

非线性负荷对小电流接地故障谐波选线的影响分析

薛永端^{1,2}, 李长安³, 徐丙垠^{1,2}

(1. 山东理工大学电气技术研究所, 山东 淄博 255049; 2. 山东科汇电气股份有限公司, 山东 淄博 255087;
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对小电流接地系统单相接地故障的谐波选线原理, 分析得出: 故障点故障前谐波电压大小是决定选线可靠性的主要因素。通过分析非线性负荷作为谐波源的特征, 及正常运行时产生的谐波电压电流在线路中的分布规律, 发现非线性负荷谐波源占主导作用的系统中发生稳定性接地故障时, 谐波选线可靠性与故障点位置密切相关, 总体而言故障点距离非线性负荷较近时选线可靠性较高, 而远离非线性负荷时选线可靠性较低。同时, 三相负荷非线性程度不对称时, 产生谐波电流大的相选线可靠性高。仿真结果验证了上述观点。

关键词: 小电流接地系统; 单相接地故障; 故障选线; 谐波选线; 可靠性分析; 非线性负荷

Influences of non-linear load to harmonic-based earth fault protection in non-solidly earthed network

XUE Yong-duan^{1,2}, LI Chang-an³, XU Bing-yin^{1,2}

(1. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Kehui Electric Co., Ltd., Zibo 255087, China;
3. Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Thorough analysis to the principle of harmonic-based earth fault protection (identification to the line with a single phase to earth fault) in non-solidly earthed network is made to find that the main factor affecting the reliability of harmonics-based protections is the amplitude of pre-fault harmonic voltage at the fault point. The characteristics of non-linear load as a harmonic source and the distribution of harmonic voltage and current produced by non-linear load are analyzed. It is discovered that the reliability of harmonic-based protection depends on the position of a fault point very much when the stability fault occurred in the network only including non-linear load harmonic source. The closer to the non-linear load the fault is, the higher the reliability is. It is also found that the protection has better reliability when fault is on the phase with larger harmonic current amplitude when the non-linear load has significant imbalance. The analysis results are proved by digital simulation.

Key words: non-solidly earthed network; single phase to earth fault; earth fault protection; harmonic-based protection; reliability analysis; non-linear load

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0044-06

0 引言

小电流接地系统单相接地故障选线的重要性日益明显。目前已提出大量的故障选线算法^[1-9], 部分实现了现场应用^[7-9], 但实用效果仍良莠不齐。

利用故障产生的谐波电压电流特征选择故障线路(简称谐波选线), 是针对谐振接地(经消弧线圈接地)系统的一个代表性的选线方法^[1-4], 但其在现场的实用效果并不理想。对于谐波选线的可靠性问题鲜见有相关报道, 还有待于深入分析研究。

谐波选线的基础是故障后系统中存在谐波电压和谐波电流。故障产生的谐波信号除故障点非线性

因素外, 还与故障前系统中的谐波有关。

配电网的谐波源分为电源侧、负荷侧(一般由非线性负荷产生)两类, 故障后又增加了故障点谐波源(一般由非线性弧光电阻产生)。由于技术的快速发展, 形式多样的现代电力电子等非线性设备已成为配电网的首要谐波源, 研究其对谐波选线的影响首当其冲。即, 本文的研究对象仅限于由非线性负荷所产生的谐波特征及其对谐波选线可靠性的影响。

本文的研究思路为: 从分析谐波选线可靠性与故障前谐波电压电流的关系, 以及非线性负荷产生的谐波特征及其在线路中的分布规律入手, 研究非

线性负荷对故障后谐波电压电流的影响, 进而发现故障点相对于非线性负荷的位置以及故障相与谐波选线可靠性之间的关系。

1 谐波选线的可靠性分析

1.1 谐波选线的基本原理

根据故障后故障线路零序电流 5 次谐波分量幅值最大、极性和流向与健全线路相反的特点, 基于 5 次谐波零序电流幅值比较、极性比较、功率方向等算法可以确定故障线路^[1-2]。

文献[3]将零序电流工频分量的群体比幅比相选线原理应用到 7 次谐波分量选择故障线路。

也有文献提出综合利用 5 次、7 次等多个谐波分量实现选线^[4]。

即, 谐波选线主要是根据故障产生的零序电流或相电流中谐波分量在故障线路与健全线路中的幅值、极性(流向)差异确定故障线路, 其主要特点是可适用于谐振接地系统。

1.2 谐波选线的可靠性与故障前谐波关系分析

在外界干扰作用下, 检测方法利用的信息量越大, 信噪比越大, 检测可靠性就越高。因此, 谐波选线的可靠性主要取决于故障产生的谐波电流大小。

根据故障分析的叠加理论^[10], 故障后系统的谐波电流可以看作系统正常运行时的谐波电流与故障产生的谐波电流 \dot{I}_{nh} 的简单叠加。在稳定性的接地故障中, \dot{I}_{nh} 主要取决于接地点过渡电阻 R_f 、系统零序分布电容 C_0 和故障点虚拟谐波电压源 \dot{U}_{nh} :

$$\dot{U}_{nh} = \sum_{n=2}^{\infty} \dot{U}_{nfh} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{nh} = \sum_{n=2}^{\infty} \dot{I}_{nfh} = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\dot{U}_{nfh}}{jn\omega_0 C_0 + R_f} \quad (2)$$

其中: ω_0 为工频角频率; \dot{U}_{nfh} 、 \dot{I}_{nfh} 为 n 次谐波电压、电流。

根据故障分析理论^[10], 虚拟谐波电压源与故障点在故障前的谐波电压幅值相等、极性相反。

因此, 稳定性接地故障时谐波选线的可靠性主要依赖于故障点在故障前的谐波电压: 该电压幅值越大, 故障产生的谐波电流越大, 则选线可靠性越高。相应地, 故障前线路中的谐波电流与故障谐波电流之间的关系是通过前者与谐波电压之间关系实现转化的, 故谐波选线的可靠性与故障前线路中的谐波电流并无直接关系。

2 非线性负荷对谐波选线可靠性的影响

2.1 非线性负荷的谐波源特征

在工频正弦电压作用下, 非线性负荷产生的谐波电流主要取决于负荷本身的性质, 与系统其它参数无关, 可把该谐波源看作恒流源。即把非线性负荷看作与工频对应的线性负荷和谐波电流源的并联叠加, 如图 1 所示。这样整个系统均由线性元件构成。

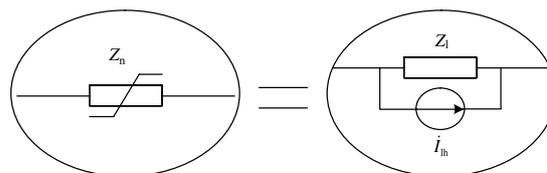


图 1 非线性负荷的谐波源等效图

Fig.1 Equivalent harmonic source of non-linear load

图中: Z_n 为非线性负荷的阻抗; Z_l 为与工频对应的线性负荷阻抗; I_{nh} 为谐波电流源。

不同类型非线性负荷产生的谐波类型也不同, 多数仅产生奇数次(主要是 5 次和 7 次)谐波, 有些特殊设备(如电弧炉等)也会产生偶数次谐波。因此, 图 1 中谐波源应为多个单次谐波电流源的线性叠加, 具体研究时可根据选线判据所采用的谐波类型进行取舍。以下均以单一频率谐波为例进行分析。

将工频下序分量的概念扩展到其它频率下。三相负荷非线性情况相同时, 产生的谐波电流仅包含正序分量, 否则同时包含正序分量和负序分量。由于系统结构的特点, 该谐波电流无零序分量。

在正常运行和接地故障期间, 非线性负荷产生的谐波电流在各相线路中总是存在且不发生变化。

2.2 单谐波源单相系统正常时线路谐波分布规律

以具有多条无分支出线的单相系统为例进行分析, 设仅有一条出线末端带有非线性负荷。

图 2(a) 给出了非线性负荷所在线路的等效电路图, 其中: M 为母线; L 为负荷; D 为观测点; Z_l 为负荷线性化后的阻抗; \dot{I}_{nh} 为谐波电流源; Z_s 为系统电源侧(变压器正序或负序)阻抗; Z_l 为其它线路等效阻抗; Z_{l1} 和 Z_{l2} 分别为 D 到 L 间线路阻抗和线路对地阻抗; Z_{21} 和 Z_{22} 分别为 D 到 M 间线路阻抗和线路对地阻抗; l_1 为 D 到 L 间线路长度; l_2 为 D 到 M 间线路长度。

对于配电网, 一般有 $|Z_s| \ll |Z_l|$, $|Z_s| \ll |Z_{l1}|$, $|Z_s| \ll |Z_{l2}|$, $|Z_s| \ll |Z_{21}|$, $|Z_s| \ll |Z_{22}|$,

$|Z_{21} + Z_{11}| \ll |Z_1|$ 。因此可以将系统进一步简化为图 2 (b) 所示电路。

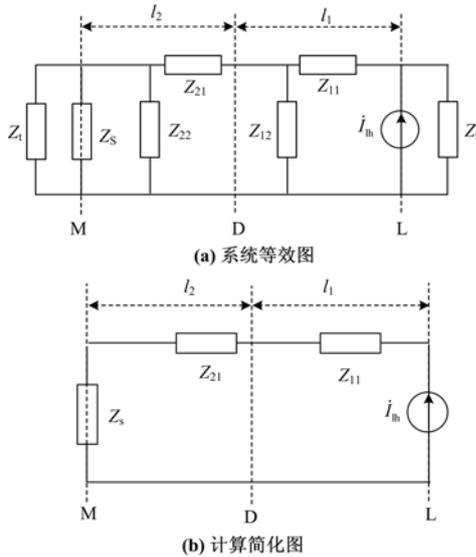


图 2 单相系统线路谐波分布计算图

Fig.2 Calculation of harmonic distribution in a single phase system

根据图 2 (b)，观测点 D 处的谐波电流 \dot{I}_{dh} ，谐波电压 \dot{U}_{dh} 分别为：

$$\dot{I}_{dh} = \dot{I}_{th} \quad (3)$$

$$\dot{U}_{dh} = (Z_{21} + Z_s)\dot{I}_{th} \quad (4)$$

对均匀传输线， Z_{21} 与 l_2 成正比，公式 (4) 可另写为：

$$\dot{U}_{dh} = Z_u l_2 \dot{I}_{th} + Z_s \dot{I}_{th} \quad (5)$$

式中： Z_u 为线路单位长度阻抗。

非线性负荷处的谐波电压 \dot{U}_{lh} 为：

$$\dot{U}_{lh} = Z_u (l_1 + l_2) \dot{I}_{th} + Z_s \dot{I}_{th} \quad (6)$$

而母线处的谐波电压 \dot{U}_{mh} 为：

$$\dot{U}_{mh} = Z_s \dot{I}_{th} \quad (7)$$

二者满足关系：

$$|\dot{U}_{mh}| \ll |\dot{U}_{lh}| \quad (8)$$

根据公式 (3) ~ (8)，图 2 所示非线性负荷所在线路的任一点处谐波电流等于谐波源的电流，而谐波电压则随着其到谐波源距离的增加而减小。在母线处谐波电压最低。

考虑 $|Z_s| \ll |Z_1|$ ，经母线流入其它线路的谐波电流 \dot{I}_{th} 满足：

$$|\dot{I}_{th}| = \left| \frac{Z_s}{Z_s + Z_t} \dot{I}_{th} \right| \ll |\dot{I}_{th}| \quad (9)$$

即，谐波电流基本上经系统电源返回。其它线路中谐波电流非常小，相应地，其谐波电压几乎保持不变，近似等于（略低于）母线处谐波电压。

2.3 复杂线路正常工作时谐波分布规律

实际配电线路一般为树形结构，存在多个分支和负荷，负荷位置也不局限于线路末端。

当非线性负荷位于线路中间（无分支）时。由于线路末端负荷阻抗（无负荷时阻抗为无穷大）远远大于系统电源阻抗，谐波源外（远离母线）区段的谐波电流基本等于零，谐波电压几乎保持不变，近似等于（略低于）谐波源处谐波电压。而非线性负荷与母线间区段的谐波电压电流规律不变。如图 3 所示。

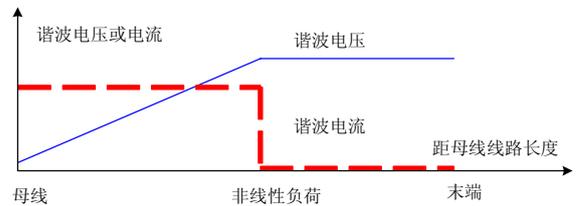


图 3 非线性负荷不在线路末端时谐波分布

Fig.3 Harmonic distribution when non-linear load is not at the remote terminal of a circuit

同样，对于非线性负荷所在线路存在分支的情况，区别主要在于不包含非线性负荷的分支线。其谐波电流均近似为零，谐波电压近似等于（略低于）分岔口处谐波电压。

对于不包含非线性负荷的线路，分支线的存在并不影响其谐波电压电流的分布。

即，对于复杂线路，谐波电压电流的分布也相对复杂，但总体分布规律与简单线路基本相近。

同时显见，线路中谐波电流与谐波电压并无固定关系，说明谐波选线的可靠性确与故障前线路谐波电流无直接关系。

2.4 单谐波源三相系统正常时线路谐波分布规律

系统正序网络和负序网络中的谐波分布特征均与单相系统相同。正序参数等于负序参数，决定了正序、负序网络的谐波电压电流分布差异取决于谐波电流源的正序和负序分量。

以谐波电压为例，线路中任一点 D 处的正序谐波电压 \dot{U}_{pdh} 和负序谐波电压 \dot{U}_{ndh} 有：

$$\begin{cases} \dot{U}_{pdh} = Z_d \dot{I}_{ph} \\ \dot{U}_{ndh} = Z_d \dot{I}_{nh} \end{cases} \quad (10)$$

其中: \dot{I}_{ph} 、 \dot{I}_{nh} 为三相谐波电流源的正序分量、负序分量; Z_d 为正序网络和负序网络中与 D 点对应的等效阻抗。

则 D 点 A、B、C 三相谐波电压 \dot{U}_{adh} 、 \dot{U}_{bdh} 、 \dot{U}_{cdh} 为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{adh} \\ \dot{U}_{bdh} \\ \dot{U}_{cdh} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{U}_{pdh} \\ \dot{U}_{ndh} \\ 0 \end{bmatrix} = Z_d \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ph} \\ \dot{I}_{nh} \\ 0 \end{bmatrix} = Z_d \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \\ \dot{I}_{ch} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: \mathbf{T} 为对称分量变换矩阵; \dot{I}_{ah} 、 \dot{I}_{bh} 、 \dot{I}_{ch} 分别为 A、B、C 三相谐波电流源。

即, 三相系统中任何一相谐波电压电流分布特征均与单相系统相同。三相线路在同一点的谐波电压(谐波电流)相位差固定、幅值比相同, 其差异取决于三相谐波电流源的差异。

2.5 多谐波源正常工作时线路谐波分布规律

当一条出线存在多个非线性负荷或者系统有多条出线均存在非线性负荷时, 可利用线性叠加原理求解系统的谐波分布规律。即, 对于任一线路的任一检测点, 可先计算在每个谐波源作用下的谐波电压电流, 再进行线性叠加即可。

谐波源的特征不同, 其产生的谐波电压电流相位也可能不同, 因此叠加后的谐波电压电流幅值可能增大也可能减小。考虑到每个谐波源在其它线路中产生的谐波电压电流均很小, 在谐波源线路中可忽略其它线路谐波源的影响。

即, 可认为非线性负荷所在线路谐波电压电流分布与单谐波源时相同。不含非线性负荷线路的谐波电压电流仍然较小, 谐波电压略小于母线谐波电压。

2.6 故障点位置对谐波选线可靠性的影响

根据上述分析, 在仅包含非线性负荷谐波源或其占主导作用的系统中, 发生稳定性接地故障时, 故障点的位置便与谐波选线可靠性密切相关。

含有非线性负荷的线路中。当故障点位于母线与非线性负荷之间时, 根据公式(5)和(2), 故障点到母线间的线路越长, 虚拟谐波电压和故障产生的谐波电流就越大, 选线可靠性越高; 相反, 故障点越靠近母线, 选线可靠性越低。当故障点位于非线性负荷外(远离母线)的区段时, 选线可靠性与非线性负荷处相近。当故障点位于分支线时, 选线可靠性与分岔处相近。

母线和不包含非线性负荷的线路中。根据公式(8)和公式(2), 无论故障点位于何处, 虚拟谐波

电压和故障产生的谐波电流均较小, 选线可靠性均较低。

2.7 同点不同相故障与谐波选线可靠性的关系

根据公式(11), 线路任一点处各相谐波电压幅值与该相谐波电流源的电流幅值呈正比。因此, 非线性负荷三相对称时, 同点各相故障选线可靠性相同; 而非线性负荷不对称时, 谐波电流源幅值较大的相故障时选线可靠性较高, 该差异在故障点位于非线性负荷所在线路时尤为明显。

3 仿真实证

3.1 仿真模型

系统仿真模型如图4所示。T 为 110 kV/10 kV 变压器, L 为消弧线圈, $l_1 \sim l_4$ 为各出线长度, f 为故障点, Z_L 为线性负荷, Z_N 为非线性负荷, 所有负荷均位于线路末端。

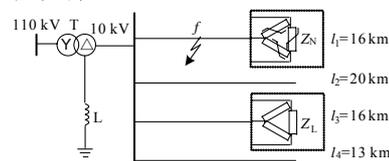


图4 仿真系统模型

Fig.4 Simulation model

线路参数为: 正序阻抗 $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$, 正序容纳 $B_1 = (j3.045) \mu\text{s}/\text{km}$, 零序阻抗 $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$, 零序容纳 $b_0 = (j1.884) \mu\text{s}/\text{km}$ 。

非线性负荷 Z_N 选为三相对称的六序脉冲控制的整流电路, 其主要产生 5 次和 7 次谐波。

3.2 正常工作时线路谐波电压分布的验证

设线路 1 和线路 2 均为非线性负荷, 其产生的 5 次和 7 次谐波电压沿各线路的分布如图 5 所示(以 A 相为例)。可见, 谐波源所在线路谐波电压从末端到母线几乎为直线下降。母线处, 5 次谐波电压约为最大谐波电压的 4.8%, 由于两个谐波源相位角不同, 7 次谐波电压只有最大谐波电压的 1.0%。线路 3

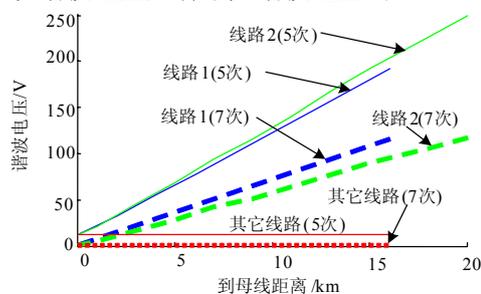


图5 双谐波源时系统谐波电压分布示意图

Fig.5 Distribution of harmonic voltages for double harmonic sources

和线路 4 谐波电压与母线处基本相同。

3.3 故障点位置对谐波选线可靠性影响的验证

对于仅有线路 1 含有谐波源的情况，表 1 给出了不同故障位置时的虚拟谐波电压幅值和金属性接地时故障点谐波电流大小（以 A 相为例）。

表 1 单谐波源时不同故障位置的谐波电压电流

Tab.1 Harmonic voltages and currents of different fault position for single harmonic source system

故障 线路	距母线距离 / km	谐波电压 / V		谐波电流 / A	
		5 次	7 次	5 次	7 次
1	4	54.7	33.7	0.099	0.089
1	8	100.6	62.0	0.187	0.172
1	16	192.2	118.2	0.391	0.365
2	5	8.8	5.4	0.015	0.014
3	10	8.7	5.4	0.015	0.014
4	13	8.7	5.3	0.015	0.014
母线	0	8.9	5.5	0.015	0.014

对于线路 1、线路 2 均含有谐波源的情况，表 2 给出了不同故障位置时的虚拟谐波电压幅值和金属性接地时故障点谐波电流大小（以 A 相为例）。

表 2 双谐波源时不同故障位置的谐波电压电流

Tab.2 Harmonic voltages and currents of different fault position for double harmonic sources system

故障 线路	距母线距离 / km	谐波电压 / V		谐波电流 / A	
		5 次	7 次	5 次	7 次
1	8	100.4	57.98	0.189	0.161
1	16	191.6	115.3	0.388	0.352
2	5	67.9	28.6	0.127	0.078
2	20	249.6	116.7	0.523	0.388
3	10	12.0	1.1	0.021	0.003
4	13	12.0	1.1	0.021	0.003
母线	0	12.1	1.2	0.021	0.004

可见，不同的故障位置，其故障点的谐波电流大小相差 24.9 倍（5 次）和 129.3 倍（7 次）。

无论基于何种谐波选线原理，其选线装置均设有一定的检测门槛，谐波电流小的故障将不能被检测，或者即使能被检测其可靠性也不高。

3.4 故障相对谐波选线可靠性影响的验证

将图 4 中线路 1 非线性负荷更换为三相不对称负荷。以 5 次谐波为例，A、B、C 三相电流源分别为：2.88 A、3.32 A、2.22 A，则三相谐波电压在线路 1 中的分布如图 6 所示。

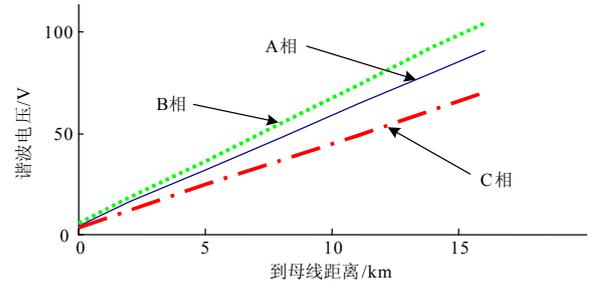


图 6 谐波源不对称时各相谐波电压分布示意图

Fig.6 The distribution of harmonic voltages for asymmetric harmonic sources

经计算，任一点处三相谐波电压幅值与三相电流源幅值呈正比。相应的，故障后三相故障谐波电流幅值也与三相电流源幅值均呈正比。

对于其它分析和结论，亦可通过仿真验证，不再一一叙述。

4 结论

故障产生的谐波电流越大，谐波选线的可靠性越高。对于稳定性接地故障，故障谐波电流与故障前故障点谐波电压的幅值成正比，而与故障前线路中谐波电流无直接关系。

仅含非线性负荷谐波源或其占主导作用的系统中，发生稳定性接地故障时，谐波选线可靠性与故障点位置及故障相密切相关：

- ①故障点位于母线与谐波源之间时，其到母线间线路越长，选线可靠性越高；
- ②故障点位于谐波源外（远离母线）区段时，选线可靠性与谐波源处相近；
- ③故障点位于母线或不含谐波源线路时，选线可靠性较低；
- ④故障点位于无谐波源分支线时，选线可靠性与分岔处相近；
- ⑤三相负荷非线性程度不对称时，产生的谐波电流源幅值较大的相选线可靠性较高。

选线可靠性随故障位置、故障相不同发生较大的变化是谐波选线可靠性总体上不高的一个重要原因。

参考文献

[1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[2] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单项接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29 (4): 16-20.
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng. Survey of the

- Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral[M]. Relay, 2001, 29 (4): 16-20.
- [3] 孟润泉, 梁翼龙, 宋建成, 等. 基于谐波检测的井下高压电网选择性漏电保护系统[J]. 继电器, 2001, 29 (5): 37-40.
- MENG Run-quan, LIANG Yi-long, SONG Jian-cheng, et al. The Selective Leakage Protection System for Underground HV Distribution Networks based on Harmonic Detection[J]. Relay, 2001, 29 (5): 37-40.
- [4] 龚静. 小电流接地系统单相接地故障的 7 次谐波选线新方法[J]. 电工技术, 2005, (9): 6-9.
- GONG Jing. The New Method for Detecting Single Phase-to-ground Fault Line in Ineffectively Grounded Systems by using the Seventh Harmonious[J]. Electric Engineering, 2005, (9): 6-9.
- [5] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (3): 1301-1308.
- [6] 索南加乐, 张超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (19): 65-70.
- SUONAN Jia-le, ZHANG Chao, WANG Shu-gang. Fault Line Selection in the Non-Solid Earthed Network Based on the Model Identification Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (19): 65-70.
- [7] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 1-6.
- DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis on Transient Traveling Wave and Study on Fault Line Selection for Distribution Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 1-6.
- [8] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (2): 11-12.
- SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for Single to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System by Injecting Signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (2): 11-12.
- [9] 薛永端, 陈羽, 徐丙垠, 等. 利用暂态特征的新型小电流接地故障监测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (24): 83-87.
- XUE Yong-duan, CHEN Yu, XU Bing-yin, et al. Characteristic Transient Based Monitoring System for Earth Fault in Non-Solidly Earthed Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (24): 83-87.
- [10] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2009-02-15; 修回日期: 2009-04-12

作者简介:

薛永端 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为配电网自动化及其故障检测; E-mail: xueyd@kehui.cn

李长安 (1976-), 男, 硕士, 研究方向为小电流接地故障选线;

徐丙垠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障检测、配电网自动化。

(上接第 29 页 continued from page 29)

- CAI Wei, ZHANG Xue-song, LIU Cheng-zhi, et al. Distribution Network Fault Location Method Based on PT Injecting Signal and Neural Network Fault Diagnosis System Tracking the Character of Wavelet Transform Modulus Maxima[J]. Relay, 2006, 34(23):44-53.
- [6] 韩晓春, 杨富营. 电压型馈线自动化设备的应用与实践[J]. 继电器, 2005, 33(11):71-79.
- HAN Xiao-chun, YANG Fu-ying. Application and Practice of Voltage-type Feeder Automation Equipment[J]. Relay, 2005, 33(11):71-79.
- [7] 刘健, 程红丽, 李启瑞. 重合器与电压-电流型开关配合的馈线自动化[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22):68-71.
- LIU Jian, CHENG Hong-li, LI Qi-rui. Feed Automation Based on Reclosers and Voltage-current-mode Pole-mounted Switches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22):68-71.
- [8] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2009-08-15; 修回日期: 2009-10-09

作者简介:

齐 郑 (1977-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、配电网自动化等; E-mail: qizheng319@126.com

张 善 (1965-), 男, 工程师, 从事电力系统运行调度工作;

杨开增 (1951-), 男, 工程师, 从事电力企业管理工作。