

Measurement and Characteristic Analysis of the Core Grounding Current of Transformer

Jiahui He¹, Yongqin Wang¹, Xin Tong¹, Qiyi Zhou²

¹State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan Hubei

²State Grid Jingzhou Electric Power Supply Company, Jingzhou Hubei

Email: 417705855@qq.com

Received: Nov. 19th, 2015; accepted: Dec. 5th, 2015; published: Dec. 9th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, we analyze the core structure and the influence factors of the transformer. Through the study of the mechanism and circuit model of core grounding current, the harmonic component of the core is pointed out in the single-phase transformer. By selecting the typical transformer to carry out the measurement of the core, the existence of the harmonic in the core grounding current is verified, and the harmonic content is related to the structure of the transformer. At the same time, we analyze the current waveform of a transformer core with multi-point grounding transformer. Then it is proved that the installation of resistance can limit the size of the current of the core, but does not change the content of its harmonics.

Keywords

Core Grounding Current, Multi-Point Grounding Fault, Harmonic

变压器铁芯接地电流测量与特征分析

贺家慧¹, 王永勤¹, 童 歆¹, 周启义²

¹国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北 武汉

²国网荆州供电公司, 湖北 荆州

Email: 417705855@qq.com

收稿日期: 2015年11月19日; 录用日期: 2015年12月5日; 发布日期: 2015年12月9日

摘要

本文首先分析变压器铁芯结构和铁芯故障的影响因素。通过对正常和故障时铁芯接地电流产生的机理和电路模型,指出在三相一体的变压器结构中,铁芯接地电流含有丰富的谐波分量。通过选取典型的变压器进行铁芯接地电流的实测,进一步验证了铁芯接地电流中谐波的存在,且谐波含量大小与变压器本体结构有关。同时针对某例铁芯多点接地故障的变压器,在投切限流电阻前后进行了波形对比分析,证明了加装电阻可限制铁芯接地电流大小,但并不改变其谐波含量。

关键词

铁芯接地电流, 多点接地故障, 谐波

1. 引言

变压器是传递电能的主要部件,是输变电系统的关键设备之一,其运行状态直接影响电力系统的可靠性和安全性。变压器一旦发生故障导致停电,将造成巨大的经济损失和社会影响[1]。铁芯多点接地,是近年来变压器事故多发原因之一;据统计数据表明,铁芯多点接地造成的故障占变压器总事故中的第3位[2]。由此可见,变压器铁芯多点接地故障不可忽视。

铁芯多点接地故障初期,接地电流带来的损耗很小,不易从空载损耗中发觉,一般通过测量绝缘电阻、监测铁芯接地电流、油色谱分析等技术手段进行检测。

测量绝缘电阻是最直接的方法,即在变压器停电时,断开铁芯接地线,测量铁芯对地绝缘电阻。若绝缘电阻为零或很低,则说明可能存在铁芯多点接地故障[3]。此方法只能在停电下进行,有很大局限性。

监测或检测铁芯接地电流,可在变压器运行时进行。测量铁芯接地引下线上流过的电流,电流过大,超过行标规定的100 mA,则预示着铁芯可能存在多点接地的故障[4]。

变压器油色谱分析也能检测出铁芯是否多点接地。铁芯多点接地时,其油色谱中总烃含量通常超过GB 7252-2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中规定的注意值150 uL/L,且其中乙烯(C_2H_4)和甲烷(CH_4)占较大比重,乙炔(C_2H_2)含量低[5]。在铁芯多点接地故障初发时期,油色谱变化不甚明显,只有当故障积累到一定程度时,色谱分析才有所显现。

因此,上述三种检测手段中,测量铁芯接地电流是最为及时、有效的方法。

2. 变压器铁芯接地电流理论分析

对比分析一点接地和多点接地故障时的电流特征,有助于提高铁芯接地故障诊断能力。首先需了解变压器铁芯基本结构、故障原因、接地电流产生机理。

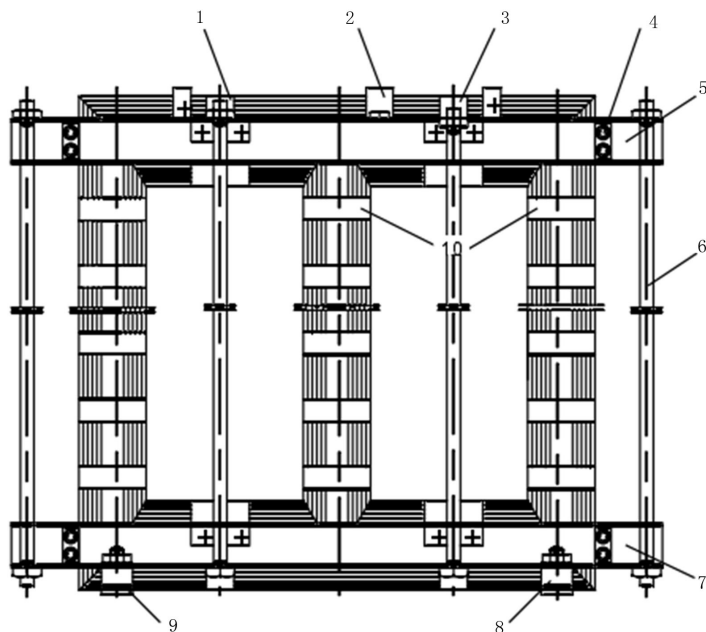
2.1. 变压器铁芯结构

铁芯是变压器的基本部件,由铁芯叠片、绝缘件、结构件等构成。

铁芯叠片是由磁导率很高的磁性钢带叠积或卷绕而成,高磁导率材料制造的铁芯可使得全部磁通在铁芯内和两个绕组交链,进而使不同绕组能感应出和匝数成正比的电压。

铁芯结构件由夹件、垫脚、撑板、拉带、拉螺杆、压钉等部件组成;结构件可使得铁芯叠片充分压紧,形成完整牢固的结构[6]。目前,大多数电力变压器铁芯为心式结构,其典型结构如图1所示。

如图1所示,上夹件的几片之间通过夹紧螺杆4连接,下夹件亦如此;上夹件5和下夹件7通过拉



1: 拉带, 2: 接地片, 3: 拉带, 4: 夹紧螺杆, 5: 上夹件, 6: 拉螺杆, 7: 下夹件, 8、9: 垫脚, 10: 绑扎带

Figure 1. Structure of 3-phase 3-limb transformer core

图 1. 三相三柱心式变压器铁芯结构

螺杆 6 连接；下夹件和垫脚连接。在上铁轭中插入接地片(铜带)，即可使接地片与上夹件连接，进而通过拉螺杆、下夹件、垫脚接地。

对于容量更大的大型变压器，通常将铁芯接地片通过套管从变压器油箱盖引出，在外部接地。这种结构的好处是在检修试验时，可将外部接地线打开，通过测量绝缘电阻检测铁芯的绝缘状态[6] [7]。

变压器正常运行时，铁芯必须有一点接地，否则悬浮电位产生间歇性击穿放电会损伤铁芯绝缘[6] [8]。但铁芯出现两点以上接地时，不均匀电位会在接地点回路中形成环流，造成铁芯局部过热，严重时局部温升增加出现烧熔，进一步形成铁芯叠片之间的短路故障，使铁损变大，严重影响变压器性能和正常工作[9]。因此，铁芯不允许存在多点接地情况。

2.2. 铁芯接地故障原因

统计资料和运行经验表明，可能造成铁芯接地故障的因素有以下几点：

(1) 变压器内部杂质影响。制造过程中内部残留的导电性悬浮物、油路中因轴承磨损引入的金属粉末、加工时残留的金属焊渣，这些导电悬浮物在油流作用下，往往被堆积到仪器，使铁芯与箱壁之间短接，造成多点接地[10]。

(2) 结构件与铁芯非正常接触，如上夹件碰油箱、夹件小托板碰铁芯、穿心螺杆刚座套碰铁芯、钢垫脚与铁芯之间的绝缘破损或受潮等。

(3) 工艺不良，导致的结构变形。如铁芯本体易位变形、外部压紧件变形翘曲等因素均可能导致多点接地故障。

2.3. 铁芯接地电流理论分析

变压器铁芯一点接地时，电流主要为电容电流。运行时，由于绕组上存在运行电压、铁芯接地，两者之间的绝缘介质中会流过一定电流。此电流为铁芯接地电流的主要来源。由于最靠近铁芯的一般是低

压绕组，其电压对铁芯接地电流贡献最大，因此可根据低压绕组的运行电压和低压绕组对地电容来初步估算单相变压器的铁芯接地电流大小。

但对于三相一体的变压器而言，由于三相运行电压互成角度，矢量和接近于零。此时，铁芯接地电流主要来源于三相电压不对称分量和三相电压中存在的谐波。由于三相电压不对称分量通常较小，此时电压谐波对接地电流的贡献凸显出来。分析可知，在三相一体变压器结构的铁芯接地回路中，大多数三相基波电压叠加归零，其归零程度取决于基波电压激励下三相绕组与铁芯间等效电容的对称程度；三相谐波电压叠加被放大，将导致铁芯接地电流中含有丰富的谐波分量。基波下和 3 次谐波下铁芯接地电流等效电路分析模型如图 2 所示。高次谐波也可类似分析。

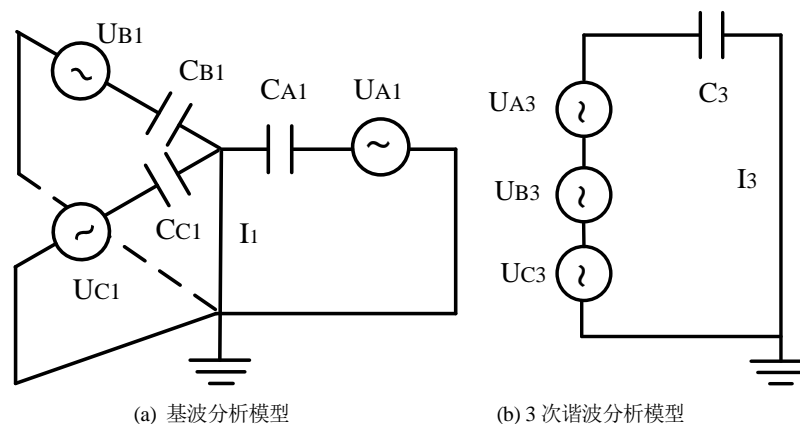
变压器铁芯存在多点接地时，两个接地点之间构成了闭合回路。接地点发生在不同部位时，闭合回路中或多或少会交链部分主磁通或漏磁通，在回路中产生感应环流。此时的接地电流主要为电磁感应产生的电势在铁芯硅钢片薄膜电阻和金属导体电阻上产生的电流。与单点接地类似，若变压器为三相一体结构，则此时接地电流中基波分量大多数仍被叠加归零、3 次谐波仍被放大；若变压器为单相结构，则接地电流中仍将以基波分量为主。

3. 典型案例分析

为进一步分析铁芯接地电流特征，选取一些变电站进行实测分析。

变压器正常运行时，铁芯接地扁钢不能断开，只能利用穿芯式的电流传感器进行测量。铁芯接地电流一般为容性电流，正常情况下幅值较小，一般的穿芯传感器很难准确测量。此外，变电站母线和其他大电流导线的交变电流及高压导体的电晕、放电等会通过电磁场在信号系统中感应出干扰电流和干扰电压，严重影响测量精度。为了准确测量现场变压器铁芯接地电流，本文使用多铁芯自补偿钳型传感器，能够有效地解决了小电流情况下传感器测量结果误差大的问题，同时，采用双层铜屏蔽技术有效地解决了现场干扰对测量结果的影响。本文利用横河 WT3000 功率分析仪作为采集设备，有效的分析了铁芯接地电流谐波含量。

在湖北省境内合理的选取了各电压等级的典型变电站，并对其运行中的变压器铁芯接地电流进行测量。湖北省某 110 kV 变压器(图 3)、220 kV 变压器(图 4)和 500 kV 变压器(图 5)铁芯接地电流波形如图 3 至图 5 所示。



U_{A1} 、 U_{B1} 、 U_{C1} 为绕组基波等效电压， C_{A1} 、 C_{B1} 、 C_{C1} 为基波下等效电容； U_{A3} 、 U_{B3} 、 U_{C3} 为绕组 3 次谐波等效电压， C_3 为 3 次谐波下等效电容。 I_1 、 I_3 分别为铁芯接地电流基波分量、3 次谐波分量

Figure 2. The equivalent circuit model of the core of three phase transformer
图 2. 三相一体变压器的铁芯接地电流等效电路分析模型

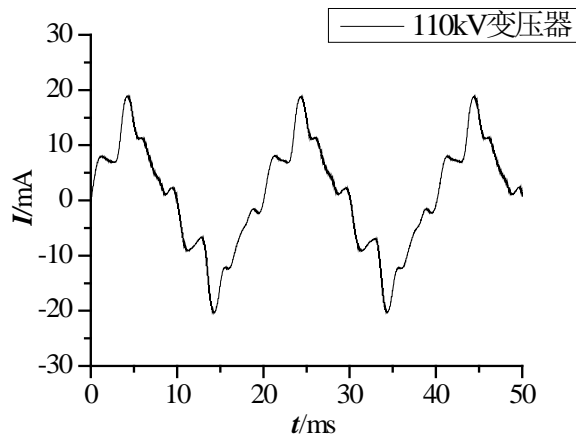


Figure 3. Core grounding current waveform of a 110 kV transformer

图 3. 某 110 kV 变压器铁芯接地电流波形

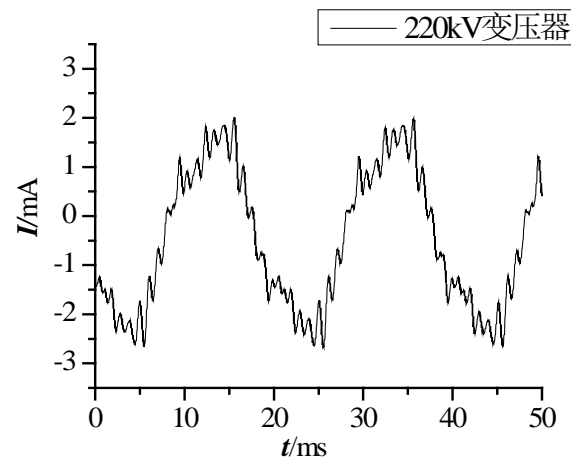


Figure 4. Core grounding current waveform of a 220 kV transformer

图 4. 某 220 kV 变压器铁芯接地电流波形

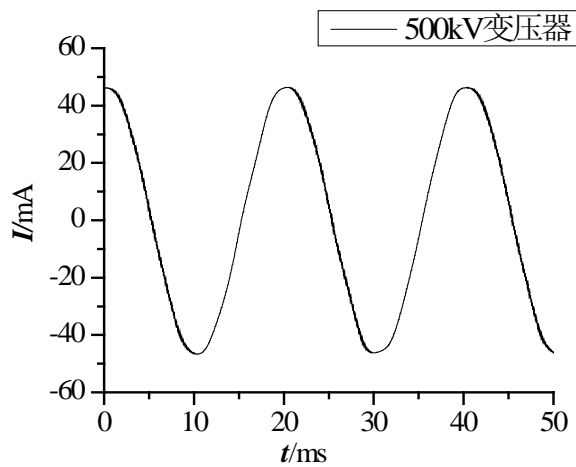


Figure 5. Core grounding current waveform of a 500 kV transformer

图 5. 某 500 kV 变压器铁芯接地电流

由图3至图5可以看出, 110 kV 和 220 kV 变压器铁芯接地电流幅值较小, 但其谐波含量较大, 而 500 kV 变压器铁芯接地电流幅值较大, 主要以基波为主, 几乎不含高次谐波。对不同电压等级变压器铁芯接地电流进行谐波分析, 如表1所示。

由表1可以看出, 500 kV 变压器铁芯接地电流以基波为主, 220 kV 变压器铁芯接地电流谐波含量以3次谐波为主, 而 110 kV 变压器铁芯接地电流谐波含量频率丰富, 含3次、5次和7次谐波。变压器铁芯接地电流谐波含量与变压器结构有关, 500 kV 变压器是单相分体的变压器, 而 110 kV 和 220 kV 变压器为三相一体的变压器。

当变压器铁芯接地正常时, 其接地电流较小, 一般不大于 100 mA。当变压器铁芯存在多点接地时, 铁芯内部由于各点电势不完全相同, 若接地回路中交链了部分主磁通, 会形成较大环流。以湖北省某 220 kV 变压器为例, 该变压器为三相一体结构, 其铁芯存在稳定的多点接地故障, 变压器运行时, 其铁芯接地电流波形如图6所示。

故障时变压器铁芯接地电流幅值为 5.50 A, 对其进行谐波分析, 该波形基波频率为 149.85 Hz, 含量为 99.36%。因此, 当变压器铁芯存在多点接地时, 电流幅值增大, 且主要是3次谐波电流。

为了减小铁芯接地电流, 某变电站对变压器铁芯接地装置进行改造, 加装限流电阻, 如图7所示。

加装铁芯接地限流电阻后, 对运行中的变压器铁芯接地电流进行测量, 其电流幅值明显减小, 约为 45.62 mA, 电流波形如图所示。对该电流进行谐波分析, 其基波电流频率为 150.01 Hz, 基波含量为 99.75%。因此, 对变压器铁芯接地装置加装限流电阻(图8), 只能降低铁芯接地电流的幅值, 而对铁芯接地电流中谐波含量没有影响。

Table 1. Typical characteristics of core grounding current

表 1. 铁芯接地电流典型特征

电压等级(kV)	电流幅值(mA)	基波含量(%)	3次谐波含量(%)	5次谐波含量(%)	7次谐波含量(%)
110	9.45	96.14	14.22	14.34	16.72
220	1.45	97.49	15.77	3.17	3.69
500	33.50	99.99	0.43	0.78	0.84

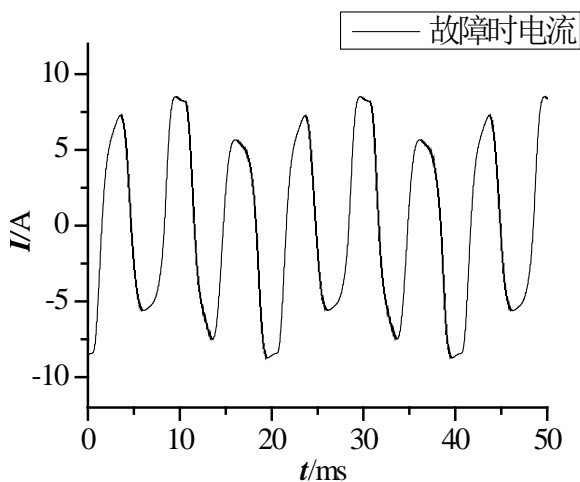


Figure 6. Core grounding current waveform of a transformer with multi-point grounding fault

图 6. 变压器铁芯多点接地故障时的接地电流波形



Figure 7. Core grounding current limiting resistor
图 7. 铁芯接地限流电阻

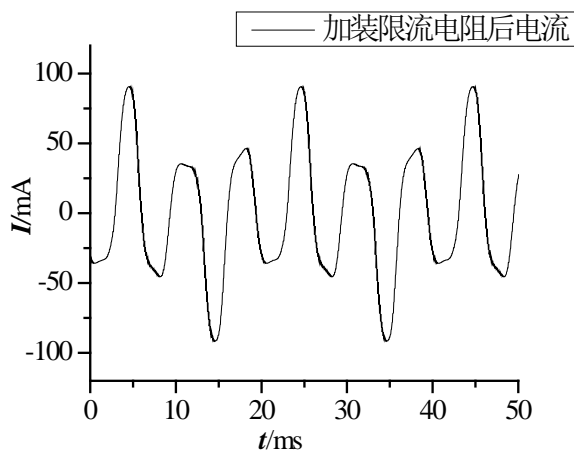


Figure 8. Core grounding current with limiting resistor
图 8. 加装限流电阻后的铁芯接地电流

4. 结论

本文对变压器铁芯接地电流进行了理论分析，阐述了铁芯多点接地时，铁芯接地电流增大的原因。在湖北省境内开展了不同电压等级变电站铁芯接地电流测量的普测工作，发现某变电站铁芯接地电流较大，并对其进行改造，加装铁芯接地限流电阻，得到以下结论：

(1) 变压器铁芯接地电流谐波含量客观存在，其大小与变压器本体结构有关；

(2) 对变压器铁芯接地装置加装限流电阻，能明显降低铁芯接地电流幅值，但不会改变铁芯接地电流中的谐波含量。

参考文献 (References)

- [1] 张士然, 李凤海. 变电站高压设备状态检修技术简介[J]. 华北电力技术, 2009(1): 46-48+54.
- [2] 孙波涛, 郭忠田, 马超. 变压器铁芯多点接地故障分析判断及处理[J]. 冶金动力, 2001(4): 21-22.
- [3] 黎炜. 主变铁芯多点接地故障分析与处理[J]. 电力安全技术, 2003, 5(3): 7-8.
- [4] 皮志勇, 熊飞轮, 皮志军, 等. 变压器铁芯接地电流在线监测装置的开发[J]. 湖北电力, 2006(4): 26-28.

- [5] 闫永明. 变压器铁芯多点接地故障的检测与处理[J]. 山西电力技术, 2001(1): 47-48.
- [6] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 机械工业出版社, 2014(6): 209-223.
- [7] 耿江海. 变压器铁芯多点接地在线监测系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2006.
- [8] 邬小波, 彭珣, 郭绍伟, 等. 变压器铁芯接地电流检测装置应用研究[J]. 华北电力技术, 2013(8): 38-42.
- [9] 康鑫. 变压器铁芯电流监测装置的开发与应用[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [10] 陈卫中, 李清波, 刘沛. 大型变压器铁芯接地在线监测技术的研究[J]. 广东输电与变电技术, 2007(2): 28-33.