基于暂态零序电流变化率的小电流接地系统单相接地故障选线方法的研究

钱　虹　黄正润　阮大兵

（上海电力学院电力与自动化工程学院，上海　200090）

摘要　首先，对小电流接地系统的单相接地故障进行仿真，分析故障后暂态零序电流的特征，即在暂态初始阶段的暂态故障电流主要由暂态电容电流所决定，因此故障线路的暂态零序电流幅值最大。若忽略暂态电感电流，则故障线路的暂态零序电流幅值等于所有健全线路的幅值之和，且方向与非故障线路相反。因此，在求得各线路的暂态零序电流变化率后，通过比较它们的大小和极性就能准确定位出故障线路。最后，采用 Matlab 搭建仿真模型，对不同的电压初始相角、过渡电阻、故障位置以及中性点的不同接地方式进行仿真实验。仿真结果证明该方法能够准确、迅速地定位出故障线路，具有较强的可靠性、实用性。

关键词：小电流接地系统；故障选线；暂态零序电流；变化率

The Study of Fault Line Selection's Method Based on the Change Rate of Transient Zero Sequence Current for Small Current Grounding System

Qian Hong　Huang Zhengrun　Ruan Dabing

(School of Electric Power and Automation Engineering of Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090)

Abstract　First of all, the simulation of one-phase grounding fault is made for the small current grounding system. And then analysis the characteristics of the transient zero sequence current. In the initial stages, the transient fault current mainly decided by the transient capacitance current, so the fault line transient zero sequence current's amplitude is the largest. If you ignore the transient inductance current, then the fault line transient zero sequence current's amplitude is equal to the sum of all sound lines' amplitude. The direction of the fault line is opposite to all sound lines'. Therefore, after we obtain the change rate of transient zero sequence current for each line, we can locate the fault line accuracy by comparing the size and polarity of them. Finally, the simulation model based on Matlab is set up for different voltage initial phase angle, transition resistance, fault location and different neutral grounding manners. The simulation results prove that the method can locate the fault line accurately and quickly with strong reliability and practicability.

Key words：small current grounding system; fault line selection; transient zero sequence current; change rate

我国 6～35kV 配电网中性点的接地方式大都为小电流接地方式，而在小电流接地系统中发生单相接地故障的概率最高。由于小电流接地系统单相接地故障电流幅值较小，可用的故障信息不够明显，此外，又受电压初始相角及故障点接地电阻等因素的影响，所以故障选线一直以来都是配电网中的关键技术问题。

国内外已有相当的文献对这一问题进行了研究。如基于稳态信号的群体比幅比相算法[1]、能量算法、5 次或 7 次谐波算法[2]、无功功率算法等，但这些稳态算法在处理大电阻接地、消弧线圈过补偿及现场大干扰情况时有可能失效。近年来，也有人

以小波变换为工具，分别提出了应用零序电流小波变换系数模值与极性[3-7]、模值的积分[8]和零序电压电流的小波变换系数之比[9]作为选线判据。但基于小波变换的故障定位方法的选线精度可能会受短路发生时刻、故障点位置、过渡电阻以及小波基的选取等多因素的影响。

本文首先对小电流接地系统的单相接地故障进行仿真，通过仿真分析得出各线路暂态零序电流的特征，即故障线路的暂态零序电流幅值最大、方向与所有的健全线路相反。据此，分析比较各线路暂态零序电流变化率的大小与极性，从而定位出故障线路。最后，采用 Matlab 搭建仿真模型，对不同的电压初始相角、过渡电阻、故障位置以及中性点的不同接地方式进行仿真实验，仿真结果证明该方法能够准确、迅速地定位出故障线路，具有较强的可靠性、实用性。

1 暂态零序电流特征

1.1 暂态零序电流仿真分析

以 Matlab6.5 为仿真软件，搭建小电流接地系统单相接地故障仿真模型，如图 1 所示。对中性点不接地系统发生单相接地故障和中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障分别进行仿真分析，各线路的暂态零序电流分别如图 2 和图 3 所示。

从图 2、图 3 可以看出，在故障的初始阶段各线路有一个零序电流的突变量，故障线路零序电流突变的方向与非故障线路零序电流突变的方向相反，而所有健全线路的零序电流突变方向相同，并且故障线路零序电流突变量的幅值等于所有非故障线路零序电流突变量的幅值之和。

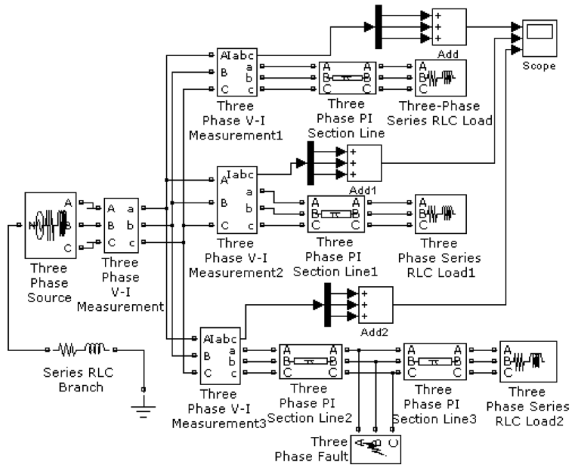


图 1 小电流接地系统单相接地故障仿真模型

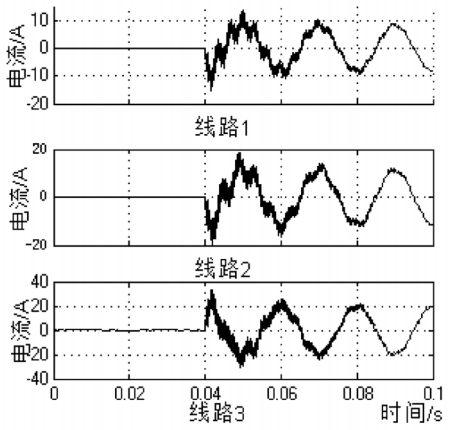


图 2 中性点不接地系统的暂态零序电流

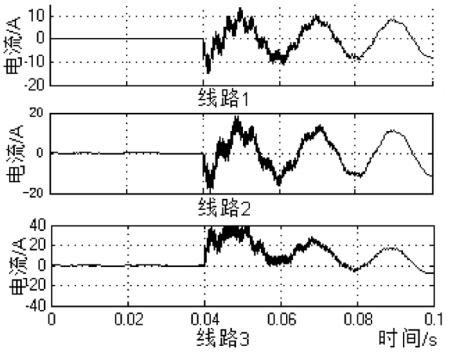


图 3 中性点经消弧线圈接地系统的暂态零序电流

1.2 小电流接地系统暂态零序电流特征

为了进一步分析中性点经消弧线圈接地系统的暂态过程，首先得分析中性点经消弧线圈接地系统在发生单相接地故障时的等效电路，等效电路如图 4 所示。

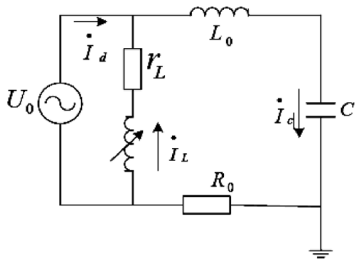


图 4 暂态电流的等效电路

图 4 中，U_0：暂态零序电源电压；r_L、L：消弧线圈有功损耗的电阻和电感；L_0：三相线路和变压器的等值电感；C：三相的对地电容；R_0：等值回路中的等值电阻；图中的暂态电容电流为

$$i_c = i'_c + i''_c = I_{cm}\left[\left(\frac{\omega_f}{\omega}\sin\varphi\sin\omega t - \cos\varphi\cos\omega_f\right) e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi)\right] \quad (1)$$

式中，I_{cm}为暂态电容电流的幅值；ω_f为暂态自由振荡分量角频率；δ为自由振荡分量的衰减系数，$\delta=\frac{1}{\tau_C}=\frac{R_0}{2L_0}$；$\tau_C$为电容回路的时间常数。

而暂态电感电流为

$$i_L = I_{Lm}\left[\cos\varphi e^{\frac{-t}{\tau_L}} - \cos(\omega t+\varphi)\right] \qquad (2)$$

式中，I_{Lm}为暂态电感电流的幅值；τ_L为电感回路的时间常数。

中性点经消弧线圈接地系统的故障暂态零序电流由两部分组成，一部分为暂态电容电流 i_C，另一部分为暂态电感电流 i_L。由式（1）、式（2）可以看出暂态电容电流 i_C 和暂态电感电流 i_L 都包含了衰减的非周期分量和稳定的周期分量。在暂态初始阶段，电感回路的时间常数 τ_L 比较大，故暂态电感电流 i_L 衰减地比较慢，频率比较低；而电容回路的时间常数 τ_C 数值比较小，故暂态电容电流 i_C 衰减的比较快，其振荡频率主要由暂态分量决定，频率比较高，因而两者频率的差别很大，不能够相互补偿。因此在故障的初始阶段，暂态零序电流特性主要由暂态电容电流特性所决定，故不论中性点接地与否，故障点的暂态零序电流特性总是相同的。即在故障初始阶段，流过故障线路的暂态零序电流幅值最大且等于流过所有健全线路的暂态零序电流幅值之和，电流方向与健全线路相反。这为后面选线判据的提出奠定了理论基础。

2 选线原理

定义暂态零序电流变化率：

$$K=\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\approx\frac{\Delta i}{\Delta t}=\frac{i_T-i_{t_0}}{T-t_0} \qquad (3)$$

式中，T 为故障后的特征时刻，为了提高选线的灵敏性和更易于实现，定义故障发生后半个周期内线路暂态零序电流幅值最大的时刻为特征时刻 T；t_0 为线路故障发生的初始时刻。

由式（3）计算出各线路的暂态零序电流变化率 $K_i(i=1, 2, \cdots, n)$，故障线路的暂态零序电流变化率幅值最大且方向与非故障线路相反，故障判据可用下式表示：

$$Q_1: K_j=\max(abs(K_i)) \quad i=1,2,\cdots,n \qquad (4)$$

$$Q_2: \mathrm{sgn}(K_j)=-\mathrm{sgn}(K_i) \quad i=1,2,\cdots,n(i\neq j) \qquad (5)$$

若第 j 条线路的暂态零序电流变化率 K_j 同时足式（4）、式（5），即该线路变化率的幅值最大且极性与健全线路相反，那么该线路就为故障线路。

3 仿真分析

利用图 1 中的模型对中性点经消弧线圈接地系统、中性点经电阻接地系统、中性点不接地系统，在不同的故障发生位置、过渡电阻、电压初始相角下进行仿真验证。

3.1 中性点经消弧线圈接地系统仿真分析

1）不同故障发生位置的仿真分析

假设线路 2 发生单相接地故障，电压的初始相角为 90°，过渡电阻为 20Ω，表 1 是不同故障发生位置的仿真过程和选线结果。

表 1 不同故障发生位置的仿真过程与选线分析

故障发生位置/km	线路	K值	故障线路
4	1	–4277	2
	2	5438	
	3	–1159	
8	1	–2452	2
	2	3024	
	3	–549	
12	1	–124	2
	2	1358	
	3	–1234	

由表 1 可以发现，对于中性点经消弧线圈接地系统，不论故障发生在什么位置，该方法都可以准确、可靠地定位出故障线路。

2）不同过渡电阻的仿真分析

假设线路 2 在 8km 处发生 A 相接地故障，电压初始相角为 90°，表 2 是不同过渡电阻的仿真过程及选线结果。

表 2 不同过渡电阻的仿真过程与选线分析

过渡电阻/Ω	线路	K值	故障线路
10	1	–2450	2
	2	2770	
	3	–77	
20	1	–1845	2
	2	2044	
	3	–165	
100	1	–230	2
	2	988	
	3	–750	

由表 2 可以看出，对于中性点经消弧线圈接地系统，在不同过渡电阻的情况下该方法可以准确、可靠地定位出故障线路。

3）不同电压初始相角的仿真分析

假设线路 2 在 4km 处发生 A 相接地故障，故障过渡电阻为 20Ω。表 3 是不同电压初始相角的仿真过程及选线结果。

表 3　不同电压初始相角的仿真过程与选线分析

电压初始相角/°	线路	*K*值	故障线路
90	1	–4176	2
	2	5355	
	3	–1184	
180	1	1567	2
	2	–2200	
	3	530	
270	1	4099	2
	2	–5326	
	3	1230	

由表 3 可以得出，对于中性点经消弧线圈接地系统，该方法不受电压的初始相角的影响，可以准确、可靠地定位出故障线路。

3.2　中性点不接地系统和经电阻接地系统仿真分析

受篇幅限制，表 4 只给出中性点不接地系统在不同故障条件下的部分仿真过程及选线结果；表 5 也只给出中性点经电阻接地系统在不同故障条件下的部分仿真过程及选线结果。

从表 4、表 5 可以看出，对于中性点不接地以及中性点经电阻接地系统，该方法不受过渡电阻、故障发生位置及电压初始相角的影响，均可有效可靠地实现故障线路定位。

表 4　中性点不接地系统的仿真过程与选线分析

过渡电阻/Ω	故障发生位置/km	电压初始相角/°	线路	*K*值	故障线路
10	3	90	1	–3798	2
			2	7728	
			3	–3927	
5	4	90	1	–2401	2
			2	6135	
			3	–3733	
15	6	270	1	2118.03	2
			2	–4235.77	
			3	2118.03	

表 5　中性点经电阻接地系统的仿真过程与选线分析

过渡电阻/Ω	故障发生位置/km	电压初始相角/°	线路	*K*值	故障线路
15	6	270	1	883	2
			2	–1503	
			3	588	
10	8	90	1	–1655	2
			2	4335	
			3	–1655	
5	4	90	1	–4300	2
			2	6863	
			3	–980	

4　结论

本文首先分析了小电流接地系统在发生单相接地故障时暂态零序电流的特征，即故障线路的暂态零序电流幅值最大，相位与所有非故障线路相反。据此，提出基于暂态零序电流变化率不同的选线判据，即故障线路的变化率幅值最大、极性与非故障线路相反。最后，通过 Matlab 搭建故障仿真模型，进行仿真验证。实验结果表明，本文所提出的选线方法不受过渡电阻、中性点接地方式、故障发生位置以及电压初始相角的影响，选线原理简单，具有较强的可靠性、实用性。

参考文献

[1] 潘贞存.比相式和比幅式小电流接地系统接地选线保护[J].山东电力技术, 2010(3): 60-64.

[2] 郝玉山,齐立芳,严永生,等.零序网络中的谐波电流分布[J].华北电力学院学报, 2005, 22(3): 12-17.

[3] 余晓荣,廖培金,彭书涛,等.小波分析在小电流接地系统故障选线中的应用[J].低压电器，2009，15(4): 24-26.

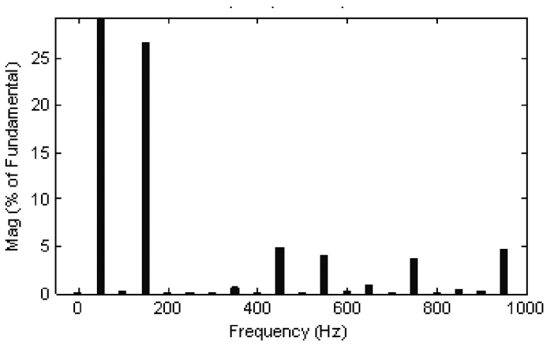
[4] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等.应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J].中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.

[5] 王娜,周有庆,龚静.小波变换在配电网单相接地故障选线中的应用[J].电气技术, 2003(10): 27-30.

[6] 王耀南,霍百林,王辉,等.基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J].中国电机工程学报，2008, 24(6): 54-58.

[7] 毛鹏,孙雅明,章兆宁,等.小波包在配电网单相接地故

（下转第 35 页）



（b）输出电压频谱图

图 7　三单元级联仿真

仿真结果分析：从 3 单元级联结构的仿真结果可以看出，较 2 单元联结构，输出电压的波形得到改善，减少了高次谐波的产生。同时可以看出，开关切换角的确定方法正确，5 次和 7 次谐波得到了很好的抑制，含量极少。

4　结论

本文在新型级联型多电平逆变器的基础之上，研究了非对称混合级联情况下该新型拓扑的调制方法。提出了阶梯波和正弦脉宽调制相结合作用于该新型拓扑电路的思路，该方法充分发挥了不同开关器件的优势，对非对称的情况尤其适用，具有一定的应用价值。

参考文献

[1] 刘风君,多电平逆变器技术及其应用[M].北京:机械工业出版社, 2007.

[2] TOLBERT L M, PENG F Z, HABETLER T G, Multilevel converters for large electric drivers[J]. IEEE. Trans. on. Ind. Appl, 1999, 35(1): 36-44.

[3] ZHANG D, TOLBERT L M, CHIASSON J N, OZPINECI B, LI H, Huang A Q: HYBRID CASCADED H-BRIDGES multilevel motor drive control for electric vehicles[C]. IEEE Power electronics specialiconference. Juju, Korea, 2006, 6: 1-6.

[4] ZHONG D, TOLBERT L M, OZPINECI B, CHIASSON J N. Fundamental frequency switching strategies of a seven-level hybrid cascaded H-Bridge multilevel inverter[J]. IEEE in IEEE Transactions on Power Electronics. 2009, 24(1): 25-33.

[5] BABAEI E. A cascade multilevel converter topology with reduced number of switches[C]. IEEE Trans Power Electron 2008, 23(6).

[6] HINAGO Y A Single-Phase multilevel inverter using switched series/parallel DC voltage sources. IEEE Transactions On IndustrialElectronics 2010, 57(8).

[7] BABAEI E, HOSSEINI S H. New cascaded multilevel inverter topology with minimum number of switches[J]. Energy Conversion and Management 2009 (50): 2761-2767.

[8] 陈元娣,刘涤尘,宋庆国.阶梯波调制级联逆变器触发角的一种简便算法[J].电工电能新技术, 2010, 29(1): 35-40.

[9] 费万民,吕征宇,姚文熙.多电平逆变器特定谐波消除脉宽调制方法的研究[J].中国电机工程学报, 2003, 23(9): 11-15.

作者简介

王鹏帅（1987-），男，河南安阳市，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动。

（上接第 30 页）

障选线中的应用[J].电技网术, 2000, 24(6): 10-17.

[8] 肖白,杜世君,周晓岩.一种基于小波变换的小接地电流系统单相接地故障选线方法[J].东北电力学院学报, 2003, 23(1): 72-75.

[9] 操丰梅,苏沛浦.小波变换在配电自动化接地故障检测中的应用研究[J].电气技术, 2009, 23(13): 33-36.

作者简介

钱　虹（1967-），女，副教授，研究生导师，博士生，从事电力系统智能控制和故障诊断研究。