第 49 卷 第 6 期：2397-2408 高电压技术 Vol.49, No.6: 2397-2408
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221835

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

王胜辉，许育帅，孙凯旋，谢　庆，律方成
（华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206）

摘　要：为研究不同短路与接地故障对变压器多次冲击后绕组状态的影响，基于变压器电、磁、热、力物理场理论，搭建了三相变压器的三维模型，考虑了温度对绕组材料属性的影响，采用迭代方法对电磁−热场进行了双向耦合仿真，然后将各故障类型下的电、磁和温度等物理量导入瞬态结构场，实现了绕组形变位移的仿真计算。结果表明，变压器内部的最大漏磁密对应故障为低压侧三相短路；绕组中部线饼服从整体磁密分布，其余部分线饼呈现一端大，另一端小的分布规律；绕组最高温度对应故障为低压侧三相短路，最高温度为 97.36 ℃，位于 A 相低压绕组 0°处；单次冲击下，位移最大对应故障为低压侧三相短路，其出现在高压绕组−20°~20°范围、高度 1/3~2/3 范围内；多次冲击后，绕组最大累积位移对应故障为低压侧两相接地，累积位移随冲击次数的增加而增加，直至趋于饱和。研究为变压器的多物理场耦合数值仿真提供参考。

关键词：三相三绕组变压器；多物理场耦合；有限元法；累积效应；仿真分析

Simulation Study on the Influence of Different Short Circuit and Ground Fault on Transformer Winding State Under the Coupling of Multiple Physical Fields

WANG Shenghui, XU Yushuai, SUN Kaixuan, XIE Qing, LÜ Fangcheng
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A three-dimensional simulation model of three-phase transformer is built based on the theory of electrical, magnetic, thermal and mechanical fields to study the influences of different short circuit and grounding faults on the winding state of transformer after multiple shocks. By considering the influence of temperature on the winding material properties, a bidirectional couple simulation of electromagnetic and thermal field is established. The electrical, magnetic, thermal and other physical quantities under each fault type are introduced into the transient structure field, and the winding deformation is calculated. The results show that when the three-phase short circuit on low-voltage side occurs, the flux leakage density inside the transformer reaches the maximum. The disc in the middle of the winding obeys the overall magnetic density distribution, and the rest of the disc is large at one side, while it is small at the other end. Furthermore, when the three-phase short circuit on low-voltage side occurs, the winding temperature reaches up to the highest, and the highest temperature is 97.36 ℃, which is located at 0° of phase A low-voltage winding. Moreover, when a single three-phase short circuit shock occurs at the low-voltage side, the displacement reaches the maximum, which occurs in the range of −20° to 20° and 1/3 to 2/3 height of the high-voltage winding. The maximum cumulative displacement of the winding reaches the maximum after multiple two-phase grounding shocks at the low-voltage side, and the cumulative displacement increases with the increase of the number of shocks until it tends to saturation. The research provides a reference for the multiple physical field coupling numerical simulation of transformer.

Key words: three-phase three-winding transformer; multiple physical field coupling; finite element method; cumulative effect; simulation analysis

基金资助项目：国家重点研发计划(2018YFF01011903)；河北省重点研发计划项目(19212109D)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2018YFF01011903), Key R&D Project of Hebei Province(19212109D).

0 引言

电力变压器是电网中昂贵且重要的枢纽设备之一，当运行线路发生短路故障时，流经变压器绕组的短路电流产生的热量和电动力是正常工况下的近百倍[1]。在该短路电动力的冲击下，变压器绕组将发生变形，可导致绕组匝间绝缘及结构件损坏，严重影响了变压器稳定运行及电网可靠供电。由于短路与接地的故障类型和变压器遭冲击的次数具有多样性，这将影响变压器绕组在受短路冲击时磁密、温度及位移的分布。因此基于电−磁−热−力多物理场耦合与累积效应，研究不同短路与接地故障下，变压器绕组各特征量的分布对进一步研究变压器绕组状态具有重大意义。

目前，国内外学者针对变压器在短路冲击下绕组磁、力和热分布的研究有了较大进展。Feyzi M R 等搭建了一台 10 MVA 变压器的二维有限元模型，在计算中考虑了铁芯非线性和几何边界的复杂性等因素，获得了变压器绕组各部位短路电磁力分布趋势和轴向电磁力的仿真结果[2]。Jaward Faiz 等通过有限元分析方法，考虑绕组相电流不对称情况，对简化后的三维变压器模型进行仿真计算，得出短路和空载合闸情况下的绕组电磁力分布特性[3-4]。重庆大学刘渝根等通过有限元仿真软件对各类型变压器在短路工况下进行了仿真并得出绕组轴向和辐向电磁力分布规律[5-7]。文献[8-11]考虑铁芯磁致伸缩及洛伦兹力的作用，仿真得到变压器铁芯磁密、应力及振动位移分布特性。文献[12-14]采用能量守恒原理分析变压器热特性，建立了变压器温度场与流场的数学模型和三维物理模型，应用流−固−热多物理场耦合对变压器的温升特性等进行仿真计算。文献[15-16]基于有限元数值分析法建立了三相干式变压器的二维模型，通过 ANSYS 有限元仿真软件对变压器进行了流体−温度场仿真分析。Patel B 等研究了多次短路时绕组累积形变，考虑了变压器运行期间的产热效应对绕组短路强度的影响[17]。西安交通大学姚绍勇等采用二维有限元法对一台 220 kV 油浸式电力变压器进行了仿真分析，得出变压器绕组在短路电流作用下会产生不可逆变形的结论，且随着冲击次数的增加，变压器绕组变形先逐渐增大后趋于稳定[18]。基于上述研究现状可知，目前针对变压器在电磁热、流固热和电磁力多物理场耦合下绕组磁密、温度及位移的研究已较为深入[19-23]，但在电磁热力多物理场耦合下，对各故障类型及累积冲击下绕组的磁密、温度及位移影响的研究较少。

本文以 SFS10−50000/110 变压器为研究对象，建立其三维仿真模型，并在 MATLAB/simulink 软件中搭建了变压器电路模型获得了各短路与接地故障类型下变压器高中低压绕组的电流。然后将仿真模型与电流数据导入 Ansys 软件中，考虑温度对变压器绕组电导率、杨氏模量的影响，在电磁−热场中采用迭代方法实现双向耦合，获得了变压器在受冲击后的温度。最后将电磁场和温度场的计算结果导入瞬态结构场，计算得出变压器在各故障类型的单次冲击和多次冲击下，绕组的最大位移和累积位移的分布特性。

1 变压器绕组多物理场理论分析

1.1 绕组电磁场分析

对变压器的电磁场分析本质上是对麦克斯韦方程组的分析，麦克斯韦方程组的微分方程形式如式(1)—式(4)所示。

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \theta} \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial \theta} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{E}$ 为电场强度；$\boldsymbol{B}$ 为磁通量密度；$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度；$\boldsymbol{D}$ 为电通量密度；ρ 为电荷密度；θ为时间。

通过有限元方法对变压器磁场进行工程计算时，引入矢量磁位 $\boldsymbol{A}$，基于以上的麦克斯韦方程组与库伦规范，忽略涡流效应，得到计算变压器绕组的磁场方程及各类边界条件如式(5)和式(6)所示。

$$\nabla \times \left(v \nabla \times \boldsymbol{A} \right) = N J_{\mathrm{s}} \boldsymbol{h} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \Gamma_1 : \boldsymbol{A} = \boldsymbol{A}_0 \\ \Gamma_2 : v \dfrac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial n} = -H_{\mathrm{t}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：v 为磁阻率；N 为绕组匝数；J_{s} 为单匝电流密度大小；$\boldsymbol{h}$ 为绕组切向的单位矢量；H_{t} 为切向磁场强度；Γ_1 和Γ_2 是第一、二类边界。

为分析变压器内各物理场理论，在变压器内部建立 xyz 直角坐标系，如图 1 所示。

通常从辐向和轴向上描述变压器内绕组部分的磁量和位移量。图 1 中，z 方向上称为轴向，x 与 y 方向共同构成辐向。坐标的转换如式(7)所示。

$$\begin{cases} z = z \\ r = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \tag{7}$$

式中：r 为辐向坐标；z 为轴向坐标，其也等于直角坐标系下 z 方向坐标。以下轴向与辐向分析的情况都基于上述方向。

通过式(5)和式(6)，即可得到求解域内任意节点处的矢量磁位 $\boldsymbol{A}$。因此磁通密度的模可以通过矢量磁位计算得到，如式(8)所示。

$$|\boldsymbol{B}| = \sqrt{B_{\mathrm{r}}^2 + B_{\mathrm{z}}^2} = \frac{1}{r}\sqrt{\left(\frac{\partial(r\boldsymbol{A})}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial(r\boldsymbol{A})}{\partial r}\right)^2} \tag{8}$$

式中：B_{r}、B_{z} 分别为辐向磁密和轴向磁密。

1.2 绕组力学分析

当变压器绕组流过电流时，绕组周围将产生漏磁场，绕组导体在电流与漏磁场的共同作用下将形成电磁力。电磁力大小可通过 Biot-Savart 定律计算得出，电磁力方向可通过左手定则判断。有限元方法下，对于微分单元 dV，漏磁场与电流密度作用下，承受的电磁力 d$\boldsymbol{f}$ 如式(9)所示。

$$\mathrm{d}\boldsymbol{f} = \boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B}\mathrm{d}V \tag{9}$$

对式(9)积分即可得出绕组整体 V 的受力如式(10)所示。

$$\boldsymbol{F} = \int_V (\boldsymbol{J} \times \boldsymbol{B})\mathrm{d}V \tag{10}$$

变压器绕组受到电磁力从方向上可分为轴向电磁力与辐向电磁力。由式(10)可知，绕组受到的轴向电磁力是由辐向漏磁与导体流过电流共同作用产生；绕组受到的辐向电磁力是由轴向漏磁与导体流过电流共同作用产生。对于正常工况下的变压器，流经低压绕组的电流要远大于高压绕组和中压绕组，因此电磁力对低压绕组的影响更大。

轴向上，根据变压器绕组的结构特点，认为上下铁轭为刚性，线饼为集中质量，绝缘垫块及端圈为弹性元件，且加上变压器油的阻尼作用，变压器绕组在轴向上可等效为如图 2 所示的模型。

该变压器绕组轴向等效系统即为绕组质量−弹簧−阻尼系统。图 2 中，绕组线饼以刚体质量块 m 表示，其线圈阻尼以阻尼器的形式表征，阻尼系数为 c_{z}；垫片以受压弹簧表征，假定各垫片预紧力 F_{preload} 和刚度 k_{z} 完全一致，得到绕组轴向机械振动动力学方程如式(11)所示

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{z}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{z}}'' + \boldsymbol{C}_{\mathrm{z}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{z}}' + \boldsymbol{K}_{\mathrm{z}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{z}} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{z}} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\mathrm{z}}$ 为各线饼的轴向位移；$\boldsymbol{x}_{\mathrm{z}}'$ 为各线饼的轴向速度；$\boldsymbol{x}_{\mathrm{z}}''$ 为各线饼的轴向加速度；$\boldsymbol{M}_{\mathrm{z}}$ 为系统质量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{z}}$ 为系统阻尼矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{z}}$ 为系统刚度矩阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{z}}$ 为轴向外力矢量。

辐向上，与轴向等效模型同理，得到绕组辐向等效模型如图 3 所示。

图 3 中，由于绕组线饼在进行辐向振动时，受到变压器油的阻尼作用，且线饼的上下近邻以及端

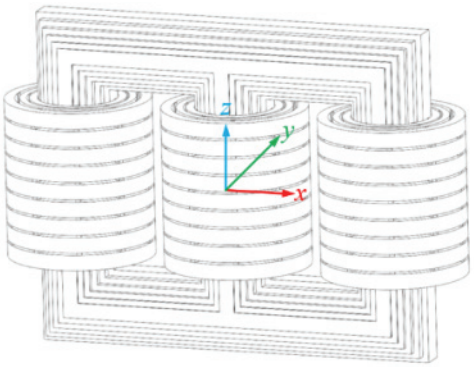


图 1 变压器内部坐标系

Fig.1 Transformer internal coordinate system

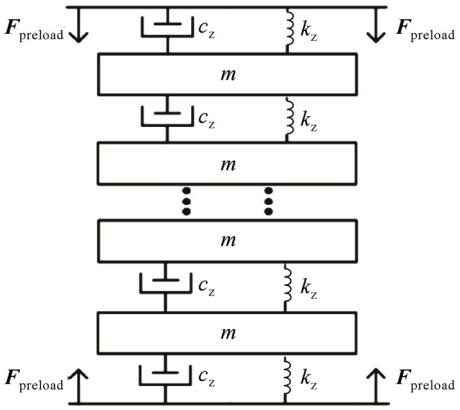


图 2 变压器绕组轴向等效模型

Fig.2 Axial equivalent model of transformer windings

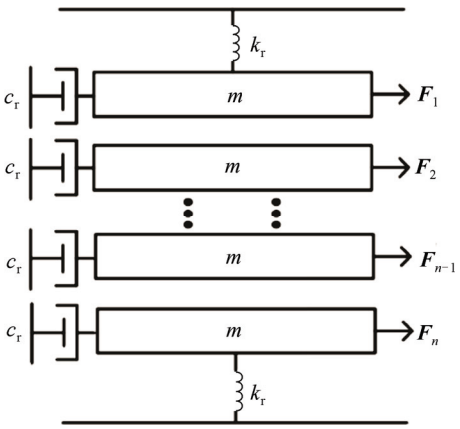


图 3 变压器绕组辐向等效模型

Fig.3 Radial equivalent model of transformer winding

部的绝缘垫块会与其发生摩擦从而产生摩擦力，因此有 c_r 为辐向阻尼系数，k_r 为刚度系数，F_n 为第 n 匝线饼受到的辐向合外力，由此得到绕组辐向机械振动动力学方程如式(12)所示。

$$\boldsymbol{M}_r\boldsymbol{x}_r''+\boldsymbol{C}_r\boldsymbol{x}_r'=\boldsymbol{F}_r \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{x}_r'$ 为各线饼的辐向速度；$\boldsymbol{x}_r''$ 为各线饼的辐向加速度；$\boldsymbol{M}_r$ 为系统质量矩阵；$\boldsymbol{C}_r$ 为系统阻尼矩阵；$\boldsymbol{F}_r$ 为辐向外力矢量。

1.3 绕组热场分析

油浸式变压器运行过程中，存在多种换热形式，有热传导、热对流和热辐射。为了简化计算，主要考虑绕组的热传导。根据傅里叶定律，变压器求解域在 xyz 直角坐标系中的三维非稳态热传导方程如式(13)所示。

$$\rho_{\text{coil}}c\frac{\partial t}{\partial\theta}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right)+\Phi \tag{13}$$

式中：ρ_{coil} 为密度；Φ为热源；c 为比热容；λ为导热系数；t 为温度。

对应变压器内部单位体积的产热率 S_T 的计算式如式(14)所示。

$$S_T=\frac{P}{V_{\text{coil}}} \tag{14}$$

式中：P 为绕组在短路过程中产生的损耗；V_{coil} 为绕组的体积。

2 变压器三维有限元仿真

2.1 变压器三维模型

以工程中典型的 SFS10−50000/110 变压器为研究对象，高中低电压比为 115 kV/38.5 kV/10.5 kV，匝数比为 582/195/92。变压器铁芯长 3390 mm，高 2800 mm，铁芯采用 11 级叠片形式。在 Ansys 有限元仿真软件中建立的变压器模型如图 4 所示。变压器铁芯与绕组的基本参数如表 1 所示。

本文以三维有限元方法对变压器绕组在多物理场耦合下研究磁密、温度和位移的分布特性，保证仿真数据准确的前提下，简化计算，在对变压器建模时作以下假设：

1）不考虑夹件、油箱、角环、端圈、磁屏蔽等结构件，模型包括铁芯、铜绕组、垫块和撑条。

2）不考虑绕组内部铜导线的绕制分布情况，各匝线饼均采用圆筒式，线圈匝数均匀分布。

3）在保证垫块与线饼尺寸关系和实际变压器尺寸关系相同的情况下，对绕组层数按比例缩减。

2.2 变压器故障电流模型

通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建变压器的等效电路如图 5 所示。

变压器高中低压绕组的电气参数如表 2 所示。设置变压器副边出口在 0 s 发生短路故障，直至 0.1 s 故障被切除，变压器恢复正常运行。将故障电流作为变压器各绕组的激励信号导入 Ansys Maxwell 软件。以低压侧三相短路为例，A 相高中低压绕组电流如图 6 所示。

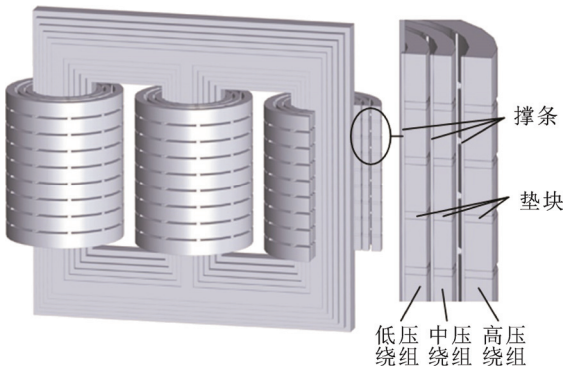


图 4 变压器三维模型

Fig.4 Three dimensional model of transformer

表 1 变压器结构参数

Table 1 Structural parameters of transformer

参数名称	数值/mm	参数名称	数值/mm
铁窗高	1540.0	中心距	1380.0
芯柱直径	630.0	铁轭直径	630.0
高压内径	526.5	高压外径	614.5
中压内径	428.5	中压外径	486.5
低压内径	337.0	低压外径	405.5
高压高度	1340.0	中压高度	1340.0
低压高度	1340.0	线饼厚度	131.1
垫块厚度	20.0		

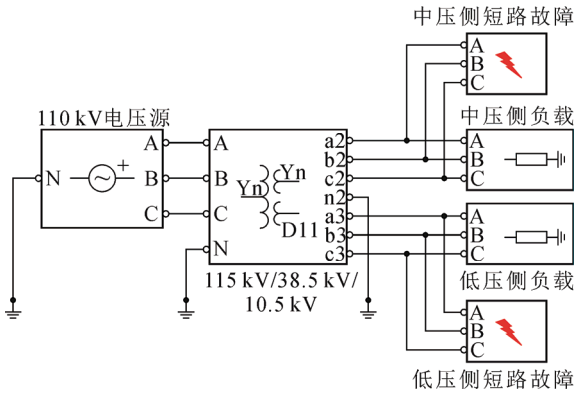


图 5 变压器故障电路模型

Fig.5 Transformer fault circuit model

表 2　变压器绕组电气参数

Table 2　Electrical parameters of transformer winding

参数名称	数值		
	高压绕组	中压绕组	低压绕组
容量/MVA	50	50	50
额定电压/kV	110	35	10
额定电流/A	307	627	1583
匝数	582	195	92

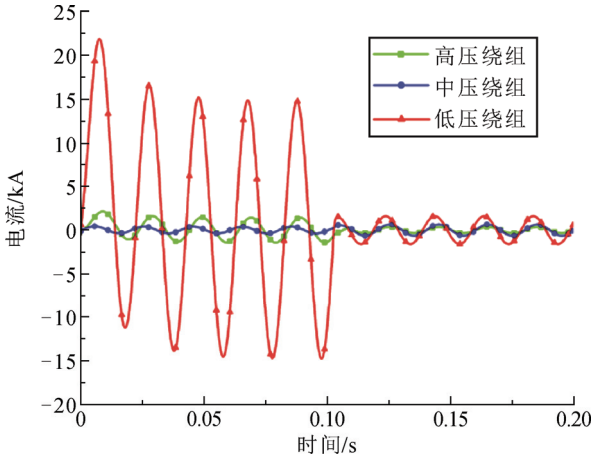


图 6　低压侧三相短路 A 相电流

Fig.6　Three-phase short circuit phase A current at low-voltage side

2.3　变压器多物理场耦合仿真

油浸式变压器涉及到电磁场、温度场、流场及结构场等多物理场，耦合情况十分复杂。电磁力对变压器绕组冲击的时间极其短暂，而温度对变压器绕组冲击的时间较电磁则漫长得多。因此在研究变压器在不同故障类型下绕组各特征量分布时，认为温度恒定不变。在对变压器电磁场与温度场进行计算时，忽略温度对变压器铁芯中硅钢材料特性的影响[24]，考虑温度对绕组电导率的影响。进行温度场与结构场计算时，考虑温度对绕组杨氏模量的影响。通过电磁场计算绕组损耗量以确定热源，再通过温度场计算温度来影响绕组电导率和杨氏模量，以此实现电磁场、温度场与结构场的多物理场耦合，研究流程如图 7 所示。

通过三维 Maxwell 场与瞬态温度场双向耦合仿真的形式，迭代计算求出变压器各部分的温度分布，实现流程如图 8 所示，k 为迭代次数，ε 为设定的收敛误差。在 Ansys Workbench 中对变压器各结构的材料设置参数，其中变压器铁芯采用牌号为 DW310_35 的硅钢材料，变压器其余结构材料参数如表 3 所示。

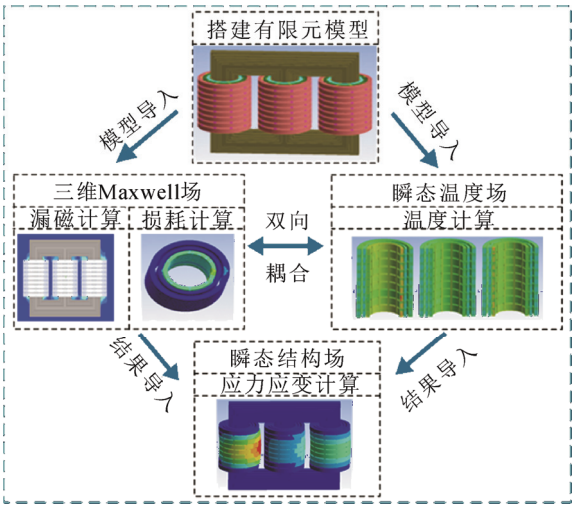


图 7　多物理场耦合下变压器绕组研究流程图

Fig.7　Flow chart of transformer winding research under coupling of multiple physical fields

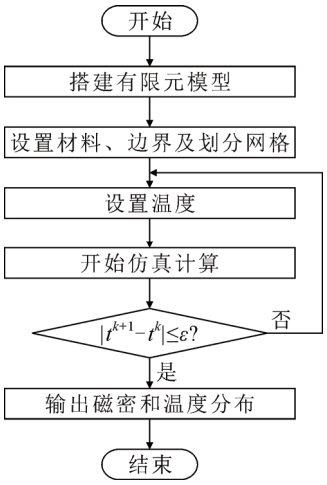


图 8　电磁场与温度场迭代计算流程图

Fig.8　Flow chart of iterative calculation of electromagnetic field and temperature field

表 3　变压器材料参数

Table 3　Transformer material parameters

参数	数值			
	铁芯	绕组	垫块	撑条
密度/(kg·m^{-3})	7650	8900	1120	1800
杨氏模量/GPa	205	$f(t)$	1.5	50
泊松比	0.28	0.32	0.35	0.35
导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})	30	387	0.245	0.245
比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	446	385	1340	1340

表 3 中，绕组的杨氏模量与温度相关，其关系式 $f(t)$及变压器绕组电导率与温度的关系如图 9 所示[25-26]。

对变压器的各结构进行网格划分时，铁芯采用自由四面体网格划分，绕组、垫块和撑条采用六面体网格划分。模型网格单元总数为 215 313，节点总数为 1 260 904。

3 仿真结果分析

基于 AnsysWorkbench 有限元仿真软件，对变压器在各短路故障类型下磁密、电磁力、温度及绕组位移进行仿真计算。为获取绕组间隙磁密，在变压器各相绕组筒间分别设置了 8 个采样路径，如图 10 所示。

3.1 各故障类型下变压器磁密分布

变压器在正常运行时，其内部会产生一定漏磁，而由于短路电流数值上是正常工况下电流的十至百倍，因此变压器内部产生的漏磁密也随之增大。变压器绕制在制作时各线饼间留有油道，以便于变压器的流动散热，并且端部线饼乏轴向上的连续。因为上述两点结构的影响，变压器绕组间隙的漏磁密在各线饼间与端部线饼处产生轴向和辐向分量，再加上导体内电流的作用，使得变压器绕组的各位置与线饼的各位置所受电磁力的大小与方向各有不同。变压器内部磁密分布云图见附录中图 A1。

在上述故障中，单相故障和两相故障的故障相分别为 A 相和 A、B 两相。分析图 A1 可知，低压侧发生短路故障在变压器内部产生的最大磁密均大于中压侧发生短路故障时产生的最大磁密。这是因为变压器低压侧的联结方式为三角形方式，当变压器低压侧发生单相接地故障时，故障电流幅值为正常工况下电流幅值的 2~4 倍，中压侧则为 Yn11 方式。又由于变压器内部磁密与电流呈正相关，因此造成上述趋势。从最大磁密数值上对比，最大值对应故障类型为低压侧三相短路，B_{max} 为 8.0034 T；其次为低压侧两相短路，B_{max} 为 6.4637 T；最小值对应故障类型为低压侧单相短路，B_{max} 为 0.4491 T。从磁密分布情况对比，各故障类型下，磁密最大值分布于各线饼间的空隙上，且端部线饼边缘的磁密较周围的大。为了观察变压器内部空间磁密的分布情况，以三相短路故障为例，其变压器内磁密分布三维云图如图 11 所示。

图 11 中，绕组自左向右依次为 A 相、B 相和 C 相，绕组以自 A 相向 C 相方向为 0°，顺时针为正。由图 11 可得，低压侧三相短路时变压器内磁密最大值位于变压器 A 相绕组的 80°，绕组中间位置，B_{max}

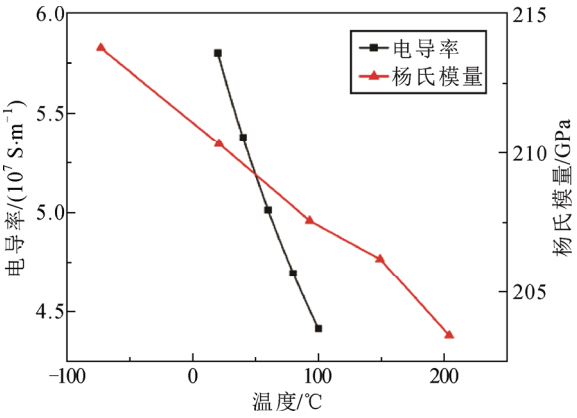


图 9 温度与绕组电导率和杨氏模量关系图

Fig.9 Temperature versus winding conductivity and Young's modulus

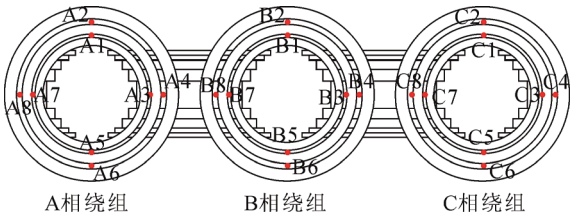
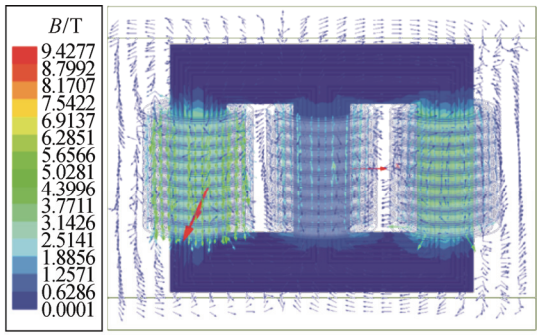
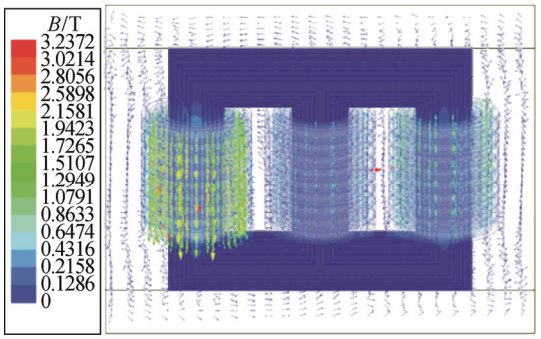


图 10 变压器磁密采样点

Fig.10 Transformer magnetic density sampling point



(a) 低压侧三相短路变压器磁密分布三维云图



(b) 中压侧三相短路变压器磁密分布三维云图

图 11 三相短路下变压器磁密分布

Fig.11 Magnetic density distribution of transformer under three-phase short circuit

为 9.4277 T。中压侧三相短路时变压器内磁密最大值位于 A 相绕组的 160°，绕组底部位置，B_{max} 为 3.2372 T。这与图 A1 中磁密的最大值与最大值的位置存在不同，在各线饼间空隙上的磁密值大于线饼部分的磁密值，变压器内漏磁主要分布于绕组与铁芯、绕组与绕组之间的空间中的分布特性一致。

鉴于篇幅有限，选冲击最大的低压侧三相短路故障，以各相 3 号测点和低压绕组为例，基于式(7)和式(8)，从绕组辐向和轴向上，对绕组磁密及电磁力分布曲线分析，如图 12 和图 13 所示。

由图 12 可知，变压器绕组整体在辐向上服从两端磁密大、中间磁密小的分布；在轴向上服从中间磁密大、两端磁密小的分布。对于各线饼，在辐向上，居于中间位置的线饼服从两端磁密大、中间磁密小的分布。而越远离中间位置的线饼，出现线饼一端磁密大、另一端磁密小的趋势。在轴向上，部分线饼出现中间磁密大、两端磁密小的分布，部分线饼中间和两端磁密大小趋于一致，剩余线饼呈现一端磁密大、一端磁密小的分布。对于以上特性，其原因是线饼与线饼间存在间隙，当高、中、低压线饼流过电流时，各压线饼产生磁密的方向与大小不同，变压器内部的漏磁密是由各压线饼产生磁密的叠加而来。对于中间线饼的中部，其上下线饼数量与结构对称，其两端由于上下线饼产生磁密在该线饼两端大小相等、方向相反，因此出现了中间线饼中部为 0、两端以相反方向递增的趋势。而不位于绕组中间的线饼由于其上下线饼数量和结构都不对称，从而加大了线饼两端辐向磁密的差距。其余各压线饼以及轴向磁密分布特点也可同理分析得出。

在图 13 中，因为电磁力的测点从轴向贯穿绕组整体，当途径间隙时，由于无电流流过，故在间隙部分的电磁力密度为零。轴向力密度的分布趋势与辐向磁密的分布趋势一致。辐向上，力密度与轴向磁密分布趋势一致。

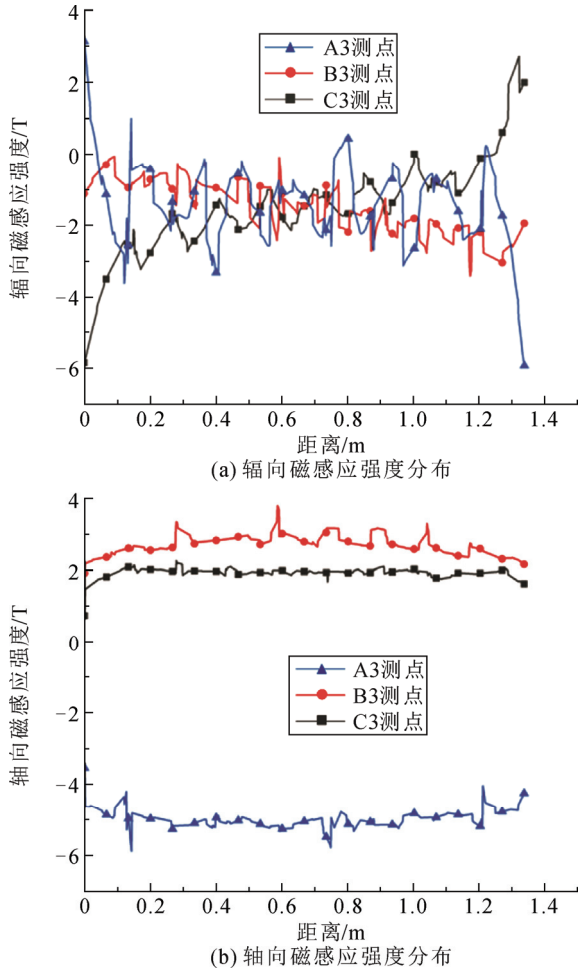


图 12 三相短路下 3 号测点磁密分布

Fig.12 Magnetic density distribution of measuring point 3 under three-phase short circuit

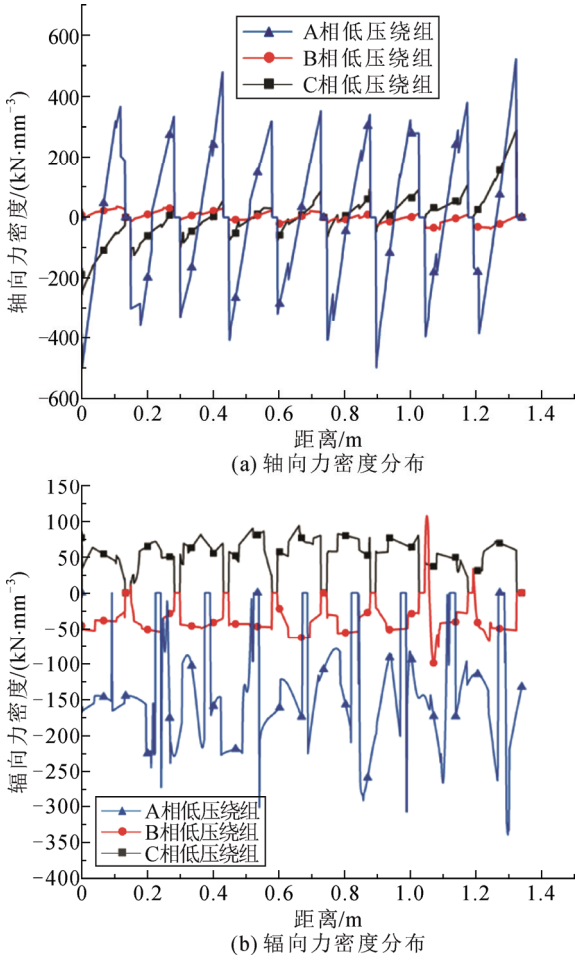


图 13 三相短路下低压绕组电磁力分布

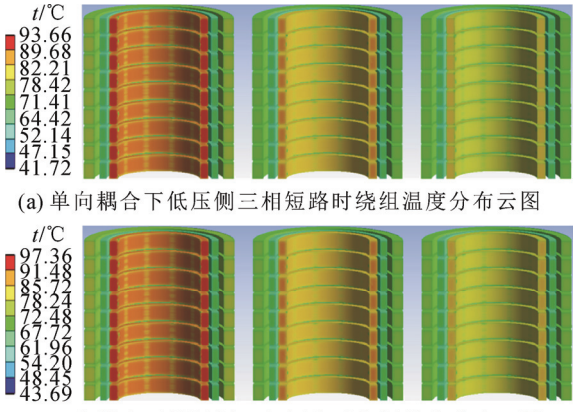
Fig.13 Electromagnetic force distribution of low-voltage winding under three-phase short circuit

3.2 各故障类型下变压器温度分布

由式(14)可知，变压器绕组产热值与其损耗成正相关，又损耗与电流平方和电阻率呈正相关。因此，以低压侧三相短路故障为例，其单向耦合与双向耦合的绕组温度分布云图如图 14 所示。

在图 14 中，变压器绕组工作环境温度为 40 ℃。由图 14 可知，在双向耦合与单向耦合方面，单向耦合的绕组整体温度低于双向耦合的整体温度，而变压器绕组温度的分布相差不大。低压侧三相短路故障中，单向耦合的最高温度比双向耦合的最高温度低 3.7 ℃，最低温度相差 1.97 ℃。这是由于绕组电导率与温度呈反比关系，如图 9 所示，在双向耦合中更高的温度导致更小的电导率，绕组从而产生更大的损耗，而在单向耦合中，绕组的损耗与温度无关，因此热源为定值。在各故障类型下绕组温度分布方面，故障相绕组温度都高于非故障相绕组温度，这是因为电流与损耗呈正比，所以电流越大，温度越高。且撑条与垫块和绕组接触的区域由于热传导使得绕组在该区域的温度略低于其他区域的温度。变压器绕组最高温度与故障类型和最大电流的关系如图 15 所示。

分析图 15 可知，当变压器低压侧发生三相短路时，绕组最高温度为 97.36 ℃。其次是低压侧两相短路故障，温度为 89.68 ℃。最高温度最低的故障类型是低压侧单相接地故障，温度为 63.24 ℃。对比绕组最高温度与最大电流，最高温度的趋势与故障时最大电流的趋势整体一致，呈现电流越大、最高温度越高的正比关系。



(a) 单向耦合下低压侧三相短路时绕组温度分布云图

(b) 双向耦合下低压侧三相短路时绕组温度分布云图

图 14 各故障类型下单双向耦合时绕组温度分布

Fig.14 Winding temperature distribution under single and Bidirectional coupling under various fault types

3.3 各故障类型下变压器绕组位移分布

3.3.1 单次冲击下绕组位移分布

通过 Ansys Workbench 有限元仿真软件，将电−磁−热物理场计算结果通过数据链导入瞬态结构场，设置相关边界条件后，可计算得出各故障类型下变压器高、中、低压绕组的位移云图。鉴于篇幅有限，取冲击最大的低压侧三相短路为例，云图分布如图 16 所示。

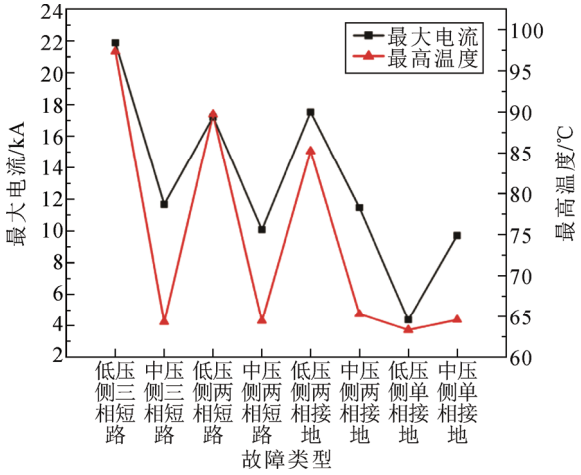
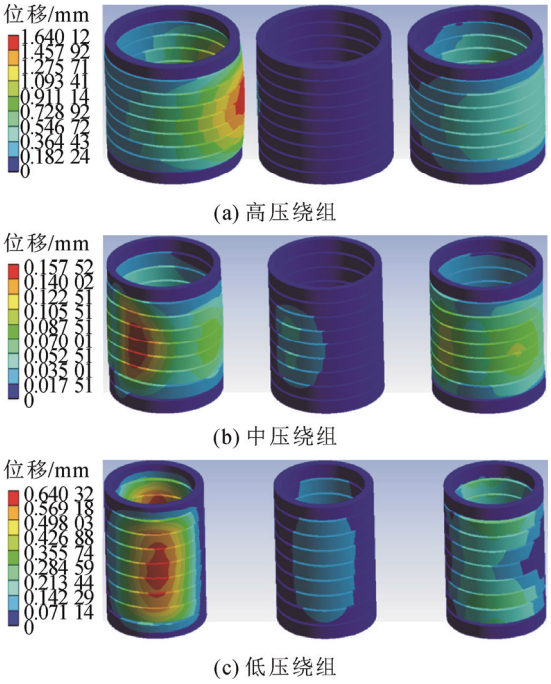


图 15 故障类型与绕组最高温度和最大电流的关系

Fig.15 Relation between fault type and maximum winding temperature and current



(a) 高压绕组

(b) 中压绕组

(c) 低压绕组

图 16 低压侧三相短路绕组位移云图

Fig.16 Displacement nephogram of three-phase short-circuit winding at low-voltage side

在图 16 中，辐向上，位移最大位置出现在高压绕组。高压绕组最大位移出现在−20°~20°范围内，位移方向为朝径外；中压绕组最大位移出现在 120°与−120°处，方向朝径内；低压绕组最大位移出现在 90°与−90°处，方向为朝径内。轴向上，最大位移出现在绕组高度 1/3~2/3 的范围内。

3.3.2 多次冲击下绕组位移分布

电力变压器在受到短路冲击力的作用后，由于铜材料属于塑性材料，每次短路冲击后会出现微小塑性形变残留。由于继电保护装置特性的影响，电力变压器每一次发生短路故障时，绕组将遭受数十次短路电磁力的冲击[27]。以 10 次冲击为例，通过对变压器多次冲击下的仿真分析，得到各故障类型下，变压器绕组最大位移的分布如图 17 所示。

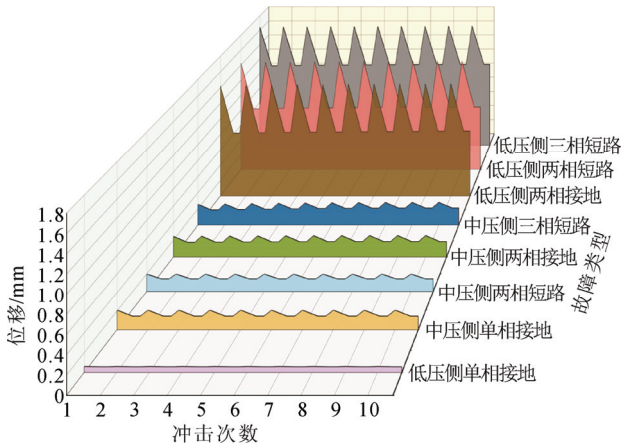


图 17 各故障类型多次冲击下绕组最大位移

Fig.17 Maximum displacement of winding under multiple shocks of each fault type

在图 17 中，冲击模式为单次冲击后，将电流设置成故障稳态下的电流，以达到冲击力释放后因铜绕组弹性而恢复正常工况下最大位移的目的。由图 17 可知，各故障类型下冲击次数与变压器绕组最大位移的变化量不明显，因此以首次冲击为基准，其后每次冲击最大位移与首次冲击最大位移作差，得到冲击次数与变压器绕组累积形变的关系如图 18 所示。

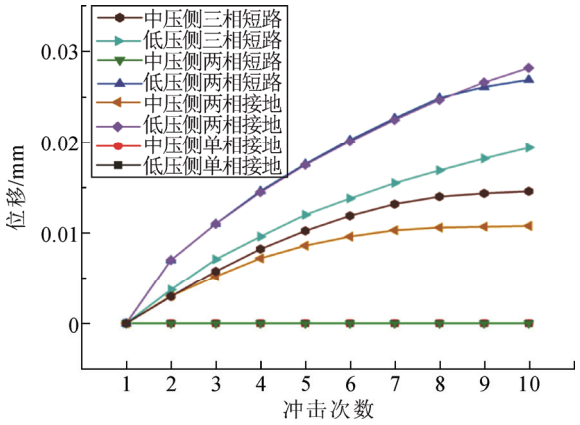


图 18 冲击次数与绕组累积形变增量关系曲线

Fig.18 Relation curve between shock times and cumulative deformation increment of winding

由图 18 可知，中、低压侧单相短路和中压侧两相短路对变压器绕组并未产生塑性形变，因此其累积形变量不随冲击次数的增加而增加。尽管低压侧三相短路单次冲击对绕组造成最大位移的值最大，但从多次冲击方面分析，对绕组最大累积形变增量的故障类型为低压侧两相接地，其次是低压侧两相短路，第三是低压侧三相短路故障。这是因为变压器绕组累积形变增量与塑性形变有关，塑性形变与所受应力和温度有关，因此低压侧三相短路故障下的累积形变增量小于低压侧两相短路故障和低压侧两相接地故障下的值。且随着冲击次数的增加，绕组累积位移的值是在增加，但其曲线斜率在逐渐减小，曲线斜率最大的是低压侧两相接地故障，其次是低压侧三相短路。由此得出，变压器绕组位移在各故障类型下的多次冲击会随着冲击次数的增加而增加，但最终绕组位移会趋于饱和。以上仿真得出的漏磁、温度和位移结果与文献[18，28-30]中计算得出的各物理量结果基本一致。

4 结论

1）变压器内漏磁密最大值对应故障类型为低压侧三相短路。各故障类型下，磁密最大值分布于各线饼间的空隙上。

2）当变压器低压侧发生三相短路时，绕组最高温度可达 97.36 ℃，位于 A 相低压绕组 0°处。最大电流与最高温度呈正比关系。

3）单次冲击时，辐向上，位移最大位置出现在高压绕组的−20°~20°范围内，位移方向为朝径外；轴向上，最大位移出现在绕组高度 1/3~2/3 的范围内。

4）多次冲击时，绕组最大累积位移对应故障类型为低压侧两相接地，绕组位移在各故障类型下的多次冲击会随着冲击次数的增加而增加，但最终绕组位移会趋于饱和。

本文目前侧重于仿真研究，后期将对变压器绕组开展试验，实测短路与接地故障类型对变压器绕组状态分布的影响。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 鲁 非，金 雷，刘思维，等. 基于有限元分析的电力变压器绕组故障诊断[J]. 高压电器，2018，54(1)：123-130.
LU Fei, JIN Lei, LIU Siwei, et al. Winding fault diagnosis of power transformer based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 123-130.

[2] FEYZI M R, SABAHI M. Finite element analyses of short circuit forces in power transformers with asymmetric conditions[C]// 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, UK: IEEE, 2008: 576-581.

[3] FAIZ J, EBRAHIMI B M, NOORI T. Three- and two-dimensional finite-element computation of inrush current and short-circuit electromagnetic forces on windings of a three-phase core-type power Transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(5): 590-597.

[4] AHN H M, LEE J Y, KIM J K, et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1267-1272.

[5] 高树国，孙 路，刘宏亮. 基于 COMSOL 多物理场仿真的短路工况下变压器轴向电磁力的计算[J]. 科学技术与工程，2022，22(13)：5250-5256.
GAO Shuguo, SUN Lu, LIU Hongliang. Calculation of axial electromagnetic force of transformer under short circuit condition based on COMSOL multi-physical field simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(13): 5250-5256.

[6] 王 磊，王敏璩，王 倩，等. 非晶合金变压器多物理场仿真及能效分析[J]. 变压器，2018，55(9)：32-38.
WANG Lei, WANG Minhao, WANG Qian, et al. Multi-physics field simulation and energy efficiency analysis of amorphous alloy transformer[J]. Transformer, 2018, 55(9): 32-38.

[7] 刘渝根，冷 迪，田 资，等. 基于 ANSYS Maxwell 的 750 kV 自耦变压器直流偏磁仿真[J]. 高电压技术，2013，39(1)：218-225.
LIU Yugen, LENG Di, TIAN Zi, et al. DC bias simulation of 750 kV autotransformer based on ANSYS Maxwell[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 218-225.

[8] 黄之明，王 乔，张逸凡，等. 谐波条件下 500 kV 联接变压器铁心应力及振动特性仿真分析[J]. 高压电器，2019，55(11)：86-92.
HUANG Zhiming, WANG Qiao, ZHANG Yifan, et al. Simulation analysis on stress and vibration characteristics of 500 kV connected transformer core in harmonic condition[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 86-92.

[9] 吴晓文，张壮壮，祝令瑜，等. 负载因素对 10 kV 三相油浸式配电变压器振动特性影响的仿真研究[J]. 高压电器，2022，58(10)：106-115.
WU Xiaowen, ZHANG Zhuangzhuang, ZHU Lingyu, et al. Simulation research on influence of load factors on vibration characteristics of 10 kV three phase oil immersed distribution transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 106-115.

[10] 王丰华，段若晨，耿 超，等. 基于“磁–机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(9)：2555-2562.
WANG Fenghua, DUAN Ruochen, GENG Chao, et al. Research of vibration characteristics of power transformer winding based on magnetic-mechanical coupling field theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555-2562.

[11] 徐 辉，于 虹，钱国超，等. 基于 ANSYS 的变压器绕组振动特性仿真研究[J]. 云南电力技术，2016，44(5)：104-106.
XU Hui, YU Hong, QIAN Guochao, et al. Simulation study on vibration characteristics of transformer windings based on ANSYS[J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(5): 104-106.

[12] 许 静，刘树鑫. 基于多物理场耦合及温升特性研究的变压器热点温度建模与仿真分析[J]. 计量学报，2022，43(2)：242-249.
XU Jing, LIU Shuxin. Modeling and simulation analysis of transformer hot spot temperature based on multi physical field coupling and temperature rise characteristics[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(2): 242-249.

[13] 蒋惠中，魏本刚，文 杰，等. 分体式油浸自冷变压器三维温度场和流场仿真与分析[J]. 高压电器，2021，57(2)：63-69.
JIANG Huizhong, WEI Bengang, WEN Jie, et al. Numerical simulation of 3D temperature and flow fields in separated oil-immersed cooling transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 63-69.

[14] 刘 刚，靳艳娇，马永强，等. 基于混合法的油浸式变压器二维瞬态温度场仿真[J]. 高压电器，2019，55(4)：82-89.
LIU Gang, JIN Yanjiao, MA Yongqiang, et al. 2-D transient temperature field simulation of oil-immersed transformer based on hybrid method[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 82-89.

[15] 王珊珊，肖 黎，廖才波. 110 kV 环氧浇注干式变压器流体−温度场的有限元仿真计算[J]. 变压器，2016，53(1)：1-5.
WANG Shanshan, XIAO Li, LIAO Caibo. Simulation calculation of fluid-temperature field of 110 kV dry-type transformer with finite element method[J]. Transformer, 2016, 53(1): 1-5.

[16] 李华春，梁作德，苏宝国，等. 干式变压器温度场的有限元仿真计算[J]. 变压器，2012，49(10)：7-10.
LI Huachun, LIANG Zuode, SU Baoguo, et al. Simulation calculation of temperature field of dry-type transformer with finite element method[J]. Transformer, 2012, 49(10): 7-10.

[17] PATEL B, WANG Z D, MILANOVIC J V, et al. Modelling transformer short-circuit reliability using multi-stress accelerated test data[C]// 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). Durham, UK: IEEE, 2014: 1-6.

[18] YAO S Y, HAO Z G, SI J N, et al. Dynamic deformation analysis of power transformer windings under multiple short-circuit impacts[C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China: IEEE, 2019: 1394-1397.

[19] 刘 刚，荣世昌，武卫革，等. 基于混合有限元法和降阶技术的油浸式变压器绕组 2 维瞬态流−热耦合场分析[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1695-1704.
LIU Gang, RONG Shichang, WU Weige, et al. Two-dimensional transient flow-thermal coupling field analysis of oil-immersed transformer windings based on hybrid finite element method and reduced-order technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1695-1704.

[20] 谭风雷，朱 超，徐 刚，等. 基于解耦分析和欧式距离的特高压变压器顶层油温预测方法[J]. 高电压技术，2022，48(1)：298-306.
TAN Fenglei, ZHU Chao, XU Gang, et al. Method of UHV transformer top oil temperature forecasting based on decoupling analysis and euclidean distance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 298-306.

[21] 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 Bingqian, XIAN Richang, YU Yang, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2177-2185.

[22] 李慧奇，李金博，杨 光. 间谐波激励下变压器励磁−振动特性的实验研究与计算分析[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1781-1790.
LI Huiqi, LI Jinbo, YANG Guang. Experimental study and calculation analysis of excitation-vibration characteristics of transformer under interharmonic excitation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1781-1790.

[23] 邓永清，阮江军，董旭柱，等. 基于自适应网格控制的 10 kV 油浸式变压器多物理场仿真计算[J]. 高电压技术，2022，48(8)：2924-2933.
DENG Yongqing, RUAN Jiangjun, DONG Xuzhu, et al. Simulation of multi-physical field of 10 kV oil-immersed transformer based on adaptive grid control[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2924-2933.

[24] 孔庆奕，程志光，李悦宁. 取向硅钢片在不同环境温度下的磁特性[J]. 高电压技术，2014，40(9)：2743-2749.
KONG Qingyi, CHENG Zhiguang, LI Yuening. Magnetic properties of oriented silicon steel sheet under different ambient temperatures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2743-2749.

[25] 罗汉武，来文青，姜国义，等. 不同温度下变压器绕组材料弹性模量及短路轴向力学性能研究[J]. 绝缘材料，2017，50(9)：46-51.
LUO Hanwu, LAI Wenqing, JIANG Guoyi, et al. Research on elastic modulus of transformer winding material under different temperatures and axial mechanical properties at short circuit[J]. Insulating Materials, 2017, 50(9): 46-51.

[26] 闫鑫笑. 干式变压器电磁−热耦合模拟特性与实验研究[D]. 天津：河北工业大学，2020.
YAN Xinxiao. Electromagnetic and thermal field coupled modeling and experimental research in dry-type transformer[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2020.

[27] 徐达明. 变压器短路冲击后的综合诊断[J]. 高电压技术，2002，28(10)：50-51.
XU Daming. Diagnosis of transformer after short circuit[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(10): 50-51.

[28] 穆 龙，陈伯根，蔡 锋，等. 电力变压器三维瞬态漏磁场及电动力仿真分析[J]. 哈尔滨理工大学学报，2021，26(5)：104-113.
MU Long, CHEN Bogen, CAI Feng, et al. Simulation and analysis of 3D transient leakage magnetic field and electromotive force of power transformer[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(5): 104-113.

[29] 邹德旭，钱国超，井永腾，等. 变压器短路模型的绕组漏磁对比分析与试验研究[J]. 变压器，2021，58(11)：49-54.
ZOU Dexu, QIAN Guochao, JING Yongteng, et al. Comparative analysis and experimental study of winding magnetic flux leakage of transformer short-circuit model[J]. Transformer, 2021, 58(11): 49-54.

[30] 谢道伟. 油浸式三相电力变压器电磁场及温度场的瞬态仿真分析[D]. 长春：吉林大学，2015.
XIE Daowei. The analysis of transient simulation on electromagnetic field and thermal field of three-phase oil-immersed power transformer[D]. Changchun, China: Jilin University, 2015.



王胜辉
1977—，男，博士(后)，副教授，硕导
主要从事电气设备在线监测与故障诊断、新型电工绝缘材料方面的研究工作
E-mail: hdwsh@ncepu.edu.cn

WANG Shenghui
Post-doctorate
Associate professor

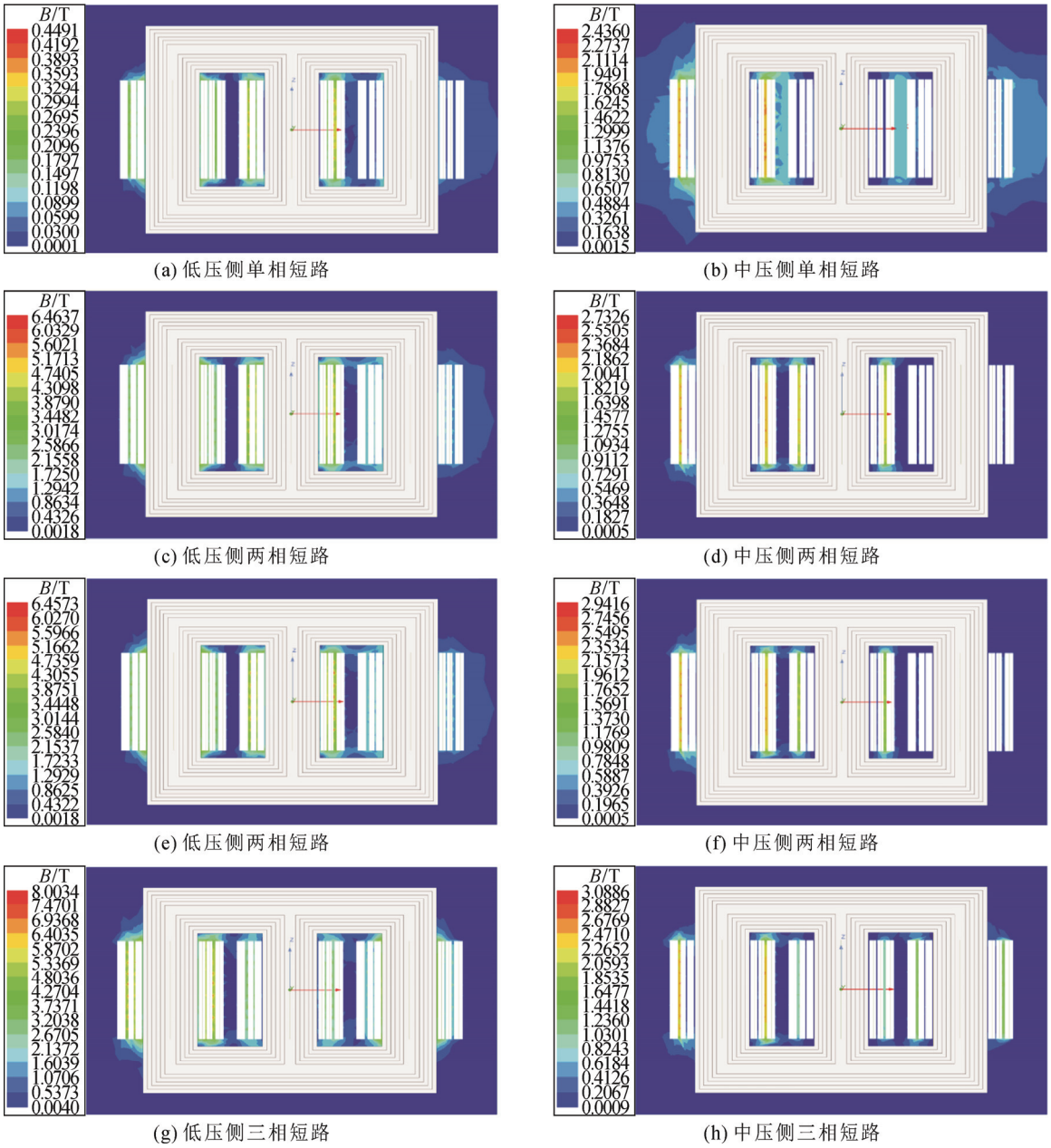


许育帅(通信作者)
1999—，男，硕士生
主要从事多物理场耦合计算与数值仿真方面的研究
E-mail: 2533696125@qq.com

XU Yushuai
Corresponding author

收稿日期 2022-11-04 修回日期 2023-03-06 编辑 曾文君

附录 A



(a) 低压侧单相短路　(b) 中压侧单相短路

(c) 低压侧两相短路　(d) 中压侧两相短路

(e) 低压侧两相短路　(f) 中压侧两相短路

(g) 低压侧三相短路　(h) 中压侧三相短路

图 A1　各故障类型下变压器内部最大磁密分布云图

Fig.A1　Cloud chart of maximum magnetic density distribution in transformer under various fault types