

# 基于小波变换的变压器差动保护算法

高志勇, 成建军, 张 昕

(二滩水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

**摘 要:**通过对典型励磁涌流和常见变压器内部故障的电流波形进行分析,总结归纳出一种基于小波变换的差动保护算法。

**关键词:**励磁涌流; 内部故障; 小波变换

**Abstract:** Through the analysis of the typical magnetizing inrush current and the current waveform of normal internal fault in the transformer, a differential protection algorithm based on wavelet transform in power transformer is presented.

**Key words:** magnetizing inrush current; internal fault; wavelet transform

中图分类号: TM762 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2011)04-0072-03

## 0 引 言

据统计<sup>[1-2]</sup>,1999年中国运行中的220 kV变压器有2 526台,330 kV变压器有102台,500 kV变压器223台。到2002年底,中国运行中的220 kV变压器达到3 229台,330 kV变压器有122台,500 kV变压器有295台。然而多年来电力系统变压器保护的正确动作率却大大低于发电机和线路保护的正确动作率。以2007年为例,全国继电保护的运行情况是:200 kV及以上母线保护装置正确动作率达96.72%;100 MW及以上发电机保护装置正确动作率为99.74%;220 kV及以上变压器保护装置正确动作率仅为96.49%。

差动保护一直用于变压器主保护,但如何正确鉴别励磁涌流和内部故障电流一直是变压器差动保护的核心问题。采用二次谐波制动原理的变压器保护较为常见,但也面临着一些问题<sup>[3-5]</sup>:对暂态信号的励磁涌流进行傅里叶级数的谐波分析,傅里叶级数法的周期延拓将导致错误的结果;同时二次谐波制动系数一直都没有统一的标准;变压器在满足一定条件时,三相励磁涌流的二次谐波含量可能均小于15%<sup>[6]</sup>,因此可能使保护出现误动。

通过在PSCAD/EMTDC中建立电力变压器典型励磁涌流和内部故障模型,通过Db小波函数研究电流波形数据从而获取明确鉴别励磁涌流和内部故障

的判据和算法。

## 1 仿真分析

变压器内部故障仿真研究选用PSCAD/EMTDC软件进行。该软件是当前国际上普遍流行的新型电磁暂态计算程序,它具有精确的元件模型、方便的数据输入方式及强大的分析功能,主要用来研究电力系统的暂态过程,是系统分析和工程研究的有力工具。该软件包是由加拿大马里托巴高压直流研究中心(Manitoba HVDC Researcher Centre)开发出来的,由PSCAD(Power System Computer Aided Design)和EMTDC(Electromagnetic Transient Including DC)两部分软件组成,其典型应用是计算电力系统遭受扰动或者参数发生变化时,电信号随时间参数发生变化的规律。特别是其中包含的基于中心几何学建立的UMEC变压器模型,不仅考虑到同相绕组之间的耦合作用,还考虑到了不同相绕组间的耦合作用。UMEC模型通过充分利用插值法,以分段的线性U-I曲线来描述铁心饱和特性,在实时计算时特别是变压器铁心饱和的情况下可以获得精确的结果,特别适合变压器饱和时励磁涌流的仿真研究。

仿真所得数据采用Matlab小波工具包中的Db小波函数进行处理。通过综合考虑,选用分解尺度为5,以特征较为明显的第3尺度下模极大值作为判断依据,原始信号 $S = d1 + d2 + d3 + d4 + d5 + a5$ ,d1至d5分别为第一至第五尺度的高频细节部分,a5为第

表1 三相变压器励磁涌流仿真参数

名称	参 数					
情况1 A相: $0B_m$ B相: $0B_m$ C相: $0B_m$	合闸时间 /s	0.1	0.1025	0.105	0.1075	
	A相合闸角 /°	0	45	90	135	
情况2 A相: $0.9B_m$ B相: $-0.9B_m$ C相: $-0.9B_m$	合闸时间 /s	0.1	0.1025	0.105	0.1075	
	A相合闸角 /°	0	45	90	135	
情况3 A相: $0.6B_m$ B相: $-0.2B_m$ C相: $0.2B_m$	合闸时间 /s	0.1	0.1025	0.105	0.1075	
	A相合闸角 /°	0	45	90	135	

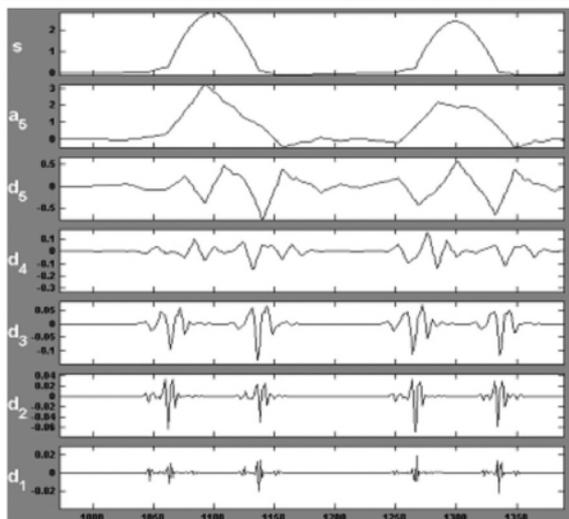


图1 情况1  $\alpha = 0^\circ$ 时A相一次侧电流小波变换五尺度下的低频粗糙部分。

内部故障主要模拟单相接地、两相短路、两相短路接地故障。设定在0.2s时发生故障,对电流信号每工频周期采样200点,以空载合闸和故障时刻为起点,对一、二次侧采样电流一工频周期时间内的信号数据进行小波分析。励磁涌流仿真具体参数见表1,数据采集范围从0~0.6s。

研究表明<sup>[7]</sup>,对于三相变压器来说,无论在任何一个瞬间空载合闸,至少有两相要出现程度不同的励磁涌流,而另一侧三相励磁电流则全部接近0(数量级为E-9)。由于变压器励磁涌流仅流经变压器电源侧,因此在差动回路中不能被平衡。图1显示了上述情况1合闸角 $0^\circ$ 时小波变换前后各相的一次侧电流波形。

图2为A相接地短路时一、二次侧的电流小波变换,可以看出A相在故障发生后的一工频周期内的模极大值对应或者接近于故障发生时刻并且一、二次侧的模极大值符号相反。

限于篇幅,所仿真的单相接地、两相短路、两相短路接地故障仅列出A相单相接地短路时的电流小波变换波形,具体模极大值数据详见表2。

上述仿真研究是基于直接对一、二次侧电流进行信号采样分析而得到的结果,而实际上无论是在励磁涌流还是在故障过程中,都有可能出现电流互感器的饱和。但是由故障开始到电流互感器开始饱和总是有一个过程,电流互感器的饱和不是从故障开始就立即出现,而只能在一定时间之后才发生,这一时间段至少有1/4个周期<sup>[8]</sup>。而仿真得到的电流数据,虽然

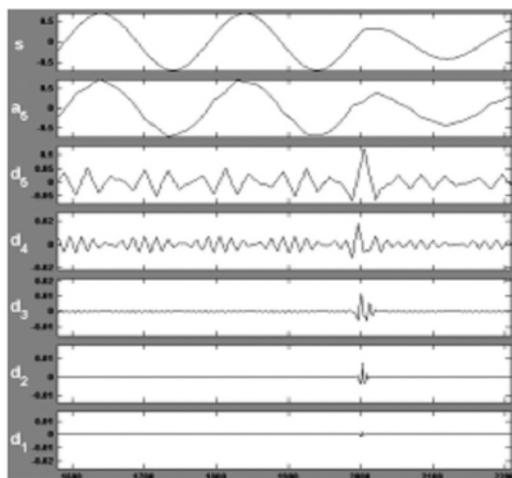
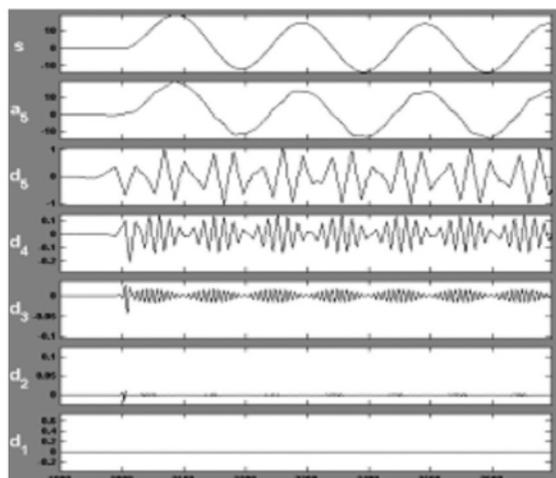


图2 A相接地短路时,A相一、二次侧电流小波变换

表2 典型故障状态下小波变换后各相电流模极大值

故障类型	模极大值		
	A相一、二次侧	B相一、二次侧	C相一、二次侧
A相单相接地	-0.042 9/0.011 7	0.005 89/0.000 46	0.006 025/ -0.007 635
AB两相短路	-0.070 7/0.051 9	0.070 8/ -0.026 1	0.000 685/ -0.025 7
AB两相短路 接地	-0.041 2/0.051 9	0.1/ -0.059 5	-0.057/0.007 65

时间范围是一个工频周期,但所需要的部分往往均在1/4周期内,因此其所设计的模型可以认为基本不受TA饱和的影响。

关于环境中的电磁噪声对小波变换模极大值所产生的影响,理论上可以通过对噪声与信号突变点的小波变换模极大值在不同尺度下的传播特性不同加以解决<sup>[9]</sup>。噪声的小波变换模极大值幅度和平均稠密度通常随尺度的增大而减小,而信号的小波变换模极大值随尺度的增加不衰减。因此可以通过设置一定的尺度来有效去除噪声的干扰。

## 2 保护算法设计

根据上述仿真研究结果表明:当发生励磁涌流时,虽然变压器电源侧涌流的幅值能达到额定电流的数倍,但是在另一侧电流却几乎为零(数量级仅为E-9),对应的模极大值也可以认为是为零的;对于发生单相接地、两相短路、两相短路接地等典型故障情况,故障发生相两侧对应的模极大值点的幅值其正负性是相反的,若采用适当的门槛值,将模极大值过小的点归结等同于是为零,则可以认为非故障相两侧的模极大值点总是有存在为零的情况。

对应于文中的具体仿真数据,可设定门槛值K为0.008,低于该数值的模极大值均设定为零。可以看出,此门槛数值可以较好地地区分出励磁涌流和故障电流,并且当某相一旦发生故障时,其一、二次侧电流信号模极大值点处电流幅值符号相反,即乘积为负;而正常相的乘积则为零。因此不但可以依据其乘积的符号对励磁涌流和故障电流做出判断,并且可以进一步判断出故障所在相,并且可以保证判断的准确。

通过大量仿真研究可以看出,一个工频周期内的电流模极大值出现的位置往往在1/4周期后,但也有少量模极大值出现在1/4周期内或者极接近1/4周期处;而上述几种典型故障情况下各相电流的模极大值均出现在故障发生时刻或接近于发生时刻处。考

虑到现场实际情况的复杂性,单凭分析一周期内模极大值出现的时间位置也不足以在任何情况下都能做出准确判断,但是可以考虑将其作为进一步判断是否为故障电流或励磁涌流的依据。

综上所述,所设计的判据如下。

设变压器差动保护回路分别在三相各自独立判断 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 分别为采样区间内某相一、二次侧电流小波变换模极大值点的幅值,设K为门槛值且 $K = 0.008$ ,若

$$|I_1(t)| > K \quad (1)$$

$$|I_2(t)| > K \quad (2)$$

则有

$$S = I_1(t) \times I_2(t) \quad (3)$$

则在差动回路中的不平衡电流高于整定值时,若数据运算后 $S < 0$ ,可判断该相发生内部故障,差动保护回路发出信号“1”;若小波变换后某相一次或二次侧电流幅值低于门槛值K,则 $S = 0$ ,差动保护回路发出信号“0”,采用逻辑“或”判断,将三相发出的“0”和“1”进行“或”运算,若结果为“1”则差动保护发出跳闸信号,若逻辑判断结果为“0”(如上述匝间短路情况)则将一周期内的电流信号进行进一步分析,若发现至少存在一相的一次侧电流模极大值出现在1/4工频周期时间范围内,则可以认定此种情况为内部故障,差动保护发出跳闸信号。反之差动保护则发出闭锁信号,延迟一定时间后保护回路复位继续进行判断。更进一步,除了能保证发生故障时断路器分断,也可利用各相反馈回的“0”、“1”信号判断具体故障发生在哪一相。

考虑到实际工程应用中电磁环境的复杂,该判断方法还需要进一步调整以适应现场环境。若门槛值K选取的不够合理,比如过高,有可能使得某些轻微故障情况仅凭判断S的数值并不能做到足够准确的判断,甚至会导致拒动情况发生,最终引起更严重的事故,这也是为什么在设计保护方案的时候增加了备用方案,虽然两者单独使用均不能做到绝对正确,但是综合运用情况下则能大大降低误判的可能性;

(下转第78页)

表3 补偿后的相关线路介数

线路	线路介数	线路	线路介数
(1 2)	6	(1 6)	20
(2 6)	20	(5 7)	12
(2 3)	16	(5 6)	20
(1 4)	10	(6 9)	20
(4 5)	12	(9 ,11)	20
(1 5)	12	(8 9)	0
(4 6)	20	(10 ,11)	20

## 4 结 语

基于复杂网络理论和有权网络模型,提出了带权重线路介数的概念,来量化电力系统线路脆弱的程度,将其作为选取多组同基 MBPS 的指标。该方法考虑了发电机分布和出力,符合系统的实际情况,能够较好地辨识那些承担功率不大,但是由于其在电网拓扑中的特殊位置而对系统产生重大影响的线路。所做工作还比较粗糙,可以继续开展深入研究,如在符合电力系统的实际情况下,进一步完善评估指标,考虑运行方式等因素。

(上接第74页)

若  $K$  值设定偏低,也不会造成保护装置的误动进而影响电力系统的可靠运行,仅仅会在发生故障的情况下除了能正确判断某相存在故障,同时还会错误判断正常相也存在故障。而这样的“误判”所导致的结果除了在故障排除的检修维护过程中增加一定工作量,对电力系统的安全稳定运行并不存在任何实质性的影响,并且该判断依据计算简单,所用数据量较少,能在很短暂的时间内就对变压器的运行状况做出判断,因此可以说该方法有着一定的可行性和实用性。

### 参考文献

[1] 王维俭,王祥珩,王赞基.大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M].北京:中国电力出版社,2006:205-208.

[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):6-7.

[3] 王维俭.变压器保护运行不良的反思[J].电力自动化设备,2001,21(10):1-3.

[4] “九五”期间全国电网继电保护统计资料汇编,2001.

### 参考文献

[1] 吕飞鹏.基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J].电力系统自动化,2005,29(24):65-69.

[2] 刘丹,吕飞鹏.基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J].电力系统自动化,2008,32(16):24-27.

[3] 刘丹,吕飞鹏.基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J].电力系统自动化,2008,32(21):27-31.

[4] 李运坤,吕飞鹏,陈新,等.基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J].电力系统自动化,2010,12(34):58-60.

[5] 丁明,韩平平.基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(增刊):118-122.

[6] 倪向萍,梅生伟,张雪敏.基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J].电力系统自动化,2008,32(4):1-5.

[7] 曹一家,陈晓钢,孙可.基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J].电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.

作者简介:

张向亮(1987),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

吕飞鹏(1968),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统继电保护和故障信息处理智能系统。

(收稿日期:2011-04-02)

[5] 葛宝明,王祥晰,苏鹏声,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):1-5.

[6] 林湘宁,刘沛,刘世明,等.变压器有载合闸的超饱和现象及对变压器差动保护的影响[J].中国电机工程学报,2002,22(3):7-11.

[7] 孙国凯,霍利民,柴玉华.电力系统继电保护原理[M].北京:中国水利水电出版社,2002:123-124.

[8] Kezunovic, M, Kojovic, L. Experimental Evaluation of EMTF - based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study. IEEE Transactions on, 1994, 9(1): 405-413.

[9] Mallat S., Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

作者简介:

高志勇(1971),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

成建军(1973),男,四川成都人,工程师,从事电力系统运行监控工作;

张昕(1980),男,四川成都人,助理工程师,从事电力系统运行监控工作。

(收稿日期:2011-03-17)