

## 模糊综合评判在接地故障选线中的应用探讨

穆大庆, 莫京军

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410077)

**摘要:** 现行的各种小电流接地故障选线方法利用不同的故障特征量进行处理, 所适用的范围不同, 检测故障的鲁棒性和精度不一样。由于小电流接地系统的复杂性及单相接地故障的特殊性, 每种选线方法往往都有一定的局限性和不足, 如果利用信息融合技术对多种选线方法进行综合应用, 将不失为一种提高接地故障选线性能的有效手段。针对小电流接地系统中的接地故障选线问题进行研究, 提出了针对多种选线方法进行模糊综合评判的小电流接地系统故障选线模式, 对多种选线方法的模糊隶属函数及权重因子的确定进行了探讨, 以能量函数法、小波变换法及相间工频变化量比较法三种接地故障选线方法为例进行了模糊综合评判实例仿真, 仿真结果说明针对多种选线方法进行模糊综合评判的故障选线模式具有更高的可靠性。

**关键词:** 小电流接地系统; 继电保护; 接地故障选线; 能量法; 小波变换法; 相间工频变化量比较法; 模糊综合评判

## Discussion of fuzzy comprehensive evaluation application on earth fault line selection

MU Da-qing, MO Jing-jun

(Changsha University of Science &amp; Technology, Changsha 410077, China)

**Abstract:** The existing different grounded fault line selection methods in ineffectively grounded system collect different fault information to deal with. Different methods have the different applicability, and the robustness and accuracy to check out the fault line are also different. Since the complication of the ineffectively grounded system and the characteristics of single-phase grounded fault, each of the methods has some limitations. Therefore, applying comprehensively various methods with information fusion technique, it will be an efficient way to improve the performance of the grounded fault line selection. This paper focuses on the investigation of fault line selection in ineffectively grounded system and presents a mode of fuzzy comprehensive evaluation for multiple methods of earth fault line selection. Membership functions and weight factors of multiple methods including are probed in the paper. The actual example simulations of fuzzy comprehensive evaluation for three methods including fundamental component mutation between phases, energy function, and wavelet transform are done. The results show that this mode has higher reliability.

**Key words:** ineffectively grounded system; relay protection; earth fault line selection; energy method; wavelet transform method; phase-to-phase fundamental current variation comparison method; fuzzy comprehensive evaluation

中图分类号: TM771

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)13-0001-05

## 0 引言

由于小电流接地系统单相接地故障时接地残流小, 使得故障选线难度较大, 尤其是中性点经消弧线圈接地时, 故障元件与非故障元件的区分则更为困难。尽管国内外许多专家学者针对这一难题进行了大量的研究工作, 也取得了可喜的进展, 但就目前而言, 尚未得到彻底的解决。因此, 小电流接地系统中的故障选线问题一直是电力系统继电保护领域里的一个研究方向<sup>[1-3]</sup>。

现有的各种接地故障选线方法利用了不同的故

障信息进行处理, 所采用的故障特征量有稳态或暂态分量; 基波或谐波分量; 无功或有功分量; 各相故障分量; 各序分量等。各种方法所适用的范围不同, 检测故障的鲁棒性和精度不一样, 且都存在一定的局限性和不足。反映暂态分量的方法(如: 零序暂态分量法、能量法、小波变换法等)受开关操作等产生的暂态干扰信号的影响较大, 在电压过零点附近时发生接地故障的故障特征量不明显, 但对间歇性接地故障的反应能力相对较强; 而反映稳态分量的方法(如: 零序功率方向法、零序高次谐波法、零序有功分量法、相间工频变化量比较法、负序分量法等)则刚好相反。反映高次谐波分量的方法受消弧线圈及其补偿度的影响较小; 而反映基波

基金项目: 湖南省教育厅科研项目(06C117)

分量的方法受其影响相对较大。由于弧光接地产生的振荡电流在负序回路中衰减较快而在零序回路中衰减较慢,因此,反映负序分量的方法比反映零序分量的方法受其影响更小。相间工频变化量比较法受三相负荷不对称的影响相对较小,而反映序分量的选线方法则受负荷不对称的影响相对较大。由于小电流接地系统本身的复杂性及其单相接地故障的特殊性和故障特征量的模糊性,目前任何一种选线方法都很难对各种故障状况均做出准确的选线判断。考虑到不同干扰信号或影响因素对不同的故障特征信息的影响程度不同,因此利用信息融合技术及模糊综合评判方法对各种故障特征信息进行综合分析并对多种选线方法进行综合应用,将不失为一种提高小电流接地选线性能的有效手段。

### 1 多种故障选线方法的模糊处理与决策

由于在故障检测中各种故障选线方法所获取的信息或多或少地会受到系统参数变化及干扰信号等诸多因素的影响,具有一定的模糊性,因此,在馈线单相接地保护中采用多种故障选线方法,利用模糊技术对各种选线方法输出的判断结果的可信度进行模糊处理,然后进行模糊综合评判,可以有效地消除干扰等因素的影响,最终得到较为可信的判断结果,从而提高故障选线的可靠性<sup>[4-7]</sup>。

#### 1.1 相间工频变化量比较法的故障特征量及其隶属函数的确定

小电流接地系统发生单相接地故障时,非故障线路的各相电流工频变化量皆相同,而故障线路尽管两个非故障相电流工频变化量相同,但其故障相与非故障相的电流工频变化量却差别很大(对中性点不接地系统,该差值为非故障相电流工频变化量的3倍以上;对过补偿度为 $p$ 的消弧线圈接地系统,该差值为非故障相电流工频变化量的 $3p$ 倍以上),利用这一特征即可进行故障选线判断。该方法利用线路各相电流工频变化量之间的关系来区分故障线路和非故障线路,体现了相与相之间的特点,其判别能力较强,无须考虑线路的对地电容参数来进行整定,受系统运行方式变化及接地点过渡电阻的影响较小,既适用于中性点不接地系统也适用于中性点经消弧线圈接地系统<sup>[8,9]</sup>。

相间工频变化量比较法故障特征量 $K$ 取为故障相分别与两个非故障相电流工频变化量差的平均值与两个非故障相电流工频变化量平均值的比:

$$K = \Delta I_f / \Delta I_2 \quad (1)$$

其中:  $\Delta I_f = |\Delta I_f - \Delta I_{unf1} + \Delta I_f - \Delta I_{unf2}| / 2$   
 $\Delta I_2 = |\Delta I_{unf1} + \Delta I_{unf2}| / 2$

式中:  $\Delta I_f$  为故障相电流工频变化量;  $\Delta I_{unf1}$ 、 $\Delta I_{unf2}$  为两个非故障相电流工频变化量。

采用 $K$ 值来判定故障线路时,考虑到误差及一些干扰因素的影响,不同的 $K$ 值对应的可信度不同, $K$ 值越大则可信度越高,反之则可信度越低,因此利用模糊隶属函数来衡量该判据的可信度。模糊隶属函数的分布模型可有多种形式,一般可采用偏大型梯形分布模型来定义其隶属函数:

$$\mu = \begin{cases} 1 & \dots\dots\dots K > C_1 \\ \frac{K - C_2}{C_1 - C_2} & \dots\dots\dots C_2 \leq K \leq C_1 \\ 0 & \dots\dots\dots K < C_2 \end{cases} \quad (2)$$

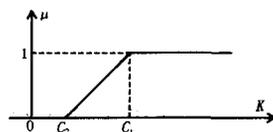


图1 相间工频变化量比较法隶属函数

Fig.1 Membership function of comparison method of fundamental component mutation between phases

$C_1$ 、 $C_2$  的取值可根据实际情况进行调整确定。对于中性点不接地系统,  $C_1$  可取 3,  $C_2$  可取 0.5; 对于过补偿度为  $p$  的消弧线圈接地系统,  $C_1$  可取  $3p$ ,  $C_2$  可取  $0.5p$ 。

#### 1.2 能量法的故障特征量及其隶属函数的确定

从故障分量的角度看,小电流接地系统发生单相接地故障时,相当于在接地点串入一个与接地点原电压大小相等极性相反的电压源,正是这个等效电压源使整个系统对地电压发生偏移。就零序网来说,故障前系统中各元件的电压和电流初始值皆为零,处于零初始状态,且为无源网络。故障时相当于等效故障电压源投入,将发生零序回路电容的充电过程。充电过程中伴随着由等效电压源发出的暂态能量从故障点经故障线路向各条正常线路传递。因此在故障线路断面上流过的暂态能量大于单条正常线路断面上流过的暂态能量,且流向相反。所以比较各条线路流过的暂态能量的大小及流向就可进行故障选线。对消弧线圈接地系统,暂态过程中电感需要激磁能量,该能量也是由等效电压源提供,由于零序能量中同时存在电感能量和电容能量,而电感和电容之间进行能量交换,系统的能量并不会释放完,因此消弧线圈的存在并不会破坏能量判据条件<sup>[10]</sup>。

零序能量函数定义为线路的零序电压与零序电流乘积的积分:

$$E_0(t) = \int_0^t u_0(\tau) \cdot i_0(\tau) d\tau \quad (3)$$

考虑到电流的参考方向, 非故障线路的能量函数总是大于零, 而故障线路的能量函数总是小于于零, 并且其绝对值为其他非故障线路 (包括消弧线圈) 能量函数的总和。

利用能量函数大小 (绝对值) 作为故障特征量构成的能量法的隶属函数定义为:

$$\mu = \begin{cases} 1 & \dots\dots\dots E_0 > C_1 \\ \frac{E_0 - C_2}{C_1 - C_2} & \dots\dots\dots C_2 \leq E_0 \leq C_1 \\ 0 & \dots\dots\dots E_0 < C_2 \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $E_0$  为能量函数的绝对值。

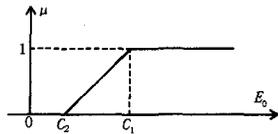


图2 能量函数法隶属函数  
Fig.2 Membership function of energy function method

### 1.3 小波变换法的故障特征量及其隶属函数的确定

在小电流接地选线中应用小波变换时, 一般可取 DBN 小波, 采用多分辨率分解, 经分解后得到各尺度 (分辨率) 上的一系列细节分量。那么, 哪个或哪些尺度上的数据可明显地反映故障特征而用来进行选线呢? 首先, 小尺度上的高频信号反映的是线路局部振荡现象, 不具有故障特征且数值很小, 其中含有较多的干扰, 是不可取的。而较大尺度的低频信号成分代表了故障的暂态过程, 能够体现故障特征且幅值较大。因此, 我们可从各尺度细节分量中选出模最大的信号所在的尺度, 以该尺度的信息作为选线的判据, 在该尺度上模值较大且相位与其他线路相反的线路, 则为故障线路。综合考虑故障时的各种情况, 一般来说, 三阶的 DB3 小波能较好地体现故障特征。采用 DB3 小波对测量的零序电流进行多分辨率的逐级尺度分解, 以模最大信号所在尺度作为考察尺度, 以该尺度下的细节分量的模值作为故障特征量进行选线判断, 该模值越大, 则判为故障线路的可信度越大<sup>[11-13]</sup>。

小波变换法的隶属函数也可采用偏大型梯形分布模型来定义:

$$\mu = \begin{cases} 1 & \dots\dots\dots M_0 > C_1 \\ \frac{M_0 - C_2}{C_1 - C_2} & \dots\dots\dots C_2 \leq M_0 \leq C_1 \\ 0 & \dots\dots\dots M_0 < C_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $M_0$  为模最大尺度下的细节分量的模值。

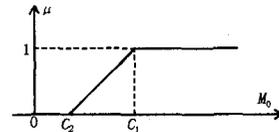


图3 小波变换法隶属函数

Fig.3 Membership function of wavelet transform method

### 1.4 多种选线方法的模糊综合评判

对选线结果进行综合评判时, 设有  $n$  种选线方法, 则每种方法作为模糊综合评判的 1 个因素, 各因素的隶属函数组成的模糊集合为  $\{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ , 各因素权重因子组成的模糊子集设为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 且经归一化处理保证  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。模糊综合决断结果可有多种算法, 在小电流接地选线时一般可采用如下算法:

$$b = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot \mu_i) \quad (6)$$

最后决策以  $b$  的值为依据, 当  $b > \epsilon$  时 ( $\epsilon$  一般可取 0.5) 判为本线路接地故障。

在不同的系统条件及故障情况下, 各种故障选线方法的优劣程度不同, 因此, 在进行模糊综合评判时每种方法都引入了权重因子。例如, 相间工频变化量比较法, 其判断量  $K = \Delta I_1 / \Delta I_2$ , 当系统对地电容很小时, 接地故障时的对地电容电流也将很小, 对于非故障线路的  $\Delta I_1$  本应小于  $\Delta I_2$ , 但由于  $\Delta I_2$  太小, 而  $\Delta I_1$  因测量误差的影响导致  $\Delta I_1 > \Delta I_2$ , 可能出现误判, 因此, 当对地电容电流越大时, 该判据的可信度越高, 反之则越低。另外, 该方法属于稳态分量法, 当出现间歇性接地故障时难以判断故障线路, 此时的可信度则很低。能量法与小波分析法皆属于暂态分量法, 而暂态分量法都受到接地故障瞬间相电压瞬时值大小 (即是否在过零点附近) 的影响, 因此其权重可采用随故障瞬间相电压瞬时值大小变化的函数值来描述, 即故障瞬间相电压瞬时值越大, 则该暂态分量法的权重因子相对越大, 反之权重因子相对越小。权重因子的确定一般有统计法、试探法或用单一隶属函数来描述。

为进一步提高模糊评判的可信度, 各种选线方法的隶属函数的确定可借助神经网络的方法, 运用大量的故障仿真数据样本和现场历史故障数据样本进行训练, 利用神经网络的自学习特性, 从而寻求与实际故障情况较为吻合的参数及分布模型。

## 2 仿真结果及分析

### 2.1 仿真模型

本文是以湖南省怀化变电站的结构及参数为仿

真原型,采用 Matlab 仿真,仿真模型为降压变 10 kV 侧中性点不接地系统,结构如图 4 所示。参数如下:  
 line1:length=4.3 km, $R_1=0.17 \Omega/\text{km}$ , $R_0=0.32 \Omega/\text{km}$ ,  
 $L_1=1.00 \text{ mH}/\text{km}$ , $L_0=5.00 \text{ mH}/\text{km}$ , $C_1=0.0114 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  
 $C_0=0.0045 \mu\text{F}/\text{km}$ ; Load1: $P=1.36 \text{ MW}$ , $Q=1.02 \text{ Mvar}$ ;  
 Line2:length=4.8km, $R_1=0.33 \Omega/\text{km}$ , $R_0=0.48 \Omega/\text{km}$ ,  
 $L_1=1.06 \text{ mH}/\text{km}$ , $L_0=5.06 \text{ mH}/\text{km}$ , $C_1=0.0107 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  
 $C_0=0.0044 \mu\text{F}/\text{km}$ ; Load2:  $P=0.304 \text{ MW}$ ,  
 $Q=0.228 \text{ Mvar}$ ;Line3:length=20.2 km, $R_1=0.26 \Omega/\text{km}$ ,  
 $R_0=0.41 \Omega/\text{km}$ , $L_1=1.04 \text{ mH}/\text{km}$ , $L_0=5.04 \text{ mH}/\text{km}$ ,  
 $C_1=0.0109 \mu\text{F}/\text{km}$ , $C_0=0.0044 \mu\text{F}/\text{km}$ ; Load3: $P=5.80 \text{ MW}$ ,  
 $Q=4.40 \text{ Mvar}$ ;Line4:length=4 km, $R_1=0.63 \Omega/\text{km}$ ,  
 $R_0=0.78 \Omega/\text{km}$ , $L_1=1.13 \text{ mH}/\text{km}$ , $L_0=5.14 \text{ mH}/\text{km}$ ,  
 $C_1=0.0100 \mu\text{F}/\text{km}$ , $C_0=0.0043 \mu\text{F}/\text{km}$ ; Load4:  $P=0.42 \text{ MW}$ ,  
 $Q=0.32 \text{ Mvar}$ ; 3-Phase C:  $C=0.05 \mu\text{F}$  (模拟变压器绕组、母线及电压互感器的各相对地电容)。

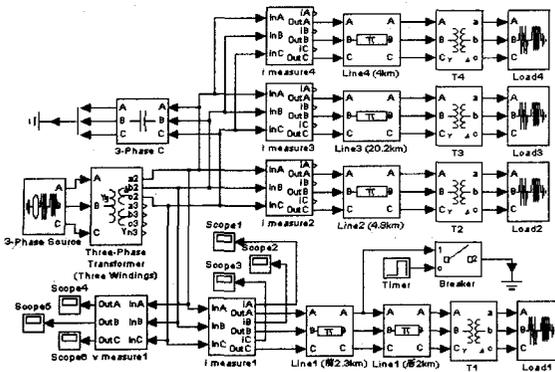


图 4 仿真模型图

Fig.4 Simulation model

## 2.2 仿真结果及分析

进行接地故障仿真分析时,故障时刻考虑接地相的相电压瞬时值分别在过零点附近和峰值点附近两种情况,故障点接地电阻  $R_g$  分别考虑  $0.01 \Omega$  和  $1000 \Omega$  两种情况,故障设为永久性稳定接地故障。故障数据采样周期  $T_s$  取为  $0.1 \text{ ms}$  (即每工频周波 200 个采样点),以能量函数法、小波分析法及相间工频变化量比较法三种方法为例进行模糊综合评判仿真。

能量函数法故障特征量  $E_0$  取故障起始后半半个工频周波内的零序能量函数绝对值:

$$E_0 = \left| T_s \cdot \sum_{k=1}^{100} [i_0(k) \cdot u_0(k)] \right|$$

( $k=1$  点为故障起始点)

小波分析法故障特征量  $M$  取三阶的 DB3 小波对采样信号进行多分辨率分解时在第 4 级尺度上的细节分量的最大模值。

相间工频变化量比较法故障特征量  $K$  取故障分别与两个非故障相电流工频变化量差的平均值与两个非故障相电流工频变化量平均值的比:

$$K = \Delta I_1 / \Delta I_2$$

三种接地选线方法的故障特征量仿真结果数据如表 1 所示。

在进行模糊综合评判时,三种接地选线方法的隶属函数皆采用偏大型梯形分布模型,三种方法隶属函数分布模型的上限  $C_1$  及下限  $C_2$  分别取为:能量法  $C_1=40$ ,  $C_2=1$ ;小波分析法  $C_1=10$ ,  $C_2=1$ ;相间工频变化量比较法  $C_1=3$ ,  $C_2=1$ 。根据以上故障特征量的值计算出三种接地选线方法的隶属函数值如表 2 中的  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ 。

表 1 三种接地选线方法的故障特征量仿真结果

(L1: 故障线路)

Tab.1 Simulation results of fault characteristics of three methods(L1: fault line)

故障情况	线路	能量函数值 $E_0$	小波第 4 级细节分量模值 $M$	相间工频变化量的 $K$ 值
相电压过零 $R_g=0.01 \Omega$	L1	0.9334	1.9178	34.7255
	L2	1.2218	0.8742	0.1136
	L3	0.0960	1.1039	0.1528
	L4	0.4790	0.2879	0.1094
相电压过零 $R_g=1000 \Omega$	L1	3.0953	1.2009	36.8571
	L2	0.2599	0.3736	0.0807
	L3	1.6153	0.5249	0.1979
	L4	0.3014	0.0496	0.1267
相电压峰值 $R_g=0.01 \Omega$	L1	64.5543	7.9736	48.3848
	L2	33.0084	4.7462	0.1970
	L3	8.8777	7.1508	0.0794
	L4	5.9550	2.1617	0.1118
相电压峰值 $R_g=1000 \Omega$	L1	48.5250	8.1352	36.9325
	L2	11.5731	2.0282	0.0726
	L3	21.0416	3.6219	0.2061
	L4	4.0669	0.5050	0.1261

能量法和小波分析法的权重因子按单一隶属函数来考虑,在相电压过零点附近接地故障,权重因子隶属函数值取  $0.2$ ,在相电压峰值点附近接地故障,权重因子隶属函数值取  $0.9$ 。由于采用 Matlab 仿真所得到的相电流工频变化量测量误差极小,且得到的故障相电流工频变化量有较大的值,故相间工频变化量比较法的权重因子直接取  $1$ 。经归一化处理,在相电压过零点附近接地时,能量法和小波分析法的权重因子  $a_1=a_2=0.2/(0.2+0.2+1)=0.143$ ,相间工频变化量比较法的权重因子  $a_3=1/(0.2+0.2+1)=0.714$ ;在相电压峰值点附近接地时,能量法和小波分析法的权重因子  $a_1=a_2=0.9/(0.9+0.9+1)=0.3214$ ,相间工频变化量比较法的权重因子  $a_3=1/(0.9+0.9+1)=0.3572$ 。模糊综合评判结果值取  $b = a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2 + a_3 \mu_3$ ,若  $b > 0.5$ ,则判为接地线路。

由表 2 可以看出,在各种故障情况下线路 L1 的综合评判结果都大于  $0.5$ ,被判为接地故障线路,而在各种故障情况下线路 L2~L3 的综合评判结果都小于  $0.5$ ,被判为非故障线路,该判断结果正确。

另外,从表 1 的三种选线方法仿真的故障特征

量可以看出, 在各种故障情况下, 能量法和小波分析法的故障特征量变化较大, 不够稳定, 由单条线路所测量的故障特征量进行选线时容易出现误判, 故能量法和小波分析法不太适宜于基于就地测量的判断, 而更适宜于基于群体测量比较的判断 (即同时测量各条线路, 并对各线路所测故障特征量进行

相对比较的判断), 因此这两种接地选线方法也就不宜与馈线保护相结合。而相间工频变化量比较法在各种故障情况下的故障特征量都比较稳定 (故障线在 3 以上, 非故障线在 1 以下), 因此适宜于就地测量判断, 能较好地与馈线保护相结合。

表 2 三种接地选线方法的模糊综合评判

Tab.2 Fuzzy comprehensive evaluation for three methods of fault line selection

故障情况	线路	能量法		小波分析法		相间工频变化量法		综合评判结果 <i>b</i>
		隶属度 $\mu_1$	权重 $a_1$	隶属度 $\mu_2$	权重 $a_2$	隶属度 $\mu_3$	权重 $a_3$	
相电压过零 $R_g=0.01 \Omega$	L1	0	0.143	0.10198	0.143	1	0.714	0.728583
	L2	0.00569	0.143	0	0.143	0	0.714	0.000814
	L3	0	0.143	0.01154	0.143	0	0.714	0.00165
	L4	0	0.143	0	0.143	0	0.714	0
相电压过零 $R_g=1000 \Omega$	L1	0.05373	0.143	0.02232	0.143	1	0.714	0.724875
	L2	0	0.143	0	0.143	0	0.714	0
	L3	0.01578	0.143	0	0.143	0	0.714	0.002257
	L4	0	0.143	0	0.143	0	0.714	0
相电压峰值 $R_g=0.01 \Omega$	L1	1	0.3214	0.77484	0.3214	1	0.3572	0.927634
	L2	0.82073	0.3214	0.41624	0.3214	0	0.3572	0.397562
	L3	0.20199	0.3214	0.68342	0.3214	0	0.3572	0.284571
	L4	0.12705	0.3214	0.12908	0.3214	0	0.3572	0.08232
相电压峰值 $R_g=1000 \Omega$	L1	1	0.3214	0.79280	0.3214	1	0.3572	0.933406
	L2	0.27111	0.3214	0.11424	0.3214	0	0.3572	0.123851
	L3	0.51389	0.3214	0.29132	0.3214	0	0.3572	0.258794
	L4	0.07864	0.3214	0	0.3214	0	0.3572	0.025275

### 3 结论

本文对模糊综合评判在小电流接地系统单相接地故障选线中的应用进行了研究与探讨, 对多种接地故障选线方法的故障特征量进行了分析, 针对多种故障选线方法的模糊隶属函数及权重因子的确定进行了研究, 以能量函数法、小波变换法及相间工频变化量比较法三种接地故障选线方法为例进行了模糊综合评判实例仿真, 实例仿真结果说明采用多种选线方法进行模糊综合评判的选线模式具有更高的可靠性。本文在理论上及 Matlab 仿真基础上对多种方法的综合应用进行了分析探讨, 然而如何更为有效地选取各种选线方法的模糊隶属函数及权重因子, 还有赖于更多的仿真数据尤其是实测数据以及进一步的研究工作。

### 参考文献

[1] 要焕年, 曹梅月. 谐振接地技术新发展[J]. 中国电力, 2000, 33(10): 55-57, 80.  
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. New Development of Resonance Neutral Earthing Technology[J]. Electric Power, 2000, 33(10): 55-57, 80.

[2] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相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[J]. Relay, 2001, 29(4): 16-20.

[3] 马珂, 张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J]. 继电器, 2003, 31(5): 65-70.  
MA Ke, ZHANG Bao-hui. Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks[J]. Relay, 2003, 31(5): 65-70.

[4] 侯宝生, 曾成碧, 高瓴, 等. 模糊数学在小电流接地系统中的应用[J]. 继电器, 2003, 31(8): 15-17.  
HOU Bao-sheng, ZENG Cheng-bi, GAO Ling, et al.. Application of Fuzzy Math in Power System with Neutral Unearthed or Indirectly Earthed[J]. Relay, 2003, 31(8): 15-17.

[5] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇迹. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88-91.  
CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG Qi-xun. A Fault Line Detection Device for the Non-solidly Grounded System Based on Fuzzy Sets Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.

[6] 房鑫炎, 郁惟镛, 庄伟. 模糊神经网络在小电流接地系统选线中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 15-19.  
FANG Xin-yan, YU Wei-yong, ZHUANG Wei. Application of Fuzzy Neural Networks to Grounded Line Detection in Neutral Point Indirectly Grounded Power System[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 15-19.

- Telecon Press, 2005.
- [3] 宋伟新. 两次主变保护误动作原因查找及防范[J]. 电力安全技术, 2003.  
SONG Xin-wei. Analysis of Transformer Protect Misaction And Prevention[J]. Security Technology of Power System, 2003.
- [4] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002.  
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. The Transient Saturation of Current Transformer and Its Application Calculation[J]. Relay, 2002.
- [5] 王维俭, 李芙英. 纵联差动原因不明误动的分析和对策[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18).  
WANG Wei-jian, LI Fu-ying. Analysis and countermeasure for misoperation of Longitudinal Differential Protection with Unclear Reason[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18).
- [6] 丁浩杰. 变压器差动保护用电流互感器饱和的原因分析及解决办法[J]. 广东电力.  
DING Hao-jie. Analysis of Current Transformer Saturation in Transformer Differential Protection and Solution to it[J]. Guangdong Electric Power, Guangdong Electric Power.
- [7] GB 16847-1997(idt. IEC 44 6 1992), 保护用电流互感器暂态特性要求[S].  
GB 16847-1997(idt. IEC 44 6 1992), Requirements for Protective Current Transformers for Transient Performance[S].
- [8] 熊列彬, 陈小川, 陈德明, 等. 秦沈线变压器差动保护误动作原因分析. 电力系统自动化[J], 2005, 29(8).  
XIONG Lie-bin, CHEN Xiao-Chuan, CHEN De-ming, et al. Analysis of Transformer Differential Protect Misaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8).
- [9] 徐习东, 方愉冬, 等. 变压器差动保护的隐患[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13).  
XU Xi-dong, FANG Yu-dong, et al. Hidden Defect of Transformer Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13).
- [10] 李光琦. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.  
LI Guang-qi. Temporary Attitude Analysis of the Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

收稿日期: 2006-08-16

作者简介:

龚洪金(1978-), 男, 学士, 主要从事变电站综合自动化项目的技术和管理工作. E-mail: snghj@sina.com

(上接第5页 continued from page 5)

- [7] 曾祥君, Li K K, Chan W L, 尹项根, 等. 信息融合技术在故障选线中的应用[J]. 继电器, 2002, 30(9): 15-20.  
ZENG Xiang-jun, Li K K, Chan W L, YIN Xiang-gen, et al. Earth Fault Feeder Detection with Information Fusion[J]. Relay, 2002, 30(9): 15-20.
- [8] 穆大庆. 消弧线圈接地电网中单相接地保护的新原理探讨[J]. 继电器, 2001, 29(6): 26-27, 34.  
MU da-qing. Study on a New Principle of Single-phase Earth Protection for Arc-suppression Coil Grounded System[J]. Relay, 2001, 29(6): 26-27, 34.
- [9] 穆大庆, 尹项根, 甘正宁. 中性点不接地系统中单相接地保护的新原理探讨[J]. 长沙电力学院学报(自然科学版), 2005, 20(1): 6-9.  
MU Da-qing, YIN Xiang-gen, GAN Zheng-ning. Exploration of New Principle of Single-phase Earth Protection for the System with Floating Neutral Point[J]. Journal of Changsha University of Electric Power(Natural Science), 2005, 20(1): 6-9.
- [10] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451-457.  
HE Ben-teng, HU Wei-jin. A New Principle to Detect the Grounded Line in a Neutral Point Indirectly Grounded Power System Based on the Energy Function[J]. Journal of Zhejiang University(Natural Science), 1998, 32(4): 451-457.
- [11] 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.  
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al. Abrupt Change Detection With Wavelet for Small Current Fault Relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 78-82.
- [12] 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]. 电力系统自动化, 1999, 23(13): 33-36.  
CAO Feng-mei, SU Pei-pu. Study on the Application of Wavelet Transform to Detect Earth-fault in Distribution Automation System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(13): 33-36.
- [13] 毛鹏, 孙雅明, 张兆宁, 等. 小波包在配电网单相接地故障选线中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 9-13, 17.  
MAO Peng, SUN Ya-ming, ZHANG Zhao-ning, et al. Wavelet Packet Based Detection of Phase-to-ground Fault in Distribution Automation System[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 9-13, 17.

收稿日期: 2006-07-10; 修回日期: 2007-02-11

作者简介:

穆大庆(1964-), 男, 工程硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动控制技术等; E-mail: mudaqing64@163.com

莫京军(1961-), 男, 学士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及电力电子等。