

变压器早期故障漏磁场三次谐波差动保护研究

邓祥力¹, 彭袁璨¹, 童志祥², 王俊超², 王振¹, 刘美含¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090;

2. 中国长江电力股份有限公司, 云南省 昆明市 650205)

Research on Third Harmonic Differential Protection of Leakage Magnetic Field for Early Faults in Transformers

DENG Xiangli¹, PENG Yuanfan¹, TONG Zhixiang², WANG Junchao², WANG Zhen¹, LIU Meihan¹

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;

2. China Yangtze Power Company, Kunming 650205, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: Many major transformer accidents arise from minor internal faults, and traditional transformer protection lacks sensitivity to early faults and cannot effectively identify them. A novel protection scheme utilizing harmonic signals of transformer leakage magnetic fields to detect early faults is proposed for this issue. Firstly, the harmonic mechanism of transformers is analyzed, and an analytical model considering the harmonic distribution of leakage magnetic fields in three-phase windings is established. Then, a method for measuring and extracting the third harmonic of leakage magnetic flux, which comprehensively utilizes the triangle method, short-time Fourier transform, and median filtering, is proposed. Fault feature quantities based on normal, transient, and steady-state information of harmonic signals are constructed, forming leakage magnetic field harmonic differential protection that quickly and sensitively identifies and distinguishes between inter-turn short circuits and winding waveforms. Finally, the effectiveness and superiority of the scheme are verified through simulations and dynamic modeling experiments, providing a new method for real-time detection of early faults in dry-type transformers.

KEY WORDS: irregular winding transformer; early fault; analytical method; leakage magnetic field; third harmonic; short-time Fourier transform

摘要: 变压器重大事故由内部轻微故障发展产生, 而传统变压器保护对早期故障灵敏度不足, 无法有效识别。针对此问题该文提出了一种利用变压器漏磁场谐波信号检测早期故障的新型保护方案。首先分析了变压器谐波机理并建立考虑三相绕组的漏磁场谐波分布解析模型, 然后提出了综合利用短时傅里叶变换和中值滤波的漏磁通三次谐波提取方法, 构造基于谐波信号正常、故障暂态和故障稳态信息的故障特征

量, 形成漏磁场谐波差动保护, 快速灵敏地识别匝间短路和绕组变形。最后, 通过仿真和动模实验验证了方案的有效性和优越性, 为干式变压器早期故障的实时检测提供了新方法。

关键词: 非规则变压器; 早期故障; 解析法; 漏磁场; 三次谐波; 短时傅里叶变换

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1790

0 引言

电力变压器作为进行电能变换和分配的枢纽电力设备, 其故障对供电可靠性和电网安全运行带来严重影响。绕组匝间短路和变形是两类常见的变压器内部故障, 在其发展早期阶段难以察觉, 但某些电气参数已发生改变, 属于潜伏性故障^[1-2]。由于许多变压器重大事故都是由轻微故障演变而来, 故通过对各种故障状态特征量进行研究, 检测出变压器早期故障, 对变压器及电网的安全运行均具有重要意义。

在实际应用中, 变压器主保护通常采用电流纵差动保护和瓦斯保护。但对于早期故障, 差动保护和瓦斯保护均不能及时、灵敏地检测。由于变压器漏磁场分布与绕组电流密度分布、绕组几何结构、故障位置等因素密切相关, 早期故障时会发生明显变化并呈现一定规律^[3], 故可根据这一漏磁场特征建立变压器早期故障的保护原理。

近年来, 在变压器漏磁场分布规律方面, 国内外展开了大量的研究。文献[4]在变压器漏磁场对称分布的基础上构造了电压故障特征量, 并提出一种基于五联电压搜索线圈的匝间短路检测和定位技术。文献[5]利用单重傅里叶算法推导了变压器辐向漏磁感应强度, 和多绕组电路模型结合, 建立了变压器电路-漏磁场解析模型, 并通过解析模型估算的

漏磁场与物理实体测量的漏磁场波形差异,进行早期故障的判断。文献[6]提出建立非理想绕组变压器数字孪生模型及利用电流、漏磁场故障特征的方法以提高内部早期故障检测可靠性。文献[7]推导了变压器绕组在空间中的磁密分布公式和三维仿真模型,分析变压器在正常运行、不同故障下的漏磁对称性和分布规律,提出了变压器内部漏磁传感器的布置方案。但是以上基于单相绕组数学解析模型展开的漏磁场研究,并未考虑其他两相绕组互漏感对漏磁场的影响。

另一方面,电力系统正在形成“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”的双高趋势,导致电力系统波形发生严重畸变,变压器中的谐波现象日益广泛。目前国内外对变压器谐波现象研究主要集中在建模、抑制和损耗分析方面。文献[8-9]基于变压器等效谐波模型研究了谐波源在不同负载率、不同功率因数和不同短路容量下的传递规律,对比了不同评估模型中的处理方法和效果。文献[10]提出了一种新的三柱四绕组式换流变压器模型,通过附加绕组等值负磁通来实现谐波滤除功能。文献[11]针对谐波下变压器的漏磁场和温度场进行了分析,计算了在考虑高次谐波时的绕组涡流损耗与杂散损耗,分析了谐波次数和谐波含有率对变压器铁芯损耗和温升的影响。文献[12]研究了谐波条件下的换流变压器漏磁场分布,并给出了考虑谐波时的损耗情况。但在利用变压器电磁量中谐波信息进行故障检测方面仍存在研究空白。谐波电流通过变压器绕组后,会形成绕组谐波漏磁场,变压器早期故障阶段谐波漏磁场分布会发生变化,以此作为故障特征可形成早期故障检测判据。

基于以上两个方面的研究成果,本文提出了一种以漏磁场谐波信号为故障特征量的新型变压器早期故障磁差动保护方案。首先建立计及变压器三相绕组的漏磁场三维解析计算模型,分别计算正常绕组、变形绕组、匝间短路绕组漏磁场分布,为保护判据整定公式提供计算依据。然后提出了综合利用基于三角形测法的漏磁通近似计算、短时傅里叶变换和中值滤波的漏磁通三次谐波幅值提取方案,并构造漏磁场谐波差动保护判据,用于检测绕组变形、匝间故障等早期故障。最后,通过仿真模型和动模实验验证了本文所提保护方案的有效性。

1 变压器漏磁场谐波分布

1.1 变压器中的谐波

变压器电气量中广泛存在着谐波成分且形成

机理复杂,其来源大致可分为外部引入和内部结构激发两类。

近年来,随着风电和光伏装机占比不断上升,大量谐波从电网侧注入变压器^[13]。另外,当变压器带有电力电子器件等非线性负载运行时也会有谐波电流流过变压器^[14-15]。例如同步发电机中的励磁变二次侧接晶闸管整流器,其阀侧电流中会产生 $6k \pm 1$ 次特征谐波。此外,变压器的铁磁材料等内部结构特性也会造成谐波^[16]。在额定工况下变压器工作在磁化曲线的饱和区,即使原边电压、主磁通均完全正弦,产生的励磁电流也会畸变,从而在原副边电流中引入谐波。而由于漏电感为常数,漏磁通中也会产生谐波。

综上所述,漏磁通谐波的产生机理如图1所示。可见,虽然漏磁通谐波的产生原因多样,但均可归结于由绕组电流的谐波分量激发产生。

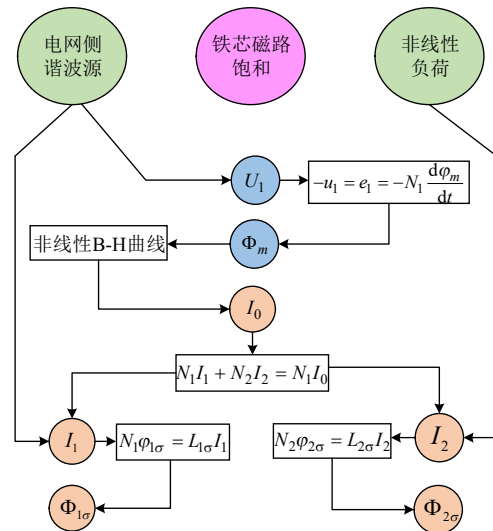


图1 产生谐波漏磁的内外因素

Fig. 1 Internal and external factors causing harmonic leakage magnetic flux

1.2 变压器漏磁场谐波解析模型建立

1.2.1 正常状态下漏磁场分布

为使所建解析模型具有普适性,以非规则分段式绕组变压器为研究对象,其尺寸与下文的动模变压器相同,具体参数详见附录表A1。以B相铁芯柱几何中心为原点建立直角坐标系,其二维正视图如附录图A1所示。由于漏磁场中的磁力线回路大部分经过空气介质,故可利用漏磁场叠加性分别计算不同绕组、不同分段产生的漏磁感应强度,最后再相加得到总漏磁感应强度。

本文中单绕组磁感应强度空间分布的计算思路源于文献[7]。以B相高压绕组的某一段段 k 为分析对象,将分段在轴向方向上分割为一系列导体层,取其中厚度为 dz 的单导体层在径向方向上分割

为一系列导体环。利用毕奥-沙伐尔定律可求出导体环上一元电流产生的磁感应强度，最后积分得到分段 k 产生的漏磁感应强度^[5]。

将 B 相所有分段的径向漏磁感应强度叠加得：

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

如果记公式(2)为变压器结构函数，

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

则 A 相和 C 相绕组的结构函数则可以由式(2)通过坐标变换得到：

$$G_a(x_0, y_0, z_0) = G(x_0, y_0 + L_c, z_0) \quad (3)$$

$$G_c(x_0, y_0, z_0) = G(x_0, y_0 - L_c, z_0) \quad (4)$$

式中： L_c 为铁芯柱中心距。

式(1)表明，漏磁感应强度可以表示为电流函数与结构函数的乘积，说明谐波漏磁分量主要由绕组谐波电流分量产生。从产生机理上看，一次侧绕组电流可分为励磁分量和电网侧分量，二次侧绕组电流可分为励磁分量和负荷侧分量，如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_1(t) = i_{\mu}^{\prime}(t) + i_s(t) \\ i_2(t) = i_{\mu}^{\prime\prime}(t) + i_l(t) \end{cases} \quad (5)$$

但为了便于分析，假设以上非正弦绕组电流波形均已知，将其傅里叶展开式代入式(1)，再叠加三相的径向漏磁公式，即得任一点处计及三相绕组的径向漏磁感应强度分布计算式(6)，若提取其中的三次谐波项即得到三次谐波漏磁分布式(7)：

$$B_y = \sum_{\substack{j=A,B,C, \\ a,b,c}} G_j [I_{j0} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{jnm} \cos(n\omega t + \varphi_{jn})] \quad (6)$$

$$B_{3y} = \sum_{\substack{j=A,B,C, \\ a,b,c}} G_j I_{j3m} \cos(3\omega t + \varphi_{j3}) \quad (7)$$

1.2.2 匝间短路和绕组变形下漏磁场分布

当绕组发生匝间短路时，安匝平衡被破坏，根据文献[17]，原边绕组匝间短路稳态电流的数值近似满足以下关系：

$$I_s = \frac{N_1'}{N_s} I_1' - \frac{N_2}{N_s} I_2' \quad (8)$$

式中： I_1' 为原边绕组电流； I_s 为短路绕组电流； I_2' 为副边绕组电流； N_s 为短路匝数； N_1' 为原边未短路匝数； N_2 为副边匝数。

则短路绕组电流可根据式(8)由此时的原边、副

边绕组电流得出。根据漏磁场的可叠加性，匝间短路下漏磁场可由正常相漏磁场 B_{y_health} 与故障相漏磁场 B_{y_fault} 相加得到。正常相漏磁场求法与正常模型相同，故障相漏磁场由故障绕组非短路段、故障绕组短路段、非故障绕组漏磁场叠加得到，故障相漏磁场具体公式见附录 B。

从模型角度分析，变压器轴向绕组变形本质上是绕组高度发生改变，绕组电流并无不同。只需将发生形变的分段原高度 $[H_{2k}, H_{1k}]$ 修改为形变后高度 $[H'_{2k}, H'_{1k}]$ ，再代入式(2)得到新的结构函数即可。

综合前小节和本小节，可得漏磁密和漏磁通三次谐波幅值表达式，详见附录 B。

1.2.3 绕组漏磁场谐波和电流谐波分析

在用谐波信号检测内部故障时，谐波含有率是一个反映灵敏性高低的关键指标，本节以解析模型为基础分析漏磁三次谐波含有率 HRB_3 。由于径向漏磁的 n 次谐波分量：

$$B_{ny} = \sum_{\substack{j=A,B,C, \\ a,b,c}} G_j I_{jnm} \cos(n\omega t + \varphi_{jn}) \quad (9)$$

B_{ny} 由同频率的正弦量相加组成，故可化为相量分析并通过复数计算求出幅值表达式。三相对称的电流展开成傅里叶级数后，基波属于正序组，三次谐波属于零序组。由于基波在电流中占主导，故可认为基波与整体的相位关系相同，即一次侧和二次侧的相位基本反相，而三次谐波一次侧与二次侧的相位关系需要由具体波形确定，但两者之和有一个确定范围，如图 2 所示，即一次侧与二次侧同时幅值最大，反相时幅值最小。

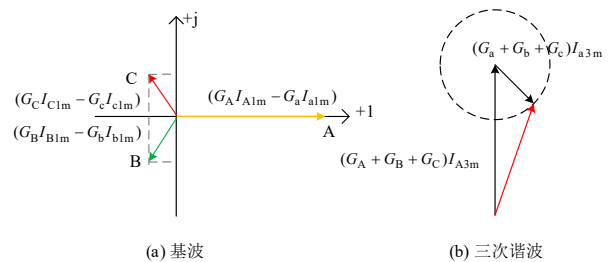


图 2 漏磁谐波相量计算示意图
Fig. 2 Schematic diagram of leakage harmonic phasor calculation

取 A 相上端外侧测点的坐标值(0, -480, 175)代入计算，得各结构函数数值为： $\{G_A, G_B, G_C, G_a, G_b, G_c\} = \{-22.86, -0.81, -0.13, -0.54, -0.26, -0.04\} \times 10^{-5}$ 。并考虑到基波一二二次侧基本满足 $I_{a1m} / I_{A1m} = N_1 / N_2 = 1.45$ ，并假设一、二次侧电流的三次谐波含有率相同，均为 k_i ，可得漏磁三次谐波含有率 k_B 为

$$k_B = \frac{B_{3ym}}{B_{1ym}} = \begin{cases} \frac{25.02I_{A1m}k_i}{14.02I_{A1m}} \approx 1.784k_i \text{ (同相)} \\ \frac{15.47I_{A1m}k_i}{14.02I_{A1m}} \approx 1.103k_i \text{ (反相)} \end{cases} \quad (10)$$

均大于电流的谐波含有率 k_i 。以上推导说明, 由于空间漏磁场分布的叠加性, 谐波含有率在从电流“传递”到漏磁的过程中会被放大, 体现了漏磁谐波信号在灵敏性上的优势。

2 漏磁场谐波差动保护原理

2.1 磁差动保护原理

根据磁通连续性原理, 变压器绕组的漏磁力线是与绕组交链的闭合回路, 因此对于任意闭合面, 穿入的磁力线一定等于穿出的磁力线。又由于在正常工况下漏磁场分布沿着绕组中部水平轴线呈现出一定对称性, 因此可以通过测量闭合空间内, 两个通过相同磁力线的对称点处磁感应强度(一进一出), 构成漏磁场差动保护。漏磁场由绕组电流激发产生, 只要绕组截面电流密度分布的对称性保持不变, 则绕组两端流过穿越性电流时(如励磁涌流、区外故障), 穿过两个测点的磁力线仍然是等大反向关系, 差动量为 0。而发生绕组变形或内部匝间故障时, 电流密度分布和漏磁场分布对称性被破坏, 从而出现很大的差动量, 如图 3 所示。

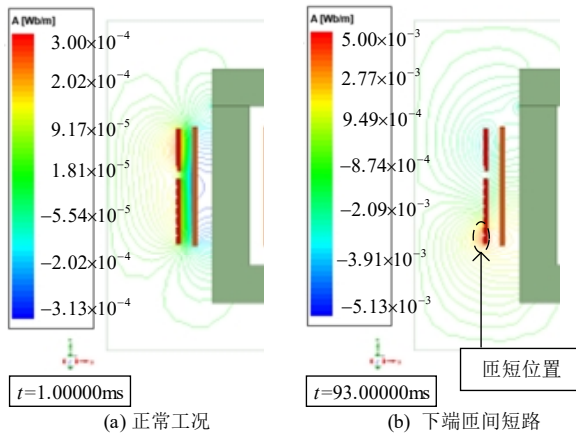


图 3 漏磁力线分布仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of leakage magnetic field lines distribution

为提高本保护方案的可靠性, 采用测量穿过上下端对称位置上三角形区域的漏磁通的方式构造差动量。在边长 30mm 的等边三角形的顶点处放置 3 个传感器测量漏磁感应强度, 然后利用附录 B 中的漏磁通近似计算公式求出三角形测量面上的漏磁通。因此, 本文使用的 4 个三次谐波保护特征量为磁上端量 Φ_{3up} 、磁下端量 Φ_{3dw} 、磁中心量 B_{3cen} 、磁差动量 Φ_{3dif} , 其中磁差动量定义式为

$$\Phi_{3dif} = \Phi_{3up} - k\Phi_{3dw} \quad (11)$$

式中: k 为上下端漏磁通幅值不一致时的补偿系数。

2.2 三次谐波计算方法

短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)作为一种时频联合分析方法(time-frequency analysis)具有兼顾时域和频域分辨率、变换物理意义明确、运算量小等优点, 适合用于漏磁场暂态扰动信号分析^[18]。对于 STFT 而言, 信号突变意味着高频分量增多, 当窗函数移动至发生匝短的过渡区段时, 高次谐波幅值会呈现先增后减的变化规律。因此, 经 STFT 求出的三次谐波幅值曲线在匝短发生时刻会呈现一个值很大的暂态尖峰, 一般持续一个工频周期 $T(=0.02s)$, 然后稳定于一个新值, 这一特征有利于实时检测故障。

取如图 4(a)所示的绕组下端 2 匝匝短时绕组下测点漏磁通信号进行 STFT 变换, 故障发生时刻在点 262 处, 持续了 16.5 个工频周期。STFT 的窗函数选择 blackman 窗, 窗宽一工频周期, 变换得到的三次、五次谐波和基波幅值曲线如图 4(b)、(c)、(d) 所示。

小波变换是检测信号局部突变点的另一种手段^[19]。信号经过小波变换后, 对应于突变点处的小波系数的绝对值往往很大。应用 DB6 小波函数对上述图 4(a)中的漏磁通信号进行 3 尺度分解, 得到各尺度小波系数 D1, D2, D3 如图 5 所示。

可见, 由三次谐波幅值曲线的暂态峰值确定的

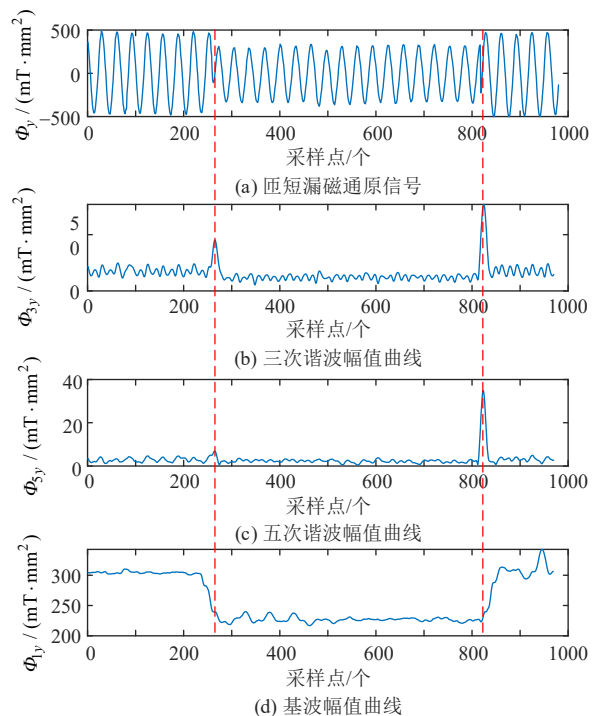


图 4 STFT 信号突变点检测

Fig. 4 STFT signal mutation point detection

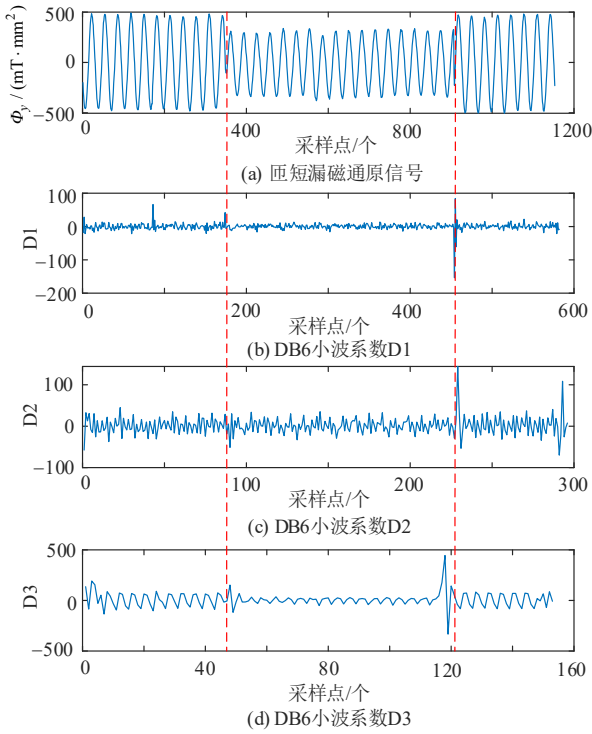


图5 小波变换信号突变点检测

Fig. 5 Wavelet transform signal mutation point detection

故障时刻与原信号波形突变时刻一致，且在故障起始时刻的检测能力优于五次谐波。基波分量在匝短过渡区段是呈斜坡状单调减少，无法精确定位故障的起止时刻，检测匝短故障的灵敏性也不如三次谐波。由于在故障起始时刻原信号波形突变程度不够剧烈，3条小波系数曲线在此刻的模极大值均不明显，无法准确地检测到故障起止时刻。因此相比小波变换，STFT对匝间短路下漏磁场突变信号拥有更强的检测能力和更高灵敏性。综上所述，本文选择STFT后的三次谐波分量分析漏磁场突变信号。

3 漏磁场谐波差动保护方案设计

3.1 保护判据

3.1.1 匝间短路判据

如前所述，当变压器发生匝间短路故障时，STFT得到的漏磁场三次谐波典型波形如图6所示。

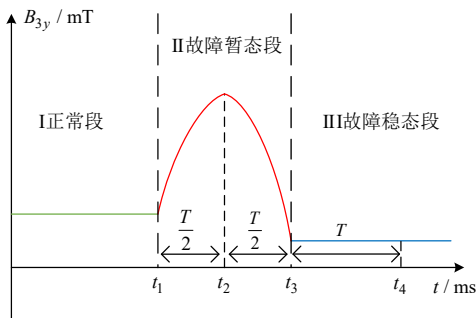


图6 匝间短路下三次谐波波形特征

Fig. 6 Characteristics of third harmonic waveform under interturn short circuit

可将匝间短路下的三次谐波幅值曲线划分成：正常段、故障暂态段和故障稳态段，对应的三次谐波幅值称为正常量、故障暂态量、故障稳态量。

本文利用故障暂态量与半个工频周期前的正常量之间的相对差值构造故障特征量，称为故障暂态分量相对值，如公式(12)所示。

$$\Delta X' \% (t) = \frac{|X(t) - X(t - 0.5T)|}{X(t - 0.5T)} \times 100\% \quad (12)$$

对应的匝间短路启动判据为

$$\Delta X' \% > X_{set} \quad (13)$$

式中： $X = \Phi_{3up}$ 、 Φ_{3dw} 、 B_{3cen} ； X_{set} 为对应的整定值，具体计算详见3.3节。

绕组发生匝间短路后，近故障测点的三次谐波故障稳态量与正常量间的差值显著。故利用故障稳态量与一定时间前的正常量的差值构造故障特征量，称为故障稳态分量。

由于实际测量得到的漏磁场三次谐波曲线稳定段存在如图4(b)所示轻微纹波，不利于保护判据动作，故采用中值滤波对STFT后的曲线稳定段进行平滑处理。中值滤波的计算宽度取一工频周期内采样点数 N ，任一采样点的中值滤波值由该点及该点前 $N-1$ 个采样点得出。假设在 t_2 时刻匝间短路启动，则经过半个周期后($t = t_3$)曲线进入故障稳态段，第一个有效的中值滤波点在 t_4 时刻算出。另外为避免暂态尖峰旁的旁瓣干扰，最终取时间间隔为 $2.2T$ ，故障稳态分量定义如下：

$$\Delta X'' (t) = X(t) - X(t - 2.2T) \quad (14)$$

对应的匝间短路判据为

$$|\Delta \Phi_{3dif}''| > \Phi_{set3} \quad (15)$$

$$\Delta B_{3cen}'' > B_{set2} \quad (16)$$

式中： $X = \Phi_{3dif}$ 、 B_{3cen} ； Φ_{set3} 、 B_{set2} 为对应整定值。

3.1.2 绕组变形判据

变压器绕组变形一般是故障电流所产生的电动力多次作用形成的，属于累积性故障，故只有故障稳态量。绕组轴向压缩变形时，近压缩侧的三次谐波幅值曲线有所减小，非压缩侧变化甚微，故绕组变形判据为

$$\Phi_{3up}'' < \Phi_{set1}' \quad (17)$$

$$\Phi_{3dw}'' < \Phi_{set2}' \quad (18)$$

$$|\Phi_{3dif}''| > \Phi_{set3}' \quad (19)$$

式中： Φ_{set1}' 、 Φ_{set2}' 、 Φ_{set3}' 为对应的整定值。

3.2 保护方案设计

利用3.1节提出的故障判据设计的漏磁场谐波差动保护逻辑框图如图7所示。所涉及的故障特征

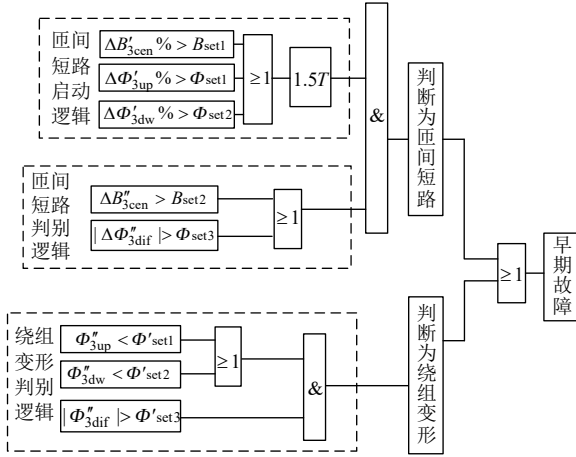


图7 漏磁场谐波差动保护逻辑框图

Fig. 7 Logic diagram of leakage magnetic field harmonic differential protection

量具体名称见附录 A 表 2。

考虑到两相以上绕组同时发生故障的概率很小和保护方案的经济性, 本文采用在铁芯窗内, AB 相绕组间和 BC 相绕组间各布置 3 个测点, 共 14 个传感器的布置方案, 如附录图 A2(a)所示。其中, AB 相间的 3 个传感器称为传感器组 1, BC 间称为组 2。由于三相三柱式平面变压器以 B 相铁芯为对称轴, 所以漏磁场分布左右对称, 组 1 和组 2 的故障判据相同, 整定值也相同。在只考虑单处故障的情况下, 若仅有组 1 动作说明 A 相绕组发生故障; 若组 1、组 2 均动作说明 B 相绕组发生故障; 仅有组 2 动作说明 C 相绕组发生故障, 如附录图 A2(b)所示。

漏磁场谐波差动保护的具体流程图如附录图 A3 所示。首先由磁光传感器采集 6 个测点的漏磁场数据, 然后 STFT 计算三次谐波幅值并进一步计算故障暂态分量相对值。若越限则匝间短路保护启动, 延时 1.5 个工频周期后进行中值滤波再判断是否为匝短故障; 若不越限则说明信号没有出现突变, 直接进行中值滤波, 判断是否为变形故障。若判别为故障, 再按照附录图 A2(b)的判别逻辑定位故障相, 最终动作并发送故障报告。

3.3 定值整定计算

3.3.1 匝间短路整定值计算

为保证本保护的可靠性, 匝间短路启动整定值应按在变压器空载合闸时不误动的原则整定。变压器空载合闸时由于铁芯饱和出现的暂态励磁涌流会产生数值很大的漏磁场三次谐波分量。若用三次谐波幅值直接整定会使启动门槛值过高, 大大降低保护灵敏度。注意到空载合闸时漏磁三次谐波幅值曲线按时间常数呈阶梯式逐步衰减, 与匝间短路时

呈脉冲式增大形成对比, 如图 8 所示, 故利用幅值差值对正常值的相对值整定能有效区分空载合闸和内部匝短。

由于磁化曲线是单增曲线, 漏磁场与绕组电流之间也是线性关系^[20], 故 ψ 、 i_{μ} 、 B_{3y} 三者衰减趋势同步, 均在最初几个周期里衰减最快。因此按最严重情况下空载合闸前两个周期整定, 取可靠系数为 1.3, 故障暂态分量相对值的整定公式为

$$X_{\text{set}} = 1.3 \frac{X(T_{\text{nlc}_1}) - X(T_{\text{nlc}_2})}{X(T_{\text{nlc}_1})} \times 100\% \quad (20)$$

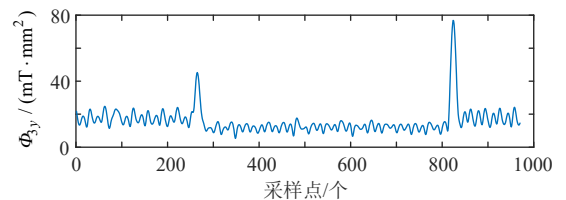
式中: $X = B_{3ymcen}$ 、 Φ_{3ymup} 、 Φ_{3ymdw} ; T_{nlc_1} 、 T_{nlc_2} 表示空载合闸第一、二个周期。

由于三相电压对称, 通过推导可知, A、B、C 三相励磁涌流三次谐波分量式相同。因此, 空载合闸后第一个周期里中部漏磁密三次谐波幅值为

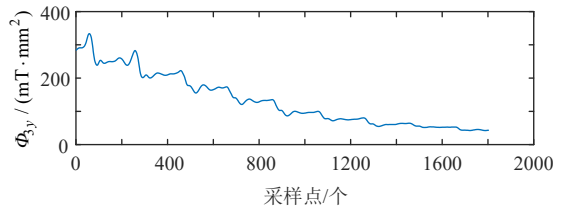
$$B_{3ymcen}(T_{\text{nlc}_1}) = I_{3m_1T} \sum_{i=A,B,C} G_i(p_{cen}) \quad (21)$$

式中: I_{3m_1T} 为空载合闸后第一个周期的励磁涌流三次谐波幅值; p_{cen} 为中部测点坐标值。上端和下端漏磁通三次谐波幅值类似, 见附录 B。

取励磁涌流第二个周期后的计算步骤相同, 不再赘述。据上述公式计算得, Φ_{set1} 为 28.86%, Φ_{set2} 为 45.05%, B_{set1} 为 57.11%



(a) 匝间短路下三次谐波幅值曲线



(b) 空载合闸下三次谐波幅值曲线

图8 空载合闸和匝间短路时三次谐波特征对比
Fig. 8 Comparison of third harmonic characteristics during no load closing and interturn short circuit

由于磁差动量 Φ_{3dif} 定义式(11)中的补偿系数 k 是按变压器额定运行下整定的, 在发生变压器过载或区外短路故障等导致绕组电流增大的情况下, Φ_{3dif} 可能不等于 0。另外, 由于电流增大, 磁中心量 B_{3cen} 也将有所增大。因此, 匝间短路判别整定值按照躲过区外三相短路情况整定。

磁差动和磁中心故障稳态分量的整定值按照区外三相短路和正常工况下的差值进行计算, 考虑

1.3的可靠系数，整定公式为

$$X_{set} = 1.3(X_{3ym} | 3f - X_{3ym} | |_{n\%}) \quad (22)$$

式中： $X = \Phi_{dif}、B_{cen}$ 。具体表达式详见附录B。据上述公式计算得， Φ_{set3} 为11.94mT·mm²， B_{set2} 为0.0073mT。

3.3.2 绕组变形整定值计算

以高压绕组上端绕组整体轴向压缩 $n\%$ 为例，磁上端故障稳态量的整定值 Φ'_{set1} 按照此时上测点的漏磁通三次谐波幅值 $\Phi_{3ymup} |_{n\%}$ 乘上 1.3 的可靠系数整定，计算公式为

$$\Phi'_{set1} = 1.3\Phi_{3ymup} |_{n\%} \quad (23)$$

式中： $\Phi_{3ymup} |_{n\%}$ 的具体表达式详见附录B。

磁差动故障稳态量的整定值 $\Phi'_{set3} |_{up}$ 按照式(11)进行计算并乘上 0.8 的可靠系数，如式(24)所示：

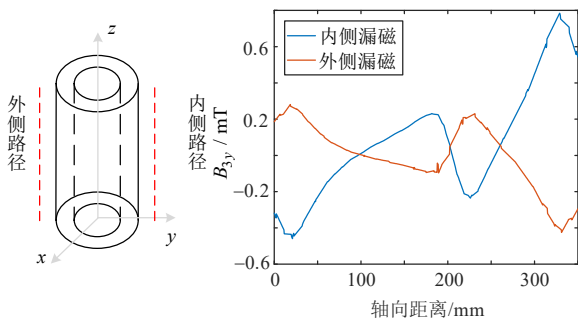
$$\Phi'_{set3} |_{up} = 0.8(\Phi_{3ymup} |_{n\%} - k\Phi_{3ymdw} |_{n\%}) \quad (24)$$

式中： $\Phi_{3ymdw} |_{n\%}$ 的计算方法与 $\Phi_{3ymup} |_{n\%}$ 相同。

当下端轴向压缩变形时， Φ'_{set2} 与 $\Phi'_{set3} |_{down}$ 的计算方法类似，不再赘述。最后取 $\Phi'_{set3} = \max\{\Phi'_{set3} |_{up}, \Phi'_{set3} |_{down}\}$ 。由于实验变压器条件所限，本文选取 5% 的绕组变形进行整定，根据上述公式得 Φ'_{set1} 为 19.81 mT·mm²， Φ'_{set2} 为 17.55 mT·mm²， Φ'_{set3} 为 3.96 mT·mm²。

3.4 传感器安装位置与保护灵敏度分析

为确定漏磁场的具体测量位置，利用上文提出的漏磁场解析模型分别计算在 A 相电流达到峰值时，A 相绕组铁芯窗内、铁芯窗外距绕组轴线 110% 外径长度的轴向路径上的漏磁感应强度分布曲线，如图 9(a)所示。从图 9(b)可见，外侧和内侧漏磁分布的对称中心点均在 202mm 处，故以该高度为中测点位置。



(a) 漏磁分布计算路径示意图 (b) 正常工况下漏磁三次谐波轴向分布

图9 漏磁轴向分布计算值

Fig. 9 Calculation value of leakage magnetic axial distribution

为确定下测点最优位置，利用解析模型得到当距绕组尾端不同位置处发生 1 匝匝短时，内侧路径上漏磁三次谐波幅值增量的分布曲线，如附录图 A4 所示，其中匝短位置以路径长度的百分比表示。可见漏磁在故障点附近变化量较大，在远故障处变化甚小。下测点最优位置应使其在绕组下半部各处匝短均能测得较大变化量，故将图中 7 条曲线取绝对值后相加得总变化量曲线(黑色虚线)。可见下测点安装在 50 至 150mm 范围内最佳，结合正常工况下漏磁分布在 20mm 和 330mm 处出现极值，故选择下测点位置为 60mm 处。用同样的分析方法得到上测点位置为 290mm 处。

为进一步探究本保护对不同位置匝短故障的反映能力和灵敏度，通过解析模型依次求得在距绕组尾端 10%~90% 共 9 个位置，发生 1 匝(0.498%) 和 2 匝(0.995%) 短路时磁差动故障稳态分量 $\Delta\Phi_{3dif}^n$ 和磁中心故障稳态分量 ΔB_{3cen}^n 的值，如附录图 A5、A6 所示。可见在两匝匝短下，磁差动量在中部 30%~60% 内存在动作死区，但由于中部匝短时中部漏磁增强，磁中心量变大，弥补了前者的死区，故综合利用磁差动量和磁中心量可消除动作死区。两匝匝短下磁差动量灵敏度最低点在 20% 处，为 1.33；磁中心量灵敏度最低点在 30% 处，为 1.22，均满足要求。而一匝匝短时由于磁差动量曲线和磁中心量曲线完全在整定值之内，故本保护无法识别到 1 匝匝短的轻微故障。

4 动模实验和仿真实证

4.1 仿真和实验建立

4.1.1 动模系统建立

动模实验系统接线如图 10(a)所示。其中，实验变压器为三相双绕组干式变压器，采用 Yn/d11 接线，变压器的电气参数为：额定容量 50kVA，额定电压 1/0.4kV，归算至高压侧的绕组参数为 $R_T = 0.637\Omega$ ， $X_T = 1.52\Omega$ ， $G_T = 0.257mS$ ， $B_T = 1.72mS$ 。变压器的结构参数见附录 A 表 1；无穷大可调电源的电压调节范围为 0~1.5kV，不及内阻；线路参数： $r_l = 8.835m\Omega/km$ ， $l_l = 0.482mH/km$ ，长度 200km；可调阻性负载的调节范围为 3.2~230.9 Ω 。

动模变压器实物见图 10(b)，其中 A 相高压绕组表面有 7 个短路抽头，配合变压器控制柜可实现 500ms 的绕组中下部 1 至 7 匝轻微匝间故障；C 相高压绕组为变高度绕组，以模拟绕组轴向轻微压缩故障。漏磁测量系统采用基于法拉第磁光效应的磁

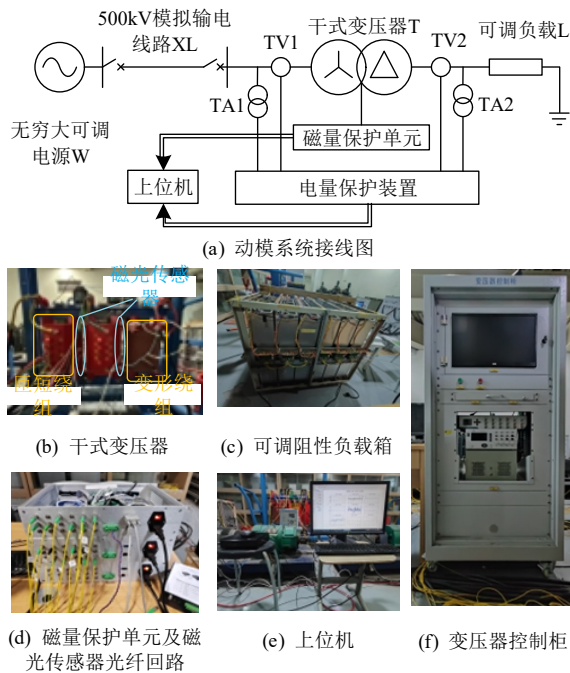


图 10 动模系统接线与装置图

Fig. 10 Wiring and device diagram of dynamic modeling system

光传感器, 具有不受电磁干扰、体积小等优点。图 10(d)中自主研发的磁量保护单元在对来自传感器的漏磁数据进行 STFT 计算、平滑、保护判据计算后将漏磁谐波数据和故障报告传输给上位机, 从而实现变压器早期故障实时在线检测。

4.1.2 仿真和解析模型一致性验证

为分析区外故障等难以在动模实验中进行的复杂工况下保护动作情况, 本文首先在 ANSYS 中建立了与动模实验变压器一致的三维仿真模型(见附录图 A7(a)), 然后分别绘制了在额定运行和空载合闸下组 1 上中下测点漏磁仿真值和实验值, 以检验仿真模型和实验变压器的漏磁场分布一致性。同样, 为检验所建解析模型的正确性, 分别绘制了额定运行下流过同一绕组电流时解析模型和仿真模型所得的径向漏磁密, 对比结果如附录图 A8、A9、A10 所示。可见, 在额定运行和空载合闸的工况下, 仿真模型和动模实验模型具有高度一致性; 额定运行下计算值与仿真值吻合较好, 仅幅值上有所偏差, 这可能是解析模型未考虑铁芯对漏磁场分布的影响所致。

为了定量评估模型的一致性, 选用 Hausdorff 距离算法衡量实验曲线与仿真曲线间、解析曲线与仿真曲线间的相似度^[21]。以额定工况下漏磁通实验曲线其自身的 Hausdorff 距离相对于曲线幅值的百分比 $H_B\%$ 作为衡量基准, 将待验证曲线组的 Hausdorff 距离百分比 $H\%$ 与之比较, 若 $H\%$ 不超过

$10H_B\%$ 说明该组曲线相似度良好。上述图中曲线组对应的 $H\%$ 如表 1 所示。

表 1 仿真模型和解析模型的一致性评估

Table 1 Consistency evaluation of simulation model and analytical model

数据类型	上测点 $H_{up}\%$	下测点 $H_{dw}\%$
基准值	1.84%	2.58%
额定运行下仿真与实验曲线	5.19%	12.05%
空载合闸下仿真与实验曲线	16.47%	11.04%
额定运行下计算与仿真曲线	11.93%	18.37%

为了在仿真模型中模拟出与实验变压器一致的谐波现象, 除按实验变压器磁化曲线设置铁芯材料参数外, 还在外电路的电源侧采用工频电压源串联 0.85% 额定电压的 150Hz 电压源供电, 以模拟真实外部电网(见附录 A 图 A7(b))。额定工况时组 1 上测点漏磁通谐波含有情况的实验值与仿真值对比如表 2 所示。可见两者的三次谐波含有率差值在允许范围内, 验证了所建仿真模型的准确性。

表 2 上端径向漏磁谐波含有率实验值与仿真值对比

Table 2 Comparison of experimental and simulated values of the harmonic content of radial magnetic flux leakage at the upper end

数据类型	基波幅值/ (mT·mm ²)	三次谐波幅值/ (mT·mm ²)	三次谐波 含有率/%
实验值	695.77	22.45	3.23
仿真值	692.30	21.0708	3.04

4.2 动模验证

4.2.1 绕组变形

为了验证本保护检测轻微绕组变形的准确性及高灵敏性, 在动模变压器 C 相高压绕组上进行了 5% 和 10% 轴向压缩故障的绕组变形试验。组 2 上测点试验采样曲线和三次谐波幅值曲线如附录图 A11、A12 所示。

由图 A12 可见, 绕组变形判据能准确判别 5% 及以上故障程度的绕组变形故障, 且故障量明显, 在实际应用中能够快速检测出早期故障并进行检修, 提高变压器的使用寿命。完整的保护校验结果如表 3 所示, 可见本保护能准确将故障定位到 C 相。

表 3 不同程度绕组变形时保护动作情况

Table 3 Protection action in different degree of winding deformation

故障工况	故障特征量/(mT·mm ²)				动作情况
	组 1		组 2		
C 相上端轴 向压缩 5%	Φ_{3up}^*	22.27	Φ_{3up}^*	15.34	组 1 不动 作, 组 2 动作
	Φ_{3dw}^*	20.42	Φ_{3dw}^*	20.13	
	Φ_{3dif}^*	1.83	Φ_{3dif}^*	-4.95	
C 相上端轴 向压缩 10%	Φ_{3up}^*	21.88	Φ_{3up}^*	10.18	组 1 不动 作, 组 2 动作
	Φ_{3dw}^*	20.76	Φ_{3dw}^*	21.48	
	Φ_{3dif}^*	1.77	Φ_{3dif}^*	-11.65	

4.2.2 匝间短路

在动模变压器 A 相高压绕组下端进行 0.995% 的匝间短路实验。根据传感器组 1 数据绘制的磁差动量和磁中心量三次谐波曲线如图 11 所示。

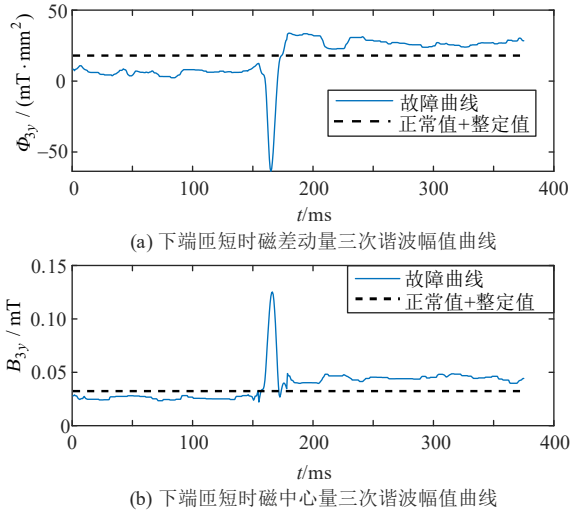


图 11 下端 0.995%匝间短路下磁差动量和磁中心量三次谐波幅值曲线

Fig. 11 Third harmonic amplitude curve of magnetic difference momentum and magnetic center under 0.995% inter turn short circuit at the lower end

曲线在约 180ms 时进入故障稳态段，图中虚线值为 156ms 时的正常值与整定值之和，均小于故障稳态量。根据故障稳态分量的定义，保护可准确识别 0.995% 的轻微匝间短路，但由于此时故障稳态段曲线的裕度已不大，说明 0.995% 是可检测到的最小匝间短路。

为进一步验证本保护检测轻微匝间短路的有效性，本文在 A 相绕组上进行了不同程度、不同位置的匝间短路实验，保护动作情况如表 4 所示。表中 A 下 0.995% 代表 A 相下端 0.995% 匝短，A 中 0.498% 代表 A 相中部 0.498% 匝短，其余类推。

由表 4 可知，本文所提出的故障暂态分量相对值在各类匝间短路时均具有很高的灵敏度，故障稳态分量则随故障程度的加深而变大。由于在发生 0.498% 的中部匝间短路时磁差动故障稳态分量和磁中心故障稳态分量均未超过整定值，因此本保护方案能够有效识别 0.995% 及以上的下端匝间短路和中部匝间短路。

4.2.3 空载合闸

变压器在空载合闸期间内部结构并未被破坏，

表 4 不同程度匝间短路时保护动作情况
Table 4 Protection action in different degrees of inter-turn short circuit

故障工况	故障特征量					动作情况
	$\Delta\Phi_{3up}^*$ / %	$\Delta\Phi_{3dw}^*$ / %	ΔB_{3ccn}^* / %	$\Delta\Phi_{3dif}^*$ / (mT·mm ²)	ΔB_{3ccn}^* / mT	
A 下 0.995%	41.72	160.13	354.08	15.92	0.0072	动作
A 下 2.488%	48.20	139.41	418.46	18.17	0.053	动作
A 下 3.483%	200.16	242.32	546.19	20.564	0.078	动作
A 中 0.498%	29.55	52.40	782.04	3.93	0.0069	不动作
A 中 0.995%	34.13	77.92	1184.82	4.81	0.023	动作
A 中 1.493%	76.95	90.58	1623.24	10.74	0.057	动作

漏磁场分布的对称性不变，漏磁场谐波差动保护应不受励磁涌流的影响。由附录图 A13 可见，空载合闸中测量到的绕组上下测点漏磁通时域波形保持着对称性。计算下测点的漏磁通三次谐波曲线及其故障暂态分量相对值曲线，如图 12 所示。

可见故障暂态分量相对值始终小于阈值，匝间短路保护不启动，本保护可以在不闭锁的情况下避免空载合闸的影响。为检验本保护在极端工况下的故障检测能力，本文进行了空载合闸叠加不同程度匝间短路的动模实验，保护动作情况如表 5 所示。

分析表 5 可知，变压器空投于匝间短路时故障特征量明显且随故障程度的加重而增大，可以准确动作，验证了本保护在极端工况下的有效性。

4.3 仿真验证

4.3.1 区外故障下漏磁场谐波差动保护验证

由于动模试验条件有限，利用前文建立的一致

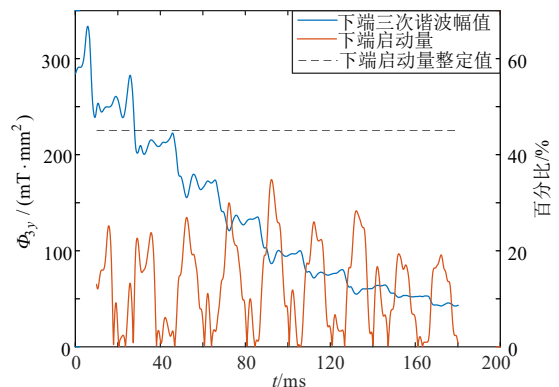


图 12 空载合闸时下测点漏磁通三次谐波幅值曲线及其故障暂态分量相对值曲线

Fig. 12 Amplitude curve of the third harmonic of the leakage flux at the measuring point under no-load closing and the relative value curve of the transient component of the fault

性仿真模型获取不同类型区外故障条件下的绕组漏磁场数据，进行故障判别。仿真总时长 220ms，所有区外故障设置在变压器二次侧出口处，发生在

40~180ms, 叠加的匝间短路设置在 A 相高压侧, 发生在 80~140ms。保护动作情况如表 6 所示, 其

中 fa 代表 A 相接地故障, fab 代表 AB 两相短路故障, fabc 代表三相短路故障。

表 5 空载合闸于不同程度匝间短路时保护动作情况
Table 5 Protection action of no-load closing during different degrees of inter turn short circuit

故障工况	故障特征量					动作情况
	$\Delta\Phi_{3up}' / \%$	$\Delta\Phi_{3dw}' / \%$	$\Delta B_{3cen}' / \%$	$\Delta\Phi_{3dif}'' / (\text{mT} \cdot \text{mm}^2)$	$\Delta B_{3cen}'' / \text{mT}$	
空投于下端 1.493%	219.48	169.38	304.17	15.47	0.064	动作
空投于下端 2.488%	313.50	469.84	629.38	21.61	0.083	动作
空投于下端 3.483%	949.60	1241.80	1706.58	27.44	0.116	动作

表 6 区外故障下保护动作情况
Table 6 Protection action under faults outside the area

故障工况	故障特征量					动作情况
	$\Delta\Phi_{3up}' / \%$	$\Delta\Phi_{3dw}' / \%$	$\Delta B_{3cen}' / \%$	$\Delta\Phi_{3dif}'' / (\text{mT} \cdot \text{mm}^2)$	$\Delta B_{3cen}'' / \text{mT}$	
fa	101.42	95.82	43.47	2.75	0.0026	不动作
fab	165.97	178.74	81.39	1.77	0.0020	不动作
fabc	160.96	196.14	85.87	4.26	0.0055	不动作
fa+A 下 0.995%	341.40	464.40	1012.20	89.50	0.37	动作
fab+A 下 0.995%	248.20	420.00	1040.80	82.86	0.37	动作
fabc+A 下 0.995%	232.50	354.30	859.60	41.25	0.34	动作

分析表 6 可知:

1) 由于外部短路也属于瞬时性故障, 绕组电流的剧增导致漏磁故障暂态分量相对值均越过整定值, 故匝间短路保护都启动。

2) 由于外部短路电流是穿越性电流, 不改变漏磁场空间分布, 故磁差动和磁中心故障稳态分量不大, 匝间短路保护不动作。

3) 当区外短路叠加内部匝间短路时, 由于漏磁场不对称度是在数值很大的短路电流激发的漏磁场上发展的, 故故障特征量更明显, 灵敏度更高。

因此, 以上仿真验证了本保护在区外短路时不误动的安全性和区外短路的同时发生匝间短路时不拒动的信赖性。

4.3.2 漏磁场谐波差动保护优越性验证

为凸显本保护方案的优越性, 利用仿真数据将本文保护方案与文献[4]所提保护进行比较。文献[4]所提保护通过测量绕组附近漏磁场在搜索线圈中产生的感应电压来检测早期匝间短路, 不妨称为漏磁场感应电压保护。由于匝间短路故障只能设置整数匝, 故对于漏磁谐波差动保护设置下端 0.995% 和中部 0.995% 匝短故障, 对于漏磁场感应电压保护设置下端 1.134%(50 匝)、下端 1.020%(45 匝)、中部 1.134%(50 匝)匝短故障, 漏磁场感应电压保护的故障特征量 U_{Crt_SUM} 的阈值按原文设为 150mV。两种保护的对比结果如表 7 所示。

由表 7 可知, 当绕组下端相同位置发生匝短时, 漏磁场感应电压保护对于 1.134% 的匝短可以可靠动作, 但在 1.020% 的匝短时 U_{Crt_SUM} 为 151.7mV, 已接近阈值, 无法满足灵敏度要求, 视为不动作。

表 7 漏磁谐波差动保护与漏磁场感应电压保护比较

Table 7 Comparison between leakage harmonic differential protection and leakage magnetic field induced voltage protection

保护方案	故障工况	故障特征量		动作情况
		$\Delta\Phi_{3dif}'' / (\text{mT} \cdot \text{mm}^2)$	$\Delta B_{3cen}'' / \text{mT}$	
漏磁谐波差动保护	A 下 0.995%	15.41	0.008	动作
	A 中 0.995%	4.81	0.023	动作
漏磁感应电压保护	U_{Crt_SUM}/mV			
	A 下 1.134%	246.8		动作
	A 下 1.020%	151.7		不动作
	A 中 1.134%	40.2		不动作

而本文保护在下端 0.995% 的匝短时 $\Delta\Phi_{3dif}''$ 的灵敏度为 1.29, 能可靠动作。此外在中部匝短时, 漏磁感应电压保护存在死区。而本保护的磁中心故障稳态分量 $\Delta B_{3cen}''$ 可灵敏检测到故障, 体现了其优越性。

5 结论

本文以非规则分段式绕组干式变压器为研究对象, 针对变压器绕组变形和轻微匝间故障的早期故障保护问题, 提出了一种基于漏磁场三次谐波信号的新型保护方案。通过理论推导和仿真、实验验证, 得出以下结论:

1) 变压器漏磁场中的谐波主要来源于绕组电流谐波分量, 所建立的计及三相绕组的漏磁场分布解析模型表明漏磁谐波信号的灵敏度高于电气量谐波信号。

2) 根据漏磁场分布的纵向对称性提出了位于绕组间纵向空隙上中下位置的 6 测点测量方案, 针对三次谐波幅值曲线特点构造的故障暂态分量相对值和故障稳态分量, 在轻微匝间短路和绕组变形

故障时具有较高的准确性和灵敏度,并且能克服励磁涌流影响。

3)建立了动模实验系统和 ANSYS 仿真模型以对本提出的漏磁场谐波差动保护方案进行实验和仿真验证。结果表明本方案能识别 5%及以上的绕组变形故障和 0.995%及以上的匝间短路故障,不受励磁涌流和区外故障影响,且在灵敏性上优于文献[4]所提漏磁场保护。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 汲胜昌, 赵德华, 贾云飞, 等. 变压器绝缘缺陷放电发展特性及检测方法研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4297-4314.
JI Shengchang, ZHAO Dehua, JIA Yunfei, et al. Research status and prospects of development characteristics and detection methods of transformer insulation defect discharge[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4297-4314(in Chinese).
- [2] 廖国文. 电力变压器内部故障早期发现与诊断技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [3] 冀茂, 齐波, 郑伟, 等. 变压器典型绕组缺陷的漏磁分布规律及编码辨识方法研究[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2133-2142.
JI Mao, QI Bo, ZHENG Wei, et al. Coding diagnosis method based on leakage distribution law under typical winding defects of transformers[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2133-2142(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 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): 3808-3818.
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): 3808-3818(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 胡雪凯, 张乾, 田广, 等. 双绕组变压器谐波传递特性研究[J]. 河北电力技术, 2021, 40(3): 62-66, 71.
HU Xuekai, ZHANG Qian, TIAN Guang, et al. Research on harmonic transfer characteristics of double winding transformer[J]. Hebei Electric Power, 2021, 40(3): 62-66, 71(in Chinese).
- [9] 袁志勇, 吴龙, 杜思宇, 等. 光伏电站电能质量评估中的变压器谐波传递问题分析[J]. 自动化应用, 2023, 64(2): 150-152.
YUAN Zhiyong, WU Long, DU Siyu, et al. Suggestions on reactive power configuration of distributed wind farms[J]. Automation Application, 2023, 64(2): 150-152(in Chinese).
- [10] 陈生栋, 孙海峰. 特高压换流站三柱四绕组结构换流变压器谐波抑制研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3155-3163.
CHEN Shengdong, SUN Haifeng. Harmonic elimination for three-limb four-winding converter transformer in UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3155-3163(in Chinese).
- [11] 许斌斌, 陈畅, 张傲宇, 等. 谐波下干式变压器铁心磁场-温度场仿真分析[J]. 电气传动, 2024, 54(2): 32-40.
XU Binbin, CHEN Chang, ZHANG Aoyu, et al. Simulation analysis of magnetic field-temperature field about dry-type transformer core under harmonics[J]. Electric Drive, 2024, 54(2): 32-40(in Chinese).
- [12] 武炬臻, 贺康航, 王贵娟, 等. 谐波条件下硅钢片磁特性及换流变压器漏磁场计算[J]. 变压器, 2024, 61(3): 52-58.
WU Juzhen, HE Kanghang, WANG Guijuan, et al. Calculation of silicon steel sheet magnetic characteristics and leakage magnetic field under harmonic condition in converter transformer[J]. Transformer, 2024, 61(3): 52-58(in Chinese).
- [13] 邹辉, 皮遂清. 电网谐波对变压器和异步电机能效影响仿真研究[J]. 电气传动自动化, 2021, 43(6): 42-46.
ZOU Hui, PI Suiqing. Simulation study on influence of grid harmonics on energy efficiency of transformer and asynchronous motor[J]. Electric Drive Automation, 2021, 43(6): 42-46(in Chinese).
- [14] 窦照宇. 感应滤波技术在低压配电网中的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- [15] 杨涛, 路晓庆, 董旭柱, 等. 交流微电网谐波功率分布式共享控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3060-3069.
YANG Tao, LU Xiaoqing, DONG Xuzhu, et al. Distributed control strategy for harmonic power sharing in AC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 3060-3069(in Chinese).
- [16] 瓦修京斯基. 变压器的理论与计算[M]. 崔立君, 杜恩田, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983: 123-154.
- [17] 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): 1839-1852.
PAN Chao, SHI Wenxin, MENG Tao. Study on electromagnetic characteristics of interturn short circuit of single-phase transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1839-1852(in Chinese).
- [18] 赵风展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34, 109.
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34, 109(in Chinese).
- [19] 胡从强, 曲娜, 张帅, 等. 连续小波变换和具有注意力机制的深度残差收缩网络在低压串联电弧故障检测中的应用[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1897-1904.
HU Congqiang, QU Na, ZHANG Shuai, et al. Application of continuous wavelet transform and deep residual shrinkage network with attention mechanism in detection of low voltage series arc fault[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1897-1904(in Chinese).
- [20] 李勇, 苏钟焕, 王然丰, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流计算分析[J]. 变压器, 2017, 54(8): 1-5.
LI Yong, SU Zhonghuan, WANG Ranfeng, et al. Calculation and analysis of magnetizing inrush current of high impedance transformer with built-in high voltage winding[J]. Transformer, 2017, 54(8): 1-5(in Chinese).
- [21] 翁汉刚, 刘华, 林湘宁, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 475-483.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483(in Chinese).



邓祥力

在线出版日期: 2025-05-16。

收稿日期: 2024-09-30。

作者简介:

邓祥力(1973), 通信作者, 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;

彭袁臻(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器电磁场分析与保护技术, E-mail: 2870822338@qq.com。

(编辑 李健一)

附录 A

表 A1 非规则绕组变压器结构参数

Table A1 Structural parameters of irregular winding transformer

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
低压绕组高度 h_L	320	低压绕组与铁轭距离 h_{L1}	50
高压内层绕组上段高度 h_{H1}	116	高压内层绕组上段与低压绕组高度差 Δh_{H1}	5
高压内层绕组下段高度 h_{H2}	174	高压内层绕组上段与下端距离 Δh_{H2}	20
高压外层绕组上段高度 h_{H3}	102	高压外层绕组上段与下端距离 Δh_{H3}	34.05
高压外层下段单匝绕组高度 h_{H4}	18.94	高压外层下段单匝绕组间距 Δh_{H4}	7
低压绕组内径 a_1	90	低压绕组外径 b_1	103.34
高压内层绕组内径 a_2	134	高压内层绕组外径 b_2	143.5
高压外层绕组外径 b_3	147	铁芯柱距离 L_c	320
铁轭距离 h_0	530	铁芯柱直径 a	115

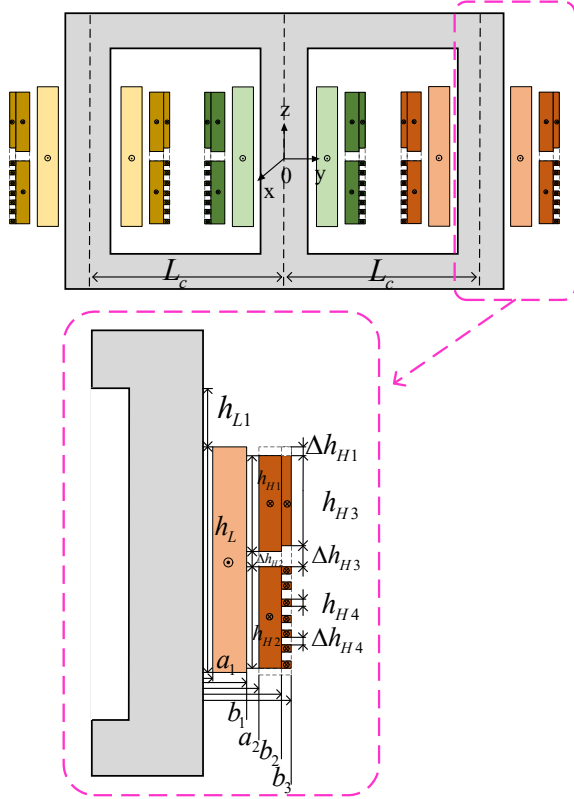


图 A1 解析模型计算示意图

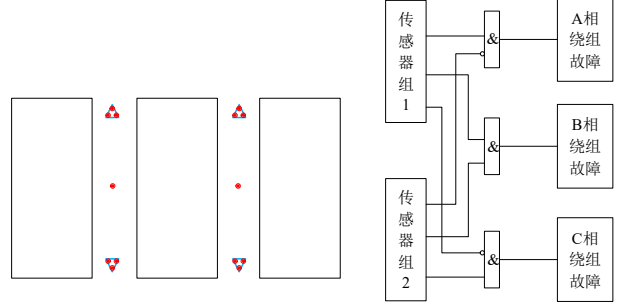
Fig. A1 Schematic diagram of analytical model calculation

表 A2 故障特征量符号

Table A2 Fault characteristic quantity symbol

名称	磁上端量	磁下端量	磁差动量	磁中心量
正常量	Φ_{3up}	Φ_{3dw}	Φ_{3dif}	B_{3cen}
故障暂态量	Φ'_{3up}	Φ'_{3dw}	Φ'_{3dif}	B'_{3cen}
故障暂态分量	$\Delta\Phi'_{3up} \%$	$\Delta\Phi'_{3dw} \%$		$\Delta B'_{3cen} \%$

相对值	Φ_{3up}	Φ_{3dw}	Φ_{3dif}	B_{3cen}
故障稳态量				
故障稳态分量			$\Delta\Phi_{3dif}$	ΔB_{3cen}



(a) 传感器布置图

(b) 故障定位逻辑图

图 A2 传感器布置图和故障相定位逻辑图

Fig. A2 Sensor layout diagram and fault location logic diagram

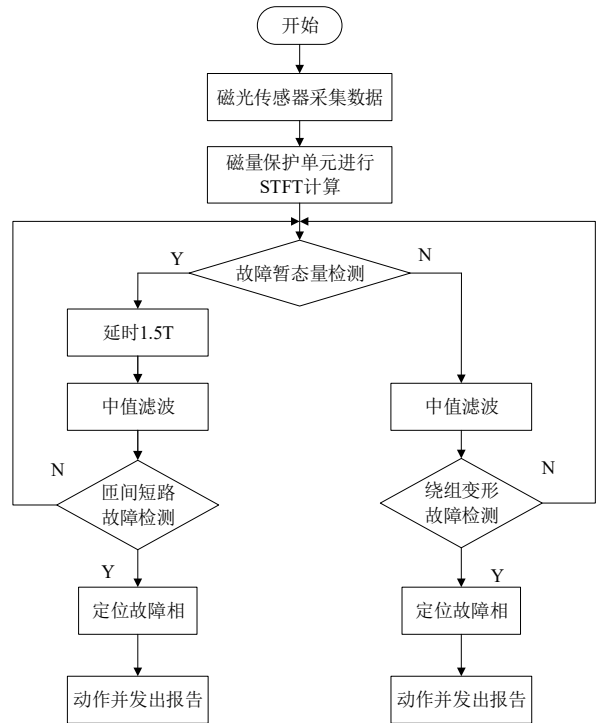


图 A3 漏磁场谐波差动保护流程图

Fig. A3 Flow chart of leakage magnetic field harmonic differential protection

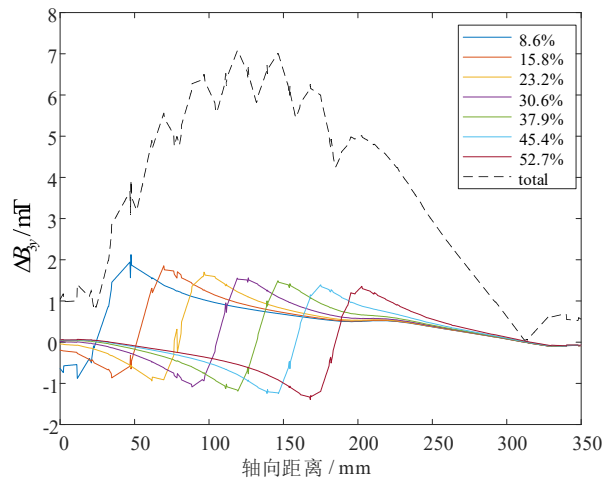


图 A4 不同位置匝短时漏磁三次谐波增量轴向分布
 Fig. A4 Axial distribution of incremental third harmonic of short-time leakage magnetic flux at different positions

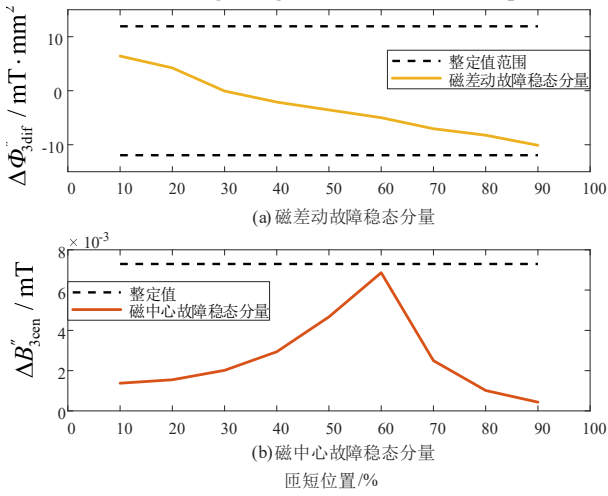


图 A5 不同位置一匝匝短时的故障稳态分量
 Fig. A5 Short term steady-state components of faults in different positions

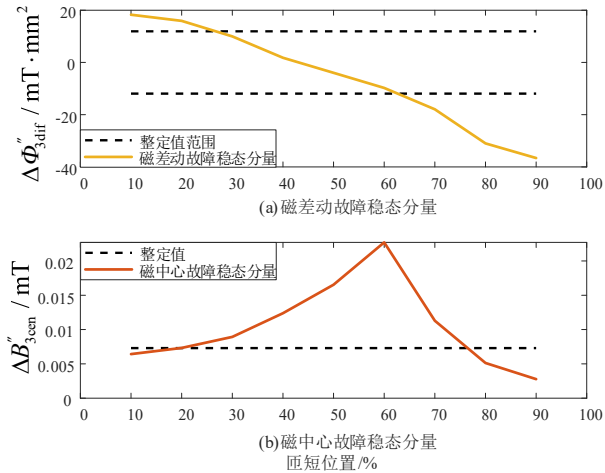
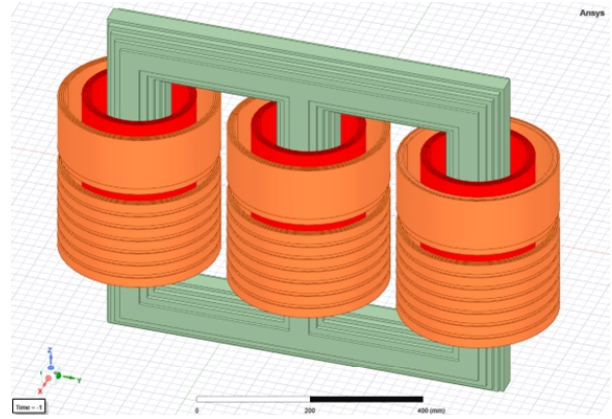
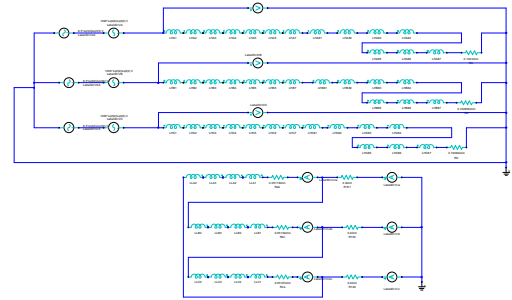


图 A6 不同位置两匝匝短时的故障稳态分量
 Fig. A6 Short term steady-state components of faults in two different positions



(a) 变压器模型



(b) 外电路模型

图 A7 分段式不规则绕组变压器 ANSYS 仿真模型
 Fig. A7 ANSYS simulation model of segmented irregular winding transformer

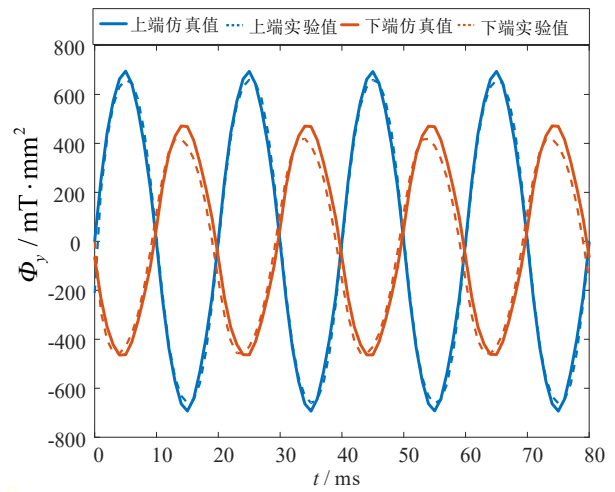


图 A8 额定运行时径向漏磁实验值与仿真值对比
 Fig. A8 Comparison between experimental and simulated radial magnetic leakage values during rated operation

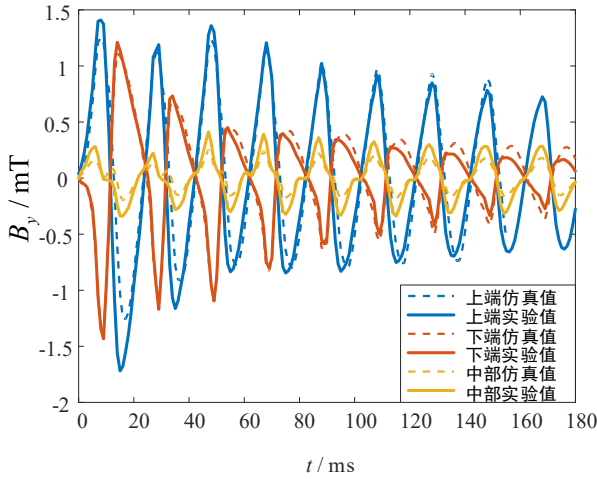


图 A9 空载合闸时径向漏磁实验值与仿真值对比

Fig. A9 Comparison between experimental and simulation values of radial magnetic leakage during no-load closing

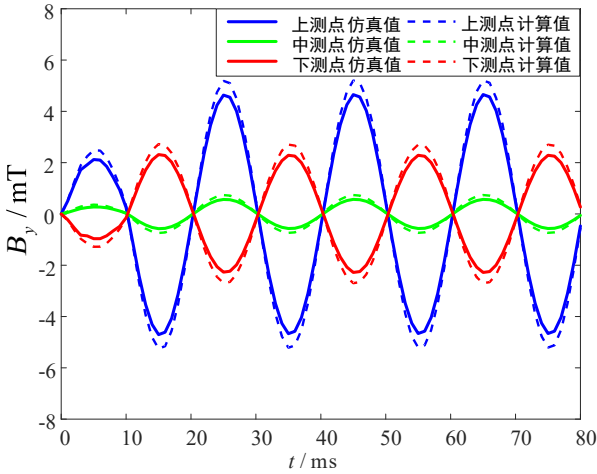


图 A10 额定运行时径向漏磁计算值与仿真值对比

Fig. A10 Comparison between Calculation and Simulation of Radial Leakage Magnetic Curve

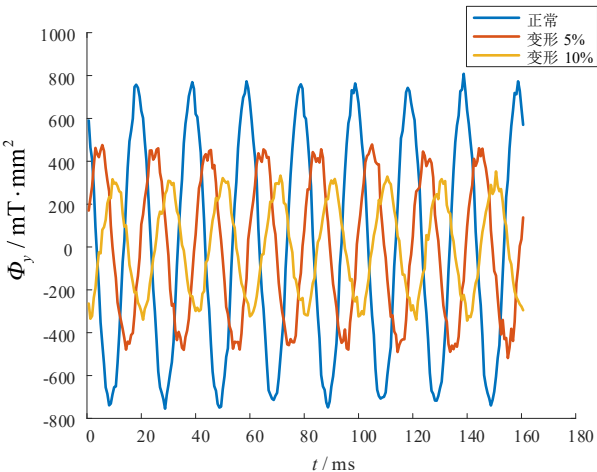


图 A11 不同程度绕组变形下上测点径向漏磁实验波形

Fig. A11 Experimental waveform of radial leakage magnetic flux at the upper measuring point under different degrees of winding deformation

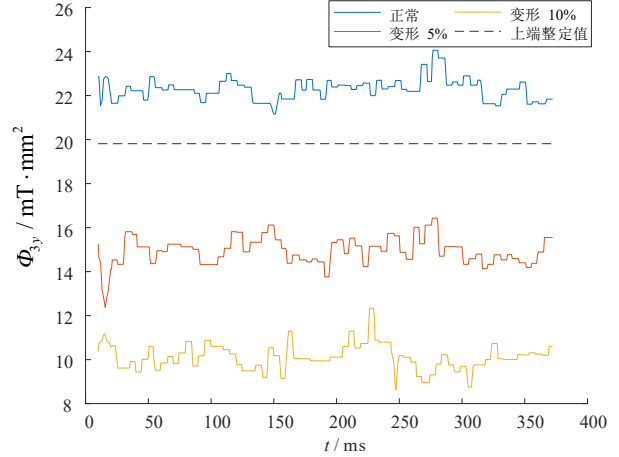


图 A12 不同程度绕组变形下上测点径向漏磁三次谐波幅值曲线

Fig. A12 Radial leakage third harmonic amplitude curve of the upper measuring point under different degrees of winding deformation

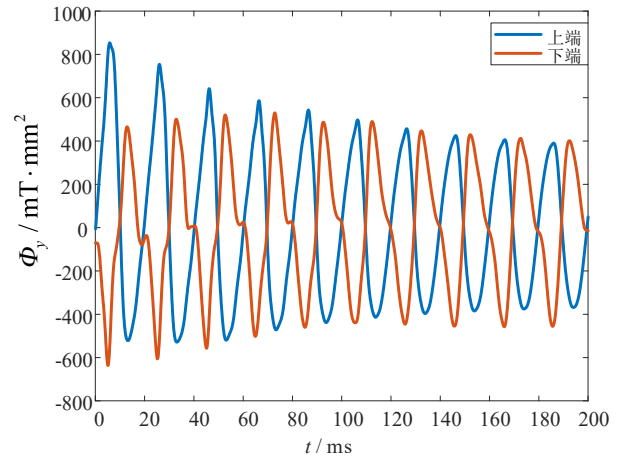


图 A13 空载合闸时上下测点径向漏磁通实验波形

Fig. A13 Experimental waveform of radial leakage flux at upper and lower measuring points during no-load closing

附录 B

1) 故障相漏磁场表达式:

$$B_{3y_fault} = G'_A I'_{A3m} \cos(3\omega t + \varphi'_{A3}) + G_{As} I_{As3m} \cos(3\omega t + \varphi_{As3}) + G_a I'_{a3m} \cos(3\omega t + \varphi'_{a3})$$

式中: G'_A 为原边绕组未短路区结构函数; G_{As} 为原边绕组短路区结构函数; G_a 为副边绕组结构函数。

2) 漏磁密和漏磁通三次谐波幅值表达式:

$$B_{3ym} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} B_{3y}(p,t)^2 dt}$$

$$\Phi_{3ym} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} (\iint_{\Sigma} B_{3y}(p,t) dS)^2 dt}$$

式中: B_{3y} 为变压器漏磁函数, 由具体工况确定; p 代表空间中待求点的坐标; Σ 为求解域; T 为基波周期。

3) 漏磁通近似计算公式:

$$\Phi_y = \iint_{\Sigma} B_y(x, y) \cdot dS \approx \iint_{\Sigma} (-A'x - B'y + D')dS \quad (25)$$

式中：A'、B'、D'是平面方程的系数，由三个顶点的坐标值和漏磁感应强度求得：

$$A' = \frac{y_2B_3 - y_2B_1 - y_1B_3 - y_3B_2 + y_3B_1 + y_1B_2}{x_2y_3 - x_2y_1 - x_1y_3 - x_3y_2 + x_3y_1 + x_1y_2}$$

$$B' = \frac{x_3B_2 - x_3B_1 - x_1B_2 - x_2B_3 + x_2B_1 + x_1B_3}{x_2y_3 - x_2y_1 - x_1y_3 - x_3y_2 + x_3y_1 + x_1y_2}$$

$$D' = \frac{x_2y_1B_3 - x_3y_1B_2 - x_1y_2B_3 + x_3y_2B_1 + x_1y_3B_2 - x_2y_3B_1}{x_2y_1 - x_3y_1 - x_1y_2 + x_3y_2 + x_1y_3 - x_2y_3}$$

4) 空载合闸后第一个周期里上端和下端漏磁通三次谐波幅值：

$$\Phi_{3ymup}(nlc_1T) = \iint_{\Sigma_1} I_{3m_1T} \sum_{i=A,B,C} G_i(p)dS$$

$$\Phi_{3ymdw}(nlc_1T) = \iint_{\Sigma_2} I_{3m_1T} \sum_{i=A,B,C} G_i(p)dS$$

式中： I_{3m_1T} 为空载合闸后第一个周期的励磁涌流三次谐波幅值； Σ_1 为上端三角形测量面； Σ_2 为下端三角形测量面。

5) 匝间短路判据的整定公式：

$$\Phi_{set3} = 1.3(\Phi_{3ymdif}|_{3f} - \Phi_{3ymdif}|_n)$$

$$B_{set2} = 1.3(B_{3ymcen}|_{3f} - B_{3ymcen}|_n)$$

6) 区外三相短路和额定运行时的漏磁密和漏磁通三次谐波幅值：

$$B_{3ymcen}|_{3f} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} B'_{3y}(p_{cen}, t)^2 dt}$$

$$B_{3ymcen}|_n = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} B_{3y}(p_{cen}, t)^2 dt}$$

$$\Phi_{3ymdif}|_{3f} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} (\iint_{\Sigma_1} B'_{3y}(p, t)dS)^2 dt}$$

$$-k \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} (\iint_{\Sigma_2} B'_{3y}(p, t)dS)^2 dt}$$

$$\Phi_{3ymdif}|_n = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} (\iint_{\Sigma_1} B_{3y}(p, t)dS)^2 dt}$$

$$-k \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} (\iint_{\Sigma_2} B_{3y}(p, t)dS)^2 dt}$$

式中：

$$B'_{3y}(p, t) = \sum_{\substack{j=A,B,C, \\ a,b,c}} G_j I_{j3m_3f} \cos(3\omega t + \varphi_{j3_3f})$$

$$B_{3y}(p, t) = \sum_{\substack{j=A,B,C, \\ a,b,c}} G_j I_{j3m_n} \cos(3\omega t + \varphi_{j3_n})$$

式中： I_{j3m_3f} 为区外三相短路时各相三次谐波电流幅值； I_{j3m_n} 为额定运行时各相三次谐波电流幅值； p_{cen} 为中部测点坐标值； Σ_1 为上端三角形测量面； Σ_2 为下端三角形测量面。

7) 上端压缩 $n\%$ 时上测点漏磁通三次谐波幅值：

$$\Phi_{3ymup}|_{n\%} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{3}{T} \int_0^{T/3} (\iint_{\Sigma_1} B''_{3y}(p, t)dS)^2 dt}$$

式中：

$$B''_{3y}(x, y, z, t) =$$

$$\left(\sum_{k=1}^m \int_{(1-n\%)H_{2k}}^{(1-n\%)H_{1k}} \int_{a_k}^{b_k} \int_0^{2\pi} \frac{\mu N_k}{4\pi H_k L_k} \frac{r(z_i - z) \sin \theta}{R^3} d\theta dr dz + \sum_{k=m+1}^n \int_{H_{2k}}^{H_{1k}} \int_{a_k}^{b_k} \int_0^{2\pi} \frac{\mu N_k}{4\pi H_k L_k} \frac{r(z_i - z) \sin \theta}{R^3} d\theta dr dz \right)$$

$$I_{fp3m} \cos(3\omega t + \varphi_{fp3}) +$$

$$\sum_{j \in hp} G_j I_{j3m} \cos(3\omega t + \varphi_{j3})$$

式中：fp代表故障相绕组；hp代表其余正常相绕组的集合；并设fp的 n 个分段中有 m 个分段发生变形。