

基于磁机械耦合法的高频变压器绕组力学特性计算与分析

陈彬^{1,2}, 陈健^{1,2}, 万妮娜³, 王帅兵⁴, 唐波^{1,2}, 黄力^{1,2}

(1. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002; 4. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 基于大功率高频变压器的磁耦合 DC/DC 变换器是实现大规模直流源互联、兆瓦级直流电压变换的核心设备, 其工作电流较大, 在变换器开关器件故障状态下绕组电流激增从而导致高频变压器绕组受力变形问题严重。文中详细分析了 IGBT 和二极管的开路故障和短路故障类型, 采用电路—电磁场—机械场间接耦合有限元方法研究电磁暂态下高频变压器绕组受力变形问题。以一台 200 kVA、10 kHz 高频变压器为例, 首先计算并测量短路条件下高频变压器的短路电压百分比和电抗值, 验证仿真模型及其电磁参数设置的有效性; 然后通过场—路耦合方法获得 16 种故障类型下的电流波形、绕组电磁力、总形变量和应力分布。结果表明: 故障状态下绕组最大电磁力、最大应力和最大形变量激增, 分别达到了 145 N、0.624 5 MPa 和 1.23 μm 。文中研究可以为大功率高频变压器的结构设计和故障分析提供依据。

关键词: 高频变压器; 故障状态; 磁机械耦合法; 电磁力; 绕组变形

Calculation and Analysis of Mechanical Characteristics of High-frequency Transformer Winding Based on Magneto-mechanical Coupled Method

CHEN Bin^{1,2}, CHEN Jian^{1,2}, WAN Nina³, WANG Shuaibing⁴, TANG Bo^{1,2}, HUANG Li^{1,2}

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Yichang Electric Company State Grid Hubei Electric Power Company, Hubei Yichang 443002, China; 4. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Magnetic coupling DC/DC converter based on high-power high-frequency transformer is the core equipment to realize large-scaled DC source interconnection and megawatt DC voltage conversion. Its working current is large, and the winding current surges in the fault state of converter switching devices, which leads to serious stress deformation of high-frequency transformer windings. In this paper, the types of open-circuit faults and short-circuit faults of IGBT and diode are analyzed in detail, and the finite element method of indirect coupling of circuit-electromagnetic field-mechanical field is used to study the stress deformation of high-frequency transformer windings in electromagnetic transient state. Taking a 200 kVA and 10 kHz high-frequency transformer as an example, the short-circuit voltage percentage and reactance value of the high-frequency transformer under short-circuit condition are calculated and measured to verify the effectiveness of the simulation model and its electromagnetic parameter setting. Then, the current waveform, the winding electromagnetic force, the general shape variable and the stress distribution under 16 fault types were obtained by the field-circuit coupling method. The results show that the maximum electromagnetic force, the maximum stress and the maximum deformation of the winding surge up to 145 N, 0.624 5 MPa and 1.23 μm , respectively. The research in this paper can provide basis for structural design and fault analysis of high-power high-frequency transformer.

Keywords: high frequency transformer; fault state; magneto-mechanical coupled method; electromagnetic force; winding deformation

0 引言

电力电子变压器(power electronic transformer, PET)将电压变换、能量控制、动态无功补偿等功能集于一身, 是未来新能源并网及交直流输配电系统互联的重要接口设备^[1-3]。高频变压器是 PET 中 DC/DC 变换器电磁耦合环节的关键部件, 起着电气隔离和电压变换的作用^[4-5]。高频变压器两端连接着电力电子电

路, 电力电子电路的不同故障类型会导致不同的故障电流^[6-7]。据统计, IGBT 和二极管的开路故障和短路故障是电力电子装置中常见的故障, 变换器系统中约 38% 的故障是由开关器件故障引起^[8]。在大功率应用中, 高频变压器工作电流较大, 一旦发生故障, 电流激增, 如果绕组短路强度不够可能会引起高频变压器绕组的变形甚至损坏事故^[9]。因此, 亟需对电磁暂态下高频变压器的绕组振动特性进行研究。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(52107006); 湖北省自然科学基金面上项目(2021CFB149); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20201202)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation(52107006), Hubei Provincial Natural Science Foundation Surface Project(2021CFB149), Science and Technology Research Project(Q20201202).

现有变压器绕组电磁力计算方法主要可归纳为两类：解析法和有限元法。比如，2012年王录亮采用洛伦兹力公式求解绕组的短路电磁力，并在相应的预应力下计算了绕组的电磁力和振动位移^[10]；2014年EBRAHIMI B M提出了变压器绕组幅向电磁力和轴向电磁力的解析计算方法，通过有限元仿真对该方法进行了验证^[11]；2015年孙昕引用J-A磁滞数学模型，即考虑变压器铁心剩磁的情况下，计算了其在短路电流冲击下的绕组静态电磁力分布和绕组强度^[12]。由于有限元法能够考虑复杂的绕组结构，铁心的非线性特性以及不平衡安匝分布等情况，目前被广泛应用于分析故障状态下变压器绕组受力和变形问题^[13]。比如，2013年GUIMARAES R针对变压器绕组倾斜失稳问题，采用三维有限元分析方法，研究了绕组的受力特点^[14]；2014年BAKSHI A采用漏磁场轴对称的有限元分析方法计算出漏磁场及绕组电磁力，分析了绕组的稳定性^[15]；2014年赵志刚通过有限元法分析了变压器副边绕组电磁线尺寸、电磁线临界屈服强度、辐向宽度及撑条对变压器抗短路能力的影响^[16]；2016年AHN H M建立了轴对称非线性瞬态涡流场的有限元模型，并对变压器短路工况下和空载合闸的瞬态电磁场进行仿真分析，得出变压器漏磁场的变化规律和电磁力的分布曲线^[17]；2018年兰生采用场—路耦合分析方法计算了绕组的短路电流和漏磁场，得到绕组短路状态下的辐向电磁力分布，并在此基础上对绕组结构稳定性进行评估和分析^[18]；2019年Park通过有限元法研究了变压器不同分接状态下的短路问题，并对仿真结果进行对比分析，研究结果对变压器结构设计具有一定的参考意义^[19]。上述研究为大功率高频变压器绕组振动特性分析提供了参考。

文中针对一台额定容量为200 kVA，额定工作频率为10 kHz的高频变压器，搭建了其三维仿真模型和电路模型，并将仿真结果与短路实验进行对比，验证仿真模型及其电磁参数设置的有效性。根据已建立的模型，考虑了16种可能出现在DAB变换电路中的故障类型，分析了暂态过程中DAB变换器的运行状态。最后，通过场路顺序耦合的方法分析并对比了移相控制下和故障状态下的绕组磁密、绕组电磁力、总形变量以及应力的分布，为大功率高频变压器的结构设计和故障分析提供依据。

1 高频变压器场—路耦合分析

1.1 高频变压器工作电路及激励波形

DAB变换器电路拓扑结构见图1，由两个有源全桥、一台高频变压器及并联电容 C_1 、 C_2 构成^[20]。图1中：变压器变比为 $n:1$ ； L_σ 为归算至高频变压器输入侧的漏电感，是移相控制方式下实现零电压开关技术的关键参数； U_{in} 和 U_o 为变换器输入侧、输出侧的直流电压； u_{AB} 和 u_{ab} 为输入侧全桥和输出侧全桥的逆变输出电压，两者的相位差为 φ 。

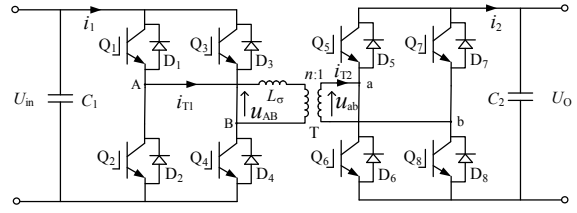


图1 DAB变换器拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of DAB converter

在正常运行时，变换器两侧的开关管由占空比为50%的脉冲驱动，通过控制两侧开关管的驱动信号即可控制两侧逆变输出电压的相位差 φ ，定义功率由 U_{in} 侧向 U_o 侧流动为正方向，当 $\varphi > 0$ 时，功率传输为正， $\varphi < 0$ 时，功率传输为负，通过控制 φ 就可以改变功率传输的大小和方向。正常工作时逆变输出电压 u_{AB} 、 u_{ab} 和原边绕组电流 i_{T1} 以及输出电流 i_2 的波形见图2。

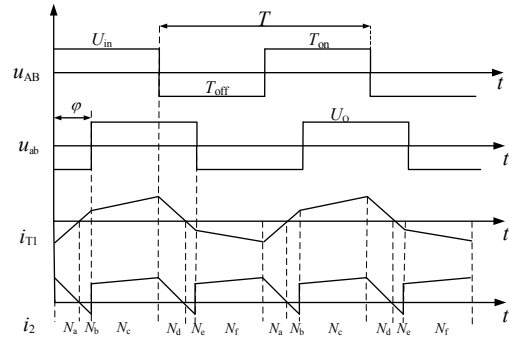
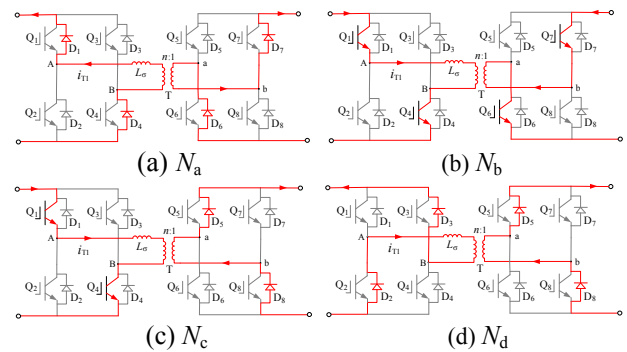


图2 变换器电压和电流波形

Fig. 2 Converter voltage and current waveforms

由图2可知，原边绕组电流 i_{T1} 为分段线性波形，一个周期内的电流波形可以被划分为6部分。这说明在正常运行情况下，DAB变换电路有6种不同的工作状态，对应的编号为 N_a - N_f ，见图3。图3(a)-(f)分别表示DAB变换电路在6种不同工作状态下各个开关器件的导通和关断情况。



(a) N_a

(b) N_b

(c) N_c

(d) N_d

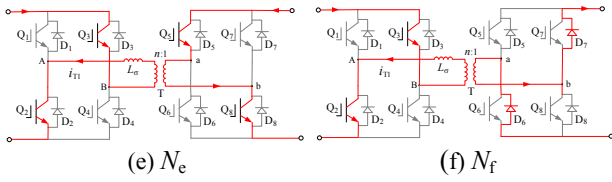


图3 变换器 6 种不同工作状态

Fig. 3 Six different working states of converter

1.2 电路—电磁场—机械场耦合计算方法

研究高频变压器绕组在故障下的电磁特性和结构力学特性涉及到多物理场的耦合计算。电路模型和仿真模型电磁参数相同，电路模型的电压电流波形是磁场计算的激励；磁场和机械场的计算模型尺寸相同，电磁力是机械场计算的激励，实际的耦合计算流程见图 4。在磁场中简化变压器绕组模型，计算出绕组的电动力体密度，在机械场中利用计算出的电动力体密度作为激励，计算绕组在电磁力作用下的结构变化和应力分布。

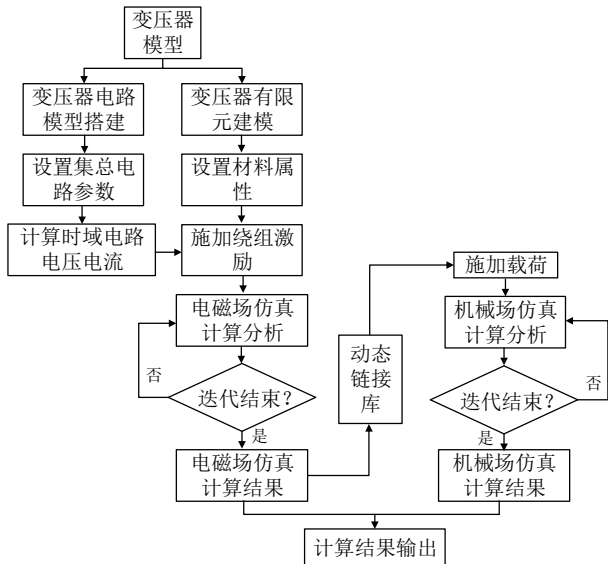


图 4 场—路耦合计算流程

Fig. 4 Field-circuit coupling calculation flow

根据磁路耦合原理对高频变压器进行电磁场分析，求解出空间的磁场分布，并作为求解绕组电磁力的基础，磁路耦合模型见图 5。

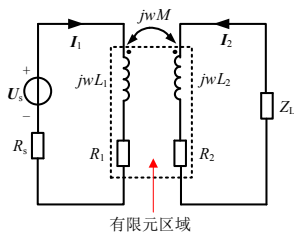


图 5 磁路耦合模型

Fig. 5 Magnetic circuit coupling model

在磁场计算中，控制方程为^[21]

$$\begin{cases} \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \mathbf{B}) = \mathbf{J}_e \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{J}_e = \frac{NI}{S} \mathbf{e}_{\text{coil}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： \mathbf{A} 为矢量磁位； μ_0 为真空磁导率； μ_r 为相对磁导率； \mathbf{J}_e 为绕组电流密度； N 为绕组匝数； I 为绕组电流； S 为绕组横截面积； \mathbf{e}_{coil} 为电流方向。

在电路计算中，平衡方程为

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = R_s \mathbf{I}_1 + (R_1 + j\omega L_1) \mathbf{I}_1 + j\omega M \mathbf{I}_2 \\ 0 = Z_L \mathbf{I}_2 + (R_2 + j\omega L_2) \mathbf{I}_2 + j\omega M \mathbf{I}_1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中： \mathbf{U}_s 为电源电压； R_s 为电源内阻； \mathbf{I}_1 、 \mathbf{I}_2 分别为原、副边绕组电流； Z_L 为负载阻抗； M 为原、副边绕组互感。

根据洛伦兹公式可知，变压器绕组电磁力大小由瞬态电流和所处空间的漏磁场强度决定^[22]。因此，文中利用有限元仿真软件计算绕组的瞬态电流和漏磁通密度，并通过场计算器估计了变压器绕组中的瞬态电磁力。绕组电磁力表示为

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (3)$$

式(3)中： V 为线圈载流导体的体积； \mathbf{B} 为漏磁通密度； \mathbf{J} 为线圈中的电流密度。

瞬态磁通密度和漏磁通密度取决于铁心的磁化特性，特别是发生故障时，故障电流导致泄漏磁通密度相比于稳态运行时大幅增加。漏磁通密度的辐向分量和轴向分量表示为

$$\begin{cases} B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z} \\ B_\phi = 0 \\ B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\phi}{\partial r} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中： B_r 、 B_ϕ 、 B_z 分别为漏磁通密度的各个分量； A_ϕ 是矢量磁位。

当漏磁通密度分解为其辐向和轴向分量时，相应地把变压器绕组电磁力分解为辐向电磁力 F_r 和轴向电磁力 F_z 两个分量^[23]。

$$\begin{cases} F_r = \int_V (J_\tau B_z) dV \\ F_z = \int_V (J_r B_r) dV \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中： F_r 和 F_z 分别表示绕组辐向电磁力和轴向电磁力； B_r 和 B_z 分别表示辐向漏磁通密度和轴向漏磁通密度； J_τ 为沿线圈切向方向上的电流密度。

变压器绕组的变形量在瞬态电磁力的作用下是变化的，一般研究在电磁力最大时刻的绕组的结构变化特性，只采用静力学分析。由经典力学理论可知，物体的动力学方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (6)$$

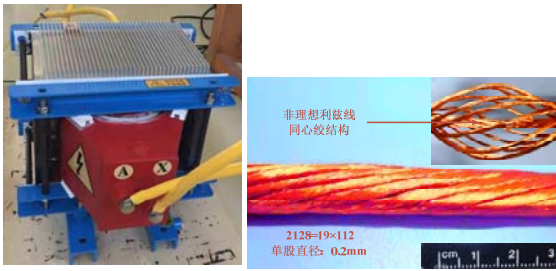
式(6)中： M 为质量矩阵； C 为阻尼矩阵； K 为刚度矩阵； $F(t)$ 为力矢量； \ddot{x} 为加速度矢量； \dot{x} 为速度矢量； x 为位移矢量。而在静力学的结构分析中，与时间 t 相关的矢量都被忽略，于是被简化为

$$Kx = F(t) \quad (7)$$

2 高频变压器模型与实验验证

2.1 高频变压器模型建立

文中研究的高频变压器额定容量为 200 kVA，额定工作频率为 10 kHz，原、副边绕组额定电压为 1 kV，高频变压器样机见图 6(a)。原副边绕组的层数均为 1 层，每层绕组包含有 7 匝方形利兹线。利兹线的尺寸为 11.35 mm×11.35 mm，股数为 2128 股，单股直径为 0.2 mm，绞合方式为同心绞，见图 6(b)，部分具体参数见表 1。



(a) 样机实物 (b) 方形利兹线

图 6 高频变压器模型

Fig. 6 High frequency transformer model

表 1 高频变压器模型主要参数

Table 1 Main parameters of HFT models

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	200	工作频率/kHz	10
绕组电压/V	1 000	功率密度/(MW·m ⁻³)	8
效率/%	99.45	最大温度/°C	120
漏感参数/μH	13.6	占空比	1
移相角/rad	0.142 8	匝数比	1 : 1
铁心材料	纳米晶	水平绝缘/mm	12.36
垂直绝缘/mm	24.175	窗口高度/mm	153.6

采用计算机采样伏安法测量纳米晶铁心在频率为 10 kHz、磁密区间为 0.1~1.1 T 的磁滞回线和损耗密度，测量结果见图 7。采用 TD8210 软磁直流测量系统，利用模拟冲击法测量纳米晶铁心的基本磁

化曲线，测量结果见图 8。

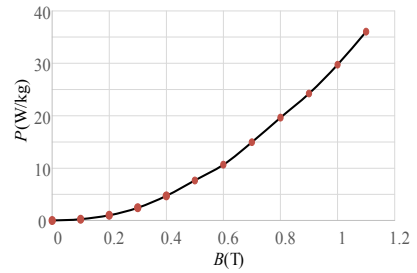


图 7 纳米晶铁心损耗曲线

Fig. 7 Loss curve of nanocrystalline core

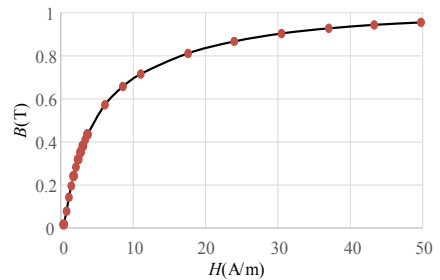


图 8 纳米晶铁心磁化曲线

Fig. 8 Magnetization curve of nanocrystalline core

高频变压器仿真模型主要由铁心、原边绕组、副边绕组、环氧树脂、撑条、夹件等组成。根据变压器实际结构尺寸，采用 Ansys/Maxwell 有限元仿真软件建立高频变压器三维模型，见图 9。高频变压器绕组导体为利兹线，其单股直径小、股数多、绞合结构复杂。为了降低建模难度、减少仿真时间同时保证计算精度，引入填充系数将利兹线等效为等面积的方形导体，等效后方形导体电导率 $\sigma_{\text{eff}} = 1.85 \times 10^7 \text{ S/m}^{[24]}$ 。

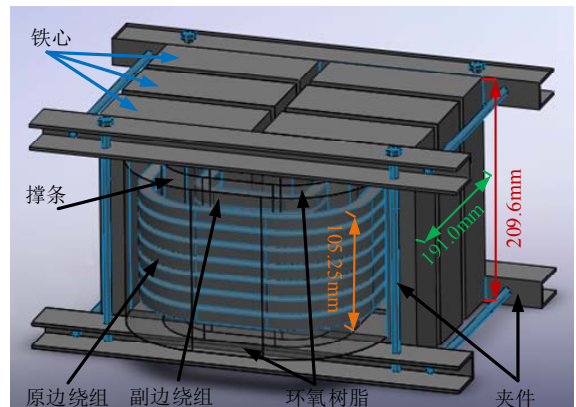


图 9 三维仿真模型

Fig. 9 Three-dimensional simulation model

2.2 短路漏电抗测量结果与仿真结果对比

搭建的高频变压器实验测量平台见图 10，以信号发生器配合功率放大器作为激励源。在变压器副边绕组施加频率为 10 kHz、有效值为 30.008 3 A 的正弦电流，原边绕组短路，副边绕组实验电压和电流波形见图 11，短路电压百分比测量值为 19.52%，

电抗测量值为 $0.9755\ \Omega$ 。

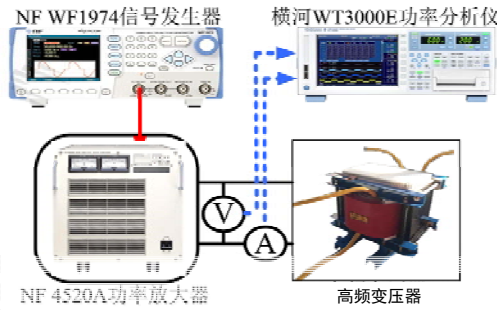
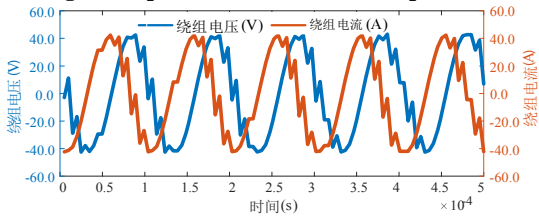
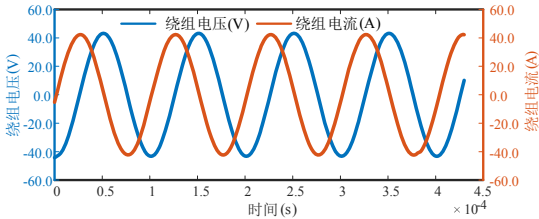


图 10 实验测量平台

Fig. 10 Experimental measurement platform



(a) 电压和电流波形测量结果



(b) 电压和电流波形仿真结果

图 11 短路条件下电压和电流波形测量结果和仿真结果

Fig. 11 Measured and simulated voltage and current waveforms under the short-circuited condition

为了验证上述瞬态场—路耦合有限元数值计算方法的合理性, 以及高频变压器仿真模型、材料参数设置的正确性, 按照上述给出的短路试验条件进行仿真分析, 计算出高频变压器在短路条件下的电压和电流波形、电抗值, 并与相应的实验测量结果进行对比。根据图 4 给出的场—路耦合计算流程, 计算时间步长设置为 $2\ \mu\text{s}$, 计算时间为 $1\ \text{ms}$ 。依据图 7、8 的纳米晶合金的损耗曲线和磁化曲线对铁心材料属性进行设置。将变压器原边绕组短路, 在副边绕组施加激励。高频变压器漏磁场分布见图 12。由图 12 可知, 由于邻近效应的影响, 短路条件下原副边绕组之间区域的漏磁场强度最大。副边绕组仿真电压和电流波形见图 11(b)。

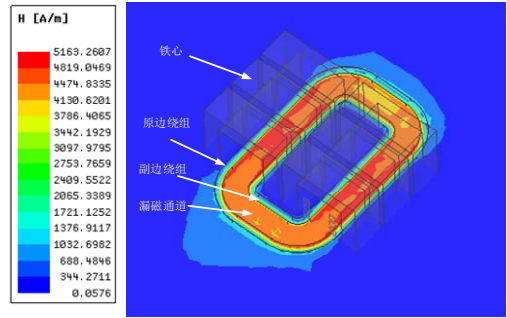


图 12 高频变压器漏磁场分布

Fig. 12 Leakage magnetic field distribution of high frequency transformer

根据式(8)计算出短路条件下短路电压百分比和电抗仿真值分别为 19.64% 、 $0.982\ \Omega$, 与测量值之间的偏差分别为 0.62% 和 0.67% , 结果见表 2。上述结果验证了文中利兹线等效方法的有效性, 以及三维仿真模型的准确性。

表 2 实验值与仿真值对比

Table 2 Comparison between experimental value and simulation value

参数	实验值	仿真值	误差/%
短路电流有效值/A	30.008 3	30.008 2	0.00
短路电压有效值/V	30.350 4	30.536 8	0.61
短路电压百分比/%	19.52	19.64	0.62
电抗值/ Ω	0.975 5	0.982 0	0.67

$$\begin{cases} U_k \% = \frac{U_k}{U_N} \\ X_k = \frac{U_N^2 \cdot U_k \%}{S_N} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: U_k 为短路电压; U_N 为额定电压; S_N 为额定容量; $U_k\%$ 为短路电压百分比; X_k 为短路电抗。

3 高频变压器绕组力学特性分析

3.1 DAB变换电路故障类型

首先, 文中采用 MATLAB/Simulink 搭建的 DAB 变换电路见图 13, 电路参数见表 3, 计算出移相控制条件下变压器的电压和电流波形。根据 2.2 节的测量得到的电抗, 得到 $10\ \text{kHz}$ 时漏电感测量值为 $13.6\ \text{mH}$ 。输入侧全桥和输出侧全桥的逆变输出电压为方波, 两者的相位差 $\varphi=0.1428\ \text{rad}$, 高频变压器的电压和电流波形见图 14。

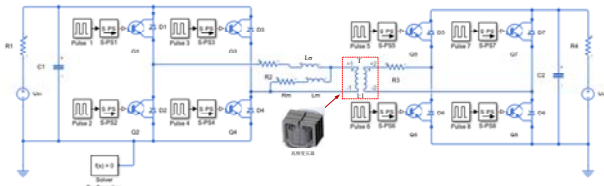


图 13 DAB 变换器电路图

Fig. 13 Circuit of DAB converter

表 3 DAB 变换器参数

Table 3 The parameters of DAB converter

参数	数值	参数	数值
开关频率(1/T _f)/kHz	10	激磁电阻 R _m /kΩ	143
原边绕组电阻 R _{HV} /Ω	0.97	激磁电感 L _m /mH	18.5
副边绕组电阻 R _{LV} /Ω	0.97	输入侧电容 C ₁ /mF	900
漏电感 L _σ /mH	13.6	输出侧电容 C ₂ /mF	900

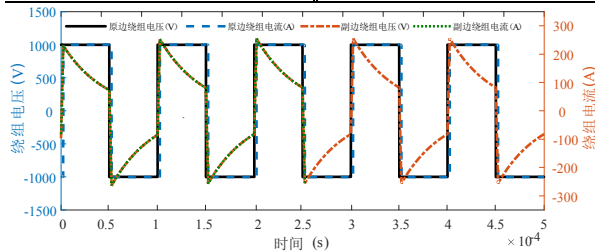


图 14 移相控制下变压器电压电流波形

Fig. 14 Voltage and current waveform of transformer under phase-shift control

然后,分析常见的 DAB 变换器的故障类型,得到各种故障条件下高频变压器的电压电流波形。IGBT 和二极管的短路故障和开路故障是电力电子设备中常见的故障类型。据估计,DAB 变换系统有 38%的故障由开关器件(如 IGBT、二极管等)故障导致的。因此,本文通过已建立的场-路耦合模型,考虑 16 种可能出现在 DAB 变换电路中的故障类型。在这每种故障状态下,流过变压器原边和副边的故障电流峰值的仿真结果见表 4。表 4 中,电流的正负代表电流的方向,以图 1 中所示原边电流 i_{T1} 和副边电流 i_{T2} 的方向为正方向。

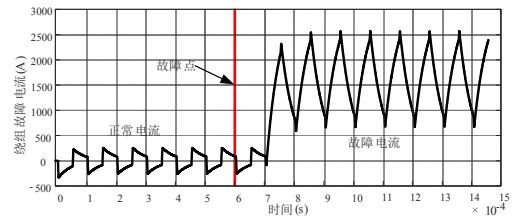
表 4 故障类型及故障电流峰值

Table 4 Fault type and peak value of fault current

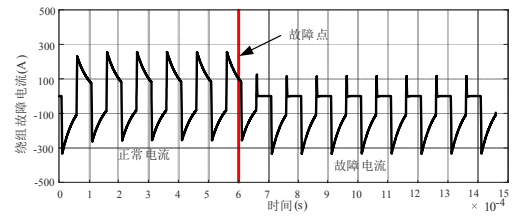
故障类型	i_{T1}/A	i_{T2}/A	故障类型	i_{T1}/A	i_{T2}/A
Q ₁ 短路	1 790	1 787	Q ₁ 、Q ₃ 短路	1 192	1 189
Q ₂ 短路	-1 790	1 786	Q ₁ 、Q ₄ 短路	2 568	2 564
Q ₃ 短路	-1 790	-1 786	Q ₂ 、Q ₃ 短路	-2 556	-2 553
Q ₄ 短路	1 790	1 787	Q ₁ 、Q ₃ 开路	257	254
Q ₁ 开路	-334	-330	Q ₁ 、Q ₄ 开路	-334	-331
Q ₃ 开路	335	332	Q ₁ 短路 D ₃ 开路	314	311
D ₁ 开路	322	319	Q ₁ 短路 D ₄ 开路	1 789	1 786

D ₃ 开路	-320	316	D ₁ 、D ₃ 开路	321	317
-------------------	------	-----	-----------------------------------	-----	-----

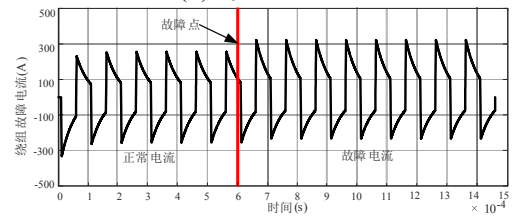
按照不同故障类型可以将 DAB 变换电路功率器件故障分为:①开关管或二极管短路,以 Q₁、Q₄ 或者 D₁、D₄ 短路为例,由图 3 可知,在开关管 Q₁ 和 Q₄ 导通期间,DAB 变换电路正常工作,但是当开关管 Q₂ 和 Q₃ 导通时,会发生开关管 Q₁ 和 Q₂ 桥臂直通,直流电容 C₁ 会通过直通桥臂放电,产生很大的过电流,故障电流见图 15(a);②开关管开路,以 Q₁ 开路为例,在开关管 Q₂ 和 Q₃ 导通期间,DAB 电路正常工作,而在开关管 Q₁ 和 Q₄ 导通期间,由于开关管 Q₁ 开路,此时 DAB 变换电路的 N_b 和 N_c 两种工作状态不能正常工作,使得电路在一个周期内的工作状态发生了改变,由于其他功率器件正常工作,该故障不会对输出侧电压产生太大的影响,但是其它开关管或二极管有可能会承受过电流或过电压,故障电流见图 15(b);③二极管开路,以二极管 D₁ 开路为例,见图 3,DAB 变换电路 5 种工作状态 N_b-N_f 均正常工作,只是在 N_a 工作状态下,无法通过 D₁ 和 D₄ 续流,因此该故障会影响开关管 Q₁ 软开关的实现,甚至可能会影响高频变压器的稳定运行,故障电流见图 15(c)。综上所述,可以发现短路故障对变换电路造成过流冲击比较大,而对于开路故障可能不会造成变换电路停止运行,且能够在正常工作状态下运行一段时间,但也可能会造成开关管或二极管承受过电压或过电流。



(a) Q₁、Q₄ 短路故障



(b) Q₁ 开路故障



(c) D₁ 开路故障

图 15 故障电流波形

Fig. 15 Fault current waveform

由表 4 可知, 在 16 种故障状态下, 故障电流峰值均大于移相控制下变压器绕组的电流峰值(256 A), 见图 14。其中, 最大故障电流峰值出现在 Q_1 、 Q_4 短路故障状态下, 其峰值电流为 2 568 A, 约为正常工况下的 10 倍, 而故障时所产生的绕组电磁力又与绕组电流的平方成正比, 因此故障电磁力可达到正常时的数百倍以上。

3.2 移相控制下绕组力学特性分析

3.2.1 磁场计算结果

基于上述所建立的三维仿真模型和移相控制下的电路模型进行场路耦合有限元仿真, 高频变压器的电压电流激励波形见图 14。为获得沿变压器绕组高度方向变化的漏磁场分布, 需要在变压器绕组上取一条线段, 通过 Ansys/Maxwell 仿真软件的求解绕组漏磁场的轴向分量和辐向分量, 见图 16。通过绕组中漏磁场的分布趋势可以看出, 无论是原边绕组还是副边绕组, 辐向漏磁通密度均是由绕组中部向两端逐渐递增, 且方向相反; 而轴向漏磁通密度则是由绕组中部向两端逐渐递减, 且方向相同。这是由于在绕组中部以轴向漏磁场为主, 而绕组端部出现较大弯曲且存在端部效应, 使得轴向漏磁分量降低, 辐向漏磁分量增加所导致。

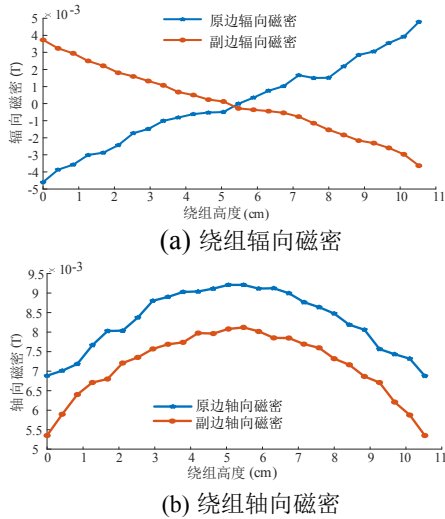


图 16 高频变压器绕组磁密分布

Fig. 16 Magnetic density distribution of high frequency transformer windings

根据式(5)可知, 绕组电磁力是由漏磁通密度和电流共同作用形成的, 且轴向电磁力由辐向漏磁通密度引起, 幅向电磁力由轴向漏磁通密度引起, 因此绕组电磁力与对应漏磁通密度的分布规律基本一致。辐向电磁力在绕组中部最大, 分别为 1.65、1.64 N; 而轴向电磁力在绕组端部最大, 分别为 0.92、1.21 N, 见图 17, 原、副边绕组从上往下依次编号为 1-7。

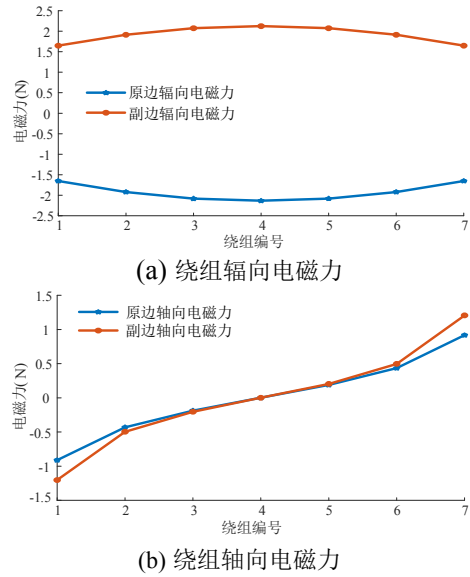


图 17 高频变压器绕组电磁力分布

Fig. 17 Electromagnetic force distribution of high frequency transformer windings

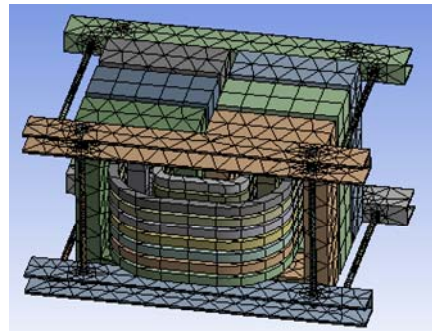
3.2.2 机械场计算结果

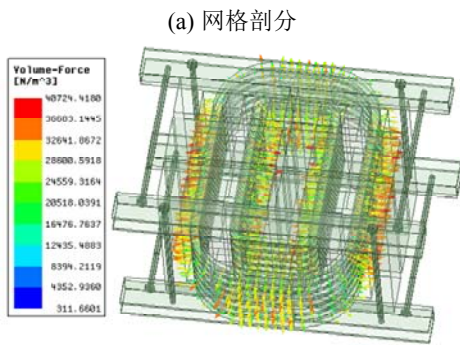
将电流峰值($t=0.1$ ms)时的最大电磁力体密度作为机械场计算的载荷, 采用顺序耦合的方法把电磁力体密度耦合到 Ansys/Workbench 中的机械场, 进行绕组的静力学分析, 并根据表 5 设置材料属性参数。对于边界条件, 将变压器下部夹件处设定其位移为零, 即固定约束, 来模拟变压器正常放置时绕组的形变情况。绕组的网格节点数为 60 425 个, 单元数为 22 371 个, 绕组、撑条、夹件以及环氧树脂均采用 sweep 方法进行剖分, 总体网格质量 0.75, 满足网格质量要求, 计算结果最终收敛。变压器绕组电磁力体密度和网格剖分见图 18。

表 5 变压器材料属性

Table 5 Transformer material properties

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/Pa
绕组	8 945	0.340	1.10×10^{11}
撑条	1 200	0.316	3.00×10^9
环氧树脂	1 160	0.350	3.78×10^9
夹件	8 055	0.300	1.95×10^{11}



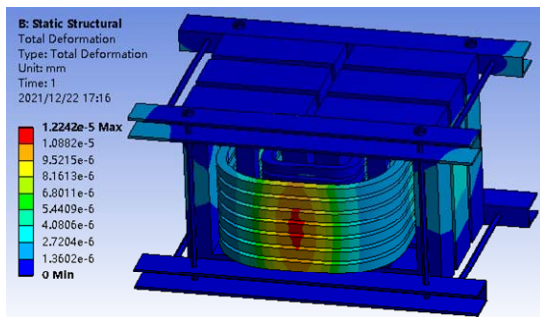


(a) 网格剖分

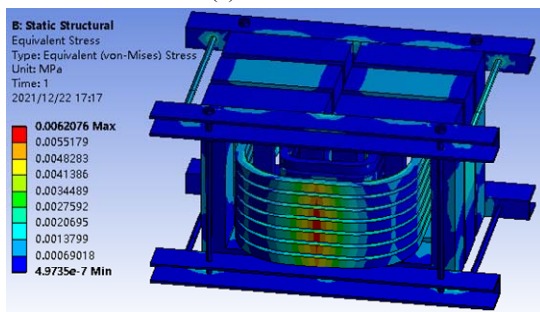
(b) 电磁力体密度

图 18 网格剖分和电磁力体密度

变压器绕组总形变量以及应力分布见图 19。如图 19(a)所示,绕组线圈以辐向变形为主,且绕组的形变基本呈现对称分布。铁心窗口内部绕组由于环氧树脂、铁心、撑条以及夹件的固定作用,其形变量较小,而铁心窗口外部变压器绕组变形较为严重,与应力的分布规律相近。此外,由于受到变压器绕组的受力挤压作用,环氧树脂、铁心、撑条以及夹件等也会产生一定的形变。如图 19(b)所示,绕组的最大应力为 6 207.6 Pa。



(a) 总形变量



(b) 应力分布

图 19 变压器绕组总形变量和应力分布

Fig. 19 Total deformation and stress distribution of transformer windings

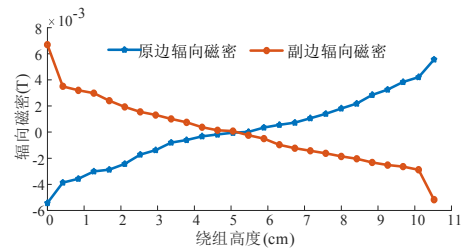
3.3 故障状态下绕组力学特性分析

3.3.1 磁场计算结果

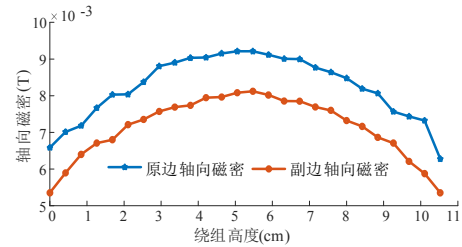
DAB 变换电路发生故障后,电路中流过变压器绕

组的电流会急剧增大,变压器绕组结构可能会因为故障电磁力的冲击而发生形变,因此对绕组承受故障电流的能力进行校核是十分必要的。根据 3.1 节可知,在 Q_1 、 Q_4 短路故障状态下,故障电流峰值最大,此时绕组受到的故障电磁力也将达到最大,因此本文选择对该故障状况下的变压器电磁和力学特性进行研究。

基于上述所搭建的三维仿真模型和电路模型,采用场路耦合的方法,通过控制 Q_1 、 Q_4 的触发脉冲的触发时间,即可实现对开关器件 Q_1 、 Q_4 开短路控制。文中选择在第 6 个周期开始时,使开关器件 Q_1 、 Q_4 同时发生短路故障,此时绕组电流急剧增大,变压器原边绕组中电流波形见图 15(a)。电流达到峰值时的绕组磁密分布见图 20,由此可知当 DAB 变换电路发生故障时,不会影响绕组磁密的分布规律。



(a) 绕组辐向磁密

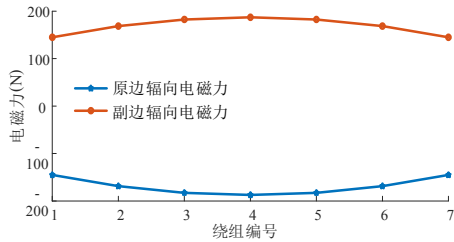


(b) 绕组轴向磁密

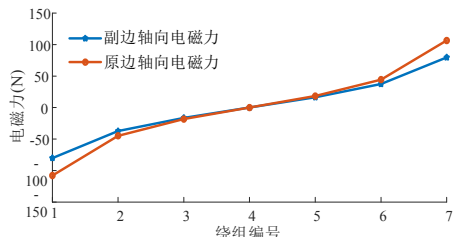
图 20 高频变压器绕组磁密分布

Fig. 20 Magnetic density distribution of high frequency transformer windings

高频变压器绕组电磁力分布见图 21。由图 21 可知,当 DAB 变换电路发生故障时,在故障电流和漏磁场的相互作用下将会使绕组承受非常大的故障电磁力,此时原副边绕组的最大辐向电磁力分别为 145.11、145.08 N,最大轴向电磁力分别为 80.08、107.86 N。过大的辐向电磁力可能会使变压器的绝缘性能受到破坏并导致绕组发生严重变形;而过大的轴向电磁力则会引起撑条与绕组之间松动,并且绕组产生的轴向振动也会加剧松动的趋势,甚至会导致变压器绕组倒塌。



(a) 绕组辐向电磁力



(b) 绕组轴向电磁力

图 21 高频变压器绕组电磁力分布

Fig. 21 Electromagnetic force distribution of high frequency transformer windings

3.3.2 机械场计算结果

将电流峰值($t=1.05\text{ ms}$)时的最大电磁力体密度作为机械场计算的载荷,采用顺序耦合的方法把电磁力体密度耦合到 Ansys/Workbench 中的机械场,进行绕组的静力学分析。故障状态下最大绕组电磁力体密度为正常状况下的 101 倍左右,绕组电磁力体密度见图 22。故障状况下的变压器绕组总形变量以及应力分布见图 23。此时绕组最大总形变量为 1.23 m ,约为正常时的 100 倍;最大应力为 0.6245 MPa ,约为正常时的 101 倍。

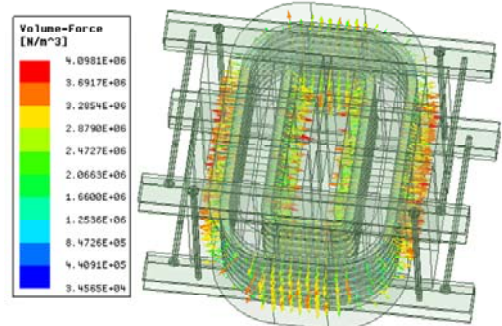
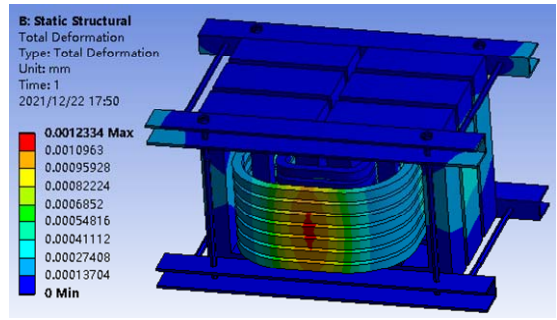
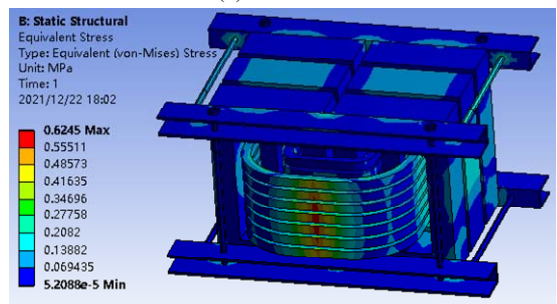


图 22 电磁力体密度

Fig. 22 Electromagnetic force volume density



(a) 总形变量



(b) 应力分布

图 23 变压器绕组总形变量和应力分布

Fig. 23 Total deformation and stress distribution of transformer windings

依据上述电磁场和机械场计算结果,可以为大功率高频变压器的结构设计和故障分析提出以下建议:①铁心窗口外部区域绕组的形变量较大,因此需要严格做到撑条和环氧树脂受力均匀,确保原、副边绕组充分压紧,以提高大功率高频变压器绕组的抗故障能力;②变压器绕组以辐向变形为主,而副边绕组受到辐向电磁力作用后,会向铁心方向压缩,所以需要加强副边绕组的支撑,确保其稳定性,常用的方法是增加撑条数量或者使用加厚的纸筒作为骨架;③采用一种配置有故障检测电路的 DAB 变换器,包括 DAB 变换器模块、微处理器模块、PWM 输出模块、电压检测单元、电流检测单元、过压保护模块、过流保护模块、故障信号传输电路以及故障保护动作电路等,以提高 DAB 变换器的可靠性。

3.4 结果比较与分析

在上述两种变压器运行状态下,变压器原边、副边绕组的辐向电磁力、轴向电磁力、总形变量以及应力的最大值见表 6。由表 6 可知,在 Q_1 、 Q_4 短路故障状态下的幅向电磁力、轴向电磁力、总形变量以及应力均远大于移相控制下的最大值。在巨大的故障电磁力和应力作用下,高频变压器受到机械应力的严峻考验,可能会导致绕组的变形甚至损坏。因此,为了保证变压器的使用寿命以及供电系统的安全可靠性,需要根据变压器发生故障时所受电磁力与应力的计算结

果来合理设计绕组夹紧装置，以提高变压器绕组的抗故障能力。

表 6 变压器绕组最大电磁力

Table 6 Maximum electromagnetic force of transformer winding

状态	绕组类别	最大辐向电磁力/N	最大轴向电磁力/N	绕组最大形变量/mm	绕组最大应力/Pa
移相控制下	原边绕组	1.65	0.92	12.24	6 207.6
	副边绕组	1.64	1.21		
故障状态下	原边绕组	145.11	80.08	1.23×10 ³	0.624 5×10 ⁶
	副边绕组	145.08	107.86		

4 结论

文中针对大功率高频变压器进行了电路—磁场—机械场的耦合仿真分析，全面考虑了 DAB 变换电路可能出现的各种故障类型，并分析了暂态过程中 DAB 变换器的运行状态和变压器绕组的受力情况、总形变量和应力分布，结论如下：

1)采用电路—电磁场—机械场顺序耦合有限元方法，实现了移相控制和各种故障类型下绕组区域磁通密度、电磁力、总形变量以及应力分布；

2)开关管短路故障对变换电路造成过流冲击比较大，开关管 Q₁、Q₄短路故障状态下故障电流峰值最大，此时绕组受到的电磁力将达到最大；

3)高频变压器绕组在受到故障电流冲击后，绕组线圈上承受的电磁力和形变激增，均为正常工况下的 101 倍，绕组总形变量幅值变大，其中铁心窗口外部原边绕组变形较为严重。

参考文献：

[1] 曾 嵘，赵宇明，赵 彪，等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报，2018，38(23): 6791-6801.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801.

[2] 周 秀，朱洪波，马云龙，等. 不同模型下变压器绕组短路力学特性对比分析[J]. 高压电器，2022，58(1): 148-154.
ZHOU Xiu, ZHU Hongbo, MA Yunlong, et al. Comparative analysis of short circuit mechanical characteristics of transformer winding under different models[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 148-154.

[3] 潘 超，陈 祥，蔡国伟，等. 基于小波包尺度—能量占比的变压器三相不平衡绕组振动特征辨识[J]. 仪器仪表

学报，2020，41(4): 129-137.

PAN Chao, CHEN Xiang, CAI Guowei, et al. Identification of winding vibration characteristics of three-phase unbalanced transformer based on scale-energy ratio of wavelet packet[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 129-137.

[4] 陈 彬，陈 健，唐 波，等. 高频变压器漏电感参数灵敏度分析及其半经验模型[J]. 电机与控制学报，2021，25(10): 97-111.

CHEN Bin, CHEN Jian, TANG Bo, et al. Sensitivity analysis and semiempirical model of leakage inductance parameters of high frequency transformer[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(10): 97-111.

[5] 王威望，刘 莹，何杰峰，等. 高压大容量电力电子变压器中高频变压器研究现状和发展趋势[J]. 高电压技术，2020，46(10): 3362-3373.

WANG Weiwang, LIU Ying, HE Jiefeng, et al. Research status and development of high frequency transformer used in high voltage and large capacity power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3362-3373.

[6] VIRDAG A, HAGER T, HU J, et al. Short circuit behavior of dual active bridge DC-DC converter with low resistance DC side fault[C]//2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Florianopolis: IEEE, 2017: 1-6.

[7] 韩杰祥，张 哲，尹项根，等. 级联型电力电子变压器内部开路故障特征及定位方法研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(19): 6071-6084.

HAN Jiexiang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and location method for internal open circuit fault of cascaded power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6071-6084.

[8] 黄 佩. 大功率中频变压器电磁分析与优化设计[D]. 武汉: 华中科技大学，2018.

HUANG Pei. Electromagnetic analysis and optimal design of high power medium frequency transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.

[9] 潘志城，邓 军，周海滨，等. 特高压多端混合直流输电工程柔直变压器的振动特性研究[J]. 高压电器，2022，58(1): 122-129.

PAN Zhicheng, DENG Jun, ZHOU Haibin, et al. Research on vibration characteristics of flexible DC transformer in UHV multi-terminal hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 122-129.

[10]王录亮. 电力变压器绕组短路力计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学，2012.

WANG Luliang. Calculation on the windings short-circuit

force of power transformer[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.

- [11] BMEBRAHIMI A F S, FAIZ J. Analytical estimation of short circuit axial and radial forces on power transformers windings[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 250-260.
- [12] 孙 昕. 短路与重合闸工况下大容量电力变压器绕组强度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
SUN Xin. The research on winding strength of large power transformer under short circuit and reclosing conditions[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [13] FEYZI M R, SABAH M. Finite element analyses of short circuit forces in power transformers with asymmetric conditions[C]//2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. [S.l.]: IEEE, 2008: 576-581.
- [14] GUIMARIES R, DELAIBA A C, OLIVEIRA J C, et al. Electromechanical forces in transformers caused by inrush currents: an analytical, numerical and experimental approach[J]. Journal of Control Automation & Electrical Systems, 2013, 24(6): 863-872.
- [15] BAKSHI A, KULKARNI S V. Analysis of buckling strength of inner windings in transformers under radial short-circuit forces[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 241-245.
- [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. Analyzing the short-circuit withstanding ability of large power transformer based the FEM method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3214-3220.
- [17] AHN H M, KIM S Y, KIM J K, et al. Numerical investigation for transient electromagnetic force computation of power transformer during short circuit condition[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2016, 52(3): 1141-1149.
- [18] 尹 浩, 苏建徽, 赖纪东, 等. 一种基于解析法的高频铜箔变压器漏感精确计算方法[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 40-46.
YIN Hao, SU Jianhui, LAI Jidong, et al. Accurate calculation method for leakage inductance of high frequency copper foil transformer based on analytic method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 40-46.
- [19] KEUM-HOKIM K, SCONG-YUN S. Study on calculation of short-circuit electromagnetic force in power transformer considering winding tap condition[J]. Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2019, 68(5): 625-633.
- [20] WU Jijun, WANG Hanyu, MA Mingyao, et al. Mode analysis and fault-tolerant method of open-circuit fault for a three-level dual active bridge DC-DC converter[J]. Microelectronics Reliability, 2023 (150): 115100.
- [21] 谢增林, 李柱永, 胡道宇, 等. 基于三维场路耦合方法的超导变压器绕组漏磁场和电流分布研究[J]. 低温与超导, 2016, 44(12): 41-46.
XIE Zenglin, LI Zhuyong, HU Daoyu, et al. Analysis of leakage field and current non-uniformity for HTS transformer windings using three dimension coupled field-circuit approach[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2016, 44(12): 41-46.
- [22] MEBRAHIMI B, SAFFARI S, FAIZ J, et al. Analytical estimation of short circuit axial and radial forces on power transformer windings[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2013, 8(2): 250-260.
- [23] HO S L, LI Y, WONG H C, et al. Numerical simulation of transient force and eddy current loss in a 720 MVA power transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 687-690.
- [24] KAZIMI ER CZUK M. High-frequency magnetic components[M]. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2014.

陈 彬(1989—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、新型电工磁性材料综合磁特性模拟与测量技术的研究(E-mail: chenbin@ctgu.edu.cn)。