

考虑直流偏磁的磁控配电变压器声振耦合研究

杜志叶^{1,2}, 陈智超^{1,2†}, 陈晓国³, 占宇^{1,2}, 李根^{1,2}

(1. 电网环境保护全国重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘 要:为分析干式磁控配电变压器(MCDT)特殊结构与直流偏磁对绕组受力、铁芯振动频率响应以及声场分布的影响,理论推导了绕组振动响应、铁芯磁致伸缩应力以及声振耦合方程,提出了干式磁控配电变压器正常运行状态下声振耦合响应有限元数值模型,定位试验测量得到的结果与数值计算结果具有较好的一致性,验证了数值模型的可行性.利用数值模型对干式磁控配电变压器调节无功的直流偏磁工况进行有限元计算,得到直流偏磁对磁致伸缩与声场分布的影响.研究表明,考虑直流偏磁运行工况下,绕组总体呈现向内收缩趋势,铁芯以 50 Hz 等大量奇次谐波频率进行振动,随直流偏磁的增加,噪声场逐渐增强.

关键词:电磁力;干式磁控配电变压器;直流偏磁;振动噪声;磁致伸缩

中图分类号:TM726

文献标志码:A

Study on Acoustic-vibration Coupling of Magnetic Control Distribution Transformer Considering DC Bias

DU Zhiye^{1,2}, CHEN Zhichao^{1,2†}, CHEN Xiaoguo³, ZHAN Yu^{1,2}, LI Gen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: To analyze the influence of the special structure of dry-type magnetic control distribution transformer (MCDT) and DC bias on the winding force, core vibration frequency response and acoustic field distribution, this paper theoretically derives the winding vibration response, core magnetostrictive stress and acoustic-vibration coupling equation, and proposes a finite element numerical model of acousto-vibration coupling response under the normal operation of dry-type magnetron distribution transformer. A good agreement between the results from the positioning tests and FE modeling verifies the feasibility of the proposed FE model. Then, the numerical model is used to calculate the influence of DC bias on magnetostriction and sound field distribution under the condition of DC bias. The results show that the windings generally show an inward shrinkage trend under the condition of DC bias,

* 收稿日期:2024-08-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52377015), National Natural Science Foundation of China(52377015);南方电网科学研究院重大资助项目(031200KK52222014, GDKJXM20222196), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Research Institute(031200KK52222014, GDKJXM20222196)

作者简介:杜志叶(1974—),男,河南许昌人,武汉大学教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail:1511922159@qq.com

and the core vibrates at a large number of odd harmonic frequencies, such as 50 Hz, and the noise field gradually increases with the increase of DC bias.

Key words: electromagnetic force; dry-type magnetic control distribution transformer; DC bias; vibration noise; magnetostriction

变压器作为电压传输与分配的核心装备,如何保证其长期稳定安全地运行至关重要。作为一种典型的多物理场耦合设备,变压器在运行过程中会受到多场的作用,形成复杂的多物理场耦合关系,干式磁控配电变压器(magnetic control distribution transformer, MCDT)作为一种新型电力设备,其运行过程中的物理场耦合情况相比于普通配电变压器更为复杂。与此同时,变压器在运行过程中产生的噪声会危害人们健康,影响正常生活,为保障居民不受噪声的干扰,需要对磁控配电变压器噪声进行更细致的研究^[1]。现有研究成果表明,铁芯硅钢片磁致伸缩与绕组所受电磁力振动是导致变压器噪声的主要原因^[2-4],考虑到磁控配电变压器运行过程中复杂的工况,对其噪声产生机理以及衰减过程进行研究,不仅可以在设计初期有效预估其噪声值,而且可为后续磁控配电变压器的噪声优化提供依据。对绕组而言,不同于常规变压器,磁控配电变压器绕组受力情况较为独特,同时绕组发生短路故障时,突变的瞬时电流会对其造成损伤,影响变压器正常运行,因此,分析磁控配电变压器漏磁分布、受力情况以及声场分布具有重大意义。

变压器噪声主要来源于本体噪声和冷却设备噪声,其中本体噪声是近年来研究的重点^[5-6]。在高外施电压下,铁芯饱和度较高时磁致伸缩导致的硅钢片振动是变压器噪声的主要来源^[7];而以本文的研究对象为例,在外施电压较低的状态下,其铁芯工作点远小于额定磁通密度工作点,磁通密度较低,由磁致伸缩导致的振动大幅减小,其噪声主要由绕组振动产生^[8]。目前,国内外学者对变压器的受力情况^[9]与噪声分布^[10-12]进行有限元分析时,对象往往为常规三相变压器,所得到的振动噪声规律在磁控配电变压器上并不适用;绕组声振耦合理论以及计算方法已经较为完善,部分学者采用结构-声耦合计算方法^[13],对三相配电变压器本体振动^[14]与声场分布^[15]进行研究。一些学者提出力-声解耦计算^[16-17],将振

动加速度作为激励得到变压器的噪声分布^[18]以及声频谱特性^[19]。但对于磁控配电变压器而言,添加直流进行无功补偿过程中,直流偏磁现象会导致铁芯达到临界饱和或过饱和状态,同时因铁磁曲线非线性原因,铁芯振动加剧的同时产生丰富谐波,进而产生更大噪声^[20]。

对此,本文构建了一种直流偏磁下的磁控配电变压器(MCDT)声振耦合模型,并通过干式磁控配电变压器样机实验验证模型的可靠性。结合铁芯与绕组漏磁通分布下受力理论对振动信号的频谱特性进行研究,通过建立磁控配电变压器声振耦合模型分析绕组受力情况与声波的分布规律,确定适用于干式磁控配电变压器的多场耦合计算方法,为后续磁控配电变压器的绕组机械强度设计以及降噪设计提供计算依据。

1 MCDT 声振耦合基本原理

1.1 MCDT 电磁-结构耦合受力理论

变压器在有限元求解中符合麦克斯韦方程组,该方程组描述磁控配电变压器运行时电磁场各变量之间的相互关系^[21]。将绕组中的电流近似表示为正弦形式,漏磁通流经非铁磁材料时,因B-H曲线线性且漏磁通主要为轴向分量,磁感应强度公式可近似表示为一个时变正弦函数:

$$B = kI_m \cos \omega t \quad (1)$$

式中: B 为磁感应强度; I_m 为电流幅值; k 为磁感应强度和电流之间的电动力系数。根据洛伦兹力公式可以得到绕组所受的电磁力:

$$\begin{aligned} F_E &= BI \cdot 2\pi R = \\ &kI_m \cos(\omega t + \phi_0) \cdot I_m \cos(\omega t + \phi_0) \cdot 2\pi R = \\ &2\pi R k I_m^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\phi_0) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: F_E 为绕组线圈受到的电磁力; R 为圆筒形线圈半径。由式(2)可知,绕组受电磁力振动的角频率为工频的两倍,即主要频率为 100 Hz,受到电网中

存在的高次谐波以及铁芯磁化曲线的非线性影响,变压器绕组的振动加速度与位移分量均会含有少量的高次谐波.

磁致伸缩效应本构模型分为应变-磁化线性模型、应力-磁化线性模型、非线性各向同性模型与非线性各向异性模型.其中非线性各向同性模型相对来说在保证仿真结果的准确性前提下能减少仿真的计算量,因此,本文选取非线性各向同性模型,其控制方程为:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3)$$

$$S = C_H \varepsilon_{el} - C_H \varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{M_s^2} \text{dev}(M \otimes M) \quad (5)$$

式中: μ_0 、 H 、 M 分别为真空磁导率、磁场强度和磁化强度; S 为应力; C_H 、 ε_{el} 、 ε 、 λ_s 、 M_s 分别为刚度矩阵、应变矩阵、磁致伸缩引起的应变矩阵、饱和磁致伸缩率以及饱和磁化强度.由式(3)~式(5)可知,磁致伸缩非线性各向同性模型需要饱和磁化强度以及饱和磁致伸缩率等关键参数.本文磁控配电变压器铁芯使用 50W470 硅钢片材料,通过 25 cm 艾卜斯坦试验进行纵横向试样各半测量得到磁化曲线,如图 1 所示.

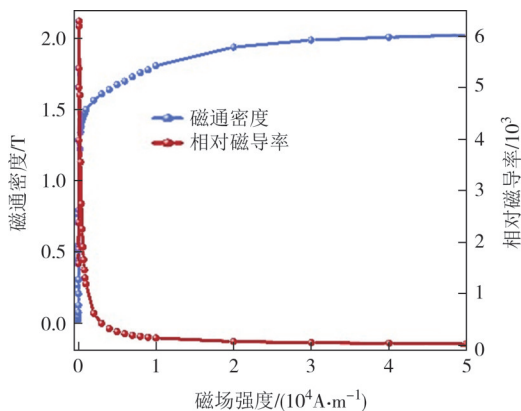


图1 铁芯磁化曲线

Fig.1 Core magnetization curve

1.2 MCDT 受力理论

MCDT 电路部分由均匀多匝圆导线绕制而成,根据右手螺旋定则可以确定图 2 所示的漏磁通曲线的大致分布规律.其中 B_x 、 B_z 分别表示辐向漏磁通与轴向漏磁通, F 为绕组所受电磁力.

变压器高低压绕组漏磁通规律已有学者进行了相应的研究^[22].高压绕组与低压绕组的辐向漏磁通规律相反,漏磁通分别自上而下逐渐下降至零与从零逐渐上升;二者轴向漏磁通规律相同,均呈由上而

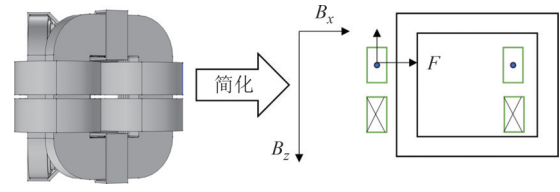


图2 绕组整体结构与高低压绕组漏磁通分布

Fig.2 The overall structure of the winding and the magnetic flux leakage distribution diagram of the high and low voltage windings

下先上升后下降的趋势,约 2/3 线圈处轴向漏磁通达到峰值.以高压绕组为例,绕组产生的轴向磁力线在绕组两端弯曲,导致两端轴向漏磁通分量小于中部轴向漏磁通分量,同时受下端低压绕组反向电流产生的轴向漏磁通影响,高压绕组的轴向漏磁通最大值由中部偏移至顶部 2/3 处.在辐向上,由于绕组结构的对称性,中间线饼处受到上下对称线饼大小相同、方向相反的轴向漏磁通,因此中部辐向漏磁通接近零.

由式(2)以及图 2 可以得出 MCDT 高压绕组所受轴向、辐向电磁力,如图 3 所示.由图 3 可知,高压绕组中,轴向电磁力具有反向对称的特点,上下两端受力较大,中端线圈处不受力且呈拉伸线圈的效果.假设高压绕组共 n 个线饼,辐向电磁力在约 $2/3n$ 处达到峰值并向两端衰减,呈现向内挤压线圈效果.

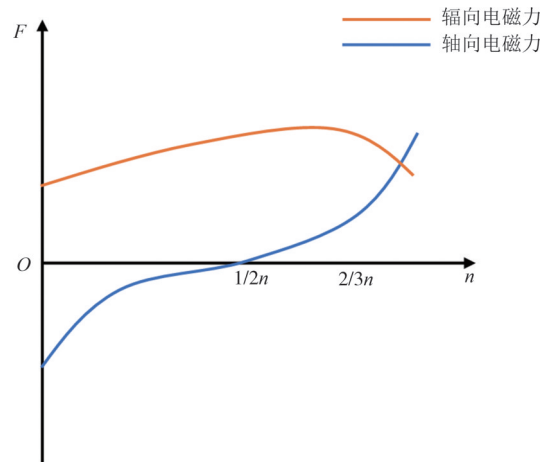


图3 MCDT 高压绕组所受轴向、辐向电磁力

Fig.3 Axial and radial electromagnetic forces on MCDT high-voltage windings

1.3 MCDT 声振耦合分析

MCDT 为线性弹性材料,忽略阻尼的作用,可看作一个典型的多自由度线性弹性质量系统,质量、阻尼、弹性是仿真数值计算的重要组成部分,振动方程为:

$$f = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c \frac{\partial u}{\partial t} + ku \tag{6}$$

式中： ρ 、 c 、 k 分别为密度矩阵、单位体积阻尼矩阵和单位体积弹性矩阵； f 为系统的外部单位体积作用力； u 为振动的位移。振动方程表示变压器自由振动与受迫振动的平衡。

MCDT 正常运行时因电磁力产生的噪声声压远小于大气压，属于线性声学的范畴。忽略对流传热导致的微小扰动，可以认为变压器内部流体质点振动速度为零，同时忽略狭窄微小结构表面处的热损耗与黏性损耗，得到适用于干式磁控配电变压器声学方程为：

$$\begin{cases} -\rho_0 \nabla \cdot l_i = \frac{\partial p_i}{\partial t} \\ \rho_0 \frac{\partial l_i}{\partial t} = -\nabla p_i \\ p_i = c_i^2 \rho_i \end{cases} \tag{7}$$

式中： p_i 为声压； l_i 为介质质点振动速度； ρ_i 为介质密度变化量； ρ_0 表示介质的初始密度； c_i 为声速。

声波在磁控配电变压器中的传播涉及电磁场、结构场、压力声场。绕组受力以法向加速度作用于流体，流体以声压为载荷作用于固体。两者间为双向耦合，关系式为：

$$\begin{cases} -n \cdot (-\frac{1}{\rho_c} \nabla p_i) = -n \cdot a \\ F_A = p_i n \end{cases} \tag{8}$$

式中： ρ_c 为流体介质密度； a 为加速度； F_A 为交界面处单位面积上的载荷； n 为法向单位矢量。

2 MCDT 绕组声振模型有限元分析

2.1 几何建模

对上述理论推导以及声振模型进行试验验证，首先进行有限元仿真建模，得到时域下绕组铁芯振动加速度等信号；然后对实际 MCDT 进行试验测量分析，观察绕组振动方向与铁芯在直流励磁作用下的振动。

本文以一台三相三柱式 MCDT 380 V 为研究对象进行试验验证，MCDT 的结构复杂，除了普通变压器所含的铁芯、绕组等结构外，还包含直流绕组、磁阀铁芯等结构。其中磁阀铁芯为截面积较小的铁芯，直流绕组绕制在磁阀之上，在正常运行时受到多场

影响，为进行高效仿真，需要设置一些简化条件。相较于绕组振动噪声，硅钢片产生的振动噪声较小，因此将铁芯简化为一整块硅钢片来控制计算成本。选择 800 mm 半径的球体作为空气域，包含 100 mm 厚度的空气作为完美匹配层，用于模拟无限远空气域，空气边界设定为磁绝缘边界。MCDT 的电磁参数如表 1 所示，磁场激励设置为符合 150/82 匝数比、高低压绕组方向相反的线圈电流激励，直流绕组不加电流激励。

表 1 MCDT 的电磁参数

Tab.1 Electromagnetic parameters of the MCDT			
参数	电流激励/A	线圈匝数	线圈半径/mm
一次侧	9.47	150	20
二次侧	17.33	82	20
直流侧	0	90	5

380 V 干式 MCDT 三维仿真模型如图 4 所示，与常规三相配电变压器不同，磁控配电变压器铁芯呈类似三角形的立体卷铁芯结构，在铁芯下端添加固定约束，模拟对铁芯的加固作用，选取高压绕组上一点作为观测点，便于后续分析。

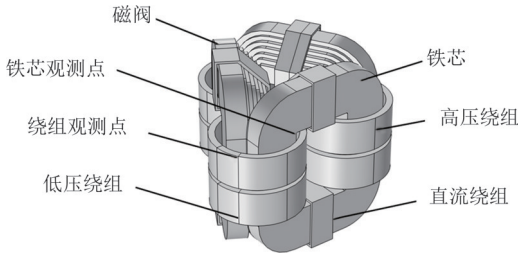


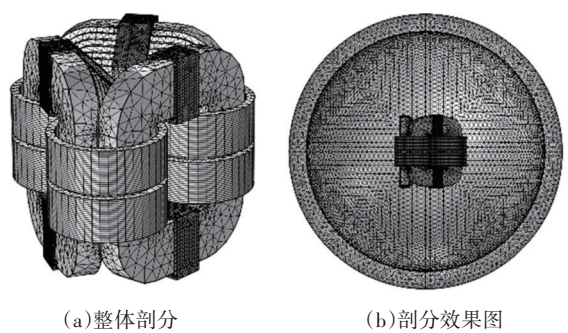
图 4 380 V 干式 MCDT 三维仿真模型

Fig.4 3D simulation model of 380 V dry-type MCDT

干式 MCDT 有限元剖分如图 5 所示。在声学仿真过程中，为确保仿真结果的精确性，需要对声音传播的媒介进行细致的网格剖分，确保网格尺寸的最大值为声音波长的 1/5；剖分效果图如图 5(b)所示，共计 1 885 686 个单元节点，远超常规三相配电变压器节点数。

2.2 电磁场有限元分析

将 MCDT 的铁芯设置为软磁材料属性，将艾卜斯坦试验测量所得磁化特性曲线导入软磁材料中，忽略铁芯的涡流效应，赋予绕组铜的材料属性。线圈假设为均匀多匝线圈，不考虑趋肤效应，电流均匀分布在线圈截面上，忽略线圈与铁芯中的涡流。MCDT 的材料参数如表 2 所示。



(a)整体剖分 (b)剖分效果图

图5 干式MCDT有限元剖分

Fig.5 Finite element partition of dry-type MCDT

表2 MCDT的材料参数

Tab.2 Material parameters of MCDT

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	相对介 电常数	泊松比	相对 磁导率	电导率/ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
铁芯	7 650	1	0.3	B-H	1.12×10^7
绕组	7 000	1	0.32	1	5.998×10^7
空气	1.29	1	—	1	0.01

不考虑直流激励情况下,对干式MCDT进行0~0.1 s的磁场研究,时步设置为0.5 ms,干式MCDT铁芯-绕组磁通-受力分布如图6所示.由图6可知,铁芯励磁处于线性区,未达到饱和状态,绕组附近的漏磁通具有对称性.同时50 Hz交变电流感应出绕组上50 Hz漏磁通,以单一时刻绕组外侧为研究对象,可以看出高压绕组辐向漏磁通自上而下由零逐渐上升,轴向漏磁通先上升后下降,于2/3线圈处达到峰值;类似地,绕组外壁受辐向电磁力向内挤压,电磁力于2/3线圈处达到峰值,两端受力向外扩张,与前文理论分析结果一致.

在50 Hz交变电流激励下,可得三相绕组在辐向与轴向所受电磁力,以A相高压绕组选取的观测点为例,经过50 ms的波动后达到稳定状态.A相高压绕组瞬态电磁力分析如图7所示.

由图7可知,绕组所受电磁力频率为100 Hz, $T=10\text{ ms}$.除此之外,辐向与轴向电磁力还包含一定的直流分量,表现为对绕组一个方向持续的作用力,与前文理论推导一致,为确保MCDT绕组不因受力损坏,需要外部添加一定约束力,消除直流分量的影响.

2.3 MCDT振动动态响应分析

为验证干式MCDT有限元模型准确性与上述铁芯-绕组受力振动机理,需要变压器绕组时域内振动信号数据.

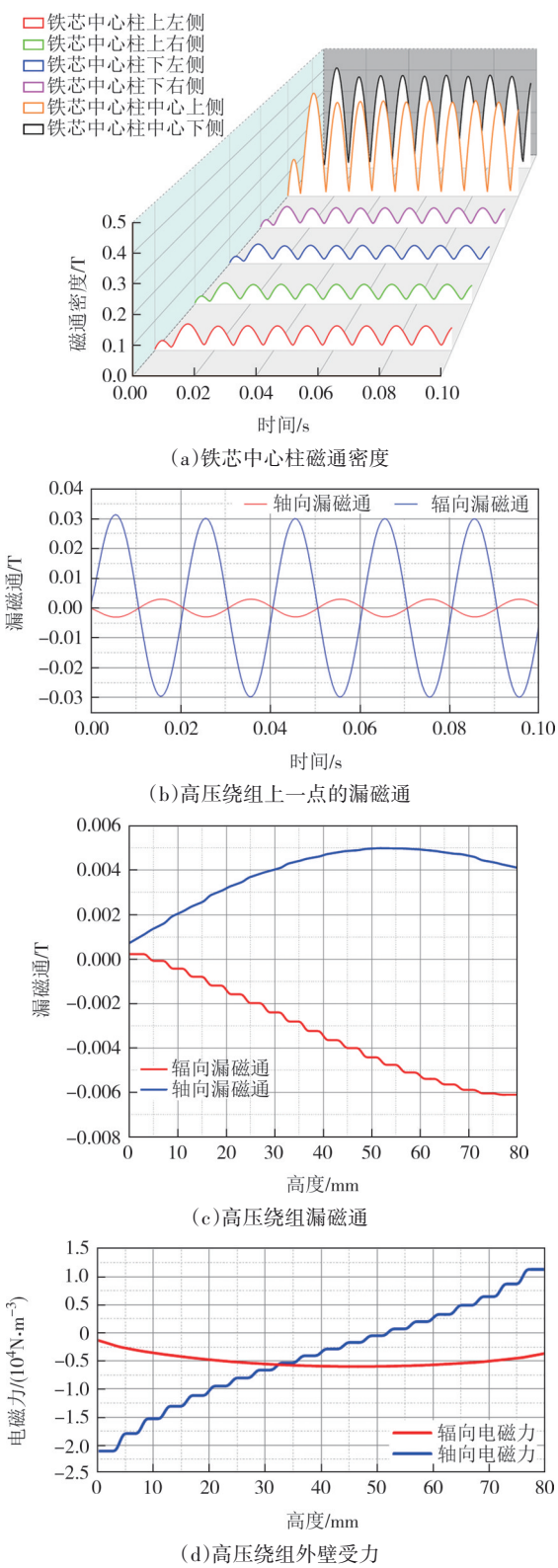


图6 干式MCDT铁芯-绕组磁通-受力分布

Fig.6 Dry-type MCDT core-winding flux-force distribution

变压器因电磁力与磁致伸缩作用产生的形变会切割磁力线产生新的感应电流,对电磁场产生影响.但变压器内部的材料通常比较紧固,难以形变,假设振动微幅,忽略绕组位置变动,产生的涡流非常小,

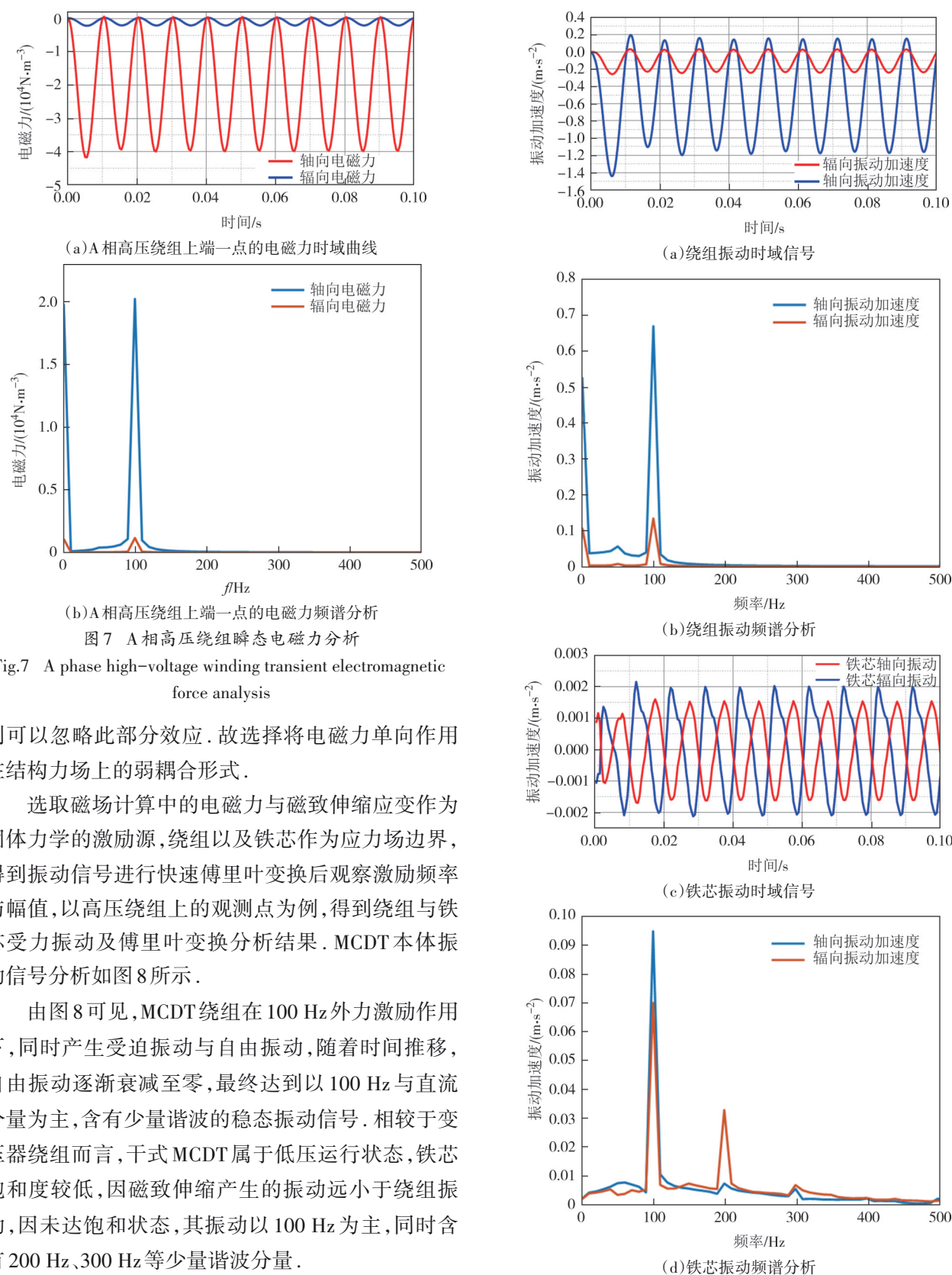


图 7 A 相高压绕组瞬态电磁力分析

图 8 MCDT 本体振动信号分析

则可以忽略此部分效应. 故选择将电磁力单向作用在结构力场上的弱耦合形式.

选取磁场计算中的电磁力与磁致伸缩应变作为固体力学的激励源, 绕组以及铁芯作为应力场边界, 得到振动信号进行快速傅里叶变换后观察激励频率与幅值, 以高压绕组上的观测点为例, 得到绕组与铁芯受力振动及傅里叶变换分析结果. MCDT 本体振动信号分析如图 8 所示.

由图 8 可见, MCDT 绕组在 100 Hz 外力激励作用下, 同时产生受迫振动与自由振动, 随着时间推移, 自由振动逐渐衰减至零, 最终达到以 100 Hz 与直流分量为主, 含有少量谐波的稳态振动信号. 相较于变压器绕组而言, 干式 MCDT 属于低压运行状态, 铁芯饱和度较低, 因磁致伸缩产生的振动远小于绕组振动, 因未达饱和状态, 其振动以 100 Hz 为主, 同时含有 200 Hz、300 Hz 等少量谐波分量.

为直观验证绕组整体安培力与铁芯振动分布特性, 确定 MCDT 绕组添加预应力、铁芯安装夹具防止绕组损坏的方式, 提取高低压绕组与铁芯位移云图, 如图 9 所示. 由图 9 可知, MCDT 绕组随电流变化相

继受力. 高低压绕组受力趋势相同, 上下端分别受轴向电磁力向外扩张, 呈现两端大、中间小的特点; 辐

向受力使绕组产生径向向内位移,符合理论分析中轴向电磁力先下降后上升、辐向电磁力恒正的特性.对于磁控配电变压器而言,避免因绕组受力损坏,需要在内侧添加夹具.对于铁芯而言,饱和程度较大的中心柱内侧区域受力位移较大,需要采取相应保护措施确保正常运行.

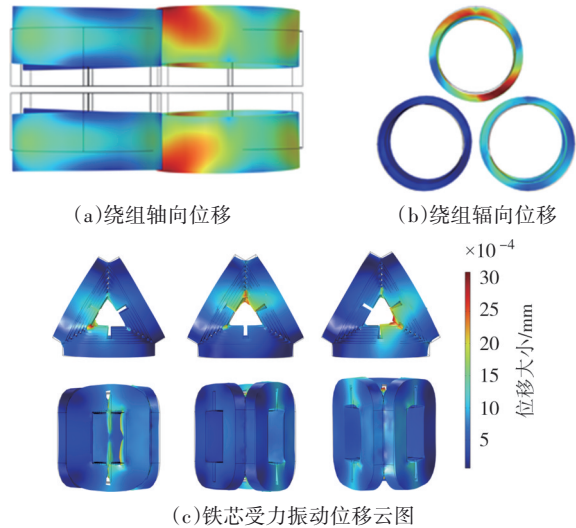


图9 绕组-铁芯振动位移云图
Fig.9 Winding-core vibration displacement cloud diagram

2.4 噪声场分析

声场激励选择应力场振动加速度作为边界载荷,考虑试验所处的试验大厅较为空旷且面积较大,是非完整的封闭空间混响场,为便于计算,忽略声波在大厅中的反射、折射,在声场仿真中将空气边界作为声场求解边界并设置为硬声场边界吸收声波,同时在空气域的外层设置一层厚度为 100 mm 的完美匹配层,进行声振耦合有限元计算,可得到干式 MCDT 噪声场云图,同时选取高低压绕组分界面作切面图. MCDT 噪声场云图如图 10 所示,三相绕组受力在交变电流的作用下交替达到峰值,可以看出干式 MCDT 绕组电流达到峰值时,其噪声可达 70 dB 左右,受力较小时,其噪声接近 50 dB.

因 MCDT 是三角对称型结构,绕组与铁芯振动产生的声场也呈对称分布,随着交变电流的变化,受力振动产生的噪声交替达到峰值,靠近绕组附近及三绕组构成的等边三角形形心处声压级较大,达到 68 dB 左右,并形成向周围扩散衰减的规律.

MCDT 噪声场波形如图 11 所示. 由图 11 可知,因绕组与铁芯振动频率均以 100 Hz 为主, MCDT 产生的噪声频率主要集中在 100 Hz 左右,同时包含

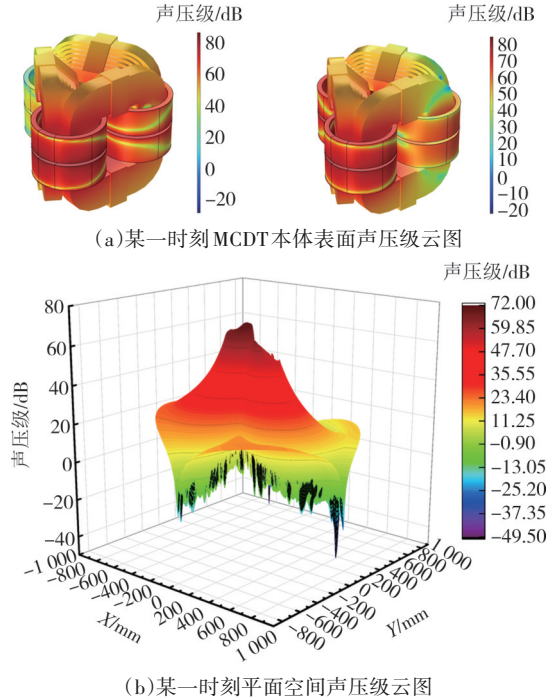


图 10 MCDT 噪声场云图
Fig.10 MCDT noise field cloud map

200 Hz、300 Hz 谐波. 同时可见干式 MCDT 所产生的噪声明显高于同电压等级的常规配电变压器,因此 MCDT 的降噪设计问题仍需着重考虑.

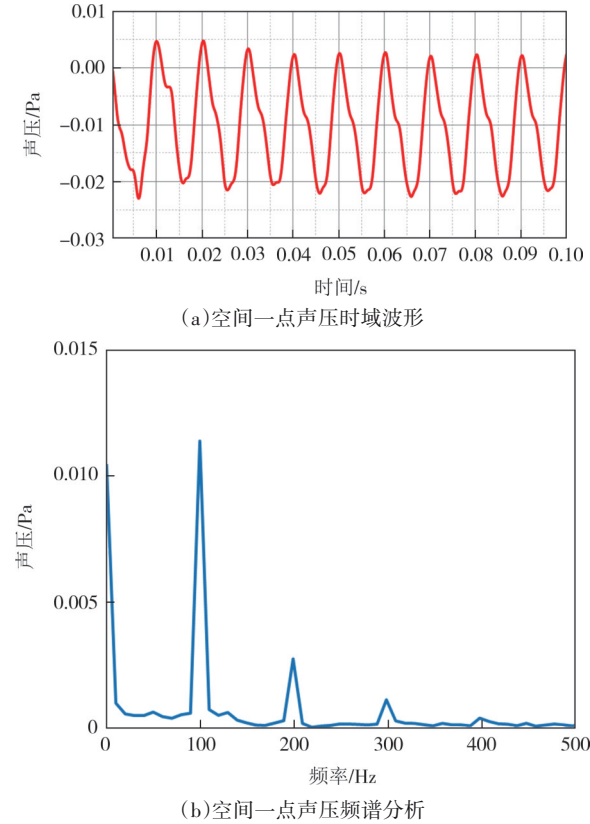


图 11 MCDT 噪声场波形

Fig.11 MCDT noise field waveform plot

3 绕组振动及噪声特性试验研究

3.1 试验布置

为探究干式 MCDT 在正常工作下振动噪声问题,验证绕组电磁力和铁芯磁致伸缩对振动噪声的影响与上述干式 MCDT 声振耦合多倍频有限元模型的准确性,以一台 380 V/220 V 干式磁控配电变压器样机为研究对象进行负载试验,搭建干式 MCDT 绕组振动噪声信号采集系统.采集系统包括数据采集卡,灵敏度为 9.8 m/s^2 、 0.5 V 的加速度传感器与声级计.通过外接调压器产生 380 V 交变电压进行负载试验,在绕组上布置传感器测试绕组上的振动信号, MCDT 声振耦合测试系统如图 12 所示.在测试中分别记录 MCDT 交变电流激励下振动信号时域波形与周围噪声场分布特性.

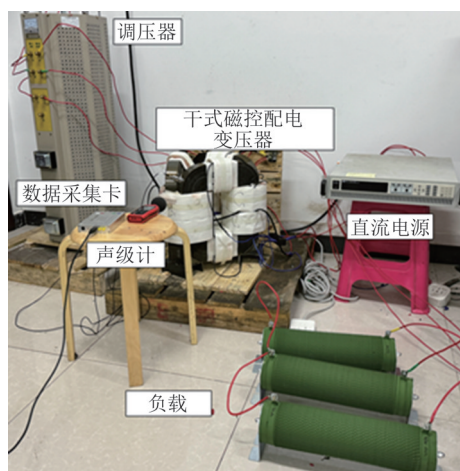


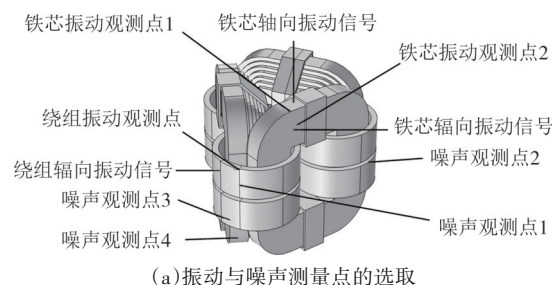
图 12 MCDT 声振耦合测试系统

Fig.12 MCDT acoustic vibration coupling testing system

3.2 绕组振动频率幅值分析

使用 MCDT 样机模型进行振动信号采集,采用常用的加速度传感器采集技术,在高压绕组上约 1/4 处与铁芯上表面与侧表面设置激励点,采集过程中只采集激励点一个方向上的信号.本文选择紧贴高压绕组外侧与铁芯上、侧表面的点作为激励点,传感器的轴向方向为激励方向,测试电流激励下 MCDT 绕组与铁芯产生的振动信号.选取干式 MCDT 声振耦合有限元模型中相同位置观测点提取其振动信号波形,选择 4 个测量点进行声压级测量与仿真对比.测量点的选取与传感器探头的安装如图 13 所示.

对于干式 MCDT 样机施加一次侧 380 V 电压,通过试验中数据采集卡对传感器激励点振动信号进行数

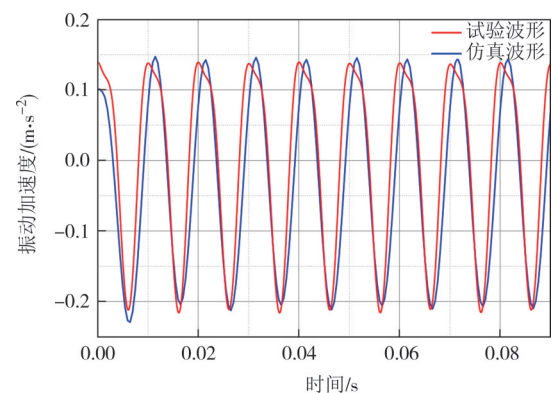


(b) 加速度传感器探头的安装

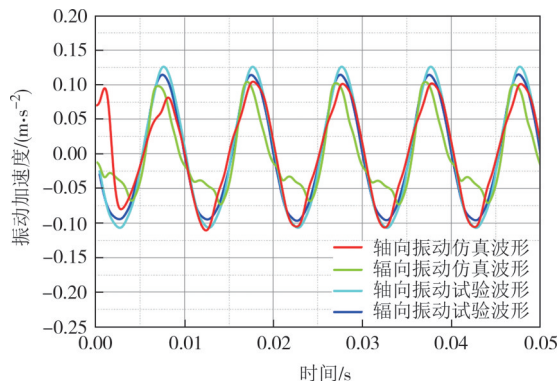
图 13 测量点的选取与传感器探头的安装

Fig.13 The selection of measurement points and the installation of sensor probes

据采集,得到 MCDT 高压绕组外侧、铁芯轴向及径向的振动信号与仿真结果的对比曲线,如图 14 所示.



(a) 绕组



(b) 铁芯

图 14 干式 MCDT 振动信号仿真与试验曲线对比

Fig.14 Comparison of dry-type MCDT vibration signal simulation and measured curves

由图 14(a)可知,绕组外侧振动呈现清晰且明显的周期性.有限元模型绕组振动加速度最大幅值在 0.22 m/s^2 左右,试验采样所得加速度幅值同样接近 0.22 m/s^2 且含有 200 Hz 分量的谐波,具有较好的稳定性.对于铁芯振动而言,因 MCDT 处于低压运行状态,未达饱和状态的铁芯振动加速度小于绕组振动加速度,幅值约在 0.1 m/s^2 左右.

干式 MCDT 振动信号频域对比分析如图 15 所示.对稳定后的振动信号进行快速傅里叶变换后,由图 15(a)可以看出,高压绕组外表面振动加速度仿真与试验所得频率均在 $100 \sim 500 \text{ Hz}$ 以内,且以 100 Hz 为主,仿真所得振动加速度 100 Hz 峰值为 0.174 m/s^2 ,谐波含量较少;试验测量由于含有部分 200 Hz 、 300 Hz 谐波, 100 Hz 加速度最大值为 0.170 m/s^2 ,仿真误差仅为 2.35% .

由图 15(b)可以看出,铁芯的振动频谱同样主要集中在 $100 \sim 500 \text{ Hz}$ 以内,在 100 Hz 主频下,对于轴

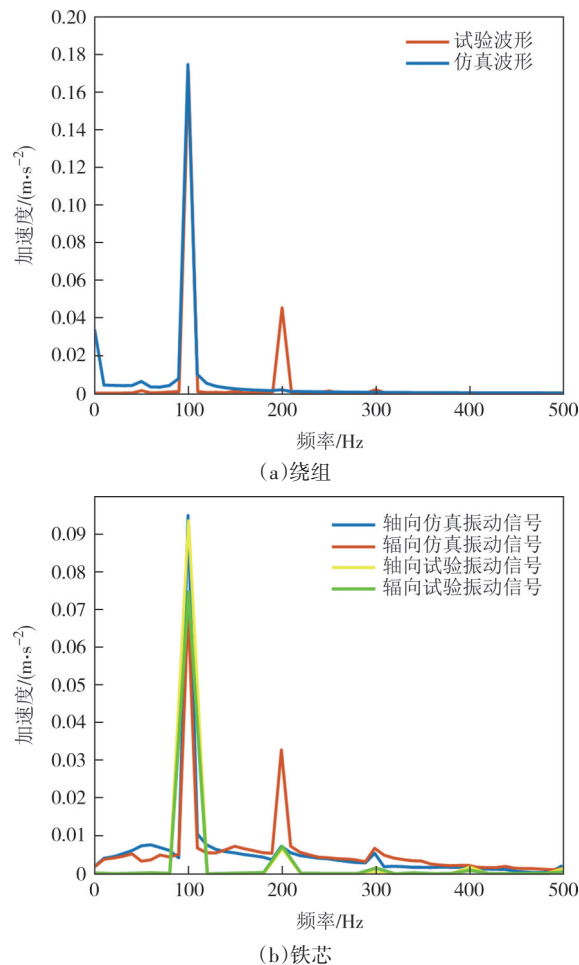


图 15 干式 MCDT 振动信号频域对比分析

Fig.15 Comparative analysis diagram of dry-type MCDT vibration signal in the frequency domain

向振动而言仿真和试验所得加速度幅值分别为 0.095 m/s^2 和 0.093 m/s^2 ,仿真误差为 2.15% ;在辐向振动方面,仿真与试验所得加速度幅值分别为 0.070 m/s^2 和 0.075 m/s^2 ,误差为 6.67% .在 200 Hz 谐波下,轴向振动仿真与试验所得误差为 9.75% ;辐向误差则较大,仿真振动加速度幅值达到 0.0328 m/s^2 ,而试验振动加速度幅值为 0.0073 m/s^2 ,在此方向上,铁芯受硅钢片仿真材料固有频率影响,在 200 Hz 处产生较大谐振,导致加速度幅值较高.试验证明了干式磁控配电变压器仿真模型的准确性.

3.3 声场分布试验测量

时域下声场测量以瞬时声压为测量参数,其峰值大小可以准确反应噪声强度,进行 MCDT 声振耦合有限元模型瞬态声场计算.将电磁力与磁致伸缩作为激励添加在磁控配电变压器上进行声振耦合计算,得到噪声瞬时声压时域波形,如图 16(a)所示.由图 16(a)可知,噪声波形与振动波形较为相似,选取稳定后的噪声信号进行傅里叶变换,可以得到噪声稳定状态下频域波形,如图 16(b)所示.

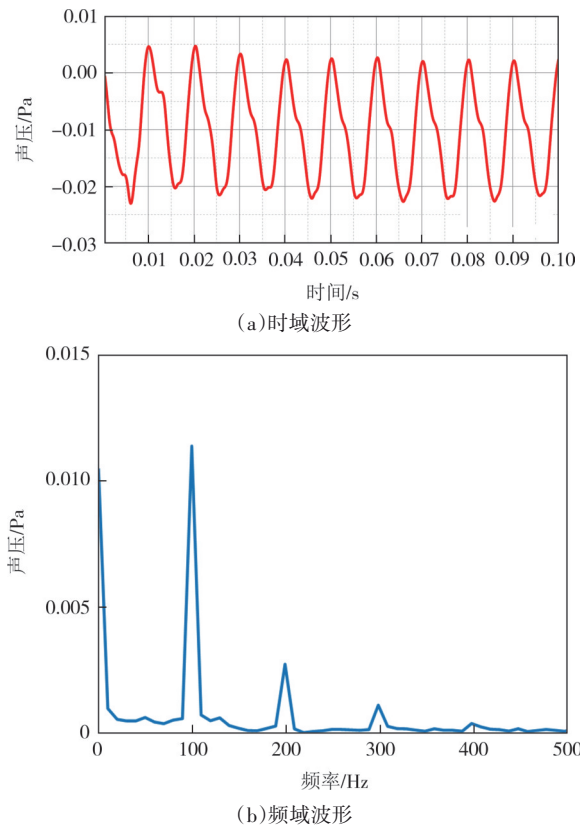


图 16 干式 MCDT 噪声瞬时声压时域、频域波形

Fig.16 Waveforms in the time domain and frequency domain of instantaneous sound pressure of dry-type MCDT noise

从图 16(b)可以看出,干式 MCDT 因振动产生的噪声以 100 Hz 为主要频率,与振动以 100 Hz 为主频的结果相匹配,除此之外还包含有 200 Hz、300 Hz 等高频谐波分量,与声音的传播介质有关。

试验测量噪声的工具为声级计,测量参量为声压级,单位为 dB,为便于与试验测量参量进行比较,采用声压与声压级转化公式进行转化后得到 MCDT 时域下噪声声压级波形,如图 17 所示。

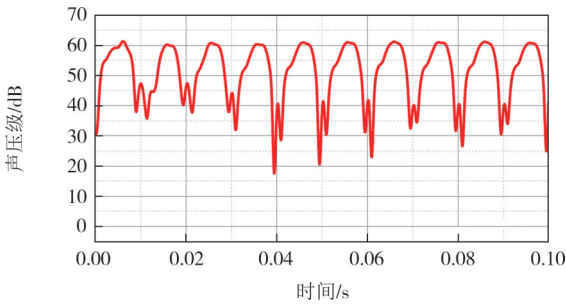


图 17 MCDT 时域下噪声声压级波形
Fig.17 Noise sound pressure level waveform in MCDT
time domain

选取前文所述的干式 MCDT 外表面各点进行声压级测量,与试验测量所得声压级大小进行对比。MCDT 观测点声压级大小如表 3 所示。

表 3 MCDT 观测点声压级大小
Tab.3 The magnitude of the sound pressure level at the observation point of the MCDT

测量点	声压级/dB		相对误差/%
	仿真值	试验值	
1	53.69	57.1	5.97
2	66.74	73.0	8.58
3	55.52	56.1	1.03
4	50.51	53.8	6.12

由表 3 可以看出,干式 MCDT 靠近绕组处声压级大部分区域达到 60~70 dB,因测量场地位于较空旷的实验大厅,并未彻底消除噪声的反射与折射,受部分混响场影响,试验测量所得的噪声值要略高于仿真所得噪声值。噪声振动试验仿真证明了干式 MCDT 多倍频声振耦合模型的准确性与广泛适用性,同时为后续 MCDT 的降噪设计提供理论基础。

4 直流偏磁下 MCDT 声振耦合研究

MCDT 在实现无功补偿的过程中,需要添加直流激励使铁芯达到过饱和状态,在过饱和状态下,铁芯与绕组的振动噪声均有较大变化,需要对其运行

状态开展研究,为减振减噪设计与并网安全运行提供一定的理论指导。

分别添加 10 A、20 A、30 A 直流励磁电流,依据干式 MCDT 声振耦合模型分析磁控配电变压器在添加直流无功补偿工况下,铁芯与绕组的磁通、电磁力、振动以及噪声的变化规律。

4.1 直流偏磁下电磁场计算

磁控配电变压器分别添加 10 A、20 A、30 A 直流电流作为激励,其他设置均与上述 MCDT 声振耦合模型相同,直流偏磁下铁芯磁通密度波形如图 18 所示。

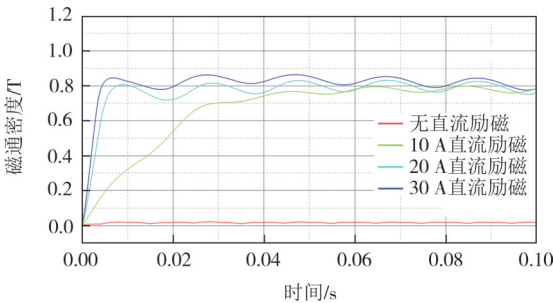


图 18 直流偏磁下铁芯磁通密度波形
Fig.18 Waveform of core flux density under DC bias

由图 18 可知,磁控配电变压器无直流励磁状态下,铁芯中的磁通密度较小,远未达到饱和状态,频率以 100 Hz 为主;随着直流励磁电流的增大,MCDT 铁芯达到饱和的速度逐渐增加,饱和速度的提升呈逐渐趋缓的状态,0~10 A 过程中饱和度与饱和速度的增加较为显著,与此同时由于铁芯非线性特性,稳定状态后的磁通密度频率由 100 Hz 变为 50 Hz。

直流偏磁下 MCDT 绕组所受电磁力分布如图 19 所示。由图 19 可知,直流偏磁作用下,绕组所受电磁力几乎不变,仅有微量增加,同时并未影响绕组 100 Hz 主频。

4.2 直流偏磁下结构场计算

将绕组所受电磁力以及铁芯中磁化分量计算所得的应变作为激励分别添加在绕组和铁芯上,进行结构场计算。直流偏磁下绕组振动信号如图 20 所示。受电磁力影响,图 20 所示的振动信号受直流励磁的影响较小,保持振动主频为 100 Hz。

直流偏磁下铁芯振动信号如图 21 所示。由图 21 可知,铁芯因直流励磁电流的增加振动更为剧烈,同时产生更加丰富的谐波。随着直流电流的增加,受直流偏磁影响,铁芯辐向、轴向振动均呈现增大的趋势,振动频率主要集中在 50 Hz、100 Hz、150 Hz、200 Hz、250 Hz、300 Hz、350 Hz、400 Hz、450 Hz 处,

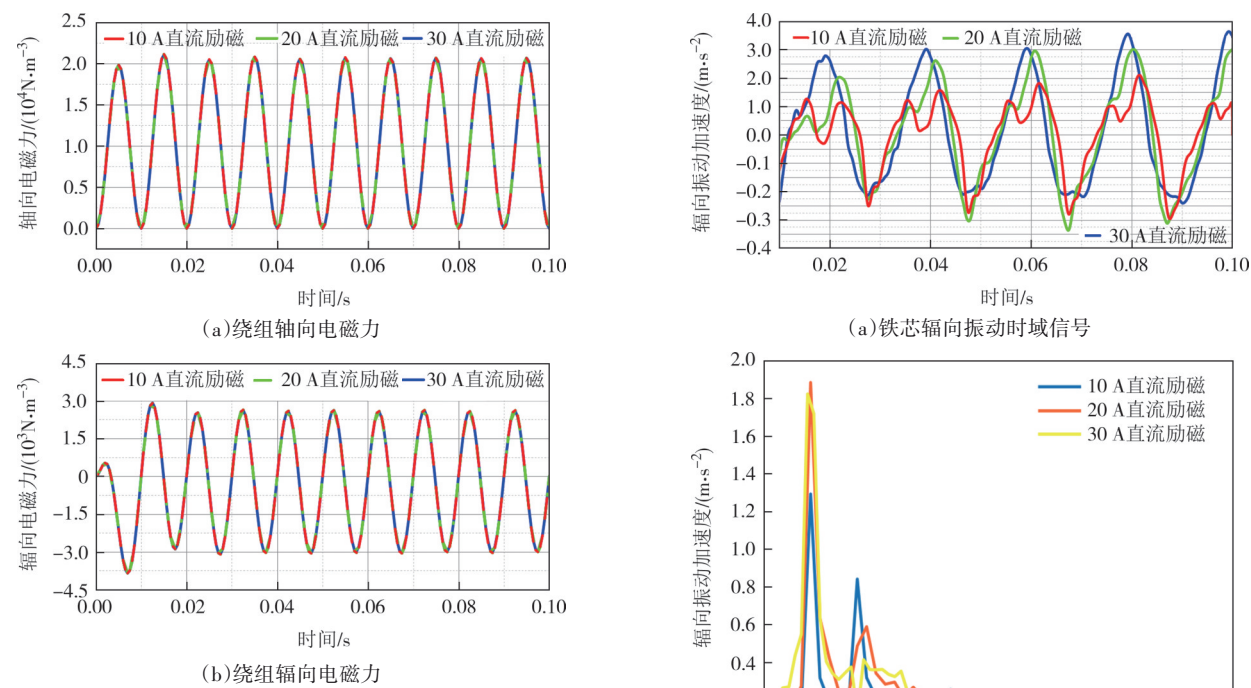


图 19 直流偏磁下 MCDT 绕组电磁力分布

Fig.19 The distribution of electromagnetic force on the MCDT winding under DC bias

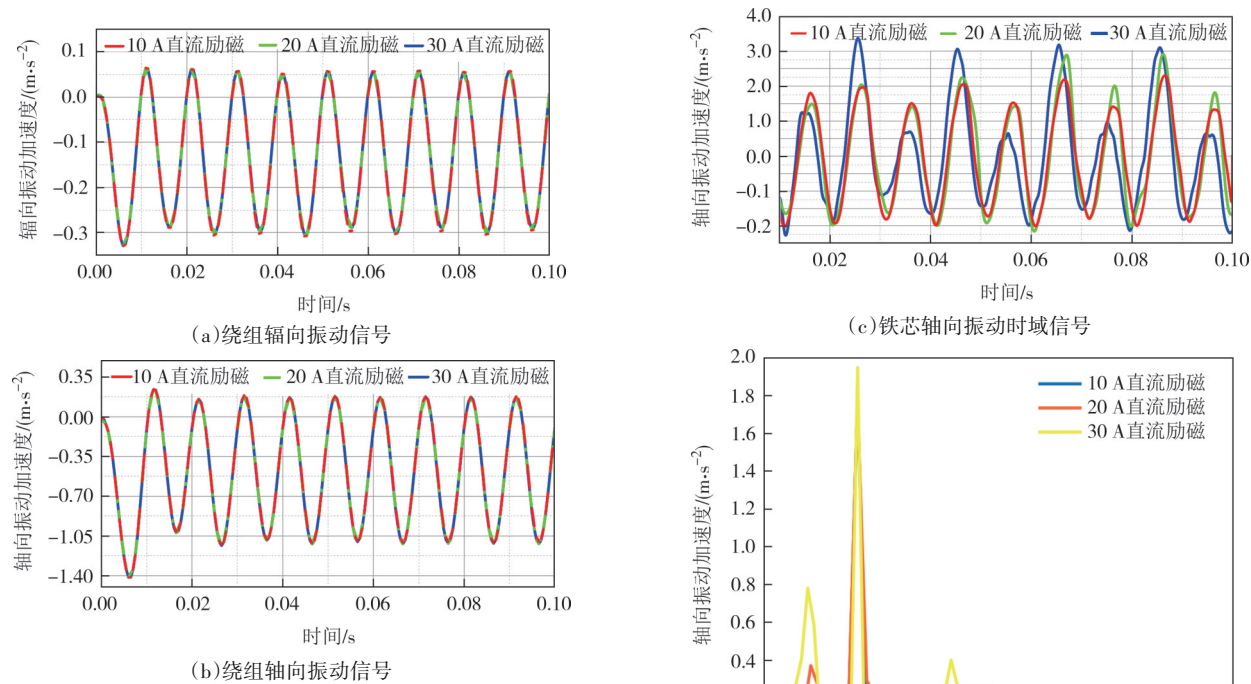


图 20 直流偏磁下绕组振动信号曲线

Fig.20 Winding vibration signal curve under DC bias

此现象与直流偏磁下引起变压器奇次谐波含量增加的事实相符,且随着直流偏磁影响加深,谐波的含量逐渐增加.

直流偏磁下噪声场波形如图 22 所示. 由图 22 可知,随着直流偏磁的增加,干式磁控配电变压器的噪

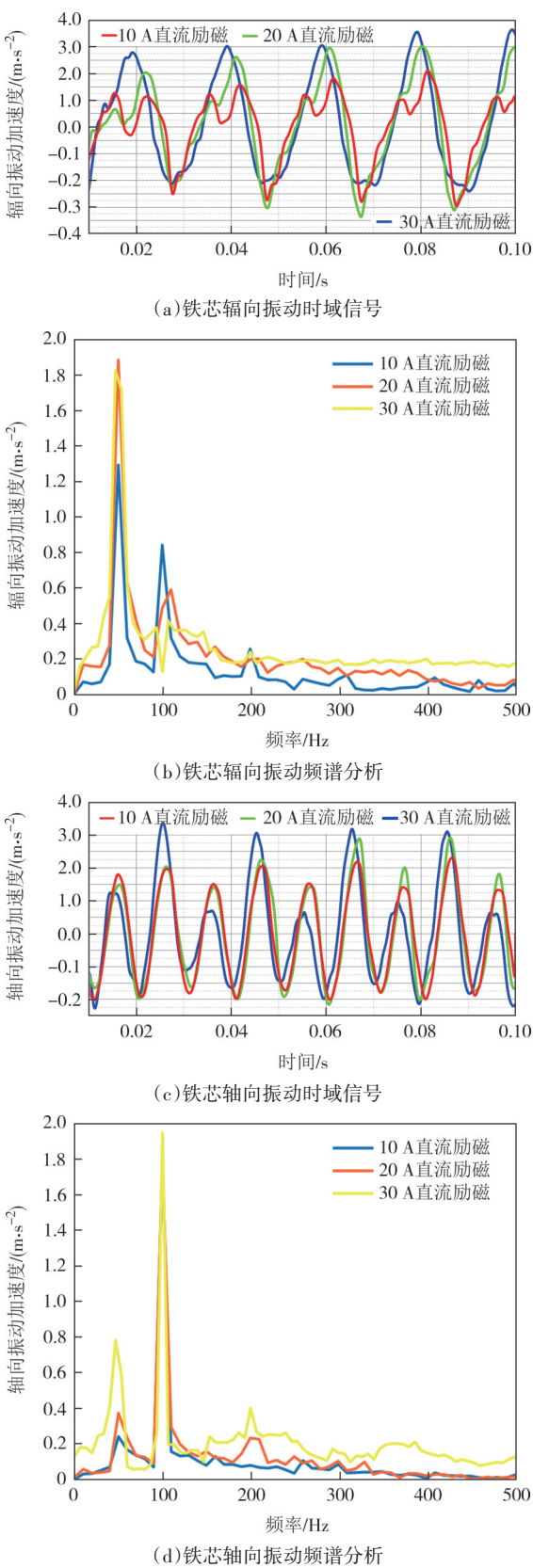


图 21 直流偏磁下铁芯振动信号曲线

Fig.21 Core vibration signal curve under DC bias

声逐渐增大;直流电流分别为 10 A、20 A、30 A 时,噪声场的声压级由 85 dB 分别上升至 90 dB 和 100 dB.

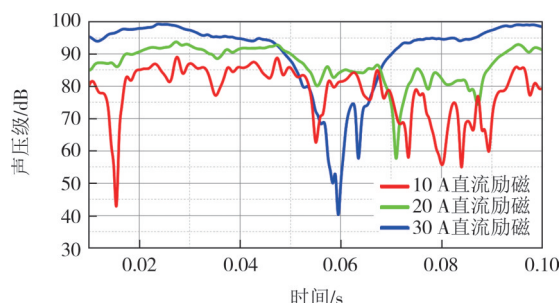


图22 直流偏磁下噪声场波形

Fig.22 Waveform diagram of the noise field under DC bias

5 结论

针对磁控配电变压器直流偏磁下受力振动问题,本文阐述了磁致伸缩、绕组受力振动与声波反射等理论,建立了数值仿真模型,对干式磁控配电变压器在直流偏磁下表面振动加速度与噪声传播规律进行了研究,确定了直流偏磁对振动加速度谐波产生与噪声场分布的影响,得到了以下结论:

1)提出了一种干式磁控配电变压器正常运行状态下的电磁振动耦合分析模型,研究了铁芯绕组在激励下的振动与噪声产生机理,并通过声振耦合理论与实际模型试验验证了所建立的数值模型的准确性,仿真值与试验值最大误差在10%以内。

2)根据干式磁控配电变压器的独特设计结构,得到了干式磁控配电变压器绕组受力分布规律,不同于传统变压器高低压绕组内外绕制,并排放置呈现高压绕组受力扩张,低压绕组压迫收缩。新型磁控配电变压器高低压绕组均呈现向内收缩的趋势,同时其辐向受力最大值也由传统变压器绕组的中端处偏移至 $2/3n$ 处,为夹具的设计与绕组防振设计提供了一定的理论支撑。

3)根据干式磁控配电变压器直流偏磁下实际运行工况,建立了考虑直流激励的干式磁控配电变压器声振耦合模型,基于本文提出的数值模型进行仿真研究,得到了直流偏磁引起干式磁控配电变压器振动加强与奇次谐波含量增大的结论,并且随着直流偏磁影响加深,磁控配电变压器的噪声不断增大。

4)380 V干式磁控配电变压器正常运行时噪声范围大致为60~70 dB,高于常规配电变压器。施加的直流调节无功的过程中,噪声进一步增强达到90~100 dB,需进行合理的降噪设计避免噪声污染。

参考文献

- [1] 孟飞,张程,郭添亨,等.城市变电站噪声污染防治研究[J].高电压技术,2023,49(增刊1):186-189.
MENG F, ZHANG C, GUO T H, et al. Study on noise pollution prevention of urban substation [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(Sup.1): 186-189.
- [2] VER I L, ANDERSEN D W, MYLES M M, et al. Field study of sound radiation by power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(7): 3513-3524.
- [3] 吴晓文,魏慧杰,周年光,等.半消声室内干式配电变压器的噪声与振动特性研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(3): 190-195.
WU X W, WEI H J, ZHOU N G, et al. Noise and vibration analysis of dry-type distribution transformer in semi-anechoic room [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 190-195. (in Chinese)
- [4] 吴晓文,周年光,彭继文,等.电力变压器噪声特性与相关因素分析[J].电力科学与技术学报,2018,33(3):81-85.
WU X W, ZHOU N G, PENG J W, et al. Noise characteristic and relevant factors analysis of power transformers [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 81-85. (in Chinese)
- [5] 潘超,安景革,刘闯,等.变压器偏磁效应噪声特性的多场耦合分析与抑制[J].电工技术学报,2023,38(18):5077-5088.
PAN C, AN J G, LIU C, et al. Multi-field coupling analysis and suppression for biased magnetic noise in transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 5077-5088. (in Chinese)
- [6] 赵亮,臧英,樊纪超,等.换流变压器原理样机电磁振动与噪声研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(2): 71-79.
ZHAO L, ZANG Y, FAN J C, et al. Research on electromagnetic vibration and noise of prototype for converter transformer [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(2): 71-79. (in Chinese)
- [7] 祝丽花,杨庆新,闫荣格,等.考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J].电工技术学报,2013,28(4): 1-6.
ZHU L H, YANG Q X, YAN R G, et al. Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1-6. (in Chinese)
- [8] 张学娟,孟天男,井永腾,等.变压器绕组振动特性的电磁-机械场仿真与试验[J].变压器,2021,58(4):20-25.
ZHANG X J, MENG T N, JING Y T, et al. Electromagnetic-mechanical field simulation and experiment of transformer winding vibration characteristic [J]. Transformer, 2021, 58(4): 20-25. (in Chinese)
- [9] 胡静竹,刘涤尘,廖清芬,等.基于有限元法的变压器电磁振动噪声分析[J].电工技术学报,2016,31(15): 81-88.

- HU J Z, LIU D C, LIAO Q F, et al. Analysis of transformer electromagnetic vibration noise based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 81-88. (in Chinese)
- [10] 陈彬, 沈辰轩, 刘洋, 等. 高频变压器电磁场-结构力场-声场求解及特性分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4459-4474.
- CHEN B, SHEN C X, LIU Y, et al. Solution and characteristic analysis of high-frequency transformer based on electromagnetic field-structural force field-acoustic field [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4459-4474. (in Chinese)
- [11] LI G P, ZHANG J X. FEA on vibration and noise of SCB dry-type transformer[J]. Journal of Electric Power, 2021, 25(6): 487-489.
- [12] 李德波, 李冰阳, 刘耀云, 等. 电力变压器振动噪声的多物理场耦合分析[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 115-119.
- LI D B, LI B Y, LIU Y Y, et al. Multi-physical field coupling analysis on vibration noise of power transformer [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6): 115-119. (in Chinese)
- [13] 张剑. 直流偏磁条件下变压器振动噪声的多物理场耦合研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- ZHANG J. Research of mul-physics coupling in transformer's vibration and noise under DC bias conditions [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] 魏亚军, 臧春艳, 顿玲. 三相电力变压器振动噪声的多物理场研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(19): 5632-5635.
- WEI Y J, ZANG C Y, DUN L. Multi-physics field research about vibration noise of three-phase power transformer [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(19): 5632-5635. (in Chinese)
- [15] 李楠, 马宏忠, 崔佳嘉, 等. 电力变压器绕组振动声纹特性分析[J]. 应用声学, 2022, 41(5): 785-793.
- LI N, MA H Z, CUI J J, et al. Characteristic analysis of vibration sound ripple of power transformer winding [J]. Journal of Applied Acoustics, 2022, 41(5): 785-793. (in Chinese)
- [16] 王佳音, 白保东, 刘宏亮, 等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 56-61.
- WANG J Y, BAI B D, LIU H L, et al. Research on vibration and noise of transformers under DC bias [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56-61. (in Chinese)
- [17] 陈传敏, 冯洪达, 郭兆枫, 等. 220 kV 电力变压器辐射噪声特性仿真分析[J]. 电力学报, 2020, 35(6): 515-521.
- CHEN C M, FENG H D, GUO Z F, et al. Simulation analysis of radiation noise characteristics of 220 kV power transformer [J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(6): 515-521. (in Chinese)
- [18] 周彬. 电力变压器磁致伸缩效应引发的振动噪声分析[J]. 变压器, 2013, 50(12): 39-43.
- ZHOU B. Analysis of vibration noise caused by magnetic deformation effect in power transformer [J]. Transformer, 2013, 50(12): 39-43. (in Chinese)
- [19] 莫娟, 苏俊收, 刘吉轩, 等. 大型电力变压器油箱辐射噪声预估研究[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 12-16.
- MO J, SU J S, LIU J X, et al. Radiated noise prediction for large power transformer tank [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 12-16. (in Chinese)
- [20] 宁志毫, 罗隆福, 许加柱, 等. 变压器铁心谐波磁通抑制技术及其在工业整流中的应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(12): 34-39.
- NING Z H, LUO L F, XU J Z, et al. Harmonic magnetic flux suppression technology of transformer core and its application in the industrial rectifier system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(12): 34-39. (in Chinese)
- [21] 钟思翀, 祝丽花, 王前超, 等. 电力变压器振动噪声分析及其有源降噪[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊1): 11-21.
- ZHONG S C, ZHU L H, WANG Q C, et al. Electromagnetic vibration of power transformer and active noise reduction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(Sup.1): 11-21. (in Chinese)
- [22] 潘超, 米俭, 王格万, 等. 基于场路耦合的变压器绕组匝间短路电磁响应分析方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 673-682.
- PAN C, MI J, WANG G W, et al. Electromagnetic harmonic response analysis method of inter-turn short circuit in transformer winding based on field circuit coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 673-682. (in Chinese)