

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

王威望, 刘莹, 何杰峰, 王鑫, 李盛涛

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 电力电子变压器是智能电网、电动汽车、军事航空等多个领域应用的关键设备。随着电力电子变压器不断向高压大功率发展, 其相关理论和关键技术获得了持续关注。目前, 针对电力电子变压器变换效率不够高、开关管电流应力较大、模块间电压功率不平衡等问题, 已经有了一些研究和解决方案。然而, 对电力电子变压器的DC-DC变换器中核心部件-高频变压器而言, 尤其是高压、高频和高温下高频变压器仍然存在很多关键问题需要研究和解决。针对高压大容量电力电子变压器的研究背景, 围绕其中高频变压器的关键问题展开论述。在总结大量文献的基础上, 首先, 论述了高频变压器应用于电力电子变压器中的复杂工况; 然后, 着重分析了高频变压器磁芯、绕组、绝缘和散热的研究现状; 据此进行思考和总结, 提炼了高频变压器存在的关键问题; 最后, 对高频变压器的研究现状进行了总结, 针对存在的问题展望了其未来发展趋势。

关键词: 大容量电力电子变压器; 高频变压器; 磁芯; 绕组; 绝缘; 散热

Research Status and Development of High Frequency Transformer Used in High Voltage and Large Capacity Power Electronic Transformer

WANG Weiwang, LIU Ying, HE Jiefeng, WANG Xin, LI Shengtao

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Power electronic transformer is the key equipment used in smart grid, electric vehicle, military aviation, and other fields. With the continuous development of power electronic transformer with high voltage and large power, considering works have been focused on its related theory and key technology. Currently, some researches have been studied, such as low conversion efficiency, high current stress of switching device, and unbalanced voltage and electric power flow between the power modules. However, few types of research were carried out on the high-frequency transformer, which is the key component in the high voltage DC-DC converters in power electronic transformer. Particularly, there are still many key issues remained in the high-frequency transformer under the high voltage, high frequency, and high temperature. According to the research background of high voltage and large capacity power electronic transformer, this paper reviews the fundamental technique and key issues in the high-frequency transformer. Based on the research results of the majority of published works, the complex working conditions of high-frequency transformer used in power electronic transformer are introduced firstly. Then, the state of the art of the magnetic core, the winding, the insulation, and the heat dissipation are mainly discussed. Furthermore, the key issues related to the transformer components are proposed. Finally, the research status of the high-frequency transformer are concluded and prospects and suggestions for the future development of large power electronic transformer equipment.

Key words: large capacity power electronic transformer; high frequency transformer; magnetic core; windings; insulation; heat dissipation

0 引言

随着新能源电力系统和能源互联网的发展, 可再生资源和分布式能源的转换、传输和并网成为智

能电网发展的迫切需求。近年来, 作为“能量路由器”的电力电子变压器发挥着电压变换、电气隔离、功率传输与控制、能量双向流动等关键作用, 成为研究的热点。

电力电子变压器(power electronic transformer, PET), 又称固态变压器(solid state transformer, SST), 是一种将电力电子技术与高频变压器(high fre-

quency transformer, HFT)相结合的新型电力变压器, 具有体积小、质量轻、环境友好等优势。除此之外, PET 还具备改善电能质量、维持电压稳定、实时监测和联网通讯等功能^[1], 弥补了传统变压器的缺点。采用模块化串并联技术的级联型电力电子变压器^[2]是目前高压大容量下应用的主要方案, 也是本文所研究高频变压器的应用场景。

针对电力电子变压器变换效率不够高、开关管电压电流应力较大、模块间电压功率不平衡等问题已受到广泛关注和研究^[3-6]。然而, 电力电子变压器的核心部件-高频变压器仍存在很多问题需要研究和解决。

在高频变压器设计方面的研究成果主要有为海上风电领域 DC/DC 变换器研究设计的 166 kVA, 20 kHz 的实验样机^[7]以及应用在高速列车领域的 350 kVA, 10 kHz 非晶合金高频变压器等^[8]。关于磁芯损耗的研究, 瑞士洛桑工学院针对轨道交通牵引中使用的高频变压器给出的非正弦励磁时磁芯损耗的计算方法, 并使用 61.6 kVA, 2 kHz 的变压器进行了验证^[9]。文献[10]针对纳米合金、软磁铁氧体和非晶合金材料 3 种高频磁性材料的改进磁芯损耗公式。此外, 文献[11]研究了不同绕组结构对高频变压器参数的影响, 并使用有限元分析法对不同绕组结构下的大容量高频变压器损耗进行了分析。文献[12]基于高频变压器等效模型, 分析了分布电容以及漏感等分布参数对变压器性能的影响, 并且计算和测量了这些分布参数以及等效绕组特性。

随着工作频率、容量的提高以及变压器体积的减小, 对磁芯材料提出更高要求。传统磁芯材料中, 硅钢片高频损耗过大, 无法满足高频变压器对传输效率的要求。铁氧体的磁芯损耗较低, 但在高压大功率条件下存在饱和磁感应强度低、热稳定性差等问题。

高频变压器绕组的集肤和邻近效应比工频变压器更加显著, 为降低绕组损耗, 一般采用利兹线以螺线管的形式缠绕在磁芯上。但是螺线管式绕制变压器漏感较大, 增加了变压器损耗, 并且很难对漏感进行精确控制^[13]。在高频工作条件下, 磁芯切割或加工的边角等磁场变化显著部位会产生很严重的边缘效应, 导致发热严重, 局部温升过高, 造成绝缘失效。

高频变压器工作在高压、高频和高温等复杂工况下, 通常会承受非正弦电压和电流波形以及大量谐波的影响, 从而导致额外的介电损耗和复杂的绝

缘应力^[14]。因此, 高频下磁芯材料、结构和损耗, 绕组结构和损耗, 绝缘材料和结构, 温升和散热, 变压器多物理场耦合、等效电路/磁路建模及参数提取方法、高频变压器与两侧电力电子拓扑间相互作用等方面的基础理论与关键技术研究的缺乏, 成为制约高压大容量高频变压器发展的瓶颈。

本文围绕高压大容量电力电子变压器中高频变压器关键问题展开综述研究, 这里的“高压”指高于 10 kV、“大容量”指 MVA 级, 而“高频”一般在 400 Hz~20 kHz, 有些文献将其称为中频变压器^[15]。首先, 介绍高频变压器的特性和工况。然后, 分别从磁芯、绕组、绝缘和散热方面, 论述和分析高频变压器的材料和结构设计, 进而提出其理论和技术存在的问题。最后, 针对问题进行高频变压器的总结和展望。

1 高频变压器的工况特性和影响

图 1 为典型模块化多电平电力电子变压器拓扑^[15], 其主要包括: 输入整流级、中间双有源桥(dual active bridge, DAB)DC/DC 变换器和输出逆变级。输入级将高压工频交流电整流成高压直流电, 经过隔离级, 先将其逆变再调制为高频方波信号, 同时高频变压器将原边的高频信号耦合到副边, 将其解调并整流成低压直流电, 最后经过逆变级转化为低压工频交流电。图 2 为隔离级(DAB 级), 其多用 LLC 谐振型变换器^[16]。LLC 谐振型变换器具有良好的软开关特性, 能够显著提升系统的功率密度, 采用变频控制实现功率的双向流动。高频变压器是其中的关键部件。

用于大容量电力电子变压器中的高频变压器是通常工作在高频、高压和高温的复杂工况下。表 1 为高压大容量 PET 中使用的高频变压器基本信息^[17-19]。可以看到, 变压器的磁芯、绝缘和散热在高压高频下必须重点考虑。

高频变压器特性受工况的影响很大, 主要可以分为内工况和外工况。内工况为高频变压器结构内部的工况, 外工况为电力电子变压器工作产生的工况。

高频变压器的内工况主要来自损耗、温升和结构导致的应力集中。损耗主要源于工作频率和激励电压波形下磁芯、绕组和绝缘损耗特性; 温升主要源于单位体积产热量增加和散热面积减小; 结构导致的应力集中主要源于高频高压下小体积的磁芯、绕组排布及绝缘设计导致的电磁-热应力集中。

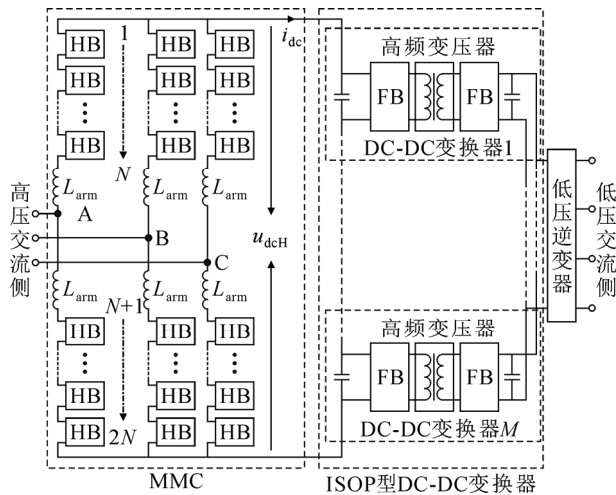


图1 基于 MMC 的 PET 拓扑图

Fig.1 Topology of PET based on MMC

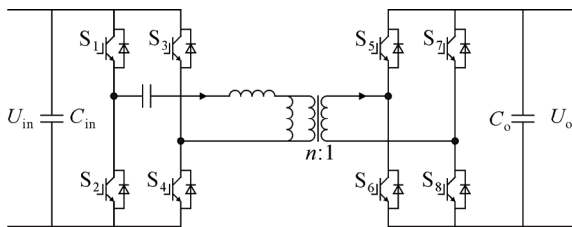


图2 LLC 谐振型 DAB 拓扑图

Fig.2 LLC resonant DAB topology

表1 高压大容量 PET 中高频变压器基本信息

Table 1 Basic information of HFT in high voltage and large capacity PET

(原边/副边) 电压/kV	容量 /kVA	频率 /kHz	磁芯材料	绝缘形式	散热方式
10/0.75	100	10	硅铁氧体	环氧树脂	风冷
3.6/1.5	150	1.75	纳米晶		油冷
2/0.4	166	20	纳米晶		水冷

除了内工况外，高频变压器的外部工况是影响其性能的关键因素，其主要取决于电力电子变压器的运行要求。图3为高频变压器绕组电压和电流波形^[20]，其典型电压波形不是标准正弦波，而是具有复杂高频谐波的类似方波，还会出现快速上升沿的尖峰电压，电流波形为非标准正弦波，出现严重畸变并有异常尖峰，造成这一现象的主要原因是高频变压器的漏感、分布电容等影响，这也造成高频下绝缘应力集中和损耗增加。除了电力电子变压器稳态运行工况外，非正常工况对变压器影响也至关重要，例如：新能源并网、输入电压跌落、不平衡、谐波电压、输出负载突变、输出带非线性负载等。

高频变压器的复杂工况，如瞬态电压变换将增强变压器绝缘系统的电应力，从而加速绝缘材料的

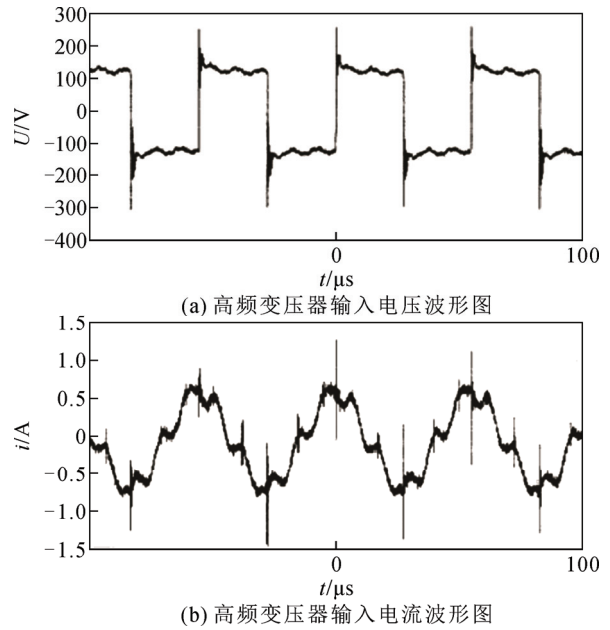


图3 高频变压器电压和电流波形

Fig.3 Voltage and current waveform of HFT

老化和失效。特别地，高压应力出现在输出电压的上升和下降边缘，这种高频效应的高压脉冲会在绝缘失效时产生增量应力(5 kV)。此外，多电平级联型 PET 的应用导致高频变压器绝缘遭受混合频率应力的影响，如低频(如 100 Hz)和(如 20 kHz)应力^[14]，复杂的谐波应力会增加绝缘击穿风险^[21]。

在高频电压下，与变压器结构、尺寸、介质参数等相关的寄生参数，如寄生电容进一步导致其工况复杂化，进而影响变压器工作特性。宽频电路模型可以建立电阻、电感、电容参数与变压器物理结构间的关联，一方面有助于对变压器电压、电流特性分析，另一方面有助于考虑变压器寄生参数的设计。通过建立高频变压器的宽频模型，获得不同负载情况下的电压、电流传输函数，进而揭示在寄生参数的作用下，高频变压器空载电压与短路电流传输比不再恒等于绕组匝比，而是随频率发生变化。此外，考虑到实际应用于电力电子变压器的高频变压器所带负载情况比较复杂，导致高频变压器在传输不同功率、带不同功率因数负载等工况下电压、电流传输比的变化特性复杂^[22]。

2 高频变压器材料和结构设计

2.1 磁芯

2.1.1 磁芯材料

图4为高频变压器用典型磁芯材料铁氧体的磁

滞回线。对于高频变压器来说, 磁芯的饱和磁通密度 B_m 较大可以有效减小变压器体积。但由于磁芯损耗和动态磁滞回线面积成正比, 又考虑到磁芯中存在涡流, 因此希望磁芯材料具有高的磁导率和电阻率以及低矫顽力。

与传统工频变压器磁芯材料硅钢片相比, 高频变压器所使用的磁芯材料一般有铁氧体、非晶合金以及坡莫合金等^[16,23-25], 表 2 为其主要优缺点的对比。

综合来看, 铁氧体损耗小、成本低, 应用最为普遍。坡莫合金性能好, 但成本最高且电阻率低, 不适用于高功率场合。对于 100 kVA 以上的大容量高频变压器, 可采用可叠片制造的非晶合金^[16]。总体来说, 高频变压磁芯材料的选取主要考虑高饱和磁通密度、低损耗和温升特性, 具体使用哪种材料需要根据实际应用场合决定。

2.1.2 磁芯损耗计算

变压器的磁芯损耗主要来自磁芯非线性磁化特性。图 5 为非晶材料磁芯损耗与饱和磁通密度和频率的关系^[24], 可以看出损耗与饱和磁通密度 B_m 和交流频率 f 成正比。

工程上用于估计磁芯损耗的经验公式主要有斯坦梅兹(Steinmetz)公式^[25], 简称 SE, 以及在此基础上的修正和推广公式 MSE、GSE、IGSE 和 WcSE^[26-29], 表 3 为斯坦梅兹公式及其修正表达式。

表中 K 、 α 、 β 均为 SE 经验系数; ΔB 为磁通密度峰峰值, $\Delta B=B_{max}-B_{min}$; $B(t)$ 为磁通密度随时间变化的值; P_v 为磁芯损耗; T 为激励周期; k' 和 k_1 分别为 GSE 和 IGSE 公式下不同波形的经验系数。

磁通波形系数 F_{eq} 表达式为^[29]

$$F_{eq} = \frac{\int_0^{T/2} |B(t)| dt}{\int_0^{T/2} B_{peak} \sin(\omega t) dt} \quad (1)$$

其中 B_{peak} 为非正弦激励下磁通密度的峰值。

由于斯坦梅兹公式及其修正公式都是经验公式, 其使用的频率和幅值范围受限, 难以适用于所有的磁芯材料。

根据磁芯损耗产生的原理可以把磁芯损耗分为磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗 3 部分^[30]。用于计算磁滞损耗的模型有 Preisach 模型和 Jiles-Atherton(J-A)模型^[31]。J-A 模型表述磁化强度与磁场强度关系的磁滞回线, 并从宏观能量的角度去计算磁滞损耗。Preisach 模型用数学公式去表述磁性材料的磁滞回线, 并通过计算磁滞回线的面积

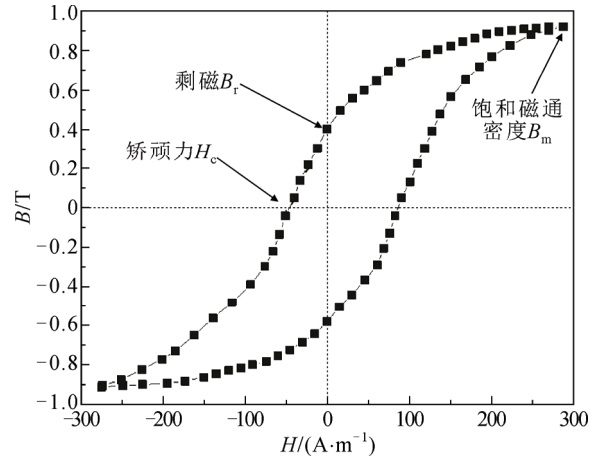


图 4 铁氧体磁滞回线

Fig.4 Hysteresis loop of Ferrite material

表 2 主要磁芯材料性能比较

Table 2 Comparison of material characteristics of the main agnetic core

磁芯材料	优点	缺点
铁氧体	价格便宜且损耗较小, 高频性能好	饱和磁通密度较低
硅钢片	磁导率极高, 饱和磁通密度也较高	高频下损耗较大
铁基非晶合金	饱和磁通密度较高, 适合用作几百到几千 Hz 的变压器磁芯	高频下需通过降低磁通密度减小损耗
钴基非晶合金	损耗相比铁基要更小	饱和磁通密度更低, 导致变压器体积更大
坡莫合金	磁通密度最高且损耗较低	成本最高

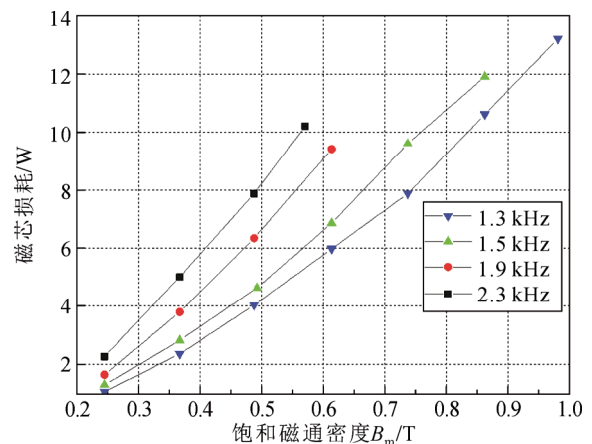


图 5 非晶磁芯损耗与饱和磁通密度 B_m 关系示意图

Fig.5 Schematic diagram of relationship between amorphous core loss and saturation magnetic flux density B_m

计算磁滞损耗。这两种模型损耗计算精度较高, 但公式复杂, 很少用在工程实际中。

基于 Bertotti 铁耗分离理论的磁滞损耗可以表示为^[30]

$$P_h = K_h B_m^\beta f \quad (2)$$

式中： K_h 和 β 是磁滞损耗系数，且激励波形的变化对磁芯静态磁滞回线的影响可以忽略不计。

由 Bertotti 铁耗分离理论可知，硅钢片叠片结构或纳米晶和非晶合金等带状材料单位重量涡流损耗为^[30]

$$P_c = \frac{\sigma d^2}{12m_v} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (3)$$

式中： σ 为电导率； d 为磁芯叠片厚度； m_v 为磁芯密度。

在不同的波形(如正弦波、方波、三角波等)下，磁芯中磁通密度的幅值和变化趋势不同，因此不同波形下磁芯的涡流损耗不同。将正弦波和方波相应的磁密瞬时值 $B(t)$ 带入式(3)得到正弦激励下的涡流损耗为^[31]

$$P_c = \frac{\sigma(\pi d)^2}{6m_v} B_m^2 f \quad (4)$$

高频方波激励下的涡流损耗为^[31]

$$P_c = \frac{4\sigma d^2}{3m_v} B_m^2 f \quad (5)$$

异常损耗是由于磁性材料磁化过程中，仅有畴壁和畴壁附近的磁化状态发生改变时造成的损耗。由 Bertotti 铁耗分离理论可知异常损耗的表达式为^[30]

$$P_{ex} = \frac{\sqrt{k_{ex} S}}{m_v} \int_0^T \left| \left(\frac{dB}{dt} \right)^{1.5} \right| dt \quad (6)$$

式中： k_{ex} 为材料相关系数； S 为材料截面积。

与涡流损耗一样，不同波形影响磁芯磁通密度的变化趋势，从而导致不同波形下异常损耗值不同。

将正弦波和方波相应的磁密瞬时值 $B(t)$ 带入式(6)得到正弦激励下的异常损耗为^[31]

$$P_{ex} = \frac{8.8}{m_v} \sqrt{k_{ex} S} B_m^{1.5} f^{0.5} \quad (7)$$

方波激励下的异常损耗为^[31]

$$P_{ex} = \frac{8}{m_v} \sqrt{k_{ex} S} B_m^{1.5} f^{0.5} \quad (8)$$

2.2 绕组

图 6 为交流电场下绕组的集肤效应示意图。集肤效应导致电流主要分布在导体表面，可表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (9)$$

其中： ρ 是导体的电阻率； μ 是导体材料磁导率； f 是交流激励的频率。

高频下，对于非正弦波形往往含有更高次的谐波，在这些谐波影响下，绕组的集肤效应和邻近效应往往会更加严重，绕组损耗更高且计算更加复杂。高频交流下绕组损耗计算模型在下文会详细说明。

2.2.1 绕组种类及排布方式

常用的变压器绕组有箔形绕组、圆导体和利兹线。其中利兹线由多股导线绕制而成，图 7 为利兹线结构和磁场强度分布^[32]。其中 H_{ext} 为绕组层间漏磁场； H_{int} 为每股导线产生的漏磁场； r_c 为利兹线的

表 3 斯坦梅兹公式及其修正表达式

经验公式	表达式	备注
SE ^[25]	$P_v = KB^\beta f^\alpha$	只能用于正弦波下磁芯损耗计算
MSE ^[26]	$P_v = (Kf_{eq}^{(\alpha-1)} B_m^\beta) f$ $f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt$	引入了用 dB/dt 计算的等效开关频率 f_{eq}
GSE ^[27]	$P_v = \frac{1}{T} \int_0^T k' \left \frac{dB}{dt} \right ^\alpha B(t) ^{\beta-\alpha} dt$	适用于任何波形
IGSE ^[28]	$P_v = \frac{1}{T} \int_0^T k_1 \left \frac{dB}{dt} \right ^\alpha \Delta B ^{\beta-\alpha} dt$	在磁通波形中存在小磁滞环时，IGSE 算法相较于 GSE 算法更加准确。
WcSE ^[29]	$P_v = F_{eq} K B_m^\beta f^\alpha$	引入了磁通波形系数 F_{eq}

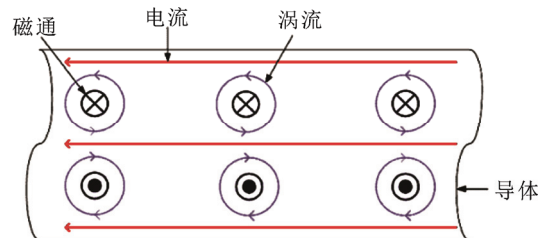


图 6 集肤效应示意图

Fig.6 Schematic diagram of skin effect

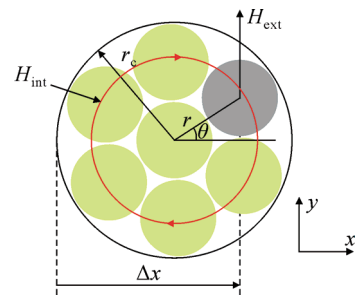


图 7 利兹线结构和磁场强度分布

Fig.7 Litz line structure and magnetic field intensity distribution

半径; r 为利兹线中相邻股线圆心距。每股导线都会通过导体横截面上的每个位置, 利兹线中电流均匀分布在每股导线中, 可以有效降低绕组损耗。每种导体的绕组损耗计算在下文会详细描述。

绕组排布方式有未交叉式、三明治式和交叉式 3 种, 图 8 为 3 种绕组排布方式示意图^[33]。其中未交叉式指高压绕组和低压绕组(带斜纹)分开绕制; 三明治式指间隔层高低压绕组交叉绕制; 交叉式指每层高压绕组和低压绕组都交叉绕制。采用未交叉式时漏感和损耗最大。采用三明治式时漏感和邻近效应降低, 从而绕组损耗降低。采用交叉式时漏感和绕组损耗最小。

2.2.2 绕组损耗计算

在高频条件下, 由于集肤效应和邻近效应会使得电流集中在导体两侧, 导致导体的等效电阻增大, 从而增大了绕组损耗。因此绕组损耗可以表示为^[32]

$$P_{\text{winding}} = F_r R_{\text{dc}} I_{\text{rms}}^2 \quad (10)$$

式中: F_r 为交流电阻系数; R_{dc} 为直流电阻; I_{rms} 为电流有效值。

若为非正弦激励, 则绕组损耗为^[32]

$$P_{\text{winding}} = \sum_1^n F_{r,p} R_{\text{dc}} I_{\text{rms},p}^2 \quad (11)$$

式中: $F_{r,p}$ 为第 p 次谐波交流电阻系数; $I_{\text{rms},p}$ 为第 p 次谐波电流有效值。

关于交流电阻系数的计算, 主要有 Dowell 模型和 Ferreira 模型^[34-35], 以及针对利兹线绕组损耗的 Bartoli 公式^[36]和 Tourkhani 公式^[37], 表 4 给出了具体公式。

Dowell 模型中 Δ 是箔片归一化厚度, $\Delta = h/\delta$; h 为箔片绕组厚度; δ 为集肤深度, δ 的计算如式(9)所示; R_{ac} 为交流电阻; m 为绕组层数。

Ferreira 模型中 $\gamma = d_1/(\delta\sqrt{2})$; η 为孔隙率, $\eta = d_1\sqrt{(\pi/4)/p}$, d_1 为圆导线截面直径; p 为相邻圆导线圆心之间的距离; $\psi_1(\gamma)$ 和 $\psi_2(\gamma)$ 的表达式为^[35]:

$$\psi_1(\gamma) = \frac{\text{Re}(J_1(\gamma))b_{\text{ei}}(\gamma) - \text{Im}(J_1(\gamma))b_{\text{er}}(\gamma)}{b_{\text{er}}^2(\gamma) + b_{\text{ei}}^2(\gamma)} \quad (12)$$

$$\psi_2(\gamma) = \frac{\text{Re}(J_2(\gamma))b_{\text{er}}(\gamma) + \text{Im}(J_2(\gamma))b_{\text{ei}}(\gamma)}{\text{Re}^2(J_1(\gamma)) + \text{Im}^2(J_1(\gamma))} \quad (13)$$

式中: $\text{Re}(J_1)$ 和 $\text{Im}(J_1)$ 是第一类贝塞尔函数的实部和虚部; $\text{Re}(J_2)$ 和 $\text{Im}(J_2)$ 是 $3\pi/4$ 宗量的二阶贝塞尔函数的实部和虚部; $b_{\text{er}}(\gamma)$ 和 $b_{\text{ei}}(\gamma)$ 的表达式为^[35]:

$$b_{\text{er}}(\gamma) = \frac{\text{Re}(J_2(\gamma)) + \text{Im}(J_2(\gamma))}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\gamma} \text{Re}(J_1(\gamma)) \quad (14)$$

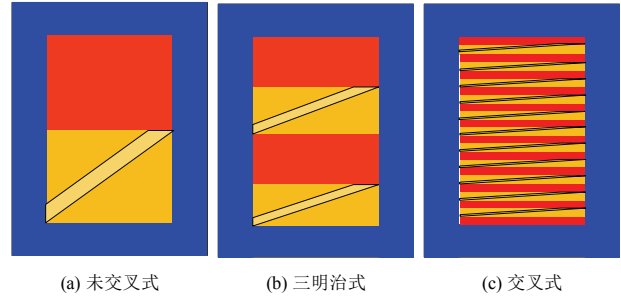


图 8 3 种绕组排布方式示意图

Fig.8 Schematic diagram of three types of winding arrangement

表 4 几种绕组交流电阻系数计算模型

Table 4 Several calculation models of AC resistance of the windings

绕组损耗计算模型	表达式	适用情况
Dowell 模型 ^[34]	$F_r = \frac{R_{\text{ac}}}{R_{\text{dc}}} = \Delta \frac{\sinh(2\Delta) + \sin(2\Delta)}{\cosh(2\Delta) - \cos(2\Delta)} + \frac{2(m^2 - 1) \sinh(\Delta) - \sin(\Delta)}{3 \cosh(\Delta) + \cos(\Delta)}$	箔形绕组
Ferreira 模型 ^[35]	$F_r = \frac{\gamma}{2} (\psi_1(\gamma) - 2\pi\eta^2 \left(\frac{4(m^2 - 1)}{3} + 1 \right) \psi_2(\gamma))$	圆导线
Bartoli 公式 ^[36]	$F_r = \frac{\gamma}{2} (\psi_1(\gamma) - 2\pi \left(\frac{4(m^2 - 1)}{3} + 1 \right) N_s^2 \left(\eta_1^2 + \eta_2^2 \frac{p}{2\pi N_s} \right) \psi_2(\gamma))$ $\eta_1 = \frac{d_0}{t_0} \sqrt{\frac{\pi}{4}}, \quad \eta_2 = \frac{d_s}{t_s} \sqrt{\frac{\pi}{4}}, \quad \beta = \frac{N_s t_s^2}{r_0^2}$	利兹线
Tourkhani 公式 ^[37]	$F_r = \frac{\gamma}{2} (\psi_1(\gamma) - \frac{\pi^2 N_s \beta}{24} \left(16m^2 - 1 + \frac{24}{\pi^2} \right) \psi_2(\gamma))$	利兹线

$$b_{\text{ei}}(\gamma) = \frac{\text{Im}(J_2(\gamma)) - \text{Re}(J_2(\gamma))}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\gamma} \text{Im}(J_1(\gamma)) \quad (15)$$

Bartoli 公式和 Tourkhani 公式中 N_s 为每匝利兹线的股线数; η_1 为利兹线导体的孔隙率; η_2 为利兹线中每股导线孔隙率; d_0 为利兹线不包括外层绝缘的导体直径; d_s 为利兹线每股导线的直径; t_0 为相邻利兹线导体中心距离; t_s 为利兹线相邻股线中心距离; r_0 为利兹线不包括外层绝缘的导体半径; β 为利兹线的填充率。

2.3 绝缘

高频变压器绝缘包括主绝缘、匝间绝缘和层间绝缘。主绝缘包括绕组及引线对磁芯与地之间、不同电压等级绕组之间的绝缘, 常用的绝缘材料为绝缘油、油纸绝缘或环氧树脂浇注。匝间绝缘常用的

绝缘材料为漆包线漆和绝缘纸,层间绝缘使用绝缘漆浸渍处理或者聚酯薄膜。

关于频率和温度对绝缘材料性能的影响,国内外已经做过很多研究。图9为聚酰亚胺(PI)薄膜在电压频率为30 kHz,幅值为1.5 kV、2 kV、2.5 kV、3 kV的正弦电压下的局部放电结果。结果表明,放电都集中在电压上升阶段并且在电压幅值为2.5 kV和3 kV时会出现反向放电,电荷积聚-耗散理论可以对此现象进行解释^[38-39]。

将两台相同的变压器分别置于工频正弦和高频脉冲下,发现在高频畸变电压下变压器局部放电水平等测量值显著变化,表明高频脉冲下绝缘系统发生了退化^[39]。基于电-热联合实验平台,在不同频率和温度下对高频变压器聚酰亚胺绝缘进行局部放电实验可知最大放电幅值随频率增大而下降^[40]。图10为聚酯薄膜(PET)等4种绝缘材料在双极性高频方波电压下的击穿特性。结果表明,绝缘材料击穿电压随频率上升显著降低^[41],当频率从1 kHz升高到20 kHz时,4种绝缘材料的特征击穿电压下降到了原值的35.54%~43.76%。由此可见,高频电场下,绝缘介质的击穿强度远低于低频或工频。因此,在高压高频下绝缘设计的首要问题是研究高频下绝缘材料击穿特性和机理,在保证绝缘材料短时耐电压能力的基础上进行材料选择和结构设计。

随着温度升高,变压器绝缘局部放电幅值和次数都随之增大^[38]。由PI薄膜在老化前后的FTIR图谱可知,PI分子在1 kV、频率为1 kHz的双极性方波脉冲电压和温度为80 °C的老化试验条件下损伤严重,主要表现为代表酰亚胺环的吸收峰均明显减弱,1 112 cm⁻¹峰甚至消失;与苯环结构相对应的吸收峰也出现较为明显的减弱,图11为PI薄膜老化前后的FTIR光谱^[42]。由仿真计算的结果可知,由于电阻率和相对介电常数随温度变化,变压器内最大电场强度在高温(100 °C)下比常温(20 °C)增加了大约5%^[43]。除此之外,介质损耗因数也随着温度升高而升高^[44]。

高频变压器常用的绝缘方式为环氧树脂浇筑,虽然环氧树脂绝缘性能好,但热导率低。另外,高频电场下磁芯和绕组损耗增加了变压器的温升。此时,变压器绝缘需要承受高频、高压和高温的共同作用,影响变压器绝缘耐电场特性;同时高频变压器体积小,这些都给高频变压器绝缘设计提出了很大的挑战。

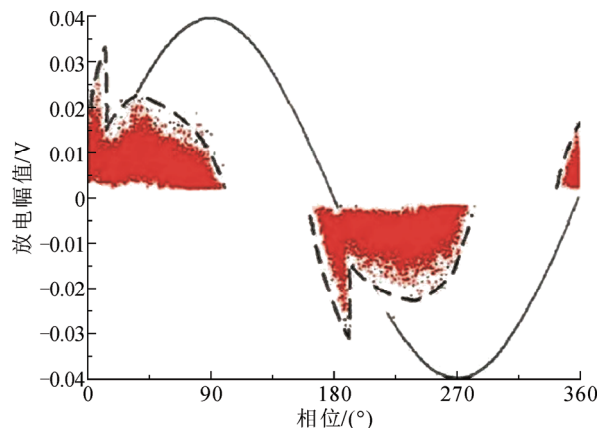


图9 PI薄膜在30 kHz, 2.5 kV的正弦电压下的局部放电结果

Fig.9 Partial discharge of PI film under the 2.5 kV sinusoidal voltage of 30 kHz

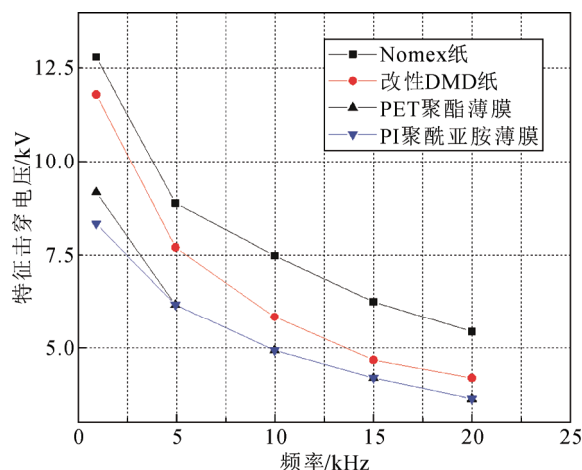


图10 特征击穿电压随频率变化结果

Fig.10 Results of breakdown voltage as a function of frequency

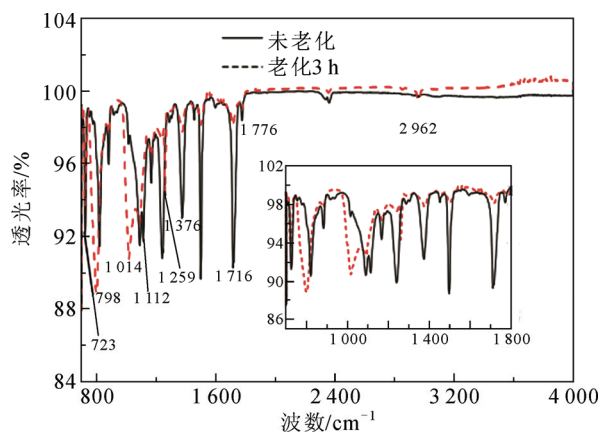


图11 PI薄膜老化前后的FTIR光谱

Fig.11 FTIR spectra of PI film before and after aging

2.4 散热

变压器的热量来源主要是磁芯、绕组和介质损耗。由上述分析可知,在高频下,磁芯和绕组损耗

都大大高于工频。同时高频变压器体积较小, 导致散热面积小, 因此高频变压器工作时内部的温升会很高, 散热对高频变压器设计至关重要。

高频变压器主要采用固体绝缘, 其散热冷却方式主要有自然风冷、强迫风冷和水冷等方式。强迫风冷是通过安装风扇或风机加速空气流动, 以达到快速冷却的目的。目前常用的强迫风冷方法是低吹顶抽方式, 即通过安装在底部的气机将吸收了热量的热空气吹到顶部, 再被顶部的气机向上抽出, 从而带走变压器的热量。强迫风冷时, 变压器的输出容量可提高 50%。文献[45]基于有限元法, 通过建立 1 000 kVA 干式变压器三维热-流耦合模型, 计算了自然风冷和强迫风冷方式下变压器的三维温度场, 发现强迫风冷下变压器温度比自然风冷下降低了 29.55%~37.56%。另外, 文献[9]在设计一种 166 kW/20 kHz 的变压器样机时为了达到温度要求, 采用了在变压器中安装管道通过水流循环带走热量的水冷方式, 大大提高了变压器的散热速度并满足了设计需求, 图 12 为带有水冷散热器的高频变压器示意图[9]。

除此之外, 文献[46]还提出了一种以相变材料为制冷剂的蒸发冷却方式, 由于汽化潜热带走的热量远大于通过温差带走的热量, 因此蒸发冷却具有广阔的应用前景, 但这种技术对相变材料的要求较高, 目前的研究还处于初始阶段。

2.5 优化设计

电力电子变压器中高频变压器的设计除遵循一般高频变压器设计原则外, 还需要考虑具体工况, 如非正弦激励下磁芯和绕组材料选择, 以及对绝缘和温升的处理等[47]。此外, 还需要分析高压、高频、多谐波下的损耗、发热特性, 通过电磁-热多物理场分析, 进行高频变压器的设计。

图 13 为高频变压器简要设计流程[48]。在设计初期, 根据系统的容量、电压等级、频率以及谐波含量和温升的要求, 选择磁芯材料并确定磁芯和绕组结构以及磁密和损耗系数。之后选择绝缘材料并计算绝缘距离, 可以根据磁芯和绕组结构选择绕组绝缘和主绝缘材料, 比如绕组绝缘可以采用绝缘纸, 或者与主绝缘一样采用环氧树脂浇注。然后进行散热设计。根据电压和容量要求, 计算损耗发热特性, 据此进行散热设计, 如水冷, 风冷等。最后选择磁芯的几何参数, 再根据所选的参数计算电磁损耗和温升等得到初步的设计参数。设计完成后, 采用有

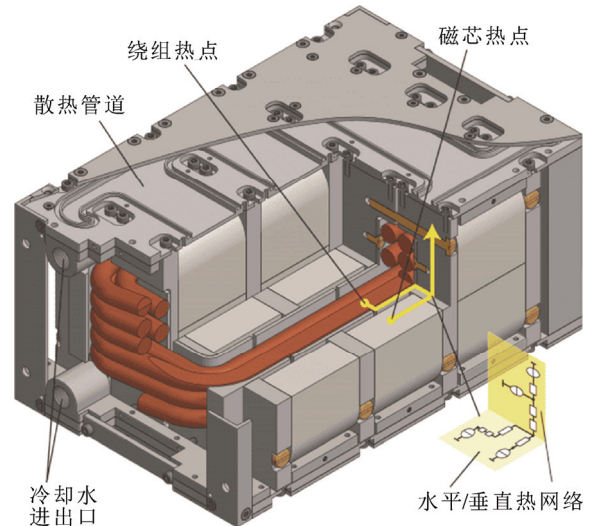


图 12 带有水冷散热器的高频变压器示意图

Fig.12 Schematic diagram of HFT with water cooling radiator

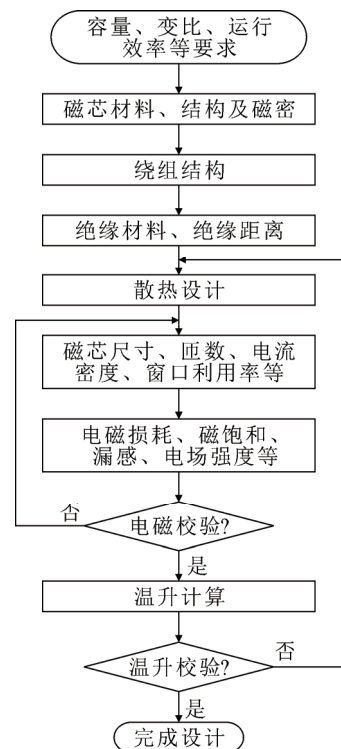


图 13 高频变压器设计流程图

Fig.13 Design flow chart of high frequency transformer

限元仿真进行校验, 计算电场应力的分布, 分析能否保证绝缘不被击穿, 尤其是在绕组端部这种电场发生畸变的区域。同时检验损耗是否满足效率要求, 温升是否达到规定指标等[48]。若仿真结果超出设计裕度, 则根据结果对设计进行优化, 如在绕组端部区域对绝缘结构进行梯度设计等。

3 存在的问题

随着电力电子变压器的小型化、高频化、高功率密度化、模块化发展,高频变压器的杂散参数对电路的影响也越来越大。如漏感、分布电容。目前,制约其发展的主要原因有:大容量高频电磁拓扑中,绝缘设计难度较大;高频变压器的激励波形,具有上升时间短、幅值大、频率高等特点^[49],易于产生更多持续的局部放电脉冲和空间电场畸变,导致绝缘在高频电压下迅速失效^[50];铁磁材料磁滞回线面积在高频下变大,导线中的集肤效应和邻近效应更加严重,损耗大大提高,其正常工况下局部温升高达150~200℃^[41],极大地影响了绝缘寿命。

3.1 磁芯特性和损耗计算

高频下具有低损耗密度、高饱和磁密和高机械强度的金属软磁材料(如纳米晶合金)可能取代传统磁芯材料应用于高压高频变压器。然而,这些金属软磁材料的高频磁化特性、损耗特性以及温升、噪声、振动等特性尚不清楚,是高压高频变压器的设计难点。

由于磁芯损耗分布不均匀,总损耗比按照磁密均匀的部分单位体积的损耗与总体积的乘积要小,也造成仿真得到的总磁芯损耗比理论计算结果小。并且,实际变压器中磁芯的接缝处磁通分布非常复杂,造成损耗严重,简单地计算模型无法体现这一现象。目前为止,也没有统一标准的非正弦激励下的磁损耗模型计算公式,能准确获得磁芯损耗密度的不均匀分布特性。所以,给高频变压器的设计造成一定的难度。

3.2 绕组分布参数及效应

集肤效应和邻近效应对导体电流分布的影响,与绕组的结构、导体的电导率、电流频率等因素有关。绕组的交流损耗越大,电流分布越不均匀。不同绕组结构的交直流电阻比计算方法有所不同。所以,对于复杂波形和谐波下的集肤效应、邻近效应,理论计算是一个研究难点。

绕组上的寄生参数分布不容忽视。漏感上储存的能量在功率器件发生转换时释放,会造成很大的尖峰电压和浪涌电流,使损耗增加,还会造成器件损坏及电磁干扰。分布电容储存的能量会使脉冲方波的上升沿以及下降沿产生振荡,由此造成的过电压和过电流会增加开关应力,分布电容还会导致变压器电场的不均匀分布,电势高的端部易发生电压

击穿现象。因此,如何优化出更良好的绕组结构来减小变压器的漏感和分布电容是绕组设计中一个重要问题。

3.3 绝缘破坏与结构优化

高频变压器在复杂工况下,绝缘受混合应力的影响,且耦合程度高,当局部电场集中时,容易引起绝缘击穿,造成绝缘系统被破坏,绝缘材料承受的电-热应力更加严重,例如:击穿、老化,绝缘系统的稳定性和可靠性也成为高频变压器发展的重要因素。

绝缘击穿和放电是高频变压器匝间、层间和主绝缘设计的关键问题。现有的绝缘击穿研究大多针对工频和直流,针对非正弦和多谐波下的绝缘击穿特性和机理研究较少,且存在很多难点。首先,如何准确表征非正弦、多谐波下绝缘介质的击穿特性,获得其击穿规律?然后,频率、温度、谐波含量等对击穿的影响机理不清楚。另外,高频高温下绝缘介质微观电荷输运模型不清楚;缺乏电荷输运与宏观电导、电场畸变、空间电荷等的关联,制约了高频变压器的初始绝缘设计。

高压大容量高频变压器一般采用绝缘性能优异的树脂材料,如环氧树脂进行浇注。在长期高压、非正弦、谐波和高温作用下,绝缘材料可能出现复杂的劣化和老化特性^[51],研究影响高频变压器的长期稳定和安全运行。因此,如何获得高压、非正弦、谐波和高温作用下介质材料的老化特性,研究老化特征参量变化,提出评估绝缘材料老化和寿命预测的方法是高频变压器可靠性研究的关键问题。

在绝缘结构设计方面,不同的绕组结构会形成不同的层间电位差,产生不同的电压分布,从而对绕组绝缘产生影响。此外,随着小型化和紧凑型的要求,如何设计小尺寸、高性能和高稳定性的绝缘结构是高频变压器发展的重要挑战。这里主要涉及两个问题。一是如何设计和开发耐高压、耐局部放电、耐高温、高导热、高机械强度的新型绝缘材料和工艺?二是如何进行绝缘结构优化设计?高频变压器匝间多采用聚酰亚胺(PI)薄膜进行绝缘,主绝缘常用环氧树脂浇注。如何进行改良浇筑类型、匝间绝缘、层间绝缘和端部绝缘的设计,优化绝缘尺寸和端部绝缘距离是研究的主要问题。此外,如何考虑非均匀绝缘、梯度绝缘和非线性绝缘设计,进而改善电场和温度分布,提高变压器的绝缘强度,是研究的难点。

3.4 电热耦合的温升效应及散热

高频变压器的散热问题主要从两部分考虑, 一要考虑内部的材料和界面处理, 由于高频变压器体积减小、散热面积减小、单位绝缘材料承受的温升更大。在长期热应力作用下, 绝缘材料将逐渐劣化、电气强度降低, 加剧绝缘材料老化, 因此要选择耐高温、绝缘性能优良的绝缘材料。二要考虑外部的冷却方式和结构设计, 要针对所研究的变压器用途和类型, 选择高效的冷却方式。另外, 磁芯和绕组的电气参数, 如磁芯的 $B-H$ 曲线、磁导率, 绕组的电导率等, 都和温度有关。绕组中的温度分布不均会使不同位置的绕组电阻率不同, 可能导致分段绕组之间的压降不均, 给压降较大的部分带来高压和绝缘挑战。绕组的排布和绝缘的结构设计也会对温升有影响, 合理设计变压器内部结构对改善温升有一定的效果。由于高频变压器的大部分损耗都转化为热量, 精确预估非正弦波激励下高频变压器绕组与磁芯损耗以及温升特性, 对于高频变压器的散热设计至关重要。

4 结论

1) 研究高频变压器分布参数, 特别是分布电容对其性能的影响; 以及负载突变造成的电压波动。探索改善分布参数影响和负载波动的方法。

2) 高频变压器材料研究和开发, 主要包括高性能磁芯材料和绝缘材料。如何开发具有高频高压稳定性、低损耗的磁芯和高绝缘、高导热性能的绝缘材料是高频变压器发展的关键。针对电磁特性、成本与散热以及用量来进行合理尺寸、形状的薄膜磁芯、片式磁芯、平面磁芯的设计。

3) 针对复杂工况下的磁芯、绕组、绝缘发热进行热管理和散热优化设计。关注高频变压器散热片优化设计, 损耗计算与分布特性, 材料特性和热界面材料设计研究。

4) 高频变压器的结构优化。在设计上需要综合绕组导线、窗口填充、散热和结构紧凑等要求。特别是绝缘结构方面, 采用非线性, 非均匀和梯度绝缘设计的思想, 实现应用场景下的整体设计。

参考文献 References

[1] 毛承雄, 范澍, 黄贻煜, 等. 电力电子变压器的理论及其应用(II)[J]. 高电压技术, 2003, 29(12): 1-3.
MAO Chengxiong, FAN Shu, HUANG Yiyu, et al. Theory of power

electronic transformer and its applications (II)[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 1-3.

[2] WANG D, YANG Y, TIAN J, et al. Design and implementation of 10-kV MW-level electronic power transformer (EPT)[C] // 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-10.

[3] 韩继业, 李勇, 曹一家, 等. 基于模块化多电平型固态变压器的新型直流微网架构及其控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 733-740.
HAN Jiye, LI Yong, CAO Yijia, et al. A new DC microgrid architecture based on MMC-SST and its control strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 733-740.

[4] 刘建强, 赵楠, 孙帮成, 等. 基于 LLC 谐振变换器的电力电子牵引变压器控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3333-3344.
LIU Jianqiang, ZHAO Nan, SUN Bangcheng, et al. Research on control strategy of power electronic traction transformer based on LLC resonant converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3333-3344.

[5] WANG D, TIAN J, MAO C X, et al. A 10 kV/400 V 500 kVA electronic power transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 6653-6663.

[6] 刘教民, 孙玉巍, 付超, 等. 基于电力电子变压器的电池储能并网系统及其自抗扰控制[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 131-139.
LIU Jiaomin, SUN Yuwei, FU Chao, et al. Battery energy storage system based on power electronic transformer and its ADRC control strategy[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 131-139.

[7] LEIBL M G, ORTIZ G, KOLAR J W. Design and experimental analysis of a medium-frequency transformer for solid-state transformer application[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 110-123.

[8] HEINEMANN L. An Actively cooled high power, high frequency transformer with high insulation capability[C]//APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas, TX, USA: IEEE, 2002: 352-357.

[9] VILLAR I, RUFER A, VISCARRET U, et al. Analysis of empirical core loss evaluation methods for non-sinusoidally fed medium frequency power transformers[C] // 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, UK: IEEE, 2008: 208-213.

[10] 韩帅, 张黎, 谭兴国, 等. 基于损耗分析的大容量高频变压器磁芯材料选型方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1486-1491.
HAN Shuai, ZHANG Li, TAN Xingguo, et al. Material selection based on loss characterization for high-power high-frequency transformer cores[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1486-1491.

[11] 赵争菡, 汪友华, 凌跃胜, 等. 大容量高频变压器绕组损耗的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 261-265.
ZHAO Zhenghan, WANG Youhua, LING Yuesheng, et al. Calculation and analysis of loss in high-capacity high-frequency transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 261-265.

[12] 朱洪文. 高频变压器等效模型与参数计算测定[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
ZHU Hongwen. High-frequency transformer equivalent model and their parameters calculation and measurement[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2012.

[13] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.
LI Zixin, WANG Ping, CHU Zunfang, et al. Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic

- transformer[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(9): 2592-2601.
- [14] GUILLOD T, HUBER J E, FRANCK C M, et al. Characterization of the voltage and electric field stresses in multi-cell solid-state transformers[C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014: 4726-4734.
- [15] 李子欣, 高范强, 赵 聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 38(5): 1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 38(5): 1274-1289.
- [16] 孙丽敬, 吴 鸣, 汪 洋, 等. 用于柔性直流配电的高频隔离链式双向直流固态变压器[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(10): 124-131.
SUN Lijing, WU Ming, WANG Yang, et al. Bidirectional High-frequency-link DC solid-state transformer for flexible DC power distribution[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(10): 124-131.
- [17] MARKO M, DRAZEN D. Sensitivity analysis of medium-frequency transformer designs for solid-state transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(9): 8356-8367.
- [18] ZHAO C H, DUJIC D, MESTER A, et al. Power electronic traction transformer-medium voltage prototype[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 61(7): 3257-3268.
- [19] ORTIZ G, LEIBL M G, HUBER J E, et al. Design and experimental testing of a resonant DC-DC converter for solid-state transformers[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(10): 7534-7542.
- [20] 王延安, 肖登明, 李佑淮, 等. 大功率高频高压变压器的试验及故障分析[J]. *高电压技术*, 2009, 35(5): 1049-1053.
WANG Yan'an, XIAO Dengming, LI Youhuai, et al. Test and fault analysis for high power high frequency high voltage transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(5): 1049-1053.
- [21] BENGTSSON T, DIJKHUIZEN F, LI M, et al. Repetitive fast voltage stresses-causes and effects[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009, 25(4): 26-39.
- [22] 齐 磊, 刘 晨, 唐 剑, 等. 高频变压器不同负载下的传输特性[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1338-1347.
QI Lei, LIU Chen, TANG Jian, et al. Transfer characteristics of high-frequency transformers under different load conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1338-1347.
- [23] DU Y, BAEK S, BHATTACHARYA S, et al. High-voltage high-frequency transformer design for a 7.2 kV to 120 V/240 V 20 kVA solid state transformer[C] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA: IEEE, 2010: 493-498.
- [24] BAEK S, DU Y, WANG G, et al. Design considerations of high voltage and high frequency transformer for solid state transformer application[C] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA: IEEE, 2010: 421-426.
- [25] 陈 彬, 李 琳, 赵志斌. 双向全桥 DC-DC 变换器中大容量高频变压器绕组与磁心损耗计算[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(22): 123-133.
CHEN Bin, LI Lin, ZHAO Zhibin. Calculation of high-power high-frequency transformer's copper loss and magnetic core loss in Dual-Active-Bridge DC-DC converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(22): 123-133.
- [26] REINERT J, BROCKMEYER A, DONCKER R W A A. Calculation of losses in ferro-and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation[J]. *IEEE Transactions on Industry applications*, 2001, 37(4): 1055-1061.
- [27] LI J, ABDALLAH T, SULLIVAN C R. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms[C] // Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE. Chicago, IL, USA: IEEE, 2001, 4: 2203-2210.
- [28] VENKATACHALAM K, SULLIVAN C R, ABDALLAH T, et al. Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters[C] // 2002 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics. Mayaguez, Puerto Rico, USA: IEEE, 2002: 36-41.
- [29] SHEN W, WANG F, BOROYEVICH D, et al. Loss characterization and calculation of nanocrystalline cores for high-frequency magnetics applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(1): 475-484.
- [30] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1988, 24(1): 621-630.
- [31] 赫荣臻. PWM 激励下高频变压器铁心损耗性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
HE Rongzhen. Research on core loss performance of high frequency transformer under PWM excitation[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2019.
- [32] 曹小鹏. 大功率高频变压器优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2018.
CAO Xiaopeng. Optimization design of high-power-high-frequency transformer[D]. Nanjing, China: Southeast University, 2018.
- [33] 李亚丽. 高频变压器绕组损耗及分布参数的分析计算[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
LI Yali. The analysis and calculation of winding loss and distribution parameters of high frequency transformer[D]. Tianjin, China: Hebei University of Technology, 2015.
- [34] DOWELL P. Effects of eddy currents in transformer windings[J]. *Proceedings of the IEE*, 1966, 113(8): 1387-1394.
- [35] FERREIRA J A. Electromagnetic modeling of power electronic converters[M]. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [36] BARTOLI M, NOFERI N, REATTI A, et al. Modelling winding losses in high-frequency power inductors[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 1995, 5(4): 607-626.
- [37] TOURKHANI F, VIAROUGE P. Accurate analytical model of winding losses in round Litzwirewindings[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37(1): 538-543.
- [38] 张开放. 高频电力变压器绝缘放电特性发展规律与机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZHANG Kaifang. Research on insulation discharge characteristics development law and mechanism of high frequency power transformer[D]. Jinan, China: Shandong University, 2019.
- [39] KHANALI M, SHESHA J, JOHN C. Effects of voltages with high-frequency contents on the transformer insulation properties[C] // Electrical Insulation Conference. Ottawa, Ontario, Canada: IEEE, 2013: 235-238.
- [40] 韩 帅, 李庆民, 刘伟杰. 温-频耦合效应对高频固态变压器绝缘局部放电特性的影响[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(2): 205-210.
HAN Shuai, LI Qingmin, LIU Weijie. Impacts of coupled temperature-frequency effects on partial discharge characteristics of high frequency solid state transformer insulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(2): 205-210.
- [41] 赵义焜, 张国强, 郭润春, 等. 高频变压器用耐高温型匝间绝缘材料的击穿特性[J]. *高电压技术*, 2020, 46(2): 657-666.
ZHAO Yikun, ZHANG Guoqiang, GUO Runrui, et al. Breakdown

- characteristics of heat-resistant inter-turn insulation materials in high-frequency transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 657-666.
- [42] 罗 杨, 吴广宁, 刘继午, 等. 表面放电对聚酰亚胺薄膜材料的电气损伤特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 187-195. LUO Yang, WU Guangning, LIU Jiwu, et al. Electrical damage characteristics of polyimide films caused by surface discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 187-195.
- [43] 王建民, 王同同, 刘建军, 等. 不同温度下换流变压器主绝缘电场的仿真研究[J]. 变压器, 2019, 56(6): 55-58. WANG Jianmin, WANG Tongtong, LIU Jianjun, et al. Numerical simulation of main insulation electric field at different temperatures for converter transformer[J]. Transformer, 2019, 56(6): 55-58.
- [44] 严贝贝, 吴旭翔, 郑志曜, 等. 变压器温升试验对绝缘油介质损耗因数的影响分析[J]. 绝缘材料, 2019, 52(11): 95-98. YAN Beibei, WU Xuxiang, ZHENG Zhiyao, et al. Influence analysis on transformer temperature rise test on dielectric loss factor of insulating oil[J]. Insulation Materials, 2019, 52(11): 95-98.
- [45] 杨 帆, 程 鹏, 胡晓锐, 等. 干式变压器的强迫风冷研究及其影响因素分析[C]//中国电机工程学会第13届青年学术会议论文集. 重庆: 中国电机工程学会, 2014: 700-706. YANG Fan, CHENG Peng, HU Xiaorui, et al. Research on forced air cooling of dry-type transformer and analysis of its influencing factors[C]//Proceedings of the 13th Youth Academic Conference of China Society of Electrical Engineering. Chongqing, China: China Society of Electrical Engineering, 2014: 700-706.
- [46] 王新程, 李永光, 王治源, 等. 变压器冷却方式的研究进展[J]. 上海电力学院学报, 2018, 35(3): 221-225. WANG Xincheng, LI Yongguang, WANG Zhiyuan, et al. Research progress of transformer cooling methods[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 35(3): 221-225.
- [47] 律方成, 郭云翔, 李 鹏. 大功率中频变压器多目标参数优化设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 210-217. LÜ Fangcheng, GUO Yunxiang, LI Peng. Optimization design for multiple target parameters of high power medium frequency transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 210-217.
- [48] 谭 鑫. 中高频变压器的设计与仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2017. TAN Xin. Design and Simulation of medium-high frequency transformer[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [49] 赵剑锋. 输出电压恒定的电力电子变压器仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 30-33. ZHAO Jianfeng. Simulation of power electronic voltage transformer with constant output voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 30-33.
- [50] GUASTAVINO F, DARDANO A. Life tests on twisted pairs in presence of partial discharges: influence of the voltage waveform[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 45-52.
- [51] 李庆民, 刘伟杰, 韩 帅, 等. 环氧树脂绝缘高频电热联合老化中局部放电特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 389-395. LI Qingmin, LIU Weijie, HAN Shuai, et al. Analysis on partial discharge characteristics of epoxy resin insulation during high-frequency electrical-thermal aging[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 389-395.



王威望(通信作者)

1987—, 男, 博士, 副教授

主要从事绝缘介质理论和应用、空间电荷特性和机理、电力电子装置高频绝缘和高性能纳米电介质等方面的研究

E-mail: weiwang@xjtu.edu.cn

WANG Weiwang

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author

收稿日期 2020-07-08 修回日期 2020-09-03 编辑 陈 蔓