

变压器抗短路能力研究综述

李克举, 淡淑恒

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要:当短路电流流过变压器时,它会在变压器中产生与电流平方成正比的电动力,这可能导致变压器绕组的变形,甚至可能损坏。因此变压器必须具备一定的抵抗短路的能力。文中首先将变压器抗短路能力分为短路电流在变压器绕组中产生的电动力及与之相对抗的机械强度两个方面,并对这两方面原理进行了详细阐述;其次探讨了电动力、机械强度和多场耦合的研究进展,以及影响抗短路能力的各种因素;再者表明变压器抗短路能力研究的展望,这对变压器抗短路能力有重要意义,最后做出总结。

关键词:变压器;漏磁通;短路电流;机械强度;电磁场;电动力

Review of Research on the Short Circuit Withstand Capability of Transformer

LI Keju, DAN Shuheng

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The short circuit current, in case of flowing through a transformer, will generate an electro dynamic force proportional to the square of the current in the transformer, which may cause deformation or even damage to the transformer winding. Therefore, the transformer must possess the ability to withstand short-circuit current. In this paper, the short circuit withstand capability of transformer is firstly divided into such two aspects as the electrodynamic force generated by the short circuit current in the transformer winding, and the mechanical strength that opposes it. The principles of those two aspects are described in detail. Then, the research progress on electrodynamic force, mechanical strength, and multi field coupling, as well as various factors affecting short-circuit withstand ability, are discussed. Furthermore, the prospect of research on the short-circuit withstand ability of transformer is presented, which is of great significance for the short-circuit withstand ability of transformers. Finally, a summary is provided.

Key words: transformer; leakage flux; short circuit current; mechanical strength; electromagnetic field; electrodynamic force

0 引言

变压器是输变电工业中的重要设备,在发电厂、输变电系统和用电系统中通过对电压等级的改变以减小经济损耗和满足用户需求等。但当电力系统出现突发短路时,瞬间增大的电流流经变压器会造成冲击破坏,导致变压器故障,无法正常运行^[1]。据统计,变压器故障占电网事故的50%以上,其中约60%的故障是由于抗短路电流能力不足引起的。因此,由于抗短路电流能力不足引起的故障已经成为

变压器主要的故障来源。中国曾发布文件规范变压器的制造,以保证其更好的生产、使用和评估,其中最新版的GB/T 1094.5—2008《电力变压器第5部分:承受短路的能力》明确了对变压器承受短路能力的新要求^[2]。而且如今,随着高比例新能源、高比例电力电子装备广泛接入,电力系统的稳定特性、安全控制都将发生根本性改变,以及分布式电源的引入显著的增大了短路电流^[3-4],变压器的抗短路能力也随之将面临着巨大的挑战。因此,良好的变压器抗短路能力对保证变压器可靠性、维持电网的安

收稿日期:2025-11-15; 修回日期:2026-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50577040)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50577040).

全稳定运行具有重要意义。

文中依据变压器抗短路电流能力的要求,阐述了变压器电动力和机械强度这两个竞争方面,介绍了其基本原理,并总结了电动力、机械强度、多场耦合的研究进展,同时对变压器抗短路能力的影响因素进行总结归纳,最后,提出对变压器抗短路能力研究的展望,以期为后续的变压器抗短路能力研究提供参考和借鉴。

1 变压器抗短路能力概述

在电网中,变压器短路电流分为电网非变压器故障的短路电流和变压器故障的短路电流。文中所述短路电流便是电网中非变压器故障的短路电流,即:电力系统非变压器处发生短路时流经变压器的短路电流。根据变压器抗短路能力,文中分为变压器电动力和变压器机械强度两方面分别概述。

1.1 变压器电动力原理

电动力是电磁现象中的动力学理论,是电流在变化的磁场中产生的力。变压器的电动力是指流经变压器的电流和漏磁通共同作用下的力,变压器运行时的电动力可以分为两种情况:正常稳定运行下的电动力和短路运行下电动力。正常稳定运行时,流经变压器的电流为额定电流,额定电流与漏磁通共同作用产生较小的电动力;当电力系统中出现短路时,流经变压器的短路电流是额定电流的10多倍甚至更大,此时出现的电动力更大。

变压器的电动力可以根据方向的不同分为轴向力和辐向力,见图1。图1中: F_r 为辐向力; F_z 为轴向力。

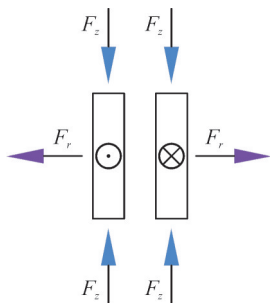


图1 电动力分布图

Fig. 1 Distribution diagram of short-circuit force

辐向力是沿绕组的径向分布的电磁力,辐向力由于漏磁场的分布不同,变压器不同位置的力的大小也会发生变化,其随变压器由低到高的位置分布见图2,但由于漏磁场的对称性,辐向力是呈对称分布的。

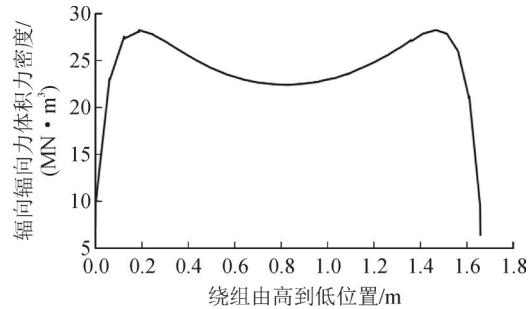


图2 辐向力分布图

Fig. 2 Distribution diagram of radial force

变压器绕组单位长度的辐向力的计算公式为

$$F_r = \sum 2\pi d_i B_{zi} S_i J_i \quad (1)$$

式(1)中: d_i 为第*i*个单元的有效半径; B_{zi} 为第*i*个单元的轴向漏磁通; S_i 为第*i*个单元的面积; J_i 为第*i*个单元的电流密度。

轴向力主要是指沿变压器绕组中心轴方向上的力,内外绕组的轴向力均是指向中间的压缩力。其分布特征较为:绕组两端向中间逐步减小至0^[5],见图3。

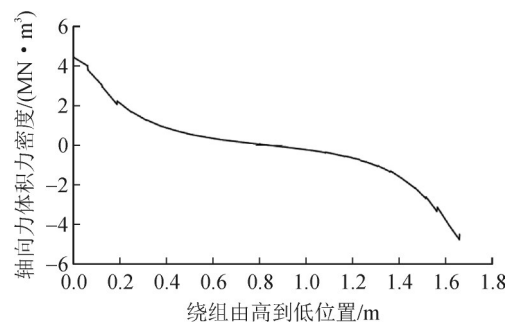


图3 轴向力分布图

Fig. 3 Distribution diagram of axial force

变压器绕组的单位长度的轴向力表达式为

$$F_z = \frac{\sum 2\pi d_i B_{ri} S_i J_i}{nl} \quad (2)$$

式(2)中: n 为绕组的线饼数; l 为绕组线圈周长; B_{ri} 为第*i*个单元的辐向漏磁通。

2种电动力原理相同,流经的电流相同,而力的分布和大小不同,这主要差别是漏磁通在辐向和轴向的分布不同,实验也表明辐向漏磁通相对较大。早期,由于辐向力相对于轴向力较大,对于辐向电动力的研究便相对较多,但随着动态力的提出,轴向力的研究也逐渐增多。

1.2 变压器机械强度原理

变压器的机械强度是指变压器承受电动力的能力。根据图1电动力的不同,绕组的机械强度可以分为3方面,即由辐向力产生的压缩力应力、拉伸应力和轴向力产生的弯曲应力。

拉伸应力是辐向力对外部的高压绕组作用产

生的, 高压绕组基于拉伸应力的大小还会产生一定的形变见图4中黑色曲线, σ 为应力, ϵ 为形变。根据a、b、c、d点可依次分为线性阶段、屈服阶段、塑性硬化阶段和颈缩变形阶段。

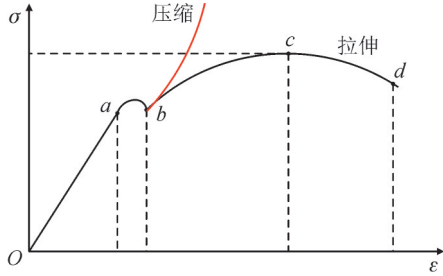


图4 应力应变曲线

Fig. 4 Tensile stress-strain curve

拉伸应力的计算公式为

$$\sigma_{r1} = \frac{F_{r1}l}{2\pi mA_1} \quad (3)$$

式(3)中: σ_{r1} 为高压绕组每根导线上的拉应力; F_{r1} 为高压绕组单位长度的辐向力; l 为高压绕组每匝导线的平均周长; m 为高压绕组每匝导线的并线根数; A_1 为高压绕组导线的截面积。

压缩应力是变压器的低压绕组受到辐向力时产生的应力, 而压缩应力应变曲线和拉伸曲线相比, 前期基本重合, 即a、b均相同。但屈服后压缩曲线会呈现上升趋势, 见图4红色曲线, 这是因为随着电动力的增加, 绕组会被压得很扁, 甚至可能成为饼状, 从而无法求取强度极限。

压缩应力的计算公式为

$$\sigma_{r2} = \frac{F_{r2}l}{2\pi mA_2} \quad (4)$$

式(4)中: σ_{r2} 为低压绕组每根导线上的拉应力; F_{r2} 为低压绕组的单位长度的辐向力; l 为低压绕组每匝导线的平均周长; m 为低压绕组每匝导线的并线根数; A_2 为低压绕组导线的截面积。

在轴向上, 绕组当受到来自轴向力的挤压会产生弯曲应力。这主要是因为垫块的存在, 垫块相当于导线的固定支架, 从而绕组会发生一定的弯曲, 见图5。

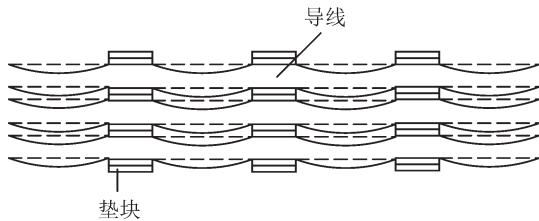


图5 绕组轴向弯曲图

Fig. 5 Winding axial bending diagram

垫块作为导线的固定支架, 求取导线的弯曲应力为

$$\sigma_z = \frac{F_z l^2}{2hb^2} \quad (5)$$

式(5)中: σ_z 为每根导线的弯曲应力; F_z 为绕组单位长度上的轴向力; h 为单根导线的轴向长度; b 为单根导线的辐向长度。

2 变压器抗短路能力研究进展

2.1 变压器电动力研究进展

流经变压器的短路电流产生的电动力一直是变压器在抗短路能力方面的研究重点, 一直受到国内外重点关注。了解变压器受力分布、获取变压器受力变化、计算变压器电动力大小, 成为变压器抗短路电流能力的主要研究点。目前, 电动力的研究可以分为静态力和动态力两种。

2.1.1 变压器静态电动力研究

静态电动力是指绕组在静止计算变压器绕组的某一时刻的短路力, 静态力最早是根据日本学者进行大量实验获取的结论和经验公式为基础进行研究, 不过这种方法需要耗费大量的人力物力, 特别是随着变压器种类的增多, 针对不同变压器研究将会消耗的更多。因此, 该方法也渐渐被淘汰。如今在静态力研究中主要采用电磁场的数值有限元分析, 通过对电磁场进行计算机模拟和数值计算获取变压器的电动力。目前常见的是使用有限元软件建立变压器物理模型, 利用软件仿真对电动力进行数值计算, 分析电动力的分布规律及其影响因素, 寻求减小电动力的措施。

目前应用较广的有限元软件是 ANSYS, 常常用该软件建立2D和3D变压器模型进行仿真计算。华北电力大学^[6]在考虑变化磁场与结构力场的相互影响的关系时, 采用了 ANSYS 软件建立2D模型进行磁场与结构场的直接耦合分析, 通过不同部位不同精细化程度的剖分, 获取更为准确的仿真结果。以先两相短路故障再发展为三相短路故障所出现的短路为例, 仿真计算得到变压器的漏磁场分布、绕组电磁力、位移矢量分布图、应力梯度等结果。解决了磁场和结构力场相互影响下的研究难题, 实现变压器电动力更为准确的分析, 对变压器的故障分析、安全评估等具有一定的指导意义。文[7]针对220 kV的双绕组、三绕组变压器进行工况下静态力分析, 发现双绕组变压器的低压侧三相短路试验可以模拟运行中所有短路情况, 而三绕组的单相短路下中压轴向力比三相短路要大, 在自耦变压器中更为明显。但该学者采用简化绕组形式, 未考虑变压

器垫块、撑条和绝缘纸的存在对受力的影响。文[8]通过3D模型的建立对三绕组变压器的中、高、低绕组的静态力进行了对比分析。对于其他种类变压器电动力学者们也进行了仿真计算,如:换流变压器、配电变压器、换相变压器等。通过有限元软件仿真能较为直观的获取变压器的受力情况,但软件仿真也需要注意模型的精细程度。文[9]便以近似模型和精细模型进行分析,发现不同程度的模型对阻抗有着1%左右的差别,但高压绕组电动力受模型精细程度的影响较大。但该学者只是采用箔式、饼式的模型分析。实际中,绕组还有螺旋式、分段式等多种形式的绕组,该学者并未对这些绕组模型进行分析。

以上乃至其他部分学者是对最大冲击电流时刻的电动力分析,但由于短路电流是随时间变化的,不断衰减至稳态的;完整短路时间的变压器电动力分析对于短路力的短时累计效应的影响有着重要意义。

综上所述,静态电动力便是在静态不变的情况下下来分析计算变压器的轴向力和辐向力的大小及分布,该方法可以简单、方便的计算出绕组受力情况。但通过有限元仿真软件仿真计算时,往往会忽略变压器铁心涡流效应等其他影响,并不能很好的仿真出变压器的实际情况,会存在一定的误差。

2.1.2 变压器动态电动力研究

为了更加贴合实际,考虑到绝缘垫块、撑条、绝缘纸等主要部件在绕组受力时间的作用,日本学者提出了动态力的概念。动态力是指变压器受到随时间变化的电磁力,无论是轴向力还是辐向力都是一个随时间不断衰减的力^[10-11],即经历几个周期后衰减至0,见图6^[12]。

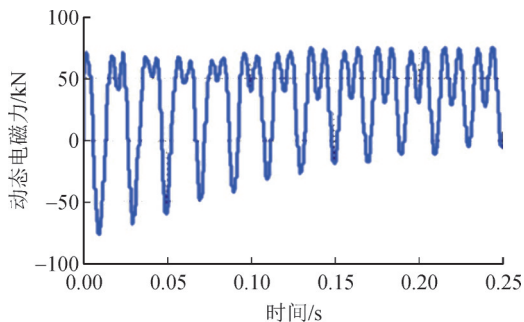


图6 动态电动力图

Fig. 6 Dynamic electric power diagram

在轴向上,日本学者提出的动态力的概念,指绕组与垫块在轴向上构建成一个弹性系统,物体在受力过程中出现弹性振动现象,在这种振动电动力下,线圈和邻近的垫块之间相互传递电动力,与静

态力有着明显的区别,并且这种动态力随着共振现象的出现而显著增加。在该弹性系统中,对线饼进行质量简化,绝缘垫块被定为弹性元件,忽略其质量,见图7。 F 为线饼受到的电动力, K 为垫块的弹性系数。文[13]在原有基础上考虑了绕组夹紧装置,并将其作为一个弹性装置,进行受力分布及位移情况,发现绕组所施加的预应力影响着变压器动态力的大小。但该学者并未推导出任何预测动态力和位移的通用公式,对于预应力的最优化没有进行具体的研究。

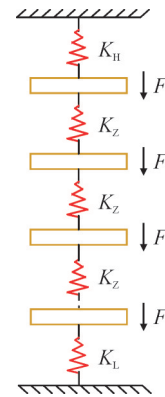


图7 绕组—弹簧等效模型

Fig. 7 Winding-spring equivalent model

实际中变压器承受电动力时,不仅有弹性振动,还会存在部件与部件之间的摩擦力。因此,国内引入了阻尼模型,采用“质量—弹簧—阻尼”模型^[14]分析动态力,该模型计及绕组与垫块之间、线圈与撑条、导线与绝缘纸之间摩擦力的作用,令绕组的受力情况更加接近于实际情况,从而可以转变为非线性问题进行求解。西安交通大学应用非线性振动的动态模型,获取绕组随时间变化的电动力与振动位移,并进一步与静态法计算的轴向力进行对比,同时对预紧力、电流幅值、固有频率的不同进行对比,但并未给出预紧力和固有频率影响动态力的计算原理^[15]。文[16]也基于该模型研究,提出线饼的固有频率在与电动力频率相近或重合会导致共振现象,即线饼动态力会剧增,并给出电动力和固有频率计算原理;文[17]在该模型上进一步对绕组线饼质量差异与绝缘垫块的不同刚度系数分析,获取轴向的短路动态力,但上述两位学者均未提取准确的最优参数。

以上针对轴向动态力的研究方法都是将绕组部件进行一定的理想化为条件相同的模型,实际中绕组的不同线饼间是存在一定的差异的,例如:绕组存在的导线换位、绝缘纸等均未考虑。并且该模型主要是针对线饼式的绕组分析。

除此之外,在辐向上,文[18]建立多跨度弹性支撑模型进行动态力的计算。文[19]为提高运行效率,计算更贴合实际,提出扁拱多跨弹支模型分析随时间不断变化的辐向动态力,即将撑条等效为了弹性支撑,等效模型见图8。针对螺旋绕组文[20]提出两端绞支模型进行力的分析。也有学者提出两端固定的直梁模型和拱形模型。但直梁模型并没有考虑到撑条与导线等部件之间的摩擦作用,绞支模型因转动系数的限制也不得已忽略诸多因素。

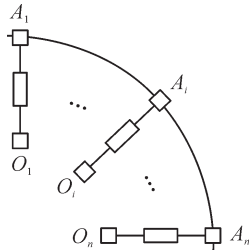


图8 等效模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of equivalent model

综上所述,动态力的研究主要是指变压器受到力的动态变化的分析。进行动态力分析可以准确的分析出变压器绕组电动力随时间的变化情况,同时也考虑了垫块、撑条、绝缘纸等部件及其摩擦力等作用。但目前的模型仅仅是等效模型,实际的垫块、撑条等并非与等效的弹簧模型完全相同,仍会忽略作为一个固体内部存在的力情况。

2.2 变压器机械强度研究进展

变压器的机械强度一直是变压器抗短路能力的重要研究内容之一,研究变压器电动力总会伴随其机械强度的研究,它的强度大小关乎整个电网安全稳定运行。早期是由苏联和日本学者通过实验数据来进行总结出一定的经验公式。尹克宁教授进行总结,从力学角度出发诠释了变压器轴向和辐向变形的原因,并总结出相关的校核公式^[21]。

目前,在研究变压器绕组机械强度的稳定性时,较多的引用了屈服分析理论分析强度问题,屈服分析分为线性屈服分析和非线性屈服分析。线性屈服分析是在了解材料的屈服模式下,通过进行与模型约束相适应的假象位移所作得虚功求取极限载荷量,从而判断其稳定性。而非线性屈服分析主要是进行收敛性分析,通过弧长法进行多次迭代获取最终结果。在变压器机械强度的分析中采用非线性屈服分析较为准确,但计算过程中多方面因素的加入让收敛会变的极为困难。文[19]以500 kVA的三相配电变压器为例通过非线性屈服分析进行稳定性的研究,在低压侧采用多跨弹支模型,以弹簧单元模拟撑条,获取非线性屈服分析的最大变形

量,并与ANSYS仿真软件进行结果校验,证明了非线性屈服的可行性,但其只是单纯的强度证明分析,并未进行更加深入的影响因素的研究分析。文[22]为了分析绕组偏心、导线绕制的紧密程度的影响,在进行非线性屈服分析基础上,提出用非线性屈服分析的弹性系数替代模拟绕组偏心、导线绕制的紧密程度对应力大小的影响情况。不过该学者虽说作了影响因素的分析,但并未对导线的紧密程度和绕组偏心程度进行联合分析,并且通过弹性系数模拟并不能准确的替代。

电力系统中重合闸的应用让多次短路情况成为了可能,因此,部分学者开始着重于多次短路下绕组的强度问题。文[23]进行动态分析绕组形变时发现绕组在第一个周期内相对稳定,但其在0.02 s内衰减40%左右,见图9^[10],提出倘若下一次短路快速到来,在第二波乃至后面的周期会存在一个积累效应,绕组的损坏情况会变得明显,但学者并未对该假设进行研究分析。

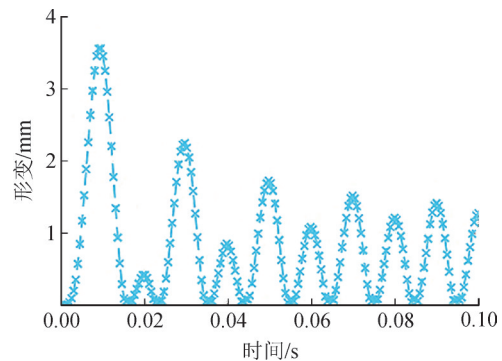


图9 动态形变曲线

Fig. 9 Dynamic deformation curve

在变压器遭受短路冲击的累计过程中,绕组由起初弹性形变的线性关系,会随着后续加载力的增加,最后应力超过屈服强度,发生形变。这种累计形变是残余形变的积累,并非是一种简单叠加,由于多次短路,绕组会进入硬化阶段,累计形变的增长率也会下降,趋势与塑性应变相近^[24]。在多次短路下的累计叠加下,应力将以逐渐偏离线性的规律增长,并且轴向力在一定程度上还增加了绕组辐向塑性形变的速度。文[18]以250 MVA/500 kV电力变压器为研究对象,通过引入屈服分析法分析,发现在累积效应下的变压器安全系数随着冲击次数的增加急剧减小,特别是出现残余形变后,安全系数下降的更快;并且冲击载荷的影响会越来越小。但遭受多次短路的变压器的累计形变随电流大小和结构存在一定的差异,因此,需要进一步的研究。

2.3 多物理场的研究现状

变压器的抗短路能力研究需要结合物理学、数学、材料学、热学等多个学科的知识和方法,需要跨学科的合作和交流,涉及多个物理场的相互作用。以往电动力冲击的时间很短,温度变化冲击时间较长,因此,常常忽略温度对材料特性的影响。文中的电动力和机械强度两方面也可以说是电磁场和结构力场两方面。

目前对于变压器抗短路的多物理场研究较为简单的是采用间接耦合数值分析,即通过计算机模拟和数值计算先进行电磁场计算电动力,将力带入结构力场计算应力、形变等结果,而结构力场的形变不会影响电动力的分布和大小。文[10]为分析变压器形变过程中的动态变化情况,通过电磁—结构间接耦合的方式将短路全过程的电磁力导入到瞬态结构,获取变压器在短路电流下的漏磁通、电动力、形变等,并通过漏磁场的测量试验间接证明分析过程的准确性。文[25]为通过振动信号检测变压器的运行状态,利用多物理场耦合研究变压器铁心和绕组的振动特性,获取绕组和铁心振荡加速度分量,并通过变压器的空载和负载试验平台进行试验验证,相对误差约为3%和6.38%,证明了场耦合的准确性。文[8]为研究三绕组的短路情况采用场路耦合来计算短路电流,并将其与解析法进行对比,误差在10%以内,验证了场路耦合的可行性。

近年来,随着直接耦合技术的发展和应用,变压器抗短路研究也逐渐转向多物理场的直接耦合研究。多物理场的直接耦合研究是将电磁场、热场、结构力场等多个物理场的相互作用考虑在内,即温度对材料属性的影响、绕组振动对电动力的影响等。这样的研究方法更贴近实际工程应用,有助于全面评估变压器在短路条件下的响应和性能。文[26]针对绕组的强烈振动引起的线圈变化现象,采用镜像法求解电动力,建立了电磁场和结构力场的绕组振动模型,分析了绕组受力和振动的直接耦合作用下的位移情况,并进行了耦合前后的位移对比,表明在强烈的振动下,线饼的振动幅值不具有规律性、振动频率具有分散性。该学者提出了电磁场和结构力场的直接耦合分析,用MATLAB的刚性求解器ode23t计算变压器绕组受力的振动位移,并将每一次的振动位移带入静态电动力的数值计算,通过多次的迭代计算出接近实际的绕组振动位移情况。

文[27]忽略绕组的导线换位等内部绕制情况和夹件、油箱、等结构件,通过Workbench搭建了瞬态

结构力场以及Maxwell电磁场和瞬态温度场的直接耦合场,仿真分析不同接地故障下的磁通分布、温度分布、形变大小。该学者在这一多物理场仿真中引入温度场和电磁场的直接耦合,即以绕组损耗为热源计算温度,再以温度改变电阻率造成的损耗变化进而来达到温度场和电磁场的互相影响来实现变压器电磁场和温度场的直接耦合,通过不断的迭代计算出变压器各部位的温度分布,见图10。

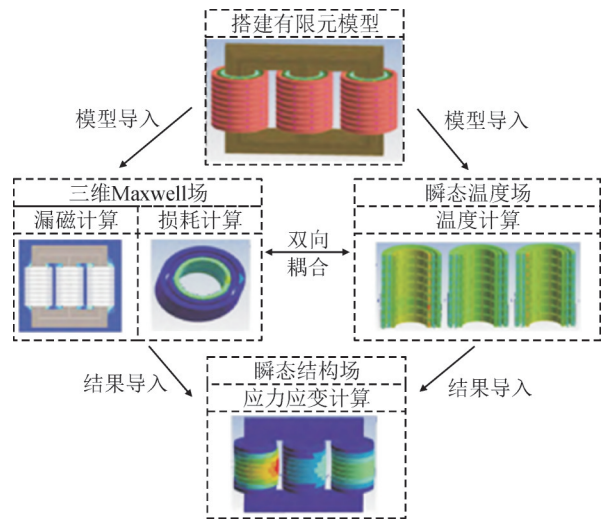


图10 变压器多场耦合流程图

Fig. 10 Transformer multi field coupling flowchart

3 变压器抗短路电流能力影响因素分析

3.1 漏磁通

漏磁通主要是指负载电流流经绕组产生的磁通,仅与一侧的绕组交链并和空气或油形成闭合回路,见图11。漏磁通作为电动力的决定因素可以改变电动力的大小甚至分布,漏磁通根据方向分为轴向漏磁通和辐向漏磁通。

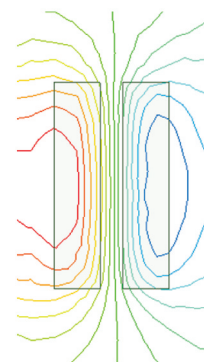


图11 漏磁通分布图

Fig. 11 Leakage flux distribution diagram

在变压器中,漏磁通的变化主要是由安匝不平衡现象引起的,在其绕组端部出现漏磁场的畸变,在原本的轴向漏磁通,产生如图12所示的额外的辐

向量分量 B_z' 。 B_z' 会产生 F_z' 令绕组进一步错位, 加剧了绕组的不对等问题, 轴向力会呈线性增长^[28]。 文[29]便基于安匝不平衡现象的影响验证了电动力的改变, 即在变压器绕组端部的力发生一定的跃迁, 导致最大力出现在调压绕组端部, 也导致端部机械强度与电动力平衡被打破而出现绕组断裂等, 验证了这一现象, 但并未指出较好的解决措施。

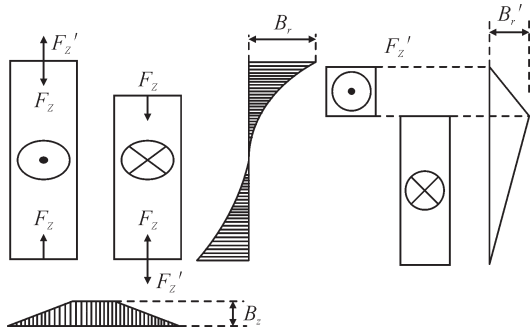


图 12 安匝不平衡漏磁分布

Fig. 12 Magnetic flux leakage distribution when ampere-turn is unbalanced

3.2 短路电流幅值

流经变压器的短路电流是电动力决定因素之一, 由于电流与漏磁通成正比关系, 电流幅值的平方与电动力成正比关系^[30]。 根据电路理论求解, 短路电流随时间变化的曲线见图 13, 其中短路电流峰值可以表示为

$$i_{\max} = \sqrt{2} I_k (e^{-\frac{R_k \pi}{L_k \omega}} - \cos \pi) = K \sqrt{2} I_k \quad (6)$$

式(6)中, K 为短路冲击系数, 取决于 R_k/L_k 。

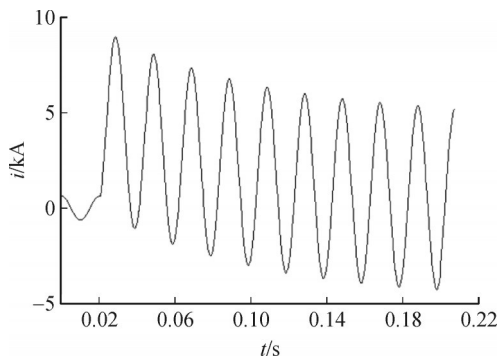


图 13 短路电流变化曲线

Fig. 13 Short-circuit current change curve

电力系统的短路分为单相短路、两相短路、三相短路等, 不同短路状况出现的短路电动力的大小幅值均不同。 以单相短路和三相短路为例, 两者的电流幅值中三相短路幅值较大, 因此出现的最大电动力较大。 文[31]则是对单相接地、两相接地、三相短路三者进行比较, 得到三相短路电动力最大, 受力后出现的位移最大, 并且由于匝数的原因, 低压侧的短路相比于中压侧的短路要更为严重。 正因

为三相短路最为严重, 为了保证一定的短路裕度, 在变压器设计和校核时, 通常使用三相短路分析。

3.3 温度

在变压器流经短路电流时, 不仅会产生巨大的电动力, 还会产生一定的热损耗, 产生一定的温度上升。 温度变化不仅会加剧变压器的绝缘老化, 也会对材料的力学属性产生影响, 降低变压器的机械强度。 特别是在短路情况下, 绕组近似于绝热环境, 热量全部用于绕组的温升, 因此分析温度变化也是十分有必要的。 根据文[32]和 Johnson-Cook 本构模型可以获取不同温度下的屈服强度与抗拉强度, 见图 14。

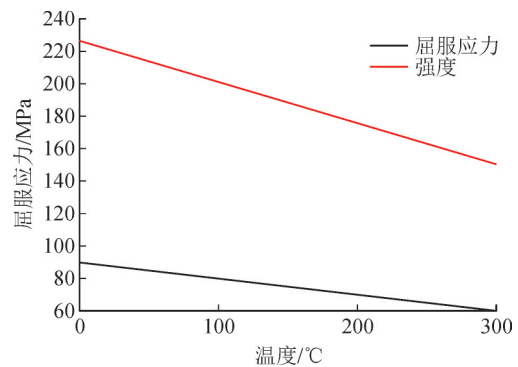


图 14 强度—温度变化曲线

Fig. 14 Strength-temperature curve

变压器正常运行时, 温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但变压器短路时温度可能达到 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 由图 14 可以看出, 随着温度升高, 屈服应力与抗拉强度有明显下降。 其中, 强度从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低了 40% 左右, 屈服应力降低了 30% 左右, 铜的机械强度在短路下出现了明显的降低。 虽说电动力没有变化, 但是屈服应力的降低, 让同一电动力下变压器绕组等部件更容易出现变形甚至直接断裂、崩坏^[31]。 计及累计效应, 绕组将会出现更为严重的变形, 造成变压器故障。 为安全起见, 变压器的温度不能过高。

3.4 变压器绕组结构

变压器受力的研究对象主要就是变压器绕组。 但由于绕组形状有圆形、椭圆形、矩形绕组等, 其出现的机械应力也会有较大的不同。 其中圆形绕组具有较好的机械特性, 受力较为均匀, 且受力下不易发生变形^[33]。 在其他主要技术参数相同情况下, 对椭圆形绕组进行电动力分析, 发现椭圆形绕组相对于圆形绕组出现的电动力较大, 并且由于形状的原因, 绕组应力应变分布十分不均匀, 特别是长轴方向上最为明显^[34]。 椭圆形绕组长轴的轴向电动力约为短轴的 3 倍、圆形的 10 倍, 长轴的辐向力

约为短轴 1.5 倍、圆形的 2.5 倍。对矩形绕组进行受力分析,发现一般矩形绕组的长边和短边应力分布也不同,与椭圆形绕组近似,但当绕组为箔绕的矩形绕组的短边受到的电动力相对于长边较大,而且矩形绕组最大应力处出现在矩形的 4 个边角。因此,为保证绕组机械强度的稳定应选择圆形绕组最为适宜。同时绕组在结构上还分为连续式、螺旋式、箔式、纠结式等。这些绕组的应力分布情况基本相同,但在研究螺旋绕组时,除了拥有辐向力的同时,由于其形状还拥有切向力的作用,将其与辐向力组成辐向合力去研究分析,发现螺旋绕组的螺旋升角越大,切向合力在辐向应力中的影响越大^[35]。

3.5 自粘换位导线

根据 GB/T 1094.5—2008《电力变压器 第 5 部分:承受短路的能力》,在计算变压器应力时,需要我们考虑自粘换位导线的应用。自粘换位导线在一定程度上可以提升变压器导线的抗弯曲能力,其提升效果一般用固化系数表示。

自粘导线的固化系数主要取决于温度、导线芯数、导线尺寸等因素。文[36]通过三点弯曲试验法,发现固化系数随温度升高而单调下降,并且下降速率逐渐增大,在 120 °C 降低约 93%,确定不同温度下的固化系数:20 °C 应大于等于 12,105 °C 应大于等于 7,120 °C 应大于等于 4。文[37]等人通过自粘导线的实测,发现电磁线整体抗弯强度受温度的影响较大,普通自粘换位导线在 95~125 °C 间的整体抗弯强度随温度的升高下降显著,在 125 °C 后其粘结性能显著降低。对绕组辐向的弯曲应力研究提供了参考。文[38]也确认了温度、导线芯数对轴向和辐向固化系数的主要影响因素,并进一步提出辐向和轴向固化系数的实验方法,给出固化系数在不同因素下的修正结果。文[39]对普通自粘导线和耐高温自粘导线对固化特性进行研究分析,发现导线在进行干燥处理需要保证足够的时间保证自粘树脂的完全固化和足够的轴向压紧力保证导线的整形。

综上,当前自粘导线换位对变压器抗短路能力的研究主要是通过对固化系数的计算来表示抗弯曲能力,但固化系数的取值存在一定的争议,特别是辐向固化系数还需大量的实验进行验证。

3.6 固有频率

在变压器的结构设计中,固有频率是十分重要的参数,事关绕组的轴向动态力的大小,进行动态力分析时,若固有频率与绕组的振动频率相同,则会产生共振现象,造成绕组失稳、破坏。忽略系统

的阻尼,对应的无阻尼特征频率方程为

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})\mathbf{X} = 0 \quad (7)$$

式(7)中: ω 为绕组轴向固有角频率; \mathbf{K} 为系统的刚度矩阵; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{X} 为振型向量。

由于绝缘纸存在非线性力学特性,绕组的固有频率在一定程度上取决于压紧力的大小,会随其减小而降低。当固有频率接近短路电流频率时,在动态力下,低压绕组的轴向应力会增加 20% 左右,高压绕组则会增加到 40% 左右^[15]。

4 变压器抗短路电流能力研究的展望

4.1 计及集肤效应的影响

当交流电流通过导体时,导体中的电流不会均匀地分布在整个截面中,而是会集中于导体表面进行传输,这种现象称为集肤效应。因此,在变压器绕组导体短路时,流经绕组导体的交流短路电流也会在导体表面深度为 h 产生集肤现象,从而造成变压器绕组导体的受力主要集中在表面区域。集肤深度 h 公式为

$$h = \sqrt{2l/(\pi f \mu \sigma)} \quad (8)$$

式(8)中: h 为集肤深度; f 为频率; μ 为磁导率; σ 为电导率。

由于集肤效应的存在,导体材料中心的电流很少,甚至没有,材料得不到充分利用。考虑采用空芯导体的绕组,一方面可以减小材料的投资,另一方面可以用于绕组正常运行时的散热。但是空芯导体的采用会降低绕组的结构强度,需要进行分析确保导体能耐受住短路力。

4.2 超导材料的应用

变压器抗短路电流能力在一定程度上取决于材料的性能。良好的材料可以保证变压器免遭电动力的损坏。可将 2G 高温超导胶带材料制作的超导变压器,即变压器绕组在短路时自动改变变压器的阻抗以限制短路电流的大小,进而减小短路电动力,保障变压器的免遭损坏。将超导绕组视为一个阻抗线圈,在正常工作条件下,变压器处在超导状态,其阻抗值很小,约等于普通变压器的阻抗。当电力系统出现短路电流时,超导材料在强大的短路电流下引起淬火导致阻抗值增加到几百倍,进而减小短路电流的大小。但超导变压器在 77 K 温度下不仅阻抗高,而且损耗更少。

2G 超导材料在一定方面能够减小短路电流,保障变压器的安全稳定运行,但其超导材料的阻抗变换所要求的环境较为苛刻,77 K 温度对其已经算是

高温环境。由于其热容量较低,绕组在短时间内很有可能达到危险水平。

4.3 新兴技术的应用

随着信息化和数据化的发展,数字孪生(digital twin, DT)、人工智能(artificial intelligence, AI)、大数据等新兴技术也逐渐进入电力行业。例如:DT技术在变压器在线监测^[40]和温度仿真^[41]的应用, AI在电力系统控制、管理、决策等领域的智能化应用^[42],大数据技术在新型电力系统潮流分析^[43]。随着技术进一步发展,DT、AI等新兴技术在变压器抗短路能力、保证变压器的安全稳定运行方面应用也不无可能。

4.3.1 DT技术

实际中变压器模型是十分复杂的,在进行变压器的数值仿真上往往基于模型的简化假设,与实际变压器不同,而且以往的有限元模型自由度高、需要对空间进行离散,所需内存大、计算时间长、计算量大、对计算机要求高。采用DT技术可以做到更新周期短、模型准确度高、数据结果精确度高,并且现在的建模技术和数据交互技术也已成熟,可以实现变压器设备3D模型及其内部的精确呈现,对变压器绕组变形情况进行精确展示。

4.3.2 AI技术

随着社会用电需求的猛增和电力系统规模的扩大,保证变压器的安全稳定运行也越来越重要。以往变压器因抗短路能力不足的故障是变压器故障的重要原因。将AI技术与变压器相结合,实现变压器的智能化管理和控制。利用变压器数据和计算机的深度学习,根据变压器的历史故障数据和维修数据,不仅可以快速预测或发现变压器绕组变形,还可以及时进行停电检修。这样不仅有效的节约检修时间还可以减少变压器故障的发生频率。并且通过AI技术的深度学习和强化学习等技术实现对变压器的抗短路情况的数据处理、技术仿真,对其形变、应力等情况进一步分析,自主完成变压器的结构材料优化设计。

4.3.3 大数据技术

变压器故障大部分是由于外部电路引起变压器绕组损坏,将因抗短路能力不足而损坏的变压器数据进行采集,再利用大数据技术对变压器抗短路能力数据进行集中管理,通过大数据技术,以实现对变压器进行深入研究和统计分析,可以为抗短路校核提供准确、可靠的依据。在进行变压器场耦合数值分析,通过大数据技术分析众多变压器故障数

据验证数值理论分析的准确性。

5 结论

变压器是电力系统中进行功率传输的重要设备,在今后仍然会是电网中不可或缺的主要设备。由于变压器抗短路能力不足很容易引起变压器故障,导致电力系统的不稳定,其的抗短路能力一直是电力行业的研究热点。结合以上内容总结出在变压器抗短路电流能力研究如下:

1)对于变压器绕组的电动力,目前研究主要是以静态力和动态力研究为主,通过ANSYS软件的仿真分析和等效模型分析在各部位的电动力大小进行了大量的研究工作。但短路电流是在一定时间一直存在的,对于多个时间的叠加的动态力值得进一步研究。

2)对于变压器机械强度的研究主要是绕组的应力、形变情况,对于累积效应、弹性形变、残余变形都进行了一定的分析。对于在考虑动态力下,绕组产生的振动情况仍存在继续研究的空间和必要。

参考文献:

- [1] 律方成,汪鑫宇,王平,等.基于振动偏离及加权熵的多次短路冲击下变压器绕组机械形变辨识[J]. 电工技术学报,2023,38(11):3022-3032.
LYU Fangcheng, WANG Xinyu, WANG Ping, et al. Mechanical deformation identification of transformer winding under multiple short-circuit impacts based on vibration deviation and weighted entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11):3022-3032.
- [2] 电力变压器 第5部分:承受短路的能力:GB/T 1094.5—2008[S].2009.
Power transformer-part 5: Ability to withstand short circuit: GB/T 1094.5—2008[S].2009.
- [3] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等.基于储能型APF的微电网电能质量综合治理[J]. 高压电器,2022,58(8):238-244.
YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on APF with energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 238-244.
- [4] 李新海,曾新雄,刘建辉,等.基于零损耗深度限流技术提升变压器抗短路能力研究[J]. 高压电器,2017,53(10):111-116.
LI Xinhai, ZENG Jianxiong, LIU Jianhui, et al. Study on anti-short-circuit ability of transformer based on the zero loss deep current limiting technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10):111-116.
- [5] 邹德旭,郑易谷,钱国超,等.变压器短路时轴向力分布特性与测试分析研究[J]. 变压器,2020,57(10):24-28.
ZOU Dexu, ZHENG Yigu, QIAN Guochao, et al. Axial force distribution characteristics and test analysis of transformer under

- short-circuit condition[J]. *Transformer*, 2020, 57(10):24-28.
- [6] 王雪, 吴涛. 基于磁-结构直接耦合动态分析变压器绕组变形的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(16):24-30.
WANG Xue, WU Tao. Dynamic deformation analysis of transformer windings based on magnetics-structure direct coupled-field[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(16):24-30.
- [7] 易梅生, 欧强, 施广宇, 等. 变压器标准短路试验与运行短路故障的关系研究[J]. *变压器*, 2021, 58(6):13-16.
YI Meisheng, OU Qiang, SHI Guangyu, et al. Research on relationship between standard short-circuit test and operation short-circuit fault of transformer[J]. *Transformer*, 2021, 58(6):13-16.
- [8] 冉德东, 孟天男, 王雄博, 等. 三绕组电力变压器单相接地短路电流及绕组强度计算[J]. *变压器*, 2022, 59(4):48-53.
RAN Dedong, MENG Tiannan, WANG Xiongbo, et al. Calculation of single-phase grounding short-circuit current and winding strength of three-winding power transformer[J]. *Transformer*, 2022, 59(4):48-53.
- [9] 毛凤春, 彭庆军, 邹德旭, 等. 基于有限元方法的变压器几何模型精细度对短路冲击计算的影响研究[J]. *变压器*, 2018, 55(6):11-16.
MAO Fengchun, PENG Qingjun, ZOU Dexu, et al. Research on the influence of transformer geometric model precision on short-circuit impulse calculation based on FEM[J]. *Transformer*, 2018, 55(6):11-16.
- [10] 王熙文, 井永腾, 张永超, 等. 变压器近区短路绕组形变动态过程计算与分析[J]. *变压器*, 2021, 58(12):1-6.
WANG Xiwen, JING Yongteng, ZHANG Yongchao, et al. Analysis of dynamic process of transformer short-circuit deformation in near area[J]. *Transformer*, 2021, 58(12):1-6.
- [11] 李金忠, 张书琦, 程涣超, 等. 特高压换流变压器绕组动稳定能力分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(8):3237-3247.
LI Jinzhong, ZHANG Shuqi, CHENG Huanchao, et al. Dynamic stability analysis of UHV converter transformer winding[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(8):3237-3247.
- [12] 吴涛. 电力变压器绕组短路动态稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
WU Tao. Research on short-circuit dynamic stability of power transformer windings[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [13] PATEL M R. Dynamic response of power transformers under axial short circuit forces part I - winding and clamp as individual components[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1973, PAS-92(5):1558-1566.
- [14] 王洪方, 王乃庆, 李同生. 短路条件下电力变压器绕组轴向振动等效单自由度分析[J]. *电工技术学报*, 2000, 15(5):39-41.
WANG Hongfang, WANG Naiqing, LI Tongsheng. Axial vibration equivalent one-degree analysis of power transformer winding under short-circuit[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2000, 15(5):39-41.
- [15] 张凡, 马程, 李秀广, 等. 计及振动响应的变压器绕组轴向机械强度动态评估方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(16):6494-6504.
ZHANG Fan, MA Cheng, LI Xiuguang, et al. Dynamic assessment of windings' axial mechanical strength in power transformers considering the vibration response[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(16):6494-6504.
- [16] 王录亮, 刘文里, 于会凤. 电力变压器绕组轴向短路动态力的计算[J]. *变压器*, 2013, 50(1):14-17.
WANG Luliang, LIU Wenli, YU Huifeng. Calculation of winding axial short-circuit dynamic force of power transformer[J]. *Transformer*, 2013, 50(1):14-17.
- [17] 李唐兵, 童涛, 席儒, 等. 直流偏磁下的电力变压器振动特性研究[J]. *变压器*, 2023, 60(3):52-58.
LI Tangbing, TONG Tao, XI Ru, et al. Research on vibration characteristics of transformer under DC bias[J]. *Transformer*, 2023, 60(3):52-58.
- [18] 张博, 李岩. 多次冲击条件下的大型变压器绕组辐向失稳[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(s2):71-76.
ZHANG Bo, LI Yan. Radial stability of large transformer windings under multiple inrush conditions[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(s2):71-76.
- [19] 兰生, 胡忠平, 廖福旺, 等. 短路电力对变压器低压绕组辐向稳定性的研究[J]. *电机与控制学报*, 2018, 22(5):19-24.
LAN Sheng, HU Zhongping, LIAO Fuwang, et al. Radial stability of transformer low voltage windings under sudden short-circuit[J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(5):19-24.
- [20] LIANG Zhenguang, TANG Renyuan, WANG Chuncheng, et al. Stability of transformer's whole low voltage winding[C]//Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003. China: IEEE, 2003:302-304.
- [21] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003:268-272.
YIN Kening. Design principle of transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003:268-272.
- [22] 李祎春, 宋晓光, 李军. 变压器绕组初始缺陷对辐向稳定性的影响[J]. *变压器*, 2021, 58(11):21-23.
LI Yichun, SONG Xiaoguang, LI Jun. Influence of initial transformer winding defect on radial stability[J]. *Transformer*, 2021, 58(11):21-23.
- [23] 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. Analyzing the short-circuit withstanding ability of large power transformer based the FEM method[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(10):3214-3220.
- [24] 邹德旭, 钱国超, 井永腾, 等. 多次短路工况下变压器内绕组径向强度计算[J]. *电器工业*, 2021(6):69-73.
ZHOU Dexu, QIAN Guochao, JING Yongteng, et al. Calculation of radial strength of transformer inner winding under multiple short-circuit conditions[J]. *Electrical Industry*, 2021(6):69-73.
- [25] 张煦, 曹辰, 路敦林, 等. 基于电-磁-结构多信息耦合的变压器振动特性仿真与试验[J]. *变压器*, 2023, 60(7):51-58.
ZHANG Xu, CAO Chen, LU Dunlin, et al. Simulation and testing of transformer vibration characteristics coupling of multiple information based on electromagnetic structure[J]. *Transformer*, 2023, 60(7):51-58.

- [26] 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.
- [27] 王胜辉, 许育帅, 孙凯旋, 等. 多物理场耦合下不同短路与接地故障对变压器绕组状态影响的仿真研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(6):2397-2407.
WANG Shenghui, XU Yushuai, SUN Kaixuan, et al. Simulation study on the influence of different short circuit and ground fault on transformer winding state under the coupling of multiple physical fields[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2397-2407.
- [28] 王建民, 张喜乐, 翟元, 等. 大型变压器绕组漏磁场及电动力学性能的仿真分析[J]. 电气制造, 2012(5):60-64.
WANG Jianmin, ZHANG Xile, ZHAI Yuan, et al. Simulation analysis on magnetic leakage field and short circuit mechanical properties of large transformer windings[J]. Electrical Manufacturing, 2012(5):60-64.
- [29] 荣佳星, 刘文里, 牛一博, 等. 变压器计及局部安匝不平衡时的轴向动态响应[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(5):52-57.
RONG Jiaying, LIU Wenli, NIU Yibo, et al. Axial dynamic response analysis of transformer with local unbalance dampere turns[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(5):52-57.
- [30] LUO Xiao, XIAO Qianbo, WANG Qian, et al. Research on short-circuit force of transformer winding with single-phase short-circuit and three phase short-circuit[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 22(3):5500804.
- [31] 黎大健, 陈梁远, 潘绍明, 等. 一起220 kV变压器中压绕组短路冲击损坏事故分析[J]. 变压器, 2021, 58(12):64-67.
LI Dajian, CHEN Liangyuan, PAN Shaoming, et al. Analysis of 220 kV transformer MV winding short circuit fault[J]. Transformer, 2021, 58(12):64-67.
- [32] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 中国材料工程大典—第4卷, 上一有色金属材料工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
HUANG Baiyun, LI Chengong, SHI Likai, et al. China materials engineering canon - volume 4, part 1 - nonferrous metal materials engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [33] 赵治刚. 电力变压器绕组变形与短路强度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
ZHAO Zhigang. Research on winding deformation and short circuit strength of power transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [34] 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 Lei, XIAN Richang, RONG Qingyu, et al. Effect analysis of winding structure on short-circuit force of distribution transformer[J]. Transformer, 2020, 57(4):28-32.
- [35] 李祎春, 刘文里, 李军, 等. 电力变压器螺旋式绕组辐向短路合力的计算与分析[J]. 黑龙江电力, 2016, 38(2):135-140.
LI Yichun, LIU Wenli, LI Jun, et al. Calculation and analysis of radial short-circuit resultant force of helical winding in power transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2016, 38(2):135-140.
- [36] 徐志军. 自粘换位导线整体抗弯曲试验方法研究[J]. 变压器, 2013, 50(12):55-57.
XU Zhijun. Research on test method of radial bending test of self-bonding continuously transposed conductors[J]. Transformer, 2013, 50(12):55-57.
- [37] 熊汉武, 张书琦, 赵志刚, 等. 电力变压器绕组幅向弯曲应力分析方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(3):931-938.
XIONG Hanwu, ZHANG Shuqi, ZHAO Zhigang, et al. Analysis method of radial bending stress of power transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3):931-938.
- [38] 汪佐宪, 张书琦, 徐征宇, 等. 多因素条件下变压器自粘换位导线抗弯能力试验及评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(9):3660-3669.
WANG Zuoxian, ZHANG Shuqi, XU Zhengyu, et al. Research and evaluation of bending resistance of epoxy continuously transposed conductors in transformers under multi-factor conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9):3660-3669.
- [39] 胡鹏飞, 谢辉, 聂伟, 等. 自粘导线的固化特性在变压器绕组生产中的应用[J]. 变压器, 2022, 59(7):16-18.
HU Pengfei, XIE Hui, NIE Wei, et al. Application of curing characteristics of self-adhesive wires in production of transformer windings[J]. Transformer, 2022, 59(7):16-18.
- [40] 荆澜涛, 董雪情, 杨超, 等. 面向数字孪生应用的变压器温度场有限元降阶建模方法研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(6):2408-2419.
JING Lantao, DONG Xueqing, YANG Chao, et al. Research on finite element reduced order modeling method of transformer temperature field for digital twin application[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2408-2419.
- [41] 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):4982-4992.
DENG Xiangli, ZHU Hui, LIU Shiming, et al. Research on digital twin modeling technology suitable for transformer protection[J]. Power System Technology, 2022, 46(12):4982-4992.
- [42] 王小君, 窦嘉铭, 刘墨, 等. 可解释人工智能在电力系统中的应用综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4):169-191.
WANG Xiaojun, DOU Jiaming, LIU Zhao, et al. Review and prospect of explainable artificial intelligence and its application in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4):169-191.
- [43] 龙云, 卢有飞, 赵宏伟, 等. 基于数据驱动的新型电力系统潮流分析方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(9):22-30.
LONG Yun, LU Youfei, ZHAO Hongwei, et al. New power system power flow analysis method based on data-driven[J]. Smart Power, 2023, 51(9):22-30.
- 李克举(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为变压器抗短路电流能力(通信作者)(E-mail: lkj515253@126.com)。
淡淑恒(1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新型电气设备研制。