

配电网单相接地故障判别的多重算法研究与 DSP 实现

王军芬¹, 刘培跃², 康怡³, 杜海莲⁴

(1. 石家庄经济学院信息工程系, 河北 石家庄 050031; 2. 石家庄职业技术学院机电工程系, 河北 石家庄 050081;
3. 华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003; 4. 河北师范大学电子系, 河北 石家庄 050031)

摘要: 配电网发生最多的故障是接地故障, 如何准确地检测并隔离接地故障线路, 成为中性点非有效接地系统实现配电网自动化的一个重要研究课题。传统的选线方法只对部分故障信息进行处理, 选线可靠性不高。本文把模糊理论应用于故障选线, 实现多判据信息融合, 使选线性能得到提高。给出整个融合算法的 DSP 软硬件实现, 并通过高压动模实验故障数据验证了文中方法的正确性和可行性。

关键词: 配电网; 故障选线; 隶属函数; 数字信号处理器

Research and realization based on DSP of multiple algorithm of selection on single-phase to ground fault line in distribution network

WANG Jun-fen¹, LIU Pei-yue², KANG Yi³, DU Hai-lian⁴

(1. Department of Information Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China;
2. Department of Electromechanics Engineering, Shijiazhuang Vocational Technology Institute, Shijiazhuang 050081, China;
3. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
4. Department of electronics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: How to detect and isolate earth-faulty section is an important subject to realize distribution automation in ineffectively grounded systems. Traditional single fault-detection method using only some parts of fault information has poor reliability. Fuzzy sets theory is introduced and applied in fault line detection to make the fusion of multi-fault information, and therefore improves the detecting performance greatly. The realization of software and hardware for the fusion strategy is also introduced. Dynamic mould laboratory emulation results show that the fusion strategy exhibits excellent property over the existing criteria.

Key words: distribution system; detection earth-fault; membership function; DSP

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)12-0005-05

0 引言

目前, 我国 6-35 kV 中低压电网普遍采用中性点非有效接地方式。长期以来, 国内外继电保护工作者做了不懈的研究和探索, 提出了多种选线方法。但是任何单一选线方法很难完全适应各种电网结构与复杂的故障状况, 这是现有选线技术失败的主要原因^[1]。在这种现实状况下, 一种可行的办法是使用多重选线判据来构成综合判据, 利用各种判据选线性能上的互补性扩大正确选线的故障范围, 提高选线结果的可靠性。

信息融合技术自20世纪70年代提出以来, 不断发展完善, 目前已成为信息处理领域的有力工具。在故障检测技术中易于实现的常用信息融合方法有:

加权系数信息融合, 神经网络信息融合, 基于模糊推理的信息融合, 基于专家系统的信息融合, 利用小波变换的多尺度信息融合^[2]。加权系数信息融合是对多源信息进行融合的最简单方法, 但是它的加权系数需要由先验知识整定。利用小波变换的多尺度信息融合只考虑了暂态信息而没有充分利用故障信息。神经网络信息融合和基于专家系统的信息融合都需要大量的样本, 尤其是利用神经网络模式识别方法, 它虽然有一定的自适应和容错性, 但一方面得出的精度依赖于提供的样本的数量和完备性, 另一方面训练样本需要大量的时间, 这两点对一定规模的配电网是很难满足的^[3]。

本文把模糊理论^[4~6]应用于故障选线, 充分利用多方面的故障信息, 实现信息融合, 提高了故障判别能力。首先根据判据规则建立各选线方法的隶

属函数,包括:故障测度隶属函数(表征一条线路表现出故障特征程度的数值属性描述)和各选线方法的权系数隶属函数(表征一种方法的可信度)。最后对各个判据的数值属性进行融合,得出一个综合选线结果^[7]。此方法在DSP芯片TMS320LF2407上进行实现,并应用高压动模实验的实验数据验证了该方法的准确性和可行性。

1 选线判据分析及其模糊模型的建立

本文在融合过程中综合了多种选线算法。下面主要介绍突变量算法和五次谐波算法的隶属函数。

1.1 突变量算法隶属函数

电流突变量算法适用于NES,与随调试的自动调节消弧线圈结合,在电网发生单相永久接地故障的情况下,通过改变消弧线圈的电抗值。考虑电压折算后,消弧线圈参数改变只会导致故障线路中的零序电流(即故障点的残余电流)发生变化。利用本条线路在消弧线圈变化前后的电流变化量不同选出故障线路^[8]。

设NES系统有n回出线。p,j表示第p,j条线路,当其不为0时表示母线。定义DetI为经电压折算后线路的电流变化差异量, I_{i1}, I_{i2}分别为消弧线圈参数值改变前后各线路的零序电流, U_{i1}, U_{i2}分别为消弧线圈参数值改变前后各线路的零序电压。对于故障线路:

$$DetI = |I_{i1} - I_{i2}U_{i1}/U_{i2}| \neq 0 \quad (i=0,1,\dots,n) \quad (1)$$

对于非故障线路:

$$DetI = |I_{i1} - I_{i2}U_{i1}/U_{i2}| = 0 \quad (2)$$

构造如下故障测度隶属函数:

$$\mu(k) = DetI(k) / \sum_{j=1}^n DetI(j) \quad 0 \leq \mu \leq 1 \quad (3)$$

其中:k为1,2,...,n。DetI(k)的值越趋于0,说明第k条线路越不可能是故障线路; DetI(k)值越大,说明第k条线路越可能是故障线路。

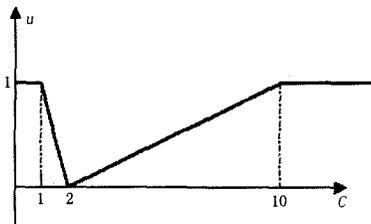


图1 电流突变量权系数隶属函数

Fig.1 Proportion membership function of mutuate variance

突变量算法权系数隶属函数:当各条线路的电流突变量不明显时,可能由以下三种情况引起:母

线故障,消弧线圈没有动作或动作量很小,外界干扰。电流突变量算法的权系数隶属函数主要是针对上述情况做出,如图1。C=max/cmax, max为线路突变量中最大值; cmax为线路突变量中次最大值。

C<2为母线故障,这时母线故障测度值为μ(0)=1-m; C>2为线路故障,这时母线故障测度值为μ(0)=1-M; m为线路故障测度值中最小值。M为线路故障测度值中最大值。经上述处理,用计算各条线路突变量可表示各线路是否可能为故障线路的情况。

定义权系数隶属函数为:

$$\mu = \begin{cases} (-C+2) & C \leq 2 \\ (C-2)/8 & 2 < C < 10 \\ 1 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

有些情况各条线路的突变值都非常小,但C的值相对比较大,可能因故障或干扰而引起,这时容易引起误判。改进的办法是利用各条线路突变量的最大值按下式对权系数进行修正。

$$\mu = \alpha * \mu \quad (5)$$

式中α为:

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 & \max \leq 0.2 \\ 1 & \max > 0.2 \end{cases} \quad (6)$$

当max≤0.2时,加入修正系数0.5,使此算法的权系数不大于0.5。

1.2 五次谐波算法

设系统共n条线路,线路k故障电流以电压为参考相量的相位用φ(k)表示。

$$\phi_c(k) = \begin{cases} |\phi(k) - 90^\circ| & \phi(k) > 0 \\ 180^\circ - |\phi(k) + 90^\circ| & \phi(k) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

称φ_c(k)为计算相角, φ_c(k)∈[0°, 180°]。φ_c(k)越趋于0°,线路k越不可能是故障线路; φ_c(k)越趋于180°,线路k越疑是故障线路;当φ_c(k)越趋于90°时,表示相位信息不能证明线路k是否故障。

经过上述处理,用计算相角可单调表示各线路是否可能为故障线路的情况。但其中一些短线路上幅值非常小的电流可能因干扰、测量误差等原因使其相位接近-90°,由此得到的计算接近180°,容易被识别为故障线路,这是不合理的。改进的办法是利用幅值按下式进行修正。

$$\phi_c(k) = \begin{cases} |\phi(k) - 90^\circ| & \phi(k) > 0 \\ \alpha(k) * (180^\circ - |\phi(k) + 90^\circ|) & \phi(k) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:α(k)为修正系数。

当线路k的电流幅值低于总电流幅值的20%

时, 加入修正系数 0.5, 使 $\phi_c(k) \leq 90^\circ$ 。再令:

$$\phi_c(0) = 180^\circ - \max(\phi_c(i)) \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

式中: $\phi_c(0)$ 为母线的故障相位, 即为线路最大计算相角的补角。当线路故障时, 故障线路计算相角值接近 180° , $\phi_c(0)$ 非常小; 当母线故障时, 各线路的计算相角都接近 0° , $\phi_c(0)$ 接近 180° 。

定义其故障测度隶属函数为:

$$\mu(k) = \begin{cases} \phi_c(k)/180^\circ & k = 1, 2, \dots, n \\ (180^\circ - \phi_c(0))/180^\circ & k = 0(\text{母线}) \end{cases} \quad (10)$$

五次谐波算法的权系数隶属函数主要根据五次谐波电流的幅值信息作出, 故障线路零序五次谐波电流的幅值越大, 它就具备越高的可信度。定义权系数隶属函数:

$$\mu(k) = \begin{cases} \left(\frac{A(m)}{\max(A(k))} \right)^2 & 0 \leq A(m) \leq \max(A(k)) \\ 1 & A(m) \geq \max(A(k)) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A(m)$ 为故障线路零序五次谐波电流的幅值, $\max(A(k))$ 为非故障线路中最大零序五次谐波电流幅值。

模糊信息融合的计算方法很多, 为适应接地故障选线的特点, 通常取加法运算。假设电网中共有 N 条线路 ($k=0, 1, \dots, N$; $k=0$ 时表示母线), 融合算法共使用 M 种选线方法 ($m=1, 2, \dots, M$), 则采用第 m 种选线方法得到的第 k 条线路故障测度隶属函数为 $A\mu_m(k)$, 第 m 种选线方法权系数为 $B\mu_m$ 。每一条备选线路 k 都得到一个 m 种方法融合的总的模糊决策可信度: $Y_k = \sum_{m=1}^M A\mu_m(k)B\mu_m$, 可信度最大的为故障线路^[8]。

2 DSP 实现

图 2 是整个硬件平台的硬件结构框图。A/D 转换器将模拟信号转换成 DSP 可处理的数字量。系统中设计了 40 路模拟输入, 通过模拟开关分两级将模拟信号分时送到 A/D 转换器进行处理。A/D 转换器采用了 AD 公司的 AD7864。TI 公司 TMS320LF2407 作为整个数据采集系统的核心^[9]。整个平台的逻辑控制全部由一片可编程逻辑器件 CPLD 来实现, 采样率为 3200Hz。

硬件平台具有以下特点:

1) 具有 40 路的模拟输入通道, 8 路开关量输入和开关量输出, 同时采用了 16bit 的 DSP 和 12bit 的 AD 转换器作为整个平台的核心。保证了具有足够的输入输出通道, 以及对模拟量和开关量处理的

快速性、可靠性、高精度性。

2) 由于电力行业设备应用环境恶劣, 平台的模拟量采用硬件及软件滤波, 输入输出通道均采用光电隔离及浮动电源技术。工艺上采用多层电路板和大面积电源及地平面, 元件亦采用贴片封装, 以提高系统的抗干扰能力。

3) 具有串口和 PWM 电流环电路接口以及 CAN 网络接口, 以适应继电保护的网络化。

4) 提供了键盘输入和液晶汉字显示功能, 方便了人机交互。

5) 利用 CPLD 的在系统可编程功能可修改系统的逻辑, 保证了系统的可扩充和可升级功能。

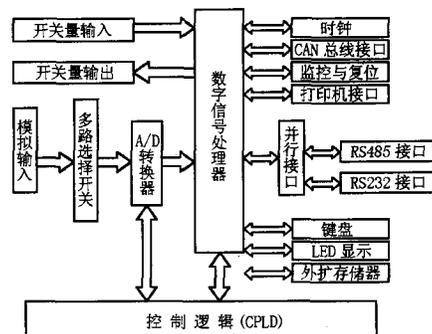


图 2 硬件结构图

Fig.2 Hardware structure chart

在软件实现上采用了易读的结构化程序设计语言 C 语言进行整体设计编程。系统软件由四大部分组成: 初始化、采样、故障判断和通信显示。软件设计采用模块化、结构化的编程思想, 使整个装置可以根据不同的需求方便地添加或删除一定功能。总系统软件流程图如图 3 所示。

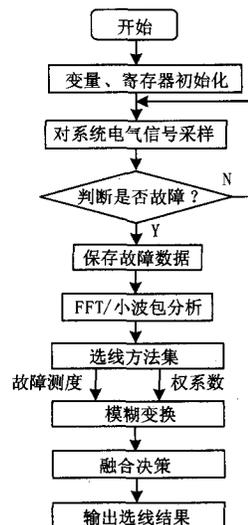


图 3 软件流程图

Fig.3 Software flow chart

3 高压动模实验室仿真

3.1 6 kV 高压动模实验系统结构

高压动模实验系统结构图如图4所示。系统电源电压为6 kV，装有接地变压器（50 kVA/6 kV）提供中性点，消弧线圈为随调式消弧线圈（35 kVA/6 kV）。采用单母线分段接线方式：第一段模拟架空线路。第二段模拟电缆线路，均有4回馈线。4条线路的设计，充分考虑了实际系统的条件和应用情况，架空线路的长度分别为： $L_1=51$ km； $L_2=21$ km； $L_3=11$ km； $L_4=1$ km；电缆线路的长度分别为 $L_1=5.1$ km； $L_2=2.1$ km； $L_3=1.1$ km； $L_4=0.1$ km；在一定程度上避免了得出偏颇的结论，同时加大了选线难度，对算法的考验更加严格。有效的克服了故障类型单一、过于简单化和理想化的不足，与现场实际非常相似。

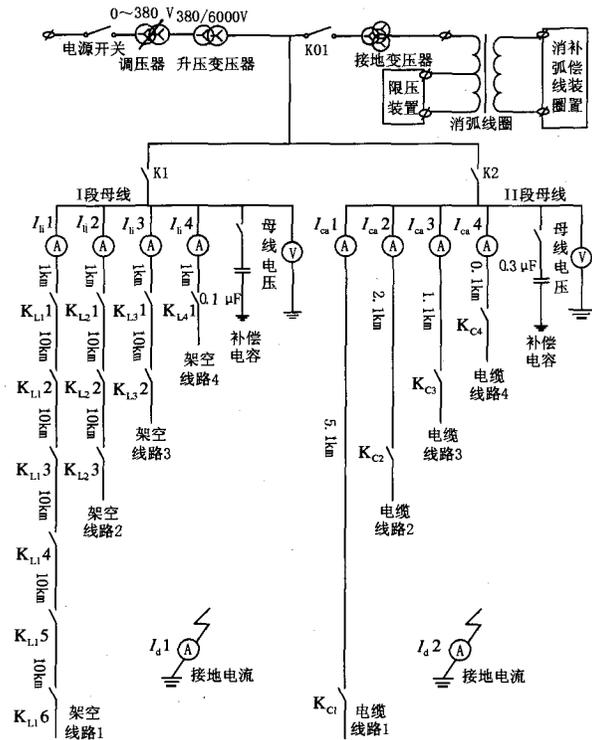


图4 6 kV 的动模实验系统结构图

Fig.4 Structure of the system of dynamic mould laboratory

3.2 仿真结果

为了验证本文所提出的算法的有效性，本文作者进行了大量的动模实验。下面为两种不同的典型条件下的接地故障实验。

算例 1：中性点不接地，架空线路与电缆线路混合系统中，选取 4 条架空线路（ $L_1=51$ km； $L_2=21$ km； $L_3=11$ km； $L_4=1$ km）和后三条电缆线路（ $L_5=2.1$ km； $L_6=1.1$ km； $L_7=0.1$ km）。其中线路 4 末端 B

相经 1 kΩ 电阻接地，故障初相角：129.2°。模糊选线结果如表 1 所示。

表 1 算例 1 模糊选线结果

Tab.1 Results for fault detection with fuzzy analysis of case 1

	权系数	测 度 集	正确/否
基波		0.517 447, 0.370 926, 0.449 801,	
比幅	1	0.476 718, 0.982 553, 0.297 792,	正确
比相		0.411 779, 0.492 983	
五次谐波	0.562	0.506 685, 0.440 324, 0.482 213,	
984		0.446 323, 0.493 314, 0.274 900,	否
		0.288 556, 0.239 859	
小波算法	1	0, 0, 0.214 286, 0,	正确
		0.785 714, 0, 0, 0	
总测度	--	0.802 702, 0.618 821, 0.935 564,	
		0.727 991, 2.045 996, 0.452 556,	正确
		0.574 232, 0.628 020	

说明：本方法共融合了五种算法，有功功率法和突变量法在 NUS 中不适用，其测度集和权系数均为 0，在此表中没有列出。表中测度集中第一个数值表征的为母线的故障测度，第二个数值表征的为第一条出线的测度值，以此类推（下表同）。

算例 2：对于架空线路与电缆线路中性点经消弧线圈系统，此算例把架空线路和电缆线路全部投入，共 8 条。线路 1 端 A 相经过渡电阻 6 kΩ 接地，故障初相角为：-131.5°。模糊选线结果如表 2 所示。

表 2 算例 2 模糊选线结果

Tab.2 Results for fault detection with fuzzy analysis of case 2

	权系数	测 度 集	正确/否
五次谐波	0.395152	0.034 062, 0.965 938, 0.370 444,	
		0.411 525, 0.265 226, 0.085 200,	正确
		0.265 544, 0.112 295, 0.281 575	
有功功率	1	0, 0.308 499, 0.049 387, 0.015 436,	否
		0.000 653, 0.335 538, 0.204 904,	
		0.085 538, 0.000 046	
小波算法	0.75	0.187 500, 0.281 250, 0, 0, 0,	正确
		0.187 500, 0.046 875, 0.046 875, 0	
		0.375 203, 0.022 171, 0.007 895,	
突变量	0.380296	0.074 375, 0.010 895, 0.080 598,	否
		0.005 093, 0.099 894, 0.079 375	
		0.576 163, 0.993 613, 0.203 664,	
总测度	--	0.252 425, 0.116 352, 0.637 303,	正确
		0.361 802, 0.276 680, 0.190 686	

说明：由于群体比幅比相在 NES 中不适用，其测度集和权系数均为 0，所以在此表中没有列出（下表同）。

表3 算例3 模糊选线结果

Tab.3 Results for fault detection with fuzzy analysis of case 3

权系数	测 度 集	正确/否
五次 谐波	0.028 793, 0.186 064, 0.265 013, 0.339 268, 0.496 253, 0.225 646, 0.230 647, 0.386 111, 0.971 207	正确
	0.131 183, 0.056 241,	
有功 功率	0.026 224, 0.003 588, 0.345 078, 0.233 293, 0.100 706, 0.103 686	否
	0.214 286, 0, 0, 0, 0, 0,	
小波 算法	0, 0, 0, 0.785 714	正确
	0, 0.003 522, 0.000 393,	
突变 量	0.000 040, 0.000 280, 0.008 538, 0.003 298, 0.003 085, 0.980 844	正确
	0.216 730, 0.074 684, 0.046 629,	
总测 度	0.039 911, 0.043 925, 0.173 335, 0.121 340, 0.078 368, 1.892 772	正确

算例3:为了更好的验证本文方法,本文仿真了在实际操作中可能出现的人为的某一条线路相位接反的情况。

在中性点经消弧线圈接地系统中,把架空线路和电缆线路全部投入(共8条),架空线路的第三条即L3反相。线路8末端C相接地,接地电阻为100Ω,故障初相角-100°。模糊选线结果如表3所示。

可以看出,对于高阻接地以及在某一线路误操作反相接入等复杂故障情况下,若像以往一样单独使用某一判据,极有可能引起误判;而使用本算法智能融合后,充分考虑了各种因素的影响,各种恶劣情况下均能正确选出故障线路。

4 结束语

本文应用模糊理论,综合多种故障选线方法、融合各种故障信息,用隶属函数表示各故障选线方法的模糊性,应用加权求和进行运算,实现多种故障选线方法在馈线保护中的就地融合,能有效克服各种干扰的影响,提高接地保护的可靠性。整个融合算法在TMS320LF2407 DSP中进行实现。并进行了大量的物理高压动模实验,证明了文中方法的有效性和优越性。

参考文献

- [1] 贾清泉,杨以涵,杨奇逊.应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护[J].电力系统自动化,2003,27(21):35-38.
JIA Qing-quan,YANG Yi-han, YANG Qi-xun. Application of D-S Evidence Theory to Single-phase-to-ground Fault Line Detection[J]. Automation of

Electric Power Systems, 2003, 27(21): 35-38.

- [2] 曾祥君, Li K K, Chan W L, 等.信息融合技术在电力系统故障检测中的应用探讨[J].中国电力,2003,36(4):8-12.
ZENG Xiang-jun, Li K K, Chan W L, et al. Discussion on Application of Information Fusion Techniques in Electric Power Fault Detection[J]. Electric Power, 2003,36(4): 8-12.
- [3] 陈晓科,徐玉琴,杜丁香.小电流接地系统单相接地故障选线新方案[J].电力自动化设备,2002,22(9):66-69.
CHEN Xiao-ke, XU Yu-qin, DU Ding-xiang. New Development of Fault Line Selection Method in Small Current Grounding Power System[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(9):66-69.
- [4] 胡淑丽.模糊数学及其应用[M].成都:四川大学出版社,1994.
HU Shu-li.Fuzzy Mathematics and Application[M]. Chongdu: Sichuan University Press,1994.
- [5] Zadeh L A.Fuzzy Algorithms[J].Information and Control, 1968, 12(2):94-102.
- [6] Zadeh L A. Rationale for Fussy Control[J]. ASME J, Dynamic Systems, Measurement and Control, 1972, 94(1).
- [7] 陈炯聪,齐郑,杨奇逊.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):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): 88-91.
- [8] 陈为化.小电流接地系统单相接地故障选线软件算法的研究(硕士学位论文)[D].北京:华北电力大学,2002.
CHEN Wei-hua. Research on Soft Arithmetic to Select Single Phase Faulted Circuit for Small Current Grounding Power Systems, Thesis[D]. Beijing: North China Electric Power University,2002.
- [9] 刘和平,严利平,张学锋,等.TMS320LF240X DSP结构、原理及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2002.
LIU He-ping,YAN Li-ping,ZHANG Xue-feng, et al. TMS320LF240X DSP Structure, Principle and Application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press,2002.

收稿日期:2006-06-29; 修回日期:2007-05-17

作者简介:

王军芬(1979-),女,助教,主要从事信号与信息处理方向的研究;E-mail:wangjunfen1979@163.com

刘培跃(1976-),男,助教,主要从事计算机集成制造系统方向的研究。

康怡(1957-),女,副教授,硕士生导师。主要从事实时信号处理方向的研究。