

基于神经网络的中性点经消弧线圈接地 系统故障选线方法

庞清乐¹, 孙同景¹, 穆 健², 秦伟刚¹

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东省 济南市 250061; 2. 聊城大学 物理系, 山东省 聊城市 252059)

Neural Network Based Faulty Line Detection Method for Power System with Neutral Grounding via Arc Suppression Coil

PANG Qing-le¹, SUN Tong-jing¹, MU Jian², QIN Wei-gang¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China; 2. Department of Physics, Liaocheng University, Liaocheng 252059, Shandong Province, China)

ABSTRACT: The faulty line detection of single-phase-to-earth fault in power system with neutral grounding via arc suppression coil has not been well solved. The commonly used single faulty line detection methods, such as wavelet transform method, the fifth harmonic current method and zero sequence current active components method, etc., can only process partial fault information, so their reliability of faulty line detection is not satisfied. Here, by means of constructing both relative fault measurement function and confirmable fault measurement function the fault measurement function of each faulty line detection method is determined, then using neural network the intelligent fusion of practical fault measurements of those faulty line detection methods is conducted, thereby the faulty line detection result with higher reliability can be obtained. Simulation results by EMTP show that the faulty line detection result by the proposed method is more precise and possesses stronger robustness.

KEY WORDS: Distribution network; Faulty line detection; Information fusion; Neural network; Fault measurement function

摘要: 中性点经消弧线圈接地系统的单相接地故障选线问题一直没有得到很好的解决, 通常采用的单一故障选线方法如小波变换法、5次谐波电流法和零序电流有功分量法等只能对部分故障信息进行处理, 选线可靠性不高。文章通过构造每种选线方法的相对故障测度函数和可确定故障测度函数来确定其故障测度函数, 再利用神经网络对每种选线方法的实际故障测度进行智能融合, 从而得到可靠性较高的故障选线结果。EMTP 仿真结果表明该方法得出的选线结果具有较高的精度和较强的鲁棒性。

关键词: 配电网; 故障选线; 信息融合; 神经网络; 故障测度函数

1 引言

配电网经消弧线圈接地系统(又称谐振接地系统)的单相接地故障选线问题一直是现场运行中的一大难题^[1]。人们对此进行了大量的研究, 提出了基于不同原理的多种选线方法。但从现场应用情况来看, 这些单一选线方法的效果并不理想。主要原因是: 发生单相接地故障时有些故障特征比较明显, 有些故障特征则比较模糊; 干扰因素可能对有些故障特征影响较大, 而对其它故障特征影响较小, 因此经常出现误选和漏选的情况。目前, 对于谐振接地系统比较成熟的选线方法有: 小波分析法^[2,3]、零序电流有功分量法^[4]和5次谐波法^[5], 最近又出现了智能化方法^[6]。但没有一种选线方法能保证对所有的故障类型都有效, 因此, 利用信息融合技术对这3种选线方法进行智能融合, 考虑多种故障特征, 可提高选线结果的可靠性^[7-9]。本文采用神经网络的方法对其进行信息融合。

2 相关算法的原理及改进

2.1 构造故障测度函数

故障测度是指各线路故障征兆的程度度量^[7]。本文将故障测度定义为 $[-1, 1]$ 上的实变量, 一条线路的故障测度越接近1表明其越可能是故障线路; 越接近-1表明其越可能是非故障线路。设电网中有 N 条线路, 采用 P 种选线方法, 则对第 k ($k=1, 2, \dots, N$) 条线路采用第 p ($p=1, 2, \dots, P$) 种选线方法构造的故障测度函数为

$$X_p(k) = X_{rp}(k)X_{ap}(k) \quad (1)$$

式中 $X_{rp}(k)$ 为相对故障测度函数; $X_{ap}(k)$ 为可确定故障测度函数。 $X_{rp}(k)$ 反映一条线路的故障测度与其它线路故障测度的比较值, $X_{ap}(k)$ 反映故障特征量的明显程度。

2.2 小波分析方法的故障测度函数

利用 db 小波包将流经各线路的暂态零序电流按一定频带宽度进行分解并剔除工频所在最低频段后, 按式(2)确定的能量最大频段即为该线路暂态电容电流分布最集中的频段

$$e = \sum_n [w_k^{(j)}(n)]^2 \quad (2)$$

式中 $w_k^{(j)}(n)$ 为小波包分解在第 (j, k) 子频段下的系数。在各线路暂态电容电流最集中的特征频段下, 只有故障线路满足如下条件: 零序电流的小波包分解结果有较大的能量, 且极性与其它线路相反^[5,10]。

对于有 n 条线路的配电网, 设 $e_{\Sigma}(k)$ 为线路 k 在各特征频段的总能量; $e_{\Sigma}(k)$ 为线路 k 在各线路能量集中的几个频段的总能量; e_{Σ} 为所有线路在各线路能量集中的几个频段的总能量。当线路零序电流小波包分解结果的极性与其它线路的分解结果相同时, 线路 k 的 $e_{\Sigma}(k)$ 在 e_{Σ} 中占的比重越小越可能是非故障线路, 相对故障测度越接近于 -1; 反之越可能是故障线路, 相对故障测度越接近于 0。又由于非故障线路的 $e_{\Sigma}(k)$ 相对于故障线路小得多, 因此相对故障测度函数如图 1(a)所示。当线路零序电流小波包分解结果的极性与其它线路的分解结果相反时, 由于线路 k 的 $e_{\Sigma}(k)$ 在 e_{Σ} 中占的比重越大越可能是故障线路, 相对故障测度越接近于 1; 反之越可能是非故障线路, 相对故障测度越接近于 0, 因此相对故障测度函数如图 1(b)所示。由于一条线路的 $e_{\Sigma}(k)$ 在 $e_{\Sigma}(k)$ 中占的比重越大采用该方法进行判断的可信度越高, 可确定故障测度越接近于 1, 因此可确定故障测度函数如图 2 所示。

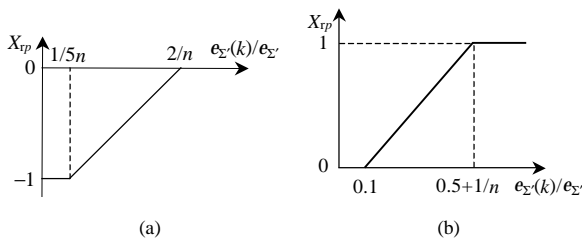


图 1 小波分析法的相对故障测度函数
Fig.1 Relative fault measurement function of wavelet analysis method

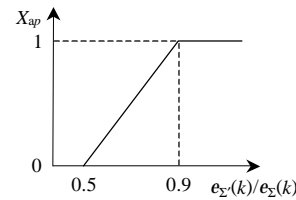


图 2 小波分析法的可确定故障测度函数
Fig.2 Confirmable fault measurement function of wavelet analysis method

2.3 零序电流有功分量法的故障测度函数

在中性点经消弧线圈接地系统中, 发生单相接地故障时, 零序电流有功分量法利用故障线路的零序有功电流远大于非故障线路的零序有功电流且方向相反的特点进行故障选线^[4,5]。对于有 n 条线路的配电网, 设 P_{Σ} 为所有线路零序有功功率的总和, $P(k)$ 为第 k 条线路的零序有功功率, $Q(k)$ 为第 k 条线路的零序无功功率。当线路的零序电流有功分量与其它线路方向相同时, 线路的 $P(k)$ 在 P_{Σ} 中占的比重越小越可能是非故障线路, 相对故障测度越接近于 -1; 反之越可能是故障线路, 相对故障测度越接近于 0, 因此, 相对故障测度函数如图 3(a)所示。当线路的零序电流有功分量与其它线路方向相反时, 线路的 $P(k)$ 在 P_{Σ} 中占的比重越大越可能是故障线路, 相对故障测度越接近于 1; 反之越可能是非故障线路, 相对故障测度越接近于 0。因此, 相对故障测度函数如图 3(b)所示。 $P(k)/Q(k)$ 的值越大, 即线路的零序有功功率在视在功率中占的比重越大, 采用该方法进行判断的可信度越高, 可确定故障测度越接近于 1, 因此, 可确定故障测度函数如图 4 所示。

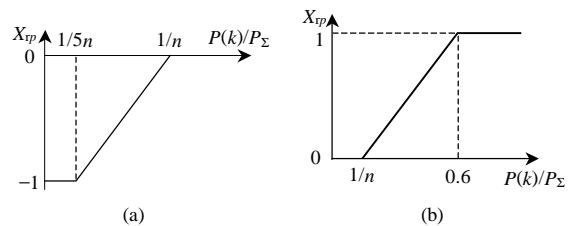


图 3 零序电流有功分量法的相对故障测度函数
Fig.3 Relative fault measurement function of zero sequence current active components method

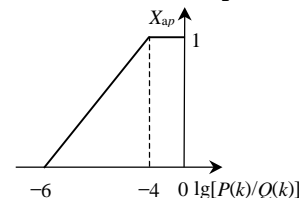


图 4 零序电流有功分量法的可确定故障测度函数
Fig.4 Confirmable fault measurement function of zero sequence current active components method

2.4 5 次谐波法的故障测度函数

中性点经消弧线圈接地系统中的消弧线圈是

按照基波整定的，可忽略消弧线圈对 5 次谐波的补偿效果。因此，可利用对 5 次谐波的群体比幅比相法解决谐振接地系统的故障选线问题^[5]。对于有 n 条线路的配电网，设 $I_{05}(k)$ 为第 k 条线路零序电流的 5 次谐波分量， $I_{01}(k)$ 为第 k 条线路零序电流的基波分量， I_{05} 为所有线路零序电流 5 次谐波分量的总和。当一条线路零序电流 5 次谐波分量的方向与其它线路方向相同时， $I_{05}(k)/I_{05}$ 的值越小，即该线路的零序电流 5 次谐波分量在所有线路零序电流 5 次谐波分量总和和中占的比重越小，该线路越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 -1；反之，线路越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 0。因此，相对故障测度函数如图 5(a)所示。当一条线路零序电流 5 次谐波分量的方向与其它线路方向相反时， $I_{05}(k)/I_{05}$ 的值越大线路越可能是故障线路，相对故障测度越接近于 1；反之，线路越可能是非故障线路，相对故障测度越接近于 0。因此，相对故障测度函数如图 5(b)所示。线路的零序 5 次谐波电流在该线路总零序电流中占的比重越大该方法的可信度越高，可确定故障测度越接近于 1，因此，可确定故障测度函数如图 6 所示。

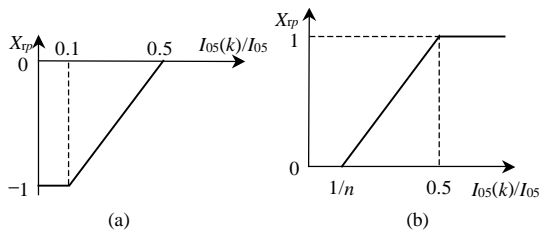


图 5 5 次谐波法的相对故障测度函数
Fig.5 Relative fault measurement function of the fifth harmonic current method

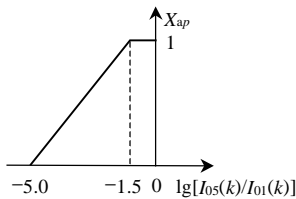


图 6 5 次谐波法的可确定故障测度函数
Fig.6 Confirmable fault measurement function of the fifth harmonic current method

3 神经网络模型

采用的神经网络结构如图 7 所示，它是一个含有两个隐层的 4 层前向神经网络，具有 3 个输入节点和 1 个输出节点，第 1 个隐层采用 8 个节点，第 2 个隐层采用 3 个节点。每 3 个输入和 1 个输出构成一个样本，每个输入在 $[-1, 1]$ 区间上以 0.5 为间隔取值，输出 Y 根据 3 个输入的和 X_{Σ} 按照 (X_{Σ}, Y) 的以

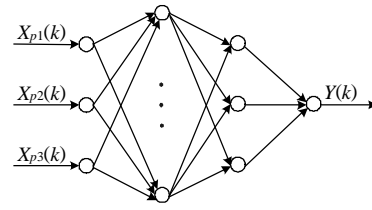


图 7 神经网络模型
Fig.7 Neural networks model

下对应关系取值：(3, 1)、(2.5, 0.95)、(2, 0.9)、(1.5, 0.85)、(1, 0.75)、(0.5, 0.5)、(0, 0)、(-0.5, -0.5)、(-1, -0.75)、(-1.5, -0.85)、(-2, 0.9)、(-2.5, -0.95)、(-3, -1)。从而形成 125 个样本对：(1.0,1.0,1.0,1.0)、(1.0,1.0,0.5,0.95)、(1.0,1.0,0,0.9)、(1.0,1.0,-0.5,0.85)、...、(-1.0,-1.0,-0.5,-0.95)、(-1.0,-1.0,-1.0,-1.0)。采用 BP 算法以 Matlab6.5 为工具进行训练，其中两个隐层各节点的激活函数均采用双曲正切 S 型传递函数 (tansig)，输出层采用线性传递函数 (purelin)，误差平方和取为 0.05，学习速率取为 0.005。经过 167 步训练完成，得到各权值和阈值。利用该神经网络模型对 3 种选线方法得到的故障测度进行融合得到一个融合后的故障测度。根据专家经验设定故障线路的故障测度阈值为 0.6，非故障线路的故障测度阈值为 -0.6。若故障测度大于 0.6 则判断为故障线路；若故障测度小于 -0.6 则判断为非故障线路；若故障测度在 $[-0.6, 0.6]$ 区间内说明不可确定；若所有线路均为非故障线路则判断为母线故障。

4 仿真模型及结果

4.1 系统模型

系统模型如图 8 所示。该系统是一个有 4 条线路的 220kV/35kV 变电站，变压器中性点经消弧线圈串联电阻接地。在 EMTP 仿真中采用 Π 型等值电路，将每条线路分为 5 段，故障点分别取在每段的末端。线路的正序参数为： $X_1=0.38\Omega/\text{km}$ ， $R_1=0.17\Omega/\text{km}$ ， $C_1=9.70\text{nF}/\text{km}$ ；零序参数为： $X_0=1.72\Omega/\text{km}$ ， $R_0=0.23\Omega/\text{km}$ ， $C_0=6.00\text{nF}/\text{km}$ ；线路 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 的长度分别为 10km、15km、20km、25km；消弧线圈参数为 $X=7400\text{mH}$ 。

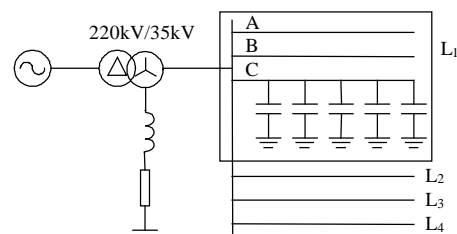


图 8 EMTP 仿真系统等值电路
Fig.8 Equivalent circuit of EMTP simulation system

4.2 仿真结果

系统故障点取在 L_4 的 40% 处, 经 50Ω 过渡电阻单相接地, L_4 和 L_3 的零序电流波形如图 9 所示。用 3 种选线方法得到的数据分别如表 1、表 2、表 3 所示。每条线路对应 3 种方法的故障测度分别为: $L_1(-0.918, -0.890, -0.721)$, $L_2(-0.808, -0.587, -0.547)$, $L_3(-0.628, -0.462, -0.708)$, $L_4(0.708, 1, 0.848)$ 。将其作为神经网络的 3 个输入即可得到相应的输出为: $Y(1)=-0.9392$, $Y(2)=-0.9085$, $Y(3)=-0.8986$, $Y(4)=0.9188$ 。线路 4 的故障测度大于 0.6, 判断为故障线路, 其余 3 条线路的故障测度均小于 -0.6, 判断为非故障线路, 与实际情况相符。

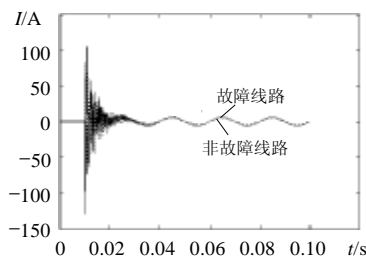


图 9 故障线路和非故障线路的零序电流信号

Fig.9 Zero sequence current of faulty line and healthy line

表 1 小波分析方法得到的数据

Tab.1 Data of wavelet analysis method

线路名	$e_{\Sigma}(k)/10^6$	$e_{\Sigma}(k)/10^6$	$X_{fp}(k)$	$X_{ap}(k)$	X_p
L_1	0.7777	0.7817	-0.9182	1	-0.918
L_2	1.2205	1.2235	-0.8084	1	-0.808
L_3	1.9459	1.9517	-0.6284	1	-0.628
L_4	5.0169	5.0257	0.7075	1	0.708

表 2 零序电流有功分量法得到的数据

Tab.2 Data of zero sequence current active components method

线路名	$P(k)$	$Q(k)/10^5$	$X_{fp}(k)$	$X_{ap}(k)$	X_p
L_1	5.0314	1.0396	-0.9612	0.8424	-0.890
L_2	2.3282	1.5595	-1.0000	0.5870	-0.587
L_3	12.7826	2.0797	-0.5165	0.8943	-0.462
L_4	-66.1133	3.2187	1.0000	1.0000	1.000

表 3 5 次谐波法得到的数据

Tab.3 Data of the fifth harmonic current method

线路名	$I_{05}(k)$	$I_{01}(k)$	$X_{fp}(k)$	$X_{ap}(k)$	X_p
L_1	0.051	0.204	-0.74	0.9747	-0.721
L_2	0.068	0.272	-0.57	0.9599	-0.547
L_3	0.012	0.048	-1.00	0.7077	-0.708
L_4	0.119	0.476	0.904	0.9377	0.848

5 结论

本文针对中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障选线困难、单一选线方式难以精确判断的问题, 提出了综合利用多种故障信息的神经网络信息融合方法。该方法综合了各种故障信息, 克服了各种干扰的影响, 提高了故障检测的精度和鲁棒性。

仿真试验表明该方法准确、有效。

参考文献

- [1] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析和接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.
Dong Xinzhou, Bi Jianguang. Analysis on transient traveling wave and study on fault line selection for distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [2] 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, 2004, 24(6): 54-58.
Wang Yaonan, Huo Bailin, Wang Hui et al. A new criterion for earth fault line selection based on wavelet packets in small current neutral grounding system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 54-58.
- [3] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地电网单相接地故障选线的新方法[J]. 电网技术, 2004, 28(12): 30-33.
Su Zhantao, Lü Yanping. A new wavelet packet analysis based method to detect faulty line for single phase to ground fault occurred in distribution network with small current neutral grounding[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 30-33.
- [4] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.
Mu Longhua. Principle of selective grounding fault protection based on active component direction of zero sequence current[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 60-62.
- [5] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.
Qi Zheng, Yang Yihan. Analysis of technology of fault line selection for single phase to earth faults in neutral point non-effectively grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [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 Xinyan, Yu Weiyong, Zhuang Wei. Application of fuzzy networks to grounded line detection in neutral point indirectly grounded power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 15-19.
- [7] 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): 35-44.
Jia Qingquan, Yang Yihan, Yang Qixun. Application of DS evidence theory to single phase to ground fault line detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 35-44.
- [8] 曾祥君, K K Li, W L Chan, 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.
- [9] 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(8): 88-91.
Chen Jiongcong, Qi Zheng, Yang Qixun. A fault line detection device for non-solidly grounded system based on fuzzy sets theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.
- [10] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.
Dai Jianfeng, Zhang Yanxia. Study on adaptively choosing fault line under single phase to ground fault based on analysis of multi-frequency bands[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.

收稿日期: 2005-09-07.

作者简介:

庞清乐 (1971-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为计算机先进控制及其在配电网保护中的应用, E-mail:stefam@163.com;

孙同景 (1949-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为计算机先进控制与系统;

穆健 (1971-), 男, 讲师, 研究方向为智能控制与机械自动化; 秦伟刚 (1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制理论与应用。