

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407323

变压器绕组匝间短路与低压侧出口短路的电磁力特征对比分析*

咸日常¹ 郑小刚¹ 李嘉洋¹ 张海强² 赵如杰³ 胡玉耀¹(1. 山东理工大学电气与工程学院 淄博 255049; 2. 国网淄博供电公司 淄博 255000;
3. 山东汇能电气有限公司 淄博 255000)

摘要: 电力变压器作为电网的关键设备,其绕组绝缘状态直接关系到电网运行安全性和供电可靠性,一旦低压侧出口短路极易引起绕组匝间绝缘损伤,进而发生绕组匝间短路故障。为进一步研究变压器绕组匝间短路和低压侧出口短路故障的暂态过程,探寻绕组发热、受力薄弱环节,揭示绕组绝缘故障形成和发展机理,通过建立与实际结构尺寸相同的变压器电-磁-力耦合模型,在开展绕组单匝匝间短路试验的前提下,利用有限元仿真软件,呈现绕组在不同工况下的电磁暂态过程,对比分析绕组电动势分布特征,探究不同故障工况对绕组绝缘的影响规律。结果表明:变压器绕组匝间短路故障时短路匝电流明显高于三相出口短路电流,与额定负载工况对比,变压器在绕组匝间短路和低压出口故障时,流经短路匝和绕组的电流最大值分别增大5318%和3314%,空间磁场强度最大值分别增大1511%和2111%,绕组线匝电磁力密度最大值分别增大5210%和11489%;变压器绕组匝间短路故障极易烧毁绕组绝缘,三相出口短路故障易引起绕组的失稳变形、绝缘劣化。

关键词: 变压器;匝间短路;出口短路;电磁暂态;绕组电动势

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Comparative analysis of the electromagnetic force characteristics of inter-turn short circuits and low-voltage side outlet short circuits in transformer windings

Xian Richang¹ Zheng Xiaogang¹ Li Jiayang¹ Zhang Haiqiang² Zhao Rujie³ Hu Yuyao¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China;

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

Abstract: Power transformers are critical components of the electrical grid, and the insulation status of their windings is directly linked to the operational safety and reliability of power supply. Short circuits at the low-voltage side outlets can easily damage the inter-turn insulation, leading to inter-turn short circuit faults in the windings. To further study the transient processes of inter-turn short circuits and low-voltage side outlet short circuits in transformer windings, this research investigates the weak links in heat generation and mechanical stresses, and elucidates the mechanisms of insulation failure development. An electromagnetic-force coupled model, congruent with the actual structural dimensions of the transformer, was developed. Utilizing finite element simulation software, the electromagnetic transient processes of the windings under various operational conditions were examined. A comparative analysis of the electromagnetic force distribution characteristics was conducted to explore the influence of different fault conditions on winding insulation. The results indicate that during inter-turn short circuit faults in transformer windings, the current in the short-circuited turn significantly exceeds that in three-phase outlet short circuits. Compared to normal load conditions, the peak currents through the short-circuited turns and overall windings increased by 5318% and 3314%, respectively; the maximum magnetic field intensity rose by 1511% and 2111%, and the peak electromagnetic force density on the winding turns surged by 5210% and 11489%. Inter-turn short circuit faults in transformer windings are likely to severely damage the insulation, whereas three-phase outlet short circuits can lead to unstable deformations and degradation of insulation.

收稿日期: 2024-03-08 Received Date: 2024-03-08

* 基金项目: 国家自然科学基金(51907109)项目资助

Keywords: transformer; inter-turn short circuit; output short circuit; electromagnetic transient; winding electrodynamics

0 引言

电力变压器作为电网关键设备,其绕组绝缘状态直接影响其健康水平和供电可靠性^[1-5]。实际运行统计表明电力变压器绕组绝缘故障时有发生,而因变压器低压侧出口短路故障电热效应,进而引起绕组匝间绝缘损伤,是造成变压器烧毁事故的主要因素^[6-10]。绕组匝间短路故障作为变压器内部绝缘故障,一旦发生,发展速度快,极易烧毁绕组绝缘,可能引起长时间停电甚至火灾事故,危害极大;变压器低压出口短路时,高、低压绕组中均流过数十倍额定电流的短路电流,一般可由保护装置在数十毫秒内快速隔离故障,虽然国标 GB 1094.5《电力变压器 第五部分:承受短路的能力》规定了变压器动、热稳定性,但短路电流冲击的累积效应会导致绕组变形和绝缘劣化,进而造成变压器绕组匝间短路故障;为此,有必要对比分析研究变压器匝间短路与出口短路故障时绕组电磁特征及电动力分布情况。

在实际研究中,受变压器绕组具体绕线布置和绝缘结构的限制,试验验证时绕组匝间短路故障的位置及严重程度无法设置^[11],试验过程中的短路匝电流、短路匝附近绕组电磁暂态参数及所受电动力不能够直接测量^[12]。而出口短路试验所需试验装置的容量大,试验费用高昂,且绕组在 2 s 内通过数十倍额定值的短路电流,其电热效应必将引起绕组变形和绝缘损伤;因此,通常采用有限元法仿真分析变压器绕组在故障工况下的物理特征及相互影响规律^[13-18]。文献[19]通过 Comsol 有限元软件建立配电变压器三维仿真模型,分析绕组结构为圆形和椭圆形的变压器三相出口短路故障特征;文献[20]研究了变压器绕组在不同位置发生匝间短路以及不同短路匝比例下的电磁特征;文献[21]研究了变压器出口短路时,过流保护动作隔离故障,但短路冲击对绕组变形及绝缘损伤有显著的累积效应;文献[22]研究得出绕组短路匝形成后有功损耗显著增加,并据此提出了利用功率损耗变化率识别配电变压器匝间短路故障的方法。目前虽有学者对变压器绕组匝间短路、出口短路等故障的特征进行了研究,但并未对变压器在额定负载、绕组匝间短路、低压出口短路故障下的绕组电磁特征及电动力分布情况进行对比分析,进而探究绕组绝缘故障的形成、发展机理,从而提出针对性应对措施。

为进一步研究变压器绕组匝间短路和低压出口短路故障暂态过程,找到绕组发热、受力薄弱环节,揭示其绕组绝缘故障形成和发展机理,以在设计制造阶段改进其承力和绝缘结构,提高绕组抗短路冲击能力,预防运行中

的绝缘烧毁事故,以及探讨变压器绕组匝间短路故障的预防性诊断方法。通过建立与实际变压器结构尺寸一致的电-磁-力耦合模型,在进行绕组单匝匝间短路试验、验证模型有效性的前提下,设置变压器绕组匝间短路和低压侧出口短路故障,仿真呈现额定运行、绕组匝间短路与低压出口短路时绕组的电磁暂态过程,对比分析电动力沿绕组的分布特征,探究不同故障工况对变压器绕组绝缘造成的危害及匝间短路故障的形成、发展机理。

1 仿真模型的建立与验证

1.1 变压器模型参数

为保证分析结论正确性,文中采用 SolidWorks 软件绘制了几何结构与实物一致的变压器高保真三维几何模型,变压器主要技术参数及结构尺寸如表 1 所示,三维几何模型如图 1 所示。其中,低压绕组 a 相外层绕组为 17 匝,自下而上编号取为 W1~W17。

表 1 变压器主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of transformer			
技术参数	数值/单位	技术参数	数值/单位
额定容量	250 kVA	联结组号	Dyn11
额定电压	10/0.4 kV	高压绕组匝数	1 544 匝
额定电流	14.43/360.84 A	低压绕组匝数	34 匝
短路阻抗	4%	频率	50 Hz
空载损耗	295.4 W	负载损耗	3 614.2 W

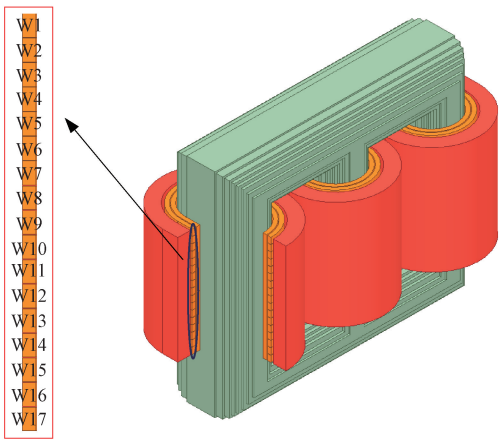


图 1 变压器三维几何模型

Fig. 1 Transformer 3D geometric model

1.2 等效电路

变压器绕组匝间短路选取初期最容易发生的低压绕组单匝短路故障,等效电路如图 2 所示,低压出口短路选取短路电流最大、危害最为严重的三相出口短路故障,等

效电路如图 3 所示。图中： $L_A、L_B、L_C、L_a、L_{a1}、L_{a2}、L_b、L_c$ 为高、低压绕组及短路匝的自感， $R_A、R_B、R_C、R_a、R_b、R_c$ 及 $R_{a1}、R_{a2}$ 为高、低压绕组的电阻， $M_{Aa}、M_{Bb}、M_{Cc}、M_{Aa1}、M_{Aa2}、M_{Aad}、M_{a1d}、M_{a2d}$ 为高、低压绕组及短路匝间的互感， $L_{ad}、R_{ad}$ 为低压绕组短路匝的电感与电阻， $I_A、I_B、I_C、I_a、I_b、I_c、I_d$ 为高、低压绕组及短路匝电流， $U_A、U_B、U_C$ 为高压绕组的相电压， $Z_a、Z_b、Z_c$ 为三相负载阻抗。

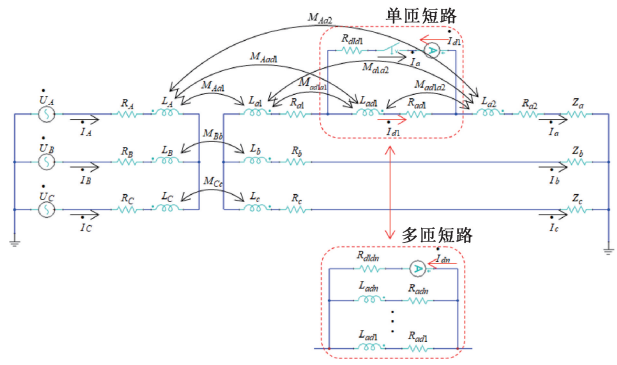


图 2 变压器低压绕组匝间短路故障等效电路
Fig. 2 Transformer low voltage winding inter-turn short circuit fault equivalent circuit

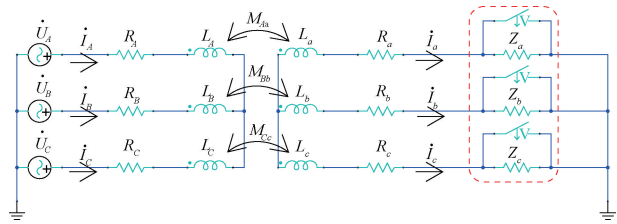


图 3 变压器三相出口短路故障等效电路
Fig. 3 Transformer three-phase outlet short-circuit fault equivalent circuit

将图 2、3 所示故障工况的外部等效电路分别导入 Maxwell 中的三维几何模型中，构建“场-路”耦合模型。故障发生时刻由图示红框中的压控开关控制，设置仿真试验时的故障时刻为 40 ms、持续时间为 100 ms。

1.3 模型验证与绕组匝间短路试验

变压器低压侧出口短路试验的技术要求，在国标 GB 1094.5《电力变压器 第五部分：承受短路的能力》已有明确规定，试验结果与理论计算值高度吻合，实际工程中得到了广泛验证。为保证绕组匝间短路故障仿真模型的有效性，特搭建实际试验平台，专门制作线规与低压绕组一致的独立短路匝，将之套装在 a 相铁心绕组上端部，等效低压 a 相绕组发生了单匝匝间短路故障。为展示直观并便于短路匝布置和测试线引出，本试验以未组装壳体和套管的变压器器身为试品，且未改变低压绕组原结构和匝数；试验时变压器高压侧绕组开路，利用三相调压器对

低压绕组逐步升高电压，检测 A 流过低压绕组及短路匝电流的变化情况。试验接线原理如图 4 所示，实物试验接线如图 5 所示。

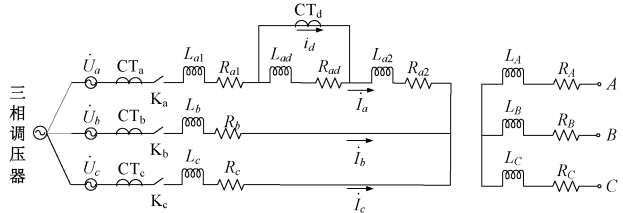


图 4 变压器低压绕组匝间短路故障试验接线原理图
Fig. 4 Transformer low voltage winding inter-turn short circuit fault test wiring principle diagram

在图 4 中， $U_a、U_b、U_c$ 分别为通过三相调压器施加在变压器低压侧的相电压； $CT_a、CT_b、CT_c$ 为低压绕组用电流互感器； CT_d 为短路匝用低压电流互感器，变比为 3 000/5。

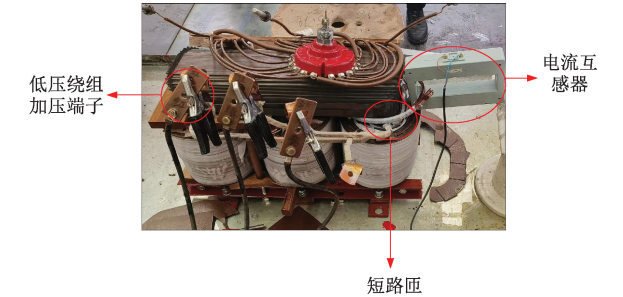


图 5 变压器低压绕组短路匝实际试验接线图
Fig. 5 Transformer low voltage winding short circuit turns actual test wiring diagram

为防止试验过程中变压器低压绕组短路匝在大电流作用下温度过高而烧毁绝缘，在短路匝上贴装光纤测温探头，监视短路匝导体在试验时的温度变化情况；试验发现励磁电压升高、短路匝电流的增大，在电流值接近 2 000 A 时，短路匝导体温度达到 155 ℃，由此可见，变压器绕组匝间短路故障一旦形成，极易引起绕组绝缘烧毁。对比不同励磁电压下短路匝电流实际测量值与仿真值，如表 2 所示。其中，仿真值 1 为低压绕组总匝数不变的短路匝电流值，仿真值 2 为低压绕组增加一匝的短路匝电流值。

由表 2 可知，在不同励磁电压下，短路匝电流实际测量值与仿真值 2 的误差小于 1%，而较仿真值 1 大 4% 左右，究其原因是实际试验时增加了短路匝而未减少二次绕组匝数，a 相二次绕组与短路匝的实际匝数比为 34/1，而非实际单匝匝间短路工况时的 33/1，变化的短路匝电流与二次回路电流之比符合电磁感应定律。由于绕组空间磁场强度、电动力等与该电流幅值正相关，所以利用该

模型进行绕组电磁特征及电动力的仿真分析,能够保证数据正确可信。

表 2 变压器绕组短路匝电流测量值与仿真值对比

Table 2 Transformer winding shorted turn current measurement values and simulation values comparison						
序号	励磁电压 /V	二次绕组 电流/A	绕组短路匝电流/A			仿真值 1、2 与试验 值的相对误差
			仿真值 1	仿真值 2	试验值	
1	10.4	9.96	425.79	441.48	445	4.32%/0.79%
2	16.4	25.09	1 072.60	1 111.92	1 121	4.32%/0.81%
3	24.5	40.31	1 723.25	1 790.29	1 804	4.48%/0.76%
4	29.8	45.82	1 958.80	2 021.32	2 037	3.84%/0.77%

2 不同工况下绕组电磁特征分析

2.1 低压绕组及其短路匝中的电流

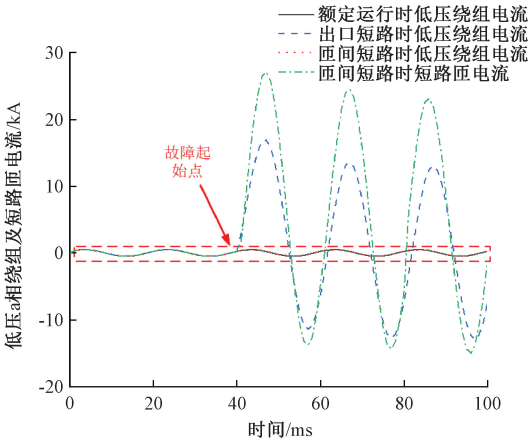
变压器绕组的电磁特征取决于其所在铁心主磁通,文中设置绕组匝间短路的故障点在低压 a 相外层绕组中部,即第 9 匝线圈(W9)。变压器额定负载工况、绕组单匝匝间短路及三相出口短路故障 3 种工况下,低压 a 相绕组及其短路匝电流变化情况,如图 6 所示。

由图 6 可知,变压器低压绕组匝间短路故障时,短路匝所在低压 a 相绕组的回路电流变化不明显,也即不会引起过电流保护装置动作,而短路匝电流峰值由额定 0.51 kA 增至 27.12 kA,增长幅度为 5 218%,绕组短路匝上的电能损耗必将剧增并引起温度异常升高,并危及相邻线匝绝缘,势必造成变压器烧毁事故。变压器三相出口短路故障时,低压侧绕组电流剧增,电流峰值由额定 0.51 kA 增至 16.90 kA,增长幅度为 3 214%,过电流保护将迅速动作并隔离故障,该故障隔离时间取决于继电保护定值和断路器机械特性,时间越短对绕组绝缘的破坏越小。

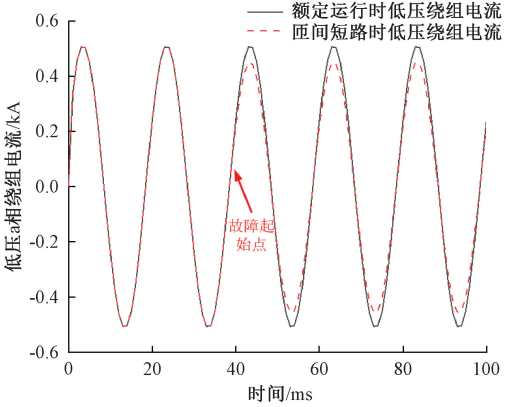
2.2 高、低压绕组的空间磁场强度

由以上不同工况下低压绕组及其短路匝电流分析可知,当变压器发生绕组匝间短路故障时,低压侧绕组电流虽变化不大,但短路匝流过了 5 318%额定值的环路电流,而三相出口短路时,低压侧各相绕组均流过 3 314%额定值的短路电流,两种工况下变压器绕组空间漏磁场强度必将随之增强。同时考虑到该配电变压器绕组为长圆形绕组,为了更好地分析绕组磁通分布规律,分别在绕组长轴和短轴各取一个观测截面,截面选取方法如图 7 所示。通过仿真试验获取不同工况下绕组磁通分布情况,如图 8 所示。

图 8(a)为额定运行工况下,A 相高、低压绕组长轴和短轴的磁通分布剖面图;图 8(b)为三相出口短路工况下,A 相高、低压绕组长轴和短轴的磁通分布剖面图,图 8(c)为低压绕组 W9 单匝匝间短路工况下,A 相高、低压



(a) 不同工况低压a相绕组及短路匝电流变化情况
(a) Variations in the low-voltage phase a winding and short-circuit turn currents under different conditions



(b) 额定运行与匝间短路时低压a相绕组电流
(b) Low-voltage phase a winding currents during rated operation and inter-turn short circuit

图 6 不同工况变压器低压 a 相绕组及短路匝电流
Fig.6 Different operating conditions transformer low voltage phase a winding and shorted turn current

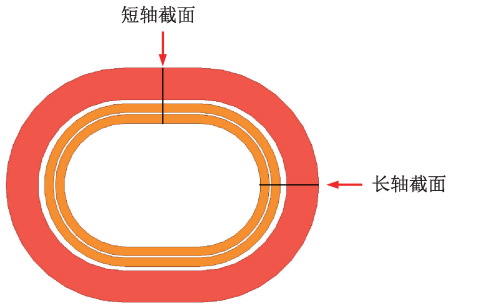


图 7 观测截面选取
Fig.7 Selection of observation cross-section

绕组长轴和短轴的磁通分布剖面图。
分析图 8 可知,在不同工况下,变压器绕组长轴和短轴磁通分布规律基本相同,但在变压器发生出口短路和

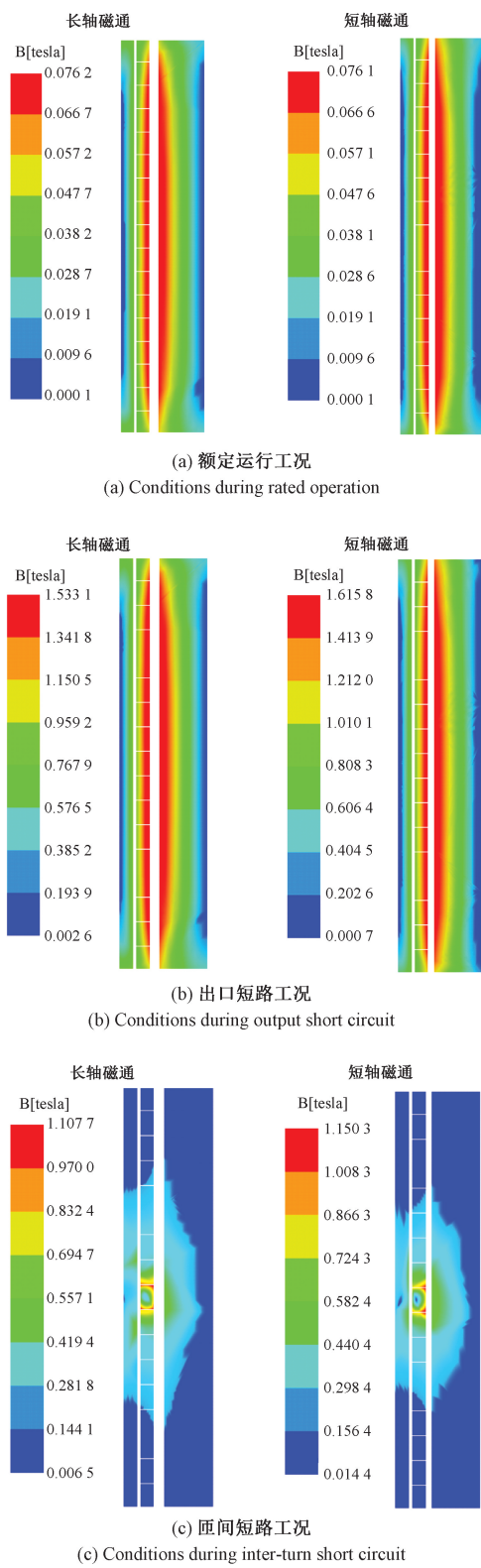


图 8 不同工况 A 相高、低压绕组磁场强度剖面图
Fig. 8 Magnetic field intensity profile of high and low voltage windings of phase A under different conditions

匝间短路故障时,变压器绕组短轴由于更加靠近铁心,受

铁心畸变磁通的影响更大,其磁通数值要比长轴更大。

由图 8 进一步分析可知,额定负载工况下,高、低压绕组间空隙漏磁场强度最强,且大小逐渐向周围递减;三相出口短路工况下,漏磁场分布规律与额定负载工况的漏磁场分布相似,但漏磁场强度显著增加,为额定负载工况的数十倍;当变压器低压绕组 W9 发生单匝匝间短路故障时,由于短路匝电流剧增,使得故障匝与相邻线匝间隙处的漏磁场剧增。

为了更直观分析不同工况下绕组的漏磁场分布,选择漏磁场强度较大的绕组短轴处进行分析,沿低压 a 相外层绕组短轴处纵向自上而下的直线为取值路径,绘制该路径不同工况下的磁场强度和辐向、轴向漏磁场强度曲线。图 9 为变压器额定运行、低压绕组匝间短路和低压出口短路时的磁场强度曲线;图 10 为 3 种工况下轴向、辐向漏磁场强度曲线,其中沿轴向漏磁场朝上为正,朝下为负,辐向漏磁场朝内为正,朝外为负。

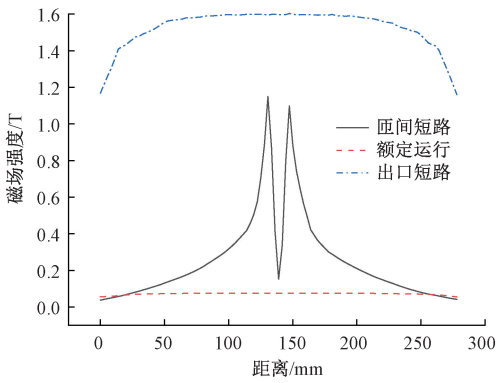


图 9 不同工况低压 a 相外层绕组磁场强度曲线
Fig. 9 Magnetic field intensity curve of phase a low voltage outer winding under different working conditions

由图 9 可知,变压器低压绕组匝间短路故障时,短路匝两侧的磁场强度最大,约 1.15 T,为额定运行工况的 1 511%;三相出口短路故障时,低压外层绕组中部的漏磁场强度最大,约 1.60 T,为额定运行工况的 2 111%;三相出口短路所引起的漏磁场强度变化高于绕组单匝短路。

由图 10 可知,变压器低压绕组匝间短路故障时,短路匝附近漏磁场发生畸变,磁场强度显著增加,轴向漏磁场强度在故障匝两侧明显增强,且方向一致,而辐向漏磁场强度在短路匝两侧剧增,但方向相反。三相出口短路故障时,辐、轴向漏磁场分布规律与额定运行工况的分布规律一致,轴向漏磁场大小由中部向两端递减,辐向漏磁场在绕组端部比中部高,且方向相反,但从数值来看,三相出口短路漏磁场强度远高于额定运行工况。图 9、10 所示规律与图 6 相互吻合,符合安培定律。

根据图 6、9 和 10 所示,对比分析不同工况绕组电流

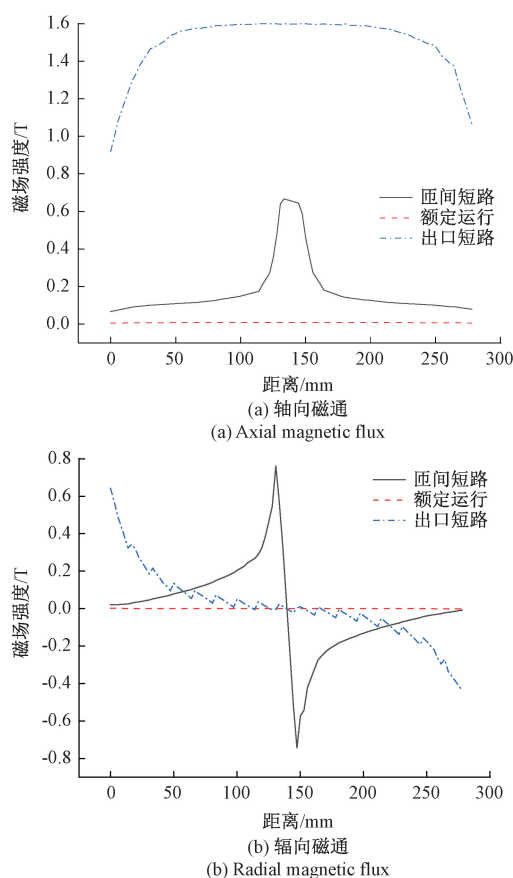


图 10 不同工况低压 a 相外层绕组轴、径向漏磁场强度曲线

Fig. 10 Curves of axial and radial leakage magnetic field intensity of the outer winding of low voltage phase a under different conditions

及漏磁场强度可知,匝间短路故障下穿过绕组的轴向漏磁场小于出口短路时,而匝间短路时短路匝流过的电流大于出口短路时绕组流过的电流;同理,匝间短路故障使得穿过短路匝相邻线匝的径向漏磁场变化较大,出口短路故障使得穿过绕组两端的径向漏磁场变化较大,而短路匝相邻线匝流过的电流远小于出口短路时绕组流过的电流,匝间短路时绕组电动力应该小于出口短路,因此,不同工况低压外层绕组电动力分布还需进一步分析。

3 不同工况下的绕组电动力分析

3.1 绕组电动力

由以上不同工况绕组电流、空间磁场分析可知,变压器绕组单匝匝间短路故障时,短路匝将流过 5 318% 额定值的电流,且与之相邻线匝空隙处的漏磁场高于其他位置数倍;而三相出口短路故障时,低压侧各相绕组均流过 3 314% 额定值的电流,且绕组处于数十倍额定值的漏磁场中,因此,两种故障工况下绕组受力将发生变化,其低

压 a 相外层电磁力密度分布分别如图 11(a)、(b) 所示;额定运行时低压 a 相外层绕组电磁力密度分布如图 11(c) 所示。

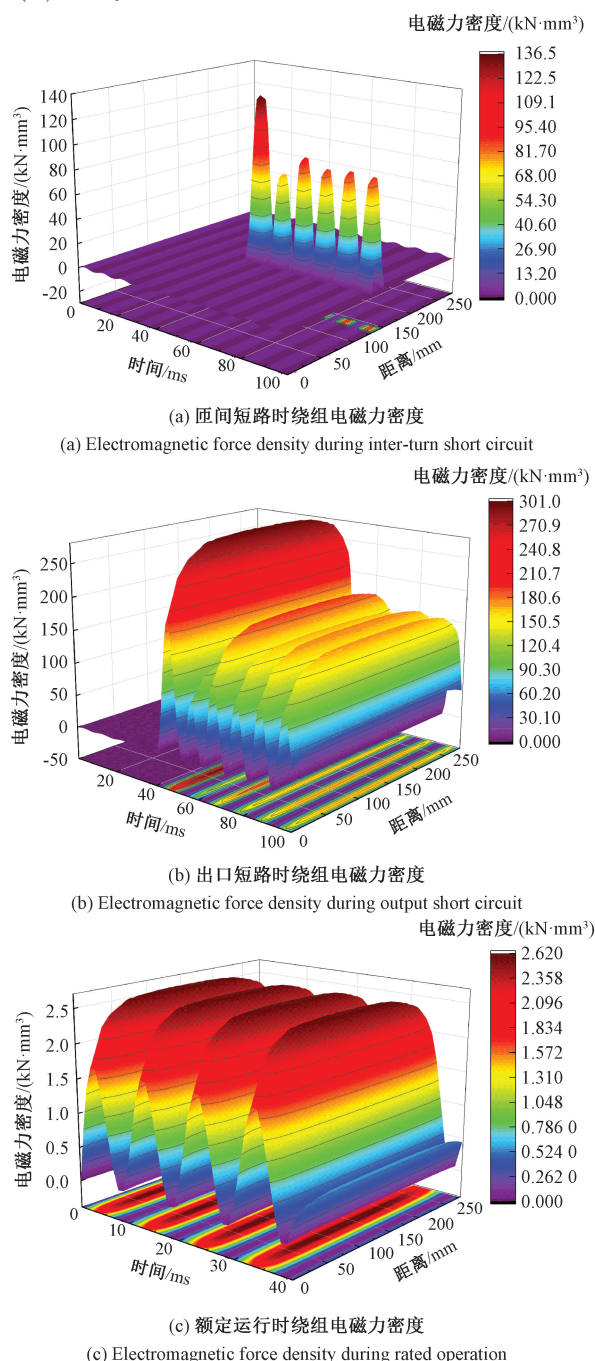


图 11 不同工况低压 a 相外层绕组所受电动力

Fig. 11 Electromotive forces experienced by the outer layer of the low voltage a-phase winding under different conditions

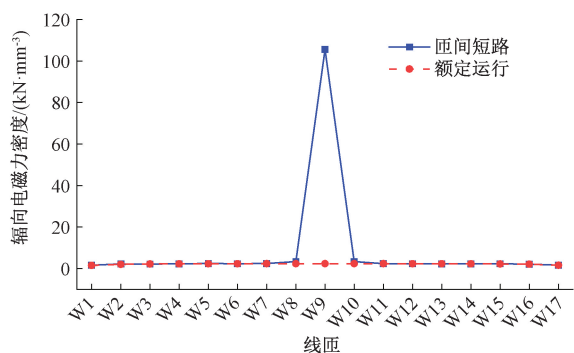
由图 11(a) 可知,变压器绕组 W9 单匝匝间短路故障时,短路匝所受电动力突增,且随时间波动,在任意时刻,电动力最大值处在短路匝位置,其他线匝受力变化不明显,绕组最大电磁力密度最大值约为 136.5 kN/mm^3 ,为额定运行时的 5 210%。由图 11(b) 可知,三相出口短

路故障时,低压外层绕组所受电动力突增,随时间波动,在任意时刻,电动力最大值处在绕组的中部,且受力大小沿绕组中部向两侧递减,绕组电磁力密度最大值为 301.0 kN/mm^3 ,为额定运行时的 11 489%。

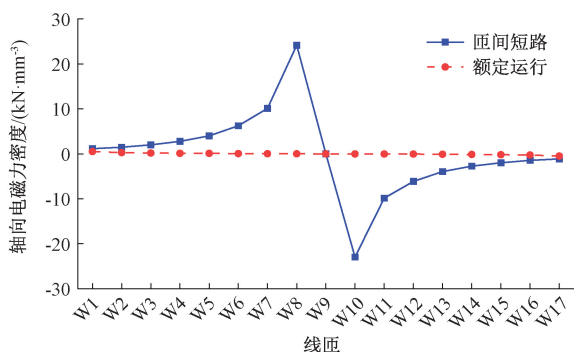
由不同工况低压外层绕组电动力分布对比分析可知,单匝匝间短路所引起的绕组电动力增幅均小于三相出口短路。

3.2 绕组轴向与辐向电动力

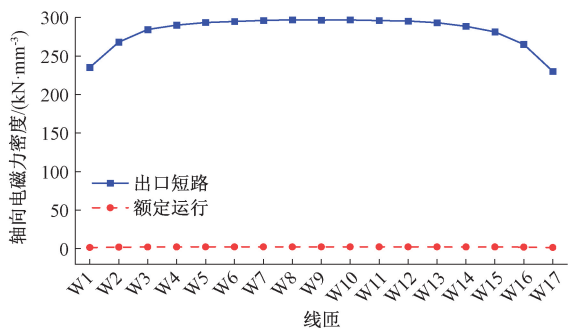
变压器绕组所处空间的电磁场可分为轴向、辐向电磁场,通有电流的线圈将受到辐向、轴向电动力。为更详细地分析不同工况绕组各线匝受力情况,绘制低压 a 相外层线圈的辐向、轴向电动力分布图,并将其分别与额定运行时绕组电动力分布作对比,如图 12 所示。



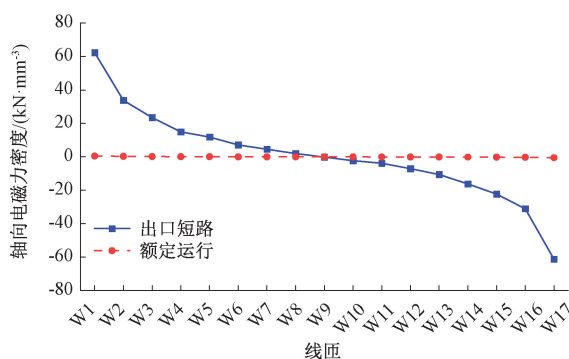
(a) 匝间短路辐向电磁力密度



(b) 匝间短路轴向电磁力密度



(c) 出口短路辐向电磁力密度



(d) 出口短路轴向电磁力密度

(d) Axial electromagnetic force density of outlet short circuits

图 12 不同运行工况低压 a 相绕组所受轴向、辐向电动力
Fig. 12 Axial and radial electromotive forces experienced by low voltage A-phase winding under different operating conditions

由图 12 可知,变压器绕组匝间短路故障时,辐向电动力在短路匝处变化增大,在其他线匝的变化轻微,轴向电动力在短路匝处几乎为 0,相邻线匝所受轴向电动力明显增强,且方向相反;而三相出口短路故障时,辐、轴向电动力均剧增。

由不同运行工况低压外层绕组轴向、辐向电动力对比分析可知,绕组单匝短路的辐向、轴向电动力均小于三相出口短路。因此,变压器在额定运行、绕组匝间短路与低压出口短路 3 种工况下,其绕组电流、绕组空间漏磁场及其电动力分布特征不同,造成的危害及重点采取的防范措施也不相同,其中,匝间短路更易烧毁绕组绝缘,三相出口短路故障更易引起绕组失稳变形和绝缘劣化,实际工程中应区别对待。

4 结 论

通过对比分析变压器在额定运行、绕组匝间短路、低压出口短路 3 种工况下,绕组电磁暂态特征及电动力分布情况,研究变压器低压出口短路进而引发绕组匝间短路故障的形成机理。研究发现,在变压器绕组匝间短路故障时,绕组主回路电流变化不明显,短路匝流过 5 318% 额定值的故障电流,漏磁场强度增大至额定运行时的 1 511%;低压侧出口短路故障时绕组流过 3 314% 额定值的短路电流,漏磁场强度增大至额定运行时的 2 111%。变压器绕组匝间短路故障时短路匝电流明显高于三相出口短路电流,极易导致短路匝的温度骤增,危及绕组绝缘,运维时应加强绕组匝间短路故障检测。在变压器绕组匝间短路故障,短路匝处绕组电磁力密度最大,约为 136.5 kN/mm^3 ,为额定运行时的 5 210%;低压出口短路故障,在绕组中部出现电磁力密度最大值,约为 301.0 kN/mm^3 ,为额定运行时的 11 489%,绕组辐向、轴

向电力均大于单匝绝缘故障时的绕组电力,极易引起绕组失稳变形,设计制造时应增强低压绕组中部的匝间绝缘和机械强度。变压器低压出口短路故障的累积效应导致绕组变形加剧和绝缘劣化,是造成绕组匝间短路故障的主要原因,应减少变压器低压出口短路故障概率,提高保护装置的速动性和灵敏度。

参考文献

- [1] 李云淦,咸日常,张海强,等. 基于改进灰狼与最小二乘支持向量机耦合的电力变压器故障诊断方法[J]. 电网技术,2023,40(3):1470-1478.
LI Y H, XIAN R CH, ZHANG H Q, et al. Power transformer fault diagnosis method based on improved gray wolf coupled with least squares support vector machine[J]. Power Grid Technology, 2023, 40(3): 1470-1478.
- [2] 咸日常. 电力变压器运行与维修[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
XIAN R CH. Power Transformer Operation and Maintenance [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [3] 徐晓刚,何韞雯,李鑫,等. 采用植物油浸渍耐高温纸的配电变压器过载能力[J]. 电网技术,2018,42(3): 1001-1006.
XU X G, HE Y W, LI X, et al. Overload capacity of distribution transformers using vegetable oil impregnated with high temperature resistant paper [J]. Power Grid Technology, 2018, 42(3): 1001-1006.
- [4] 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 X L, YAN K, ZHU H Y, et al. Early fault protection based on transformer winding circuit-leakage magnetic field multi-state resolution model [J]. Power Grid Technology, 2023, 47(9): 3808-3821.
- [5] 张冰倩,咸日常,于洋,等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J]. 高电压技术,2021,47(6):2177-2185.
ZHANG B Q, XIAN R C, YU Y, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter turn short circuit fault [J]. High Voltage Technology, 2021,47(6): 2177-2185.
- [6] 张海强,黄凯,张述杰,等. 配电变压器绕组短路电力的暂态特征分析[J]. 电工技术,2022,(7): 43-46,48.
ZHANG H Q, HUANG K, ZHANG SH J, et al. Transient characteristics analysis of short-circuit electromotive force of distribution transformer windings [J]. Electrical Engineering Technology, 2022,(7): 43-46,48.
- [7] 洪志敏,柴星海,陈鹏,等. 三绕组变压器各侧出口短路电流分析与研究[J]. 电工技术,2020(11): 82-84,87.
HONG ZH M, CHAI X H, CHEN P, et al. Analysis and study of short-circuit currents on each side outlet of three-winding transformers [J]. Electrical Engineering Technology, 2020(11): 82-84,87.
- [8] 邓祥力,朱慧,刘世明,等. 适用于变压器保护的数字孪生建模技术研究[J]. 电网技术,2022,46(12): 4982-4993.
DENG X L, ZHU H, LIU SH M, et al. Research on digital twin modeling techniques applicable to transformer protection [J]. Power Grid Technology, 2022, 46(12): 4982-4993.
- [9] 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 R CH, ZHANG B Q, ZHANG Q ZH, et al. Characterization of distribution transformer inter-turn insulation degradation based on finite element analysis [J]. High Voltage Electrical, 2023, 59(2): 169-176.
- [10] 邵凯旋,何怡刚,汪磊. 基于多尺度熵分析与改进SVM的变压器故障识别[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(6):161-168.
SHAO K X, HE Y G, WANG L. Fault identification of transformer based on multiscale entropy analysis and improved SVM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 161-168.
- [11] 张立静,盛戈俾,侯慧娟,等. 基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J]. 电网技术,2021,45(7):2473-2482.
ZHANG L J, SHENG G H, HOU H J, et al. Fault identification method of oil-immersed transformer inter-turn short circuit based on fusion analysis of electrical and thermal characteristics [J]. Power Grid Technology, 2021, 45(7): 2473-2482.
- [12] 陈浩宇,张健,崔聪,等. 一起400 kVA配电变压器出口短路故障分析[J]. 山东电力技术,2020,47(8): 14-17.
CHEN H Y, ZHANG J, CUI C, et al. Analysis of a 400 kVA distribution transformer outlet short-circuit fault[J]. Shandong Electric Power Technology, 2020, 47(8): 14-17.
- [13] 郝艳,咸日常,胡玉耀,等. 基于场-路耦合有限元法的干式变压器匝间短路暂态特性研究[J]. 南方电网技术,2023,17(6): 90-98.
HAO Y, XIAN R CH, HU Y Y, et al. Research on the transient characteristics of dry-type transformers with

- inter-turn short circuit based on field-path coupled finite element method [J]. Southern Power Grid Technology, 2023, 17(6): 90-98.
- [14] 郝艳, 咸日常, 胡玉耀, 等. 干式变压器绕组匝间短路故障的电磁特征及电动力分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(8): 214-218.
HAO Y, XIAN R CH, HU Y Y, et al. Electromagnetic characteristics and electrodynamic analysis of dry-type transformer winding interturn short circuit fault [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(8): 214-218.
- [15] 李智, 咸日常, 崔川, 等. 配电变压器低压绕组导线换位处单股匝间短路特征分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(5): 211-215.
LI Z, XIAN R CH, CUI CH, et al. Characteristics analysis of single-strand inter-turn short circuit in low voltage winding wire transposition of distribution transformer [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(5): 211-215.
- [16] 咸日常, 张冰倩, 刘兴华, 等. 应用有限元分析电力变压器绕组匝间短路的暂态特征[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(10): 130-138.
XIAN R CH, ZHANG B Q, LIU X H, et al. Application of finite elements to analyze the transient characteristics of power transformer winding turn-to-turn short circuit [J]. Journal of Electrical Machinery and Control, 2021, 25(10): 130-138.
- [17] 崔佳嘉, 马宏忠, 李楠, 等. 基于 COMSOL 的变压器铁心振动声场分布的有限元仿真[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 48-55.
CUI J J, MA H ZH, LI N, et al. Simulation and analysis of vibration and noise of oil immersed transformer core based on COMSOL [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 48-55.
- [18] 郝艳, 咸日常, 冷学冰, 等. 基于电压、电流不平衡度差值的干式变压器匝间短路故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 12-21.
HAO Y, XIAN R CH, LENG X B, et al. Identification method of turn-to-turn short-circuit faults in dry-type transformers based on the difference of voltage and current unbalance [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 12-21.
- [19] 燕蕾, 咸日常, 荣庆玉, 等. 绕组结构对配电变压器短路电动力影响分析[J]. 变压器, 2020, 57(4): 28-32.
YAN L, XIAN R C, RONG Q Y, et al. Analysis of the influence of winding structure on the short-circuit electromotive force of distribution transformers [J]. Transformer, 2020, 57(4): 28-32.
- [20] 潘超, 石文鑫, 孟涛, 等. 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 C, SHI W X, MENG T, et al. Study on the electromagnetic characteristics of single-phase transformer turn-to-turn short circuit [J]. High Voltage Technology, 2020, 46(5): 1839-1856.
- [21] 游力, 欧江陵, 康逸群, 等. 一起因近区短路导致 500kV 变压器故障的事故分析[J]. 变压器, 2020, 57(8): 67-71.
YOU L, OU J L, KANG Y Q, et al. An accident analysis of a 500 kV transformer fault due to a short circuit in the vicinity [J]. Transformer, 2020, 57(8): 67-71.
- [22] XIAN R C, WANG L L, ZHANG B Q, et al. Identification method of interturn short circuit fault for distribution transformer based on power loss variation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, DOI: 10.1109/TII.2023.3292972.

作者简介



咸日常, 1987 年于山东工业大学获得学士学位, 2003 年于华中科技大学获得硕士学位, 现为山东理工大学二级教授, 主要研究方向为高电压绝缘及防护技术、多物理场耦合仿真技术、设备运行状态智能感知技术等。

E-mail: xianre@163.com

Xian Richang received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 1987, M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2003, respectively. Now he is a second-level professor at Shandong University of Technology. His main research interests include high-voltage insulation and protection technology, multi-physics coupling simulation technology, intelligent perception technology of equipment operating status, etc.



郑小刚 (通信作者), 2018 年于闽南师范大学获得学士学位, 2023 年于福建理工大学获得硕士学位, 现为山东理工大学博士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

E-mail: 17859901021@163.com

Zheng Xiaogang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Minnan Normal University in 2018 and M. Sc. degree from Fujian University of Technology in 2023. Now he is a Ph. D. candidate at Shandong University of Technology. His main research interests include high voltage and insulation technology.