

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250109

基于漏磁场相位变化特征的变压器绕组早期故障保护研究

邓祥力¹, 刘美含², 曾平³, 周德生³, 杜焯鑫³, 冯倩³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网技术学院, 山东 济南 250002;
3. 国网上海市电力公司, 上海 200437)

摘要: 针对传统变压器保护难以有效识别变压器绕组轻微匝间短路类早期故障的问题, 提出一种基于漏磁场相位变化特征的变压器绕组早期故障保护方案。首先, 建立非理想绕组结构变压器漏磁场解析模型, 计算分析绕组故障前后漏磁分布变化规律。然后, 结合漏磁相位突变量、不同测点漏磁相位差等故障分量及漏磁幅值比信息, 提出漏磁相位差动保护判据和故障定位逻辑, 避免了温度对光纤测量系统的影响。并利用漏磁场解析模型进行保护动作定值整定。最后, 通过动模实验与有限元仿真模型验证了所提早期故障判别与定位方案的可行性和有效性。
关键词: 非理想绕组变压器; 漏磁场; 相位变化; 早期故障保护

Research on early fault protection of transformer windings based on leakage magnetic field phase change characteristic

DENG Xiangli¹, LIU Meihan², ZENG Ping³, ZHOU Desheng³, DU Zhaoxin³, FENG Qian³

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: To address the difficulty of traditional transformer protection in effectively identifying early-stage faults such as minor inter-turn short circuits in transformer windings, this paper proposes an early fault protection scheme for transformer windings based on the phase change characteristics of the leakage magnetic field. First, an analytical model of the leakage magnetic field for a transformer with a non-ideal winding structure is established, and the variation of magnetic leakage distribution before and after winding failures is analyzed. Then, by combining the fault components such as magnetic leakage phase mutation, phase differences among multiple measuring points, and leakage amplitude ratio, a leakage phase differential protection criterion and a fault location logic are proposed, effectively avoiding the influence of temperature on the optical fiber measurement system. The leakage magnetic field analytical model is also used for setting the operating thresholds of the protection scheme. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed early fault identification and location scheme are verified by dynamic model experiments and finite element simulations.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 520940240037).

Key words: non-ideal winding transformer; leakage magnetic field; phase change; early fault protection

0 引言

变压器是电力系统电压变换和电能传输的关键枢纽设备, 其运行状态对电力系统的安全稳定运行具有重大影响^[1-2]。研究变压器早期故障诊断方法, 及时发现变压器早期故障状态并采取相应保护措施隔离故障, 对于保障电网安全运行、维护供电可靠性具有重要意义。

由于变压器抗短路能力不足, 变压器受到外部短路故障冲击后内部绕组易发生松动变形、匝间绝缘破损, 引发变压器绕组短路故障^[3-4]。据统计, 绕组匝间短路在变压器绕组故障中约占 50%~60%^[5]。工程上, 一般采用瓦斯保护和差动保护作为变压器的主保护。然而, 传统的差动保护针对绕组轻微匝间短路灵敏度较低, 油浸式变压器轻微匝间短路由瓦斯保护反应^[6], 但干式变压器没有绝缘油, 发生轻微匝间短路故障时差动电流小于动作电流, 保护不动作, 且故障发展迅速, 差动保护具有动作延时, 将进一步导致层间短路、相间短路, 甚至烧毁变压

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(520940240037);
国家自然科学基金项目资助(51777119)

器,造成严重经济损失,威胁电网安全。如果绕组故障早期即能够可靠检测,将有充足的时间停运变压器,避免严重故障的发生。研究发现,变压器发生轻微匝间短路故障时,短路匝电流高达额定电流的数十倍^[7-8],漏磁的空间分布受到短路匝电流和故障位置的影响会发生显著变化,因此,可利用漏磁场变化特征实现变压器轻微匝间短路故障的判别。

目前,利用漏磁场作为故障特征的变压器保护研究已取得一定进展。文献[9]将多工况变压器漏磁信号负载归一化,使用卷积神经网络对二维漏磁图形进行特征提取并分析绕组故障。文献[10]通过改进长鼻浣熊算法,寻找残差神经网络最优超参数,构建了漏磁故障诊断模型。但上述文献所提变压器保护均基于数据驱动算法,未从物理意义的角度对绕组故障前后漏磁分布规律的变化及原因进行理论分析,且严重依赖精确的有限元模型和大量实验数据训练机器学习模型,训练过程复杂,容易出现过拟合或欠拟合问题,影响保护灵敏性与可靠性。文献[11-12]仿真研究了变压器绕组发生匝间短路故障时的电磁参数变化特征及分布规律,为基于漏磁信息的匝间故障辨识提供了参考。文献[13]分析得到故障后变压器漏磁分布不再对称,提出了判别故障并识别故障相的方案,但该方案无法识别绕组中部故障。文献[14]建立了变压器电路-漏磁场解析模型,利用解析模型与物理实体之间的漏磁特征差异对绕组早期故障进行识别。

上述文献充分说明以漏磁场分布变化作为特征量在识别变压器绕组的早期故障中具有可行性,但以上针对漏磁解析模型的研究均是基于理想绕组结构变压器的单相绕组,未考虑非理想绕组漏磁场不对称及其他两相绕组对漏磁分布的影响。此外,实际工程应用中还必须要考虑漏磁测量问题。

现有基于漏磁信息的变压器保护研究中,漏磁的测量元件主要是霍尔传感器、线圈传感器、光纤磁场传感器^[15-17]。其中,霍尔传感器、线圈传感器为金属传感器,安装较为困难且具有短路风险。磁光晶体式光纤磁场传感器^[18]与其他光纤传感器相比具有体积小、绝缘性能好、灵敏度高优点,但高温环境下稳定性较差,目前没有成熟的温度解调、补偿方法,且幅值信息受温度干扰较大,易引发保护装置误动,但漏磁测量时相位信息基本不受温度影响,如果充分利用可以提高保护动作的可靠性。

综上所述,本文提出一种基于漏磁相位变化特征的非理想绕组变压器早期故障保护方案。首先,建立了计及变压器三相绕组及非理想绕组结构的漏磁场解析模型。然后,对正常和匝间短路故障时的

漏磁相位分布规律进行计算分析,并进一步提出基于漏磁相位差动的保护判据和绕组故障定位逻辑,避免了温度对保护可靠性的影响。最后,通过 Ansys 仿真软件和动模实验验证了所提方案能够不受励磁涌流、区外故障的影响,快速、灵敏地判别变压器绕组轻微匝间短路故障,并确定故障位置。

1 变压器漏磁场解析模型建立

1.1 变压器绕组正常工况下漏磁场分布模型

为研究非理想绕组变压器正常运行与早期故障状态下的漏磁分布特征差异,综合考虑三相绕组对空间磁场分布的影响,建立非理想绕组变压器漏磁场解析模型,对变压器正常工况下磁场的空间分布特征进行分析。

本文所述非理想绕组变压器几何结构剖面图如图 1 所示,变压器高、低压绕组的高度不同,且高压绕组非密绕,线饼之间存在空气间隙,具体电气参数见附录 A 表 A1。

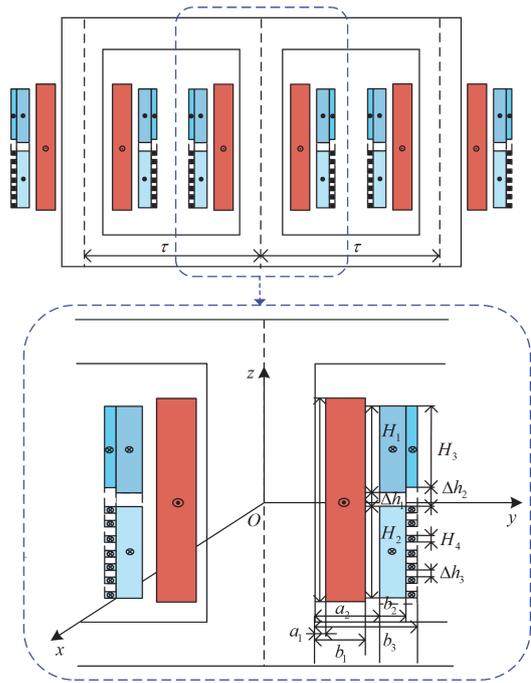


图 1 非理想绕组变压器几何结构剖面图

Fig. 1 Geometry profile of non-ideal winding transformer

为便于分析变压器内部磁场分布情况,以变压器 B 相铁芯几何中心为原点建立三维直角坐标系,对空间中任意点 $M(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁场进行分析,将 A、B、C 三相绕组在空间中任意点产生的磁场分解为各相高、低压绕组导体层的叠加分量。

根据毕奥-萨伐尔定律,以 B 相低压绕组在点 M 处产生的磁场为例,对单段绕组中电流元产生的

径向磁场 dB_y 进行分析^[19], 具体推导过程见附录 B, 积分得到 B 相低压绕组产生的径向磁感应强度。将 B 相高低压绕组所有导体层的径向漏磁感应强度叠加, 得到 B 相绕组对空间中任意点 $M(x_0, y_0, z_0)$ 产生的径向漏磁表达式为

$$B_y = i \sum_{k=1}^n \int_{H_{2k}}^{H_{1k}} \int_{a_k}^{b_k} \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 N_k}{4\pi H_k R_k} \frac{r(z_0 - z) \sin \theta}{d^3} d\theta dr dz \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; N_k 为绕组线圈匝数; i 为绕组每匝导线内流过的电流; H_k 为绕组高度; R_k 为绕组内外径之差; H_{1k} 、 H_{2k} 分别为绕组沿 z 轴方向高度下限与上限坐标; a_k 、 b_k 分别为绕组内径与外径; r 为导体环内径; θ 为源电流的微小线元素与 y 轴正方向的夹角; d 为 P 点处电流元到 M 点的空间距离。

将式(1)中与各导体层结构参数相关量用结构参数相关函数 $T(x_0, y_0, z_0)$ 表示, 则

$$T(x_0, y_0, z_0) = \sum_{k=1}^n \int_{H_{2k}}^{H_{1k}} \int_{a_k}^{b_k} \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 N_k}{4\pi H_k R_k} \frac{r(z_0 - z) \sin \theta}{d^3} d\theta dr dz \quad (2)$$

A 相与 C 相结构参数相关函数, 可根据坐标变换得到, 将 M 点坐标分别等效替换为 $(x_0, y_0 + \tau, z_0)$ 、 $(x_0, y_0 - \tau, z_0)$ 即可, 其中 τ 表示变压器相邻两相铁芯柱几何中心的距离。三相绕组在空间任意一点 M 处产生的径向漏磁表达式为

$$B_y = \sum_{j=A,a} T_j(x_0, y_0 + \tau, z_0) i_j + \sum_{j=B,b} T_j(x_0, y_0, z_0) i_j + \sum_{j=C,c} T_j(x_0, y_0 - \tau, z_0) i_j \quad (3)$$

式中: T_j 为变压器三相绕组高、低压侧结构参数相关函数; i_j 为三相绕组高、低压侧电流。

漏磁表达式可以展开为傅里叶级数的形式, 如式(4)所示。

$$B_y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (4)$$

式中: T 为工频周期; a_0 为直流分量; a_n 和 b_n 分别为 n 次谐波的余弦分量和正弦分量幅值, 则 $n=1$ 时漏磁基波幅值与相位的表达式分别为

$$\begin{cases} B_1 = \sqrt{\left(\frac{2}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T B_y(t) \cos \frac{2\pi t}{T} dt \right)^2 + \left(\frac{2}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T B_y(t) \sin \frac{2\pi t}{T} dt \right)^2} \\ \angle \Phi_1 = \arctan \frac{\int_{\frac{T}{2}}^T B_y(t) \sin \frac{2\pi t}{T} dt}{\int_{\frac{T}{2}}^T B_y(t) \cos \frac{2\pi t}{T} dt} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 变压器绕组匝间短路时漏磁场分布模型

以 A 相高压侧最外层绕组发生匝间短路故障为例进行分析, 变压器正常运行时, 各相绕组电流为正弦量, A 相电流相量 $i_A(t)$ 的幅值、相位分别记为 I_m 、 φ_0 。当变压器绕组发生匝间短路故障时, 短路匝电流较非短路匝电流增大数十倍, 且短路匝电流方向与非短路匝电流方向相反, 短路匝电流会对产生一个很大的与原来漏磁反向的漏磁分量, 此时短路匝电流相量 $i'_A(t)$ 的幅值 $I'_m \gg I_m$, 相位为 $\varphi_0 - \pi$, 匝间短路时漏磁分布可根据叠加定理求解, 叠加分量示意图如图 2 所示。

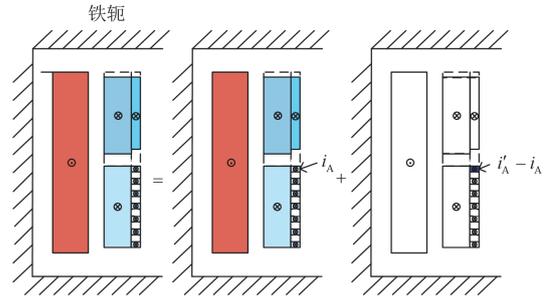


图 2 匝间短路漏磁叠加分量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of stacked leakage magnetic flux components due to turn-to-turn short circuit

匝间短路时的径向漏磁 B'_y 可分解为正常漏磁与漏磁故障分量的叠加, 则有

$$B'_y = B_y - i_A(t) T_k + i'_A(t) T_k \quad (6)$$

$$T_k = \frac{\mu_0 N_k}{4\pi H_k R_k} \int_{H_{1k}}^{H_{2k}} \int_{a_k}^{b_k} \int_0^{2\pi} \frac{r(z_0 - z) \sin \theta}{d^3} d\theta dr dz \quad (7)$$

式中: $B_y - i_A(t) T_k$ 为正常绕组与故障绕组非短路匝在点 M 处产生的径向漏磁量, T_k 为短路匝绕组结构参数系数。漏磁基波幅值与相位的表达式见附录 C 式(C1)。

2 变压器绕组早期故障相位差动保护方案

2.1 变压器绕组早期故障相位差动保护原理

漏磁场空间分布由绕组电流密度决定, 且根据基尔霍夫磁通定律, 磁路中, 穿出或进入任一闭合曲面的总磁通量恒等于 0。将光纤磁场传感器安装在如图 3 所示的绕组轴向对称的上、中、下端, 理想绕组变压器正常运行时, 绕组电流密度均匀分布, 漏磁场在空间呈对称分布^[20-21], 磁力线在绕组高度范围内近似平行于铁芯柱, 绕组端部弯曲产生径向漏磁分量, 因此, 上、下端部径向漏磁分量最大, 在绕组高度的中心处接近为 0。图 3 中①、②测点径向漏磁分量大小相等、方向相反, 即相位相差

180°, ③测点径向漏磁分量接近于 0。当发生匝间短路故障时, 绕组电流密度不再均匀分布, 且中间测点径向漏磁幅值显著增加, 短路匝出现较正常匝大数十倍的反向电流, 短路匝附近对应产生与正常时反向的磁通分量, 导致匝间短路时刻漏磁波形反向, 使漏磁相位发生明显偏移。

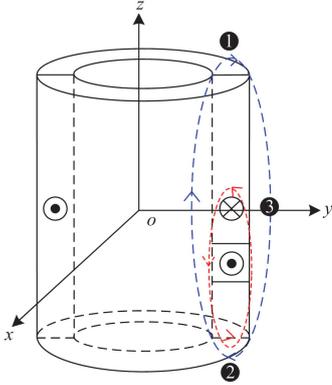


图 3 绕组漏磁场磁力线分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of magnetic field lines of winding leakage field

对于非理想绕组变压器而言, 由于绕组绕制形式非密绕、实际绕组结构存在气隙, 漏磁场分布会发生一定程度的畸变, 中部测点径向漏磁不再为 0, 可以通过调整中部测点安装位置使其接近于 0。由于绕组结构不对称, 漏磁场轴向对称测点测得的径向漏磁分量大小不再相等, 但对称测点的漏磁相位差基本不受绕组是否密绕、绕组结构是否存在气隙的影响, 其相位差仍接近 180°。空载合闸时的励磁涌流、区外故障时的穿越性电流, 均不会改变漏磁分布规律, 对称测点的漏磁相位差仍接近 180°。

2.2 光纤漏磁场传感器温度特性分析

光纤磁场传感器的基本原理为法拉第磁光效应, 偏振光通过磁光晶体时, 偏振面会发生偏转, 偏转角度可表示为

$$\theta = BlV \quad (8)$$

式中: B 为通光方向上的磁感应强度, $B = B_m \sin(\omega t + \varphi)$; l 、 V 分别为磁光晶体的费尔德系数和长度。

出射光强 L_0 通过光电转换装置之后的输出电压为 U_0 , 光电转换系数为 K , 由马吕斯定律可知

$$U_0 = KL_0 = KL_1 e^{-\alpha l} \cos^2(\beta + \theta) \quad (9)$$

式中: L_1 为输入光强; α 为磁光晶体光吸收系数; β 为检偏器透光轴与入射光偏振面之间的夹角, 一般设置为 45°。

联立式(8)、式(9), 并根据贝塞尔函数化简可得

$$U_0 = \frac{KL_1 e^{-\alpha l}}{2} (1 - 2J_1(2VB_m l) \sin(\omega t + \varphi)) \quad (10)$$

式中: 一阶贝塞尔函数值 J_1 的具体公式见附录 C 式(C2)。

传感器所选磁光晶体为顺磁材料, 可以忽略线性双折射的影响, 但费尔德系数较大, 磁光晶体费尔德系数的热敏特性更显著, 在 -25~40 °C 范围内, 费尔德系数变化量最高可达 1950%^[22-23]。由式(10)可知, 温度变化时, 费尔德系数的改变会影响一阶贝塞尔函数值, 从而对光学测量装置输出电压基波分量的幅值产生较大影响, 而不影响相位信息。

2.3 漏磁通的测量

根据传感器安装位置, 以 3 个测点为一组分别计算 3 个测点的径向漏磁感应强度, 取 3 点的平均值与面积的乘积作为计算区域的近似磁通值。本文选取的漏磁计算区域为边长为 30 mm 的等边三角形, 3 点取等边三角形的顶点。假设计算区域中心的位置坐标为 (x, y, z) , 则计算区域的辐向漏磁计算值为

$$\Phi(x, y, z) = \frac{S}{3} (B_1 + B_2 + B_3) = \frac{S}{3} \sum_{p=1}^3 \sum_{q=A,B,C} T_{pq} i_{pq} \quad (11)$$

式中: S 为计算区域面积; B_1 、 B_2 、 B_3 分别为 3 个测点的径向漏磁感应强度。

漏磁通正弦量的瞬时值表达式可以记为 $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \theta_f)$, 磁通初相位 θ_f 是反映磁通变化进程的重要特征参数。本文以工频周期 20 ms 作为漏磁相位提取的时间窗宽度, 通过快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 将时间窗内采样波形时域磁通信号转换到频域, 提取频谱图 50 Hz 基波所在频率位置的相位谱值, 即为对应时间窗内初始时刻的漏磁相位。

两漏磁波形在对应时刻时间窗内的相位的差值即为对应时刻相位差。FFT 后得到的相位差存在跳变现象, 为防止保护误动, 本文将所有涉及到的相位差值规定在 $[-\pi, \pi]$ 范围内, 对于在相位差值计算过程中超出规定范围的值, 通过加减 2π 将其规范在 $[-\pi, \pi]$ 的范围内, 如式(12)所示。

$$\Delta\theta_f = \begin{cases} \theta_1 - \theta_2 + 2\pi, & \theta_1 - \theta_2 < -\pi \\ \theta_1 - \theta_2, & -\pi \leq \theta_1 - \theta_2 \leq \pi \\ \theta_1 - \theta_2 - 2\pi, & \theta_1 - \theta_2 > \pi \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta\theta_f$ 为相位差; θ_1 、 θ_2 分别为对应时刻时间窗内漏磁波形 1、2 的相位。

2.4 相位差动保护故障判别

变压器发生轻微匝间短路故障时, 短路匝中会产生极大的短路电流, 进而产生与原来方向相反的

极大径向漏磁分量, 此时测量区域中测得的径向漏磁突变量可作为故障判别启动判据, 径向漏磁突变量计算方法如式(13)所示。

$$\Delta\Phi_{\text{set},i'}(t) = |\Phi_{\text{set},i'}(t) - \Phi_{\text{set},i'}(t-2T)| = \left| \frac{S}{3} \sum_{p=1}^3 \sum_{q=A,B,C} T_{pq} i_{pq}(t) + KT_k - \sum_{p=1}^3 \sum_{q=A,B,C} T_{pq} i_{pq}(t-2T) \right| \quad (13)$$

式中: $i' = u, d, m$ 分别代表上、下、中部测点位置编号; $T = 20 \text{ ms}$; $K = (i_k(t) - i'_k(t)) \frac{\mu_0 N_k}{4\pi H_k R_k}$; 短路匝绕组结构参数系数 T_k 的具体计算方法如式(7)所示。

以绕组下端面为起始点, 将故障处与绕组下端面的垂直距离占绕组总高度的比值定义为故障位置。不同位置处, 匝间短路绕组结构参数及运行参数不同, 分别代入式(13), 即可得到高压绕组沿轴向不同位置发生匝间短路时, 故障时刻各测点径向漏磁突变量变化规律。

(1) 端部轻微匝间短路故障判别

当变压器运行在正常工况下时, 根据测点安装位置, 上下测点的相位差在一个定值附近小幅波动, 将该定值记作上下测点相位差标准值 δ_{TD1} 。当变压器端部发生轻微匝间短路故障时, 短路匝产生与原来漏磁反向的极大径向漏磁分量, 使端部漏磁相位明显变化, 从而上下测点的相位差动量 $\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}$ 较正常运行时发生明显变化, 保护判据如式(14)所示。

$$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}} = |(\angle\Phi_{\text{up}} - \angle\Phi_{\text{down}}) - \delta_{\text{TD1}}| > \theta_{\text{set1}} \quad (14)$$

式中: $\Delta\angle\Phi_{\text{up}}$ 、 $\Delta\angle\Phi_{\text{down}}$ 分别为上、下测点漏磁通相位突变量。

(2) 中部轻微匝间短路故障判别

考虑变压器中部发生轻微匝间短路故障时上下测点相位差变化不大的故障工况, 在变压器中部设漏磁测量点, 采用幅相协同判据判别变压器中部早期故障。变压器中部发生轻微匝间短路故障时, 中部漏磁相位明显变化, 上部与中间测点的相位差动量 $\Delta\angle\Phi_{\text{um}}$ 变化十分明显, 保护判据如式(15)所示。

$$\Delta\angle\Phi_{\text{um}} = |(\angle\Phi_{\text{up}} - \angle\Phi_{\text{mid}}) - \delta_{\text{TD2}}| > \theta_{\text{set2}} \quad (15)$$

式中: $\Delta\angle\Phi_{\text{mid}}$ 为中部测点漏磁通相位突变量。

正常运行时, 变压器中部测点磁力线径向分量接近为 0, 且气隙的存在使中部径向漏磁相位变化杂乱。不仅仅是中部发生匝间短路故障时, 当变压器发生空载合闸或发生区外故障时, 中间测点漏磁幅值都将显著增加且相位信息与正常工况时相比均会发生明显变化。由式(5)计算可知, 中部轻微匝间

短路故障时, 中部漏磁幅值显著增加, 端部幅值变化不明显, 因此, 为防止空载合闸、区外故障时中间测点的相位变化引起保护误动, 可增设上中下测点幅值比的保护判据作为中部故障判别的辅助判据, 如式(16)所示。

$$\begin{cases} k_1 = \Phi_{\text{mid}} / \Phi_{\text{up}} > k_{\text{set1}} \\ k_2 = \Phi_{\text{mid}} / \Phi_{\text{down}} > k_{\text{set2}} \end{cases} \quad (16)$$

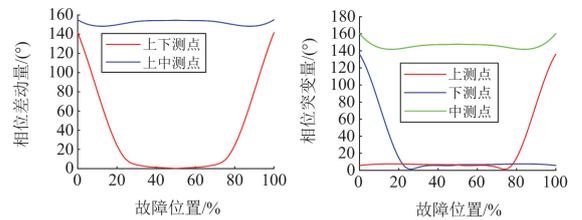
当上下测点相位差未超过设定阈值, 且上中测点相位差动判据与中上部幅值比判据同时满足时, 判定为中部匝间短路故障。虽然中部匝间短路故障判别过程中引入了幅值信息作为辅助判据, 但相位差动判据为故障判别的必要条件, 而相位信息不受温度干扰, 所以温度变化并不会导致保护误动。

2.5 相位差动保护故障定位

上下、上中测点径向漏磁相位差动量计算公式如式(14)、式(15)所示。提取某时刻波形相位与两周前周期内相同时刻波形的相位差作为相位突变量, 如式(17)所示。

$$\Delta\angle\Phi_{\text{set},i'}(t) = \angle\Phi_{\text{set},i'}(t) - \angle\Phi_{\text{set},i'}(t-2T) \quad (17)$$

高压绕组轴向不同位置发生 0.498%匝间短路时, 上下测点、上中测点径向漏磁相位差动量如图 4(a)所示, 上、下、中部测点突变量如图 4(b)所示。



(a) 上下、上中测点径向漏磁相位差动量 (b) 上、下、中部测点相位突变量

图 4 不同位置匝间短路径向漏磁相位变化

Fig. 4 Phase variation of radial magnetic flux leakage at different locations with turn-to-turn short circuits

由图 4(a)可以看出, 变压器绕组匝间短路故障位置距离绕组端部 20%以内时, 上下测点相位差动量较大, 可判别为端部故障。利用图 4(b)所示上、下测点相位突变量的大小关系即可定位故障, 当上测点相位突变量明显大于下测点时, 可定位故障发生在绕组上端, 反之, 故障位于下端。而上中测点相位差动量始终很大, 当满足中部匝间短路故障判据时, 可直接定位绕组中部发生故障。从图 4(b)可以看出, 变压器绕组下端发生 0.498%匝间短路故障时, 下测点径向漏磁相位突变量明显大于上测点, 匝间短路故障位置越靠近端部前 20%处越显著。因此, 当满足端部轻微匝间短路故障判据时, 若下测点相位突变量大于上测点, 则故障位置位于距绕组

下端 20% 以内；若下测点相位突变量小于上测点，则故障位置位于距绕组上端 20% 以内。

根据上文提出的故障判别与定位判据，可以得到如图 5 所示的漏磁相位差动保护逻辑框图，其具体流程如图 6 所示。

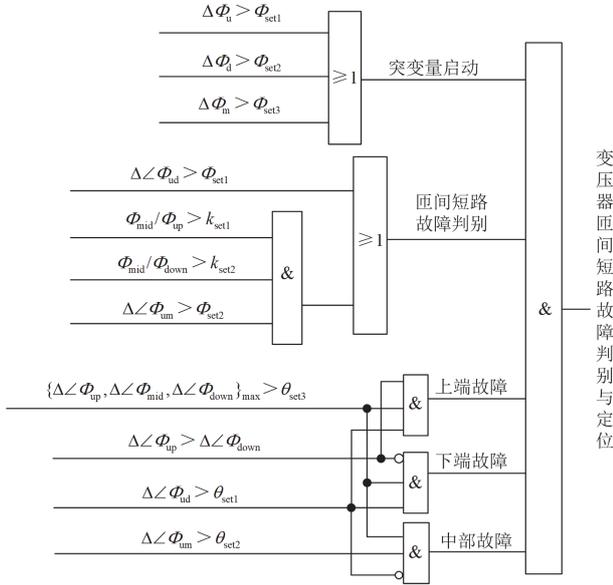


图 5 漏磁相位差动保护逻辑框图

Fig. 5 Logic block diagram of MFL phase differential protection

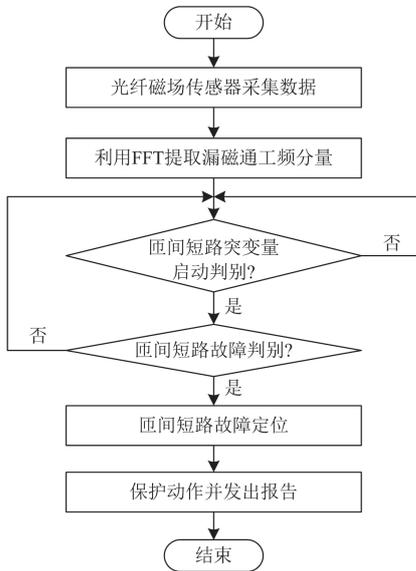


图 6 漏磁相位差动保护流程图

Fig. 6 Flow chart of flux leakage phase differential protection

图中， $\Delta\Phi_u$ 、 $\Delta\Phi_m$ 、 $\Delta\Phi_d$ 分别为变压器绕组上、中、下端径向漏磁通故障幅值突变量， Φ_{up} 、 Φ_{mid} 、

Φ_{down} 分别为匝间短路故障时绕组上、中、下端径向漏磁通幅值。

2.6 整定值计算

为保证保护有足够的灵敏性，匝间短路故障漏磁通幅值突变量启动阈值按照 0.2 倍的额定工况下径向漏磁通幅值的计算量进行整定，如式(18)所示。

$$\Phi_{set.i'} = 0.2|\Phi(x_i, y_i, z_i)| + \varepsilon(x_i, y_i, z_i) \quad (18)$$

式中： $\Phi(x_i, y_i, z_i)$ 表示对应位置的漏磁通幅值计算量； $\varepsilon(x_i, y_i, z_i)$ 表示与传感器安装位置、引出线、结构件等因素有关的误差项。

上下测点相位差标准值 δ_{TD1} 由传感器实际安装位置计算得到，如式(19)所示。上中测点相位差 δ_{TD2} 整定方法与 δ_{TD1} 相同，具体公式见附录 C 式(C3)。

$$\delta_{TD1} = \angle\Phi_{upb} - \angle\Phi_{downb} = \text{angle}(\text{FFT}(\Phi_{upb})) - \text{angle}(\text{FFT}(\Phi_{downb})) \quad (19)$$

上下测点相位差动量阈值 θ_{set1} 按照变压器在空载合闸工况下不误动的原则进行整定，考虑位置、硬件限制、环境噪声等产生的相位偏移，增加一定的保护裕度 δ_Y ，如式(20)所示。

$$\theta_{set1} = |(\angle\Phi_{up} - \angle\Phi_{mid}) - \delta_{TD1}| + \delta_Y \quad (20)$$

对于中部匝间短路故障，中上部幅值比判据已保证保护不误动，上中测点相位差动阈值 θ_{set2} 仅用于中部故障定位，而相位突变量阈值 θ_{set3} 用于启动故障定位，因此可以降低 θ_{set2} 、 θ_{set3} ，令 $\theta_{set2} = \theta_{set3} = \delta_Y$ ，提高中部匝间短路故障判别及定位的灵敏度。

中上、中下测点幅值比系数分别按照正常工况下中上与中下部漏磁通幅值之比进行计算，考虑可靠系数后的整定值公式为

$$k_{set.i'} = 1.3 \frac{|\Phi_{mid}(x, y, z)|}{|\Phi(x_i, y_i, z_i)|} \quad (21)$$

综上，计算得到 Φ_{set1} 为 $296.180 \text{ mT} \cdot \text{mm}^2$ ， Φ_{set2} 为 $257.209 \text{ mT} \cdot \text{mm}^2$ ， Φ_{set3} 为 $39.751 \text{ mT} \cdot \text{mm}^2$ ， k_{set1} 为 0.280， k_{set2} 为 0.318， δ_{TD1} 为 176° ， δ_{TD2} 为 47° ， θ_{set1} 为 14.434° ， θ_{set2} 、 θ_{set3} 为 10° 。

3 仿真及动模验证

3.1 仿真及动模实验模型的建立

3.1.1 动模模型的建立

动模实验系统接线图如图 7 所示，无穷大电源调压范围为 0~1.5 kV，线路参数为 $x_1 = 0.1747 \Omega/\text{km}$ ， $c_1 = 0.0336 \mu\text{F}/\text{km}$ ，长度 $L = 200 \text{ km}$ ，试验变压器为采用 Yn/d11 接线的三相双绕组变压器，额定容量为

50 kVA, 额定电压为 $U_1/U_2 = 1/0.4\text{kV}$, 归算至高压侧的绕组参数为 $R_A = 0.5899\ \Omega$, $R_B = 0.5896\ \Omega$, $R_C = 0.5903\ \Omega$, $X_A = X_B = X_C = 1.52\ \Omega$, 负荷调节范围为 $3.2\sim 230.9\ \Omega$, 通过故障录波器记录变压器的电流和电压。

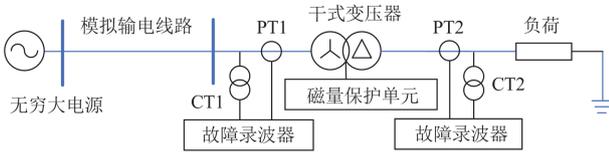


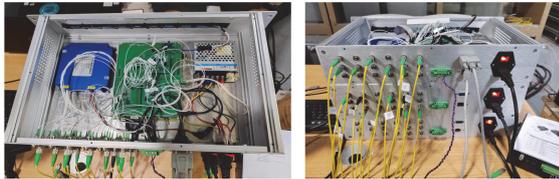
图 7 动模系统接线图

Fig. 7 Wiring diagram for dynamic model test system

动模变压器如图 8(a)所示, 可以设置绕组轻微匝间短路故障、电弧故障, 磁量保护装置如图 8(b)所示, 变压器保护柜及实验平台如图 8(c)所示。



(a) 动模实验变压器



(b) 磁量保护装置



(c) 变压器保护柜及实验平台

图 8 动模系统实物图

Fig. 8 Physical diagram of dynamic model test system

3.1.2 仿真模型的建立与验证

本文在 Ansys 环境中建立了与动模实验变压器参数一致的三维有限元仿真模型, 弥补动模实验数据在故障设置中的局限性, 仿真模型及对应的电磁场边值问题表达式见附录 D。

为验证仿真模型和动模实验变压器的一致性,

绘制了正常运行且负载电流相同的工况时, 上下测点的漏磁通波形曲线对比图如图 9 所示。

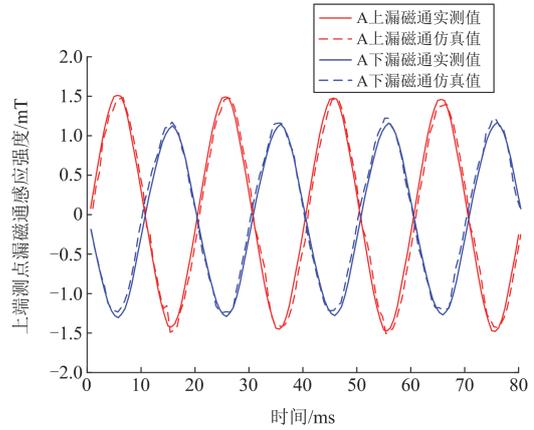


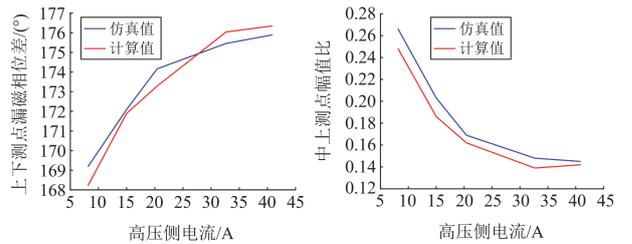
图 9 实测波形与仿真波形对比图

Fig. 9 Comparison chart of measured and simulated waveforms

采用波形相关系数对曲线相似度进行评估, 相关系数矩阵非对角线元素值越接近 1, 仿真模型与动模实验变压器相关度越强。上、下测点漏磁通实测值与仿真值的相关系数分别为 0.9932、0.9947, 表明实测与仿真波形具有高度一致性。

3.1.3 解析模型验证

为验证漏磁解析模型对于本文保护方案整定值计算的适用性, 将不同负载下漏磁解析模型上下测点相位差计算值与 Ansys 仿真值比较, 如图 10(a)所示; 将不同负载下漏磁解析模型中上测点幅值比计算值与 Ansys 仿真值进行比较, 如图 10(b)所示。



(a) 不同负载下相位差变化趋势

(b) 不同负载下幅值比变化趋势

图 10 不同负载下计算值与仿真值比较

Fig. 10 Comparison of calculated values and simulation values under different loads

两组曲线波形相关系数分别为 0.9894、0.9974, 因此漏磁解析模型满足分析要求, 适用于本文保护方案整定值计算。漏磁相位差与幅值比随负载变化而变化, 高压侧电流大于 20 A, 即变压器负载率大于额定负载的 50%时, 图中漏磁相位差与幅值比基本稳定。变压器工作时负载率通常大于 60%, 此时变压器空间漏磁分布状态已经稳定。

3.2 动模验证

3.2.1 空载合闸

变压器处于空载合闸状态下时，漏磁场对称分布规律不变，漏磁相位差动保护应不受励磁涌流影响。空载合闸状态下的漏磁波形及相位差动保护校验波形如图 11 所示。

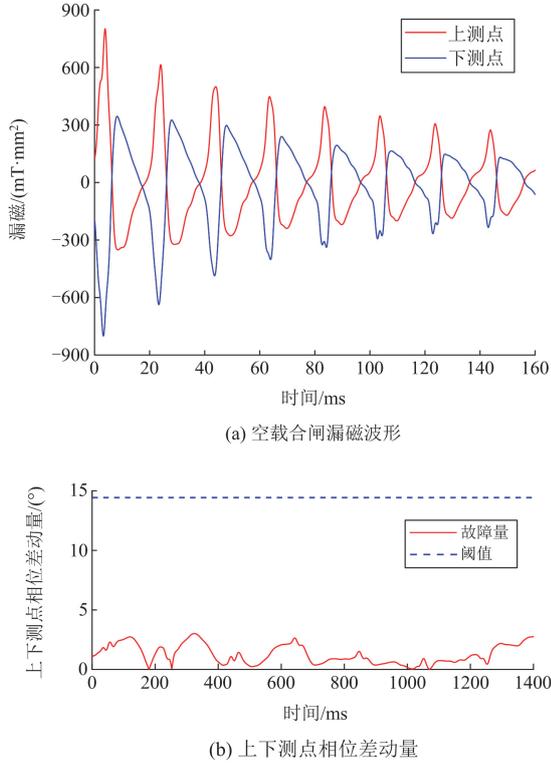


图 11 空载合闸漏磁波形及相位差动保护校验

Fig. 11 No-load closing MFL waveform and phase differential protection check

变压器空载合闸产生励磁涌流时，由图11(a)可知，空载合闸上下测点漏磁幅值比不满足上下测点幅值比判据，且由图 11(b)可知，上下测点漏磁相位差动量明显小于整定值，不满足故障判别的必要条件，保护不会误动，因此本文所提漏磁相位差动保护方案不受励磁涌流的影响。

3.2.2 匝间短路

变压器高压绕组下端发生 0.995%匝间短路故障时，漏磁相位差动保护校验曲线如图 12 所示。

相位差动量为经过 20 ms 即 32 个采样点的 FFT 计算数据窗延时得到，因此采样点序号自 33 起，采样点序号为 86 时刻发生匝间短路故障，由图 12(a)可见，采样点序号为 102 时刻上下测点相位差动量超过阈值，表明匝间短路故障后经过 16 个采样点即 10 ms 可成功判别故障。

判别匝间短路故障后进入故障定位判别逻辑，上下测点相位突变量如图 12(b)所示。采样点序号为 102 时刻下测点相位突变量大于阈值，上测点相位突变量小于阈值，且下测点相位突变量远大于上测点相位突变量，满足绕组下端匝间短路故障判别条件，可推出绕组匝间短路故障发生在绕组下端面至其上方 20%高度处。

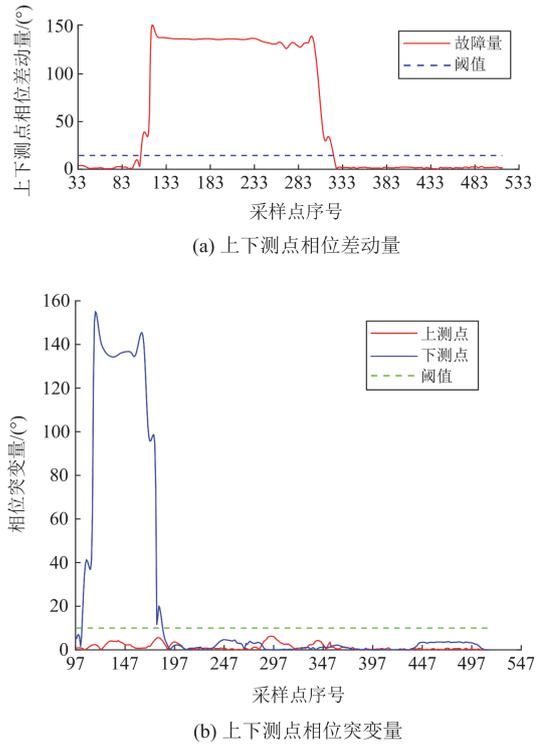


图 12 绕组下端 0.995%匝间短路故障相位差动保护校验

Fig. 12 Phase differential protection check of lower end of winding 0.995% turns short fault

3.2.3 绕组对地放电

通过绕组对地放电实验，模拟变压器绕组内部电弧故障，放电装置产生的电弧与绕组匝间短路故障特性基本相同，均为局部电场集中，导致绕组电流发生变化，影响漏磁分布。额定电压下，62 ms 时刻绕组发生对地放电故障，相位差动保护校验波形如图 13 所示。

变压器绕组发生对地放电故障时，71 ms 时刻上下测点相位差动量超过阈值，持续 5 ms 后低于阈值，满足漏磁相位差动保护判据，保护正确动作。

3.2.4 动模实验总结

空载合闸、端部及中部 0.995%匝间短路 3 种工况下动模实验变压器漏磁相位差动保护具体结果如表 1 所示。

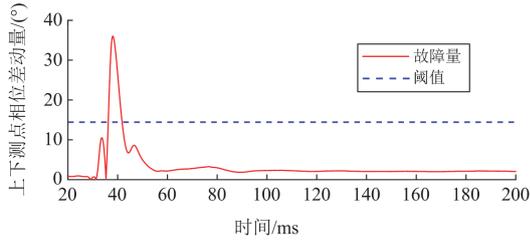


图 13 绕组对地放电故障相位差动保护校验

Fig. 13 Winding-to-ground discharge fault phase differential protection check

表 1 动模实验变压器漏磁相位差动保护结果

Table 1 Leakage phase differential protection results of dynamic mode experiment transformer

工况	漏磁相位差动保护特征量	动作情况	故障定位	
空载 合闸	$\Delta\Phi_{\max}/(\text{mT}\cdot\text{mm}^2)$	203.81	不动作	—
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	2.974		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{um}}/(\text{°})$	50.735		
	k_1	0.092		
	k_2	0.099		
下端 0.995% 匝间短路	$\Delta\Phi_{\max}/(\text{mT}\cdot\text{mm}^2)$	3080.42	动作	下端故障
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	151.475		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{um}}/(\text{°})$	105.511		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{up}}/(\text{°})$	20.496		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{down}}/(\text{°})$	130.979		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{mid}}/(\text{°})$	85.015		
	k_1	4.667		
k_2	2.220			
中部 0.995% 匝间短路	$\Delta\Phi_{\max}/(\text{mT}\cdot\text{mm}^2)$	234.12	动作	中部故障
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	1.696		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{um}}/(\text{°})$	170.609		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{up}}/(\text{°})$	15.085		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{down}}/(\text{°})$	16.781		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{mid}}/(\text{°})$	155.524		
	k_1	3.165		
k_2	3.813			

动模实验结果表明, 本文所提出的漏磁相位差动保护方案能够灵敏识别绕组内部电弧故障, 在轻微匝间短路故障判别时有较高的灵敏度并能实现故障定位, 且在空载合闸状态下保护不会误动。

3.3 仿真验证

变压器发生轻微匝间短路故障时端口电流差动量较小, 传统纵差保护无法灵敏动作。为进一步凸显本文所提保护方案在判别轻微匝间短路故障方面的优越性, 利用仿真模型模拟绕组 0.498%匝间短

路故障工况, 将本文所提保护与传统电流纵差保护进行对比分析, 按照变压器纵差保护整定计算原则, 整定值为 15.32 A, 两种保护对比结果如表 2 所示。利用仿真数据对区外故障工况下漏磁相位差动保护动作情况进行验证, 如表 3 所示。

表 2 漏磁通相位差动保护与传统纵差保护仿真比较

Table 2 Simulation comparison between leakage flux phase differential protection and traditional longitudinal differential protection

工况	漏磁相位差动保护	结果	纵差保护/A	结果
下端 0.498% 匝间短路	$\Delta\Phi_{\max}/(\text{mT}\cdot\text{mm}^2)$	2496.25	动作	8.39
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	141.591		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{um}}/(\text{°})$	165.84		
	k_1	1.977		
	k_2	1.685		
中部 0.498% 匝间短路	$\Delta\Phi_{\max}/(\text{mT}\cdot\text{mm}^2)$	163.27	动作	9.41
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	0.981		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{um}}/(\text{°})$	15.278		
	k_1	1.079		
	k_2	1.252		
空投于下端 0.498% 匝间短路	$\Delta\Phi_{\max}/(\text{mT}\cdot\text{mm}^2)$	3779.43	动作	闭锁
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	38.946		
	$\Delta\angle\Phi_{\text{um}}/(\text{°})$	70.324		
	k_1	0.414		
	k_2	0.465		

表 3 区外故障时保护动作情况

Table 3 Protection action in case of an out-of-area fault

工况	漏磁相位差动保护特征量			动作情况
	$\Delta\angle\Phi_{\text{ud}}/(\text{°})$	k_1	k_2	
A 相接地	2.649	0.138	0.159	不动作
AB 两相短路	3.862	0.146	0.165	不动作
三相短路	1.709	0.134	0.154	不动作

由表 2 可知, 变压器发生 0.498%匝间短路故障时, 传统纵差保护无法动作, 而本文所提漏磁通差动保护能准确动作, 且在空载合闸工况下仍能准确识别 0.498%匝间短路故障。

区外故障时绕组电流明显大于正常运行值, 漏磁幅值突变量必然超过门槛值, 匝间短路故障判别逻辑会启动, 但外部短路电流属于穿越性电流, 不改变漏磁场空间分布。由表 3 可知, 3 种区外故障工况下, 均不满足判别匝间短路故障的必要判据条件, 因此, 本文所提保护方案在区外故障时不会误动。

4 结论

针对非理想绕组变压器早期故障保护的问题, 本文提出了一种基于漏磁场相位变化特征的变压器绕组早期故障保护方案, 通过理论推导和仿真、实验验证, 得出以下结论:

1) 漏磁场解析模型综合考虑了非理想绕组结构变压器的三相绕组对漏磁分布的影响, 适用于保护的分析和定值整定。

2) 结合漏磁相位突变量、不同测点漏磁相位差故障分量等信息, 提出了可靠性不受温度影响的早期故障判别和定位方案, 并完成了相关定值整定。

3) 建立了动模实验系统和有限元模型, 对本文所提早期故障保护方案进行了动模和仿真实验验证, 结果表明, 本文所提方案能快速判别 0.498% 及以上轻微匝间短路故障、电弧故障, 并实现轻微匝间短路故障定位, 且不受励磁涌流和区外故障影响。

附录 A

表 A1 非理想绕组变压器电气参数

Table A1 Electrical parameters of non-ideal winding transformers

参数	数值	参数	数值
额定容量/(kV·A)	50	联结组标号	Ynd11
额定电压/kV	1/0.4	额定频率/Hz	50
额定电流/A	28.87/72.17	阻抗电压/%	7.60
空载电流/%	3.44	空载损耗/kW	257.4
高压绕组电阻/ Ω	0.5819	低压绕组电阻/ Ω	0.5119

附录 B

将绕组导体层在 z 轴方向上微分为导体层, 进一步在径向上微分为导体环, 如图 B1 所示。

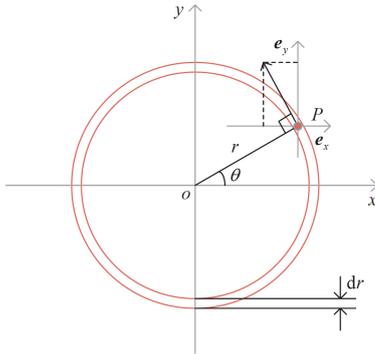


图 B1 微分导体环示意图

Fig. B1 Schematic diagram of a differential conductor ring

导体环流过的电流 I_h 为

$$I_h = Ni \frac{dz dr}{H R} \quad (\text{B1})$$

式中: N 为绕组线圈匝数; H 为绕组高度; dz 为导体层沿 z 轴方向的高度; R 为绕组内外径之差; dr 为导体环内外径之差。

取导体环上任意点 $P(x, y, z)$, 则 P 点处电流元 I_h^{dl} 的坐标为

$$I_h^{dl} = I_h r (-\sin \theta, \cos \theta) d\theta \quad (\text{B2})$$

式中: dl 为源电流的微小线元素; θ 为 dl 与 y 轴正方向的夹角; $d\theta$ 为弧长 dl 对应的微分角度。

P 点处电流元在 M 点产生的磁感应强度 dB 为

$$dB = \frac{\mu_0 Ni}{4\pi HR} dz dr \frac{dl \times d}{d^3} \quad (\text{B3})$$

$$d = \sqrt{(x_0 - r \cos \theta)^2 + (y_0 - r \sin \theta)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (\text{B4})$$

式中: d 为电流元 P 点指向场点 M 的矢量。

综上所述, dB 的径向分量 dB_y 为

$$dB_y = \frac{\mu_0 Ni}{4\pi HR} \frac{r(z_0 - z) \sin \theta}{d^3} d\theta dr dz \quad (\text{B5})$$

附录 C

漏磁基波幅值与相位表达式分别为

$$\left\{ \begin{aligned} B_1' &= \sqrt{\left(\frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} B_y'(t) \cos \frac{2\pi t}{T} dt \right)^2 + \left(\frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} B_y'(t) \sin \frac{2\pi t}{T} dt \right)^2} \\ \Phi_1' &= \arctan \frac{\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} B_y'(t) \sin \frac{2\pi t}{T} dt}{\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} B_y'(t) \cos \frac{2\pi t}{T} dt} \end{aligned} \right. \quad (\text{C1})$$

一阶贝塞尔函数值为

$$J_1(2V(T)B_m I) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2V(T)B_m I)^{2n+1}}{n! \Gamma(n+2)} \quad (\text{C2})$$

上中测点相位差 δ_{TD2} 整定公式为

$$\delta_{TD2} = \angle \Phi_{upb} - \angle \Phi_{midb} = \text{angle}(\text{FFT}(\Phi_{upb})) - \text{angle}(\text{FFT}(\Phi_{midb})) \quad (\text{C3})$$

附录 D

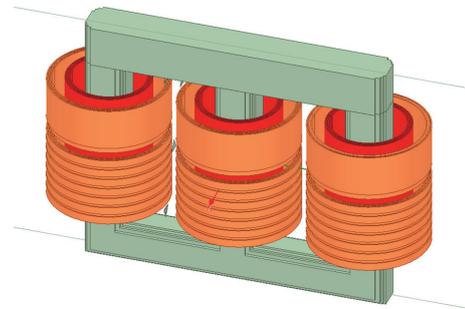


图 D1 Ansys 仿真模型

Fig. D1 Ansys simulation model

变压器三维磁场有限元的核心控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} = -\mu J_x \\ \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} = -\mu J_y \\ \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = -\mu J_z \end{cases} \quad (D1)$$

式中: μ 为介质磁导率; A_x 、 A_y 、 A_z 为矢量磁位在 x 、 y 、 z 方向上的分量; J_x 、 J_y 、 J_z 为电流密度在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

绕组-铁心、绕组-空气等网格单元公共面, 自动满足麦克斯韦边界连续性, 对应边界条件的数学表述为

$$\begin{cases} B_{\text{normal}}^1 = B_{\text{normal}}^2 \\ H_{\text{tangential}}^1 = H_{\text{tangential}}^2 \end{cases} \quad (D2)$$

用有限的“空气盒”模拟变压器外部无限空间, 区域为长方体, 且几何中心与变压器的几何中心重合, 设置边界条件为长方体 6 个面的磁矢势为 0, 符合狄利克莱边界条件, 对应数学表述为

$$A_x = A_y = A_z = 0, x = \pm \frac{kl_x}{2}, y = \pm \frac{kl_y}{2}, z = \pm \frac{kl_z}{2} \quad (D3)$$

式中: k 为比例系数, 取 5; l_x 、 l_y 、 l_z 为变压器的实际长、宽、高尺寸参数; 本文动模实验系统变压器 $l_x = 300 \text{ mm}$, $l_y = 940 \text{ mm}$, $l_z = 630 \text{ mm}$ 。

参考文献

- [1] 薛健侗, 马宏忠, 杨洪苏, 等. 基于格拉姆角场与迁移学习-AlexNet 的变压器绕组松动故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 154-163.
XUE Jiantong, MA Hongzhong, YANG Hongsu, et al. A fault diagnosis method for transformer winding looseness based on Gramian angular field and transfer learning-AlexNet[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 154-163.
- [2] LAI Jinmu, YIN Xin, YIN Xianggen, et al. Typology and working mechanism of a hybrid power router based on power-frequency transformer electromagnetic coupling with converters[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-17.
- [3] 邓祥力, 廖玥琳, 朱宏业, 等. 基于数字孪生模型电流动态时间规整差异度的变压器早期故障辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 156-167.
DENG Xiangli, LIAO Yuelin, ZHU Hongye, et al. Early fault identification for a transformer based on current dynamic time warping difference of a digital twin model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 156-167.
- [4] 唐轩, 成俊杰, 吴琳, 等. 基于信号距离度模型和 SVM 的变压器绕组变形诊断方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 27-36.
TANG Xuan, CHENG Junjie, WU Lin, et al. Study on diagnosis method of power transformer winding deformation based on signal distance degree model and SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 27-36.
- [5] 刘光伟, 关宇, 董明, 等. 变压器匝间故障特性与检测研究进展[J]. 绝缘材料, 2023, 56(11): 7-15.
LIU Guangwei, GUAN Yu, DONG Ming, et al. Research progress in characteristics and detection of transformer interturn fault[J]. Insulating Materials, 2023, 56(11): 7-15.
- [6] 赵鑫, 王东丽, 彭泓, 等. 基于多策略改进蜣螂算法优化的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 120-130.
ZHAO Xin, WANG Dongli, PENG Hong, et al. Transformer fault diagnosis based on a multi-strategy improved dung beetle optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(6): 120-130.
- [7] 咸日常, 张冰倩, 张启哲, 等. 基于有限元分析的配电变压器匝间绝缘劣化特征分析[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 169-176.
XIAN Richang, ZHANG Bingqian, ZHANG Qizhe, et al. Deterioration characteristics analysis of inter-turn insulation of distribution transformers based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 169-176.
- [8] 李婷, 肖京, 刘赞, 等. 基于信息融合和神经网络的变压器内部故障快速诊断方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 194-200.
LI Ting, XIAO Jing, LIU Yun, et al. Fast diagnosis method of transformer internal fault based on information fusion and neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 194-200.
- [9] 张博闻, 冯健, 王博文, 等. 基于漏磁负载归一化 Lissajous 图形分析的变压器绕组故障诊断[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(6): 25-33.
ZHANG Bowen, FENG Jian, WANG Bowen, et al. Fault diagnosis method for transformer winding based on the load normalized Lissajous graphical analysis of leakage magnetic field[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(6): 25-33.
- [10] 刘建锋, 李志远, 周亚茹. 基于漏磁场和 ICOA-ResNet 的变压器绕组早期故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 99-110.
LIU Jianfeng, LI Zhiyuan, ZHOU Yaru. Transformer

- windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 99-110.
- [11] 杨家辉, 王帅兵, 袁耀, 等. 基于场路耦合法的换流变压器匝间短路故障研究[J]. *南方电网技术*, 2018, 12(8): 17-22.
YANG Jiahui, WANG Shuaibing, YUAN Yao, et al. Research on interturn short-circuit fault of converter transformer based on field-circuit coupling method[J]. *Southern Power System Technology*, 2018, 12(8): 17-22.
- [12] 咸日常, 陈蕾, 耿凯, 等. 接地变压器低压绕组匝间短路故障的电磁特征研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 74-82.
XIAN Richang, CHEN Lei, GENG Kai, et al. Research on electromagnetic characteristics of short circuit faults in low-voltage windings of grounding transformers[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 74-82.
- [13] HAGHJOO F, MOSTAFAEI M, MOHAMMADI H. A new leakage flux-based technique for turn-to-turn fault protection and faulty region identification in transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(2): 671-679.
- [14] 邓祥力, 严康, 朱宏业, 等. 基于变压器绕组电路-漏磁场多状态解析模型的早期故障保护[J]. *电网技术*, 2023, 47(9): 3808-3821.
DENG Xiangli, YAN Kang, ZHU Hongye, et al. Transformer winding early fault protection based on circuit-magnetic leakage field multi-state analytical model[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(9): 3808-3821.
- [15] ATHIKESAVAN S C, JEYASANKAR E, MANOHAR S S, et al. Inter-turn fault detection of dry-type transformers using core-leakage fluxes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1230-1241.
- [16] 冯军基, 刘力卿, 马程, 等. 计及磁-机耦合效应的变压器绕组短路振动特性研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(8): 43-52.
FENG Junji, LIU Liqing, MA Cheng, et al. Study on short-circuit vibration characteristics of transformer winding considering electromagnetic mechanical coupling effect[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(8): 43-52.
- [17] 邓祥力, 马倩, 童志祥, 等. 基于数字孪生虚拟漏磁场波形的变压器早期故障保护研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(11): 4806-4815.
DENG Xiangli, MA Qian, TONG Zhixiang, et al. Research on transformer incipient fault protection based on virtual leakage field waveform of the digital twin model[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(11): 4806-4815.
- [18] 侯越, 周淑, 欧阳希, 等. 基于磁光晶体和光纤光栅的反射式磁场传感器[J]. *光学学报*, 2024, 44(11): 280-290.
HOU Yue, ZHOU Quan, OUYANG Xi, et al. Reflective magnetic field sensor based on magneto-optical crystal and fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(11): 280-290.
- [19] 郑玉平, 龚心怡, 潘书燕, 等. 变压器匝间短路故障工况下的漏磁特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 121-127.
ZHENG Yuping, GONG Xinyi, PAN Shuyan, et al. Analysis on leakage flux characteristics of turn-to-turn short-circuit fault for power transformer[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(15): 121-127.
- [20] 李永建, 闫鑫笑, 张长庚, 等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(21): 4483-4491.
LI Yongjian, YAN Xinxiao, ZHANG Changgen, et al. Numerical prediction of losses and local overheating in transformer windings based on magnetic-thermal-fluid model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(21): 4483-4491.
- [21] 孙佳安, 李琳. 考虑次同步分量下时间周期问题的三维定点有限元法及变压器电磁特性分析[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(14): 3475-3486.
SUN Jiaan, LI Lin. 3D fixed-point finite element method for time periodic problems with subsynchronous components and analysis of transformer electromagnetic characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(14): 3475-3486.
- [22] 欧阳希, 陈明浩, 周淑, 等. 一种新型全绝缘光纤温度-磁场双参数传感器[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(20): 8114-8124.
OUYANG Xi, CHEN Minghao, ZHOU Quan, et al. A novel all-dielectric optical fiber temperature-magnetic field dual-parameter sensor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(20): 8114-8124.
- [23] WANG B, LIU S, ZHAO Y. Research on modeling and application of magneto optical measurement technology[C]// *IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems*, December 4-6, 2020, Jinan, China: 207-211.

收稿日期: 2025-01-26; 修回日期: 2025-04-25

作者简介:

邓祥力(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: xiangli_deng@163.com

刘美含(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: lmh_0012@163.com

(编辑 石晋美)