

# 基于分布式神经网络的变压器励磁涌流鉴别的研究

陈琛,张举,成敬周

(华北电力大学电力工程系,河北保定 071003)

摘要: 针对目前变压器保护中普遍采用的利用二次谐波原理识别变压器励磁涌流存在的缺陷,提出利用分布式神经网络实现基于半波叠加原理鉴别励磁涌流的新方案。经仿真实验表明:该方案能准确地判别出变压器内部故障和励磁涌流,不受系统谐波影响,具有很高的可靠性。

关键词: 励磁涌流; 相电流差; 神经网络(ANN)

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)24-0033-04

## 0 引言

变压器在空载合闸或外部故障切除电压恢复时会产生较大的励磁涌流,必须加以识别,以防止差动保护误动作。随着电力系统的不断发展,目前普遍采用的二次谐波和波形间断角的识别方法由于原理本身的局限,还不能完全保证差动保护的可靠性,需要寻找更有效的涌流识别法。

基于电流波形的特点,提出了一种通过比较一周波数据窗内前后半波对称性来鉴别励磁涌流的波形对称原理。由于该原理综合利用了波形中的形状、大小及变化率,理论上优于二次谐波制动原理。目前被提出的波形对称判据有积分型,电流导数型,改进电流导数型等。半波叠加原理属于积分型波形对称判据。但基于波形对称原理的励磁涌流判别方法需要对原始波形数据作比较复杂的数学运算,而且高剩磁情况下的励磁涌流存在误判现象。

人工智能中的人工神经网络 ANN (Artificial Neural Network) 技术具有快速性,自适应性和容错性。因此,利用 ANN 实现基于波形对称原理的励磁涌流鉴别方法具有一定的优势。

本文提出了利用 ANN 实现基于简化的半波叠加原理中半波叠加识别变压器内部故障和励磁涌流的方法,数据运算量小,特征输入量获取简单迅速,判断迅速准确。同时,该方法采用分布式 ANN 结构实现,克服了网络规模大,训练时间长的缺陷。

## 1 人工神经网络的概述

对生物神经元作适当的结构简化和功能抽象,就得到所谓的人工神经元。将多个神经元按某种拓扑结构连接起来,即构成了 ANN。根据连接的拓扑结构不同,神经网络可分为很多种类。分层前向网

络 BP(Back - Propagation) 即误差反向传播网络是应用最为广泛的一种神经网络模型。其结构如图 1 所示。

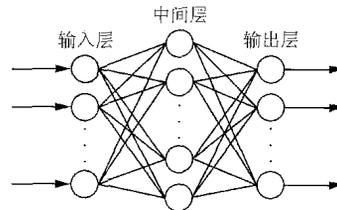


图 1 BP 网络的神经网络结构

Fig. 1 BP network structure with three layers

BP 网络的神经元采用的传递函数通常是 Sigmoid 型可微函数,所以可以实现输入和输出间的任意非线性映射,这使得它在诸如函数逼近、模式识别、数据压缩等领域有着广泛应用。

## 2 基于简化半波叠加原理鉴别励磁涌流的基本思路

图 2、图 3 是用 EMTP 仿真的变压器励磁涌流波形和内部故障波形。

图 2、3 中(a)、(b)、(c)三条曲线分别为三相电流  $I_{da}$ 、 $I_{db}$ 、 $I_{dc}$ ,  $x$  轴单位为时间  $T$ ,表示采样点数,图中取的是一周期 20 ms 内的波形,采样频率为 1 000 Hz,即每周期采样 20 个点。

由励磁涌流波形与内部故障波形比较可知,对励磁涌流而言,在一个周期内,三相差流(即流入差动继电器的电流)波形中有两相由于变压器饱和特性的影响使得波形存在间断角。其采样值在一周期内基本位于  $x$  轴的一侧。剩下的一相由于变压器绕组接线方式的影响往往呈现出周期性电流的特征,存在一定间断角,但波形接近正弦。而变压器内部故障时,三相差流波形基本都为正弦基波。

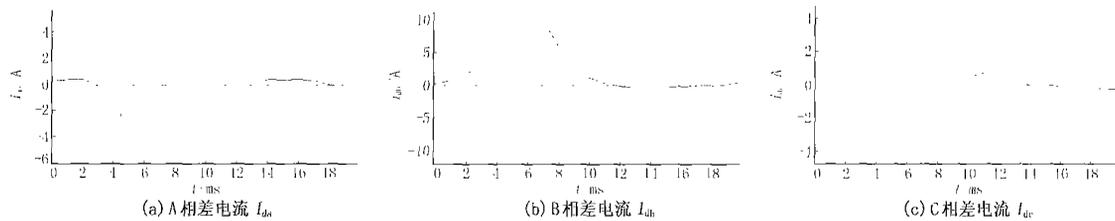


图2 变压器空载合闸产生的励磁涌流

Fig. 2 Inrush current when the transformer is switched with no load

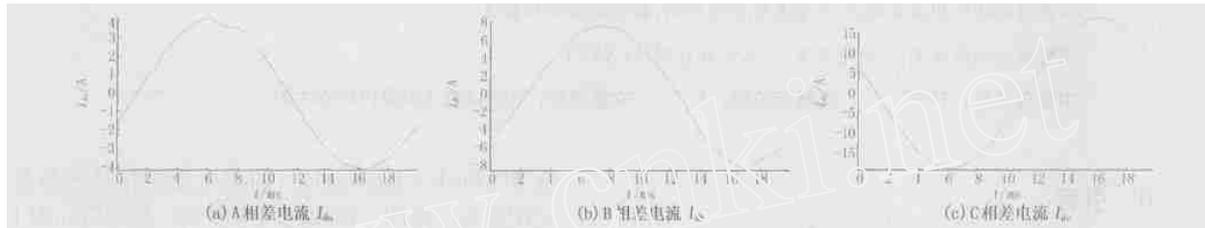


图3 变压器低压侧 C 相匝间短路电流波形

Fig. 3 Current waveform of the transformer with C phase interturn fault in low voltage side

设  $i_d$  为相差电流,令

$$c = \int_0^{\frac{T}{2}} \left| i_d(t) + i_d\left(t + \frac{T}{2}\right) \right| dt \quad (1)$$

$$d = \int_0^{\frac{T}{2}} \left| i_d(t) \right| dt \quad (2)$$

式中  $i_d(t)$  为  $i_d(t)$  的导数。由上面波形可知,当  $i_d(t)$  为理想的正弦波形故障电流时,恒有  $c/d = 0$ ; 当  $i_d(t)$  为励磁涌流时,因存在间断角,有  $c/d > 0$ ; 而当间断角大于  $180^\circ$  时,有  $c = d$ ,所以  $c/d = 1$ 。可见,适当选取  $k$  值,可构成如下判据:

$$P = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} \left| i_d(t) + i_d\left(t + \frac{T}{2}\right) \right| dt}{\int_0^{\frac{T}{2}} \left| i_d(t) \right| dt} k \quad (3)$$

当式(3)满足时,判断  $i_d(t)$  为内部故障电流;不满足时,判断  $i_d(t)$  为励磁涌流。式(3)可称为半波叠加涌流制动原理,是积分型波形对称原理的一种。

文献[3]中提出一种类似判据,只是不取  $i_d(t)$  的导数。判据为:

$$Q = \frac{\int_0^{\frac{T}{2}} \left| i_d(t) + i_d\left(t + \frac{T}{2}\right) \right| dt}{\int_0^{\frac{T}{2}} \left| i_d(t) \right| dt} k \quad (4)$$

该判据简单,引入判据的特征量获取方便。为既能可靠区分内部故障与励磁涌流,又利于构造 ANN,本文借鉴文献[3]中提出的判据原理采用将每

相差电流的前、后半波采样值对应求和的方法获取特征量作为 ANN 的输入。

在图 2(a)中,前半周期的采样值与后半周期的采样值对应相加,得到一组绝对值多数大于零的和值。同理,对图 3(a)的采样值做对应求和运算,得到的是一组绝对值等于或接近于零的和值。这两组数据的差别是十分明显的。

对图 2,图 3 的三相差流分别进行上述数据处理,各得到 3 组和值。励磁涌流状态下的 3 组数据中,只有一组里有接近零的值,而内部故障状态下的 3 组数据基本都等于或接近于零。

需要指出的是,本方法在对相差流波形进行运算时没有做滤除直流分量的处理,而是通过在训练样本增加含高直流分量的数据,网络采用分相处理综合判别等措施减小其影响。仿真检验证明直流分量对本方案的判别影响比较小。

考虑到受 CT 传变影响,励磁涌流二次波形间断角减小以及故障电流波形有畸变,前者采样值求和后的绝对值将会减小,后者的将会增大。但两种状态下的数据还是有明显大小区别的。这种区别可以通过大量样本数据训练 ANN,从而使其能被 ANN 准确识别。由此,我们可以把一周期内相差流波形前、后半周期采样值对应之和作为 ANN 的特征输入量,实现励磁涌流与内部故障的判别。

### 3 用分布式 ANN 实现励磁涌流鉴别

由于励磁涌流状态下,往往有一组差流波形呈现

周期性,为利于判别,同时也为简化网络,采用分布式 ANN(即多个子 ANN)分相判别。设计框图如图 4。

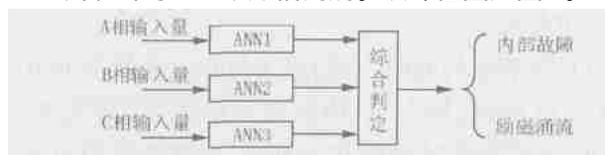


图 4 设计框图

Fig. 4 Block diagram of the proposed scheme

其中 ANN1,ANN2,ANN3 分别对 A,B,C 三相进行判别,判别的结果作为综合判定单元的输入,然后经过简单的逻辑判别输出最终结果。

ANN1,ANN2,ANN3 三个子网络的内部结构是相同的,均为三层 BP 网络。

以判别 A 相的 ANN1 为例。其采用 Levenberg-Marquardt 反向传播算法训练网络,权值调节规则采用动量梯度下降权值和阈值学习函数 Learngdm,传递函数为正切 Sigmoid 传递函数。输入量是由 A 相差流第一个采样周期的采样值经过对应求和得到的数据。每周期采 20 个点,对应求和后得到 10 个值,作为 ANN1 的输入量。因此,ANN1 的输入层神经元个数为 10。经大量实验,中间层神经元个数为 9 时网络收敛性最好,输出层神经元个数为 1。

在对 ANN 进行训练和检验时,为提高收敛速度,都要预先对输入样本数据做归一化处理。本方法中将输入量绝对值归一化到 -1 和 1 之间。

#### 4 仿真实验结果

用 EMTP 仿真三相双绕组变压器内部故障及励磁涌流。仿真系统如图 5 所示。



图 5 系统图

Fig. 5 Diagram of a simple power system

变压器由三个单相变压器组成,每个额定容量为 10 kVA,额定电压 1 000 / 380 V,额定电流 10 / 25.3 A。

为严格考核原理的可靠性,对变压器分别进行了高压、低压侧单相接地、匝间短路、两相接地短路、两相不接地短路、三相短路等内部故障以及在不同合闸初相角、电源内阻和剩磁情况下的空载合闸实验。同时,对空载合闸于内部故障也做了大量仿真实验。

变压器铁芯内的剩磁  $\sigma_{sy}$  及空载合闸时初始相角  $\alpha$  的大小对励磁涌流都有很大的影响。因此对在不同铁心剩磁和电压初始相角的情况下的空载合闸做了大量仿真。

当变压器空载合闸时三相初始相角  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $-120^\circ$  和  $120^\circ$ ,三相铁芯内剩磁分别为  $0.9 \text{ m}$ 、 $-0.9 \text{ m}$ 、 $-0.9 \text{ m}$ ,则将产生对称涌流。如图 6 所示。

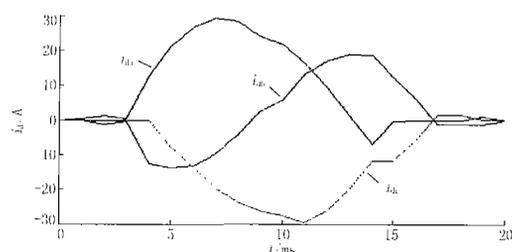


图 6  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\sigma_{sy} = 0.9 \text{ m}$ ,

$\sigma_{yb} = \sigma_{yc} = -0.9 \text{ m}$  时的涌流

Fig. 6 Inrush current when  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\sigma_{sy} = 0.9 \text{ m}$ ,

$\sigma_{yb} = \sigma_{yc} = -0.9 \text{ m}$

这种情况下,由于对称涌流的间断角比较小(最不利的对称涌流情况下,间断角小于  $30^\circ$ ),用间断角法就有可能将 B 相误判断为非励磁涌流。而根据本文提出的前后半波叠加的方法,计算出 B 相前 20 ms 与后 20 ms 采样点对应相加后的绝对值均大于零,与内部故障情况下的值仍存在较大差异。通过在训练样本中加入各种剩磁和初相角情况下的空合样本数据,即可提高对这种不利情况下励磁涌流的鉴别能力。而且,分布式 ANN 分相处理,综合判断的特点也大大降低了误判率。

将仿真得到的各种状态下的 75 组数据作为 ANN 的训练集。规定内部故障时,ANN 输出为 0,励磁涌流时,输出为 1。训练完毕后,用训练集之外的仿真数据进行检验。统计结果如表 1 所示。

表 1 中各 ANN 的输出是由实际各 ANN 输出的原始数据约简后的值,原始数据小于 0.5,则写 0;大于等于 0.5 则为 1。对三个子 ANN 的输出进行综合判定,若有两个或三个输出数据为 1 则判定为励磁涌流,否则判定为内部故障。

由仿真实验统计结果可以看出,对于各种类型的内部故障,均能得到十分准确的判断。对于不同合闸初相角和电源内阻情况下的空载合闸,尽管有一相被判断为内部故障,但最终的综合判定结果是正确的。另一方面,在变压器带内部故障空载合闸的情况下,由于最初一周期内的波形有畸变,非标准正弦波,所以判断结果有可能出现偏差。可以通过

增加训练数据集中空合于内部故障情况下的数据数量来减小此偏差。

表 1 检验结果统计

Tab. 1 Test results

实验类型	实验项目	ANN 输出值			综合判定结果
		ANN1	ANN2	ANN3	
内部故障	Y <sub>0</sub> 侧 C 相相间短路	0	0	0	内部故障
	Y <sub>0</sub> 侧 B 相匝地短路	0	0	0	内部故障
	侧 AB 相间短路	0	0	0	内部故障
	侧 B 相经 5 过渡电阻接地短路	0	0	0	内部故障
	侧三相短路	0	0	0	内部故障
	初相角为 0°	0	1	1	励磁涌流
空载合闸	电源内阻 5	0	1	1	励磁涌流
	初相角为 0°	0	1	1	励磁涌流
	电源内阻 10	1	1	0	励磁涌流
	初相角为 30°	1	1	0	励磁涌流
	电源内阻 10	1	0	1	励磁涌流
	初相角为 30°	1	0	1	励磁涌流
空合于内部故障	剩磁 0.9 m	1	0	0	内部故障
	Y <sub>0</sub> 侧 A 相匝地短路	1	0	0	内部故障
	侧 AB 相间短路	0	0	0	内部故障
	Y <sub>0</sub> 侧 BC 相间短路	1	1	0	励磁涌流

由于变压器内部故障和励磁涌流情况下输入 ANN 的数据组有着较大的区别,而 BP 网络又具有较强的自适应能力和非线性分类识别能力,所以,用分布式 ANN 实现的基于简化半波叠加原理鉴别励磁涌流的方案是可行的。

## 5 本方案的优势

1) 原理简单,判断速度快。由于本方案的内部故障与励磁涌流的判据是通过对变压器原副边三相电流差采样值做简单对应求和运算得出的,所以判断量的获取简单快速。尽管判断量的类型单一,但由于内部故障与励磁涌流两种状态下的判断量有着明显的区别,而且 BP 网络有较强的非线性分类能力,所以仍具有良好的可靠性。

2) 本方案提出的判断原理虽然与间断角的存在有关,但与间断角鉴别原理比较,该原理利用了输入到差动继电器中的电流,将励磁涌流的鉴别与变压器差动判据有机结合起来,且实现简单。可以直接作为变压器数字差动保护的辅助制动判据。

3) 从原理上克服了谐波制动的缺陷。目前由于电力系统中补偿电容的存在、超高压系统长距离输电线对地电容的影响以及电缆电容的影响,使得变压器发生内部故障时短路电流中同样会含有较大

的谐波成分,这对以谐波鉴别涌流来制动的保护而言是十分不利的。本方案提出的原理不受谐波影响,简单有效。

4) 网络结构简明,判断迅速可靠。采用分布式 ANN 分相判别,每个子 ANN 输入量少,结构简单,训练时间和判断时间都比采用一个网络所用时间少。综合判定单元的设置,提高了判断的可靠性,且使输出结果简单明了。

## 6 结论

本文提出了基于简化的半波叠加原理识别变压器内部故障和励磁涌流的方法,并采用分布式 ANN 结构实现。同时给出了 EMTP 仿真检验的结果。最后在比较了新方法与传统涌流鉴别方法的基础上说明了新方法的优越性。

## 参考文献:

- [1] 王维俭 (WANG Wei-jian). 发电机变压器继电保护应用 (Application of Generator and Transformer Relay Protection) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press),1998.
- [2] 胡玉峰,陈德树 (HU Yu-feng, CHEN De-shu). 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法 (A New Method to Identify Inrush Current Based on Sampled Values) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE),2000,20(9):55-58.
- [3] 许正亚 (XU Zheng-ya). 几个励磁涌流新判据分析 (Analysis on Several New Criteria of Inrush Current) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment),2002,22(1):23-28.
- [4] 林湘宁,刘世明,杨春明 (LIN Xiang-ning, LIU Shi-ming, YANG Chun-ming). 几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究 (Study on Comparisons among Some Waveform Symmetry Principle Based Transformer Differential Protection) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society),2001,16(4):44-50.
- [5] 许东,吴铮 (XU Dong, WU Zheng). 基于 MATLAB6. x 的系统分析与设计——神经网络 (System Analysis and Design Based on MATLAB6. x——Neural Network) [M]. 西安:西安电子科技大学出版社 (Xi'an: Xidian University Press),1998.

收稿日期: 2004-04-01; 修回日期: 2004-05-21

(下转第 49 页 continued on page 49)

- laying and Fault Recorder) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2001, 25(2): 75-77.
- [3] David Bennett. Visual C++ 5 开发人员指南 (Visual C++ 5.0 Develop Guider) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2000.
- [4] 李光琦 (LI Guang-qi). 电力系统暂态分析 (Transient Analysis of Power System) [M]. 北京:水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1995.
- [5] 朱声石 (ZHU Sheng-shi). 高压电网继电保护原理与技术 (The Principle and Technology of Relaying Protection in High-voltage Power System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1995.
- [6] Josuttis N M. C++ 标准模板库 (C++ Standard Library) [M]. 侯捷, 译 (HOU Jie, Trans). 武汉:华中科技大学出版社 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press), 2002.
- [7] 刘金龙, 高兆法, 巩玉国 (LIU Jin-long, GAO Zhao-fa, GONG Yu-guo). Visual C++ 6.0 类参考详细 (Visual C++ Reference Library) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1999.
- [8] Eddon G, Eddon H. Inside COM+ Base Services [M]. 北京:北京希望电子出版社 (Beijing: Beijing Hope Electronics Press), 2000.

收稿日期: 2004-04-12; 修回日期: 2004-07-09

作者简介:

桂 勋 (1978 - ), 男, 博士, 从事电力系统自动化的研究; E-mail: guih3@263.net

郭 凯 (1981 - ), 男, 硕士, 从事电力系统自动化的研究;

谭永东 (1953 - ), 男, 副教授, 从事电力监控系统的研究;

钱清泉 (1936 - ), 男, 工程院院士, 从事电力监控系统及其自动化的研究。

### All-graphic software system for fault record analysis based on network

GUI Xun, GUO Kai, TAN Yong-dong, QIAN Qing-quan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the prevailing of network technology in management of electric power system, the demand of fault analysis based on network is required. To satisfy the demand, the embedded all-graphic software system for fault record analysis based on network is developed. The paper discusses the structure, principle and methods of the software, and five key modules of the system which includes the switchable software framework, the reading and writing engine of standard COMTRADE files, the flexible subsystem of download, the agile subsystem of wave show and control, and the auto-subsystem of fault analysis report. In the end, the main analysis functions of the software system in the graphic environment is introduced.

**Key words:** fault record; COMTRADE standard; harmonic analysis; sequence component analysis; impedance locus

(上接第 36 页 continued from page 36)

作者简介:

陈 琛 (1979 - ), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: chenchentop528@sohu.com

张 举 (1946 - ), 男, 教授, 主要从事电力系统继电保护的研究;

成敬周 (1980 - ), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究。

### Study on inrush current identification based on distributed artificial neural network

CHEN Chen, ZHANG Ju, CHENG Jing-zhou

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Aimed at the disadvantages of second harmonic for inrush current identification in transformer protection, a new method is presented in this paper to distinguish inrush current based on the half-circle-added theory and the distributed artificial neural network. The simulation tests show that the new method can correctly judge the transformer's inrush current and internal fault without the harmonic effect, and it has a good reliability.

**Key words:** inrush current; phase differential current; artificial neural network (ANN)