

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.010

## 干式变频变压器磁热力的计算与分析

李欣然<sup>1,2,3</sup>, 王建民<sup>1,2,3</sup>, 杜振斌<sup>3</sup>, 刘兰荣<sup>3</sup>, 秦金立<sup>3</sup>, 杨莹<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130; 2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130; 3. 保定天威保变电气股份有限公司河北省输变电装备电磁与结构性能重点实验室, 河北保定 071056)

**摘要:** 磁浮列车牵引供电系统中的输出变压器, 通常在不同频率下运行。为了保证此类变压器的运行可靠性和分析频率变化对其性能参数的影响, 文中对一台干式变频变压器在3种运行工况下的磁热力进行了研究。首先, 在测量3种频率下铁心材料磁特性的基础上, 采用场—路耦合法对各工况下的磁场分布、损耗及短路阻抗进行了计算与对比分析; 然后, 基于有限体积法分别计算了有无谐波影响下的温度分布与热点温升; 最后对其短路性能进行了仿真研究。结果表明, 频率变化对铁心磁密、绕组及硅钢片损耗和短路阻抗具有较明显的影响, 3种运行工况下的磁热力性能满足产品设计要求, 并为今后干式变频变压器的开发设计提供了参考。

**关键词:** 干式变频变压器; 铁心磁特性; 漏磁场; 温度场; 短路力

### Calculation and Analysis of Magnetic-thermal-mechanical Properties of Dry-type Variable Frequency Transformer

LI Xinran<sup>1,2,3</sup>, WANG Jianmin<sup>1,2,3</sup>, DU Zhenbin<sup>3</sup>, LIU Lanrong<sup>3</sup>, QIN Jinli<sup>3</sup>, YANG Ying<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electro-magnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. Hebei Province Key Laboratory of Electromagnetic and Structural Performance of Power Transmission and Transformation Equipment, Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Hebei Baoding 071056, China)

**Abstract:** The output transformer in the traction power supply system of maglev train usually operates at different frequencies. For assuring the operational reliability of this kind of transformer and analyzing the influence of frequency variation on its performance parameters, in this paper the magnetic -thermal-mechanical properties of a dry-type variable frequency transformer under three operating conditions is studied. First, on the basis of measuring the magnetic characteristics of core materials at three frequencies, the magnetic field distribution, loss and short-circuit impedance under each working condition are calculated and compared by using the field-circuit coupling method. Then, the temperature distribution and hot spot temperature rise with or without harmonic influence are calculated respectively based on the finite volume method. Finally, the short-circuit performance is simulated and studied. The results show that the frequency variation has a significant effect on the core magnetic density, winding and silicon steel sheet loss and short-circuit impedance, the magnetic-thermmal-mechanical properties under the three operating conditions meet the design requirements of the product and provide a reference for the development and design of dry-type variable frequency transformer in the future.

**Key words:** dry-type variable frequency transformer; magnetic properties of the iron core; leakage magnetic field; temperature field; short-circuit force

收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2025-09-25

基金项目: 河北省重点研发计划项目资助(V1586309661297)。

Project Supported by Key R & D Program of Hebei Province(V1586309661297).

## 0 引言

磁浮列车牵引供电系统根据运行控制系统的要求对交流系统输出的电压和电流幅值、频率进行实时调节,通过输出变压器对磁浮列车所在的长定子直线电机供电,从而实现对磁浮列车运行速度的精确控制<sup>[1]</sup>。磁浮列车牵引供电系统示意图见图1。输出变压器位于牵引供电系统中变流器后端,该变压器不仅能够进行电压电流的变换来满足列车运行需求,还要能够在不同频率下稳定运行。目前此种变压器主要依赖于进口,而在中国尚处于设计研发阶段<sup>[2]</sup>,因此,公开发表的相关文献也较少。

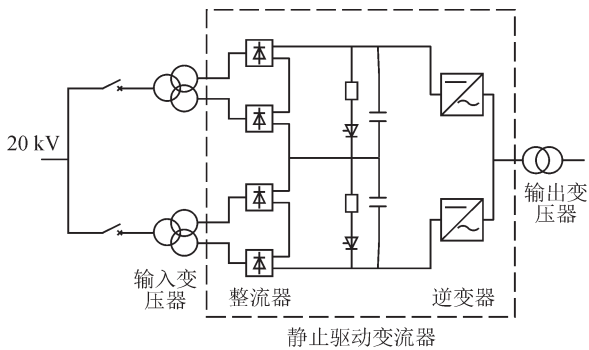


图1 磁浮列车牵引供电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of traction power supply system of maglev train

由于频率变化会影响变压器铁心磁特性、损耗及短路阻抗等性能参数<sup>[3]</sup>,并且在变频过程中所产生的谐波会加剧变压器附加损耗及绕组温升,进而引起绕组可能的局部过热<sup>[4-11]</sup>和抗短路能力不足<sup>[12-18]</sup>等的可靠性问题,因此,为了使磁浮列车牵引供电系统能够安全稳定运行,对干式变频变压器磁热力相关性能进行计算与分析具有重要的实际意义。文中基于对干式变频变压器结构特点及变频运行分析,建立了三维有限元场—路耦合法计算模型<sup>[19]</sup>,测量了不同频率下铁心材料的磁特性,并将测量结果应用到MagNet软件中对干式变频变压器3种频率工况下的绕组漏磁场、损耗及峰值电流下的绕组短路力与机械强度进行了计算分析;在此基础上,利用有限体积法建立了干式变频变压器二维温度场计算模型,并对3种工况下的温度分布与热点温升进行了计算和谐波影响因素的分析。

## 1 计算模型与计算原理

### 1.1 计算模型

分析干式变频变压器容量为3 500 kVA的单相双柱环氧浇注结构,其冷却方式为强迫风冷,器身

布置由内至外依次为铁心、一次侧绕组和二次侧绕组。各绕组采用扁铜线绕制的多层(各4层)圆筒式结构和两柱并联的联结方式。3种运行工况的额定频率分别为56、72、96 Hz。除了额定频率不同外,磁浮列车对于各工况输出电压和电流的幅值要求也不同,因此,为了满足电压、电流变化的要求,需要对二次侧绕组匝数进行调整,其接线原理见图2。通过调整二次侧绕组3个分接头a-x、a-y、a-z来实现3种工况的切换。变压器主要参数见表1。在建立模型时忽略垫块撑条和绝缘等部件。铁心材料按非线性处理,且认为各向同性;根据层式绕组导体布置,认为绕组每层安匝分布均匀,并将绕组每层作为一个分区,共分为8个区,即一次侧绕组由内到外为1、2、3、4区,而二次侧绕组由内到外为5、6、7、8区。计算模型见图3。

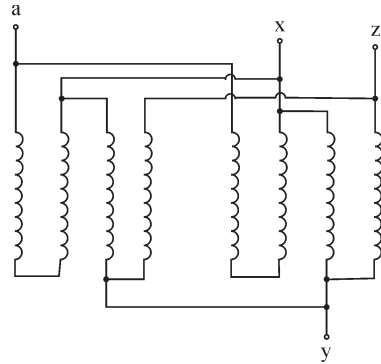


图2 二次侧绕组接线原理图

Fig. 2 Schematic diagram of secondary winding wiring

表1 变压器主要参数

Table 1 Transformer main parameters

分类	工况1	工况2	工况3	
额定频率/Hz	56	72	96	
额定电压/V	3 500	3 500	3 500	
一次侧绕组	额定电流(双柱/单柱)/A	1 000/500	1 000/500	1 000/500
	匝数	61	61	61
	额定电压/V	1 892	2 333	2 778
二次侧绕组	额定电流(双柱/单柱)/A	1 849/924.5	1 500/750.0	1 259/629.5
	匝数	33	41	48

### 1.2 计算原理

根据所研究的变压器铁心及绕组串并联结构特点,利用MagNet软件中场—路耦合计算功能,实现绕组外电路与图3有限元计算模型的自动耦合见图4。对应的场路耦合矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{AA} & \mathbf{K}_{Ai} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{AA} & \mathbf{0} \\ \mathbf{T}_{ic} & \mathbf{T}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{A}$ 为待求解的节点矢量磁位矩阵; $\mathbf{I}$ 为

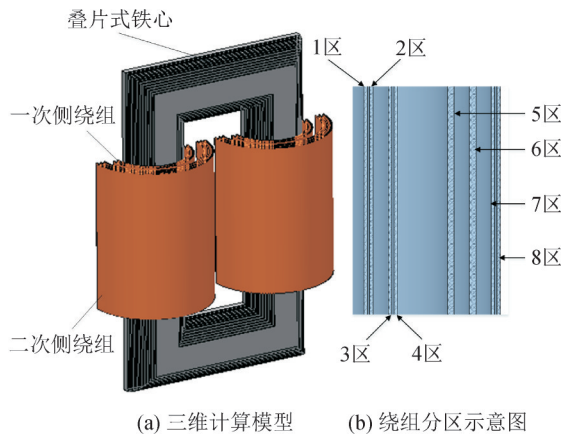


图3 计算模型

Fig. 3 Computational model

待求解各支路电流或感应电流矩阵;  $\mathbf{K}_{AA}$  为  $\mathbf{A}$  的系数矩阵;  $\mathbf{K}_{Ai}$  为  $\mathbf{A}$  与  $\mathbf{I}$  相关的系数矩阵;  $\mathbf{K}_{RR}$  为  $\mathbf{I}$  电阻系数矩阵;  $\mathbf{T}_{AA}$  为  $\mathbf{A}$  的时间相系数矩阵;  $\mathbf{T}_{ic}$  为感应电压和  $\mathbf{A}$  相关的系数矩阵;  $\mathbf{T}_{L}$  为  $\mathbf{I}$  的电感系数矩阵;  $\mathbf{U}$  为外加电压矩阵。

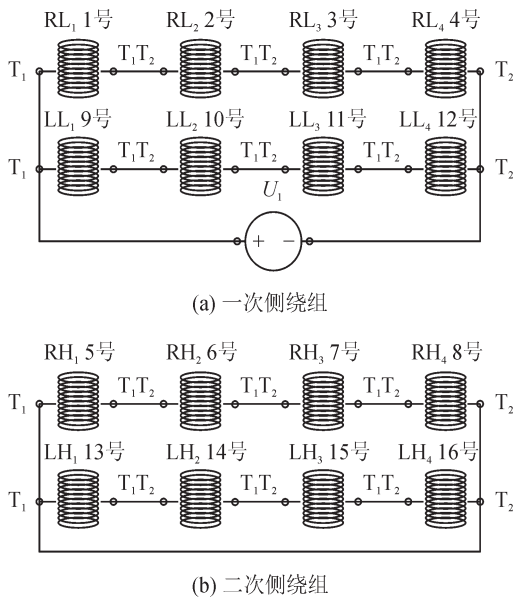


图4 绕组电路连接图

Fig. 4 Winding circuit connection diagram

通过对上述场—路耦合法的矩阵方程进行求解,便可以得到变压器绕组漏磁场分布、磁场能量和短路力等电磁参数。

## 2 磁场及损耗等性能参数的计算分析

### 2.1 不同频率下的铁心磁特性

变压器铁心所用硅钢片为 B23R085。为了计算和分析 3 种工况下的磁场分布及损耗等性能参数,采用单片测量法对其不同频率下的磁特性进行测量。测量系统实物图见图 5。测量过程中将硅钢

片测试样品放置在由磁轭和励磁线圈组成的磁极上,通过在电脑控制端施加不同频率的激励信号并经过功率放大器传输到励磁线圈实现对测试样品的磁化。然后,通过对传感器上的  $H$  线圈和  $B$  线圈的感应电势进行采样,分别得到测试样品的磁化曲线与损耗曲线。

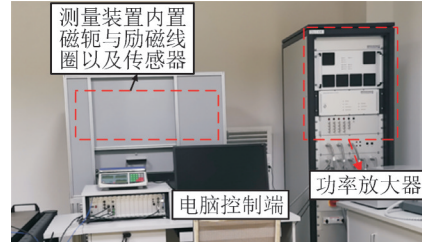


图5 测量系统实物图

Fig. 5 Physical diagram of the measurement system

56、72、96 Hz 3 种频率下的磁化曲线与损耗曲线见图 6。由图 6 可知,3 种频率下硅钢片磁化曲线没有明显的差别,而在相同磁密下硅钢片单位质量的损耗随着频率的升高随之增加且增幅不断扩大。

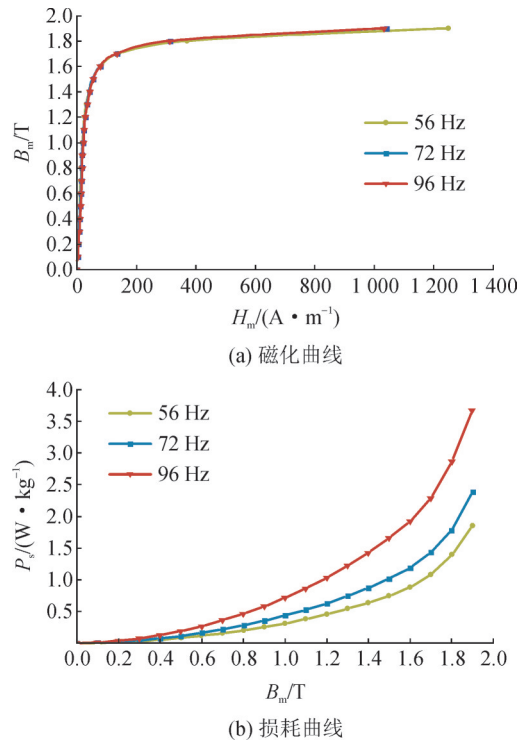


图6 硅钢片不同频率下的磁特性曲线

Fig. 6 Magnetic characteristic curve of silicon steel sheet at different frequencies

### 2.2 磁场分布与短路阻抗计算

将测得的硅钢片磁特性参数输入到 MagNet 软件中,并利用所确定的场—路耦合法对变压器内部漏磁场进行了计算,3 种工况下的漏磁场分布见图 7、8。

由图 7、8 可知,磁力线在绕组端部出现弯曲,导致绕组端部辐向分量增大而轴向分量减小;由于

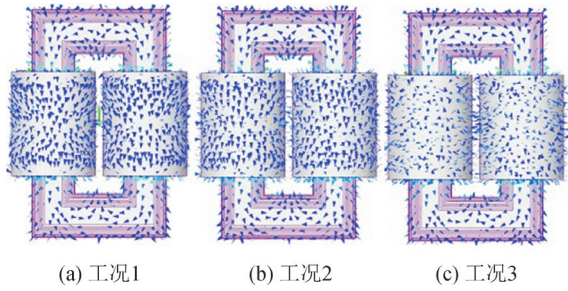


图7 三维漏磁场分布图

Fig. 7 3D Leakage magnetic field distribution map

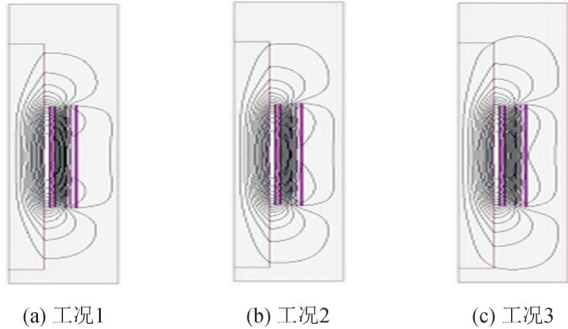


图8 漏磁场截面图

Fig. 8 Cross-sectional view of the leakage magnetic field

3种工况下二次侧绕组匝数的不同,使得相应的漏磁场分布变化比较明显。为了更直观的看到3种工况切换对二次侧漏磁场的影响,给出了二次侧绕组最内侧漏磁通密度沿高度的分布曲线见图9。

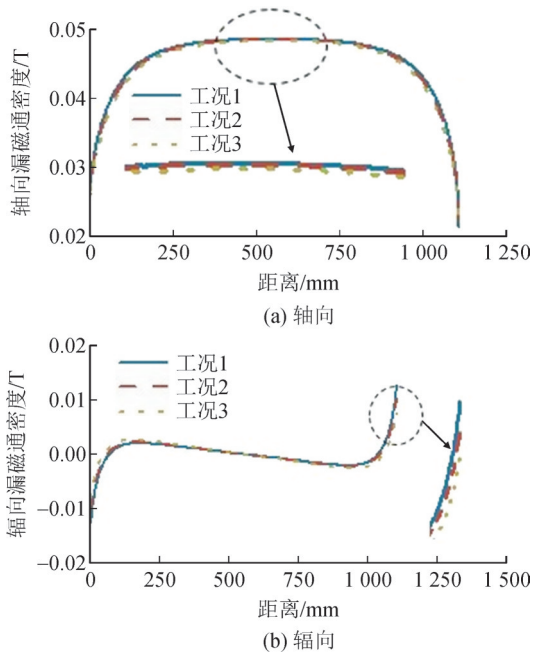


图9 漏磁通密度沿绕组高度方向分布情况

Fig. 9 Leakage flux density distribution along the winding height direction

由图9可知,轴向漏磁通密度在绕组的中部达到最大值,从中间向上下端部延伸逐渐减弱,3种工况下的磁密最大值接近相等,约为0.05 T;而辐向漏

磁通密度在绕组中部较小,向绕组两端逐渐增大;在3种工况下的辐向磁密最大值改变量为37.8%,表明工况切换对二次侧辐向磁密影响较明显。

为了直观的分析频率变化对铁心磁场的影响情况,在外电路一次侧施加额定电压,二次侧开路,采用瞬态场计算,仿真时长设置为0.1 s,步长为0.000 5 s,3种工况分别在0.07、0.055、0.04 s达到稳态,此时各工况下铁心的磁场分布情况见图10。

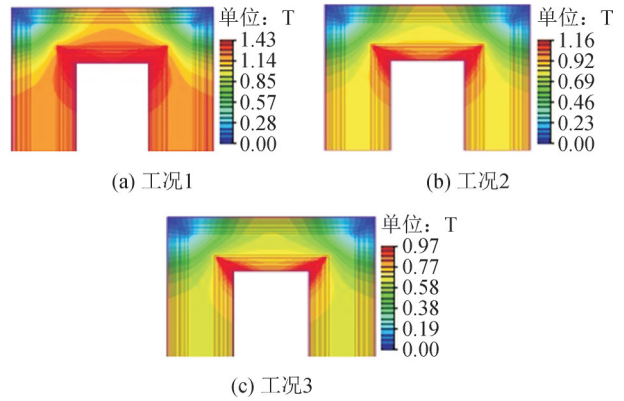


图10 铁心磁场分布云图

Fig. 10 Core magnetic field distribution cloud diagram

从图10中可以看出,3种工况下铁心磁场的整体分布情况大致相同,磁通密度最大值均出现在铁轭转角区域,分别为1.43、1.16、0.97 T。在一次侧绕组电压与匝数不变的情况下,铁心磁通密度与频率成反比,因此,3种工况下的铁心磁通密度随着频率的增大而逐渐减小。

为了验证计算方法的有效性,利用磁场计算结果和磁场能量法<sup>[20]</sup>计算了变压器的短路阻抗,对应的计算值与实测值的比较结果见表2。

表2 短路阻抗的比较结果

Table 2 Comparison results of short-circuit impedance

工况	实测值/%	仿真值/%	误差/%
1	4.19	4.14	1.2
2	5.83	5.73	1.7
3	7.83	7.78	0.6

由表2可知,3种工况下的短路阻抗随着频率的增加依次增大;相应的仿真值与实测值误差均在3%内,表明计算方法合理、可靠。

### 2.3 损耗计算

#### 2.3.1 铁心损耗

根据铁心磁场的仿真结果,并利用Steinmetz公式<sup>[21]</sup>,得到了变压器在3种不同工况下的铁心损耗分布与计算结果,见图11、表3。

$$P_0 = Kf^x B_m^y \quad (2)$$

式(2)中: $B_m$ 为磁通密度最大值,T; $f$ 为频率,Hz;

$K$ 、 $x$ 、 $y$ 为与铁心材料特性有关的经验参数,通过输入的铁心损耗曲线拟合得到。

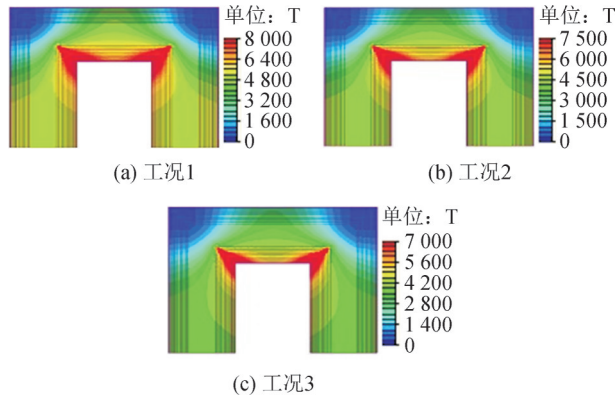


图 11 铁心损耗分布云图

Fig. 11 Core loss distribution map

表 3 3种工况下的铁心损耗比较

Table 3 Comparison of core loss under three working conditions

参数	工况 1	工况 2	工况 3
计算值/W	4 925.62	3 979.22	3 596.48
实测值/W	4 765	3 791	3 489
误差/%	3.37	4.96	3.08

虽然硅钢片单位质量损耗随着频率的升高而增大,但由于铁心磁通密度随着频率的升高而降低,因此在两者共同作用下3种工况下的铁心损耗依次减小,通过对比得到对应的计算值与实测值误差小于5%。

### 2.3.2 绕组损耗

变压器绕组中的损耗主要包括直流电阻损耗和涡流损耗。直流电阻损耗由传统的解析计算方法得到<sup>[2]</sup>,而绕组涡流损耗利用有限元专用软件 MF2D 和式(3)得到。计算结果见表4。

$$\begin{cases} P_{Exi} = \frac{1}{12} \sigma (\omega b B_{ix})^2 \pi R_i S_i \\ P_{Eyi} = \frac{1}{12} \sigma (\omega a B_{iy})^2 \pi R_i S \\ P_E = \sum_{i=1}^n (P_{Exi} + P_{Eyi}) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $P_{Exi}$ 、 $P_{Eyi}$ 为第*i*个单元的横向、纵向涡流损耗,W; $B_{ix}$ 、 $B_{iy}$ 为第*i*个单元内辐向、轴向磁通密度,T; $a$ 、 $b$ 为导线厚度、宽度,m; $R_i$ 为第*i*个单元的重心到铁心中心线的距离,m; $S_i$ 为第*i*个单元内导体所占面积,m<sup>2</sup>。

表 4 绕组损耗计算结果

Table 4 Calculation result of winding loss

参数	工况 1	工况 2	工况 3
直流电阻损/W	6 135.19	5 730.97	5 241.13
涡流损耗/W	233.91	441.73	835.66
总损耗/W	6 369.10	6 172.70	6 076.79

由表4可知,3种工况下的绕组涡流损耗随频率的升高而增加,直流电阻损耗受二次侧绕组匝数与电压电流变化的影响而逐渐减小,对应的绕组总损耗为二者共同作用的结果。

## 3 温度场计算与分析

### 3.1 计算模型

与磁场计算不同,绕组外部包裹的环氧树脂以及绕组之间的绝缘挡板对温度场的计算结果影响较大,在建模时需要考虑。由于变压器两柱情况完全相同,且每柱均为轴对称结构,因此,取单柱剖面的1/2进行建模分析。计算模型见图12。

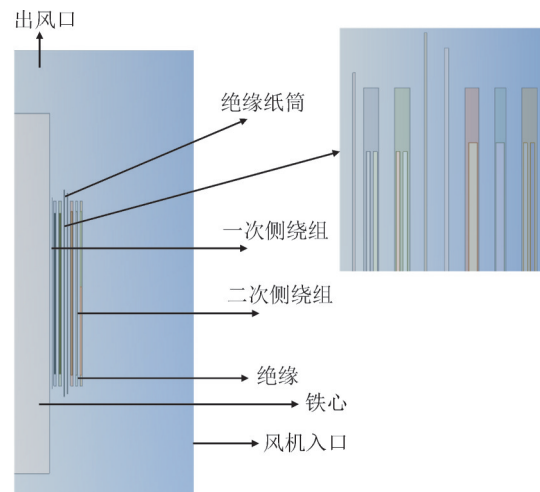


图 12 温度场二维计算模型

Fig. 12 Two-dimensional calculation model of temperature field

### 3.2 计算结果与分析

采用有限体积法进行变压器温度场计算。相关设置如下:热源为单位体积损耗密度,按绕组分区手动赋值,环境温度设置为20℃,入口风速设置为1.5 m/s,在软件中指定流固耦合面,耦合系数通过软件自动计算。采用湍流计算模型。动量和能量的离散方式都采用2阶迎风模式提高计算精度。计算过程中固体材料参数按实际值设置,考虑空气物性参数随温度的变化。温度场计算结果见图13、14。

由图13可知,3种工况下变压器整体的温度分布均呈现由下至上逐渐升高的态势。这种现象产生的主要原因是随着绕组高度的增加热空气上升并堆积,在壁面粘滞作用影响下,由于换热边界层厚度增加和换热条件变差,造成上端温度升高;而铁心所处位置散热条件较差,且被高温绕组所包围,因此导致其温度较高,甚至在工况1时铁心的最高温度要略高于绕组的热点温度。

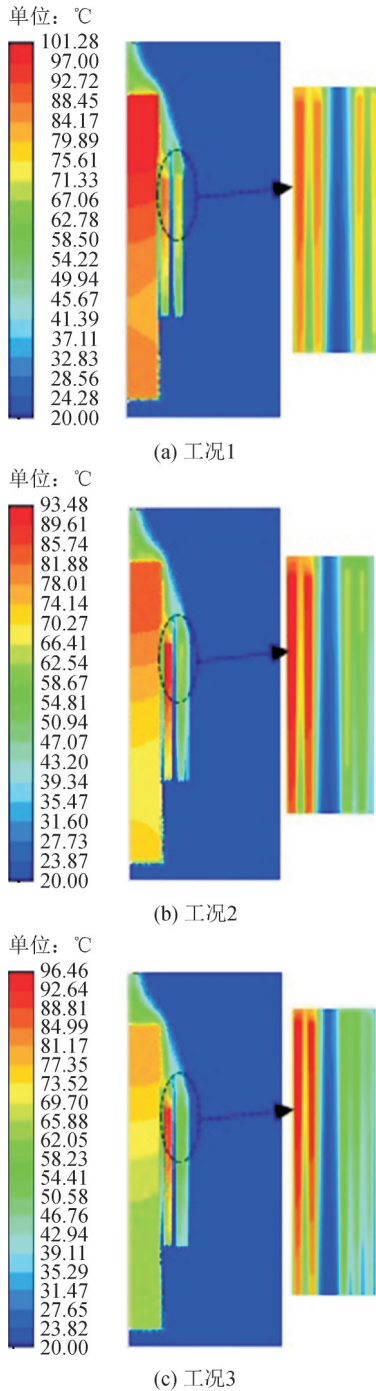


图 13 温度分布云图

Fig. 13 Temperature distribution cloud map

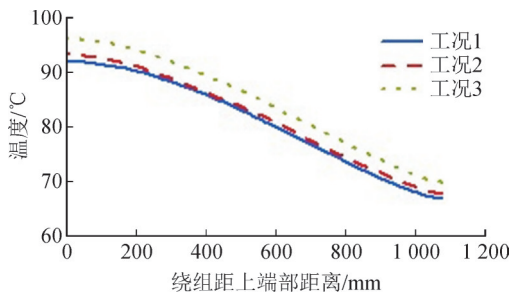


图 14 1区绕组温度沿高度分布

Fig. 14 Winding temperature distribution along the height in zone 1

一次侧绕组温度整体高于二次侧, 主要是因为风机安装在变压器侧面, 二次侧绕组所处位置散热条件好。3种工况下绕组的热点均位于绕组分区中的1区, 接近绕组上端部的位置。由图14可知, 绕组的热点温度分别为92.00、93.48、96.46 °C, 热点温升为72、73.48、76.46 K。计算结果与实测值误差小于10%。由于一次侧绕组直流损耗相同, 涡流损耗在不同工况下随频率升高而增加, 因此, 绕组最高温度出现在工况3, 在进行温度监测时要注意此工况下绕组温度。此外工况1最高温度位于铁心, 要重点关注该工况下的铁心温度。

### 3.3 谐波影响下温度场计算与分析

变压器工作在交流装置后端, 运行过程中会受到谐波干扰。为了了解谐波影响下变压器的温度分布情况, 选择绕组热点温度最高的工况3, 并按设计要求中35%的谐波畸变率考虑负载运行时谐波对绕组损耗及温度场的影响。此时各次谐波含量见表5, 电流波形见图15。

表 5 各次谐波电流含量

Table 5 The content of each harmonic current

谐波次数	1	5	7	11	13	17	19
含量/%	100.0	25.3	19.5	12.4	5.3	3.9	2.8

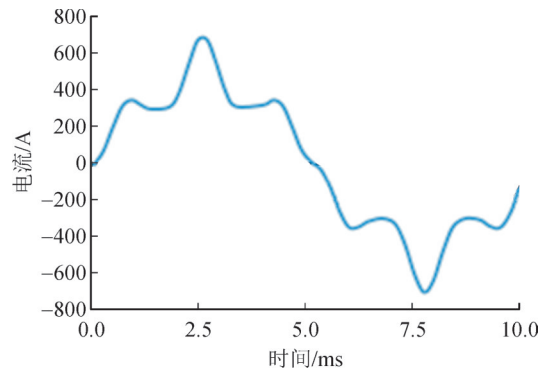


图 15 受谐波影响时的电流波形

Fig. 15 Current waveform when affected by harmonics

本小节主要研究谐波对于绕组热点温度的影响, 因此, 近似认为铁心损耗保持不变。根据绕组涡流损耗与电流和频率的平方近似成正比的关系, 可由式(4)得到谐波电流作用下的涡流损耗<sup>[23]</sup>。

$$P_E = P_{E1} \times \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2 \quad (4)$$

而绕组的直流电阻损耗与电流的平方成正比, 当不考虑频率变化对绕组阻值的影响时, 可由式(5)得到在谐波影响下的电阻损耗。

$$P_R = P_{R1} \times \sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \quad (5)$$

式(4)、(5)中:  $h$  为谐波电流次数;  $h_{max}$  为最高次谐

波电流次数;  $I_1$  为基波电流有效值,  $A$ ;  $I_h$  为  $h$  次谐波电流有效值,  $A$ ;  $P_{ei}$  为基波电流作用下的涡流损耗,  $W$ ;  $P_{ri}$  为基波电流作用下的直流电阻损耗,  $W$ 。考虑谐波影响下的温度场计算结果见图 16。

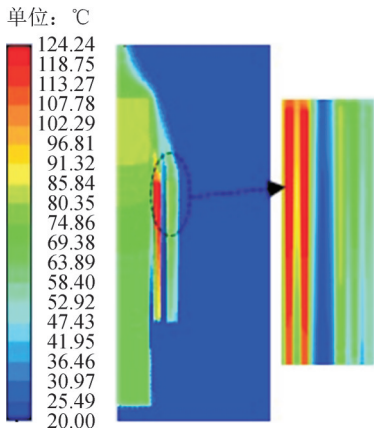


图 16 谐波影响下温度分布云图

Fig. 16 Temperature distribution cloud map under the influence of harmonics

考虑谐波的情况下, 变压器整体温度分布情况与额定工况下基本一致。热点位置未发生改变, 其温度为 124.24 °C, 温升为 104.24 K。与不考虑谐波相比热点温度升高了 27.78 K。热点温度小于绝缘等级为 H 级干式变压器所允许的最高温度。

谐波会使变压器产生附加温升和内部绝缘所承受的热应力增加, 从而降低设备可靠性与缩短使用寿命。如果谐波严重还会加速绝缘老化, 产生局部过热等现象, 严重影响变压器的稳定运行。因此, 可以在磁浮列车牵引供电系统中安装相应的滤波装置以降低谐波含量。

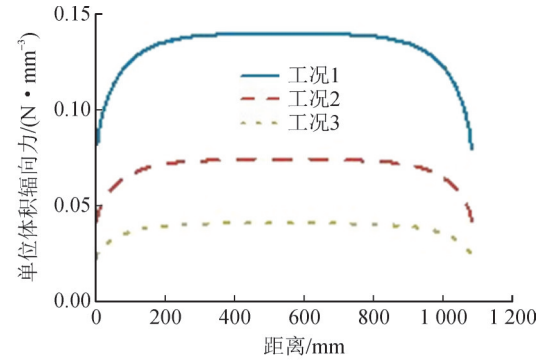
## 4 短路性能计算结果与分析

### 4.1 短路力计算与分析

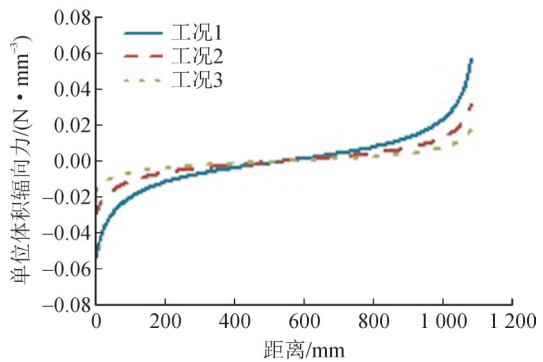
为了保证变压器具有足够的抗短路能力, 通过三维场—路耦合法对峰值短路电流作用下 3 种工况的受力情况进行了分析。一次侧绕组最外侧单位体积短路力沿绕组高度的分布情况见图 17。峰值短路电流作用下 3 种工况下的轴向力最大值见表 6。

由图 17 可知, 由轴向漏磁场产生的辐向力在绕组中部达到最大并向两端逐渐减小; 由辐向漏磁场产生的轴向力在绕组两端较大并向绕组中部逐渐减小。由于 3 种工况下的一次侧额定电流相同, 而峰值短路电流大小主要受短路阻抗的影响<sup>[24]</sup>, 因此, 随着工况的切换短路阻抗增大, 而峰值短路电流依次减小, 受其影响, 单位体积的短路力也随之减小。

由表 6 可知, 3 种工况轴向力最大值依次降低,



(a) 单位体积辐向力



(b) 单位体积轴向力

图 17 单位体积短路力沿绕组高度分布情况

Fig. 17 Distribution of short-circuit force per unit volume along winding height

表 6 绕组所受的轴向力最大值

Table 6 Maximum axial force on the winding

工况	工况 1	工况 2	工况 3
轴向力/kN	31.96	16.81	9.00

其中工况 1 的轴向力最大, 为 31.96 kN, 要重点关注该工况下绕组受力。

### 4.2 绕组机械强度计算与分析

在短路力的作用下绕组会承受巨大的短路机械应力, 包括由轴向力引起的轴向弯曲应力与辐向力引起的辐向拉或压应力, 其计算结果见式(6)。变压器 3 种工况下的机械应力计算结果, 见表 7。

$$\begin{cases} \sigma_y = \frac{\sqrt{2} K B_x I l^2}{2 m n a b^2} \\ \sigma_x = \frac{\sqrt{2} K B_y I R_a}{m n s} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中:  $\sigma_y$ 、 $\sigma_x$  为轴向弯曲应力、辐向拉或压应力, MPa;  $l$  为两垫块间的距离, m;  $a$ 、 $b$  为单根导线厚度、宽度, m;  $R_a$  为绕组的平均半径, m;  $m$  为绕组并联支路数;  $n$  为每匝绕组并联导线数。

变压器绕组所用导线为自粘半硬铜线, 屈服极限  $\sigma_{0.2}$  为 200 MPa。根据电力变压器国家标准 GB 1094.5—2008《电力变压器第 5 部分: 承受短路的能力》中规定多层绕组的心式变压器, 绕组中每一层

表7 绕组所受应力最大值

Table 7 Maximum stress on the winding

参数	工况1	工况2	工况3
轴向弯曲应力/MPa	12.84	7.10	3.82
辐向拉伸应力/MPa	70.09	32.32	15.16
辐向压缩应力/MPa	68.11	34.27	19.31

的平均辐向拉伸应力与轴向弯曲应力应小于等于  $0.9\sigma_{0.2}$ , 即为 180 MPa; 等值平均环形压缩应力对于自粘性导线应小于等于  $0.6\sigma_{0.2}$ , 即为 120 MPa。由表7可知, 3种工况下绕组受到的应力值均远小于极限值, 绕组的机械强度满足要求。

## 5 结论

文中在考虑频率变化对铁心材料参数影响的前提下, 基于场—路耦合法与有限体积法分别建立了干式变频变压器三维磁场短路力计算模型与二维温度场计算模型, 并对其磁场、损耗、温度分布以及绕组短路机械性能进行了计算分析。得到了如下结论:

1) 频率上升导致铁心材料在相同磁通密度下单位质量的损耗明显增加和3种运行工况下的铁心磁通密度逐渐减小, 在两者共同作用下铁心损耗随频率的升高而依次降低。

2) 3种工况下的绕组漏磁场受二次侧绕组安匝分布变化的影响, 使得二次侧绕组横向漏磁最大值改变量为 37.8%, 其他部位的漏磁变化相对较小。

3) 随着3种工况下频率依次增大, 绕组的热点位置未发生变化, 但热点温度逐渐升高, 其最大值出现在工况3为 96.46 °C。在谐波畸变率为 35% 的条件下, 绕组热点温度增加了 28.79%, 即 124.24 °C。

4) 频率升高导致3种工况下短路阻抗增大, 相应的短路力与机械应力受短路阻抗影响而依次减小, 虽然工况1的抗短路能力相对较弱, 但3种运行工况下的短路机械性能均满足产品抗短路能力的设计要求。

通过对干式变频变压器磁热力性能的计算与分析, 不仅得到了对应参数的变化分布规律和验证了计算方法的有效性, 而且, 表明了3种工况下的磁热力性能均满足产品设计要求。因此, 为今后进行干式变频变压器的开发设计与分析提供了指导性结论。

## 参考文献:

[1] 王天立, 李力鹏. 高速磁悬浮牵引供电系统[M]. 北京: 北京交通

大学出版社, 2003.

WANG Tianli, LI Lipeng. High-speed maglev traction power supply system[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2003.

[2] 周媛, 陶丹, 项阳, 等. 磁浮牵引系统输出变压器的研究[J]. 变压器, 2013, 50(6): 43-47.

ZHOU Yuan, TAO Dan, XIANG Yang, et al. Research on output transformer in propulsion system of maglev train[J]. Transformer, 2013, 50(6): 43-47.

[3] 赵志刚, 毕紫莉. 正弦及谐波激励下铁磁材料损耗模型的改进和验证[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3452-3459.

ZHAO Zhigang, BI Zili. Improvement and verification of ferromagnetic material loss model under sinusoidal and harmonic excitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3452-3459.

[4] CÓRDOBA P A, DARI E, SILIN N. A 3D numerical model of an ONAN distribution transformer[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148(2): 897-906.

[5] 裴丽君, 徐慧, 陈晗, 等. 基于 PSO 优化的 SA-LSTM 变压器绕组温度预测方法[J]. 供用电, 2025, 42(8): 112-119.

PEI Lijun, XU Hui, CHEN Han, et al. Prediction method for winding temperature of SA-LSTM transformer based on PSO optimization[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(8): 112-119.

[6] 晋涛, 胡帆, 梁基重, 等. 油浸式变压器热点温升计算中绕组结构简化的误差分析[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 156-163.

JIN Tao, HU Fan, LIANG Jizhong, et al. Error analysis of winding structure simplification in hot spot temperature rise calculation of oil immersed transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 156-163.

[7] 孙晨茜, 李琳. 非正弦激励下高频变压器的温度分布计算与分析[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 96-105.

SUN Chenqian, LI Lin. Calculation and analysis of temperature distribution of high-frequency transformer under non-sinusoidal excitation[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 96-105.

[8] 胡安龙, 李敏, 魏勇, 等. 基于磁场能量法的圆形利兹线绕组高频变压器漏电感解析计算模型[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 24-30.

HU Anlong, LI Min, WEI Yong, et al. Analytical model for leakage inductance calculation of high frequency transformer with round litz wire windings based on magnetic field energy method[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 24-30.

[9] ZHANG Yiyi, WEI Xingxiao, FAN Xianhao, et al. A prediction model of hot spot temperature for split-windings traction transformer considering the load characteristics[J]. IEEE Access, 2021(9): 22605-22615.

[10] LIU Gang, RONG Shichang, WU Weige, et al. A two-dimensional transient fluid-thermal coupling method for temperature rising calculation of transformer winding based on finite element method[J]. AIP Advances, 2020, 10(3): 1-11.

[11] LI Yongjian, YAN Xinxiao, WANG Chunguang, et al. Eddy current loss effect in foil winding of transformer based on magneto-fluid-thermal simulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7): 1-5.

[12] 张晓华, 吕志瑞, 孙云生, 等. 基于修正热路模型的油浸式变压器绕组热点温度计算研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 78-84.

- ZHANG Xiaohua, LYU Zhirui, SUN Yunsheng, et al. Research of hot spot temperature calculation in oil-immersed transformer based on modified thermal model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(3): 78-84.
- [13] 刘建锋, 李志远, 周亚茹. 基于漏磁场和 ICOA-ResNet 的变压器绕组早期故障诊断[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 99-110.
- LIU Jianfeng, LI Zhiyuan, ZHOU Yaru. Transformer windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 99-110.
- [14] 刘建锋, 董倩雯, 田书欣, 等. 基于 ReliefF-mRMR 漏磁场特征优选和改进 LSSVM 的变压器绕组早期故障诊断[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(11): 198-209.
- LIU Jianfeng, DONG Qianwen, TIAN Shuxin, et al. Early fault diagnosis of transformer winding based on ReliefF-mRMR leakage magnetic field feature optimization and improved LSSVM[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(11): 198-209.
- [15] 龙 启, 杨 旭, 薛淑鹏, 等. 基于圆坐标表征法的换流变压器励磁涌流辨识研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(9): 118-129.
- LONG Qi, YANG Xu, XUE Shupeng, et al. Research on identification of converter transformer inrush current based on circular coordinate representation method[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(9): 118-129.
- [16] 杨金鑫, 廖才波, 胡 雄, 等. 基于 DGA 与 TPE-LightGBM 的变压器故障诊断[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(4): 70-77.
- YANG Jinxin, LIAO Caibo, HU Xiong, et al. Transformer fault diagnosis based on DGA and TPE-lightGBM[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(4): 70-77.
- [17] 范慧芳, 咸日常, 刘兴华, 等. 基于能量系数的电力变压器热故障严重性评估方法[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(2): 83-88.
- FAN Huifang, XIAN Richang, LIU Xinghua, et al. Evaluation method of thermal fault severity of power transformer based on energy coefficient[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(2): 83-88.
- [18] 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.
- [19] QIU Hao, WANG Shuhong, ZHANG Naming, et al. Field-circuit coupling and electromagnetic-thermal-mechanical coupling analysis of the single-stage fast linear transformer driver using time-domain finite integration technique[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(6): 1-5.
- [20] 王 勃, 王 帆, 井永腾, 等. 多分裂变压器半穿越短路阻抗平衡性计算与分析[J]. *变压器*, 2022, 59(9): 54-57.
- WANG Bo, WANG Fan, JING Yongteng, et al. Calculation and analysis of balance of semi-crossing short-circuit impedance in multi-split transformers[J]. *Transformer*, 2022, 59(9): 54-57.
- [21] SERGEY Z, MOROZ Y I, ARTURI C M. Once again about the Steinmetz transformer model and the ongoing subdivision of its leakage inductance[J]. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2021, 41(1): 81-95.
- [22] 房 森. 干式变压器多物理场耦合分析及温升建模研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- FANG Sen. Multi-physics coupling analysis and temperature rise modelling of dry-type transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [23] WU Jie, LIU Cong, ZHANG Xianliang, et al. Influence of harmonic current on the winding loss and temperature distribution of AC transformer[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chongqing: IEEE, 2021: 1492-1498.
- [24] 车锐坚, 汪自成. 高速铁路牵引变压器短路阻抗百分比基准容量选择研究[J]. *电气化铁道*, 2021, 32(s1): 97-99.
- CHE Ruijian, WANG Zicheng. Research on the selection of reference capacity for short-circuit impedance percentage in high-speed railway traction transformers[J]. *Electric Railway*, 2021, 32(s1): 97-99.
- 李欣然(1996—), 女, 硕士研究生, 从事变压器磁热力应用技术研究(E-mail: 980448251@qq.com)。
- 王建民(1961—), 男, 教授级高工, 从事各类变压器及电抗器等产品电磁热力关键技术研究(通信作者)(E-mail: bdwjm053@126.com)。