

# 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线

闫光太, 梁甲文, 王新涛, 刘安华

(聊城供电公司, 山东 聊城 252000)

**摘要:** 为了准确检测出谐振电网单相接地故障, 提出一种基于暂态幅值故障测度的故障选线方法。通过模量变换, 分析发生故障后的故障馈线和正常馈线, 利用电流的小波模极大值特性得出零模初始电流小波模极大值的规律。结合此规律和一般故障测度的定义, 定义了暂态幅值故障测度。故障馈线的暂态幅值故障测度最大, 正常馈线的暂态幅值故障测度大于0且接近于0, 据此检测出故障馈线。理论分析和 ATP 仿真结果表明, 该方法能有效准确地检测出谐振电网单相接地故障, 不受消弧线圈的影响, 证明了该方法的正确性。

**关键词:** 谐振电网; 单相接地故障; 零模初始电流; 暂态幅值故障测度; ATP 仿真

## A fault feeder selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure

YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, LIU Anhua

(Liaocheng Power Supply Company, Liaocheng 252000, China)

**Abstract:** In order to accurately detect single-phase ground fault in resonant grounding systems, a fault line selection method based on fault transient amplitude measure is proposed. With the modulus transform, feeder fault and normal feeder after fault are analyzed. By using wavelet modulus maxima characteristic current, the law of zero mode initial current wavelet modulus maxima is developed. The transient amplitude fault measures are defined combined with this law and the general fault measures. The transient amplitude fault measure of the fault feeder is maximum, and the normal ones is greater than 0 and close to 0. Accordingly, the fault line selection method is proposed and the fault feeder is detected. Theoretical analysis and ATP simulation results show that, this method can effectively detect single-phase ground fault in resonant grounding systems, and is not influenced by arc suppression coil.

**Key words:** resonant grounding system; single-phase ground fault; zero mode initial current; transient amplitude fault measure; ATP simulation

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0064-05

## 0 引言

我国配电网广泛采用小电流接地运行方式。微弱的单相接地故障电流叠加到较大负荷电流之上, 难以区分谐振电网故障所在馈线<sup>[1-7]</sup>。故研究灵敏可靠的故障选线技术迫在眉睫。近年来的研究表明, 基于故障测度的选线方法可以确定故障馈线, 但没有深入挖掘暂态分量的关系, 灵敏度不高<sup>[8-9]</sup>。

本文首先利用小波模极大值对电流进行描述, 重点定义了暂态幅值故障测度, 利用此测度的大小来区分故障馈线与正常馈线。提出选线方法。ATP 仿真验证表明该选线方法是正确的。

## 1 电流的模量分析

配电馈线在 F 处发生单相接地故障(电阻  $R_F$ ), 边界式为

$$\begin{cases} u_{FA} + i_{FA}R_F = -u_{FA(0)} \\ i_{FB} = i_{FC} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

对故障边界式(1)做模量变换:

$$\begin{cases} u_{FA} + (i_{F0} + i_{F1} + i_{F2})R_F = -u_{FA(0)} \\ i_{F0} - 2i_{F1} + i_{F2} = i_{FB} = 0 \\ i_{F0} + i_{F1} - 2i_{F2} = i_{FC} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

经过整理, 从 F 点开始沿着馈线分别向母线侧和负荷侧推进的电流为

$$i_0 = i_1 = i_2 = \frac{-u_{FA(0)}}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 6R_F} \quad (3)$$

发生故障时初始模量传输路径如图 1 所示。由于初始电流的幅值均与故障前正常运行时故障点的相对地电压  $u_{FA(0)}$ 、过渡电阻  $R_F$  和馈线阻抗的大小有关, 故对于某一确定的配电网而言, 初始电流的幅值与故障初相角和过渡电阻有关。

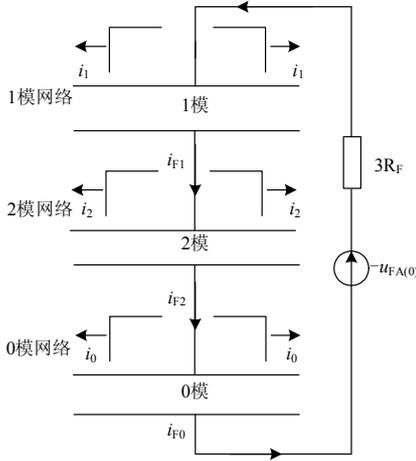


图 1 单相接地故障初始电流模量传输路径

Fig. 1 Initial modulus current path of single-phase grounding fault

本文仅针对零模初始电流分析, 假定各馈线的阻抗均相等。变压器二次零模等效阻抗用  $Z_{T10}$  表示, 馈线  $N$  零模阻抗用  $Z_{LN0}$  和  $Z_{LDN0}$  表示。故障初始电流入射和反射零模量用  $i_{F0}$  和  $i_{i0}$  表示, 馈线 1 上故障初始电流折射零模量用  $i_{i0}$  表示。中性点等效阻抗用  $Z_{eq}$  表示, 即消弧线圈等效阻抗。给出如图 2 的零模等效电路。

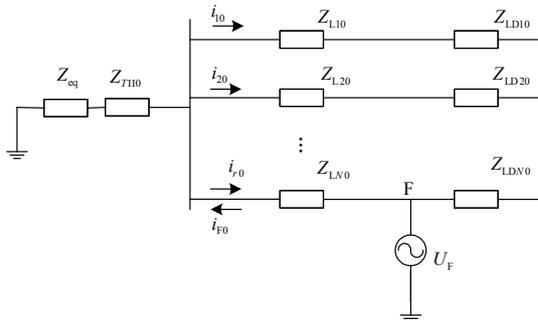


图 2 初始零模电流的传播等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of zero mode current spread

由于初始电流频率很高, 变压器阻抗与频率成正比, 因此, 不考虑突变电流传播到变压器一次侧。假设馈线  $N$  发生故障, 产生故障初始  $i_{F0}$ , 健全

馈线阻抗  $Z_Z$  为  $N-1$  条健全线波阻抗以及中性点等效波阻抗  $Z'_{eq}$  并联, 即

$$Z_Z = \frac{1}{\frac{1}{Z'_{eq}} + \frac{N-1}{Z}} \quad Z'_{eq} = Z_{eq} + Z_{T10} \quad (4)$$

每条健全馈线上流过零模  $i_j$

$$i_j = \frac{2Z_Z}{Z + Z_Z} i_{F0} < \frac{1}{N-1} i_{ZZ} \quad (5)$$

规定: 电流从母线流向馈线为正方向。故障馈线零模电流  $i_N$  为

$$i_N = -\frac{2Z}{Z + Z_Z} i_{F0} \quad (6)$$

在电流经过电感瞬间, 电感对电流而言相当于开路。因此初始电流视为没有折射到消弧线圈,  $Z_{eq}$  无穷大, 式(6)变为

$$i_N = -\frac{2(N-1)}{N} i_{F0} \quad i_j = \frac{2}{N} i_{F0} \quad (7)$$

由小波变换原理知: 故障之后电流信号的奇异点与其小波变换模极大值点是一一对应的。小电流接地电网发生单相接地故障有: ① 故障馈线零模电流的小波变换模极大值的幅值最大; ② 其大小等于非故障馈线的小波变换模极大值幅值之和。

## 2 暂态幅值故障测度的定义

### 2.1 故障测度的一般定义

故障测度(Fault Measures)是指在某判据基准下能够表征各自馈线发生故障可能性的一种正实数<sup>[8]</sup>。在同一电压等级电网的多条馈线中, 倘若某一条馈线的故障测度最大, 则能表明该馈线为故障馈线的可能性最大。

故障测度概念的提出使得符号型输出结果改进为数值型输出结果。在故障馈线未确定的情况下, 同一电压等级电网全部馈线都值得怀疑。小电流接地故障选线判据进行故障馈线的判断时可能会受到一定的干扰, 而不可能确保某一条馈线肯定是故障馈线。故障测度概念融入小电流接地故障选线方法之中, 能够优化这种模糊的判断结果, 从而提高选线结果的可靠性。

本文通过小波模极大值将零模故障电流特征突显出来, 构造暂态幅值故障测度。

### 2.2 暂态幅值故障测度的定义

假设某一中性点非有效接地电网共有  $N$  条馈线, 令  $C(j)$  表示第  $j$  条馈线行波幅值测度, 结合小电流接地故障的零模电流特征、小波变换理论和故

障测度概念构造幅值故障测度  $C(j)$ ，如图 3 所示。第  $j$  条馈线故障测度  $C(j)$  定义式是测度定义式一  $C_1(j)$  和测度定义式二  $C_2(j)$  的线性组合。

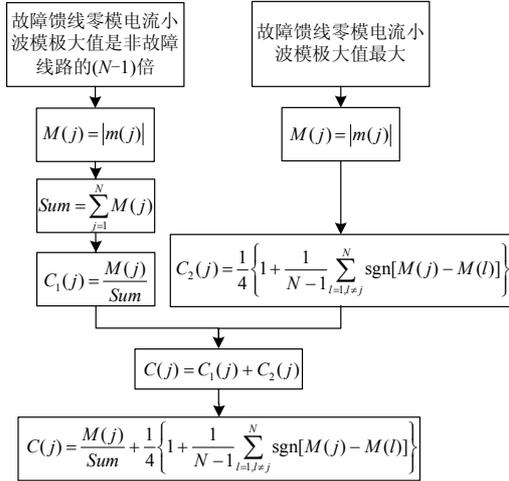


图 3 暂态幅值故障测度的构造示意图  
Fig. 3 Tectonic diagram of fault transient amplitude measure

用  $m(j)$  来表示发生故障后第  $j$  条馈线零模电流第一个小波变换模极大值。由于小波变换模极大值的数值有正负之分，但模极大值不会为 0，故  $m(j) \in (-\infty, +\infty)$  且  $m(j) \neq 0$ 。发生故障后，第  $j$  条馈线零模初始电流行波第一个小波变换模极大值的幅值用  $M(j)$  来表示，即  $M(j) = |m(j)|$ 。

① 测度定义式一的构造

假设单相接地故障发生在第  $k$  条馈线，该馈线的零模电流小波模极大值幅值用  $M(k)$  表示。与其他馈线的零模电流小波模极大值幅值相比， $M(k)$  最大，且满足关系式：

$$M(k) = (N - 1)M(j) \quad (8)$$

其中， $M(j)$  是指除第  $k$  条馈线以外的任一健全馈线零模电流小波模极大值， $j \in [1, N]$  且  $j \neq k$ 。

将各条馈线零模初始电流行波小波模极大值幅值累加，用  $Sum$  表示模极大值幅值的累加和，即

$$Sum = \sum_{j=1}^N M(j) \quad j \in [1, N] \quad (9)$$

模极大值累加和  $Sum$  与故障所在的第  $k$  条馈线零模初始电流行波小波模极大值幅值  $M(k)$  的关系为

$$Sum = 2M(k) \quad (10)$$

根据式(7)，构造出与零模电流模极大值有关的测度定义式一  $C_1(j)$ ，即

$$C_1(j) = \frac{M(j)}{Sum} \quad (11)$$

② 测度定义式二的构造

根据零模电流小波变换模极大值规律，能够推出与零模初始电流行波模极大值有关的行波幅值测度定义式二  $C_2(j)$ ，即

$$C_2(j) = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \frac{1}{N-1} \sum_{l=1, l \neq j}^N \text{sgn}[M(j) - M(l)] \right\} \quad (12)$$

其中， $\text{sgn}()$  为符号函数，具体为

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

由符号函数的定义可知，所谓符号函数  $\text{sgn}[M(j) - M(l)]$ ，是用来反映某两条出线零模初始电流行波小波模极大值幅值差值的大小，取值为 1、0 或 -1。

综合上述①和②可知，反映小电流接地故障的零模电流小波模极大值幅值特性的幅值测度  $C(j)$  定义式为

$$C(j) = C_1(j) + C_2(j) \quad (14)$$

暂态幅值故障测度  $C(j)$  的取值范围为 [0,1]，满足故障馈线与健全馈线的结果能够得到较为明显地区分的要求。

3 基于故障测度的选线方法

基于暂态幅值故障测度的故障选线原理流程如图 4 所示。

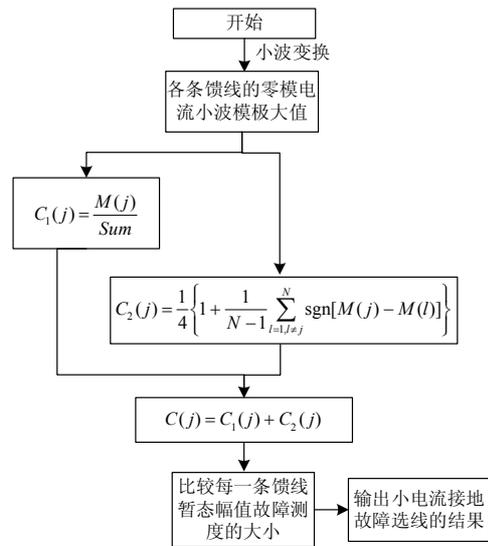


图 4 基于暂态幅值故障测度故障选线方法  
Fig. 4 Fault line selection based on fault transient amplitude measure

第一步，采集各条馈线的三相初始电流信号。通过相模变换，转变为零模初始电流。

第二步, 获取各条馈线的零模初始电流行波第一个小波模极大值  $m(j)$ 。

第三步, 根据幅值测度  $C(j)$  的定义式(14), 计算每一条馈线的幅值测度  $C(j)$ 。

第四步, 根据  $C(j)$  的大小, 比较故障馈线和非故障馈线测度的大小来实现选线, 若某馈线的故障测度最大而且与其他馈线的故障测度差距最大, 则该馈线是故障馈线的可能性最大。

倘若暂态幅值故障测度  $C(j)$  越接近于 1, 而且  $C(j)$  在全部暂态幅值故障测度中是最大的, 则第  $j$  条馈线确定为故障馈线。

倘若暂态幅值故障测度  $C(j)$  越接近于 0, 而且  $C(j)$  在全部暂态幅值故障测度中不是最大的, 则该馈线确定为健全馈线。

## 4 故障选线方法的仿真

### 4.1 仿真模型的建立

采用 ATP 建立如图 5 所示的谐振接地电网<sup>[10]</sup>, 电压等级为 10 kV, 单位长度馈线参数如下: 正(负)序电容: 13.3 pF/km, 正(负)序电阻: 0.011 3  $\Omega$ /km, 正(负)序电感: 3.001 mH/km, 零序电容: 8.43 pF/km, 零序电阻: 0.282  $\Omega$ /km, 零序电感: 3.001 mH/km。消弧线圈  $L = 6.103$  H。

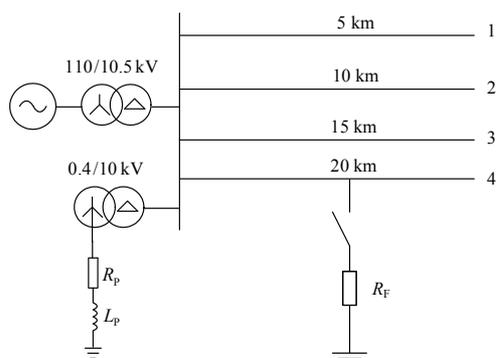


图 5 谐振接地电网的 ATP 仿真模型

Fig. 5 ATP simulation of resonant grounding system

### 4.2 故障选线方法的仿真验证

仿真馈线 2 在 0.023 33 s、0.021 67 s 和 0.02 s 发生过渡电阻 10  $\Omega$  单相接地故障, 即初相角为 30°、60° 和 90°。限于篇幅, 仅给出 30° 的波形如图 6。幅值测度如表 1。

由表 1 可知, 馈线 2 的幅值测度最大, 近似于 1, 其他馈线的故障测度小很多, 说明馈线 2 发生了单相接地故障。

仿真馈线 4 在 0.02 s 发生单相接地故障, 电阻分别取 10  $\Omega$ 、100  $\Omega$  和 500  $\Omega$ , 限于篇幅, 仅给出电阻 10  $\Omega$  的波形如图 7。幅值测度如表 2。

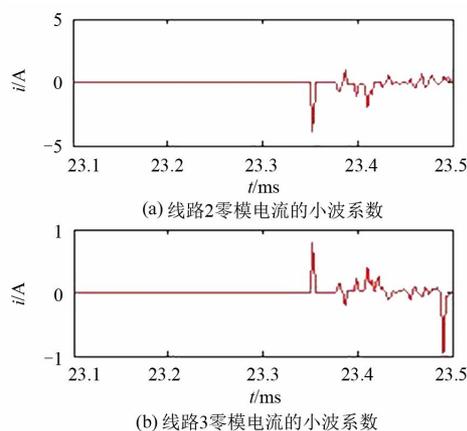


图 6 初相角 30° 的零模电流小波系数

Fig. 6 Zero modulus current wavelet coefficients of 30° initial phase

表 1 馈线 2 故障的各线暂态幅值故障测度

Table 1 Line transient amplitudes of fault feeder 2 faulting

幅值测度	馈线 1	馈线 2	馈线 3	馈线 4
相角 30°	0.199 8	0.999 8	0.500 2	0.350 1
相角 60°	0.350 1	0.997 1	0.350 1	0.350 1
相角 90°	0.300 0	1.000 2	0.300 0	0.300 0

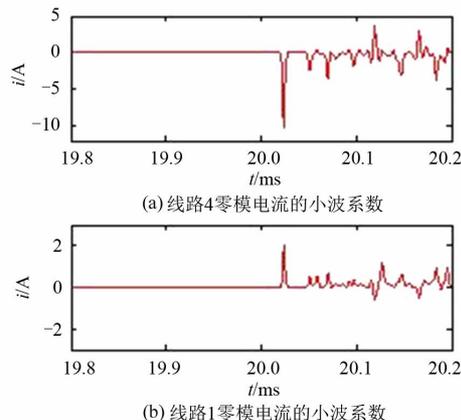


图 7 接地电阻 10  $\Omega$  的零模电流小波系数

Fig. 7 Zero modulus current wavelet coefficients of grounding 10  $\Omega$

由表 2 可知, 馈线 4 的行波幅值测度最大, 近似于 1, 其他馈线的故障测度小很多, 说明馈线 4 发生了故障。

表 2 馈线 4 故障的各线暂态幅值故障测度

Table 2 Line transient amplitudes of fault feeder 4 faulting

幅值测度	馈线 1	馈线 2	馈线 3	馈线 4
电阻 10 $\Omega$	0.300 0	0.500 5	0.300 0	0.999 1
电阻 100 $\Omega$	0.299 9	0.299 9	0.299 9	1.000 7
电阻 500 $\Omega$	0.300 0	0.500 2	0.300 0	1.000 2

仿真结果表明：故障馈线的暂态幅值故障测度最大。根据测度的大小能轻易检测出故障馈线。

### 5 结语

配电网单相接地故障选线技术的研究具有重要意义。本文从故障测度的概念出发定义了暂态幅值故障测度，故障测度的范围是[0, 1]。测度最接近 1 的馈线为故障馈线。该方法简单，且适用于谐振接地电网，值得推广。

### 参考文献

[1] 查丛梅, 王长江, 魏云冰, 等. 一种基于 EMD 的谐振接地系统选线新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 100-104.  
ZHA Congmei, WANG Changjiang, WEI Yunbing, et al. A new method of the resonant grounding system fault line detection based on EMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 100-104.

[2] SHU Hongchun, XIAO Bai. A novel fault feeder selection algorithm of single-phase ground faults in ungrounded neutral system using wavelets transform[C] // International Conference on Power Systems Technology, 2006: 2532-2536.

[3] 张国军, 任荣, 韩静静, 等. 希尔伯特变换在配电网故障选线中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 23-28.  
ZHANG Guojun, REN Rong, HAN Jingjing, et al. Application of Hilbert transform in faulty line selection of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 23-28.

[4] 李斌, 束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法[J]. 电工技术学报 2012, 27(6): 183-190.  
LI Bin, SHU Hongchun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 183-190.

[5] 高志鹏, 张慧芬, 孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.

GAO Zhipeng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.

[6] HE Zhengyou, CAI Yumei, QIAN Qingquan. A study of wavelet entropy theory and its application in power system[J]. IEEE Robotic and Automation Society, IEEE Industrial Electronics Society, Proceedings of ICIMA 2004: 327-331.

[7] 郭谋发, 林妙玉, 杨耿杰. 谐振接地系统暂稳态信息智能融合选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 60-66.  
GUO Moufa, LIN Miaoyu, YANG Gengjie. The transient and steady-state information fusion method for phase grounding line detection in resonant grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 60-66.

[8] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.  
JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.

[9] 齐郑, 艾欣, 杨以涵, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 43-46.  
QI Zheng, AI Xin, YANG Yihan, et al. Effective domain of faulty line detection in small current grounding system based of rough set theory[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 43-46.

[10] 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: 37-39.

收稿日期：2014-07-07； 修回日期：2014-09-01

作者简介：

闫光太(1989-), 男, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统调控运行和继电保护工作. E-mail: 312844901@qq.com

(编辑 葛艳娜)