

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2019.06.020

单相变压器首端匝间短路电磁振动特性研究

潘超¹, 葛佳柔¹, 刘天舒¹, 李响²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;
2. 吉林市计量测试技术研究院, 吉林 吉林 132013)

摘要:针对单相变压器首端匝间短路问题,研究不同匝间短路比例下电磁振动特性,利用电磁耦合原理建立变压器匝间短路状态方程,仿真模拟不同短路比例下电磁参数及振动加速度变化,结果说明在不同比例匝间短路故障下,短路绕组电流方向改变、幅值变大,未短路绕组电流改变较小;内部漏磁增加,且短路绕组对应区域漏磁增加明显;由于电流及漏磁增加致使绕组振动加剧,随着匝间短路比例的提高,变压器电磁参数及绕组振动加速度进一步改变。最后,搭建匝间短路动模实验平台,测量变压器首端不同比例匝间短路故障下绕组电流及振动加速度,对比仿真结果与实验数据,验证了建模的有效性及其所得结论的正确性。

关键词:单相变压器;匝间短路;电磁参数;振动特性

中图分类号:TM412

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)06-0147-07

0 引言

变压器是电力系统中的关键设备,在不同电压等级电网互联和功率交换中起到枢纽作用,其运行状况不仅影响设备自身安全,而且对整个电力系统的稳定性和可靠性也有影响^[1-5]。根据统计资料显示,变压器绕组故障占变压器总故障的50%~60%,其中变压器绕组首端短路故障发生频率较高^[6-8]。匝间短路一般由内部线圈之间的绝缘老化或破损等问题引起,具有电流增大、局部漏磁增加、铁芯及绕组振动加剧的特点^[9-11]。若变压器持续运行在这些状态,会导致(层)股短路和相间短路,进而造成设备烧毁甚至电网解列等严重故障^[11-12]。

变压器匝间短路故障是目前国内外变压器研究的关注点之一。文献[13-14]提出利用重复脉冲的特征曲线进行匝间短路故障诊断。文献[15-16]提出基于行波分析的变压器匝间短路故障定位方法。文献[17]对变压器的频响函数相关系数进行分析,建立变压器匝间短路故障的监测系统。文献[18-19]利用绕组变形与漏电感参数之间的关系,实现对变压器绕组振动及变形在线监测。文献[20]针对变压器匝间短路具体事故进行了Matlab仿真分析。以上研究均从变压器匝间短路故障发生后外部参数的提取与分析进行故障监测及定位,罕有研究变压器匝间短路故障下电磁参数的具体变化及电磁参数变化与振动的相互关系

的文献。

文中针对变压器绕组首端匝间短路故障,研究单相变压器绕组首端匝间短路故障下电磁参数与绕组振动特性的变化情况。基于场路耦合原理建立单相变压器首端匝间短路故障下的状态方程,循环迭代求解磁场模型和电路模型实现场路耦合。在此基础上构建绕组振动谐响应分析模型,对变压器首端匝间短路的绕组电流、漏磁、绕组振动特性进行仿真计算,分析电磁参数与振动的变化情况,并总结其规律。搭建单相变压器首端匝间短路动模实验平台,监测变压器绕组的振动情况。通过对比仿真结果和实验数据验证模型的有效性及其方法的正确性。

1 匝间短路电磁耦合计算模型

以单相变压器为研究对象,建立电磁耦合状态方程:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = M(t)X(t) + N(t)U(t) \\ Y(t) = P(t)X(t) + Q(t)U(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为系统状态变量,包含动态电流矩阵*i*和动态电感矩阵*L*; $U(t)$ 为系统输入变量,包括交流电压向量及控制参数矩阵,其中电压向量为正弦激励,控制参数包括短路模式及匝数比; $Y(t)$ 为输出变量,主要包含电路参量与磁场场量; $M(t)$, $N(t)$, $P(t)$, $Q(t)$ 为系数矩阵。该状态方程包含磁场和电路两个部分,其求解过程通过磁场-电路间接耦合的方法实现。

1.1 磁场模型

假设某时刻的绕组电流已知,采用基于磁矢势

收稿日期:2019-06-23;修回日期:2019-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507027);吉林省自然科学基金资助项目(2018JLSF-9)

\mathbf{A} 的能量平衡有限元法计算该时刻的动态电感^[21]。

假设导磁介质各向同性,忽略磁滞效应,根据准静态场下的麦克斯韦方程得到三维非线性磁场方程:

$$\left(\nabla \times \frac{1}{\mu}\right) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} \quad (2)$$

式中: μ 为磁导率; \mathbf{A} 为磁矢势; \mathbf{J} 为电流密度。

采用矢量插值公式:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \sum_{l=1}^{np} N_l(\mathbf{p}) A_l \\ N_l(\mathbf{p}) = \varphi_l(\xi, \eta, \zeta) \nabla q_l(\mathbf{p}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_l 为矢量 \mathbf{A} 沿棱边元 l 的环量; l 为基函数项数; N_l 为与棱边对应的矢量形状函数; $\mathbf{p} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$, 为整体坐标内任意场点的位置矢量; φ_l 为局部坐标内棱边形状函数; ξ, η, ζ 为棱边单元三维空间位移; q_l 为局部坐标的棱边方向函数。

利用格林公式对上式进行求解,得到相应磁场区域的伽辽金加权余量方程^[22]:

$$\iiint \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{M}_m) \cdot (\nabla \times \mathbf{M}_n) A_n dV = \iiint \mathbf{M}_m \cdot \mathbf{J} dV \quad (4)$$

式中: \mathbf{M}_m 为权函数序列, m 为序列编号; \mathbf{M}_n 为基函数序列, n 为序列编号。

若已知任意时刻电流 i_k , 将加权余量方程离散形成磁场模型代数方程组,求解可得 \mathbf{A} , 进而求得 \mathbf{B}, \mathbf{H} 等场量。

在某一时刻两端口电流变化为 di_α, di_β , 将电磁系统总能量与电感和电流关联,得到:

$$\begin{cases} dW_1 = \frac{1}{2} L_{\alpha\beta} di_\alpha di_\beta \quad \alpha, \beta = 1, 2 \\ dW_2 = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} dV \end{cases} \quad (5)$$

式中: dW_1, dW_2 分别为电路和磁场能量增量。

根据能量平衡原理,由电磁能量守恒可联立(4)中的方程计算动态电感。

1.2 电路模型

将磁场模型计算得到的动态电感加入到电路模型中,进行电路模型计算。当变压器发生匝间短路故障时,原边未短路绕组 L_{1-s} 、短路绕组 L_s 、副边绕组 L_2 相互耦合。匝间短路情况下电路耦合原理如图 1 所示。

图 1 中 M_{12}, M_{1s}, M_{2s} 分别为原副边互感、原边短路与未短路绕组互感、副边短路与未短路绕组互感; r_{1-s}, r_s, r_2 分别为原边未短路绕组、短路绕组、副边绕组等效电阻。 i_1, i_3, i_s 分别为原边未短路绕组电

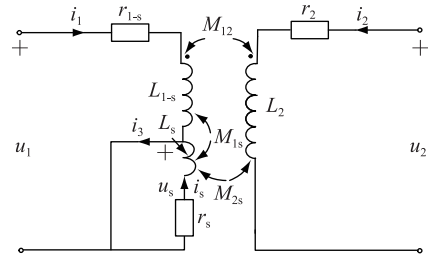


图 1 变压器匝间短路耦合电路原理

Fig.1 Schematic diagram of transformer inter-turn short circuit coupling circuit

流,原边短接处电流,原边短路绕组电流,三者关系如下:

$$i_s = i_3 - i_1 \quad (6)$$

绕组匝间短路电磁关系方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{1-s} & M_{12} & M_{1s} \\ M_{12} & L_2 & M_{2s} \\ M_{1s} & M_{2s} & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

将磁场模型得到的动态电感参数代入式(7),采用四阶龙格库塔法,由 t_k 时刻的绕组电流 i_k 计算 t_{k+1} 时刻的电流 i_{k+1} 。

$$i_{k+1} = i_k + \frac{h}{6} (\lambda_1 + 2\lambda_2 + 2\lambda_3 + \lambda_4) \quad (8)$$

式中: h 为步长; $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 为步长内的分段计算斜率。

将计算所得的 i_{k+1} 作为下一次磁场模型求解输入量,进行下一时刻的磁场求解,从而实现电磁耦合迭代。

1.3 绕组振动谐响应模型

在匝间短路状态方程求解的基础上,可计算变压器磁场模型任一绕组单元的电磁力:

$$\mathbf{F}_e = \int \mathbf{J}_s \times \mathbf{B} dV \quad (9)$$

对绕组所受的电磁力进行傅里叶变换,即可得到电磁力的各谐波分量,将其作为简谐激励源,进行稳态结构谐响应振动分析。考虑材料刚度与简谐激励的频率,受力谐响应分析原理^[22]为:

$$\mathbf{F}_1 + j\mathbf{F}_2 = (-\omega^2 m + j\omega C + K)(l_1 + jl_2) \quad (10)$$

式中: ω 为简谐激励的角频率; m 为质量; K 为刚度系数; C 为阻尼系数; l 为振动位移。根据振动位移可计算振动加速度 g :

$$g = d^2 l / dt^2 \quad (11)$$

2 单相变压器仿真模型建立

2.1 模型建立

采用 ANSYS 三维电磁场棱边有限元分析方法,

对单相变压器进行建模仿真,参数如表 1 所示。

表 1 单相变压器参数表

Table 1 Parameters of single-phase transformer

铭牌参数	额定值	量测值
容量 $S_N/(V \cdot A)$	300	
频率/Hz	50	
高/低压绕组电压 U_N/V	220/60	
铁芯直径/mm		50
铁芯高度/mm		130
高/低压绕组匝数	396/108	
高/低压绕组内径/mm	60/72	
高/低压绕组外径/mm		61.6/74.4
高/低压绕组高度/mm		110

根据变压器的实际数据等比例建模,施加正弦电压激励,设置变压器首端发生不同比例(3%,6%,9%)的匝间短路故障,仿真分析端口电流及磁场的变化情况,并进一步得出绕组不同位置振动特性。图 2 为变压器等比例仿真模型,图 3 为变压器 $B-H$ 曲线。

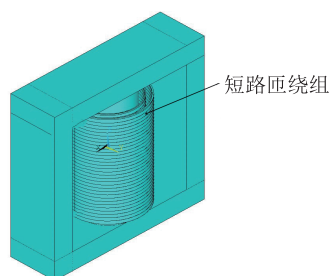


图 2 变压器仿真模型

Fig.2 Transformer simulation model diagram

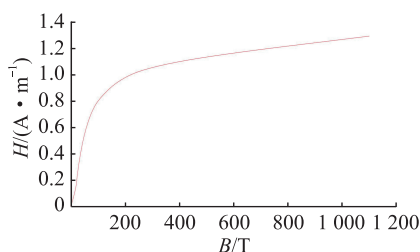


图 3 变压器 $B-H$ 曲线

Fig.3 $B-H$ curve of transformer

2.2 绕组电流仿真结果

设置变压器满载运行下绕组首端发生不同比例匝间短路故障,施加正弦电压激励,得到图 4 所示绕组电流仿真结果。

如图 4 所示,当变压器绕组首端发生不同比例匝间短路故障时,短路绕组电流密度上升为正常运行状态下原边绕组电流密度的 45.16 倍,且方向变为与副边绕组电流密度相同,但随着短路比例的提

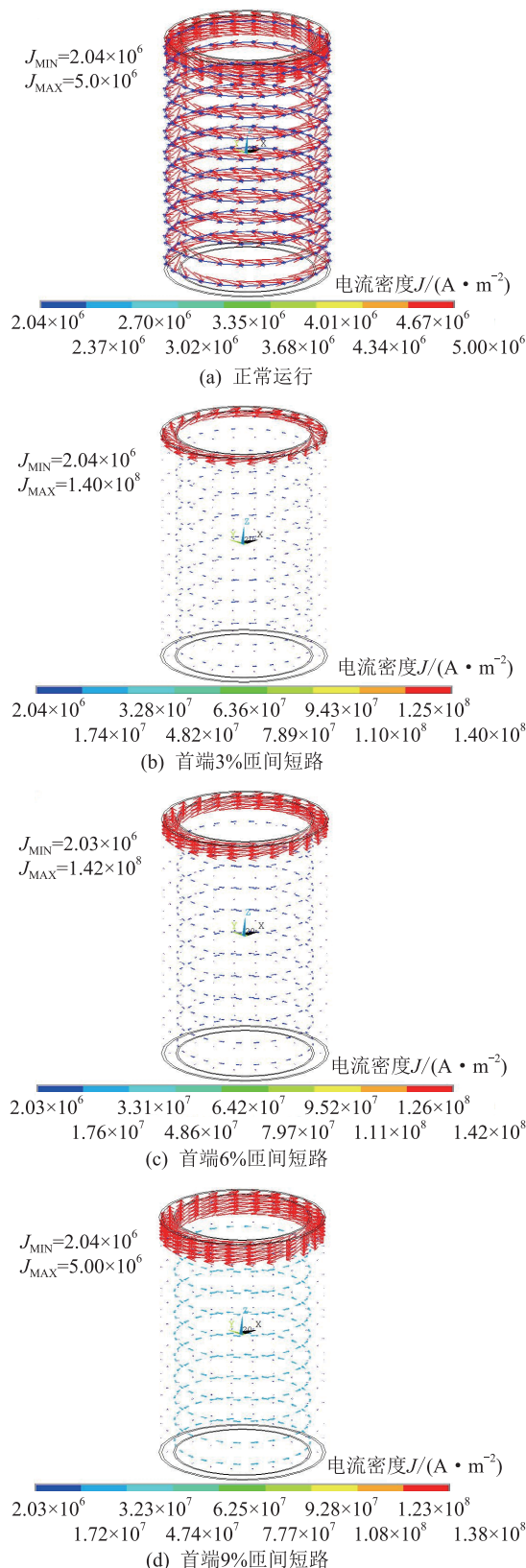


图 4 变压器首端匝间短路电流密度图

Fig.4 Diagram of short-circuit current density between turns at the head end of transformer

高,短路绕组电流密度基本不再变化。在比例为3%,6%,9%匝间短路下,原边绕组电流密度分别上升为正常运行状态下的 3.44,4.92,6.47 倍,副边绕

组电流密度与正常运行状态下一致^[23-24]。以原边电流方向为正方向,绕组电流密度及电流有效值如表2所示。

表2 不同比例匝间短路故障绕组电流仿真结果

Table 2 Simulation results of short-circuit fault winding current between turns of different ratios

匝间短路比例/%	电流密度/(A·m ⁻²)			电流/A		
	J ₁	J _s	J ₂	I ₁	I _s	I ₂
0	3.06×10 ⁶		-2.04×10 ⁶	0.68		-2.50
3	10.53×10 ⁶	-140.45×10 ⁶	-2.04×10 ⁶	2.34	-30.90	-2.49
6	15.07×10 ⁶	-141.82×10 ⁶	-2.03×10 ⁶	3.35	-31.2	-2.48
9	19.78×10 ⁶	-138.18×10 ⁶	-2.03×10 ⁶	4.40	-30.4	-2.49

2.3 磁场仿真结果

在绕组电流密度仿真的基础上,进行变压器绕组首端不同匝间短路比例(3%,6%,9%)下磁场分布仿真,得到如图5所示的磁场分布矢量图。

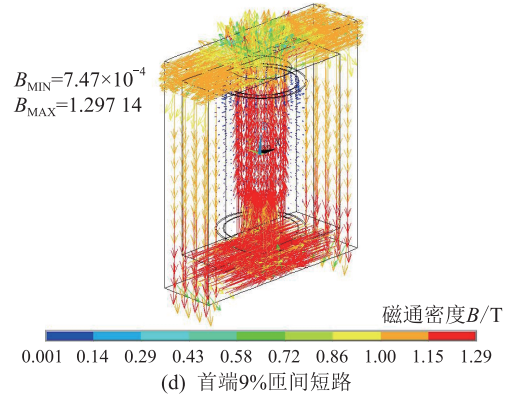
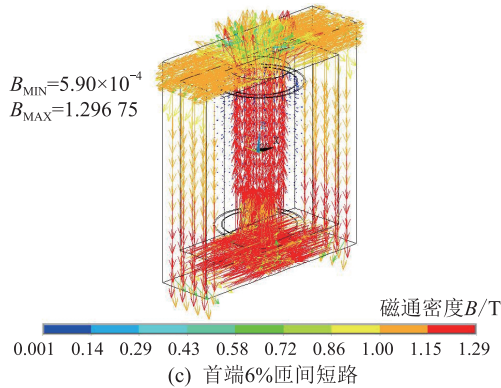
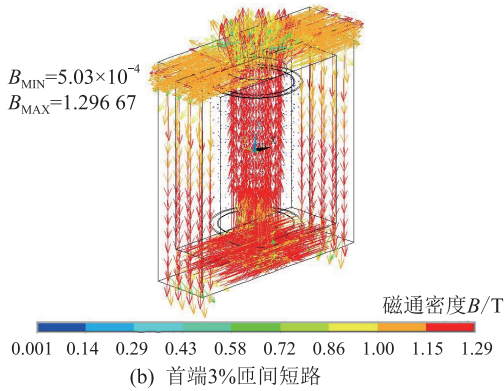
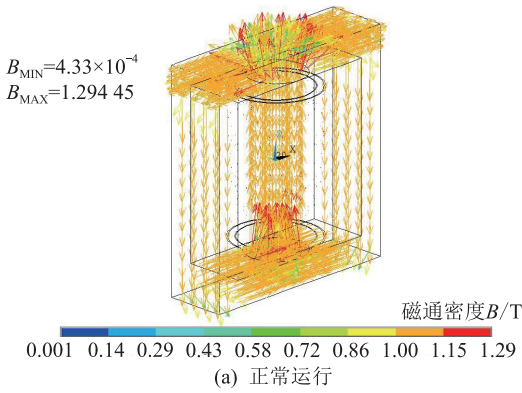


图5 变压器首端匝间短路磁场分布

Fig.5 Distribution of short-circuit magnetic field between turns at the head end of the transformer

如图5所示,当变压器绕组首端发生匝间短路时,变压器主磁通增大,铁芯短路绕组对应区域磁通低于未短路绕组对应区域。将变压器匝间短路磁场分布图数据进行整理,结果如表3所示。

表3 不同比例匝间短路故障绕组电流仿真结果

Table 3 Simulation results of winding currents in different proportions of inter-turn short-circuit fault

短路比例/%	铁芯柱磁密/T	绕组内部漏磁/T	铁芯旁轭磁密/T
0	1.295	3.75×10 ⁻⁴	1.007
3	1.296	5.02×10 ⁻⁴	1.008
6	1.296	5.91×10 ⁻⁴	1.009
9	1.297	7.47×10 ⁻⁴	1.009

由表3可知,当变压器绕组首端发生匝间短路时,在不同匝间短路比例下(3%,6%,9%),变压器漏磁分别变为正常运行的1.34,1.58,1.99倍,变压器铁芯磁密变化较小。

根据图4及表2分析可知,当变压器绕组发生匝间短路时,短路绕组电流激增,且方向变为与副边绕组电流方向相同,短路绕组形成的反向励磁削弱原边未短路绕组励磁,导致铁芯柱内原副边合成的主磁通在短路绕组对应区域下降,随着绕组首端匝间短路比例的提高,该变化趋势更加明显。由图5分析可知,在绕组首端匝间短路部分,局部漏磁增加,且随着匝间短路比例的提高,局部漏磁增加幅度随之提高。

2.4 振动仿真分析

设置变压器绕组首端发生不同比例匝间短路故障,并对振动加速度仿真结果进行快速傅里叶变换,得到图6所示绕组振动加速度仿真频谱图。

由图6(a)可知,当变压器绕组首端发生匝间短路故障时,绕组在电磁力的作用下会发生明显振动,随着绕组的深入,振动加速度逐渐减小,由绕组

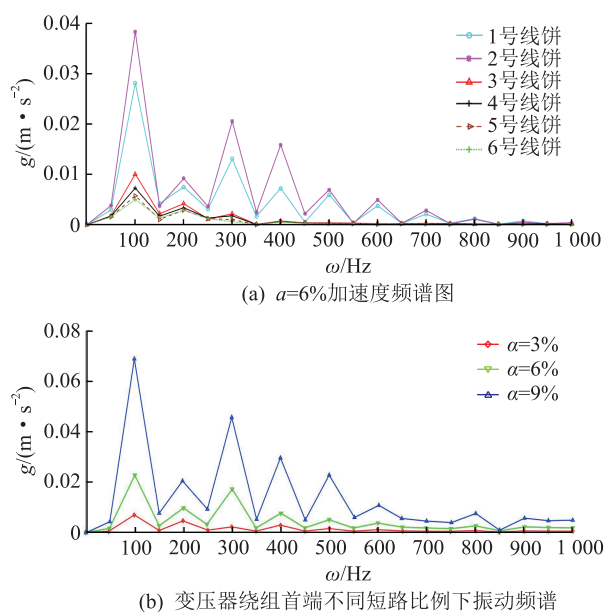


图6 绕组振动谱响应分布

Fig.6 Distribution of winding vibration harmonic response

电流及磁场仿真结果可知,在绕组首端发生匝间短路故障时,短路绕组电流激增、局部漏磁增加,从而导致绕组首端振动明显,由于变压器上铁轭对绕组线饼的约束,致使2号线饼振动加速度大于1号线饼。由图6(b)可知,随着匝间短路比例的提高,绕组振动加速度逐渐提高。图6(a)、(b)均能表明在100 Hz 频率下,绕组振动最为剧烈,由振动谱响应原理可知,振动加速度频率为施加激励频率的2倍,仿真结果证实了振动谱响应模型的正确性。

3 实验验证

变压器发生匝间短路时,内部磁场直接量测难度较大,因此搭建单相变压器首端匝间短路动模实验平台监测其电流及绕组振动,变压器基本参数如表1所示,实验接线如图7所示。

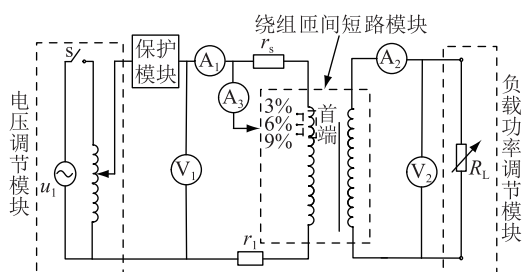


图7 绕组匝间短路实验接线

Fig.7 Experimental wiring diagram of interturn short-circuit between windings

变压器工作模式为满载运行,副边接入12 Ω 电阻负载。采用压电加速度传感器(JF2100-T)分别监

测绕组首端不同匝间短路比例下绕组振动情况。

3.1 电流实验结果分析

设置变压器满载运行绕组首端发生不同比例(3%,6%,9%)匝间短路故障,测量原副边端口电流及短路匝分接头电流,并计算得到短路绕组电流,电流仿真结果如图8所示。

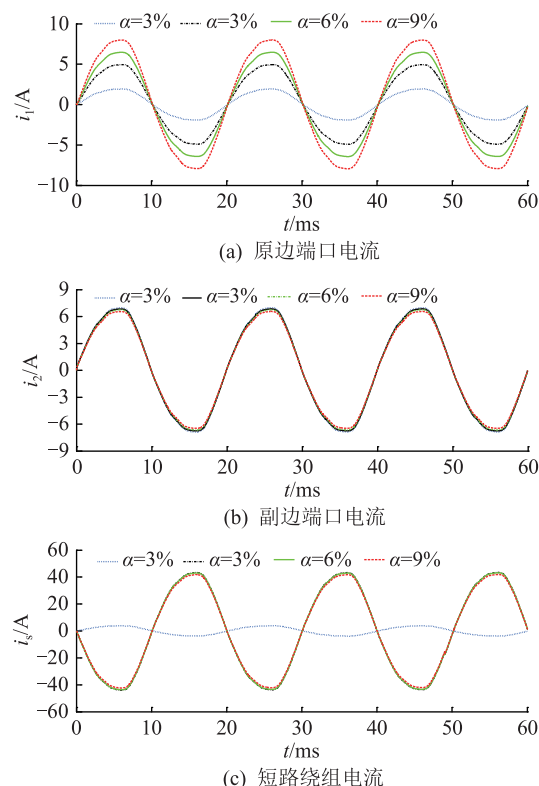


图8 绕组首端匝间短路电流

Fig.8 Short-circuit current between turns at the head of the winding

由图8可知,变压器在不同匝间短路比例下原边绕组首端匝间短路电流变化情况与理论分析和仿真结论一致。进一步计算电流有效值的相对误差(电流有效值的实验值和仿真值的差取绝对值后与电流有效值的实验值的比),仿真计算结果与实验量测数据的电流有效值相对误差小于3%,说明了仿真结果的有效性。

3.2 振动加速度实验结果分析

在干式变压器绕组外设置与振动仿真相同位置的振动监测点(变压器匝间短路绕组线饼对应位置),监测变压器绕组首端不同短路比例(3%,6%,9%)下绕组振动情况,通过对压电加速度传感器采集数据的整理与分析,得到如图9所示绕组振动谱响应分布实验图。

图9进一步表明绕组首端发生匝间短路时振动加速度随着短路比例的提高振动剧烈程度逐渐提高。绕组振动主要集中在前10次谐波,且在100 Hz

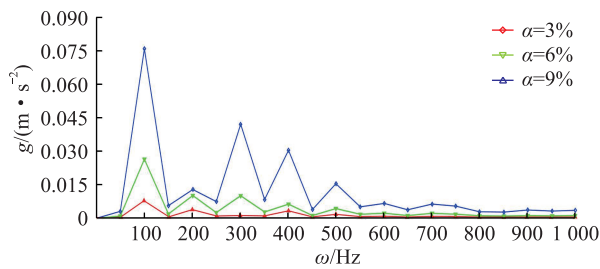


图9 绕组振动谐波响应分布实验结果

Fig.9 Experimental results of winding vibration harmonic response distribution

处变化最剧烈,振动频谱中含相对较高的高频分量。

表4为不同匝间短路比例下绕组振动结果,随着匝间短路比例的提高,振动加速度增大明显,实验和仿真所得规律基本一致。

表4 不同比例匝间短路故障绕组振动结果

Table 4 Vibration results of inter-turn short-circuit fault windings of different ratios

短路比例/%	振动频率/Hz				
	100	200	300	400	500
3	0.007	0.005	0.002	0.003	0.001
6	0.02	0.01	0.02	0.008	0.006
9	0.08	0.02	0.05	0.03	0.02

4 结论

针对单相变压器绕组首端匝间短路问题,研究故障后绕组电流、局部漏磁及振动特性变化情况,得到以下结论。

(1) 绕组首端发生匝间短路故障后,原边绕组电流增加、副边绕组电流基本不变、短路绕组电流激增,且方向变为与原边绕组电流一致,随着匝间短路比例的提高,原边绕组电流继续增加,短路绕组、副边绕组电流基本不再变化。

(2) 在绕组首端匝间短路故障后,由于短路绕组激增的反向电流,导致短路绕组反向励磁削弱变压器主磁通,使得短路绕组对应铁芯部分主磁通下降、局部漏磁增加。

(3) 振动谐波响应分析表明,变压器发生匝间短路故障后,绕组振动明显,且在100 Hz频段振动严重,在局部漏磁作用下,绕组振动信号频谱更加复杂。

(4) 对比仿真结果和实验数据表明,文中所用电磁耦合模型能够有效模拟单相变压器绕组首端匝间短路时的内部电磁环境,进而分析绕组的电流、振动情况,为绕组匝间短路故障的辨识提供可行性方法。

参考文献:

- [1] PAN Chao, YI Shuangyuan, SU Hao. Excitation-vibration harmonic response research of transformer in DC biasing operation [J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(3): 410-417.
- [2] SZCZENIAK P, TADRA G, KANIEWSKI J. Model predictive control algorithm of AC voltage stabilizer based on hybrid transformer with a matrix converter [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 170: 222-228.
- [3] MOHAMMAD H S, PHILIPP H, STEFAN T. Investigating the applicability of the finite integration technique for studying the frequency response of the transformer winding [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 110: 411-418.
- [4] 柯于刚, 顾文雯. 220 kV 主变短路故障后的综合试验分析 [J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 21-23.
KE Yugang, GU Wenwen. Comprehensive test analysis after short circuit fault of 220 kV main transformer [J]. Jiangsu Electric Engineering, 2015, 34(2): 21-23.
- [5] 冯顺, 曲欣, 王毅, 等. 1 000 kV 特高压变压器调压原理及其仿真分析 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 109-112, 121.
FENG Shun, QU Xin, WANG Yi, et al. Voltage regulation principle and simulation analysis of 1 000 kV UHV transformer [J]. Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 109-112, 121.
- [6] 张明泽, 刘骥, 吕佳璐, 等. 换油周期对变压器油纸绝缘老化性能影响规律研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 1(13): 159-166.
ZHANG Mingze, LIU Ji, LYU Jialu, et al. Study on the influence of oil change cycle on the insulation aging performance of transformer oil paper [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 1(13): 159-166.
- [7] EHSANIFAR A, DEGHANI M, ALLAHBAKHSI M. Calculating the leakage inductance for transformer inter-turn fault detection using finite element method [C] // Electrical Engineering, IEEE, 2017: 1372-1377.
- [8] 唐治平, 彭敏放, 李光明, 等. 基于重复脉冲法的变压器绕组匝间短路故障诊断 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 153-158.
TANG Zhiping, PENG Minfang, LI Guangming, et al. Fault diagnosis of inter-turn short circuit of transformer winding based on repeated pulse method [J]. Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 153-158.
- [9] 林春耀, 欧小波, 杨贤, 等. 短路冲击状态下的变压器振动特性及匝间短路故障检测 [J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3569-3576.
LIN Chunyao, OU Xiaobo, YANG Xian, et al. Transformer vibration characteristics and inter-turn short circuit fault detection under short-circuit impact state [J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11): 3569-3576.
- [10] 刘骥, 赵明云, 张明泽, 等. 变压器油纸绝缘老化介电谱特性及特征量研究 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11): 67-74.
LIU Ji, ZHAO Mingyun, ZHANG Mingze, et al. Study on die-

- lectric characteristics and characteristic quantities of transformer oil-paper insulation aging [J]. Journal of Electric Machines and Control, 2018, 22(11): 67-74.
- [11] 张鹏宁,李琳,程志光,等. 并联电抗器与变压器模型铁心振动仿真与试验对比[J]. 电工技术学报,2018,33(22): 5273-5281.
ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Simulation and experimental comparison of shunt reactor and transformer model core [J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 33(22): 5273-5281.
- [12] 朱矿男,王迪,金洋,等. 在线测量 10 kV 配电变压器损耗的方法研究[J]. 东北电力大学学报,2017,37(5):25-31.
ZHU Kuangnan, WANG Di, JIN Yang, et al. Research on online measurement of 10 kV distribution transformer loss [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(5): 25-31.
- [13] 李元,刘宁,梁钰,等. 基于温升特性的油浸式变压器负荷能力评估模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(22): 6737-6746.
LI Yuan, LIU Ning, LIANG Yu, et al. Oil-immersed transformer load capacity evaluation model based on temperature rise characteristics [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 38(22): 6737-6746.
- [14] 李卓昕,彭敏放,黄清秀,等. 行波反射法在变压器绕组匝间短路故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(21):84-89.
LI Zhuoyu, PENG Minfang, HUANG Qingxiu, et al. Application of traveling wave reflection method in fault location of transformer winding inter-turn short circuit [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 84-89.
- [15] 徐永明,郭蓉,张洪达. 电力变压器绕组短路电动力计算[J]. 电机与控制学报,2014,18(5):36-42.
XU Yongming, GUO Rong, ZHANG Hongda. Calculation of short-circuit electric power of power transformer windings [J]. Journal of Electric Machines and Control, 2014, 18(5): 36-42.
- [16] 赵志刚,李光范,李金忠,等. 基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术,2014,40(10): 3214-3220.
ZHAO Zhigang, LI Guangfan, LI Jinzhong, et al. Analysis of short-circuit resistance of large power transformers based on finite element method [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(10): 3214-3220.
- [17] 许渊,弓艳朋,刘有为,等. 变压器绕组频率响应数据的图块频点分析法[J]. 电力系统自动化,2014,38(6):91-97.
XU Yuan, GONG Yanpeng, LIU Youwei, et al. Block frequency analysis method for transformer winding frequency response data [J]. Automation of Power Systems, 2014, 38(6): 91-97.
- [18] 陈民铀,王明林,郑杰,等. 计及不对称负荷的配电变压器短路电抗在线检测方法[J]. 高电压技术,2015,41(3): 881-886.
CHEN Minyou, WANG Minglin, ZHENG Jie, et al. On-line detection method for short-circuit reactance of distribution transformers considering asymmetric load [J]. High Voltage Technology, 2015, 41(3): 881-886.
- [19] 张俊杰,刘兰荣,刘东升,等. 用场路耦合模拟变压器线圈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. Method for simulating partial short-circuit fault current of transformer coil by field coupling [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 30(20): 65-70.
- [20] 杨理才,孙结中,刘蔚,等. 变压器匝间短路建模及其实际应用[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(8):140-145.
YANG Licai, SUN Jiezhong, LIU Wei, et al. Transformer turn-to-turn short circuit modeling and its practical application [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 140-145.
- [21] 黄子平,秦玲,张良,等. 含磁芯线圈动态电感计算[J]. 强激光与粒子束,2007,1(2):125-128.
HUANG Ziping, QIN ling, ZHANG liang, et al. Calculation of dynamic inductance of coils with magnetic cores [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2007, 1(2):125-128.
- [22] 潘超,王梦纯,杨德友,等. 变压器电磁场三维有限元计算问题的研究[J]. 东北电力大学学报,2014,34(2):21-26.
PAN Chao, WANG Mengchun, YANG Deyou, et al. Research on three dimensional finite element calculation of transformer electromagnetic field [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2014, 34(2): 21-26.
- [23] 叶志军,苟炬龙,曾文辉,等. 变压器一次侧匝间短路参数与特征分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(21):213-224.
YE Zhijun, GOU Julong, ZENG Wenhui, et al. Analysis of parameters and characteristics of inter turn short circuit on primary side of transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 213-224.
- [24] 林春耀,欧小波,杨贤,等. 短路冲击状态下的变压器振动特性及匝间短路故障检测[J]. 高电压技术,2018,44(11): 3569-3576.
LIN Chunyao, OU Xiaobo, YANG Xian, et al. Transformer vibration characteristics and turn to turn short circuit fault detection under short circuit impulse [J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11): 3569-3576.

作者简介:



潘超

潘超(1981),男,博士,副教授,研究方向为电力系统稳定与电磁兼容(E-mail:31563018@qq.com);

葛佳柔(1995),女,硕士在读,研究方向为变压器故障监测;

刘天舒(1989),男,硕士在读,研究方向为变压器故障监测。

(下转第 166 页)

A design of high voltage electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology

WANG Bingzhuo, SI Jianfei, YU Chunfeng

(Navy Aeronautics University Qingdao Branch, Qingdao 266000, China)

Abstract: According to the insufficient endurance of rotor UAV in power line inspection, a design of high voltage electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology is proposed. The inductive electric energy is stored between the high voltage electric field and the overhead ground line by using the airborne conductor of the patrol UAV as a floating electrode. The airborne conductor cascades the gas self-triggering switch and the inductor, and forms an energy-receiving loop with the overhead ground wire. The floating electrode breaks through the switch air gap and discharges to the ground. With the development of air gap discharge, the distributed capacitance between the floating electrode and the power line and the overhead ground line will be quickly divided to suppress the discharge. Therefore, an arc cannot be formed between the air gaps, and the high-frequency stream is injected into the pulse discharge to excite the high-frequency electromagnetic oscillation of the loop. Finally, the electric field induced electric energy output is realized by the electromagnetic mutual inductance. This paper introduces the principles of this design and the theory of inhibition-discharge, analyzes the equivalent energy-gaining circuit and builds a discharge-pulse energy-gaining circuit model. The feasibility of the design is verified through tests on the physical platform.

Keywords: electric-field induction technology; pulsed power technology; streamer theory; inhibition-discharge; power lines inspection UAV

(编辑 江林)

(上接第 153 页)

The electromagnetic vibration characteristics of the first end of single-phase transformer

PAN Chao¹, GE Jiarou¹, LIU Tianshu¹, LI Xiang²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Jilin city measurement and testing technology research institute, Jilin 132013, China)

Abstract: According to the inter-turn short circuit problem of single-phase transformer, the electromagnetic vibration characteristics of different turn-to-turn short-circuit ratios are studied. The electromagnetic coupling principle is used to establish the inter-turn short-circuit state equation of the transformer. The electromagnetic parameters and vibration acceleration changes under different short-circuit ratios are simulated. Under different inter-turn short-circuit faults, the short-circuit winding current direction changes, the amplitude becomes larger, and the un-short winding current changes less; the internal leakage flux increases and the leakage flux in the corresponding area of the short-circuit winding increases significantly; the winding vibration due to the increase of current and leakage flux Intensified; electromagnetic parameters and vibration acceleration are further changed as the proportion of short-circuit between turns is increased. Finally, the inter-turn short-circuit dynamic model experimental platform is built to measure the winding current and vibration acceleration under different inter-turn short-circuit faults at the head end of the transformer. The simulation results and experimental data are compared to verify the validity of the model and the correctness of the conclusions obtained.

Keywords: single-phase transformer; inter-turn short circuit; electromagnetic parameters; vibration characteristics

(编辑 杨卫星)