

基于小波预处理的人工神经网络实现 微机变压器保护的新方法

胡晓鹏, 易理刚

(湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了一种微机变压器保护的新方法。利用小波分析的信号奇异性检测特性, 建立起信号突变量与模局部极大值的一一对应关系, 提取所需要的状态特征; 利用小波分析的时频分解滤波特性, 减少故障暂态过程中非周期分量和高次谐波对故障方向判别的影响。在此基础上, 提出并建立三层前向神经网络模型, 用来实现变压器的微机保护。理论分析和 EMTP 仿真试验表明, 该方法可以有效地提高保护的灵敏性、选择性和速动性, 而且不受 CT 饱和的影响。

关键词: 小波变换; 人工神经网络; 微机变压器保护; 励磁涌流

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)06-0022-05

0 引言

与传统保护类似, 微机变压器差动保护的原理和方法主要分为两部分: 如何区分内外故障, 如何鉴别励磁涌流^[1]。

对于如何区分内、外故障, 以保障区内故障, 尤其是匝间短路时, 具有较好的灵敏度, 而在区外故障时, 可靠地不动作。由于变压器内、外故障具有不确定性, 目前各种典型的保护原理, 如差突变量标积制动原理, 有时还不能很好地区分内、外故障。

对于如何区分励磁涌流和短路电流, 目前主要有二次谐波制动原理和间断角原理。研究表明^[2], 大容量变压器在某些情况下涌流中的二次谐波含量仅为 7%, 而在有串补电容的高压系统及高压电缆中变压器发生故障的故障电流中的二次谐波含量可能超过 15%, 这对二次谐波原理提出了挑战。间断角是励磁涌流所特有的电流波形特征。间断角原理是以准确测量间断角的大小为基础的。由于受电流互感器(CT)饱和的影响, 使得该原理在微机差动保护的的实际应用中受到限制, 效果并不理想。

另外, 在基频分量估计算法上, 采用传统算法的微机变压器保护, 都有其局限性^[3]。

小波分析作为一种新颖的信号分析方法, 能够将含有多种频率成份的被分析信号按一定的时间和频率进行分解并逐步求精, 具有近乎完善的双重局部化性质并能有效地刻划信号突变和抑制噪声^[4,5]。利用小波变换的信号奇异性检测特性和时频分解滤波特性, 可建立起信号突变量与模局部极大值的一一对应关系, 增强起动判据的灵敏度; 滤除

故障暂态过程中的非周期分量和高次谐波分量, 提高方向判别的灵敏度。

人工神经网络允许应用大量的输入量对电力系统的状态进行完整的描述, 而对这些输入量不要求有非常精确的了解。实际上, 神经网络可用于从系统各种参数的组合模式来识别故障状态。

近年来, 小波分析和神经元网络在电力系统中的应用越来越多^[6~9], 它们在解决实际问题中显示出巨大潜力。

本文依据小波变换和神经元网络的上述特性, 定性利用了励磁涌流出现或故障发生时时刻系统中多个相关变量的采样信号在尺度上的小波变换模极大值, 提取所需要的信号突变量特征, 将它们的特征量信息利用人工神经网络进行有效的融合, 最后, 通过一个综合识别模块, 判别变压器所处的状态, 实现变压器的微机保护。该方法在一定程度上克服了常规变压器保护的缺点, 提高了保护动作的快速性和可靠性。

1 基于人工神经网络的变压器保护模型

本文提出的基于人工神经网络的变压器保护由两个独立子网络组成: 励磁涌流识别子网络 NN1, 故障检测与诊断子网络 NN2。图 1 为变压器的保护示意图。

来自 CT、PT 二次侧的电流、电压量经模数转化和小波变换后, 由各子网络提取其特征量, 加于各输入节点, 得出计算结果。由两个子网络输出的结果经过综合判断后, 给出变压器所处的状态, 在保护起动且在区内故障发生时, 发出保护跳闸命令并给出

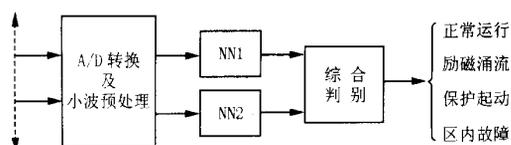


图1 变压器保护结构示意图

Fig. 1 Structure of transformer protection

保护起动等信号。

1.1 变数据窗滤波和信号的奇异性检测算法

小波分析具有提供自适应可调时-频窗的“聚焦”功能,小波变换的模局部极大值,对应于平滑后信号的拐点^[10],对于检测信号的边缘和信号的奇异性具有重要意义^[4,11]。利用小波变换的模局部极大值及其跨尺度传递,可提取信号的突变量。

由于小波变换模极大值与信号波形的奇异边界相对应,并沿尺度传递。为了保证可靠性的同时,提高保护的動作速度,本文综合考虑信号奇异性检测和滤波的需要及计算量的大小,选择了B样条函数作为积分变换的样本函数,选取第三尺度的小波变换的模极大值作为所提取的特征,并采用Mallat算法实现小波变换。此外,为了便于检测电力系统瞬间的信号突变,即突出该信号的高频部分,本文根据小波包分解^[5]的思想对Mallat进行了扩展^[6]。

信号的检测算法按以下进行:信号的小波三尺度分解—搜索小波变换的模极大值—信噪分离—输出奇异信号的极性、幅度等信息。

所有小波变换结果是逐采样点同时计算出来的,因而具有很好的实时性;在实际应用中只需在微机保护软件的采样中断服务程序中插入小波变换即可。

1.2 神经网络模型

本文选用三层前向神经网络模型,采用误差反传学习算法(BP算法),网络中每一层的传递函数选用Sigmoid函数。

对人工神经网络的详细阐述,请参阅文献^[12]。

1.3 特征量提取及网络的结构

对CT、PT二次电流、电压量以每周期36点的采样率进行采样,经A/D转换和小波变换后,并行输入每个子网络。为了压缩模式的维数,同时便于网络计算,先对这些采样数据进行特征量提取。

1) 励磁涌流识别子网络 NN1

对于在变压器空载合闸或故障切除后电压恢复时产生的励磁涌流的识别,本文结合励磁涌流波形出现间断现象的特征,利用小波理论进行特征提取,

通过小波变换的模局部极大值提取励磁涌流的间断角特征,定性地识别励磁涌流和短路电流。先对输入的CT二次波形进行小波变换,如果存在相邻模极大值同号的现象,则此时为对称性涌流,将该相闭锁;如果没有相邻模极大值同号的现象,则把输入电流差分再次进行小波变换,如果存在相邻模极大值同号的现象,则此时输入的是非对称性涌流,将该相闭锁;如果小波变换的模极大值仍是一正一负等间隔出现的相邻异号,则为短路故障电流。在CT严重饱和时,由于饱和后涌流波形的间断角已经不再存在,本文首先对饱和后的波形进行差分,显然,差分后间断角有所恢复,但差分也放大了高频分量;然后对差分后的CT饱和的涌流波形进行1至3尺度的小波变换。这样,第三尺度的小波变换不但具有前面所分析的相邻模极大值同号的涌流特征,而且滤除高频的效果很好。这说明本判据不受CT饱和的影响。

从尽可能简化网络的角度考虑,选取变压器两侧三相电流第三尺度小波变换的两相邻模极大值以及这两个极大值中点处的小波变换值作为NN1的特征量,将其转换为标幺值“0~1”并作为NN1的输入层节点值。当尺度3上的小波变换出现模局部极大值,且其值为正时,取对应输入层节点值为1;否则取为0。如果尺度3上的小波变换出现模局部极大值,且相邻模极大值中点处的小波变换值很小,取对应输入层节点值为1;否则为0。为了增强网络对输入量的容错能力,上述特征量均连续计算3次,作为同一特征量的3个节点,这样,励磁涌流识别子网络NN1的输入层节点数,应取为9。

这样的取值,使得网络具有更好的容错能力,即便在数据采集时,某一点出现坏数据,网络的识别能力也不会受到致命的影响,不会导致错误的识别结果。

励磁涌流识别子网络NN1的输出层节点数取为1,当变压器出现励磁涌流时,其值为1;否则为0。

本文对于小波变换峰值的识别,采用如下的模糊规则:

if $(W_{k-1} < W_k > W_{k+1} \ \&\& W_k > 0)$, then W_k 是正峰;

if $(W_{k-1} > W_k < W_{k+1} \ \&\& W_k < 0)$, then W_k 是负峰。

本文选取小波变换的第三尺度进行模极大值特征的识别,由于小波变换固有的滤波特性,第三尺度

已经基本上滤除了高频分量及噪声的影响。为了确保识别的可靠性,采用以下两条模糊规则:

为了去除小波变换中很小的峰值,把局部模极大值与涌流的峰值相比较,首先去掉非常小的极大值;

相邻模极大值如果同号,那么这两个极大值中点处的小波变换值必然很小。

2) 区内、外故障识别子网络 NN2

该网络的目的是检测系统中是否发生故障及是否为区内故障。其输出层共有 1 个节点。当取其值为 1 时,代表保护起动。

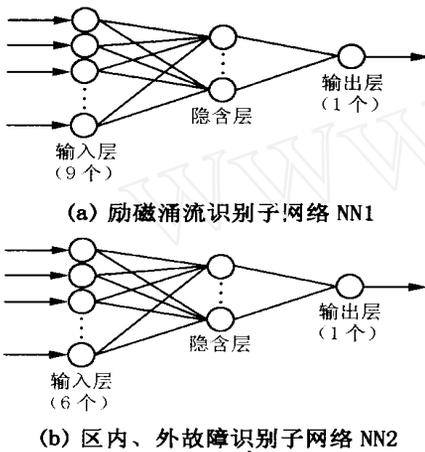


图 2 两个子网络的结构图

Fig. 2 Structures of two sub-networks

当系统发生不对称故障时,会产生负序分量,考虑到判别故障区域的需要,选取变压器两侧电流向量负序分量作为输入层的节点输入,通过比较负序分量第 3 尺度的小波变换模极大值向量的方向来判别变压器所发生的故障是否为内部故障;发生对称故障时,选取任一相电流作为输入层的节点输入,通过比较变压器两侧任一相电流瞬时值尺度 3 上的小波变换模极大值向量的方向,来判别变压器所发生的是否为内部故障。因此选取的特征量为:两侧电流向量负序分量尺度 3 上小波变换模局部极值向

量,两侧三相电流中任一相瞬时值尺度 3 上的小波变换模局部极值向量。每一种特征量均连续计算 3 次,分别加于各输入节点,以增强网络的可靠性和冗余度。这样故障检测子网络 NN2 的输入层节点数应取为 6。当负序分量的尺度 3 上小波变换出现模局部极大值,且其值为正时,取相应的输入层节点的值为 1,否则取为 0;当两侧三相电流中任一相瞬时值的尺度 3 上小波变换出现模局部极大值,且其值为正时,取相应的输入层节点的值为 1,否则取为 0。

两个子网络的结构如图 2 所示。NN1、NN2 的输入层节点数分别为 9、6,输出层节点数均为 1。每个子网络的隐含层节点个数在训练过程中确定。

2 网络的训练与检验

2.1 训练

1) 用 EMTP 获取神经网络的训练样本

本文利用电磁暂态仿真程序 (EMTP) 对变压器可能发生的各种故障进行了大量的仿真计算。

如图 3 所示,本文在选取利用 EMTP 进行仿真计算的电力系统模型中包括有电缆线,考虑了变压器处于双端电源系统和单端电源系统两种情况。对于通过一条电缆连接到电源的电力变压器,由于电缆较大的分布电容,导致响应变压器内部故障的差动电流畸变。它包括二次谐波分量和三次谐波分量。

在计算中,以变压器 1 为研究对象,设电流从变压器流向母线的方向为电流的正方向。在图 3 中示出了故障点位置,分布在变压器 1 的两侧。

为了使所建立的神经网络能够正确地进行工作,对变压器所发生的各种状态作出正确的反应,本文采用的样本尽可能多地包括变压器可能发生的各种故障类型,如:变压器内部故障、变压器外部故障、变压器空载合闸投入电网、变压器空载合闸于内部故障状态等,其中,变压器内、外部故障包括单相故障、两相故障、两相接地故障及三相故障。

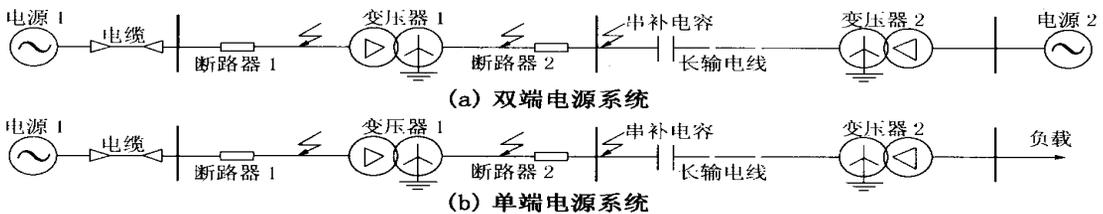


图 3 电力系统模型

Fig. 3 Power system model

在利用 EMTP 进行仿真计算时,根据前述内容,计算步长取为 0.556 ms,即取采样率为 36 点/周。

2) 输入数据预处理

即对采样得到的数据进行如前文所述的数据预处理。从而得到大量的训练、检验样本,以此进行网络的训练与检验。

3) 人工神经网络的训练

训练样本确定后,开始对所建立的神经网络模型进行学习训练,学习算法采用前文所述的反传学习算法。

因为本文所提出的两个子网络是相对独立的,首先分别对它们进行训练,以得到各自的权值矩阵和阈值矩阵。训练完成后,综合判断各子网络的输出结果,得出最终的识别结果。每个子网络的隐含层节点的数目是在训练过程中确定的,两个子网络的隐含层节点数分别取为 5 和 4。

2.2 检验

在完成对所建立的神经网络的训练之后,还需利用不同于训练样本的检验样本对它们同时进行检验。以检验网络的容错能力、工作速度及对变压器所发生故障的判别能力。此时样本来源于 EMTP 仿真试验结果及动模试验的数据结果。其用来计算的电力系统模型仍为图 3 所示。所取的故障类型基本同前。

表 1~4 列出了两个子网络的部分训练样本、检验样本及检验结果。由表可见,对各个子网络进行检验的结果与期望值基本一致。

表 1 训练样本举例(NN1)

Tab. 1 Examples of training samples(NN1)

故障类型与励磁涌流	理想输出
变压器空载合闸	1
外部故障切除后,电压恢复	1
带外部 b 相故障空投变压器	0
内部故障, a 相接地	0
内部故障, a-b 相间短路	0
外部故障, b-c 接地故障	0

表 2 检验样本和结果举例(NN1)

Tab. 2 Examples of test samples and results(NN1)

故障类型与励磁涌流	实际输出	理想输出
变压器空载合闸	0.998 8	1
外部故障切除后,电压恢复	0.987 8	1
带外部 a 相故障空投变压器	0.001 2	0
内部故障, b 相短路	0.100 1	0
内部故障, b-c 接地故障	0.090 1	0
外部故障, a-b 相间短路	0.009 8	0

表 3 训练样本举例(NN2)

Tab. 3 Examples of training samples(NN2)

故障类型	理想输出
外部故障, a 相接地	0
外部故障, b-c 相间短路	0
外部故障, a-b-c 三相短路	0
内部故障, a-b 接地故障	1
内部故障, c 相接地	1
内部故障, a-b-c 三相短路	1
内部故障, b-c 相间短路	1

表 4 检验样本和结果举例(NN2)

Tab. 4 Examples of test samples and results(NN2)

故障类型	实际输出	理想输出
外部故障, b 相接地	0.101 2	0
外部故障, a-c 相间短路	0.010 1	0
外部故障, a-b-c 三相短路	0.009 7	0
内部故障, a-b 相间短路	0.997 6	1
内部故障, a 相接地	0.958 6	1
内部故障, a-b-c 三相短路	0.967 9	1
内部故障, a-c 接地故障	0.968 8	1

通过对训练后的神经网络进行检验的结果表明,本文方法克服了常规保护及目前微机变压器保护中的缺点,能够对变压器处于励磁涌流状态进行正确判断,具有很好的工作性能,能够正确识别变压器所处的各种状态,如区内、区外故障,并且不受 CT 饱和的影响。

经过检验计算,该方法对变压器故障状态的响应时间,即从输入信号经 A/D 转换及小波预处理、进入神经网络直至给出判断结果这一过程的时间小于 10 ms。

3 结论

本文利用小波变换的时频分解和信号奇异性检测特性,运用神经网络方法实现微机变压器保护。该方法较之采用传统算法(如傅氏算法)的人工神经网络方法实现的微机变压器保护,具有结构简单、概念清晰、网络训练容易、权值阈值易获取等特点。能够有效地提高保护的选择性、速动性和灵敏性。

参考文献:

- [1] 陈德树(CHEN De-shu). 计算机继电保护原理与技术(Computer Relay Protection Principle and Technique) [M].

- 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1992.
- [2] 王维俭(WANG Weir-jian). 电气主设备继电保护原理与应用(Principle and Application of Main Electrical Equipment Relay Protection) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1996.
- [3] 杨奇逊(YANG Qi-xun). 微型机继电保护基础(Basis of Microcomputer Relay Protection) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and electric Power Press),1988.
- [4] Mallat S,Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on IT,1992,38(2):617-643.
- [5] 崔锦泰[CUI Jin-tai]. 小波分析导论(Wavelets Analysis Introduction) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press),1995.
- [6] 林湘宁,刘沛,等(LIN Xiang-ning,LIU Pei,et al). 基于小波包变换的变压器励磁涌流识别新方法(The New Method of Transformer Inrush Current Identifier Based Wavelet Packets Transform) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),1999,19(8):15-19,38.
- [7] 杨桦(YANG Hua). 小波分析及其在电力系统中的应用(Wavelet Analysis and Application in Electric Power System) [M]. 重庆:重庆大学出版社(Chongqing:Chongqing University Press),1997.
- [8] Thomas D, et al. Multir neural Network Based Fault Area Estimation for High Speed Protective Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(2).
- [9] Damir N, et al. Algorithms for Locating Faults on Series Compensated Lines Using Neural Network and Deterministic Methods[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1996,11(4).
- [10] 叶昊,王桂增,等(YE Hao,WANG Guir-zeng,et al). 小波变换在故障检测中的作用(Application of Wavelet Transform to Fault Detection) [J]. 自动化学报(Automation Journal) 1997,23(6):736-741.
- [11] 全玉生,等(QUAN Yu-sheng, et al). 应用小波变换检测间断角的新方法(The New Method of Application Wavelets Transform Inspecting the Dead Angles) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1998,22(1):33-35.
- [12] 杨行峻,郑君里(YANG Xing-jun,ZHENG Jun-li). 人工神经网络(Artificial Neural Network) [M]. 北京:高等教育出版社(Beijing:Higher Education Press),1992.

收稿日期: 2003-06-12; 修回日期: 2003-11-26

作者简介:

胡晓鹏(1955-),男,教授级高工,主要研究方向为电力自动化、自动控制及人工智能;

易理刚(1970-),男,工程师,硕士,主要研究方向为电力自动化、自动控制及人工智能。

A new method of applying artificial neural network based on preprocess of wavelets to realize computer-based transformer protection

HU Xiao-peng, YI Li-gang

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper presents a new method of computerized transformer protection. Using wavelets analyzed signal fantasticality inspection characteristic, it sets up the corresponding relationship between values of signal discontinuity and its modular partial maxima, and picks up state characteristics that needed. Using the characteristic of its time-frequency decomposing filter, it reduces the influence of imperiodic components and higher harmonic to fault direction identification in transient fault. Based on these, a three-layer feed-forward neural network model is presented and built in order to realize the computer-based transformer protection. Theoretical analysis and EMPT simulation test show that the method can effectively improve sensitivity and selectivity of conventional numerical protection principles and criteria without the effect of CT saturation.

Key words: wavelets transform; ANN (artificial neural network); computer-based transformer protection; inrush current

(上接第 19 页 continued from page 19)

Abstract: To distance protection elements, the existence of transition resistance may result in tripping missing or maloperation, when fault happens at the exit of short line of one-terminal power supply or on the line of two-terminal power supply. In view of that, the paper analyses the influences of transition resistance to distance protection, discusses the improvement of impedance circle characteristics of grounded distance relay and interphase distance relay whose standing transition resistance ability is inferior, and presents several impedance circle characteristics with better standing transition resistance ability. The paper draws a conclusion that distance protection will possess better standing resistance ability when the characteristics mentioned above combined together.

Key words: distance relay; transition resistance; impedance circle