia, ZHOU Zhicheng, et al. NUGS choosing earth-fault line device based on zero sequence power method and harmonic phase method[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 33-36.
- [15] 刘渝根, 王建南, 马晋佩, 等. 结合小波包变换和 5 次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1519-1525.
- LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1519-1525.
- [16] 陈志亮, 范春菊. 基于 5 次谐波突变量的小电流接地系统选线[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 37-41.
- CHEN Zhiliang, FAN Chunju. Selection of low-current grounding system based on 5 harmonic mutations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 37-41.
- [17] 赵军, 袁雪琼, 阮琦, 等. 基于对地参数跟踪测量的不接地系统单相接地故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 81-85.
- ZHAO Jun, YUAN Xueqiong, RUAN Qi, et al. Research on single phase grounding fault phase selection based on ground parameter tracking and measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 81-85.
- [18] SAGASTABEITIA K J, ZAMORA I, MAZON A J, et al. Phase asymmetry: a new parameter for detecting single-phase earth faults in compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2251-2258.
- [19] 贾文超, 黄少锋. 扩大单元接线发电机组定子接地保护的选择性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4941-4949.
- JIA Wenchao, HUANG Shaofeng. Research on selectivity of stator ground fault protection for generators in expanded unit connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4941-4949.
- [20] NIKANDER A, PERTTI J. Identification of high impedance earth faults in neutral isolated or compensated MV networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1187-1194.
- [21] SAGASTABEITIA K J, ZAMORA I, MAZON A J, et al. Low-current fault detection in high impedance grounded distribution networks, using residual variations of asymmetries[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(12): 1252-1261.
- [22] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [23] 薛永端, 高旭, 苏永智, 等. 小电流接地故障谐波分析及其对谐波选线的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 60-64.
- XUE Yongduan, GAO Xu, SU Yongzhi, et al. Analysis of harmonic in non-solidly earthed network and its influences on harmonic based earth fault protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 60-64.
- [24] 陈景文, 褚恩亮, 李英春, 等. 基于贝叶斯分类器的谐振接地故障选线系统设计[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 99-104.
- CHEN Jingwen, CHU Enliang, LI Yingchun, et al. Design of resonant ground fault line selection system based on Bayesian classifier[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 99-104.
- [25] 杨磊, 曾祥君, 喻锴, 等. 新型谐振接地系统接地故障全补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 57-62.
- YANG Lei, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Novel method of full compensation for grounding fault in resonant grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 57-62.
- [26] LIU Baowen, MA Hongzhong, XU Honghua, et al. Single-phase-to-ground fault detection with distributed parameters analysis in non-direct grounded systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 139-147.

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2020-03-06

作者简介:

韦莉珊(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 326770849@qq.com

贾文超(1984—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: jiawenchao_snow@163.com

焦彦军(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 许威)