

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200769

接地变压器低压绕组匝间短路故障的电磁特征研究

咸日常¹, 陈蕾¹, 耿凯², 范慧芳¹, 张冰倩¹, 高鸿鹏¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东汇能电气有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 接地变压器具有系统中性点引出和站用电双重功能, 在我国大中型变电站中被普遍采用, 其运行可靠性直接影响电网的安全稳定。针对接地变压器低压绕组匝间绝缘短路故障检测方法缺失问题, 基于磁场-电路耦合原理, 利用 ANSYS 软件建立接地变压器二维有限元模型。通过对比高、低压侧电流的仿真值与计算值, 验证模型的正确性。在此基础上分析其低压绕组单匝匝间短路故障时的电磁特征。研究表明: 当接地变压器低压绕组发生单匝匝间短路故障时, 短路环内部有很大的短路电流; 电压、电流相位角, 功率因数角以及高、低压侧三相电流均会发生变化, 但电流波动达不到接地变压器保护的动作定值; 同时, 短路环附近的磁场也会发生畸变。

关键词: 接地变压器; 低压绕组; 匝间短路; ANSYS; 电磁特征; 研究

Research on electromagnetic characteristics of short circuit faults in low-voltage windings of grounding transformers

XIAN Richang¹, CHEN Lei¹, GENG Kai², FAN Huifang¹, ZHANG Bingqian¹, GAO Hongpeng¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Huineng Electric Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract: The grounding transformer is widely used in large and medium-sized substations in China since it has the dual functions of system neutral point extraction and station power consumption. Its operational reliability directly affects the safety and stability of the power grid. There is a problem of the lack of a detection method for an inter-turn insulation short-circuit fault of the low-voltage winding of a grounding transformer. Thus this paper builds a two-dimensional finite element model of the grounding transformer based on the magnetic field-circuit coupling principle and by use of ANSYS software. The correctness of the model is verified by comparing the simulated and calculated values of the high and low side currents. The electromagnetic characteristics of its low-voltage winding single-turn inter-turn short-circuit fault are analyzed. Research indicates that when a single-turn inter-turn short circuit fault occurs in the low-voltage winding of a grounding transformer, there is a large short-circuit current inside the short-circuit ring; the voltage, current phase angle, power factor angle, and three-phase currents on the high and low voltage sides change, but the current fluctuation cannot reach the action setting value of the grounding transformer protection; at the same time, the magnetic field near the short-circuit ring is distorted.

This work is supported by the National “13th Five-Year Plan” Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901303).

Key words: grounding transformer; low-voltage winding; inter-turn short circuit; ANSYS; electromagnetic characteristics; research

0 引言

目前我国变电站的主变压器低压绕组一般采用

三角形接线, 在 10~35 kV 电网中没有供接地电阻或消弧线圈接地的中性点。当系统发生单相接地故障时, 若电容电流小于 10 A, 接地电弧可能自行消失。但随着配电网规模的日益增大、配出线路中电力电缆比重增加、环网结构越来越复杂, 致使线路单相接地故障时电容电流急剧增加, 接地电弧不能

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目资助(2016YFB0901303)

自行消失^[1-4]。持续性电弧会产生幅值较高的弧光接地过电压, 对电气设备绝缘造成破坏; 断续性电弧引起的铁磁谐振过电压容易烧毁电压互感器, 严重影响了电力系统的稳定运行^[5-7]。

为防止上述事故的发生, 利用接地变压器人为地制造一个供接地电阻或消弧线圈接地的中性点^[8-9]。我国接地变压器一般采用 ZNyn11 型接线方式, 同时为节省成本和空间, 通过增加第三绕组用于变电站内部供电^[10-11]。可见, 接地变压器具有形成 10~35 kV 电网中性点和给变电站供电两项功能, 在电力系统中具有十分重要的作用。由于接地变压器绕组接线方式和运行要求不同于常规配电变压器, 易发生绕组匝间短路故障, 尤其是低压绕组发生匝间短路故障时往往会引起变电站供电中断并可能扩大事故^[12-13]。因此, 有必要对接地变压器低压绕组匝间短路故障的电磁特征进行研究, 以制定有效的保护和运行控制策略^[14-16]。

目前, 国内外学者对接地变压器及其内部故障分析相对较少, 其研究主要集中在接地变压器等效模型建立方面。文献[17]基于接地变压器原理利用单相三绕组变压器模块搭建了 Z 形接地变压器模型, 但该模型仅能分析引出线故障, 无法对接地变压器的内部故障进行分析; 文献[18]提出一种利用 3 个单相 5 绕组变压器模块搭建接地变压器模型的方法, 并对内部绕组发生单相接地故障和匝间短路故障时的电流变化进行简单分析, 但未考虑低压侧负载的情况^[18]。基于上述分析可知, 针对接地变压器低压绕组匝间短路故障时的电磁特征研究不足, 存在故障检测方法缺失问题。因此, 本文基于磁场-电路耦合原理, 对接地变压器低压绕组匝间短路故障时的电磁特征进行分析, 具有十分重要的意义。

本文以一台型号为 DKSC-650/38.5-100/0.4 的实际接地变压器为研究对象, 基于磁场-电路耦合原理在 ANSYS 软件建立接地变压器二维模型, 对其低压绕组不同位置发生单匝匝间短路故障时的电磁特征进行研究。首先, 根据实际参数建立接地变压器二维模型, 通过对比正常状态下高、低压侧电流的仿真值与计算值, 验证模型的正确性; 在此基础上, 建立接地变压器低压绕组不同位置发生单匝匝间短路故障时的仿真模型, 对比分析了短路电流大小, 电压、电流相位以及功率因数角变化、高低压侧三相电流变化以及磁场的变化规律。

1 磁场-电路耦合模型原理分析

1.1 电路模型

ZNyn11 型接地变压器电气原理图如图 1 所示。

低压绕组采用 Y 型接线方式, 靠近铁芯; 高压绕组采用 Z 型接线方式, 位于低压绕组外侧, 每相绕组分为匝数相等的两部分, 形成中性点后通过消弧线圈或接地电阻接地。

根据接地变压器高、低压侧绕组的耦合关系, 正常运行状态下的等效电路如图 2 所示。

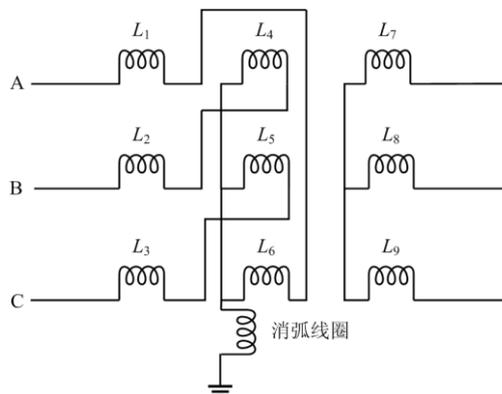


图 1 接地变压器电气原理图

Fig. 1 Electrical schematic of grounding transformer

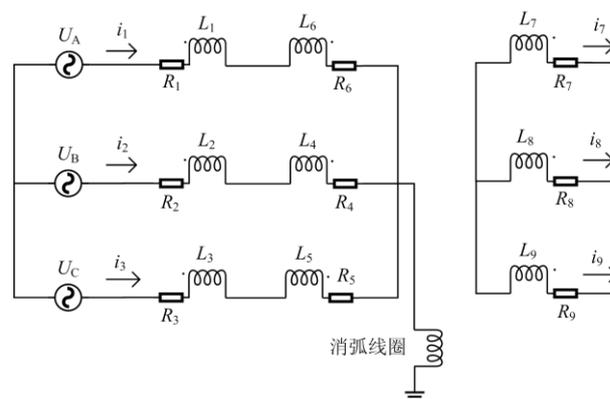


图 2 正常运行状态下的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram under normal operation

图 2 中, U_A 、 U_B 、 U_C 代表三相电压源, i_1 、 i_2 、 i_3 代表接地变压器高压侧三相电流, L_1 、 L_2 、 L_3 分别代表高压侧 A、B、C 三相主绕组的自感, L_6 、 L_4 、 L_5 分别代表高压侧 A、B、C 三相移向绕组的自感, L_7 、 L_8 、 L_9 分别代表低压侧 a、b、c 三相绕组的自感, R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 、 R_9 分别代表对应绕组的等效电阻, i_7 、 i_8 、 i_9 分别代表低压侧三相电流。各个绕组间存在互感, 图中未标出。

基于接地变压器正常状态下的等效电路图, 低压绕组三相电压表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_7 = i_7 R_7 + L_7 \frac{di_7}{dt} + M_{87} \frac{di_8}{dt} + M_{97} \frac{di_9}{dt} + (M_{67} - M_{17}) \frac{di_1}{dt} + (M_{47} - M_{27}) \frac{di_2}{dt} + (M_{57} - M_{37}) \frac{di_3}{dt} \\ u_8 = i_8 R_8 + L_8 \frac{di_8}{dt} + M_{78} \frac{di_7}{dt} + M_{98} \frac{di_9}{dt} + (M_{68} - M_{18}) \frac{di_1}{dt} + (M_{48} - M_{28}) \frac{di_2}{dt} + (M_{58} - M_{38}) \frac{di_3}{dt} \\ u_9 = i_9 R_9 + L_9 \frac{di_9}{dt} + M_{79} \frac{di_7}{dt} + M_{89} \frac{di_8}{dt} + (M_{69} - M_{19}) \frac{di_1}{dt} + (M_{49} - M_{29}) \frac{di_2}{dt} + (M_{59} - M_{39}) \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中： u_7 、 u_8 、 u_9 代表低压绕组电压； M_{ij} 代表第 i 号绕组与第 j 号绕组之间的互感。

当接地变压器低压绕组发生匝间短路故障时，以 a 相为例，等效电路图如图 3 所示。

图 3 中， i'_1 、 i'_2 、 i'_3 代表低压绕组匝间短路时的高压侧三相电流， L'_1 、 L'_2 、 L'_3 分别代表低压绕组匝间短路时高压侧 A、B、C 三相主绕组的自感， L'_6 、 L'_4 、 L'_5 分别代表低压绕组匝间短路时高压侧

A、B、C 三相移向绕组的自感， L_{7a} 、 L_7 、 L_{7c} 代表低压绕组 a 相匝间短路时三部分绕组的自感， L'_8 、 L'_9 分别代表低压绕组匝间短路时低压侧 b、c 相绕组的自感， i'_7 、 i'_8 、 i'_9 代表低压绕组匝间短路时三相电流， R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_{7a} 、 R_7 、 R_{7c} 、 R_8 、 R_9 代表对应绕组的等效电阻。各个绕组间存在互感，图中未标出。此时低压绕组电压表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{7a} = i'_7 R_{7a} + L'_{7a} \frac{di'_7}{dt} + M'_{7c7a} \frac{di'_7}{dt} - M'_{i7a} \frac{di_i}{dt} + M'_{87a} \frac{di'_8}{dt} + M'_{97a} \frac{di'_9}{dt} + (M'_{67a} - M'_{17a}) \frac{di'_1}{dt} + (M'_{47a} - M'_{27a}) \frac{di'_2}{dt} + (M'_{57a} - M'_{37a}) \frac{di'_3}{dt} \\ 0 = i_i R_i + L'_i \frac{di'_i}{dt} - M'_{7ai} \frac{di'_7}{dt} - M'_{7ci} \frac{di'_7}{dt} - M'_{8i} \frac{di'_8}{dt} + M'_{9i} \frac{di'_9}{dt} + (M'_{1i} - M'_{6i}) \frac{di'_1}{dt} + (M'_{2i} - M'_{4i}) \frac{di'_2}{dt} + (M'_{3i} - M'_{5i}) \frac{di'_3}{dt} \\ u_{7c} = i'_7 R_{7c} + L'_{7c} \frac{di'_7}{dt} + M'_{7a7c} \frac{di'_7}{dt} - M'_{i7c} \frac{di_i}{dt} + M'_{87c} \frac{di'_8}{dt} + M'_{97c} \frac{di'_9}{dt} + (M'_{67c} - M'_{17c}) \frac{di'_1}{dt} + (M'_{47c} - M'_{27c}) \frac{di'_2}{dt} + (M'_{57c} - M'_{37c}) \frac{di'_3}{dt} \\ u'_8 = i'_8 R_8 + L'_8 \frac{di'_8}{dt} + M'_{7a8} \frac{di'_7}{dt} + M'_{7c8} \frac{di'_7}{dt} - M'_{i8} \frac{di_i}{dt} + M'_{98} \frac{di'_9}{dt} + (M'_{68} - M'_{18}) \frac{di'_1}{dt} + (M'_{48} - M'_{28}) \frac{di'_2}{dt} + (M'_{58} - M'_{38}) \frac{di'_3}{dt} \\ u'_9 = i'_9 R_9 + L'_9 \frac{di'_9}{dt} + M'_{7a9} \frac{di'_7}{dt} + M'_{7c9} \frac{di'_7}{dt} - M'_{i9} \frac{di_i}{dt} + M'_{89} \frac{di'_8}{dt} + (M'_{69} - M'_{19}) \frac{di'_1}{dt} + (M'_{49} - M'_{29}) \frac{di'_2}{dt} + (M'_{59} - M'_{39}) \frac{di'_3}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中： u'_8 、 u'_9 代表故障后低压绕组 b、c 相电压； u_{7a} 、 u_{7c} 代表短路环的上下两部分绕组电压； M'_{ij} 代表第 i 号绕组与第 j 号绕组之间的互感。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (3)$$

式中： μ 为磁导率； \mathbf{J} 为电流密度矢量。

变压器的磁链方程为

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L}_s(t, \mathbf{i}) \times \mathbf{i} \quad (4)$$

式中： $\boldsymbol{\psi}$ 为磁链向量； \mathbf{i} 为绕组电流向量； \mathbf{L}_s 为静态电感矩阵。

由 $\mathbf{u} = \frac{d\boldsymbol{\psi}}{dt}$ 可知变压器时域电路微分方程为

$$\mathbf{u} = \left(\frac{d\mathbf{L}_s}{dt} \mathbf{i} + \mathbf{L}_s \right) \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{U}_Z = \mathbf{L}_D(\mathbf{i}) \frac{d\mathbf{i}}{dt} + \mathbf{U}_Z \quad (5)$$

式中： \mathbf{u} 为交流电压向量； \mathbf{U}_Z 为直流电压向量； \mathbf{L}_D 为动态电感矩阵。

当绕组中电流增量为 $d\mathbf{i}_j$ 时，根据磁场能量计算公式可得

$$\begin{cases} dW_1 = \frac{1}{2} M_{Djk} di_j di_k \quad j, k = 1, 2 \\ dW_2 = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \times d\mathbf{H} \end{cases} \quad (6)$$

式中： dW_1 、 dW_2 分别代表电路和磁场能量增量；

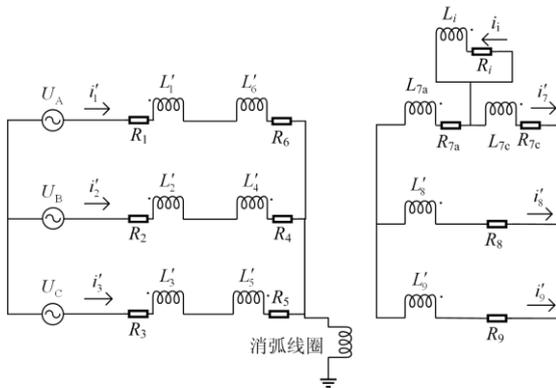


图 3 低压绕组 a 相匝间短路时的等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of low-voltage winding a-phase inter-turn short circuit

1.2 磁场模型

基于矢量磁位 \mathbf{A} 棱边有限元法计算动态电感矩阵^[19-20]。磁场模型如式(3)所示。

$d\mathbf{B}$ 、 $d\mathbf{H}$ 分别代表 $d\mathbf{i}$ 引起的磁感应强度和磁场强度变化; M_{Djk} 为绕组电感参数, j 、 k 为绕组编号。

根据能量守恒原理, 求解式(6)即可得到绕组时域电感参数矩阵 L_D [21-22]。将时域电感参数 L_D 代入式(1)和式(2), 即可求解 t_b 时刻电流 i_b , 利用龙格库塔法的中点公式, 得到 t_{b+1} 时刻的电流 i_{b+1} , 如式(7)所示。

$$i_{b+1} = i_b + h(f(t_b + \frac{h}{2}, i_b + \frac{h}{2}f(t_b, i_b))) \quad (7)$$

式中: h 为时间步长; i_b 为电流列向量。

1.3 磁场-电路迭代求解过程

接地变压器低压绕组匝间短路迭代求解过程如下:

1) 将接地变压器低压绕组某时刻电流 i_b 代入磁场模型, 通过式(6)计算绕组之间的自感与互感。

2) 将求得的自感和互感参数代入式(1)、式(2)中, 可得 t_b 时刻的绕组电流 i_b , 并利用式(7)求得 t_{b+1} 时刻的电流 i_{b+1} 。

3) 将 i_{b+1} 代入磁场模型, 计算下一时刻绕组之间的自感与互感。

2 模型建立与验证

2.1 仿真模型的建立

选择一台型号为 DKSC-650/38.5-100/0.4 的实际接地变压器为研究对象, 铭牌技术参数和模型尺寸参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 接地变压器铭牌技术参数

Table 1 Nameplate technical parameters of grounding transformer

参数	参数值	参数	参数值
型号	DKSC-650/38.5-100/0.4	联结组别	ZNyn11
额定容量	650 kVA/100 kVA	频率	50 Hz
额定电压	38.5×2±2.5% kV/0.4 kV	装置种类	户内式
额定电流	9.7 A/144.3 A	冷却方式	自冷

表 2 接地变压器模型尺寸参数

Table 2 Dimensional parameters of grounding transformer model

参数	参数值/ mm	参数	参数值/ mm
铁芯直径	220	高压移向绕组内半径	216
铁轭高	220	高压移向绕组外半径	232
铁芯窗高	1 210	高压主绕组内半径	278
低压绕组内半径	112.5	高压主绕组外半径	294
低压绕组外半径	119.5	层间绝缘	4×0.23

在 ANSYS 软件中基于 1:1 的比例建立接地变压器二维模型, 高压绕组每相两部分各有 7 层, 每层 150 匝; 低压绕组每相两层, 每层 9 匝; 高、低

压绕组层间绝缘均采用玻璃纤维布带, 如图 4 所示, 铁芯采用 30Q130 型号硅钢片。利用外电路将各相绕组按 ZNyn11 联结方式连接, 并施加 38.5 kV 的线电压有效值作为激励, 如图 5 所示。

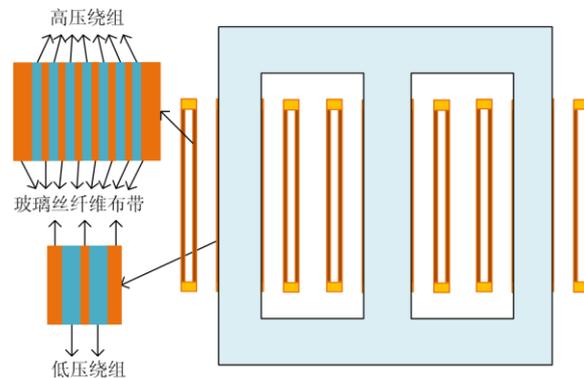


图 4 接地变压器二维模型

Fig. 4 Two-dimensional model of grounding transformer

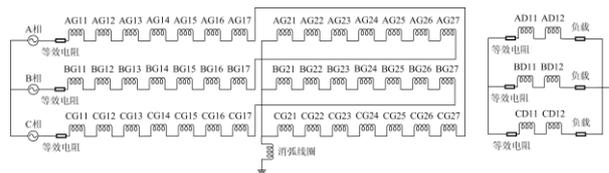


图 5 外电路接入接地变压器的电路图

Fig. 5 Circuit diagram of external circuit connected to grounding transformer

2.2 模型验证

利用 ANSYS 软件中建立的接地变压器二维模型对正常状态下高、低压侧相电流有效值进行仿真计算, 将仿真得到的数值与计算值比较, 如表 3 所示。

表 3 高、低压侧电流仿真值与计算值对比

Table 3 Comparison of simulation value and calculated value of high and low side current

	参数	仿真值/A	计算值/A	误差/%
高压侧	A 相电流	1.493 7		0.25
	B 相电流	1.489 2	1.49	-0.05
	C 相电流	1.459 9		-2
低压侧	a 相电流	147.686		2.3
	b 相电流	144.238 4	144.3	-0.04
	c 相电流	144.680 6		-0.26

由表 3 可知, 低压侧电流计算值与仿真测量值最大误差为 2.3%, 最小为 -0.04%; 高压侧电流计算值与仿真测量值最大误差为 -2%, 最小为 -0.05%。验证了接地变压器二维模型的正确性与可行性。

3 低压绕组匝间短路故障的电磁特征分析

接地变压器低压绕组共两层, 每层缠绕九匝线

圈，基于线匝在结构上的对称分布，下面分别对不同层绕组第一匝至第五匝发生单匝匝间短路故障时的电磁特征进行分析。

3.1 短路电流分析

当低压绕组不同位置发生单匝匝间短路故障时，短路电流大小如图 6 所示。

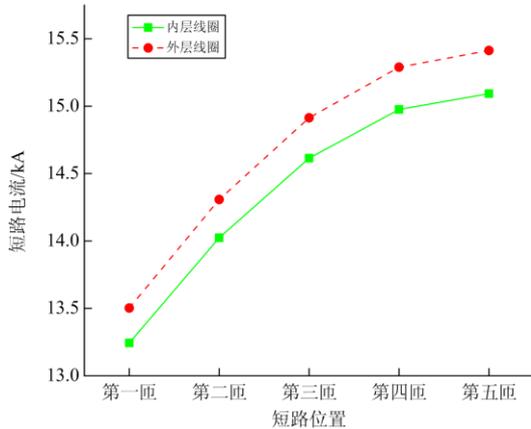


图 6 短路电流大小分析

Fig. 6 Analysis of short-circuit current

由图 6 可知，当接地变压器低压绕组发生单匝匝间短路故障时，短路电流在 13~15.5 kA 范围内，是低压侧额定电流的 100 倍左右。当同一层绕组不同匝间发生短路故障时，短路位置越靠近绕组横向轴对称处，短路电流越大，但短路电流大小的变化速度逐渐减慢；当不同层绕组同一高度发生单匝匝间短路故障时，内层绕组故障时的短路电流比外层绕组故障时的短路电流小，且越靠近绕组横向轴对称处，两者相差越大。这主要是由于短路位置越靠近绕组横向轴对称处，绕组之间的耦合作用强，短路电流越大。

3.2 电压、电流相位和功率因数角分析

当低压绕组发生单匝匝间短路故障时，由于绕组间的耦合关系发生变化，电压、电流的相位和功率因数角发生变化，仿真试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知，当低压绕组发生单匝匝间短路故障时，电压、电流相位和功率因数角都增大。当同一层绕组不同匝间发生短路故障时，电压、电流相位和功率因数角随短路位置靠近绕组横向轴对称处逐渐增大，但增长速度逐渐减慢。其中电压相位角变化最大，在 4.5~8.5° 之间，电流相位角变化最小，在 1.2~3° 之间。当不同层绕组同一高度发生单匝匝间短路故障时，外层绕组短路时的电压、电流相位变化量以及功率因数角变化比内层绕组短路时大，

且越靠近绕组横向轴对称处，两者差的越大。

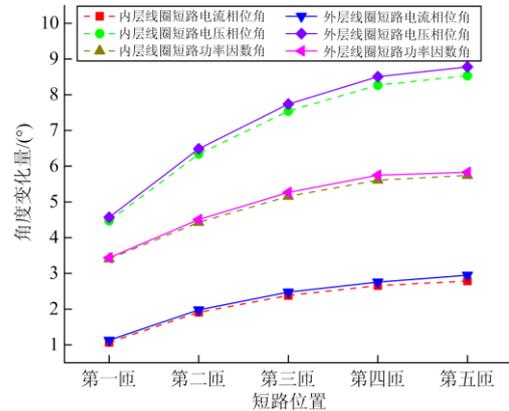


图 7 相位角变化量与短路位置的关系

Fig. 7 Relationship between phase angle change and short-circuit position

3.3 电流大小分析

当低压绕组发生单匝匝间短路故障时，高、低压侧电流大小分别如图 8 和图 9 所示。

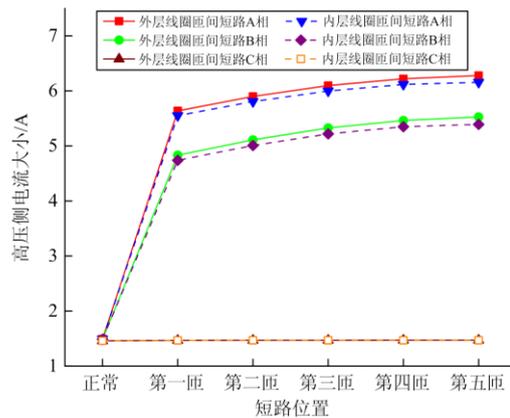


图 8 高压侧三相电流

Fig. 8 High-voltage three-phase current

由图 8 可知，当低压绕组发生单匝匝间短路故障时，A 相电流增大，是正常状态下 A 相电流的 4 倍左右；B 相电流亦增大，但小于 A 相电流，是正常状态下的 3.6 倍左右，且短路位置越靠近绕组横向轴对称处，A、B 相电流变化越大。当短路位置高度相同时，外层绕组发生匝间短路时的高压侧 A、B 相电流比内层绕组短路时变化更大，C 相电流几乎没有变化。这主要是由于低压侧发生匝间短路故障，有功功率损耗增加。在高压侧电压一定情况下，高压侧电流会变大。

由图 9 可知，低压侧 a、b 相电流减小，a 相减小最大；c 相电流有略微波动。

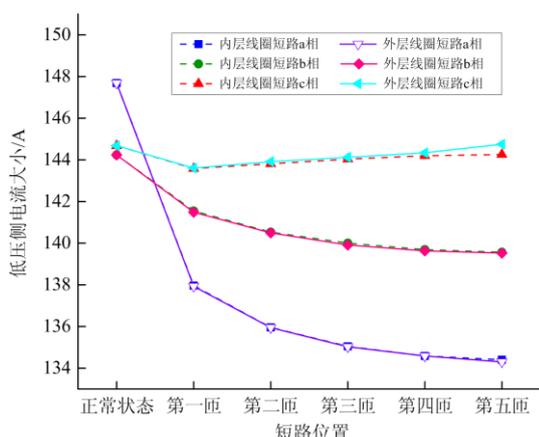


图 9 低压侧三相电流

Fig. 9 Low-voltage three-phase current

干式接地变压器继电保护装置的基本配置为电流速断保护和过电流保护^[23-24]。根据以上仿真分析发现,接地变压器低压侧发生单匝匝间短路故障时,高压侧电流增大,但达不到接地变压器高压侧的额定电流,电流速断保护和过电流保护灵敏度不够,无法对低压绕组匝间短路故障起到保护作用。同时,低压侧电流变化较小,低压侧保护亦不动作。这主要是由于接地变压器高低压侧容量相差较大导致的。接地变压器高压侧容量等于低压侧容量加消弧线圈容量,在不发生单相接地故障的前提下,消弧线圈电压为 0,处于不工作状态。因此,在接地变压器正常运行时,高压侧实际电流比额定电流小很多,即使低压侧发生单匝匝间短路故障,导致高压侧电流变大,但也达不到过电流保护和电流速断保护的定值,无法起到保护作用。

因此,接地变压器低压绕组发生单匝匝间短路故障时,由于存在继电保护死区,无法切除故障,会导致单匝匝间短路故障发展成多匝线圈短路故障,直至接地变压器烧毁,接地变压器运行中的故障案例也恰恰如此。

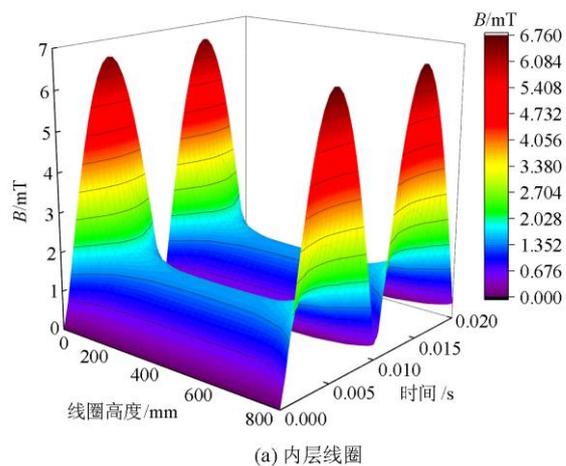
3.4 磁场分析

当接地变压器低压绕组发生单匝匝间短路故障时,由于短路环内部有较大的短路电流,导致周围磁场发生畸变。下面以低压侧内层绕组发生单匝匝间短路故障为例,仿真分析第一匝、第三匝、第五匝分别发生匝间短路故障时内外两层线圈轴向上的漏磁感应强度大小。

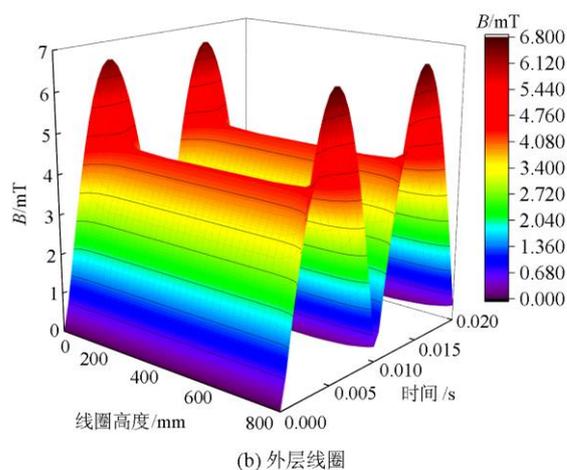
正常情况下,低压绕组内外两层绕组轴向方向上漏磁感应强度如图 10 所示。

由图 10 所示,低压绕组轴向上内层线圈漏磁感应强度在端部较大,为 6.7 mT;中间较小。外层绕

组也是端部较大,为 6.8 mT,中间较小。同一高度处外层线圈的漏磁感应强度大于内层线圈的漏磁感应强度。



(a) 内层线圈



(b) 外层线圈

图 10 低压绕组轴向漏磁感应强度大小

Fig. 10 Magnitude of axial magnetic flux leakage intensity of low voltage winding

当接地变压器低压绕组内层线圈的第一匝、第三匝、第五匝分别发生匝间短路故障时,内外两层绕组轴向上的漏磁感应强度大小分别如图 11—图 13 所示。

由图 11 可知,当内层绕组第一匝发生匝间短路故障时,短路环附近漏磁感应强度剧增,为 311 mT;外层绕组首端靠近短路环,漏磁感应强度也变大,为 284 mT。

由图 12 和图 13 可知,当接地变压器低压绕组内层绕组第三匝、第五匝分别发生匝间短路故障时变化规律与第一匝匝间短路时一致。短路环附近漏磁感应强度剧增,且外层绕组相邻位置的漏磁感应强度也增大。

由图 11—图 13 对比可得，内层绕组短路位置越靠近绕组横向轴对称处，漏磁感应强度越大。

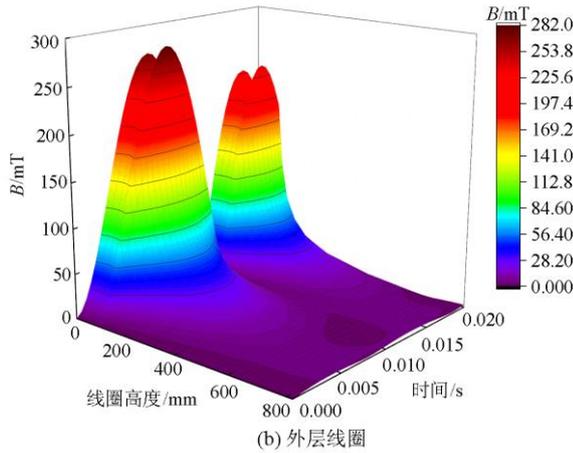
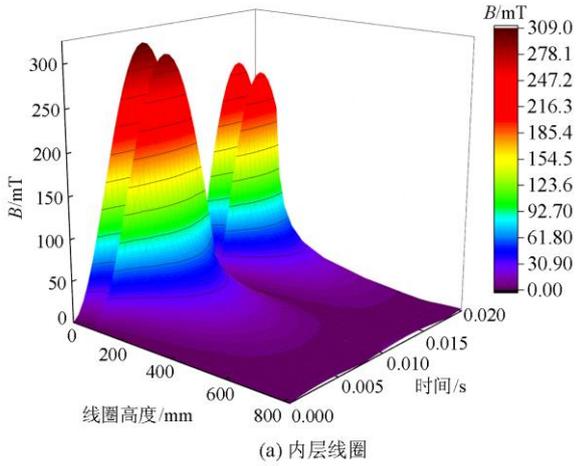


图 11 低压绕组第一匝线圈短路故障时轴向漏磁感应强度大小

Fig. 11 Magnitude of axial magnetic flux leakage intensity of short-circuit fault in the first turn of low voltage winding

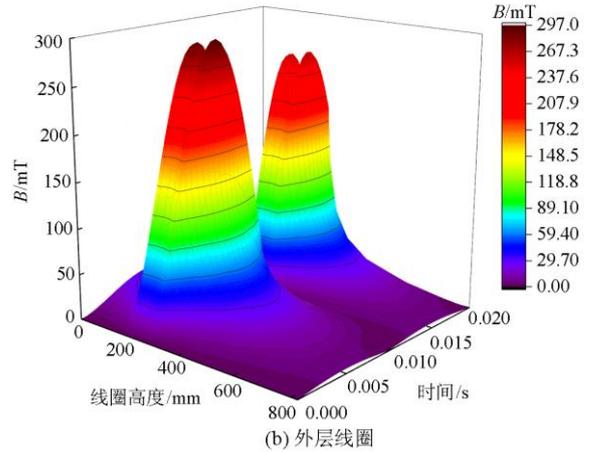
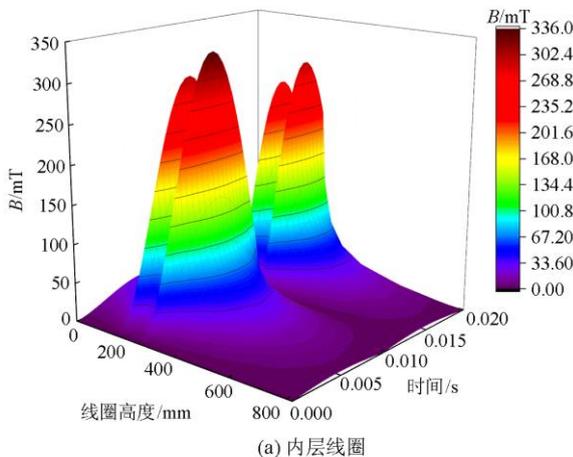


图 12 低压绕组第三匝线圈短路故障时漏磁感应强度的大小

Fig. 12 Magnitude of axial magnetic flux leakage intensity of short-circuit fault in the third turn of low voltage winding

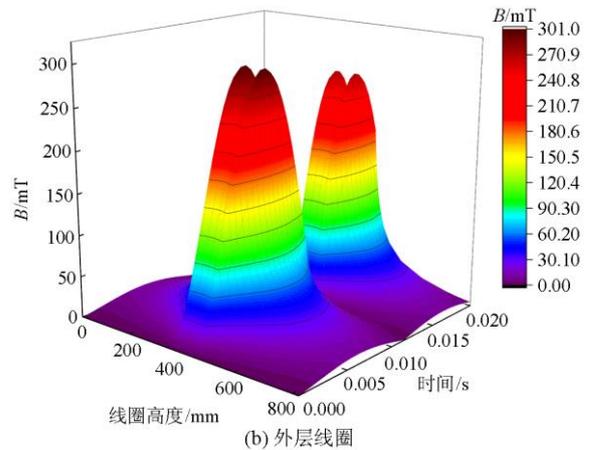
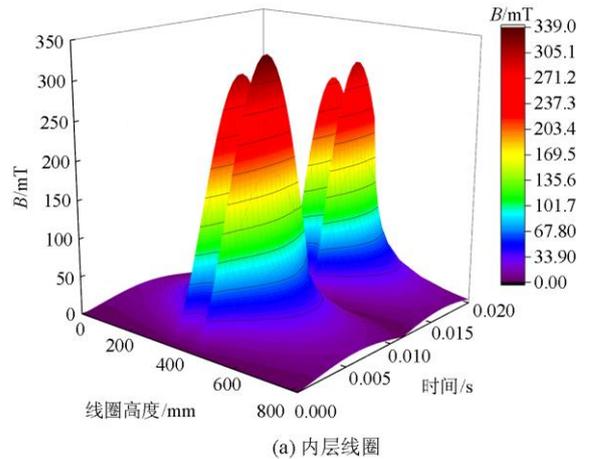


图 13 低压绕组第五匝线圈短路故障时漏磁感应强度的大小

Fig. 13 Magnitude of axial magnetic flux leakage intensity of short-circuit fault in the fifth turn of low voltage winding

4 结论

本文基于磁场-电路耦合原理,对实际运行的接地变压器建立有限元仿真模型,对低压绕组单匝匝间短路故障时的电磁特征进行了分析研究,得出以下结论:

1) 当接地变压器低压绕组同一层发生单匝匝间短路故障时,短路位置越靠近绕组横向轴对称处,短路电流越大,但增长速度逐渐减慢;当不同层绕组相同高度发生单匝匝间短路故障时,内层绕组故障时的短路电流比外层绕组故障时小。

2) 电压、电流相位和功率因数角随短路位置由绕组端部向横向轴对称处靠近而逐渐增大,其中电压相位变化最大。当绕组不同层线圈相同高度发生单匝匝间短路故障时,外层绕组故障比内层绕组故障对电压、电流相位和功率因数角影响更大,且越靠近绕组横向轴对称处,两层间差的角度越大。

3) 接地变压器低压 a 相绕组匝间短路故障时,高压侧 A、B 相电流变大且 A 相电流变化最大, C 相电流基本不变,三相电流都小于铭牌额定电流值,达不到电流速断保护和过电流保护的定值;低压侧电流 a、b 相电流减小, c 相略有波动,但也达不到低压侧保护的定值。因此,实际运行的接地变压器在低压侧发生绕组单匝匝间短路故障时存在保护死区。

4) 故障绕组短路环处漏磁感应强度剧增,同时,另一层绕组的相同高度处的漏磁感应强度也相应变大,且短路位置越靠近绕组横向轴对称处,其漏磁感应强度越大。

本文研究结论可对接地变压器状态监测及保护整定提供参考。

参考文献

- [1] 张瑞, 王克杰. 断路器合闸输电线路单相接地短路故障线路两侧短路电流计算与分析[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 33-37, 43.
ZHANG Rui, WANG Kejie. Calculation and analysis of short circuit current on two sides of single-phase grounding fault line of circuit-breakers closing transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 33-37, 43.
- [2] 贾巍, 雷才嘉, 葛磊蛟, 等. 城市配电网的国内外发展综述及技术展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 158-168, 175.
JIA Wei, LEI Caijia, GE Leijiao, et al. Overview on domestic and international development of urban distribution network and technical prospect[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 158-168, 175.
- [3] XIAO Y, OUYANG J, XIONG X, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 111-123. DOI: 10.1186/s41601-020-00156-w.
- [4] 张振宇, 程诺, 罗翔, 等. 10 kV 配电网高温超导电缆电热耦合模型仿真分析[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 203-209.
ZHANG Zhenyu, CHENG Nuo, LUO Xiang, et al. Electrical-thermal coupling model analysis of high temperature superconducting power cable utilized in 10 kV power distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 203-209.
- [5] 唐国庆, 唐磊, 林炯, 等. 小电阻接地系统中性点故障分析及管控措施[J]. 电工技术, 2020(5): 92-94.
TANG Guoqing, TANG Lei, LIN Jiong, et al. Neutral point fault analysis and control measures for small resistance grounding system[J]. Electric Engineering, 2020(5): 92-94.
- [6] OPAK H, ALI T, JERGOVI S. Influence of grounding transformer on ground fault current in MV networks[J]. 2017(1): 733-737.
- [7] 颜雅迪, 何柏娜, 孟涛, 等. 特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 78-86.
XIE Yadi, HE Baina, MENG Tao, et al. Research on secondary arc characteristics of UHV lines with high compensation degree series compensation degree series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 78-86.
- [8] 唐映媚. 浅析接地变的作用及保护的配置[J]. 科学技术创新, 2020(17): 152-153.
TANG Yingmei. Analysis of the role of grounding transformer and the configuration of protection[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2020(17): 152-153.
- [9] SHEN M, INGRATTA L, ROBERTS G. Grounding transformer application, modeling, and simulation[C] // Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA.
- [10] EDUFUL G, MENSAH G. Sizing and selection of grounding transformers-decision criteria[C] // 2011 World Congress on Sustainable Technologies (WCST). November 7-10, 2011, London, UK.
- [11] 汪兴. 发电机机端电压互感器匝间短路引起的过励磁保护动作分析[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 79-85.
WANG Xing. Operation analysis of over-excitation protection due to voltage transformer inter-turn short-circuit

- at generator terminal[J]. Electric Power, 2019, 52(9): 79-85.
- [12] 张俊杰, 刘兰荣, 刘东升, 等. 用场路耦合模拟变压器绕组部分短路故障电流的方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 65-70.
ZHANG Junjie, LIU Lanrong, LIU Dongsheng, et al. A method of simulating the fault current using field-circuit coupling for partially short-circuited transformer winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 65-70.
- [13] 黄小华, 孔宪国, 姚艺新, 等. 一起接地变压器雷电冲击试验故障分析[J]. 变压器, 2020, 57(1): 79-83.
HUANG Xiaohua, KONG Xianguo, YAO Yixin, et al. Fault analysis of grounding transformer lightning impact test[J]. Transformer, 2020, 57(1): 79-83.
- [14] 吴书煜, 马宏忠, 姜宁, 等. 基于多物理场耦合的高压电抗器温度场仿真与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 17-24.
WU Shuyu, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Simulation and analysis of temperature field of high voltage reactor based on multi physical field coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 17-24.
- [15] 甘源, 白锐, 张琪. 基于场-路耦合的干式空心电抗器稳态电磁场及电动力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 144-149.
GAN Yuan, BAI Rui, ZHANG Qi. Steady-state electromagnetic field and electrodynamic analysis of dry-type air-core reactor based on field-circuit coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 144-149.
- [16] 魏新劳, 朱博, 聂洪岩, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘故障位置与电气参数之间关系[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 71-79.
WEI Xinlao, ZHU Bo, NIE Hongyan, et al. Relationship between electrical parameters and turn-to-turn insulation fault position of dry-type air-core reactor[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 71-79.
- [17] 蒋仁江, 英云龙, 秦志成, 等. Z型接地变压器在PSCAD下的仿真模型构建[J]. 价值工程, 2015, 34(29): 137-138.
JIANG Renjiang, YING Yunlong, QIN Zhicheng, et al. Simulation model of Zigzag grounding transformer by PSCAD[J]. Value Engineering, 2015, 34(29): 137-138.
- [18] 曾祥君, 陶金, 郭璞维, 等. 接地变压器故障仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(3): 47-53.
ZENG Xiangjun, TAO Jin, GUO Puwei, et al. Simulation analysis for grounding transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(3): 47-53.
- [19] 史海涛, 王建元, 蔡国伟, 等. 变压器电磁耦合模型中动态电感的计算方法[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(8): 69-74.
SHI Haitao, WANG Jianyuan, CAI Guowei, et al. Dynamic inductance computation in electromagnetic coupled model of transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(8): 69-74.
- [20] 潘超, 米俭, 蔡国伟, 等. 交直流混杂环境下变压器漏电感参数分析方法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 25-33.
PAN Chao, MI Jian, CAI Guowei, et al. Analysis method of leakage inductance parameters under AC/DC hybrid environment in transformer[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(5): 25-33.
- [21] 潘超, 石文鑫, 孟涛. 单相变压器匝间短路电磁特性研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1839-1856.
PAN Chao, SHI Wenxin, MENG Tao. The electromagnetic vibration characteristics of single-phase transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1839-1856.
- [22] 刘天舒, 苏昊, 潘超. 交直流混杂环境下三相变压器绕组振动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 61-68.
LIU Tianshu, SU Hao, PAN Chao. Research on winding vibration of a three-phase transformer under an AC/DC hybrid environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 61-68.
- [23] DETJEN E R, SHAH K R. Grounding transformer applications and associated protection schemes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(4): 788-796.
- [24] 赵世杰, 兰文光, 钟磊, 等. 接地变压器及其保护原理分析[J]. 科学技术创新, 2020(30): 164-165.
ZHAO Shijie, LAN Wenguang, ZHONG Lei, et al. Analysis of grounding transformer and its protection principle[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2020(30): 164-165.

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-12-31

作者简介:

咸日常(1965—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统过电压、电气设备在线监测与故障诊断技术; E-mail: xianrc@163.com

陈蕾(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断技术; E-mail: 985207494@qq.com

耿凯(1982—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为高压与绝缘技术. E-mail: gengkai_2003@163.com

(编辑 周金梅)