基于模糊综合评价的小电流接地故障选线研究

吴文胜　聂一雄
（广东工业大学自动化学院，广州　510006）

摘要　针对目前配电网小电流接地系统单相接地故障，单一保护算法不能完全满足选线可靠性和灵敏性要求的现状，将模糊理论应用于故障选线，根据单相接地故障的电气特性，选用零序电流比幅算法、五次谐波算法、零序能量算法和小波分析算法作为综合选线的基础判据，建立各选线的故障测度隶属函数。利用最小二乘法，结合客观权重系数和专家经验，确定组合权重系数。在此基础上，采用基于模糊综合评价的多重判据选线方案进行故障选线。在 Matlab 环境下搭建 10kV 配电网模型，分别仿真不同故障位置、故障合闸角和过渡电阻以验证理论的有效性及其选线精度的提高。

关键词：单相接地故障；故障选线；模糊理论；组合权重

Research on Single-phase Earth Fault Line Selection in Non-utility Grounded System Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Algorithm

Wu Wensheng　Nie Yixiong
(School of Automation Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006)

Abstract　For single-phase earth fault in non-utility grounded system of distribution network, a single protection algorithm can not fully meet the reliability and sensitivity requirements of the status of line selection. Thus fuzzy theory is applied to the fault line selection in the paper. First it analyzes the electrical characteristics of single-phase earth fault. Then it choices a comprehensive line selection criterion as following: zero sequence current amplitude method, the basis of the fifth harmonic method, the zero-order energy method and the Wave Wavelets maximum value method. Furthermore it establishes each line selection method fault measures and combinational weight using least-squares. Eventually it uses the method based on fuzzy comprehensive multi-criterion decision-making to choose fault line. At last, a 10 kV distribution networks simulation model is set up by Matlab. Fault location, fault close initial angles and transition resistance are simulated to demonstrate the feasibility and improvement of selection accuracy in the theory.

Key words：single-phase earth fault; fault line selection; fuzzy theory; combinational weight

我国 6～66kV 配电网大多采用小电流接地方式[1]，而小电流接地故障选线问题一直是电力系统领域的热点研究方向之一，至今人们对此进行了大量研究，并提出了多种基于不同原理的选线方法[2-4]。但是从实际运行效果来看，单一选线的方法准确度低，很难完全适应各种故障类型和接地方式，而多信息智能融合技术逐渐成为故障选线发展的趋势[5]。因此，考虑一种可行的方法是使用多重选线判据来构成综合判据，充分利用单一故障信息间互补性，扩大能够正确选线的故障范围，提高选线结果的可靠性。

本文将模糊理论应用于小电流单相接地故障选线，主要是利用故障选线过程中本身体现出的不确定性，即模糊性[6]，对各种选线算法进行智能融合，根据判据规则建立各选线方法的故障测度隶属函数形成模糊输入列向量，结合专家经验和客观因素确

定综合权重系数，最后对各个判据数值属性进行融合得到模糊输出矩阵，并由实验仿真得出综合选线结果。

1 模糊模型的建立

目前单相接地故障选线判据很多，本文选取运行中较成熟的零序电流比幅算法、五次谐波算法、零序能量算法和小波分析算法构成判据集合，下面就各算法下的线路故障特征明显程度及算法客观权重模糊化问题进行论述。

1.1 零序电流比幅算法

在中性点不接地系统发生单相接地故障后，流过故障线路的零序电流在数值上等于所有正常线路对地电容电流之和，即故障相的零序电流幅值最大，因此只要比较零序电流幅值大小就可以找出故障线路。因为在中性点经消弧线圈接地系统，消弧线圈具有补偿故障接地电容电流的作用，使得零序电流减小，此方法效果应用受到影响。

选择的故障测度隶属函数应符合运行实际，一般模糊隶属函数分布模型可有多种形式，可采用模糊统计方法、指派矩阵型、梯形型、Γ型、正态型等。本文采用指派梯形型分布模型。为了让所有线路（包括母线）的故障测度隶属度函数值都随着零序电流减小而增大，定义零序电流比幅算法的故障测度隶属度函数为[7]

$$\mu_1(k)=\begin{cases}1 & (I_k\leqslant -0.5|I|_{\mathrm{SUM}})\\ \dfrac{0.5|I|_{\mathrm{SUM}}-I_k}{|I|_{\mathrm{SUM}}} & (-0.5|I|_{\mathrm{SUM}}<I_k<0.5|I|_{\mathrm{SUM}})\\ 0 & (I_k\leqslant 0.5|I|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{1}$$

式中，$|I|_{\mathrm{SUM}}$ 为所有线路（含母线）零序电流绝对值之和，$|I|_{\mathrm{SUM}}=\sum_{k=0}^{n}|I_k|$；$I_k$ 为线路（母线）的电流，$k=0$ 表示母线，$k=1,2,\cdots,n$ 表示各条线路，下文同。

理论上不接地系统中故障线路的零序电流和正常线路差别应该很大，但在实际中由于各种因素的影响，故障线路的零序电流和正常线路的差别有可能很小。因此客观权重模糊隶属函数的建立要遵循以下规则：当各线路（含母线）零序电流有效值差别越大时，该方法的可信度就越高。定义该方法客观权重模糊隶属函数为

$$q_1=\begin{cases}\dfrac{|I|_{\mathrm{MAX}}}{0.5|I|_{\mathrm{SUM}}} & (0<|I|_{\mathrm{MAX}}<0.5|I|_{\mathrm{SUM}})\\ 1 & (|I|_{\mathrm{MAX}}<0.5|I|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{2}$$

式中，$|I|_{\mathrm{MAX}}$，为所有线路（含母线）的零序电流有效值绝对值的最大值。

1.2 五次谐波比幅算法

因为消弧线圈只对零序接地电容电流基波分量补偿，其故障线路零序电流 5 次谐波分量仍在谐波信号中占很大比例，所以可以将零序电流 5 次谐波信号用于故障选线[8]。

类似于零序电流比幅算法隶属函数分布模型，定义 5 次谐波比幅法故障测度隶属函数为

$$\mu_2(k)=\begin{cases}1 & (I_5(k)\leqslant -0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}})\\ \dfrac{0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}}-I_5(k)}{|I_5|_{\mathrm{SUM}}} & (-0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}}<I_5(k)<0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}})\\ 0 & (I_5(k)\geqslant 0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{3}$$

式中，$|I_5|_{\mathrm{SUM}}$ 为所有线路（含母线）零序电流 5 次谐波绝对值之和，$|I_5|_{\mathrm{SUM}}=\sum_{k=0}^{n}|I_5(k)|$。

在实际运行中由于负荷不对称，测量误差等原因的影响，故障线路与非故障线路的 5 次谐波电流数值差别可能不明显。因此当各线路零序 5 次谐波电流有效值差别越大的时候，该方法的可信度就越高。定义该方法客观权重模糊隶属函数为

$$q_2=\begin{cases}\dfrac{|I_5(k)|_{\mathrm{MAX}}}{0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}}} & (0\leqslant |I_5(k)|_{\mathrm{MAX}}<0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}})\\ 1 & (|I_5(k)|_{\mathrm{MAX}}\geqslant 0.5|I_5|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{4}$$

式中，$|I_5(k)|_{\mathrm{MAX}}$ 为所有线路（含母线）的零序电流 5 次谐波有效值绝对值的最大值。

1.3 零序能量算法

能量法是对配电网发生单相接地故障后整个过程均以能量观点来解释的选线方法。定义线路的零序能量函数 $S_k=\int_0^t i_k(\tau)u_k(\tau)\mathrm{d}\tau$，规定零序电流方向由母线流向线路为正，则非故障线路和消弧线圈的零序能量函数大于零，故障线路的零序能量函数小于零，并且其绝对值等于非故障线路（包括消弧线圈）的零序能量函数总和，数值最大，由此选出故

障线路[9]。

为了让所有线路（含母线）的故障测度隶属函数值都随零序能量值的减小而增大，定义能量法的故障测度隶属函数为

$$\mu_3(k)=\begin{cases}1 & (S_k\leqslant -0.5|S|_{\mathrm{SUM}})\\ \dfrac{0.5|S|_{\mathrm{SUM}}-S_k}{|S|_{\mathrm{SUM}}} & (-0.5|S|_{\mathrm{SUM}}<S_k<0.5|S|_{\mathrm{SUM}})\\ 0 & (S_k\geqslant 0.5|S|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{5}$$

式中，$|S|_{\mathrm{SUM}}$ 为所有线路（含母线）零序电流绝对值之和，$|S|_{\mathrm{SUM}}=\sum_{k=0}^{n}S_k$ 。

由零序能量的计算式可知，其准确性和波形的质量关系很大，即波形的总畸变率 ν 影响方法的可信度。定义该方法客观权重模糊隶属函数为

$$q_3=\begin{cases}1 & (\nu\leqslant 0.05)\\ -\dfrac{20}{9}\nu+\dfrac{10}{9} & (0.05<\nu<0.5)\\ 0 & (\nu\geqslant 0.5)\end{cases} \tag{6}$$

式中，总畸变率 ν 为各次谐波有效值的方均根值与基波有效值的比率。

1.4 小波分析算法

小波分析作为一种时频分析工具，它利用小波奇异性检测理论对采集到的暂态零序电流突变量故障信号进行小波变换，对各出线暂态零序电流进行多层分解，由重构后细节系数的模极大值确定模极大值点，可以判别出故障线路[10]。

本文采用 db6 小波基函数对暂态故障零序电流信号进行处理，记 M_k 为线路小波分解后其模极大值，当某线路幅值最大，且极性与其余线路相反时，判断此线路为故障线路，令母线故障测度值 $\mu_4(0)=0$。若所有线路的零序电流小波变换模极大值的方向都一样，则判断是母线发生单相接地故障，令 $\mu_4(0)=1$。本文使用的与零序电流比幅法类似的隶属函数为

$$\mu_4(k)=\begin{cases}1 & (M_k\leqslant -0.5|M|_{\mathrm{SUM}})\\ \dfrac{0.5|M|_{\mathrm{SUM}}-M_k}{|M|_{\mathrm{SUM}}} & (-0.5|M|_{\mathrm{SUM}}<M_k<0.5|M|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{7}$$

式中，$k=1,2,\cdots,n$，$|M|_{\mathrm{SUM}}$ 为所有线路小波模极大值之和，$|M|_{\mathrm{SUM}}=\sum_{k=1}^{n}|M_k|$。

该方法客观权重系数隶属函数为

$$q_4=\begin{cases}\dfrac{|M_k|_{\mathrm{MAX}}}{0.5|M|_{\mathrm{SUM}}} & (0<|M_k|_{\mathrm{MAX}}<0.5|M|_{\mathrm{SUM}})\\ 1 & (|M_k|_{\mathrm{MAX}}\geqslant 0.5|M|_{\mathrm{SUM}})\end{cases} \tag{8}$$

式中，$|M|_{\mathrm{MAX}}$ 为所有线路小波模极大值绝对值最大值，母线故障时 $q_4=1$。

2 基于最小二乘法的权重系数确定规则

采用基于模糊综合评价小电流接地系统故障选线方法中，其中重要的一环是确定判据权重系数。若在选线中根据专家经验来确定权重，则会使得结果主观性很大。而且权重的选择对客观环境敏感，即不同的小电流接地系统，相同的选线方法对评价输出有不同的影响。如果将客观可信度考虑为影响权重因素，并且同专家经验结合起来，可以得到较为理想的结果。

本文以最小二乘法为工具，将专家经验和客观权重结合起来形成组合权重。对参与选线的所有判据而言，其主客观赋权下的综合评价值的偏差应当越小越好，利用最小二乘法优化组合评价模型[11]：

$$\min H(w)=\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=0}^{n}\left\{\left[(p_j-w_j)\mu_{ji}\right]^2+\left[(q_j-w_j)\mu_{ji}\right]^2\right\}$$

约束函数为 $w_j\geqslant 0$，（j=1, 2, …, m），其中 p_j 为专家经验给定权重，q_j 为判据客观权重，w 为基于最小二乘法确定的组合权重。

3 模糊综合评价环节设计

如图 1 所示，电网一次故障数据经 PT、CT 变换，将故障特征输入不同的选线判据，根据模糊变换得到母线及各条线路的故障测度隶属函数集合构成的 $m\times(n+1)$ 矩阵[12]为

$$\boldsymbol{\mu}=\begin{bmatrix}\mu_{10} & \mu_{11} & \cdots & \mu_{1n}\\ \mu_{20} & \mu_{21} & \cdots & \mu_{2n}\\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots\\ \mu_{m0} & \mu_{m1} & \cdots & \mu_{mn}\end{bmatrix} \tag{9}$$

矩阵中行表示某一选线判据，列表示母线及各条线路。

由上文中权重系数确定规则，得到不同判据的

权重系数 $\boldsymbol{\omega}=[\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_m]$，进行综合评价 $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{\omega}\cdot\boldsymbol{\mu}$，最终归一化评价结果为

$$R(k)=\sum_{j=1}^{m}\omega_j\mu_j(k)/\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{m}\omega_j\mu_j(i) \qquad (10)$$

式中，k=0, 1, 2, …, n。根据式（10）计算结果，选择综合评价结果最大值线路或母线为故障线路。

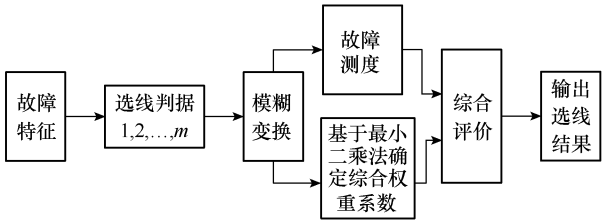

图 1　模糊综合评价选线模型结构

4　仿真模型及结果

4.1　系统模型

本文用 Matlab 建立一个 10kV 配电系统仿真模型，如图 2 所示。系统包含一条进线五条出线，中性点经消弧线圈接地，消弧线圈设为过补偿方式，补偿度为 8%，输电线路采用π型分布参数贝杰龙模型元件，数据采样频率为 10kHz。系统主要设置参数如下：变压器变比为 110/10kV，线路正序参数 R_1=0.45Ω/km，L_1=0.91mH/km，C_1=61μF/km；零序参数 R_0=0.7Ω/km，L_0=3.09mH/km，C_0=38μF/km，馈线分别为 10km、20km、25km、15km、18km。经计算消弧线圈 L_N=0.62H，等值损耗电阻 R=19.5Ω。

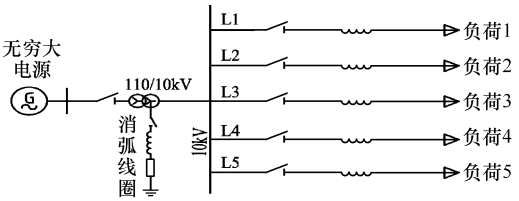

图 2　配电网仿真模型

4.2　仿真结果及分析

接地故障仿真分析时，分不同线路（母线、L_1—L_5）、故障位置（10%、50%、90%）、故障初始角（0°、90°）以及故障点接地电阻（5Ω、500Ω、1kΩ、1.5kΩ）采集故障样本。因篇幅所限，下面仅列出几种典型故障样本分析。

4 种接地选线方式的特征量部分仿真结果数据见表 1。

表 1　4 种选线方法下故障特征值

故障情况	线路	零序电流	谐波电流	能量	小波
中性点不接地相电压过零 R=5Ω L_2 10%处故障	母线	0	0	0	0
	L_1	0.9496	0.1211	12.38	0.8764
	L_2	–6.462	–0.8314	–79.82	–5.937
	L_3	2.377	0.3082	31.15	2.157
	L_4	1.426	0.1815	18.34	1.392
	L_5	1.711	0.2208	22.15	1.511
经消弧线圈接地相电压过零 R=5Ω L_2 50%处故障	母线	–6.805	0.7943	271.8	3.173
	L_1	0.8704	0.1366	10.48	4.497
	L_2	2.013	-1.035	-345.3	-27.73
	L_3	2.187	0.3267	26.22	11.37
	L_4	1.306	0.2124	15.71	6.795
	L_5	1.568	0.2452	18.95	8.234
经消弧线圈接地相电压峰值 R=1000Ω L_2 90%处故障	母线	–4.564	0.2049	60.23	0.04638
	L_1	0.5524	0.03813	4.126	0.1211
	L_2	1.025	0.1967	–78.84	–0.8512
	L_3	1.378	0.09847	10.45	0.3131
	L_4	0.8226	0.05836	6.214	0.176
	L_5	0.9663	0.06725	7.486	0.2294

根据表 1 中的数据，采用各选线判据的模糊模型计算得到母线和各线路的故障测度隶属度值及选线判据的客观权重，赋予专家权重值，得到组合权重，最终给出综合评价结果，见表 2。

表 2　4 种选线方法的综合评价

选线方法	故障情况	故障测度 u						客观权重 q	专家权重 p	组合权重 w
		母线	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5			
零序电流比幅法	中性点不接地相电压过零 R=5Ω L_2 10%处故障	0.5000	0.4265	1.0000	0.3161	0.3897	0.3676	1	1	1
五次谐波比幅法		0.5000	0.4272	1.0000	0.3147	0.3909	0.3672	1	1	1
零序能量法		0.5000	0.4244	0.9872	0.3099	0.3881	0.3648	0.95	0.8	0.86
小波分析法		0.0000	0.4262	1.0000	0.3183	0.3828	0.3727	1	0.9	0.97
模糊综合评价		1.4300	1.6321	3.8190	1.2060	1.4855	1.4101			

（续）

选线方法	故障情况	故障测度 u						客观权重 q	专家权重 p	组合权重 w
		母线	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5			
零序电流比幅法	经消弧线圈接地 相电压过零 R=5Ω L_2 50%处故障	0.0143	0.4410	0.3635	0.3517	0.4115	0.3937	0.36	0.2	0.22
5 次谐波比幅法		0.2112	0.4503	0.8763	0.3812	0.4228	0.4108	0.75	0.5	0.56
零序能量法		0.1052	0.4848	1.0000	0.4619	0.4772	0.4725	1	0.9	0.93
小波分析法		0.0000	0.4272	0.9487	0.3160	0.3900	0.3668	0.9	0.9	0.9
模糊综合评价		0.2193	1.1846	2.3546	1.0049	1.1221	1.0862			
零序电流比幅法	经消弧线圈接地 相电压峰值 R=1000Ω L_2 90%处故障	0.1316	0.4407	0.3899	0.3520	0.4116	0.3962	0.29	0.1	0.11
五次谐波比幅法		0.1913	0.4426	0.7963	0.3517	0.4121	0.3987	0.59	0.4	0.46
零序能量法		0.1401	0.4753	0.9711	0.4376	0.4629	0.4553	0.94	0.9	0.92
小波分析法		0.0000	0.4303	0.9900	0.3198	0.3987	0.3679	0.98	1	1
模糊综合评价		0.2314	1.2267	2.5497	1.0195	1.1558	1.1136			

由表 2 可以看出，模糊综合评价方法均正确选线。而且在中性点不接地方式下，零序电流幅值法和 5 次谐波法可靠性较高，但是在消弧线圈接地方式，零序电流幅值法可信度低较低情况下，模糊综合评价仍然能够完全辨识故障线路。同理，5 次谐波法在大过渡电阻，可信度降低时，模糊综合评价显示出选线可靠性。

5 结论

本文将零序电流比幅算法、5 次谐波比幅算法、零序能量算法和小波分析法融合应用于小电流接地系统单相接地故障选线中，能够充分利用故障信息，仿真结果对比说明其可靠性和准确性较高，在实际应用中具有重要参考价值。

参考文献

[1] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].北京:中国电力出版社, 2009.

[2] 李冬辉,史临潼.非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J].继电器, 2004, 32(18): 74-78.

[3] 王新超,桑在中.基于“S 注入法”的一种故障定位新方法[J].继电器, 2001, 29(7): 9-12.

[4] 杜丁香,徐玉琴.消弧线圈接地电网有功选线[J].继电器, 2002, 30(5): 33-36.

[5] 胡会军.追根溯源小电流接地选线装置准判率堪忧[J].电器工业, 2005(2): 36-39.

[6] 赵鹏,刘智昱.基于模糊集理论的小电流接地系统单相故障多判据定位研究[J].现代电力, 2010, 27(6): 21-25.

[7] 贾清泉,杨奇逊,杨以涵.基于故障测度概念与证据理论的配电网单相接地故障多判据融合[J].中国电机工程学报, 2003, 23(12): 6-11.

[8] 陈志亮,范春菊.基于5次谐波突变量的小电流接地系统选线[J].电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 37-41, 61.

[9] 束洪春.配电网络故障选线[M].北京:机械工业出版社, 2008.

[10] 谷彩连,张友林.基于小波变换和模极大值的低压配电线路选线方法的仿真研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版), 2010, 6(3): 221-224.

[11] 李伟,王静,牛东晓.基于组合权重的发电企业竞争力综合评价研究[J].华北电力大学学报, 2006, 33(5): 93-96.

[12] 王军芬,刘培跃.配电网单相接地故障判别的多重算法研究与 DSP 实现[J].继电器, 2007, 35(12): 9-12.

作者简介

吴文胜（1983-），男，硕士研究生，研究方向为配电网自动化技术。