

A thesis submitted to
Zhengzhou University
for the degree of Master

**Research on Distinguishing Inrush Current of Power
Transformer Based on Wavelet Analysis**

By Tao Ji

Supervisor: Associate Prof. Mingdong Wang

Electrical Engineering

School of Electrical Engineering

Octo,2015



学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者：纪韬

日期： 年 月 日

学位论文使用授权声明

本人在导师指导下完成的论文及相关的实物作品，知识产权归属郑州大学。根据郑州大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权郑州大学可以将本学位论文的全部或部分编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或者其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。本人离校后发表、使用学位论文或与该学位论文直接相关的学术论文或成果时，第一署名单位仍然为郑州大学。保密论文在解密后应遵守此规定。

学位论文作者：纪韬

摘 要

近些年以来，随着电力事业的发展，我们已经发现我们的生活中已经离不开电了，无论是各种电子产品的应用，还是互联网、多媒体的传播过程中，都离不开电的作用。在这个高速发展的社会，没有电力事业的支持，我们就无法如此轻松地获取各种知识，这对于我们的生活的影响无疑是巨大的。随之而来与电力相关的问题就出现了，其中为了使电力系统的各个环节可以安全稳定地运行，电力变压器的选择及保护成了一个大问题。一旦变压器出现问题将对系统的正常运行产生严重的后果，又由于变压器造价高、检修困难等等原因，做好电力变压器的保护工作很重要。人们使用差动保护的方法来提高变压器的可靠性和灵敏性，防止其出现故障。而励磁涌流所导致的差动保护误动作问题是差动保护过程中最难解决的。围绕着上述问题，继电保护研究人员提出了很多励磁涌流的识别方法。

本文综述了国内外典型的励磁涌流识别方法，简单阐述了其优缺点。分析了变压器涌流暂态过程的复杂问题，并且科学地分析研究了产生变压器各种涌流的机制，以及相关的影响因素，并且综合展示了各种涌流的波形特征。在理解小波分析理论的基础上，阐述了小波包分析方法的基本原理及其实现算法。论文从能量的角度出发，阐述了测量小波包的新方法，通过仿真系统模拟变压器涌流和内部故障电流在不同情况下的状态，得到全新的数据进行小波包的数据分析，求得频带 $W(4, 3)$ 的能量时谱。又因为励磁涌流拥有不同的机理，所以可以得到不同的能量时谱，通过对不同时谱的对比，就可以得出相应的数据，并将所有数据整合成合理的判据。这种方法是通过大量的实验总结出来的，所以这种方法可以被广泛地应用于各种小波分析中。

关键词：励磁涌流；内部故障；小波包变换；变压器差动保护；能量时谱

Abstract

In recent years, with the development of electric power, we have found that we can not live without electricity, whether it is a variety of electronic products, or the Internet, the transmission of multimedia, are not separated from the role of electricity. In this high - speed development of the community without the support of electric power, we can not be so easy to obtain a variety of knowledge, which is undoubtedly a great impact on our life. Followed with power related problems, which in order to make the power system can be a safe and stable operation of the power system, power transformer selection and protection has become a big problem, once the transformer problems will have serious consequences for the normal operation of the system, and due to the high cost of transformers, maintenance difficulties and so on, so do the power transformer protection is very important. People use the method of differential protection to improve the reliability and sensitivity of the transformer to prevent the failure of the transformer. The differential protection caused by magnetizing inrush current is the most difficult to control in the process of differential protection. Around these problems, the relay protection researchers have proposed a lot of methods for the identification of inrush current.

In this paper, a review is made on the typical excitation inrush current identification method, and its advantages and disadvantages are briefly described. The complex problem of transformer inrush current transient process is analyzed, and the scientific analysis and Research on the mechanism and the related factors of the transformer inrush current, and the related factors, and the comprehensive display of the waveform characteristics of the current. On the basis of understanding the theory of wavelet analysis, the basic principle of wavelet packet analysis method and its implementation algorithm are described. From the viewpoint of energy, a new method of measuring the wavelet packet is proposed. The state of the transformer inrush current and the internal fault current are simulated in different conditions. The new data is obtained by the new data analysis. The energy spectrum of 4,3 (W) is obtained.

Because the inrush current has different mechanism, so it can get different energy spectrum. Through the comparison of different time spectrum, we can draw the corresponding data, and integrate all the data into a reasonable criterion. This method is concluded by a lot of experiments, so this method can be widely used in various wavelet analysis.

KEY WORDS: inrush current; internal fault; wavelet packet transform; transformer differential protection; energy spectrum

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 绪论	1
1.1 课题的背景和意义	1
1.2 变压器涌流国内外研究现状	3
1.2.1 励磁涌流研究现状	3
1.2.2 和应涌流的研究现状	10
1.2.3 恢复性涌流的研究现状	10
1.3 论文的主要工作	11
2 变压器涌流分析	13
2.1 变压器励磁涌流的分析	13
2.2 变压器和应涌流的分析	17
2.3 变压器恢复性涌流的分析	21
2.4 本章小结	25
3 小波分析理论	27
3.1 小波分析的基本概念	27
3.1.1 小波变换理论的提出	27
3.1.2 连续小波变换	28
3.1.3 离散小波变换	29
3.2 多分辨率分析	29
3.3 小波包分析	30
3.3.1 小波包基本原理	31
3.3.2 小波包能量	32
3.4 小波函数与分解尺度的选取	32
3.4.1 小波函数的选取	32
3.4.2 分解尺度的确定	34

3.5 本章小结	39
4 应用小波包分析识别变压器涌流	40
4.1 建立电力系统仿真模型	40
4.2 基于小波包的变压器励磁涌流识别研究	41
4.2.1 仿真结果分析	41
4.2.2 算法设计	43
4.3 算法验证	45
4.4 本章小结	54
5 结论	55
参考文献	56
致谢	61
作者简介	62

1 绪论

1.1 课题的背景和意义

近年来,我国经济建设的高速发展,导致电力工业迅猛发展,进而使得电网总装机容量大幅上升。整个电力系统也变得越来越复杂多样化,所以对电网安全稳定运行的要求也越来越高。变压器是电力系统的重要设备,在电力系统中起着不可磨灭的作用,一旦发生故障而遭受破坏时,会造成电力系统的严重损失。为了提高电力系统的安全性,变电器的运行可靠性必须得到保障。相对来说,变压器的结构越复杂,其故障影响范围就越大,检修的难度和所消耗的时间也都有所提升,所以对于现代大型高等级高容量的变压器来说,拥有良好性能的继电保护装置非常重要。所以我们要进一步深入对于保护变电器相关的研究和探索,以提高电力变电器的速动性及灵敏性。

在电路保护方面,人们一直以来在寻找一种原理简单易懂,灵敏程度高,反应迅速的方法,特别是在大型电力设施上,比如大型的发电机和变压器。经过长时间的研究,在纯电路电气设备保护方面,人们提出了电流差动保护的理论和方法,并应用于大型电力设施,得到了良好的效果。但是在变压器保护方面,由于电生磁、磁生电的相互克制性,基尔霍夫电流定律无法很好的应用其中。在变压器的内部,由电压变动产生的故障电流打破了纯电路的电流平衡。在一些特殊情况下,比如断电的重启、新的设备投入或切除等都会出现骤大骤小的电流变化。变压器励磁涌流便属于这种情况。当变压器空载合闸,或外部故障切除后电压恢复过程中,差动回路将出现很大的励磁涌流(为额定电流的6—8倍)^[1-2],可能会引发差动保护装置误动作。因此,快速、准确地识别励磁涌流和内部故障电流直接决定着差动保护的性能,开展相关研究十分必要。

从近年来的继电保护动作情况统计中我们可以看出,其实我国的继电保护发展的整体技术还是比较快的,属于国际的先列水平,尤其是其中的正确动作率一直属于上升趋势。但是相比较来说,继电保护技术中的变压器差动保护的正确率却迟迟上升不起来,一直处于一个偏低的水平。接下来我们来对比一下近几年的保护动作情况(如表 1.1、表 1.2 所示)。这份数据是由国家电网总局在 2013 年所进行的统计分析提供的来的。

绪论

表 1.1 2009-2013 年 220kV 及以上系统变压器保护动作情况
Tab.1.1 2009-2013 power system of more than 220kV transformer protection movement situation

项目	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
动作次数	180	182	179	183	182
正确动作次数	166	170	170	179	180
误动次数	14	11	8	4	1
拒动次数	0	1	1	0	1
正确动作率%	92.22	93.41	94.5	97.81	98.90

表 1.2 2013 年 220kV 及以上电网元件保护动作情况
Tab.1.2 2013 power system components of more than 220kV protection movement situation

项目	变压器保护	发电机保护	母线保护	高压电抗器保护	合计
动作次数	182	396	134	1	713
正确动作次数	180	394	132	1	707
误动次数	1	2	2	0	5
拒动次数	1	0	0	0	1
正确动作率%	98.90	99.49	98.51	100.0	99.16

由表对比得知，其实我国的继电保护发展水平一直在稳步上升的阶段，是一个整体进步的状态。可是唯一出现不同的就是关于变压器保护的正确率改变情况，一直处于上升缓慢的状态。这一事实也说明目前我们国家对于变压器保护相关的研究并不完善，总是存在一些无法解决的问题，所以我们要着力于研究变压器保护的相关问题。在已有的理论和技术中去其糟粕，更好的完善变电器保护原理，提高其继电保护的能力。

在人们发现励磁涌流会影响差动保护后，又逐渐发现了另一种可以影响差动保护的涌流，它的原理就是在两台变压器之间产生相互影响的作用，运行在变压器中，就会产生和应涌流现象，导致变压器之间的纵差保护误动。这种操作就会导致变压器差动保护装置误动，使间断角消失，使二次谐波变少。

在此过程中，变压器本身并没有发生故障，故障是发生在变压器间完成空投之后的经过空投的一段时间，就会使很多的实验数据消失，或者产生误差，

使人们很难寻找得到变压器发生故障的原因。在继电保护中和应涌流的问题过去一直被人们忽略，目前这方面的研究才刚刚起步，所以对于和应涌流全方面的研究还有待深入。由此我们可知，对和应涌流进行全面的分析研究，以提高变压器的保护程度，是一件非常重要的事情。我们应该寻找到一种具有实践与理论都过关的措施，对变压器的发展会有很大的意义。

近年来，偶尔会有变压器差动保护区外故障切除后误动的现象出现。这一误动现象的产生与电压恢复性涌流有关。但长期以来，我们还是会把变压器的空载合闸现象与其电压的恢复过程混为一谈。但事实上，却有另一种特性在影响着这种电压的恢复，那就是其电磁暂态的过程，这种特性不能被忽略，同样应该对其进行分析，以进一步的寻找涌流与变压器保护之间的联系。

随着现代社会的发展，越来越多的保护原理被应用起来，其中包含曾经因为没有足够硬件支持所不得不放弃的保护方法，也有一些新的数学理论方法。虽然这些被应用于变压器保护的全新的理论方法大多都属于实验期，并不能大量的运用，但是它们对保护研究的影响却还是可以带给研究人员新的灵感的，同时也会更加地促进变压器保护的发展。

1.2 变压器涌流国内外研究现状

1.2.1 励磁涌流研究现状

为了防止变压器差动保护误动，国内外学者做了很多的研究，根据励磁涌流与内部短路电流的差别，找到了很多的方法。而这些方法是否可行，是否可以因此实现对这两种电流的区分，我们要加以论证：

1) 基于电流量的励磁涌流判别技术

(1) 二次谐波制动原理^[9-11]

通过多种数据我们可以发现励磁涌流中存在比内部短路电流更多的二次谐波分量，所以通常会用这种特性来区分励磁涌流和短路电流。只要是通过计算，满足了公式(1.1)，就可以判断出来哪一个才是励磁涌流，哪一个是正常的短路电流，并对因为励磁涌流而引起的差动保护进行闭锁，防止励磁涌流破坏系统的运作。

$$\frac{I_{d2}}{I_{d1}} \geq K_2 \quad (1.1)$$

式中, I_{d1} 、 I_{d2} 分别为差动电流中的基波和二次谐波的幅值; K_2 为二次谐波制动系数。

二次谐波制动原理已被应用在国内外各个变压器领域, 这种简单的容易在微机保护中实现的原理, 非常适用于当今的社会。但是, 随着大型变压器越来越广泛使用, 采用二次谐波制动原理区分涌流和故障电流也有其局限性:

a. 对于超高压、大容量变压器, 由于制造工艺和材料以及结构上的特点等方面的原因, 尤其是对于广泛采用高导磁冷轧晶粒硅钢材料的现代变压器铁芯, 剩磁较大并且饱和点低, 励磁涌流中二次谐波含量就会很小, 使得二次谐波制动原理无法准确识别励磁涌流, 从而误动差动保护系统。

b. 因为二次谐波会使差动保护的系统不能够按照正常的时间进行运作, 会发生延时。而现代的远距离输电变压器多数以容量大著称, 所以这样就会使其内部故障时出现大容量的二次谐波, 出现上述情况。

c. 二次谐波的制动原理通常采用一相制动三相的方案, 即采用或门制动。当变压器空载合闸时的二次谐波不明显, 则会导致保护误动。有的时候, 其中一相的二次谐波过大也会发生不一样的后果, 当出现匝间故障的时候, 这种情况同样会使保护的動作发生延时的情况。因此, 励磁涌流二次谐波“含量高”的特征, 由于运行方式的增多和系统的扩大已不再是其独有的。

d. 一般来说, 当变压器的饱和磁通为额定磁通的 1.4 倍时二次谐波最小。考虑这种情况, 二次谐波制动比通常取 15%~17%。然而现代的变压器达到饱和状态时的磁通倍数却更低, 导致其二次谐波的最小含量也会下降, 同比例的下降很多, 可能会因此误动变压器的差动保护模式。

(2) 间断角原理^[7, 8]

根据这个特别的角度, 对励磁涌流进行判断。其依据为

$$\theta_j > 65^\circ; \quad \theta_\omega < 140^\circ \quad (1.2)$$

式中: θ_ω 是涌流波宽; θ_j 是涌流间断角。

当 $\theta_j \leq 65^\circ$ 且 $\theta_\omega \geq 140^\circ$ 时, 则判定电流为故障电流, 开放差动保护; 而当间断角 $\theta_j > 65^\circ$ 就判定电流为励磁涌流, 闭锁差动保护。

在励磁涌流的二次谐波比较小的情况下, 间断角原理也可以简单可靠地识别励磁涌流, 但当应用微机保护实现间断角原理时, 由于该方法是以精确测量间断角为基础的, 因此有以下难点:

a. 用微机实现间断角原理时，由于 A/D 转换芯片可以使零点附近的转换误差升到最大值，同样也可以使涌流间断角处的电流降到最小，因此，需要高分辨率的 A/D 转换芯片。硬件成本越高，CPU 的质量越高，相应高的计算速度可以提高 A/D 采样率，为间断角的测量提供帮助。

b. 当电流互感器饱和时，内部故障电流的差动电流的间断角增大，而且差动电流的间断角随着电流互感器饱和严重度变化，饱和越严重，其间断角越大；对于励磁涌流而言，由于涌流将在电流间断角区域内的电流方向会发生变化，所以会导致间断角消失的局面。而电流互感器饱和度越严重就会加剧这种局面的形成。变压器差动保护在前一种内部故障情况拒动，而在后一种情况产生涌流使得差动保护误动。

(3) 基于波形对称性的识别原理

我们都知道在一个周期内的励磁涌流它的前后半波形是不同的，而一个周期内的内部故障电路的前后半波形却是对称的，所以我们所研究出的各种各样的方法都是根据这个原理构建出来的。根据这个差异找出励磁涌流，并立即对其作出相应的活动。波形对称原理的判别式如下：

$$K > K_{set} \quad (1.3)$$

式中， K_{set} 为整定值， K 为波形不对称系数。

利用波形对称性特征的识别原理从本质上来讲，是由间断角原理的衍生和改进而成，也是利用涌流波形存在间断而造成波形不对称的特点，但间断角原理与其算法相比不易实现。在实际应用中， K 值只能根据大量试验的方式以及实际情况来确定，而涌流波形却很难确定，因为会受到很多因素的制约。并且并没有严格的理论和公式可以证实，所以很有可能会发生误判断。

a. 波形比较法^[9]

数据窗为差动电流的一个周波，数据窗内的差流可用适当的方法分解成有明显差异的两段波形 $x(t)$ 和 $y(t)$ (每段长度为 1/2 周波)，不对称度 K 可通过计算两段波形的相关系数来得到：

$$K = \frac{Cov(x, y)}{\sigma(x)^2} \quad (1.4)$$

式中, $\sigma(t)$ 为 $x(t)$ 的均方差, $Cov(x, y)$ 为 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的协方差。由于采用积分方法计算不对称度 K , 此算法抗饱和能力强且具有较好的稳定性。

b. 波形拟合法^[10, 11]

首先选取一个标准正弦波作为参照波形, 通过其与实际电流波形之间的差异比较, 反映出波形的不对称度。其中, 标准正弦波是利用差动电流的实时采样值拟合而成的。即:

$$K = \frac{|y'(n) - |y(n)|}{|y'(n) + |y(n)|} \quad (1.5)$$

式中, $|y(n)|$ 为滤除直流分量后的差流离散值, $|y'(n)|$ 为拟合正弦波的离散值。该方法具有较短的数据窗, 因此特征明显且识别速度快。

c. 波形对称原理^[12]

首先通过微分算法滤除差动电流中的直流分量, 然后根据分析处理后差流的前半波与后半波作对称性的结果来判断差流是否为励磁涌流。设 $i(n)$ 为差动电流采样值序列, $i'(n)$ 为其导数序列, 计算 K 值如下:

$$K = \frac{|i'(n) + i'(n - N/2)|}{|i'(n) - i'(n - N/2)|} \quad (1.6)$$

当 $K \leq K_{set}$ 时判断为波形对称, $K > K_{set}$ 时判断为波形不对称。该方法充分地利用了差动电流中二次谐波以上的偶次谐波分量来制动, 因此, 差动保护的励磁涌流制动能力有了提高。

(4) 虚拟三次谐波制动原理

虚拟三次谐波制动式变压器差动保护通过半周傅氏算法计算拟合波形中基波以及三次谐波含量构成^[13]。拟合波形的前半周为励磁涌流波形中的半个周波。它是以尖脉冲为中心形成的, 但是后半周则是通过其他的原则拟合而成的。由于对称性涌流和单侧尖脉冲性涌流含有较多的三次谐波分量, 且该原理仅利用半个周波就可做出判断, 因此可以有效地防止保护误动。虽然虚拟三次谐波制动原理是非常简单的保护算法, 但很难在模拟式保护中实现, 而由于数据窗位置的影响, 保护整定值的选取和直流分量的影响等因素的存在, 其在微机保护中实现也存在一些问题需要解决。

2) 基于电流量和电压量的励磁涌流判别技术

(1) 磁通特性保护原理^[4]

磁通特性保护原理利用变压器空载合闸和内部短路时变压器差动电流 i_d 与磁链 ψ 曲线的差别来识别励磁涌流。

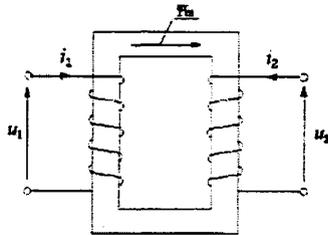


图 1.1 单相变压器空载合闸运行
Fig. 1.1 Unloaded Transformer Operation

图 1.1 为双绕组单相变压器空载运行时的情况，忽略变压器绕组电阻，则流入绕组的电流 i_d 与该变压器磁链 ψ 之间的关系为：

$$u_1 - L_1 \frac{di_d}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1.7)$$

式中， L_1 为变压器原边绕组的漏电抗； ψ 为绕组回路磁链； u_1 为原方绕组端电压； i_d 为变压器差动电流（空载合闸时为励磁电流）。

变压器各种运行情况下的 $\psi - i_d$ 曲线如图 1.2 所示，曲线 1 和 2 是变压器产生涌流时的状态，其中曲线 2 还考虑了剩磁的影响。随着 i_d 的变化 $d\psi/di_d$ 发生周期性的变化，变压器进入饱和区域时的斜率 $d\psi/di_d$ 要小于变压器未饱和时的 $d\psi/di_d$ 。曲线 3 对应于变压器内部故障状态， $d\psi/di_d$ 数值较小且基本不变。励磁涌流识别可以通过对 $d\psi/di_d$ 所落区域的判断来实现。

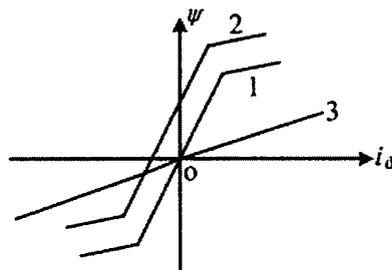


图 1.2 $\dot{\psi} - i_d$ 励磁特性曲线Fig. 1.2 $\psi - i_d$ Magnetizing Curve(2) 基于励磁阻抗或瞬时励磁电感的变压器保护原理^[15]

根据变压器铁芯磁路饱和的机理，即励磁涌流产生的本质原因，可得到基于瞬时励磁电感的识别方法。由于基频特性不同，所以在处理空载合闸和内部短路励磁电感时，应用傅里叶分解的方法来区分，并通过判断分解后是否存在基频分量实现对励磁涌流的识别。

定义瞬时励磁电感 L_m 如下：

$$L_m = \frac{d\psi}{di_m} \quad (1.8)$$

式中， i_m 、 ψ 分别表示变压器的励磁电流和励磁磁链。因为瞬时励磁电感难以尽或缺的获得，所以实际应用中常借助从变压器原边绕组端口看进去的瞬时电感来代替。但是却具有一定的局限性，这只是通过实验模型获得结果，并不精准。

(3) 功率差动原理^[16, 17]

从能量守恒角度考虑电流、电压综合信息的功率差动原理是一种全新的不依赖励磁涌流波形特征的保护方法。通过研究可知：在正常运行时和在绝缘损坏时变压器所消耗的有功是不同的，在绝缘损坏时将消耗大量的功，所以为了更好地判断变压器是否发生内部故障，我们可以根据他消耗的有功进行判断。但是这种方法仍存在一些不足，需要解决：

- a. 变压器采用 Y/ Δ 接线方式时无法获取 Δ 侧绕组内部电流，保护的灵敏度由于无法确定铜损耗而降低。
- b. 由于励磁涌流的存在铁损耗增加，整定变困难，铜损耗难以精确计算。

3) 现代信号处理技术在涌流识别中的应用

(1) 小波分析在励磁涌流识别方面的应用

小波分析是 20 世纪 80 年代后期发展起来的新理论。小波分析可以准确地提取频带宽、持续时间短的电力系统故障暂态信号，更好地识别励磁涌流和内部故障电流。他完全的克服了其他信号的处理缺陷。

目前小波分析在励磁涌流的识别方面已取得了一定的成果^[18-26]。文献^[27]提出了一种新的方法，用于区分励磁涌流和内部短路电流，这种方法就是有小波分析得出的。

通过仅流经变压器一侧且小波变换后一侧无故障跳，以及内部故障两侧具有符号相反故障跳等特点，构建了励磁涌流新的算法，并利用仿真证明了所提出的判据简单，计算量小，且能在故障或是空载合闸瞬间迅速做出判断。文献^[28]提出了一种可以识别励磁涌流和内部短路电流的新方法，这种方法是通过多分辨率和小波分析共同得出。通过一种特殊的小波分解故障电流和励磁涌流，并找出经过小波分解后的各层小波系数的差异，即故障电流的高频成分在初始阶段逐渐减小，而随着时间的推移，励磁涌流的高频成分逐渐增大，该方法可以有效识别轻微匝间短路，可靠性和灵敏度都较高。文献^[29]的方法则是用小波变换来识别匝间的两种电流。该方法对仿真波形采用 B 样条小波进行分析，通过李氏指数值的大小识别故障电流和励磁涌流，李氏指数值可用来表征信号奇异度大小，可利用分解后的局部模极大值处对应的小波系数求得。

以上的文献都表明了小波分析的发展已经逐渐成熟，已经逐渐被应用到各个领域。它在分析领域的优势被逐渐放大。它给人们带来的结果也是满意的，无疑是一个成功的科学案例。

(2) 模糊理论在励磁涌流识别方面的应用^[30、31]

将模糊理论有机的融入到变压器保护中，利用各种模糊的识别、控制、决策理论对涌流识别进行模拟应用，以提高涌流识别的可靠性。将不同置信度给予多个输入量及相关保护判据，通过模糊推理得到最终的动作决策，按照这个基本思想，可以根据实际情况分别置于不同的置信度，综合判别差动电流间断角特征、波形对称度、二次谐波含量等几种常用判据。这种方法是一种新的尝试，可以解决变压器励磁涌流的识别问题，但是它所存在的弊端还是有许多，有很多问题待解决。

(3) 人工神经网络技术在励磁涌流识别方面的应用

1994 年，变压器差动保护首次利用人工神经网络优秀的模式识别能力判别励磁涌流^[32]，之后便越来越多地出现此类应用^[33、34]。人工神经网络已被多处的

用在识别励磁涌流和内部故障电流中，但是国内外学者并不局限于此，他们想要可以实现的更多就像文献^[35]不仅考虑了励磁涌流和内部故障电流的识别问题，还将人工神经网络用于区别变压器的外部故障和内部故障。

1.2.2 和应涌流的研究现状

虽然变压器的和应涌流现象很早就已经被国内外学者发现^[36]，但学者们近些年才逐渐重视起和应涌流。国外早在 1941 年就有和应涌流现象的报道。通过对变压器差动保护误动原因的分析，学者们发现不仅在变压器刚合闸时会出现较大暂态激励电流，在与其并网运行的变压器中也会出现该电流^[37]。至此，学者们开始了对和应涌流的深入研究。文献^[38]对两台并联运行的变压器进行仿真，其中一台为带负荷、有并联电容器或空载的变压器而另外一台变压器空载合闸，在对两组数据的对比分析，确实得出了变压器和应涌流之间存在联系^[39、40]。

国内对和应涌流的认识着重点在于电流波动变化和其自身特点，如文献^[41]观察记录两个相同效率的电路模型输出的磁通数据分析变压器和应涌流存在的联系和特点。而文献^[42]通过建立了级联和并联运行的两台单相变压器模型，在简化线性化的基础上，对正在运行的变压器和应涌流产生机理及影响因素做了定性分析。文献^[43]就指出偏磁也是影响和应涌流的重大原因之一。阐述了和应涌流在并联和串联两种情况下对变压器差动保护、其他相关保护变压器及后备保护的影响。文献^[43]之所以电路会出现和应涌流是因为新并入电路的变压器突然工作会有励磁涌流，而这股电流会通过整个电力系统的电阻，在整个电路系统中并联或串联的正在工作的变压器电线路电压不正常，这一产生的原因和特点全是基于励磁涌流偏向时间轴一侧，这就是和应涌流出现的根本原因。

目前虽然和应涌流的问题受到了广大专家学者的重视，但是由于整个电力系统的复杂和庞大，以及变压器自身内部电流的复杂因素，还不能很清楚的知道其中影响电力系统保护的原因，所以，对于这一重要问题还需要更加深入的研究才能更好地保护电力系统。

1.2.3 恢复性涌流的研究现状

在以往的研究中，当变压器出现故障并且修复后的回复工作的过程中和变压器刚刚并入电路系统中的变化是一样的，这也是被世界学者所认同的^[44]。但是近几年，随着研究难题的突破，学者们发现以往认同的过程出现差异并且各自有些自身特征。文献^[45]里提到了分析变压器从故障开始到排除的整个过程，记录了期间的所有数据。文献^[46]中也提到的了在通过对仿真电路变压器模型的分析，并且提出了在变压器出现故障和排除故障并入电路的过程中有可能会出电路系统的过载状态，保护误动的概念由此提出。对于这个国内外都为之头疼的问题，人们主要都是集中于对励磁涌流的研究，而忽略了对其他涌流的重视。虽然得到了很多的成果，但是却仍然不全面。目前对变压器和应涌流及恢复性涌流的研究还较少，对和应涌流及恢复性涌流的产生机理和影响因素研究结论还没有得到广泛的共识，因此还需要更加深入的研究这个项目，以得到系统化的结论。

1.3 论文的主要工作

通过之前的论述，我们可以发现由于短路电流和励磁涌流的差别很小，所以当继电器中出现该涌流时，并不易识别，造成差动保护的偏差。所以如何正确的识别这两种电流成为人们关于变压器差动保护的重点问题。虽然现存的识别方法有很多，但是大多数都没有得到验证，还是处于研究的阶段。然而随着电力系统规模的不断扩大，即使变压器差动保护过程中精准度已经有所提高，但是出现误动拒动的情况还是有的，所以本文的目的就是为了要寻找正确的识别方法，通过小波分析的理论进行分析与前人研究的成果相结合，组合成一种暂态保护的判断依据。

本文介绍的主要内容概述为：

(1) 简要分析目前变压器保护面临的主要问题，综述目前国内外涌流识别技术的研究和应用现状，通过这些分析阐明了论文的研究意义和研究目标。

(2) 分析变压器励磁/和应/恢复性涌流的暂态机理，明确了三种涌流各自的产生原理、影响因素、各自特征。

(3) 在小波分析理论上提出了基于小波包能量的涌流识别方法。通过 MATLAB 软件建立变压器仿真模型，分析了经小波包分解的涌流及故障电流暂态信号的能量变化情况，根据能量变化趋势的不同，制定新的涌流识别方法和保护判据，并验证其准确性。

2 变压器涌流分析

2.1 变压器励磁涌流的分析

在正常情况下，变压器绕组的励磁电感会很大，所以所带来的励磁电流就会很小很小，不会出现励磁涌流的情况，这也是由于变电器在正常情况下是不处于饱和状态的，所以它的导磁率就会很大。但是每当出现外部故障需要检修，检修切除过后恢复原本电压的过程中或者空载合闸变压器的时候都有可能数值很大的励磁电流，成为励磁涌流。出现该涌流的原因是由于变压器铁芯中的磁通量突变，使铁芯瞬时饱和，变压器绕组的电感就会随之下降，励磁电流也会出现改变，会比额定电流的值大很多。

由于短路电流和励磁涌流的差别很小，所以当继电器中出现该涌流时，并不易识别，造成差动保护的偏差。所以如何正确的识别这两种电流成为人们关于变压器差动保护的重点问题。因此我们要通过对这种涌流全方面的分析，加深加深对励磁涌流的进一步认识，以减少差动保护的错误率。

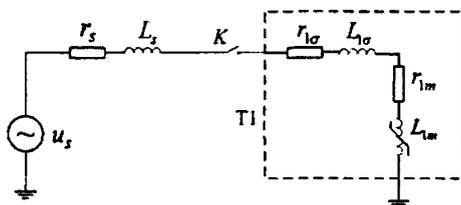


图 2.1 空载合闸时单相变压器的等效电路

Fig.2.1 Single-phase transformer no-load closing when the equivalent circuit

图 2.1 中， L_s 为系统侧等效电感， r_s 为系统侧等效电阻， L_{1m} 为变压器励磁电感， r_{1m} 为变压器励磁电阻， $L_{1\sigma}$ 为变压器的一次绕组漏电感， $r_{1\sigma}$ 为变压器的一次绕组漏电阻。变压器 T_1 在 $t=0$ 时空载合闸， α 为电压初始合闸角，可列写合闸回路电压方程为：

$$u_s(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) = ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.1)$$

式中， Ψ 为合闸回路的总磁链， $r = r_s + r_{1\sigma} + r_{1m}$ 为回路的电阻，同时满足：

$$\psi = (L_s + L_{1\sigma})i + \psi_T = (L_s + L_{1\sigma} + L_{1m})i = Li \quad (2.2)$$

式中，变压器铁芯磁链 $\psi_T = N_1\Phi_T$ ， N_1 为变压器原方绕组匝数， Φ_T 为变压器铁芯磁通。励磁电感 L_{1m} 产生的磁链可用 ψ_T 等效，即 $\psi_T = L_{1m}i$ ，励磁电感 L_{1m} 是一个非线性电感。为了定性分析励磁涌流暂态过程，将非线性方程式 (2.1) 进行线性化处理，得到的微分方程以磁链 ψ 为变量：

$$U_m \sin(\omega t + \alpha) = \frac{r}{L}\psi + \frac{d\psi}{dt} \quad (2.3)$$

求解微分方程(2.3)得：

$$\psi = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi)]e^{-t/\tau} \quad (2.4)$$

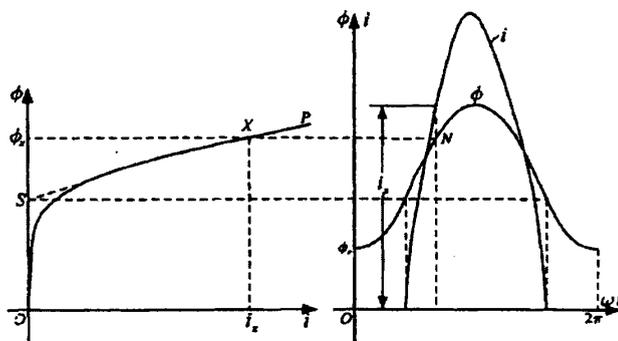
式中， ψ_m 为磁链稳态分量最大值，且满足 $\psi_m = \frac{LU_m}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}$ ， ψ_r 为铁芯剩磁链，

$\tau = L/r$ 为变压器一次侧合闸回路时间常数， $\varphi = \arctan(\omega L/r)$ 。

公式 (2.4) 表明，变压器的暂态磁链 ψ 由稳态交流分量和衰减的暂态直流分量两部分组成。一般情况下，合闸回路的电抗远大于电阻，因此可以忽略回路电阻，公式 (2.4) 可简化为：

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + \psi_r + \psi_m \cos \alpha \quad (2.5)$$

得出变压器磁链的公式以后，依据变压器铁芯磁化特性曲线 $\psi = f(i)$ （或 $B = f(H)$ 曲线）及空载合闸的铁芯磁通就可以求出励磁涌流，如图2.2所示。



(a) 铁芯磁化曲线 (b) 铁芯磁链与励磁涌流

图2.2 变压器铁芯磁化特性曲线及励磁涌流说明图

Fig.2.2 Magnetizing curve and inrush current illustration

图 2.2 (a)用两段直线近似表示铁芯磁化曲线,纵轴与饱和曲线 SP 交于 S 点,饱和磁链 ψ_s 为该点磁链。当铁芯未进入饱和即磁链 $\psi < \psi_s$ 时,励磁阻抗很大,此时励磁电流 $i \approx 0$; 当铁芯进入饱和即 $\psi > \psi_s$ 时,励磁阻抗急剧减小。由此时励磁涌流为:

$$i_m = \frac{\psi - \psi_s}{L} = \frac{U_m}{\omega L} \left[\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha) + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m} \right] \quad (2.6)$$

根据式 (2.6) 可求得, 当 $\omega t + \alpha = \pi$ 时, 励磁涌流的峰值 $i_{m.\max}$:

$$i_{m.\max} = \frac{U_m}{\omega L} \left(\cos \alpha + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m} + 1 \right) \quad (2.7)$$

最后可以解得简化情况下的单相励磁涌流为:

$$i_m(t) = \begin{cases} i = \frac{U_m}{\omega L} \left[\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha) + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m} \right] & \omega t_1 < \omega t < \omega t_2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2.8)$$

变压器饱和程度的变化可以改变变压器的励磁电感 L_m , 并与之成反比例变化, 所以真实的励磁涌流波形是具有波峰的变化曲线。也就是说当变压器不在饱和时, 励磁电流的值趋于零, 这个时候就会呈现出具有间断角特性的波形曲线变化。也就是说, 励磁涌流衰减的幅值和速度上升的原因是由变压器越来越趋于饱和所导致的励磁电感变小造成的, 与其他因素无关。

根据 t_1 、 t_2 时刻 $i_m = 0$, 代入公式 (2.8) 可求得涌流起始点 t_1 及终点 t_2 :

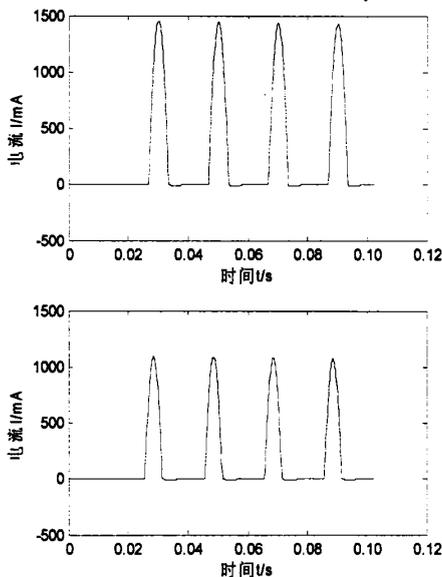
$$\cos(\omega t_1 + \alpha) = \cos \alpha + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m} \quad (2.9)$$

$$\omega t_2 = 2\pi - (\omega t_1 + \alpha) \quad (2.10)$$

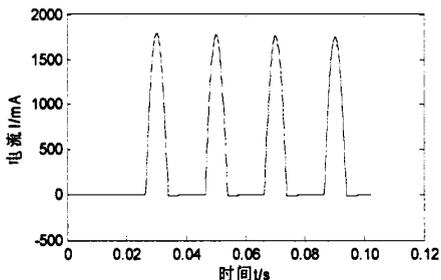
根据公式 (2.9) 和公式 (2.10) 可以求出励磁涌流间断角为:

$$\theta_j = \omega t_1 + (2\pi - \omega t_2) = 2 \arccos A = 2 \arccos \left(\cos \alpha + \frac{\psi_r - \psi_s}{\psi_m} \right) \quad (2.11)$$

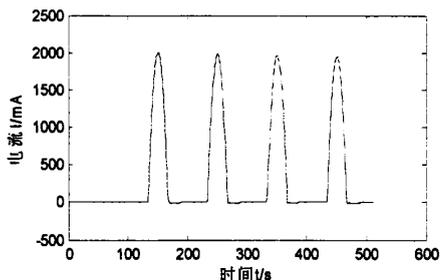
通过 MATLAB 建立单相变压器空载合闸仿真模型。观察励磁涌流波形及各种主要因素对励磁涌流的影响。



(a) $\alpha = 0^\circ$, $\psi_r / \psi_m = 0.6$, $\psi_s / \psi_m = 1.2$ (b) $\alpha = 30^\circ$, $\psi_r / \psi_m = 0.6$, $\psi_s / \psi_m = 1.2$



(c) $\alpha = 0^\circ$, $\psi_r / \psi_m = 0.9$, $\psi_s / \psi_m = 1.2$



(d) $\alpha = 0^\circ$, $\psi_r / \psi_m = 0.9$, $\psi_s / \psi_m = 1.3$

图2.3 单相变压器励磁涌流

Fig.2.3 Single-phase transformer inrush currents

由上图可知，合闸角 α 、剩磁 ψ_r 及饱和磁链 ψ_s 可以影响励磁涌流的峰值，也可以改变间断角的大小。当保证其他参数不变，只有以上三个参数发生改变的时候，我们可以发现这样一个现象，合闸角不变处于零时，励磁涌流出现最大峰值，这时候的间断角最小；而剩磁与间断角成反比例变化；饱和磁链与间断角成正比例改变。

励磁涌流的分析结果可以带给我们这样一些发现，变压器的励磁涌流有如

下几个方面的特点：

- a. 励磁涌流出现间断角，并且其波形偏于时间轴的一侧；饱和磁通减小或剩磁减小时，将减小励磁涌流的间断角。
- b. 励磁涌流为含有高次谐波分量和非周期分量的尖顶波，剩磁越大且饱和磁通值越高，则励磁涌流的峰值越高。
- c. 变压器空载投入时的电压初相角也会影响励磁涌流的幅值，合闸相角为 0° 时，励磁涌流的峰值为最大值；出现励磁涌流的地方还有三相变压器中，鉴于三相变压器特殊的结构，所以在三相电压中一定会存在一定角度的相位差，这种相位差会导致空投变压器时一定出现不同程度的励磁涌流，无论是在其中的两相之间还是三相之间。

2.2 变压器和应涌流的分析

在同一电网中，当其他变压器突然出现合闸的情况时，相邻连接的变压器可能会出现不同程度的涌流情况。但是这种和应涌流的发生也是有条件的，他一定会发生在励磁涌流之后，合闸后励磁涌流会持续一定的时间，这时合用涌流出现并且逐渐增大，达到最大值后再衰减，其波形偏向时间轴的另一侧。

本文以并联运行变压器为例，分析和应涌流的产生机理。如图 2.4 所示 T_1 、 T_2 为两台并联运行的变压器，当 T_1 已正常运行时， T_2 空载投入。若 T_2 中产生的励磁涌流较大，在 T_1 中将会出现与励磁涌流相对应的和应涌流。

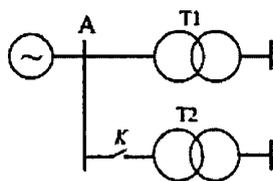


图 2.4 两台变压器并联的系统图
Fig.2.4 Two transformer parallel system

图 2.5 中 $U_s(t)$ 为系统电源电压； L_s 与 R_s 分别为系统侧的电感与电阻； $L_{11\sigma}$ 和 $R_{11\sigma}$ ， $L_{12\sigma}$ 和 $R_{12\sigma}$ ， L_{1m} 和 R_{1m} 分别是变压器 T_1 的一次绕组与二次绕组的漏电感和电阻，及励磁电感与励磁电阻； $L_{21\sigma}$ 和 $R_{21\sigma}$ ， $L_{22\sigma}$ 和 $R_{22\sigma}$ ， L_{2m} 和 R_{2m} 分别是变压器 T_2 的一次绕组与二次绕组的漏电感和电阻，及励磁电感与励磁电阻。变压

器 T_1 空载运行。

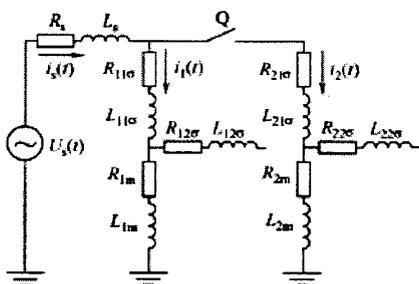


图 2.5 两台单相变压器并联的等效电路图
Fig.2.5 Equivalent circuit of two transformer parallel

图 2.5 为两台单相变压器并联的等效电路图，变压器 T_1 和空投变压器 T_2 的励磁电流分别为 $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$ 。令 $R_1 = R_{11\sigma} + R_{1m}$ ， $L_1 = L_{11\sigma} + L_{1m}$ ， $R_2 = R_{21\sigma} + R_{2m}$ ， $L_2 = L_{21\sigma} + L_{2m}$ ；设 $U_s(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha)$ 为系统电源电压，其中，电源电压幅值为 U_m ，合闸角为 α 。根据 KCL 定律和 KVL 定律有

$$\begin{cases} R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \\ R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \\ i_s = i_1 + i_2 \end{cases} \quad (2.12)$$

式中， ψ_1, ψ_2 —变压器 T_1 、 T_2 的磁链。

为了更加方便的进行研究分析，要将以上 (2.12) 方程组进行特定处理计算以得到变压器之间的磁链关系。具体我们要假定一个情况，当两台变压器所有的参数都一样的情况，用其励磁回路的平均电感作为 L_m ，并且令 $R_1 = R_2 = R$ ， $L_1 = L_2 = L$ ，利用线性微分方程组以及各种科学的数学方法将方程准确的解析出来，最后就可以得到一个新的关于变压器磁链关系的式子 (2.13) (2.14)：

$$\psi_1(t) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] e^{-\frac{R+2R_s}{L+2L_s} t} + \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] e^{-\frac{R}{L} t} \quad (2.13)$$

$$\psi_2(t) = \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] e^{-\frac{R+2R_s}{L+2L_s} t} + \frac{1}{2} [\psi_1(0) - \psi_2(0)] e^{-\frac{R}{L} t} \quad (2.14)$$

式中， $Z = \sqrt{(R+2R_s)^2 + (L+2L_s)^2}$ ， $\theta = \arctan \frac{\omega(L+2L_s)}{R+2R_s}$ ，变压器 T_1 的初始磁链

和变压器 T_2 的初始剩磁分别为 $\psi_1(0)$ 、 $\psi_2(0)$ 。分析两台变压器的偏磁衰减规律，可进一步准确地解释和应涌流的产生过程。按图 2.5 重新列写电压方程如下：

$$\frac{d\psi_1}{dt} = U_s - (R_s + R_1)i_1 - R_s i_2 \quad (2.15)$$

$$\frac{d\psi_2}{dt} = U_s - R_s i_1 - (R_s + R_2)i_2 \quad (2.16)$$

考虑电源电压 $U_s(t)$ 是对称的周期函数，即 $\int_{-T/2}^{+T/2} U_s \sin(\omega t + \alpha) dt = 0$ ，分别对 (2.15)、(2.16) 等式两边进行一个周期的积分，得到两台变压器在一个周期内的磁链增量分别为

$$\Delta\psi_1 = - \int_{-T/2}^{+T/2} (R_s + R_1)i_1(t) dt - \int_{-T/2}^{+T/2} R_s i_2(t) dt \quad (2.17)$$

$$\Delta\psi_2 = - \int_{-T/2}^{+T/2} R_s i_1(t) dt - \int_{-T/2}^{+T/2} (R_s + R_2)i_2(t) dt \quad (2.18)$$

我们可以在得出的图 (2.13) 和 (2.14) 磁链表达式中，以及如图 (2.17)、(2.18) 所表达出的衰减规律表达式中，对和应涌流进行定性的分析，发现它产生的过程机理。

通过对和应涌流的暂态分析，可以了解其特征主要有以下四点：

a. 相互作用的两个变压器和单个变压器相比具有使和应涌流衰减速度下降的特点，这时候我们所需要确定的就是要在起始合闸相同条件下才能进行的。

b. 当变压器处于空载合闸的状态下时，通过励磁涌流持续一段时间以后运行变压器的和应涌流才出现且逐渐增大，达到最大值后再逐渐减小。

c. 当运行变压器的和应涌流处于正向饱和状态时，相应的空投变压器的励磁涌流会处于反向的饱和状态。也就是说，和应涌流和励磁涌流相比较，最大的特点是，他们所运行的方向是相对的。

根据图 2.4 系统建立并联单相变压器仿真模型。系统仿真参数如下：

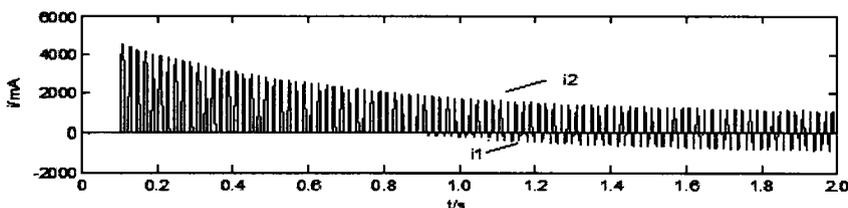
等效电源 220kV、50Hz，等效电阻 6Ω ，等效电抗 0.2Ω 。

变压器 T_1 、 T_2 参数设置相同，均为 450MVA、50Hz，一次绕组额定电压 220kV，二次绕组额定电压 500kV， $R_1=0.002\text{Pu}$ ， $L_1=0.08\text{Pu}$ ， $R_2=0.002\text{Pu}$ ， $L_2=0.08\text{Pu}$ ，

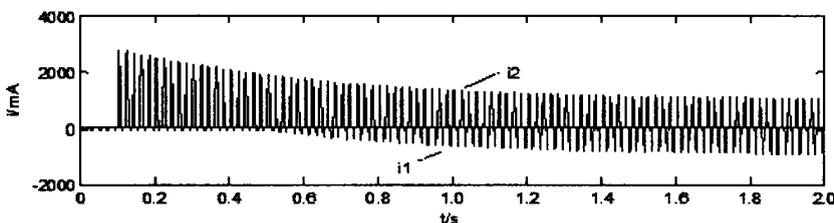
饱和特性是 $i_1=0, f_1=0; i_2=0, f_2=1.2; i_3=1.0, f_3=1.52$ 。

负载为 300MW、100Mvar、50Hz。

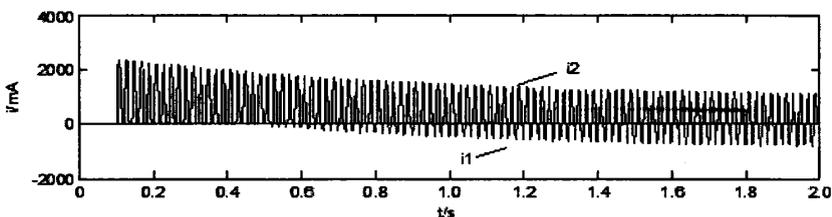
T_2 在 $t=0.5s$ 时刻空载合闸， T_2 产生励磁涌流与 T_1 产生和应涌流的波形。



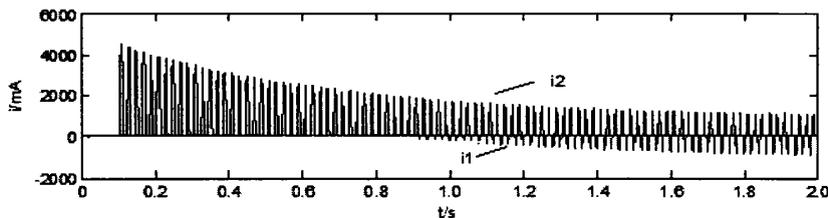
(a) $\alpha = 0^\circ, r_s = 1\Omega, \psi_r / \psi_m = 1.2$, 二次侧接负载



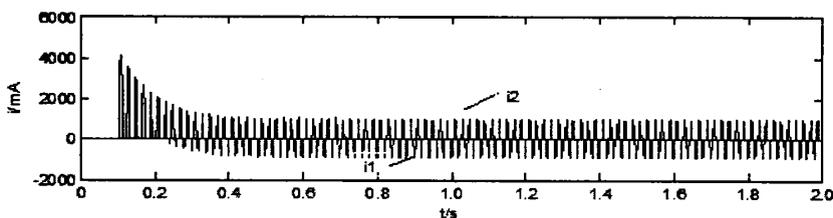
(b) $\alpha = 0^\circ, r_s = 1\Omega, \psi_r / \psi_m = 1.2$, 二次侧不接负载



(c) $\alpha = 0^\circ, r_s = 1\Omega, \psi_r / \psi_m = 0.6$, 二次侧不接负载



(d) $\alpha = 30^\circ, r_s = 1\Omega, \psi_r / \psi_m = 0.6$, 二次侧不接负载



(e) $\alpha = 0^\circ$, $r_s = 10\Omega$, $\psi_r / \psi_m = 0.6$, 二次侧不接负载

图2.6 单相变压器和应涌流

Fig.2.6 Single-phase transformer sympathetic currents

通过上述各种对和应涌流的分析，我们可以得出这样一种结果，合闸角、系统电阻等等对和应涌流的产生和衰减都是有很大的，就例如合闸角吧，当合闸角逐渐增大时，它的非周期磁通就会相应变小，流过 T_2 的励磁电流就会变小，直到和应涌流现象消失。而且会使得它所产生的波形与 T_1 逐渐趋于对称形式；而系统电阻对于和应涌流也是有巨大的影响的，并且系统的电阻值越大，就越容易产生该涌流，同时也可以使它的衰减能力变得越来越慢。这就是说，和应涌流的衰减和产生都离不开系统电阻值的影响；并不仅仅是合闸角和系统电阻对和应涌流有影响，对和应涌流有影响的还有 T_2 的初始剩磁，我们都知道变压器的剩磁和变压器的饱和状态成正比，也就是说， T_2 的初始剩磁在增大的同时，所带来的和应涌流到达最值的时间和幅度均会成比例增大；然而在变压器上第二次侧接负载的时候，就会发现变压器的压降会增大，两变压器之间连接的和应涌流能力就会加强，这种那个效果就相当于再次增加了一个侧电阻，相当于减缓了变压器达到饱和的速度。因为变压器的饱和速度和和应涌流的衰减速度成反比。所以相对和应涌流衰减的速度就会加快，一次，增加相应的侧电阻或者多次侧接负载，和应涌流的情况就会消失。

2.3 变压器恢复性涌流的分析

当变压器空载合闸时，故障电流并不从变压器内通过，导致电压升高产生励磁电流；当然还有另一种情况的发生，一旦故障电流通过了变压器，变压器同样会产生涌流，电压也同样会升高，唯一不同的就是故障电流通过变压器所产生的涌流为恢复性涌流。它的原理如下图 2.7, 2.8 所示。所以可知，区外故障切除扰动会影响故障电流的流动途径。

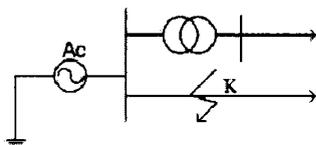


图 2.7 故障电流不流过变压器

Fig.2.7 Fault current doesn't flow through transformer

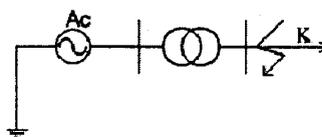


图 2.8 故障电流流过变压器

Fig.2.8 Fault current flow through transformer

如图 2.9 所示，假如忽略铁芯的损耗问题，我们可以从这个变压器的暂态模型电路图中发现，它的励磁支路是一个纯电感支路，并且可以得到在这个单项变压器中，各个电气量均是以瞬时值出现的事实。

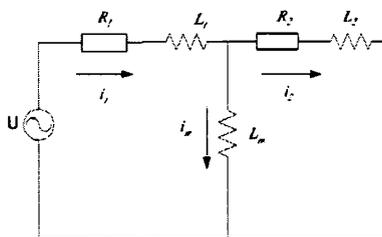


图 2.9 变压器暂态模型

Fig.2.9 Transformer transient model

根据基尔霍夫定律和回路方程，可以列出下式：

$$\begin{cases} u = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_m}{dt} \\ \frac{d\psi}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \\ \frac{d\psi}{dt} = u_m \\ i_1 = i_2 + i_m \end{cases} \quad (2.19)$$

式中： u_m 是变压器励磁支路电势； ψ 是变压器铁芯磁链； L_1 是变压器一次回路电感， R_1 是变压器一次回路电阻； L_2 是归算后的变压器二次回路的电感， R_2 是归算后的变压器二次回路的电阻。令电源电势为：

$$u(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \alpha) \quad (2.20)$$

忽略变压器励磁电流，则相应的负荷电流为：

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (2.21)$$

式中： $I = U / \sqrt{R^2 + X^2}$ ； $\varphi = \arctan(X/R)$ ；正常运行时的等效电抗和电阻分别是 $X = \omega L_1 + \omega L_2$ ； $R = R_1 + R_2$ 。

变压器正常运行时一次回路的电阻和电感相对二次回路很小，可忽略不计。此时可以近似认为励磁支路的电势 u_m 与电源电势 u 相等，则变压器的铁芯磁链通过 (2.20) 式得：

$$\psi(t) = \psi_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.22)$$

其中， $\psi_m = \sqrt{2}U / \omega$ 。

变压器区外在 $t = 0$ 时刻发生故障，变压器二次回路的电阻突变为 R_{2k} 、电感突变为 L_{2k} 。变压器区外发生故障后，其励磁电流变得很小，可以忽略，即 $i_m \approx 0$ 。

令 $m = \frac{|R_{2k} + jX_{2k}|}{|R_k + jX_k|}$ ，表示区外故障的严重程度，则故障电流为：

$$i_m = \sqrt{2}I_m \cos(\omega t + \alpha - \varphi_k) + \left[\sqrt{2}I \cos(\alpha - \varphi) - \sqrt{2}I_m \cos(\alpha - \varphi_k) \right] e^{-t/T_k} \quad (2.23)$$

其中， $R_k = R_1 + R_{2k}$ ， $X_k = X_1 + X_{2k} = \omega(L_1 + L_{2k}) = \omega L_k$ 。

不计衰减，则：

$$u_m(t) \approx mu = \sqrt{2}mU \cos(\omega t + \alpha) \quad (2.24)$$

变压器在发生故障时，其铁芯磁链不会突变，则根据 (2.20) 式和 $\Psi(0^-) = \Psi(0^+)$ 得变压器的铁芯磁链：

$$\psi(t) \approx m\psi_m \sin(\omega t + \alpha) + (1 + m)\psi_m \sin(\alpha) \quad (2.25)$$

一般，故障存在变压器外非常短暂，在几个工作周期可以被排除，所以，因故障出现的 ψ 影响可以忽略不计。

在 $t = \tau$ 时刻故障切除，变压器二次回路的电阻突变为 R_2 、电感突变为 L_2 。此时，励磁电感 L_m 是变化的。区外故障切除后的电压恢复过程，变压器一次回路的电感和电阻相对二次回路很小，同样可忽略。此时又可以近似认为励磁支路的电势 u_m 与电源电势 u 相等。这样根据 (2.19) 式和 $\Psi(\tau^-) = \Psi(\tau^+)$ 得变压器的铁芯磁链：

$$\psi_T = \psi_m \sin(\omega t + \alpha) + \psi_{1p} \quad t > \tau \quad (2.26)$$

式中： $\psi_{1p} = (1+m)\psi_m(\sin(\alpha) - \sin(\omega t + \alpha))$ ，称之为变压器的偏磁。

恢复性涌流出现正是由于偏磁 ψ_{1p} 的存在。在区外故障发生前后变压器磁通的变化情况如下图 2.10 所示。图中变压器的饱和磁通为 $\psi_{1.sat}$ 。在系统正常运行和区外故障期间 $\psi < \psi_{1.sat}$ ，变压器铁芯不饱和，励磁电感无穷大，电流等于零；故障切除后，如果 $\psi > \psi_{1.sat}$ ，变压器铁芯饱和，励磁电感迅速减小，从而产生了恢复性涌流。

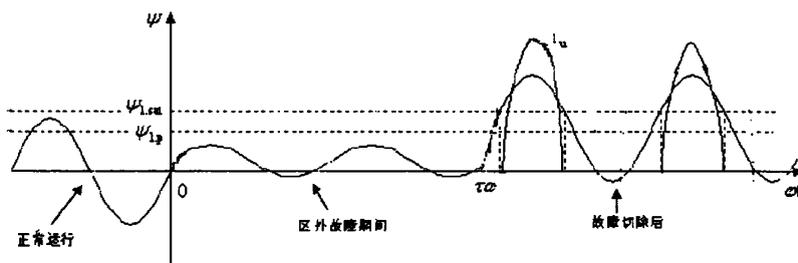
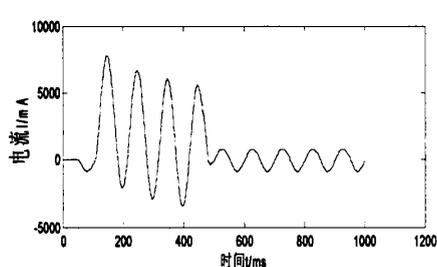


图 2.10 无损变压器在区外故障发生前后的磁通与恢复性涌流

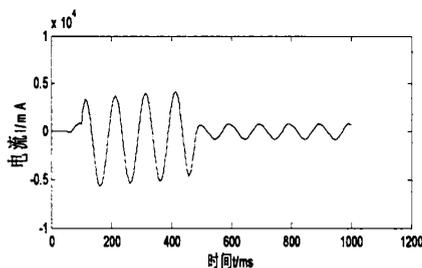
Fig.2.10 The flux and restorative inrush current of nondestructive transformer external faults

根据图 2.7 系统建立三相变压器恢复性涌流仿真模型。系统仿真参数如下：
负载为 3000MW、100Mvar、50Hz，仿真时间为 0.5s。

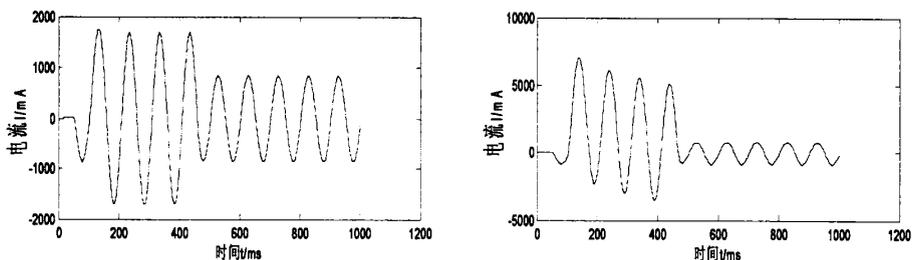
为了便于观察恢复性涌流波形，建立三相变压器外部故障切除的仿真模型。设定 $t=0.05s$ 时外部故障切除，且考虑负荷电流的影响。这里只给出 A 相的仿真波形。



(a) $\alpha = 0^\circ$ 三相接地故障



(b) $\alpha = 90^\circ$ 三相接地故障



(c) $\alpha = 0^\circ$ 单相接地故障

(d) $\alpha = 0^\circ$ AB 相间故障

图2.11 变压器A相的恢复性涌流

Fig.2.11 transformer recovery currents of A phase

通过以上的分析可知，在故障切除前的 0.05s 内，变压器中电流为故障电流，故障切除后，恢复性涌流出现。同时，还可以观察到电压初相角 α 及故障类型对恢复性涌流有一定影响。

在变压器出现问题时，其电势相角 α 和恢复性涌流呈正相关。故障越严重，变压器励磁电势在切除故障时恢复的幅度就越大，从而恢复性涌流就大；反之，就小。同时，由于在电路支路中存在负荷，所以在变压器故障出现时的内部电流涌流的波动有不规则现象，这就在影响电路保护的安全性。

2.4 本章小结

通过本章建立变压器出现故障时的仿真模型，收集其在故障中出现的一系列数据，进行对比分析，利用数学模型加以模拟，最终得出了故障时其内部变量之间的关系和相应的理论依据。

(1) 在变压器并入电路时，记录励磁涌流数据通，把数据带入仿真模型可以看出，变压器空载合闸时励磁涌流的特征及其影响因素。

(2) 以两台单相变压器并联运行为例，可以看出其内部的涌流是由于在变压器工作的瞬间出现励磁电流流经整个系统的电阻，使得系统电路的电压偏移，这就解释了应涌流为什么会出现在其相应的特点。初步分析了电压初始相角、系统电阻、空投变压器不同剩磁对和应涌流的影响。

(3) 在等效电路的基础上，从磁链变化的角度出发，对变压器外部故障切除的暂态过程进行了详细的理论分析。变压器外部故障切除后的铁芯磁链包含两个直流衰减分量，正是这两个直流衰减分量与稳态量的共同作用使得变压器

铁芯在外部故障切除后出现饱和，导致恢复性涌流的产生。

3 小波分析理论

3.1 小波分析的基本概念

以往，傅里叶变换作为传统的数学分析方法存在着他的局限性，傅里叶变换只能从频变量方面分析，而在时变量方面因为他的局限性限制了他的分析，正由于这种局限，短时傅里叶是在此基础上发展起来的，它以固定大小的窗函数使其在时域上有了一定的定位能力。频率窗和时间窗大小和形状都可改变的时-频局部化分析方法小波变换，非常适合对非平稳时间信号进行分析处理，解决了在高频无法得到适用时间分辨率和在低频无法得到适用频率分辨率的难题。通过小波函数的平移和伸缩，对于短时傅立叶变换缺乏离散正交基和窗口大小不随频率变化的缺点也能克服。在近几年来，小波分析在数学问题上的重大突破，解决了傅里叶变换的许多问题，因为他的广泛性，优越性得到越来越多方面的应用，在电力，计算机，通信等领域得到广泛应用。因此，小波分析具有广泛的应用前景和巨大的潜力^[46]。

3.1.1 小波变换理论的提出

小波函数的定义为：设 $\psi(t) \in L(R)$ ，若 $\psi(t) \in L^2(R)$ ，即 $\psi(t)$ 是平方可积函数，若其傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足条件：

$$C_\psi = \int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} < \infty \quad (3.1)$$

称式 (3.1) 为小波函数的可容许条件， $\psi(t)$ 为小波母函数或基本小波^[46]。

我们可以从中得知，小波就是一种长度有限的特殊的波形，他会持续的处于衰减的状态，其特点之一直流分量为零，即存在正负交替的“波动性”；特点二是“小”，即在时域具有紧支集。

将小波函数 $\psi(t)$ 进行平移或伸缩，可得函数 $\psi_{a,b}(t)$ ：

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left[\frac{t-b}{a} \right] \quad a > 0, b \in R \quad (3.2)$$

式中： a 为伸缩因子，代表时间的伸缩和扩展； b 不为平移因子，反映时间上的位移； $\psi_{a,b}(t)$ 为依赖于参数 a, b 的小波基函数。

傅里叶变换是使用光滑的正弦函数，存在缺点。而小波分析是把一段信号整合处理，分解成一个个小的波形信号，小波信号数字化成为小波函数，小波函数由母小波函数 $\psi(t)$ 在 x, y 坐标系中平移伸缩得来，用不规则的小波函数逼近电力系统故障时的暂态瞬变信号，这弥补了傅里叶变换的缺点，逼近了信号的局部特性。

3.1.2 连续小波变换

任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基下进行展开，称这种展开为函数 $f(t)$ 的连续小波变换，其表达式为：

$$(W_\psi f)(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi \left(\frac{t-b}{a} \right)} dt \quad (3.3)$$

连续小波变换是由母小波经过尺度伸缩，以及任意移动后的一系列小波簇， $a > 0$ 是代表时间的压缩或扩展的尺度因子，它起到伸缩变换母小波作用，并且 a 越大 $\psi(t/a)$ 越宽。由于母小波 $\psi(t)$ 是振荡函数，那么缩短表示频率升高，反之伸长表示频率降低，依靠这种尺度的伸缩，小波变换对不同频率信号的检测得以实现；能量标准化因子 $1/\sqrt{a}$ ，是保证母小波能量与不同 a 值下 $\psi_{a,b}(t)$ 的能量相同；其值可正可负且反应时间上的位移的 b ，可在保持小波函数形状不变的情况下只在时间轴作平行移动，依靠函数的平移，小波变换对不同时刻信号的局部分析得以实现。

无论什么变换在存在逆变换时，才具有实际意义。若采用的小波满足可容许条件公式(3.1)，则连续小波变换的逆变换存在，其逆变换公式：

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (W_\psi f)(a,b) \left[\frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \right] db \right\} \frac{da}{a^2} \quad (3.4)$$

3.1.3 离散小波变换

连续小波在计算机上实现实际应用中，必须进行离散化，这一离散化过程称为离散小波变换（DWT）。

连续小波变换中平移参数 τ 和尺度参数 a 的离散化公式一般分别取作 $b = ka_0^j b_0$, $a = a_0^j$, 其中扩展步长 $a_0 \neq 1$ 是固定值并假定 $a_0 > 1$, 且 $j \in Z$ 。离散小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 即可表达为:

$$\psi_{j,k}(t) = |a_0|^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j}t - kb_0) \quad (3.5)$$

任意函数 $f(t)$ 的离散小波变换为:

$$(W_\psi f)(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a_0|^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi(a_0^{-j}t - kb_0)} dt \quad (3.6)$$

其重构公式为:

$$f(t) = \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3.7)$$

其中, C 是与信号无关的常数。

3.2 多分辨率分析

1988年 S.Mallat 在构造正交小波基时提出了一个建立在函数空间概念上的理论, 即多分辨率分析 (Multi-Resolution Analysis) 或多尺度分析的概念。多分辨率分析主要思想是将 $L^2(\mathbb{R})$ 按分辨率 $\{2^{-j}\}$ 分解为一串嵌套子空间序列 $\{V_j\}$, 再将 $L^2(\mathbb{R})$ 经由正交补的塔式分解成一串正交子空间序列 $\{W_j\}$ 。若每一近似函数都是 $f(t)$ 在不同分辨率子空间上的投影, 则 $L^2(\mathbb{R})$ 中的函数 $f(t)$ 表示成一序列近似函数的逼近, $f(t)$ 在不同子空间的特征和形态的分析和研究可通过这些投影来实现。

对于空间 $L^2(\mathbb{R})$ 中的多分辨率分析是指 $L^2(\mathbb{R})$ 中满足以下条件的一个空间序列 $\{V_j\}_{j \in Z}$:

a. 逼近性: $\bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}$, $\overline{\bigcup_{j \in Z} V_j} = L^2(\mathbb{R})$;

b. 平移不变性: $f(x) \in V_0 \Leftrightarrow f(x-k) \in V_0 \Leftrightarrow f(2^{-j}x-k) \in V_j$;

- c. 正交基存在性: 存在 $\varphi \in V_0$, 使得 $\{\varphi(x-k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 是 V_0 的标准正交基;
- d. 单调性: $V_j \subset V_{j+1}, j \in \mathbb{Z}$;
- e. 伸缩性: $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1}, j \in \mathbb{Z}$ 。

则该组嵌套的子空间 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 构成 $L^2(\mathbb{R})$ 的多分辨率分析。 W_j 为 V_j 在 V_{j+1} 中的正交补空间, 即 $V_{j+1} = W_j + V_j$ 是小波空间, 对应的小波函数是 $\psi_j(x)$ 。由上述条件知, 尺度函数 $\phi(x)$ 可平移和伸缩生成嵌套子空间 V_j , 与小波函数 $\psi(x)$ 的平移和伸缩生成序列空间 W_j 相同。即:

$$V_j = \text{span}\{\phi_{j,k}(x)\} \quad k \in \mathbb{Z} \quad (3.8)$$

其中称 $\phi_{j,k}(x)$ 为尺度函数, 且 $\phi_{j,k}(x) = 2^{-j} \phi(2^{-j}x - k)$, V_j 是尺度空间。通过研究多分辨率分析可得到, 其余项部分可在 W_j 上给出, 且 $f(x)$ 可在 V_j 上无穷逼近, 通过多分辨率分析可实现当 j 减小时, V_j 上能量将向 W_j 上转移的过程。对于任意函数 $f(t)$ 存在 $f(t) \in V_0$, 即将该函数分解为大尺度逼近部分 V_j 和细节部分 W_j , 再将大尺度逼近部分 V_j 进一步分解。经过如此重复就可得到任意尺度上的逼近部分和细节部分。函数 $f(t)$ 向尺度空间 V_j 和小波空间 W_j 投影后得 j 尺度下的概貌信号 $f_s^j(t)$ 和细节信号 $f_d^j(t)$, 即:

$$\begin{cases} f_s^j(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{j,k} \phi_k(2^{-j}t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{j,k} \phi_k(t) \\ f_d^j(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} \psi_k(2^{-j}t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} \psi_k(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

其中

$$\begin{cases} c_{j,k} = \langle f(t), \phi_k(t) \rangle \\ d_{j,k} = \langle f(t), \psi_k(t) \rangle \end{cases} \quad (3.10)$$

分别为尺度展开系数和小波展开系数。

3.3 小波包分析

小波变换作为小波包的基础, 虽然可以较高分辨率的进行分析, 但小波包从小波变换发展而来, 带来的优势是有更高的分辨率。多分辨率分析虽然在进行分析是效率比较高, 但是编码编制为 0、1 二进制编码, 所以其缺点是在频率较高或较低时时分辨率不够精确。而本章的分析理论未得到更加精准的分析提

供了理论依据和方法，在对信号进行细致的，多层次的分解，高、中、低频段都能得到更加精确的分析分辨率。

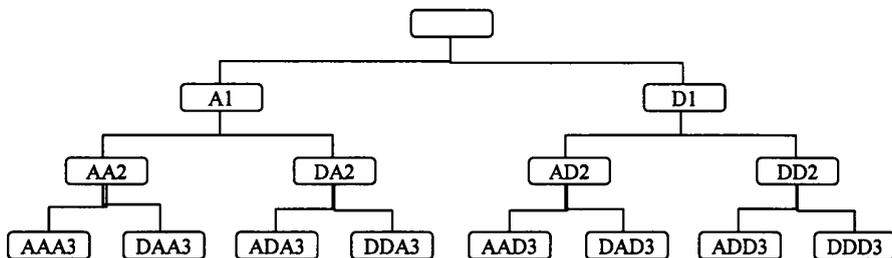


图 3.1 三层小波包分解树
Fig 3.1 Three-layer tree of wavelet packet decomposition

图 3.1 是三层小波包分解树，A 表示低频，D 表示高频，末尾的序号数表示小波包分解的层数（即尺度）。分解的关系式为：

$$S=AAA3+DAA3+ADA3+DDA3+AAD3+DAD3+ADD3+DDD3$$

3.3.1 小波包基本原理

(1) 小波包定义^[50]

正交小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 已给定，其二尺度关系为：

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k \phi(2t - k) \tag{3.11}$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \phi(2t - k) \tag{3.12}$$

式中 h_k ， g_k 是多分辨率分析中的滤波系数。

为了进一步推广二尺度方程，定义下列递推关系：

$$u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_k u_n(2t - k) \tag{3.13}$$

$$u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k w_n(2t - k) \tag{3.14}$$

式中 h_k ， g_k 仍是公式 (3.11)、(3.12) 的滤波系数。当 $n=0$ 时， $u_0(t) = \phi(t)$ ， $u_1(t) = \psi(t)$ 。并定义函数集合 $\{u_n(t)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ 为由基函数 $u_0(t) = \phi(t)$ 所确定的正交小波包。

(2) 小波包分解与重构算法

设 $g_j^n \in U_j^N$ ，则 g_j^n 可表示为：

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j,n} u_n(2^j t - l) \quad (3.15)$$

小波包分解算法：由 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 求 $\{d_l^{j,2n}\}$ 与 $\{d_l^{j,2n+1}\}$

$$\begin{aligned} d_l^{j,2n} &= \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n} \\ d_l^{j,2n+1} &= \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1,n} \end{aligned} \quad (3.16)$$

小波包重构算法：由 $\{d_l^{j,2n}\}$ 与 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j+1,n}\}$

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k (h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}) \quad (3.17)$$

3.3.2 小波包能量

$$E_i = \sum_{k=1}^n |x_i(k)|^2 \quad (3.18)$$

(3.18) 表示第 i 个频带能量总量，利用分解一段信号的任意频带，选取这些分解频带上能量的统计量作为小波能量的特征向量。向量的平方加和作为分析的标志，(3.18) 式中： n 为信号总采样点数； $x_i(k)$ 为原始信号经小波包变换第 i 个频带上的重构信号。

若信号进行了 j 层小波包分解，以能量为元素可以构造一个特征向量 T 如下：

$$T = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_{j^2}] \quad (3.19)$$

而小波包变换后第 i 个频带的细节能量可表示为：

$$E_i(k) = |x_i(k)|^2 \quad (3.20)$$

称式 (3.20) 为小波包能量时谱^[51]。

3.4 小波函数与分解尺度的选取

3.4.1 小波函数的选取

小波函数选择的不同，对信号分解后的效果也不相同。因此，小波函数的选择是否准确，是十分关键的一步，在选择小波函数时着重考虑以下特征：

a. 紧支性，理想小波具有紧支集，所谓一个函数的紧支性集就是只在有限

的区间不为 0；

b. 对称性，如小波函数和尺度函数对称，滤波器会产生线性相位；反之，如果小波函数不具有对称性，会发生线性相位扭曲。

c. 正交性，保证小波变换之间不存在关联，即频率不混叠，减少重构信息的冗余度；

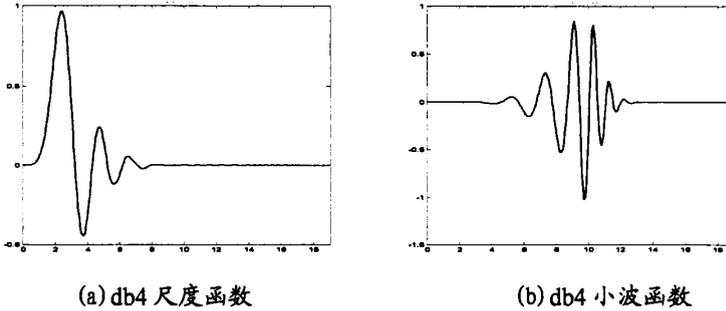
d. 消失矩，小波应具有尽可能高的消失矩。当小波具有 N 阶消失矩时，次数小于 N 的多项式信号会被抑制，更有利于突出信号的高阶导数中和高阶起伏可能存在的奇异点；

e. 正则性，即小波函数必须足够光滑，如果小波在频域上 $\psi(\omega)$ 表现出局部化能力越强；则代表正则性越好。

著名的小波研究学家 Inrid Daubechies 研究出了小波函数，所以由他的名字缩写 db 命名函数，db 由于其正交性，其阶数用大写 N 表示，所以这个函数可以写作 dbN ，阶数就是函数的消失矩， $2N-1$ 为小波函数和尺度函数的支撑长度。除 $N=1$ 外， dbN 不具有对称性（即非线性相位）。一个函数通常具有独立阶数的支集长度与其消失矩，因此 dbN 没有统一的表达式。但正交小波的支撑集长度与消失矩关系十分密切。若小波消失矩给定为 k 阶，则 Daubechies 小波有最小的支集，其支撑集长度至少为 $2k-1$ ，因此 Daubechies 小波从这一意义来说是最优的。在选择正交小波时，还要考虑消失矩和支集长度之间的关系，要在两者阶数之间折衷。

根据励磁涌流的特点，本文选择 $db4$ 小波函数对变压器励磁涌流和内部故障电流进行识别。

$db4$ 是有效支撑长度为 7，尺度函数以及消失矩为 4 的小波函数，由于其时频局域化程度较好，且高低通滤波器系数较短，因此，很适合应用于实时计算； $db4$ 小波的非对称性十分明显，小波函数不具有对称性。本文所要研究的故障电流波形类似于标准正弦波，前后半波基本对称；而变压器励磁涌流波形有间断角存在，畸变严重，前后半波也不对称。



(a) db4 尺度函数 (b) db4 小波函数
图 3.2 db4 小波的尺度函数与小波函数

Fig.3.2 Scaling function and wavelet function of db4 wavelet

3.4.2 分解尺度的确定

从上一章的分析可知，励磁涌流的谐波含量较高，而采用传统的二次谐波制动原理识别涌流的方法存在误动或拒动的现象。本文选取分解尺度为 4，信号采样频率为 2500Hz，小波包分解的信号的有效频率范围是 0-1250Hz。小波包的频带划分和频率没有直接关系，但小波包的交错频带是有规律可循的，即在每个节点，如果分解其高频子带，就要产生频带交错，而低频中的交错要带入下一级高层进一步产生^[49]。在研究涌流和故障电流经小波包分解后某一层能量分布时，需要具体分析各节点对应的实际频带范围，才能得到正确的分析结果。各个节点所对应的实际频带范围如图 3.3 所示。

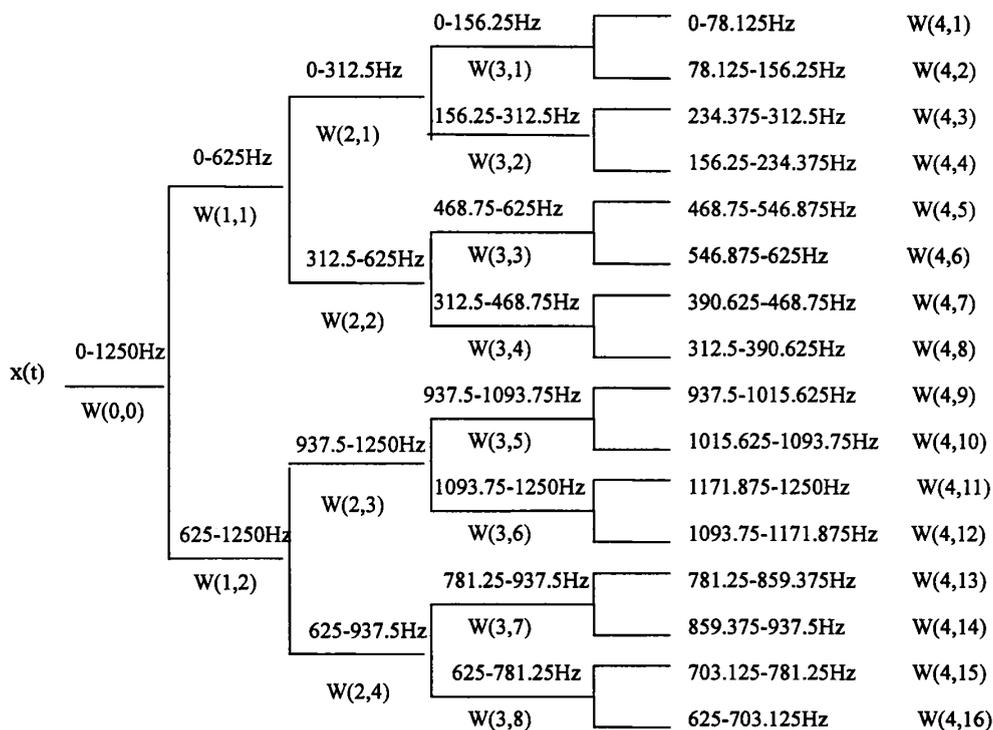
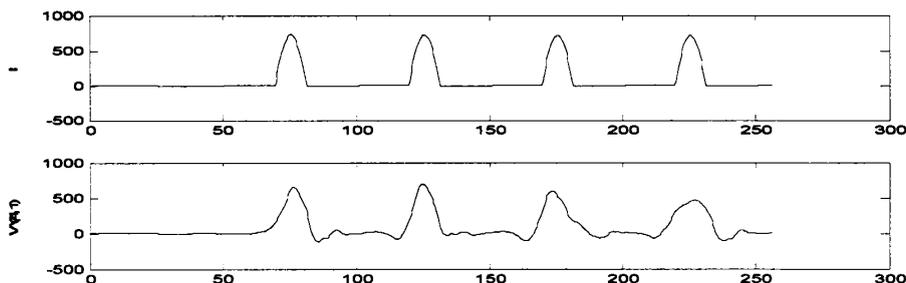


图 3.3 小波包分解及频带分布

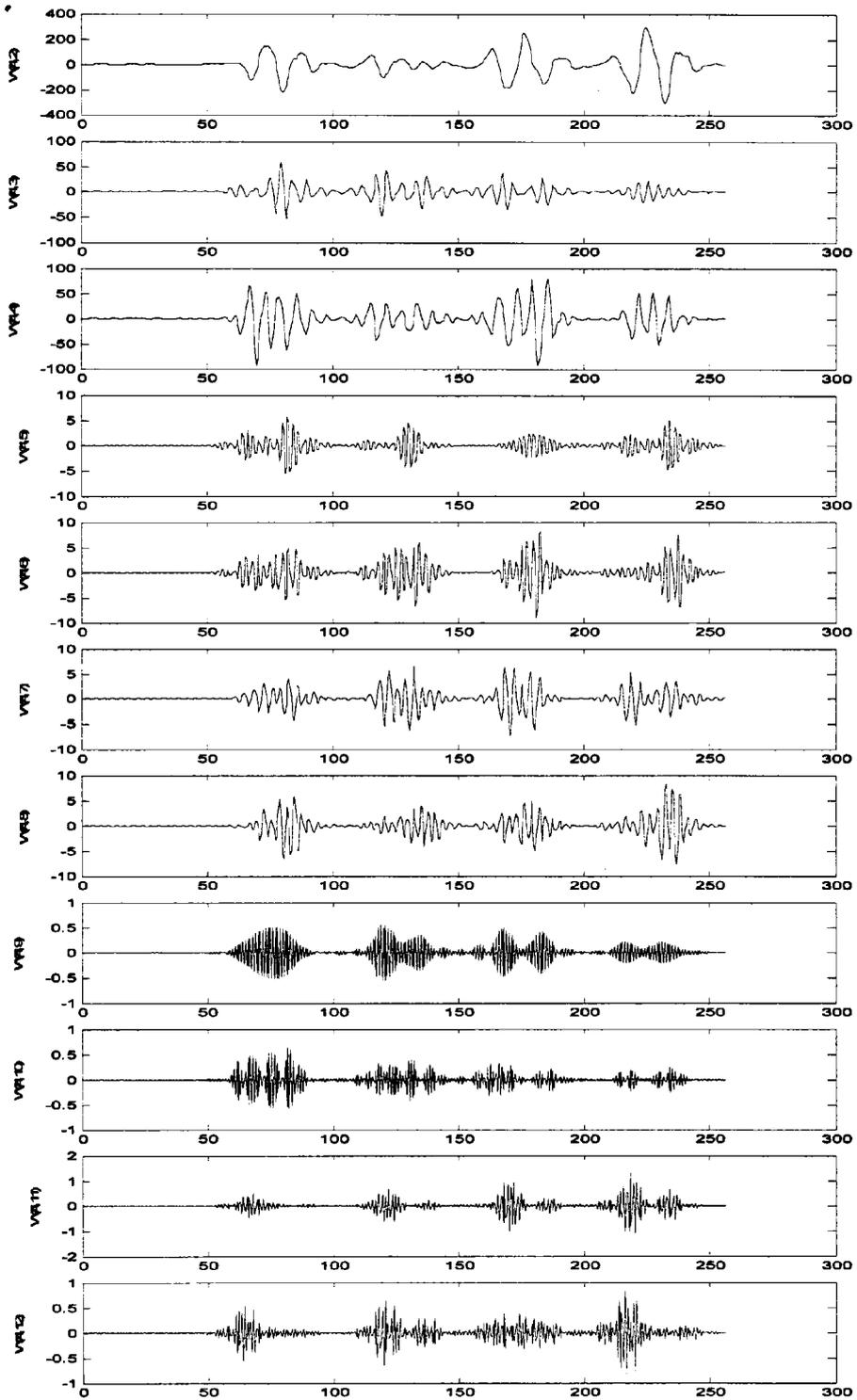
Fig.3.3 Wavelet packet decomposition and frequency distribution

利用 SpS 集成工具箱，输入和第二章相同的参数，建立数学模型，导出图标，更加直观的分析 db4 小波对励磁涌流和故障电流波形的影响。

当 $\alpha = 0^\circ, \psi_s / \psi_m = 0.6, \psi_r / \psi_m = 1.2$ 时，变压器在 $t = 0.02$ s 空载合闸，用小波包将单相变压器励磁涌流进行 4 层分解，共得到 16 组小波包系数如图 3.4 所示。



小波分析理论



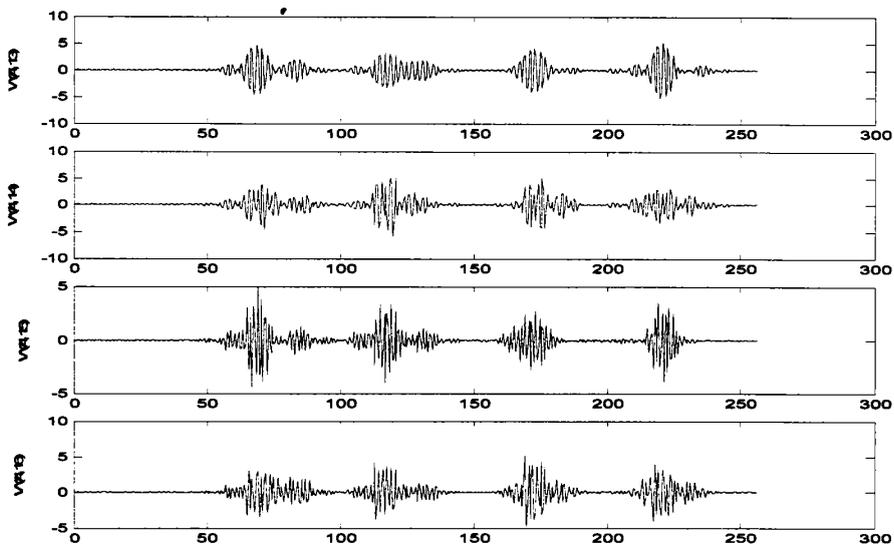
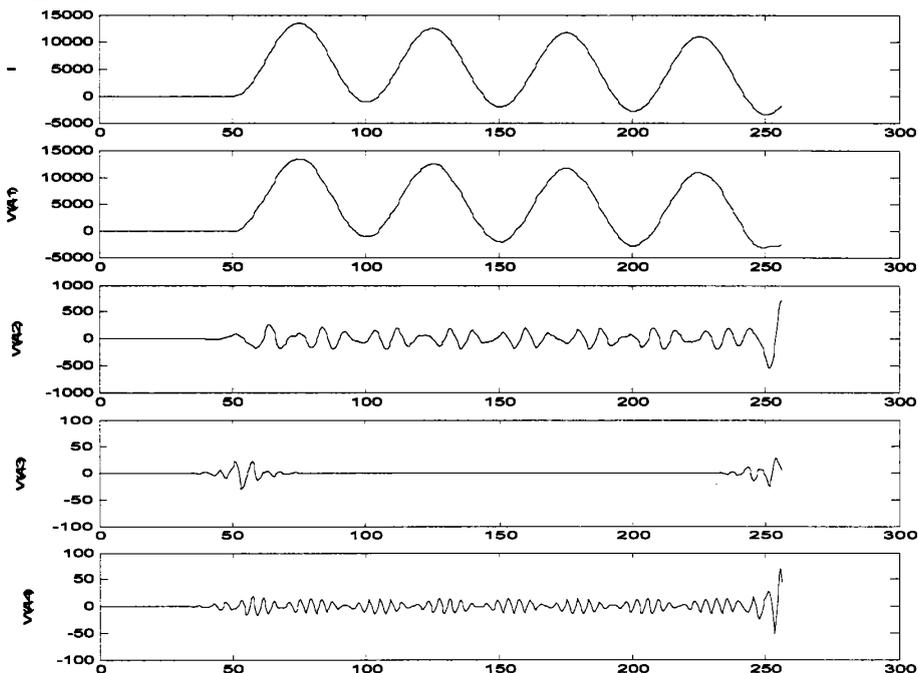
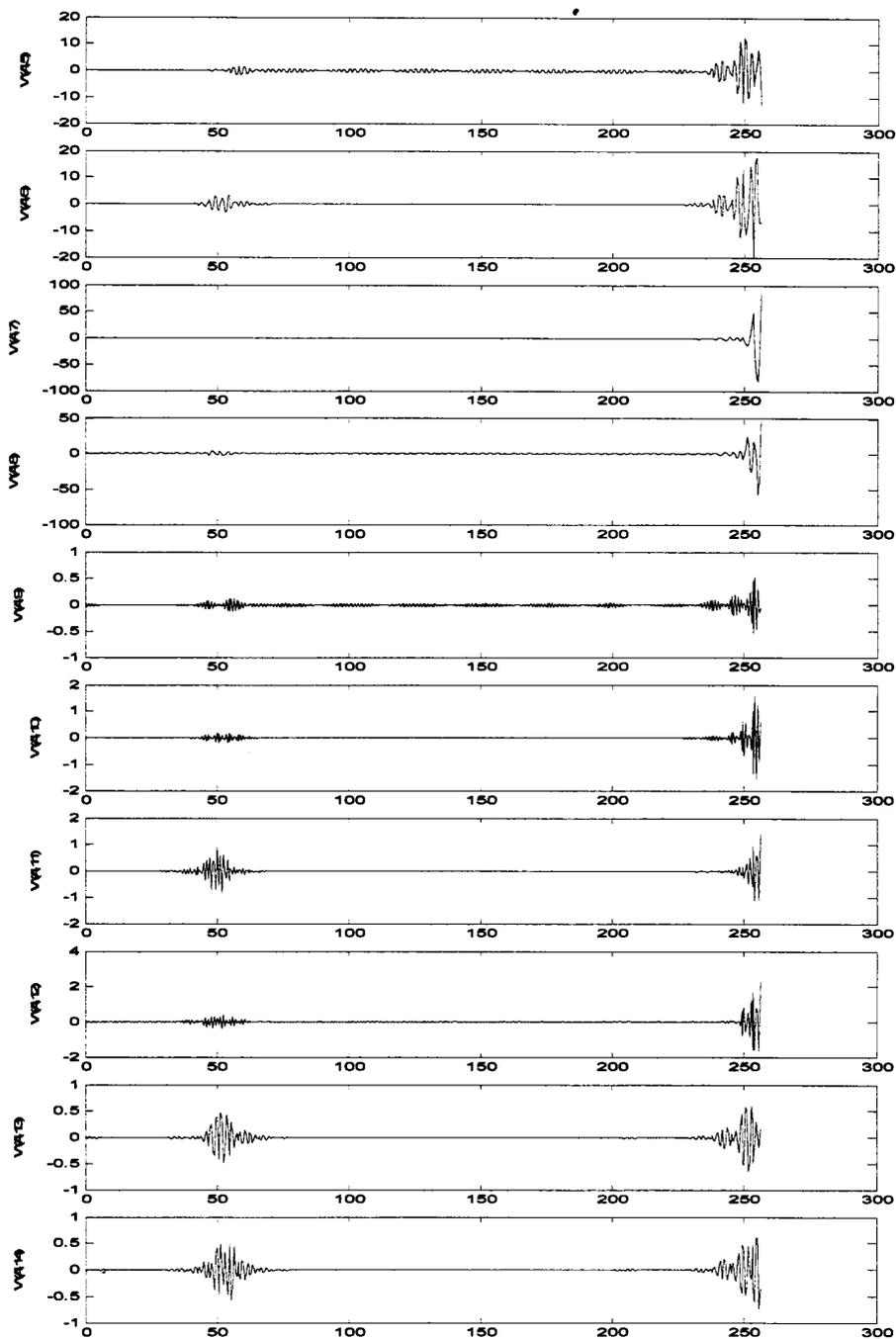


图 3.4 励磁涌流及小波包变换结果

Fig3.4 The result of magnetizing inrush currents with wavelet packet transform

单相变压器在 $t = 0.02$ s, 电压初相角 $\alpha = 30^\circ$ 时发生接地故障, 故障电流及小波包变换结果如图 3.5 所示。





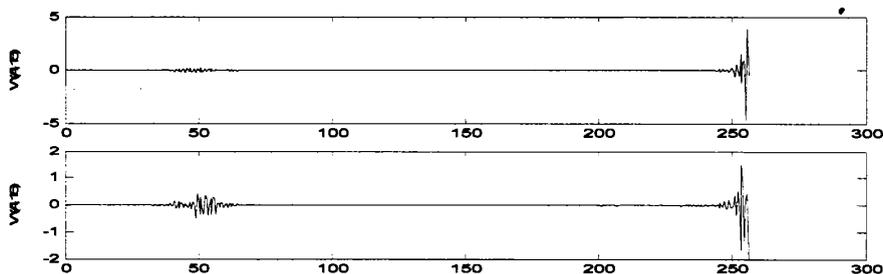


图 3.5 故障电流及小波包变换结果

Fig3.5 The result of fault currents with wavelet packet transform

通过对单相变压器励磁涌流和故障电流的仿真分析,从图 3.4 可以看出,变压器励磁涌流有明显的畸变特征且波形畸变程度较大,在某一时刻的畸变点处出现较大的小波包系数,说明此处的谐波含量较高;从图 3.5 中可知,故障电流突变后基本呈正弦波形,小波包变换后在故障发生时刻的小波包系数较大,其它时刻小波包系数都很小,说明故障电流只在故障发生时刻的谐波含量较高,故障发生后谐波含量会迅速减小。

把上面得到的实验数据用 (3.18)、(3.19) 两式计算, 就可以看出,励磁涌流与故障电流信号能量的分布情况。

3.5 本章小结

本章介绍了小波分析的基本理论。包括小波的定义,连续小波变换、离散小波变换的定义和性质,以及多分辨率分析的相关内容。还介绍了小波包的基本原理,包括小波包的定义、小波包分解和重构算法及小波包能量相关概念。通过研究分析确定了本文所采用的小波函数为 db4 小波,分解尺度 $j=4$,采样频率为 2500Hz,并给出了四层小波包分解的频率分布情况。同时,利用 MATLAB 仿真软件,建立了单相变压器空载合闸与接地故障时的仿真模型,进行了四层小波包变换,简述了励磁涌流与故障电流变换后的小波包系数差异。为接下来提出的涌流识别方法提供理论依据。

4 应用小波包分析识别变压器涌流

变压器保护准确动作的关键是正确识别励磁涌流和内部故障电流。而现阶段，在电力系统实际运行中，二次谐波制动原理和间断角原理应用虽然十分广泛，但是，本文在第一章已经系统阐述了这两种识别方法对于某些特定的条件无法正确识别涌流。因此，研究励磁涌流和内部故障电流新的、能够更好的进行识别，其意义重大。

在建立模型方面，通常利用 MATLAB 语言进行建模，这种语言集成性高，在电力领域专业性强。这种语言包含很多集成工具箱，大大简化了建模的困难，利用函数集成，语言集成的特点，建立二维三维数据模型，强大的图像处理能力使得人们可以更直观的分析数据。SimPowerSystems 库简称 SPS 是在电力通信方面建模的库，是 MATLAB 的主要工具箱。

研究故障电流和励磁涌流被小波包提取后的能量特点，从而能够对这两种电流进行更好的识别。通过利用 MATLAB 的 SpS 工具箱，建立电流的仿真模型，利用本章的方法全面的分析，得出结果。

4.1 建立电力系统仿真模型

图 4.1 表示电压为 500kV 的三相变压器电路连接图

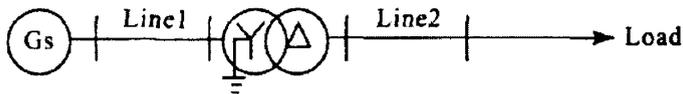


图 4.1 电力系统模型

Fig4.1 Simulated power system model

系统等效电源的参数：额定电压 500kV，频率 50Hz，系统内阻 $R_S=0.65\Omega$ ， $L_S=6.65mH$ 。

变压器为三相双绕组，采用 Y_n/Δ 接线的带饱和特性的降压变压器。其参数设定：容量为 450MVA。一次绕组额定电压 500kV，二次绕组额定电压 220kV， $R_1=0.002Pu$ ， $L_1=0.08Pu$ ， $R_2=0.002Pu$ ， $L_2=0.08Pu$ ，饱和特性是 $i_1=0$ ， $f_1=0$ ； $i_2=0$ ， $f_2=1.2$ ； $i_3=1.0$ ， $f_3=1.52$ 。

输电线路: $L=100\text{km}$, $R_1=0.10273\Omega/\text{km}$, $R_2=0.4864\Omega/\text{km}$, $L_1=0.9337\text{mH}/\text{km}$,
 $L_2=4.0264\text{mH}/\text{km}$, $C_1=12.34\mu\text{F}/\text{km}$, $C_2=6.751\mu\text{F}/\text{km}$ 。

图 4.2 为三相变压器的系统仿真图。

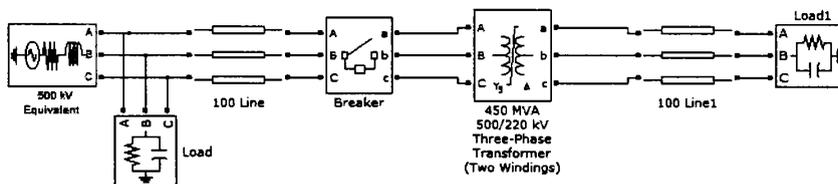


图 4.2 变压器正常运行的仿真模型

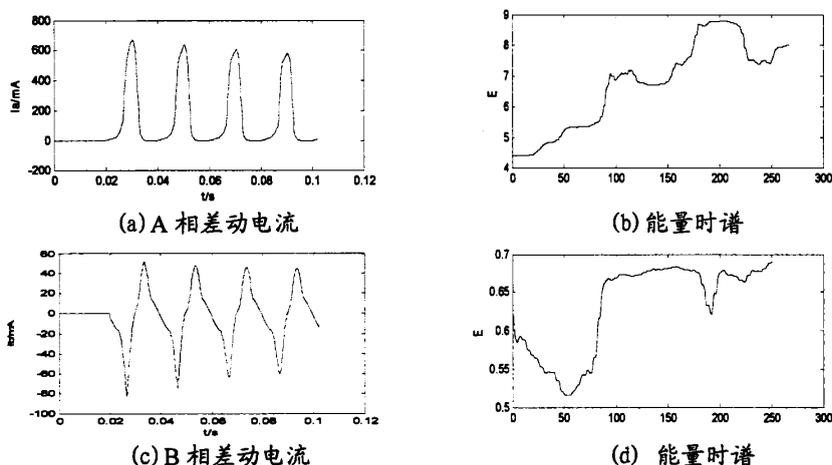
Fig.4.2 The simulation model of transformer normal operation

4.2 基于小波包的变压器励磁涌流识别研究

第三章中提到，将一个样本为 2500 赫兹，震荡最长周期正弦分量为 50 赫兹，一个信号通过小波可以截断成多段信号。通过选择频带 $W(4,3)$ 进行研究，进一步的分析励磁涌流和设备并入电网出现故障时 5 次谐波的能量 E 的分布。

4.2.1 仿真结果分析

(1)变压器空载合闸，参数设定同 4.1 节的系统设置。当变压器初相角 $\alpha = 0^\circ$ ，且三相剩磁 $B_r = (0,0,0)$ 时， $t = 0.02\text{ s}$ 时断路器闭合，此时流过变压器的三相差动电流及其对应的能量时谱如图 4.3。



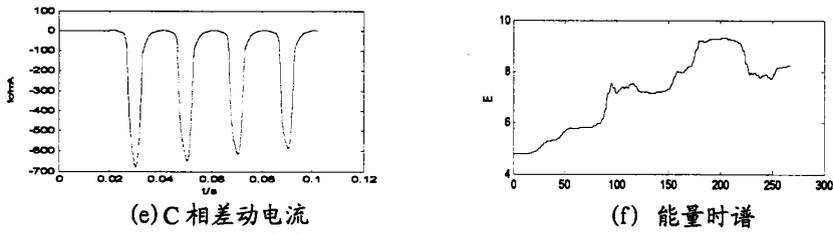


图 4.3 空载合闸时的励磁涌流及其能量时谱

Fig.4.3 Inrush currents and energy time spectrum of unloaded transformer switching on

(2) 变压器低压侧发生 9%匝间故障，参数设定同 4.1 节的系统设置。当变压器初相角 $\alpha = 0^\circ$ ，且故障电阻 $R_f = 0.001\Omega$ 时， $t = 0.02\text{ s}$ 故障发生，此时流过变压器的三相差动电流及其对应的能量时谱如图 4.4。

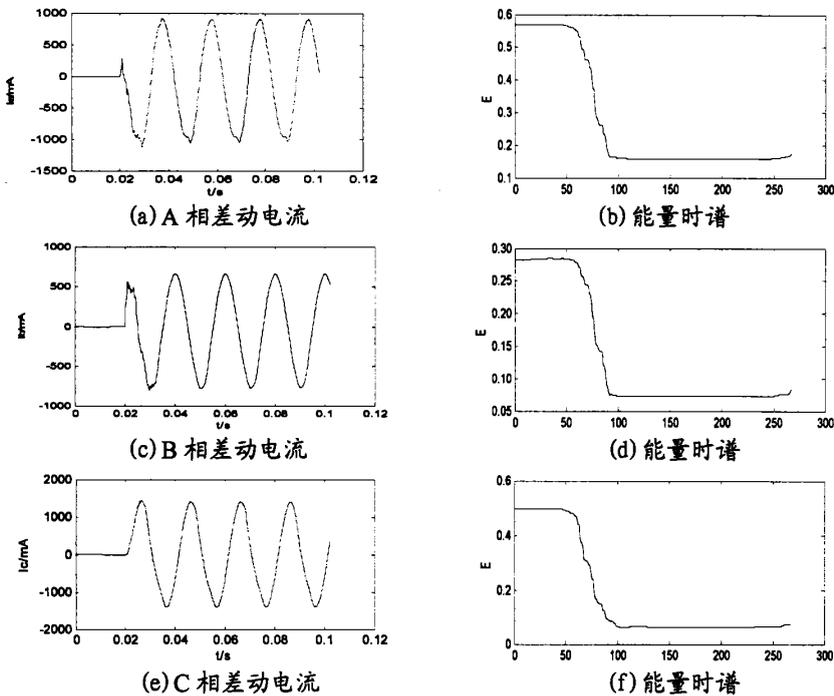


图 4.4 9%匝间故障时的故障电流及其能量时谱

Fig.4.4 Fault currents and energy time spectrum of 9%turn to turn fault

(3) 变压器低压侧发生三相接地故障，参数设定同 4.1 节的系统设置。当变压器初相角 $\alpha = 30^\circ$ ，且故障电阻 $R_f = 10\Omega$ 时， $t = 0.02\text{ s}$ 故障发生，此时流过变压器的三相差动电流及其对应的能量时谱如图 4.5。

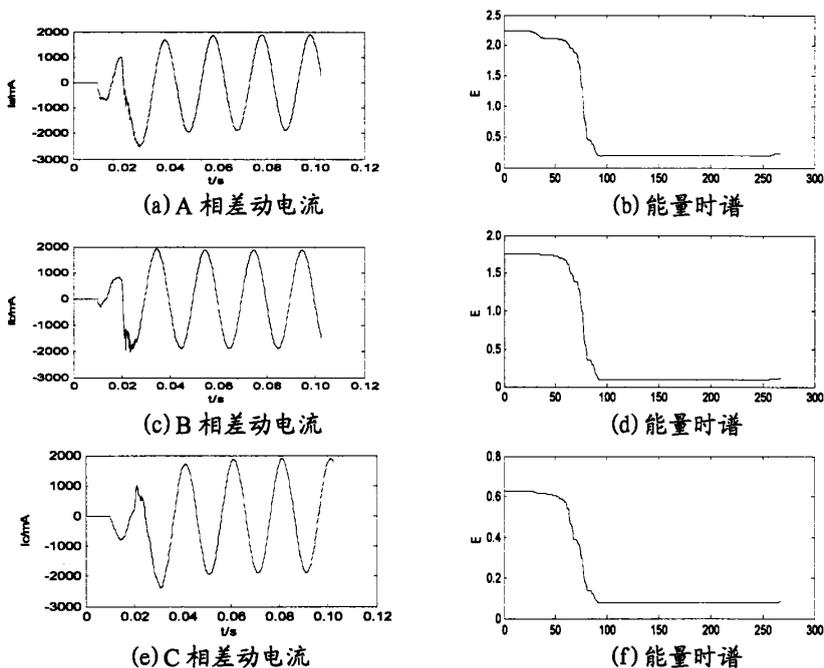


图 4.5 三相接地故障时的故障电流及其能量时谱
Fig.4.5 Fault currents and energy time spectrum of abc-g fault

图 4.3 为供电设备空载并入电网的过程中出现的三相差动电流,这个时候的电流就是励磁涌流,通过五次的变换得到的能量由图 4.4 所示。 $f_s = 2500 \text{ Hz}$ 是猜的一个样本数据,在模仿试验中,50 个 f_s 成为一个周期,从 4.4 可以看出,时间为 0.02 秒设备并入电网的过程中,得到样本点 50,在经过后二分之一周期中得到样本点为 75,从 50 到 75 的过程中 E 缓慢增大。4.4、4.5 的三相电流是出现问题的电流出现问题 E 就会缓慢变小。所以比较设备并入电网过程中发生故障的二分之一周期的 E 的变化曲线可以辨别出中励磁涌流和故障电流。

4.2.2 算法设计

当调动电压的元器件出现问题,想要保证快速的启动保护,电磁继电器灵敏程度要高需要作出快速反应,需要有一套算法保证保护的有效性,由于在问题出现后的半个周期内,问题电流会具有特殊性,应当重点考虑在内。在上一个节中,我们知道在供电设备空载并入电网的过程中的半个周期内,励磁涌流经小波包变换后得到的 5 次谐波的能量出现上升趋势,问题电流的形式不同,问题出现的半个周期内,5 次谐波的能量变化趋势是下降的。

设： E_1 表示设备并入电网空载时刻的能量， E_2 表示在半个周期内的能量，在 $[E_1, E_2]$ 的边缘进行比较，能够得出 E 的变化值 λ_1

$$\lambda_1 = \frac{E_2}{E_1} \quad (4.1)$$

综合考虑 A、B、C 三相的能量分布情况，分别用 λ_A 、 λ_B 、 λ_C 代表 A、B、C 三相的能量比。则三相能量比的平均值为：

$$\lambda = \frac{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C}{3} \quad (4.2)$$

涌流的识别判据定义为：

$$\lambda > T \quad \text{为涌流} \quad (4.3)$$

$$\lambda < T \quad \text{为故障电流} \quad (4.4)$$

其中， λ 为能量比， T 为设定的阈值。根据大量仿真分析，确定 $T=1$ 。

整个算法流程如图 4.6 所示：

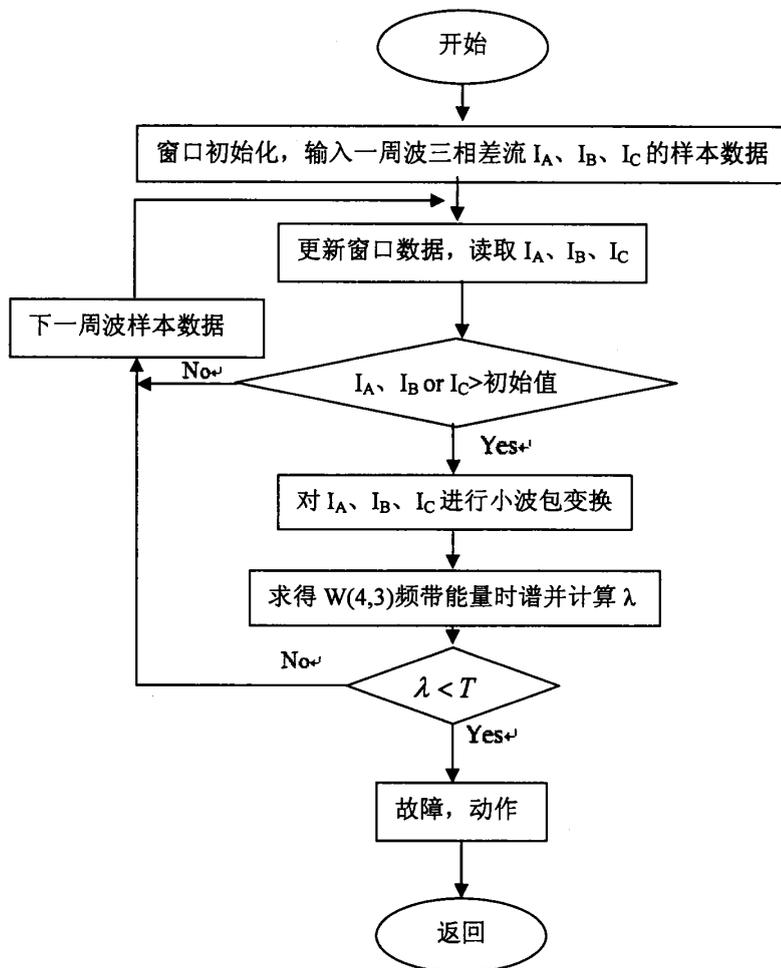


图 4.6 算法流程图
Fig. 4.6 Relay Flow Chart

4.3 算法验证

变压器励磁涌流大小受合闸初始角 α 和三相剩磁 B_r 的影响, 且变压器有不同的故障类型: 单相接地短路 (LG), 相间短路 (LL), 三相接地短路 (3LG), 匝间短路。因此本文在不同合闸角、不同剩磁、不同故障状况等具体条件下建立仿真模型, 研究涌流识别算法的性能, 计算相应的 λ 值。

上一节分析了在改变电压的电器元件没有工作开关闭合的情况下，电压电气元件在外部出现故障，电流不能顺利的通过该电路元件，清除故障后，出现励磁涌流。 $\alpha = 30^\circ$ ， $B_r = (0,0,0)$ ， $t = 0.01\text{s}$ 问题出现， $t = 0.02\text{s}$ 问题解决，此时流过变压器的三相差动电流及其对应的能量时谱如图 4.7。

计算得出 $\lambda = 1.027 > T = 1$ ，判定为涌流，满足保护判据。

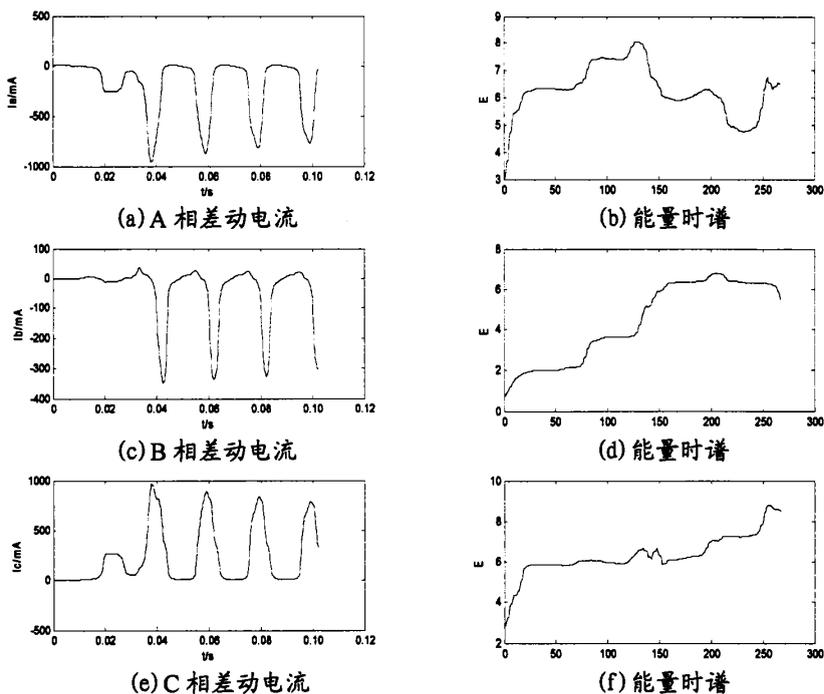


图 4.7 外部故障切除时的励磁涌流及其能量时谱

Fig.4.7 Magnetizing inrush currents after clearance of external faults and energy time spectrum
 变压器空载合闸或外部故障切除（故障电流不流过变压器），合闸或故障切除时间为 $t=0.02\text{s}$ 。合闸时电压初相角 α 分别考虑 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 三种情况；三相剩磁 B_r 设置为 $B_r = (0, 0, 0)$ 、 $B_r = (-0.2, 0, 0.4)$ 、 $B_r = (0.6, -0.4, -0.1)$ 三种。

对这些条件下的系统进行分析，并计算 λ 值。其仿真测试结果如表 4.1 所示。

表 4.1 励磁涌流的仿真测试结果 λ 值

Table 4.1 The simulation results of the inrush current and λ

	空载合闸			外部故障切除且故障电流不流过变压器		
	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=60^\circ$
$B_r = (0, 0, 0)$	1.049	1.035	1.028	1.022	1.036	1.041
$B_r = (-0.2, 0, 0.4)$	1.014	1.012	1.012	1.013	1.012	1.014
$B_r = (0.6, -0.4, -0.1)$	1.028	1.033	1.028	1.024	1.038	1.041

表 4.1 给出了共计 18 组不同情况下有关涌流的仿真结果，根据计算所得的 $\lambda > T = 1$ ，判定为涌流，满足判据。

除此之外，变压器发生外部故障，且故障电流流过该变压器，则在故障切除时出现恢复性涌流，恢复性涌流的二次谐波含量比励磁涌流小，这样在采用传统二次谐波制动原理进行涌流识别可能会有些困难^[92]。下面通过仿真实例验证本文提出的保护算法的可行性。

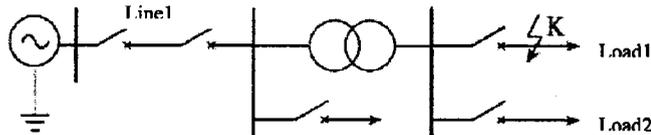


图 4.8 变压器外部故障接线图
Fig. 4.8 System hookup of transformer with external faults

图 4.8 是变压器外部短路故障切除的系统图，且故障电流流过变压器，形成了恢复性涌流。其系统参数设置为：

变压器为三相双绕组，采用 Y_n/Δ 接线的带饱和特性的降压变压器。其参数设定：容量为 450MVA。一次绕组额定电压 500kV，二次绕组额定电压 220kV， $R_1=0.013\text{Pu}$ ， $L_1=0.19\text{Pu}$ ， $R_2=0.013\text{Pu}$ ， $L_2=0.19\text{Pu}$ ，三相剩磁 $B_r = (0,0,0)$ 饱和特性是 $i_1=0$ ， $f_1=0$ ； $i_2=0$ ， $f_2=1.3$ ； $i_3=1.0$ ， $f_3=1.63$ 。

输电线路： $L=110\text{km}$ ， $R_0=0.10384\ \Omega/\text{km}$ ， $R_1=0.5975\ \Omega/\text{km}$ ， $L_0=0.9448\text{mH}/\text{km}$ ， $L_1=4.037\text{mH}/\text{km}$ ， $C_0=13.45\ \mu\text{F}/\text{km}$ ， $C_1=6.530\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

(1) 外部故障切除后没有负荷电流流过。设定合闸初始角 $\alpha = 0^\circ$ ，变压器外部发生三相接地故障。当 $t = 0.02\text{s}$ 时，外部故障切除，则变压器的三相差动电流及其经小波包变换后的能量时谱如图 4.9 所示：

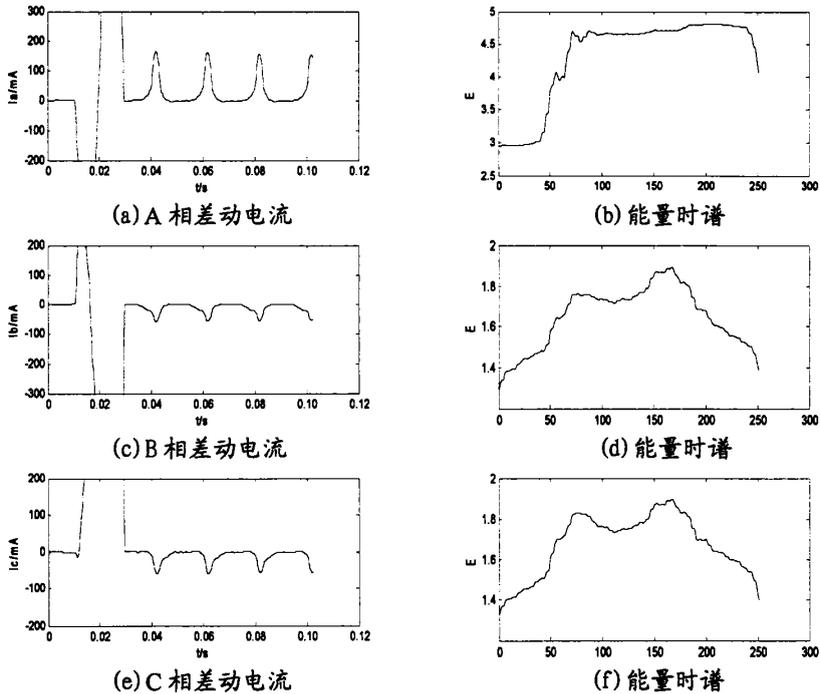
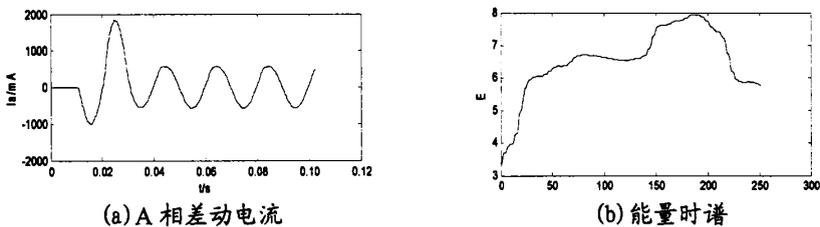


图 4.9 外部故障切除时的恢复性涌流及其能量时谱

Fig.4.9 Recovery inrush currents after clearance of external faults and energy time spectrum

从图 4.9 可以看出，故障切除时，三相差动电流由故障电流迅速转变为恢复性涌流，在能量时谱图中可以观察到，故障切除 $t = 0.02s$ ，到合闸运行一半周期，三相励磁涌流随着小波包变换后得到的能量值 E 是逐渐增大的。经计算得出 $\lambda = 1.003 > T = 1$ ，判定为涌流，满足保护判据。

(2) 外部故障切除后有负荷电流流过。设定合闸初始角 $\alpha = 0^\circ$ ，变压器外部发生三相相间故障。当 $t = 0.02s$ 时，外部故障切除，则变压器的三相差动电流及其经小波包变换后的能量时谱如下图 4.10 所示。计算得出 $\lambda = 1.056 > T = 1$ ，判定为涌流，满足保护判据。



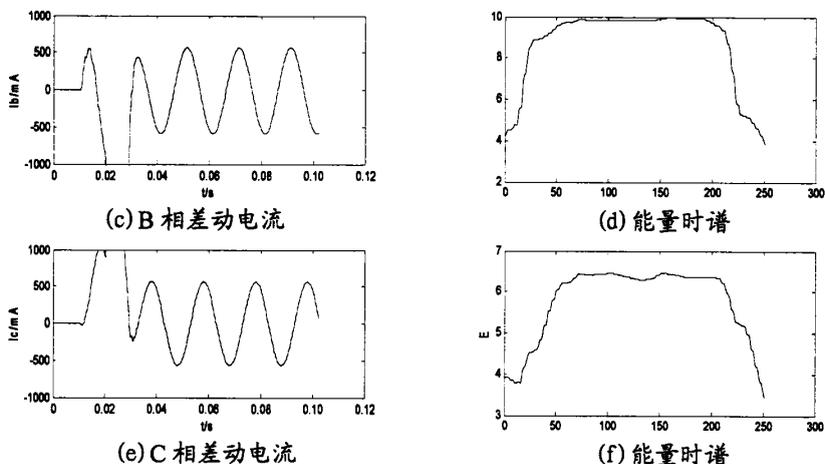


图 4.10 外部故障切除时有负荷电流的恢复性涌流及其能量时谱

Fig.4.10 Recovery inrush currents after clearance of external faults with charge currents and energy time spectrum

由于恢复性涌流的大小受合闸初始角 α 、故障类型的影响，因此，本文在不同合闸角、不同故障状况等具体条件下建立仿真模型，并给出仿真结果 λ 值如表 4.2 所示。

表 4.2 恢复性涌流的仿真测试结果 λ 值

Table 4.2 The simulation results of the recovery inrush current and λ

	故障切除后不考虑负荷电流				故障切除后考虑负荷电流			
	A 相接地	AB 相间	AB 接地	三相接地	A 相接地	AB 相间	AB 接地	三相接地
$\alpha=0^\circ$	1.004	1.002	1.001	1.003	1.090	1.006	1.009	1.056
$\alpha=30^\circ$	1.081	1.081	1.080	1.081	1.004	1.072	1.077	1.102
$\alpha=60^\circ$	1.001	1.001	1.081	1.003	1.072	1.170	1.277	1.056
$\alpha=90^\circ$	1.080	1.083	1.005	1.077	1.039	1.088	1.099	1.102

表 4.2 列出了 32 种条件下产生的恢复性涌流经小波包变换后，最终计算得出的 λ 值，且 λ 都大于阈值 T ，判定为涌流，满足保护判据。因此，该算法在恢复性涌流的识别上是可行的。

上一节分析了变压器低压侧发生故障的两种情况，当变压器高压侧发生 AB 相间故障，初相角 $\alpha = 90^\circ$ ，且故障电阻 $R_f = 100\Omega$ 时， $t = 0.02s$ 故障发生，此

时流过变压器的三相差动电流及其对应的能量时谱如图 4.11。计算得出 $\lambda = 0.890 < T = 1$ ，判定为故障电流，满足保护判据。

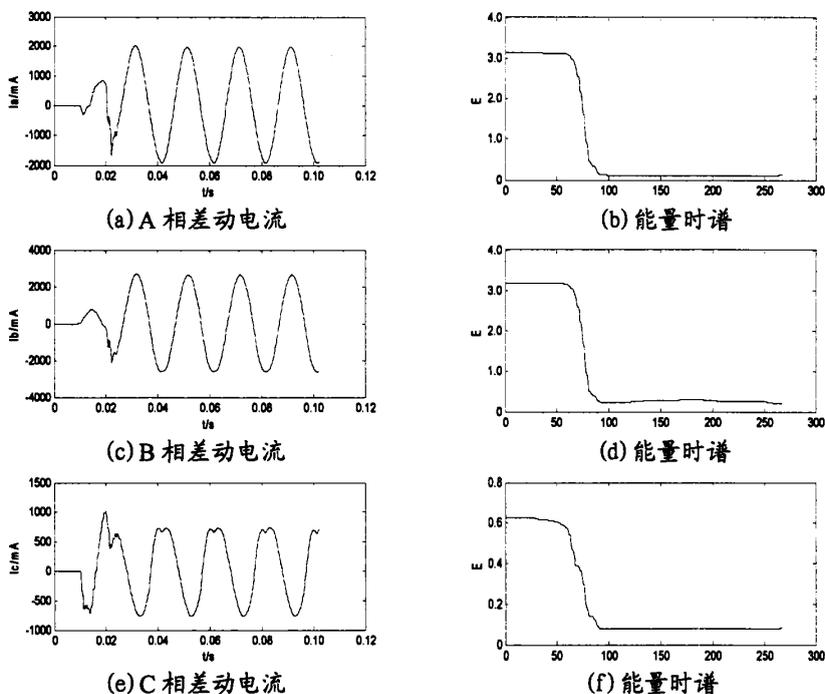


图 4.11 高压侧 AB 相间故障时的故障电流及其能量时谱
Fig.4.11 Fault currents and energy time spectrum of ab fault on high-pressure

变压器高压侧或低压侧故障运行，故障发生时间为 $t=0.02s$ 。分别考虑单相接地短路，相间短路，三相接地短路，匝间短路四种情况。电压初相角 α 分别设置为 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\alpha = 90^\circ$ ；故障电阻考虑 $r_f=0.01\Omega$ 、 $r_f=10\Omega$ 、 $r_f=100\Omega$ 三种参数情况。其他模型参数不变。仿真计算结果如表 4.3 所示。

表 4.3 故障电流的仿真测试结果 λ 值
Table 4.3 The simulation results of the fault current and λ

		A 相接地	AB 相间	AB 接地	ABC 接地	7%匝间	21%匝间	
高压侧	$\alpha=0^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.876	0.757	0.614	0.781	0.694	0.698
		$r_f=10\Omega$	0.852	0.887	0.769	0.667	0.675	0.685
		$r_f=100\Omega$	0.791	0.754	0.694	0.638	0.693	0.693
	$\alpha=30^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.867	0.716	0.802	0.805	0.694	0.697
		$r_f=10\Omega$	0.924	0.778	0.771	0.749	0.698	0.675
		$r_f=100\Omega$	0.883	0.814	0.668	0.686	0.697	0.783
	$\alpha=60^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.877	0.846	0.825	0.891	0.687	0.694
		$r_f=10\Omega$	0.814	0.834	0.852	0.861	0.681	0.691
		$r_f=100\Omega$	0.778	0.832	0.704	0.847	0.693	0.671
	$\alpha=90^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.877	0.868	0.852	0.814	0.696	0.692
		$r_f=10\Omega$	0.855	0.847	0.821	0.841	0.693	0.691
		$r_f=100\Omega$	0.713	0.887	0.979	0.838	0.698	0.695
低压侧	$\alpha=0^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.716	0.791	0.877	0.825	0.696	0.691
		$r_f=10\Omega$	0.776	0.771	0.802	0.801	0.692	0.693
		$r_f=100\Omega$	0.754	0.716	0.867	0.825	0.694	0.698
	$\alpha=30^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.852	0.887	0.879	0.880	0.675	0.685
		$r_f=10\Omega$	0.771	0.798	0.814	0.823	0.693	0.691
		$r_f=100\Omega$	0.754	0.694	0.846	0.832	0.694	0.697
	$\alpha=60^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.769	0.814	0.878	0.868	0.692	0.689
		$r_f=10\Omega$	0.832	0.846	0.894	0.847	0.696	0.894
		$r_f=100\Omega$	0.814	0.662	0.847	0.879	0.693	0.696
	$\alpha=90^\circ$	$r_f=0.01\Omega$	0.858	0.879	0.661	0.865	0.698	0.687
		$r_f=10\Omega$	0.846	0.805	0.825	0.778	0.694	0.681
		$r_f=100\Omega$	0.812	0.887	0.881	0.689	0.693	0.693

表 4.3 共给出了 140 组不同条件下系统故障时的仿真结果，计算所得 $\lambda < T = 1$ ，判定为故障电流，满足判据。

通过表 4.1、4.2、4.3 给出的大量仿真结果验证了本文提出的算法的有效性。下面通过对前文没有提及的几种变压器运行状态的仿真分析，进一步验证该算法。

(1) 变压器低压侧 A 相 3%匝间短路，发生故障时间为 $t=0.02s$ ，初相角 $\alpha = 0^\circ$ ， $r_f = 0.001\Omega$ ，发生故障时三相差动电流及其小波包变换后的能量时谱如图 4.12 所示。依据小波包变换后的能量值计算可得 $\lambda = 0.582 < T = 1$ 判定为故障电流，保护动作。

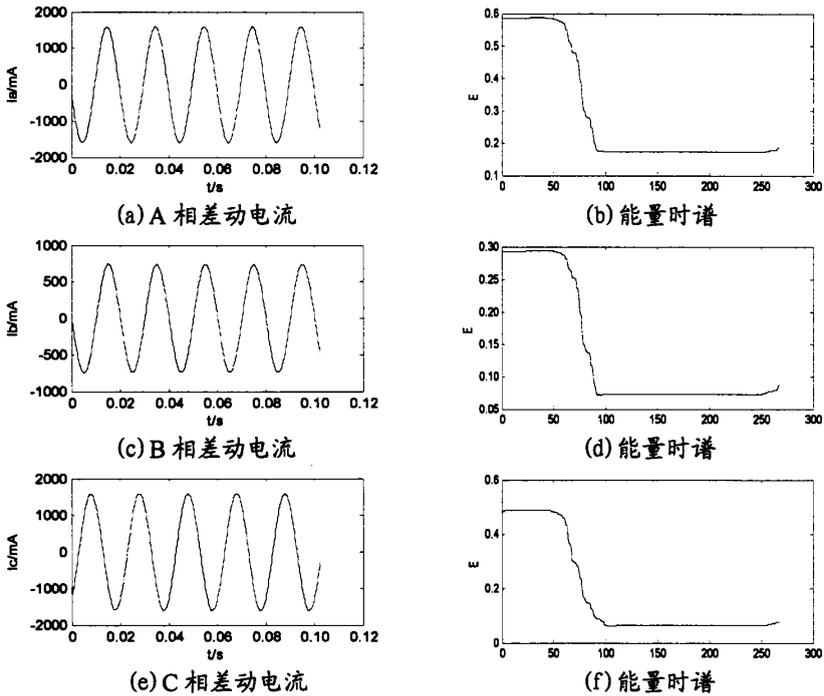


图 4.12 低压侧 3%匝间短路故障时三相差动电流及其能量时谱

Fig. 4.12 3. phase dynamic currents and energy time spectrum of 3% turn to turn fault

(2) 变压器空载合闸，合闸时间为 $t=0.02s$ ，初相角 $\alpha = 0^\circ$ ，三相剩磁 $B_r = (0.9, 0.9, 0.9)$ ，三相差动电流及其小波包变换后的能量时谱如图 4.13 所示。依据小波包变换后的能量值计算可得 $\lambda = 1.053 > T = 1$ 判定为励磁涌流，保护不动作。

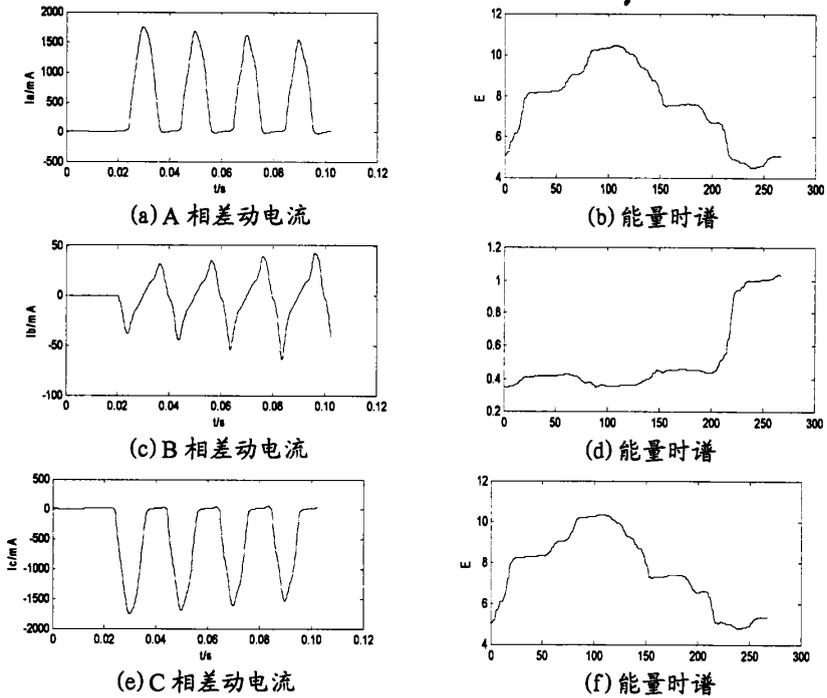
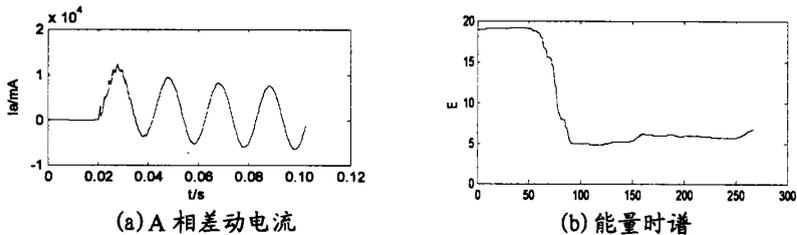


图 4.13 空载合闸时三相差动电流及其能量时谱

Fig. 4.13 3-phase dynamic currents and energy time spectrum of unloaded transformer switching on

(3) 变压器空载投入最严重的情况是带故障投入，此时故障电流与励磁涌流同时存在，易引起保护误动。设变压器在 $t = 0.02s$ 时发生 AB 相间短路故障， $\alpha = 0^\circ$ ， $r_f = 0.001\Omega$ ，变压器的三相差动电流以及其小波包变换后的能量时谱如图 4.14 所示。依据小波包变换后的能量值计算可得 $\lambda = 0.683 < T = 1$ 判定为故障电流，保护动作。



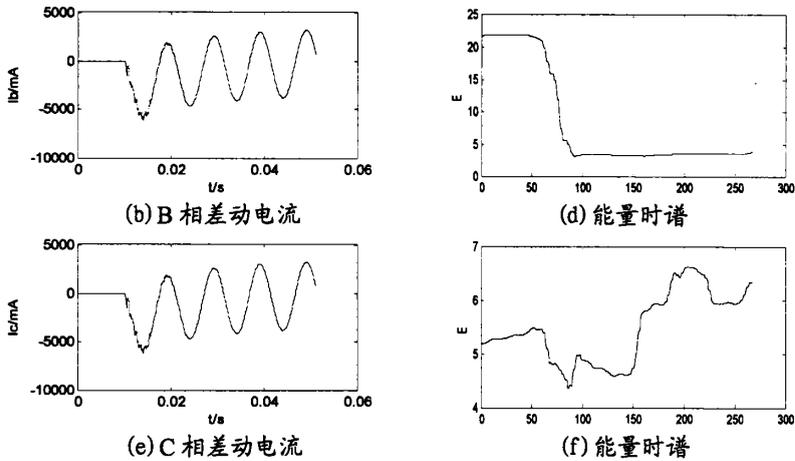


图 4.14 变压器空投 AB 相间故障三相差动电流及其能量时谱

Fig.4.14 3.phase dynamic currents and energy time spectrum of unloaded transformer with a-b fault

4.4 本章小结

本章阐述了在变压器区外出现短暂性故障，利用理论分析信号对于涌流的影响，能量变化的不同提出保护算法，构成涌流识别判据。在 MATLAB 中建立了变压器空载合闸和各种内部故障的仿真模型，然后根据变压器不同工作状态下的仿真实验，得到大量的仿真数据，经小波包分析，获得所分析子频带信号的能量时谱，归纳得出涌流识别判据。结果表明，变压器发生涌流时，三相差动电流经过小波包变换后得到的能量值，在合闸初始的 $1/2$ 周期内是增大的，满足判据 $\lambda > T$ ；而故障时的三相差动电流经小波包变换后得到的能量值，在故障发生的 $1/2$ 周期内是减小的，满足判据 $\lambda < T$ 。同时，仿真试验数据表明，在理论情况下变压器运行证实了提出的理论的可行性。

5 结论

处理信号的工具有很多种，每种工具都有自身特点，其中小波分析以他独有的优点在当前的数学和工程学科中迅速成为电力方面的新宠儿。这种理论依据在保护领域得到了迅速发展，这种分析方法将信号的不同频率分解发送再放大，在电力变压器保护方面有着很好的应用。本文提出了基于小波包分析的涌流识别方法，得到结论如下：

(1) 涌流经小波包变换后得到的 5 次谐波能量时谱，在空载合闸（外部故障切除）初始的 1/2 周期内是增大的；而故障电流经小波包变换后得到的 5 次谐波能量时谱，在故障发生初始的 1/2 周期内是减小的。依据两种电流在产生初始阶段（1/2 周期内）的能量变化趋势，可以实现涌流和故障电流的识别。满足判据 $\lambda > T$ 为涌流； $\lambda < T$ 为内部故障电流。

(2) 通过对一些特殊情况（如 3% 匝间短路的轻微故障、空载时带故障投入、三相剩磁较大使二次谐波含量较低的情况）的仿真分析，进一步验证了方法的可行性。证明了该方法能够正确识别涌流与内部故障电流。

本文所作的理论分析与判据研究对小波分析应用于变压器差动保护具有一定的实用意义，但由于技术和时间的因素，仍有一些不足。将该判据应用于严重的和应涌流识别的可行性需要进一步验证；没有检验 CT 饱和是否会给该判据带来影响。

参考文献

- [1] 沈晓凡, 程道, 章激扬. 2005 年全国电网继电保护装置运行情况分析[J]. 电力设备, 2007, 8(2):26-29.
- [2] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇等. 2007 年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术, 2008, 32(16):5-8.
- [3] C. Bengtsson, Status and trends in transformer monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3), Page: 1379-1384.
- [4] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [5] 葛宝明, 王祥珩等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22):1-6.
- [6] 宋芸等. 励磁涌流鉴别方法在变压器保护中的应用[J]. 继电器, 2002, 30(10):85-89.
- [7] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 2005.
- [8] 朱亚明, 郑玉平, 叶锋等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(11):36-40.
- [9] 林湘宁, 刘世明, 杨春明, 刘沛. 几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(4):44-49.
- [10] 陈德树, 尹项根, 张哲等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8):19-23.
- [11] 焦邵华, 刘万顺. 变压器励磁涌流和短路电流的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8):35-38.
- [12] 徐习东, 何奔腾. 变压器差动保护中 CT 饱和后间断角的测量[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(5):22-25.
- [13] 陈德树, 尹项根, 张哲等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8):19-23.
- [14] A.G. Phadke, J.S. Thorp. A new computer-based flux-restrained current-differential relay for power transformer protection [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(11): 3624 – 3629.

- [15] 葛宝明, 于学海, 王祥珩, 苏鹏声. 基于等效瞬时电感判别变压器励磁涌流的新算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7):44-48.
- [16] 孙鸣, 梁俊滔, 冯小英. 基于功率差动原理的变压器保护实现方法的分析[J]. 继电器, 2001, 29(12):13-15.
- [17] 郑涛, 刘万顺, 吴青华等. 基于瞬时功率的变压器励磁涌流和内部故障电流识别新方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23):51-55.
- [18] Omar A.S.Youssef. A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers [J]. IEEE Transactions On power Delivery, January 2003, 18(1): 170-176.
- [19] Karen L.Butler-Purry, Mustafa Bagriyanik. Characterization of transients in transformers using discrete wavelet transforms [J]. IEEE Transactions on power systems, MAY 2003, 18(2):648-656.
- [20] A.I.Megahed, A.Ramadan, W.ElMahdy. Power transformer differential relay using wavelet transform energies[C]. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. 20-24 July 2008 Page(s):1-6.
- [21] S.A.Saleh, M.A.Rahman. Real-time testing of a WPT-based protection algorithm for three-phase power transformers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, July/August 2005, 41(4): 1125 – 1132.
- [22] Jawad Faiz, S.Lotfi-Fard. A novel wavelet-based algorithm for discrimination of internal faults from magnetizing inrush currents in power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, Oct.2006, 21(4):1989-1996.
- [23] M.O. Oliveira, R.H. Salim, A.S. Bretas. Differential protection of three-phase transformers using wavelet transforms [C] Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES 13-15 Aug. 2008 Page(s):1-6.
- [24] M.M.Eissa. A novel directional transformer protection technique based on wavelet packet [J]. IEEE Transactions On power Delivery, July, 2005, 20(3):1830-1836.
- [25] Rahmati, A., Sanaye-Pasand, M., New method for discrimination of transformers internal faults from magnetizing inrush currents using wavelet transform [C] Power System

- Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on 12-15 Oct. 2008 Page(s):1 - 7 .
- [26] Iswadi HR, Redy Mardiana. Differential power transformer protection technique using the wavelet packet transform approach[C]. Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering and Informatics Institute Technology Bandung, Indonesia June 17-19, 2007. Page(s): 818-821 .
- [27] 冯小玲, 郭焱等. 小波变换识别变压器励磁涌流和故障电流的新方法[J]. 继电器, 2005, 33(11):31-36.
- [28] 安源, 刘家军. 基于小波理论和多分辨分析的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2007, 31(17):21-25.
- [29] 李红岩, 张璿, 侯媛彬. 基于小波变换的变压器励磁涌流鉴别的新方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(3):500-503.
- [30] 王增平, 高中德, 张举等. 模糊理论在变压器保护中的应用. 电力系统自动化, 1998, 22(02): 13-16.
- [31] 黄登峰, 郁惟铺. 基于模糊集合理论的变压器匝间短路保护算法及仿真研究[J]. 电网技术, 2002, 26(1):11-14.
- [32] L.G.PEREZ, A.J.Fleehsig, J.L.Meado, et al. Training an artificial neural network to discriminate between magnetizing inrush and internal faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1):434-441.
- [33] A.L.Orille Fenrandez, N.K.1.Ghonaim, J.A.Valeneia. A FIRANN as a differential relay for three Phase Power transformer Protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2):215-218.
- [34] David C.Yu, et al. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using Artificial Neural Networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2001, 16(29).
- [35] 段玉倩, 贺家李, 贺继红. 基于神经网络方法的微机变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 1998, 13(3):190-194.
- [36] Hayward C.D. Prolonged inrush current with Parallel transformers affect differential

- relaying[J]. IEE Trans, 1941, VOI.60:1096~1101.
- [37] SAIED M M.A study on the inrush current Phenomena in transformer substations[C]. Proceedings of Industry Applications Conference & Thirty-sixth IAS Annual Meeting, 2001 Vol.2:1180~1187.
- [38] BRONZEADO H S, YAEAMIMI R. Phenomenon of sympathetic interaction between transformers caused by inrush transients[J]. IEEE Proc, 1995, 142(4):323-329.
- [39] BRONZEADO H S, Brogan P, YAEAMIMI R. Harmonic analysis of transient currents during sympathetic interaction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 2051-2056.
- [40] 张雪松, 何奔腾, 张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22):15-19.
- [41] 毕大强, 王祥晰, 李德佳等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005. 29(6):1-8.
- [42] 张雪松, 何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14):12-17.
- [43] 束洪春, 贺勋, 李立新. 变压器和应涌流分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10):7-11.
- [44] 刘中平, 陆于平, 袁宇波. 变压器外部故障切除后恢复性涌流的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(08):41-44,95.
- [45] 张晓宇, 毕大强, 苏鹏声. 变压器外部故障切除后差动保护误动原因的分析[J]. 继电器, 2006, 34(1):5-9,14.
- [46] XIANG-NING L and L PEI. The ultra saturation phenomenon of loaded transformer exercitation and its impacts on differential protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005, 20(2): 1265-1272.
- [47] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1995.
- [48] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1999.
- [49] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [50] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [51] 李舜酩. 二进离散小波能量谱及其对微弱信号的检测[J]. 中国机械工程,

参考文献

2004,15(5):394-397.

[52] 李立新, 束洪春. 变压器电压恢复涌流分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10):59-63.

致 谢

作为一个在职人员，过往的校园生活是那么的美好，感谢学校给了我再次学习的机会。值此论文成稿之际，我对所有曾经关心、支持、帮助过我的人们致以最诚挚的感谢！

本文是在导师王明东副教授的悉心指导下完成。从论文的选题、研究、撰写到顺利完成，自始至终都受到了导师的谆谆教诲和悉心关怀。老师不仅教我研究问题的方法，还教我做人的道理，给了我莫大的鼓励使我不断进步和成长，在此我要向导师表示深深的谢意！

最后祝大家身体健康，万事如意！

作 者 简 介

纪韬，男，1986年7月出生，汉族，大学本科文化，2009年在河南城建学院完成了大学本科的学习，主修计算机科学与技术专业并顺利取得了工学学士学位。2009年8月进入河南省电力公司周口供电公司计量部，工作主要围绕河南省电力公司进行的电能采集系统建设工程，实现周口市及县级单位所有计量点的数据远程采集及深化应用。