

# 吉牛电站主变铁芯多点接地故障仿真分析

白 维

(国能大渡河革什扎水电开发有限公司,四川 丹巴 626302)

**摘要:**针对变压器铁芯多点接地故障发生率高、不易发现,变压器接地危害性大,接地试验操作难度大的特性,在 Maxwell 电磁仿真软件中搭建了吉牛电站三相主变的 3D 涡流场模型,基于 3D 涡流场理论,对吉牛电站主变进行了铁芯多点接地故障仿真实验,仿真结果显示了吉牛电站主变铁芯多点接地故障电流特点及其发展规律,从而为铁芯多点接地故障预测与定位和绝缘优化提供依据。

**关键词:**三相变压器;铁芯多点接地;仿真分析;实验结果

**中图分类号:**[TM622];U224.2+2;U472.42

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2021)02-0118-05

## Simulation Analysis on Iron Core Multi Grounding Fault of Main Transformers in Jiniu Hydropower Station

BAI Wei

(Guoneng Dadu River Geshiza Hydropower Development Co., LTD, Danba, Sichuan, 626302)

**Abstract:** Iron core multi grounding fault of main transformers are of high occurrence rate. Grounding faults are harmless, difficult to be detected and grounding test is not easy to be carried out. The author establishes, in the Maxwell electromagnetic simulation software, 3D current field model of three-phase main transformers in Jiniu hydropower station. Based on the 3D current field theory, simulation experiment on iron core multi-grounding fault is conducted, and the simulation demonstrates the current characteristics and development trend of iron core multi-grounding fault which provides basis for fault prediction, positioning and insulating optimization.

**Key words:** three-phase transformer; iron core multi-grounding fault; simulation analysis; experimental result

## 0 引 言

主变是电厂主要和昂贵的设备之一,变压器一旦发生故障,将给供电造成巨大经济损失和影响。引发变压器故障有多方面的原因,变压器的故障类型也有多种。其中铁芯多点接地出现频率最高,而又往往不易及早发现。正常情况下,铁芯只有一点接地,若出现铁芯多点接地情况,接地点之间将构成回路,可产生高达数十安培的环流。长期运行将造成铁芯叠片片间短路,局部过热,使绝缘材料加速老化,绝缘油分解,甚至烧毁接地线等部件,给变压器安全运行带来巨大压力。

现场通过监测接地线电流的大小可诊断出多点接地故障是否存在,但对于故障位置的判断往往需吊罩后逐一排查,费时费力。实际工作中,变

压器故障电流可以通过模拟试验得到,但在试验研究中,由于基于实体变压器的试验具有破坏性及操作难度高,不能够获取大量的数据来进行规律分析。所以对变压器铁芯多点接地故障的仿真模拟尤为重要,探究故障电流随故障位置的变化规律,进而为故障位置预测、绝缘优化等提供参考,目前多采用均匀化模型代替<sup>[1-2]</sup>。通过各向异性电导率设置可以达到模拟铁芯叠片间的绝缘效果,文献[3-6]提出了针对叠片铁芯的各向异性电导率公式,并在不同频率下进行了验证,没有考虑绝缘层的影响。文献[7]综合考虑了各种阻抗,但公式迭代次数过多,推导复杂。本文通过 maxwell 建立仿真,然后针对水电站三相主变压器进行仿真实验,探寻铁芯多点接地故障下的电流规律,提出相应的防护建议。

## 1 主变的有限元仿真分析

收稿日期:2021-03-24

本文以吉牛电厂 SFP10-H-135000/220 型变压器为例进行 3D 涡流场建模仿真研究, 变压器实际参数如表 1 所示。

表 1 变压器基本参数

参数	数值
额定容量(MVA)	135
容量比(高/低)	100/100
变比	242/13.8
联接组别	YN,d11
硅钢片型号	韩国浦项 30 型
单相运输尺寸 (mm,长 x 宽 x 高)	3 595×3 002×3 640(B), 3 400×3 002×3 640(A,C)

## 1.1 三相变压器模型设置

### 1.1.1 模型构建

在 ansys 的 RMxprt 模块, 构建三相变压器铁芯外部实体 3D 模型(图 1), 根据上表数据调整尺寸参数, 线圈匝数比设置为 2420:138。

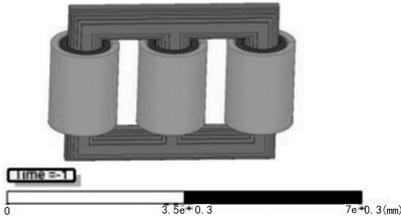


图 1 变压器绕组与铁芯

### 1.1.2 内部接线

变压器采用 YND11 联结方式, 联结示意图 2, 通过 Maxwell Circuit Design 电路编辑器联合编辑, 高压二次侧电阻设置  $10^8 \Omega$ , 模拟空载开路情况。

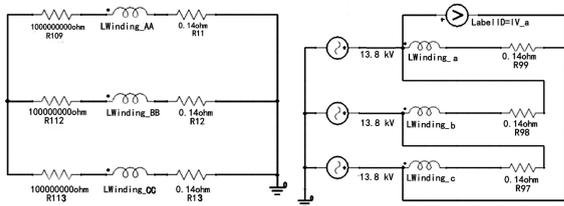


图 2 变压器的联结

### 1.1.3 材料 B-H 曲线

材料库中尚未录入韩国浦项冷轧取向硅钢参数, 可在自定义材料库逐个录入, 这里选取韩国浦项硅钢 30PG130 的交流磁化参数, 生成硅钢片的交流磁化曲线如图 3。线圈材料可直接取库中已有的铜参数。

30PG130 性冷轧取向硅钢片参数如表 2。

### 1.1.4 自适应网格剖分

ANSYS 程序提供了近似的技术自动估计特

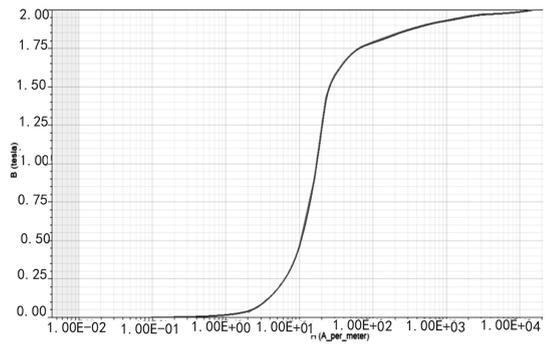


图 3 硅钢片的交流磁化曲线

表 2 30PG130 硅钢基本参数

参数	数值
厚度 $d$ /mm	0.3
宽度 $l$ /mm	1 000
电阻率 $\rho$ / $\Omega \cdot m$	$48 \times 10^{-8}$
相对磁导率 $\mu_r$	36 500
叠装系数 $F$	0.95

定分析, 类型中因为网格划分带来的误差, 通过这种误差估计, 程序可以确定网格是否足够细。如果不够, 程序将自动细化网格以减少误差。这一自动估计网格划分误差并细化网格的过程就叫做自适应网格划分, 然后通过一系列的求解过程使得误差低于用户指定的数值。

整体自适应剖分数据元最大值设置为  $10^5$ , 然后对硅钢片再自适应剖分一次, 数据元设置为  $8 \times 10^4$ 。这样设置不仅有足够的剖分精度, 而且又在计算机算力内(图 4)。

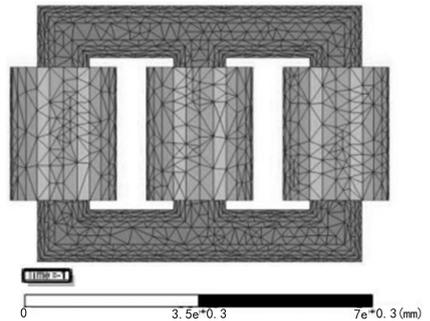


图 4 网格剖分示意图

## 1.2 变压器正常运行铁芯励磁情况分析

通过运行变压器空载仿真, 监测主磁通分布情况、电压电流分布情况, 辨识环境变量设置的合理性(图 5 为空载时, 铁芯主磁通分布)。由图 5 可知, 瞬态环境下呈周期性变化的状态, 主磁通均匀分布于主回路, 磁场强度沿主回路向外逐渐减弱, 漏磁通主要分布于铁芯两侧, 磁通分布范围合理。

从图 6 可以看出,在一次低压侧设置的电压源参数,模拟电源 A 相、B 相、C 相幅值为 13.8 kV,相位差 120°,周期为 20 ms,模拟电源参数与实际相符,其波形、幅值、相位等都十分合适。

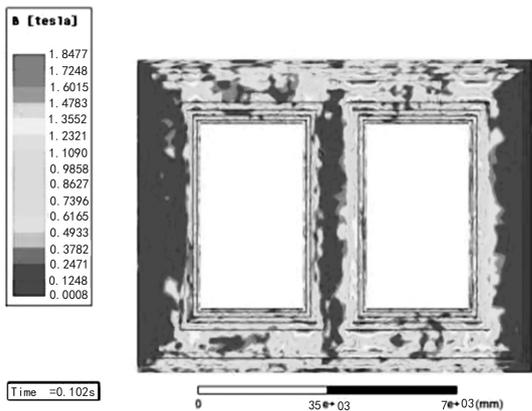


图 5 变压器空载情况下主磁通分布

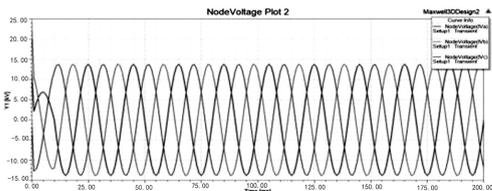


图 6 低压一次侧输入电压

图 7 为高压侧电压,作为二次侧,这里的电压为感应电压,对应产生 A 相、B 相、C 相幅值为 242 kV,相位差 120°,周期为 20 ms 的电压,波形相位良好,满足额定变比 242 : 13.8。

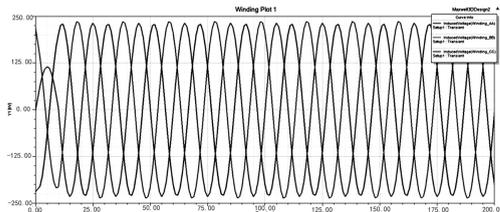


图 7 高压二次侧感应电压

图 8 为绕组上的电流分布,原边电流波形良好,a、c 两相为图中幅值最大的两条波形曲线,其幅值相同,b 相为图中波形较小的波形曲线,幅值减小很多,这是因为变压器铁芯的磁路并不相同,中间 b 相磁路更短,导致空载时电流会小很多,这与电磁物理机理相符,属于正常状态。副边电流本来应该有三条线,但空载试验的高压侧设置为开路,所以理应是电流为零,在图 8 所示中,A、B、C 三相的电流与轴线 0 重合,在图 8 中呈淡蓝色直线,与理论相符合。

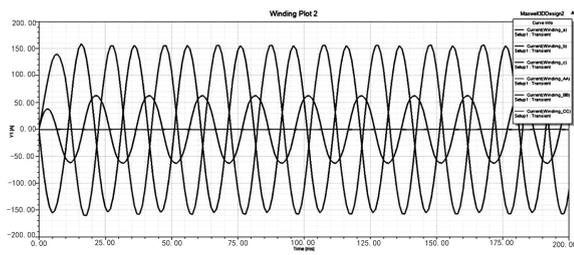


图 8 一二次测电流分布

至此,验证了所有运行参数,设置合理。

### 1.3 主变三相变压器铁芯多点接地仿真

由于变压器铁芯多点接地故障在最初是两点接地,本着尽早发现故障的原则,实验设计为两点接地故障的仿真,模型如图 9。铁芯接地实质上是通过大地让多点相连,仿真实验中以一根铜导线代替大地,模拟两点接地状态的发生。

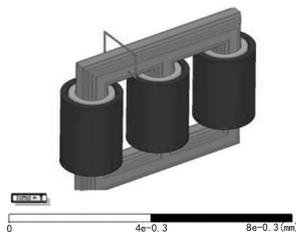


图 9 铁芯两点接地故障模拟示意图

在铁芯正面,上下两边设置的接地点如图 10 铁芯正面示意图, $z_1 - z_{24}$  分别在同一块硅钢片,等距排列;在铁芯侧面,设置的接地点如图 10 铁芯侧面示意图, $y_1$  和  $y_8$  接触点都在侧面, $x_1 - x_9$  接触面都在上面。

设置三组独立对照实验,分别为:

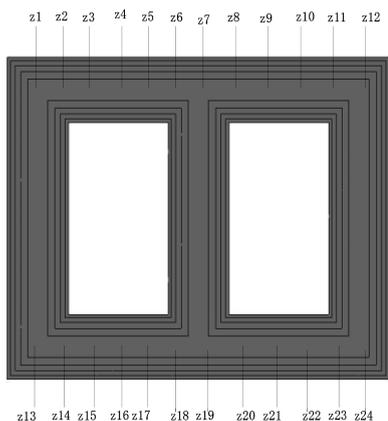
- (1)两个接地点分别为  $z_1 - z_{24}$  中的两个点;
- (2)两个接地点分别为  $x_1 - x_9$  中的两个点;
- (3)两个接地点分别为  $y_1 - y_8$  中的两个点。

实验一探寻铁芯中同一块硅钢片出现多点接地的电流情况,实验二探寻不同硅钢片层数间发生多点接地时,垂直于硅钢片叠装方向接地电流情况,实验三探寻不同硅钢片层数间发生多点接地时,沿硅钢片叠装方向接地电流情况。

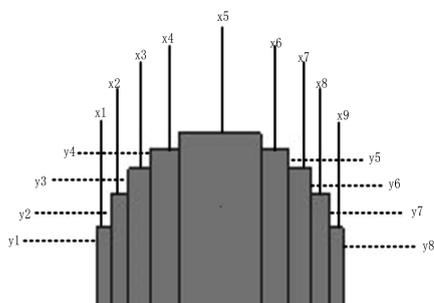
## 2 主变铁芯多点接地故障仿真实验结果

### 2.1 实验一

前半部分实验, $z_1$  固定为一个接地点,依次连接  $z_2、z_3、z_4 \dots z_{12}$ ,进行分布式参数分析,故障电流有效值结果输出,绘制成更加直观的折线统计图,如图 11,图中横坐标从 1 到 11 分别表示  $(z_1, z_2)、(z_1, z_3)、(z_1, z_4) \dots (z_1, z_{12})$  的位置信息,



(a)铁芯正面示意图



(b)铁芯侧面示意图

图 10 故障点设置示意图

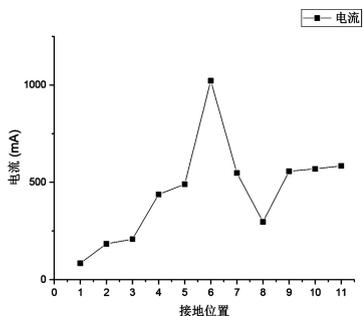


图 11 铁芯正面同边接地点电流趋势图

纵坐标表示电流大小。

由图 11 可以看出,当接地点出现在同一块硅钢片上,且在铁芯绕组的同一边时,随着接地点间距离不断增大,接地电流总体是呈增大趋势;其中,铁芯中芯部分由于有不只一相磁路通过,由此产生的感应磁势也比两边大,所以接地电流相比边缘接地点也会突然增大很多,这也是图中位置 6 电流凸起的原因。

后半部分实验中, $z_1$  固定为一个接地点,依次连接  $z_{13}$ 、 $z_{14}$ …… $z_{24}$ ,其仿真结果绘制折线统计图如图 12 所示,其中横坐标从 1 到 12 分别表示 ( $z_1, z_{13}$ )、( $z_1, z_{14}$ )……( $z_1, z_{24}$ ) 的位置信息,纵坐

标表示电流大小:

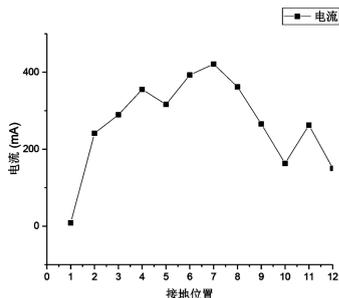


图 12 铁芯正面异边接地点电流趋势图

此处实验模拟在同一硅钢片上,但是分别是上下铁轭发生多点接地的情况。从总体趋势可以看出,接地电流随着两接地点间距离增大呈先增大后减小的趋势;除第一个点外,其余电流在相邻位置间电流差值比较小;前半部分的增大趋势原因同上所述,后半部分下降趋势是由于两接地点间的阻抗增加比感应电势增加更快;而第一个位置由于其设置的特殊性,其连线垂直于地面,接地回路没有磁通通过,造成接地点间没有产生感应电势,所以故障电流几乎为零。

### 2.2 实验二

实验结果直接统计成折线图 13 年示, $x_1$  固定为一个接地点,图中横坐标从 1—8 分别表示 ( $x_1, x_2$ )、( $x_1, x_3$ )……( $x_1, x_9$ ) 的位置信息,纵坐标表示电流大小。

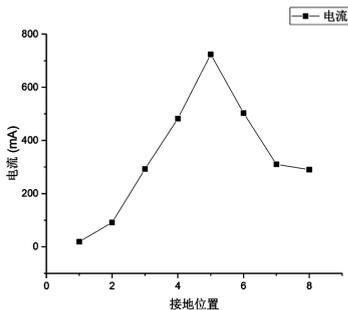


图 13 铁芯上边接地点电流趋势图

由图 13 可知,1—4 点都是位于同一侧,5 为中心点,随着接地点间硅钢片级数增加,故障电流呈明显的增大趋势,且在其中一个接地点到达硅钢叠片中心时达到最大值,之后又由于同样的原因,故障回路间由于硅钢片增加造成阻抗增加速度比感应电势大,所以接地电流又呈减小趋势。

### 2.3 实验三

实验结果直接统计成折线图 14, $y_1$  固定为一

个接地点,图中横坐标从 1—7 分别表示 $(y_1, y_2)$ 、 $(y_1, y_3)$ …… $(y_1, y_8)$ 的位置信息,纵坐标表示电流大小。

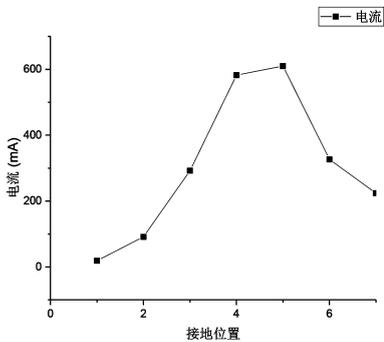


图 14 铁芯侧边接地点电流趋势图

该实验与上面实验一的区别在于接地点接入方式的不同,上面的实验是从垂直于叠装方向接入短路线,这里是从平行于叠装方向接入短路线,区别模拟两种不同接入方式在几乎相同位置造成多点接地故障的电流异同。从折线统计图的趋势可以看出,总体电流趋势没变。随着故障回路间硅钢级数的增加,电流呈先增大后减小的趋势,但是,整体的接地电流比上一个实验要小,也就是从侧面接地硅钢片比从正面接地硅钢片的接地电流要小。

#### 4 结 语

针对变压器铁芯多点接地故障发生率高、不易发现,变压器接地危害性大,接地试验操作难度大特性,推导了变压器铁芯的均匀体等效电导率,并于 Maxwell 电磁仿真软件中搭建了 SFP10-H-135000/220 型变压器的 3D 涡流场模型,设计了多种多点接地故障可能出现的情况,通过有限元仿真获得了一系列故障电流参数,归纳出铁芯

多点接地故障发生在不同接触点上的故障电流发展规律。

从仿真试验总结可知,不同接地面接地点所产生的多点接地故障电流间有很大差异,后续可以借此特征,通过多点接地电流的异同进行故障定位方向的研究。

#### 参考文献:

- [1] Hamzehbahmani H, Anderson P, Hall J, et al. Eddy current loss estimation of edge burr-affected magnetic laminations based on equivalent electrical network-PartI: Fundamental concepts and FEM modeling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29, (2): 576-582.
- [2] Hamzehbahmani H, Anderson P, Hall J, et al. Eddy current loss estimation of edge burr-affected magnetic laminations based on equivalent electrical network-PartII: Analytical modeling and experimental results [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29, (2): 651-659.
- [3] Kaimori H, Kameari A, Fujiwara K. FEM computation of magnetic field and iron loss in laminated iron core using homogenization method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1405-1408.
- [4] Wang Jian, Lin Heyun, Huang Yunkai, et al. A New formulation of anisotropic equivalent conductivity in laminations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1378-1381.
- [5] Wang Jian, Lin Heyun. Numerical analysis of 3D eddy current fields in laminated media under various frequencies[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 267-270.
- [6] 王坚, 林鹤云, 房淑华, 等. 利用等效电导率进行叠片铁心涡流场分析的有效性和准确性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 162-168.
- [7] 周利军, 刘桓成, 高仕斌, 等. 考虑多点接地故障的变压器铁心均匀化建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3709-3716+31.

#### 作者简介:

白 维(1973-),男,四川广安人,硕士,高级工程师,从事电力生产科技、管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 117 页)

准可以满足工程需要。

(2)GIN 法使用单一的稳定性浆液,较之传统的稀浆与浓浆转换更为方便;GIN 法灌浆较为合理,GIN 值为常数,避免了灌浆量过大导致的超灌;同时也能避免灌浆压力过大造成岩石劈裂,相较于传统灌浆技术,更为科学合理。

#### 参考文献:

- [1] 陈进贵. GIN 灌浆法在北非突尼斯默拉大坝项目中的应用 [J]. 水利科技, 2014, (4): 32-34+36.
- [2] 徐建闽,王进城,郭天龙. GIN 法灌浆施工在曼维莱水电站中的运用[C]. 土石坝技术, 2015 年论文集, 2015: 352-356.

- [3] 杨俊志,冯杨文. GIN 法灌浆技术分析及其应用[J]. 水电站设计, 2006, (2): 108-111.

- [4] 李俊刚. GIN 法灌浆技术试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2007, (6): 547-550.

#### 作者简介:

李忠爽(1994-),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,硕士,助理工程师,主要从事岩土工程、工程地质工作;

苏 星(1983-),男,汉族,甘肃庆阳人,高级工程师,从事水电工程地质工作;

周 青(1970-),女,汉族,重庆垫江人,正高级工程师,从事水电站水工设计工作。

(责任编辑:卓政昌)