

气隙结构对特高压并联电抗器铁芯振动的影响

郭佳熠^{1,2}, 耿江海¹, 律方成^{1,2}, 赵晓宇³, 牛雷雷^{1,2}, 潘亦睿¹

(1. 华北电力大学 河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:以气隙个数和气隙位置对特高压并联电抗器铁芯振动的影响为主要研究对象,在分析特高压并联电抗器铁芯振动机制的基础上,指出了麦克斯韦力和磁致伸缩力的矢量和是影响铁芯振动强度的主要原因;系统分析了铁芯气隙可能存在的结构型式,搭建了具有不同气隙个数和气隙位置的特高压并联电抗器铁芯的真型仿真模型,并采用多物理场有限元仿真计算的方法,得到了气隙结构对特高压并联电抗器铁芯振动的影响规律。研究表明,在研究范围内(气隙个数为15~25),特高压并联电抗器铁芯气隙个数越少则振动强度越弱;气隙位置越靠近底轭则振动越强,越靠近铁芯柱3/4高度中心则振动越弱。在此基础上提出一种特高压并联电抗器铁芯减振设计方案,与现有铁芯设计方案相比该方案能够使铁芯振动位移均方根减小18.925%。

关键词:特高压并联电抗器;铁芯;振动;气隙个数;气隙位置

中图分类号:TM 472

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101016

0 引言

特高压电网是我国现有电网的核心,无功平衡是特高压电网设计的关键技术之一,特高压并联电抗器是实现这一技术的关键设备^[1]。振动超标是长期困扰特高压并联电抗器安全稳定运行的一类重要问题,研究特高压并联电抗器振动的影响因素,有助于设计有针对性的减振方案,对于提高特高压电网的运行可靠性具有至关重要的意义^[2-3]。

目前,国内外已经开展了一系列针对电抗器振动影响因素的研究,这些影响因素可以分为2类:外施条件和铁芯材料。针对外施条件的影响,文献[4]研究了铁芯预紧力对电抗器铁芯振动的影响,指出增强铁芯预紧力能够有效降低铁芯振动;文献[5]研究了阻尼弹性体对电抗器铁芯振动的影响规律,通过对比试验验证了阻尼弹性体具有良好的减振降噪效果。上述研究成果虽然有助于减弱电抗器的振动,但并未涉及电抗器振动的机制,也无法从根本上抑制振动的产生。针对铁芯材料的影响,文献[6-8]研究了负磁致伸缩材料对电抗器铁芯振动的抑制效果,通过理论分析指出负磁致伸缩材料是一种理想的电抗器铁芯材料,能够大幅降低铁芯振动的强度;文献[9-10]研究了气隙垫块硬度对电抗器铁芯振动的影响,其中文献[9]指出铁芯气隙垫块的杨氏模量

越大,铁芯的振动强度越小,文献[10]则认为并非气隙垫块的硬度越大,铁芯的振动越弱,而是存在最佳气隙垫块硬度能够使电抗器铁芯振动强度最小。上述对于铁芯材料的研究旨在通过改变铁芯的受力来调节其振动特征,具有较高的理论与工程价值,但新材料的应用会增加电抗器的生产成本,这在一定程度上限制了上述研究成果的应用前景。结合研究现状可以发现,调节铁芯气隙特征是改善特高压并联电抗器振动特性的有效方法,但现有研究普遍针对气隙材料展开,缺少气隙结构对电抗器铁芯振动影响的研究。特高压并联电抗器的受力不仅与铁芯材料相关,还会受到铁芯结构(尤其是气隙结构)的影响。在不影响电抗器其他性能的前提下,优化铁芯气隙结构设计,同样可以改善铁芯振动性能。

本文研究了气隙结构(主要是气隙个数和气隙位置)对特高压并联电抗器铁芯振动的影响。首先,阐述了特高压并联电抗器铁芯振动的机理,并从理论角度分析了特高压并联电抗器铁芯振动的影响因素;然后构建了特高压并联电抗器三维仿真模型,基于该模型设计了一系列具有不同气隙结构的对照模型;最后采用计及铁芯叠片规则与流-固耦合的特高压并联电抗器铁芯振动计算方法研究了气隙个数和气隙位置对特高压并联电抗器铁芯振动的影响规律。本文的研究能够为特高压并联电抗器的优化设计提供合理的建议,有利于在不大幅提高生产成本的前提下,改善特高压并联电抗器的振动特性。

1 特高压并联电抗器铁芯振动机制

1.1 铁芯振动机制

在研究特高压并联电抗器铁芯振动的影响因素前,首先应该明确其振动机制。特高压并联电抗器

收稿日期:2020-09-28;修回日期:2020-11-24

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(特高压电抗器全寿命周期本体质量提升及安全运行管控措施研究)(GYB17201900166)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Study on the Improvement of the Whole Life Cycle of the UHV Reactor and the Control Measures of Safe Operation)(GYB17201900166)

典型结构如图1所示。铁芯饼和铁轭均由硅钢片堆叠而成,磁致伸缩是引起其振动的主要原因之一^[11]。同时,特高压并联电抗器的铁芯柱还包含多个气隙,当磁通穿过高磁导率的铁芯饼与低磁导率的气隙边界时,会产生麦克斯韦力,这是特高压并联电抗器铁芯振动的另一个主要原因^[12]。

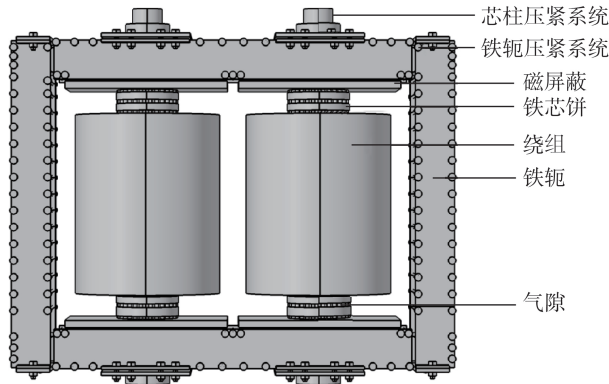


图1 特高压并联电抗器内部结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of UHV shunt reactor internal structure

综上,磁致伸缩现象对应的麦克斯韦力和磁致伸缩力的矢量和是造成特高压并联电抗器铁芯振动的主要因素,即:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\max} + \mathbf{F}_{\text{mag}} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{F}$ 为造成振动的外力矢量和; $\mathbf{F}_{\max}$ 为麦克斯韦力; $\mathbf{F}_{\text{mag}}$ 为磁致伸缩力。

磁致伸缩力是铁芯硅钢片磁致伸缩现象的一种等效应力,可以通过铁芯的磁致伸缩应变计算得出:

$$\mathbf{F}_{\text{mag}} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = -\nabla \cdot (\mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}) = -\nabla \cdot (\mathbf{D}\mathbf{f}(\mathbf{B})) \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为磁致伸缩应变; $\boldsymbol{\sigma}$ 为磁致伸缩应力; $\mathbf{D}$ 为弹性张量。铁芯的磁致伸缩应变可以通过应力条件下硅钢片的磁致伸缩特性曲线测量试验获得,可以认为是电磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的函数 $\mathbf{f}(\mathbf{B})$,弹性张量仅与铁芯材料参数有关^[13]。

麦克斯韦力是铁芯气隙与铁芯饼交界面处的一种表面应力,一般通过麦克斯韦应力张量 $\mathbf{T}_{\max}$ 进行计算:

$$\mathbf{F}_{\max} = \int_S \mathbf{T}_{\max} dS = \int_S \left(\mathbf{B}\mathbf{H} - \frac{1}{2} \mathbf{B}\mathbf{H}\mathbf{I} \right) dS \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu}\mathbf{H} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度矩阵; $\boldsymbol{\mu}$ 为磁导率矩阵; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; S 为铁芯饼与气隙交界面的面积。

构成特高压并联电抗器铁芯的硅钢片和气隙(大理石或陶瓷)均为线弹性材料,在麦克斯韦力和磁致伸缩力的共同作用下会产生振动,该振动可以用弹性体的动力学方程描述^[9],即:

$$\mathbf{M}_c \frac{\partial^2 \mathbf{d}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t} + \mathbf{K}_c \mathbf{d} = \mathbf{F} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{M}_c$ 为铁芯的质量矩阵; $\mathbf{d}$ 为铁芯的位移矩阵; $\mathbf{C}$

为阻尼矩阵; $\mathbf{K}_c$ 为铁芯的刚度矩阵,可由铁芯的材料参数和结构尺寸等计算得出; t 为时间。

1.2 特高压并联电抗器铁芯振动的影响因素

基于上述振动机制,总结出影响特高压并联电抗器铁芯振动的因素主要有:振动阻尼,对应的参数为 $\mathbf{C}$;铁芯的本身结构和材料特征,对应的参数为 $\boldsymbol{\mu}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{M}_c$ 和 $\mathbf{K}_c$;铁芯所处的磁场环境,对应的参数为 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 。下面对上述3类振动影响因素逐一进行分析。

(1) 振动阻尼^[14]

特高压并联电抗器是油浸式电抗器,铁芯与变压器油间的流-固耦合会对铁芯的振动产生阻尼作用。此外,为了减弱铁芯振动,可在电抗器油箱内部布置减振垫等装置,以增加振动的阻尼。这2种阻尼是特高压并联电抗器铁芯振动中的常见阻尼因素。

(2) 本体结构和材料特征

铁芯材料是影响振动的重要因素,如图1所示,特高压并联电抗器铁芯主要包含铁轭、铁芯饼和气隙等部分。其中,铁轭和铁芯饼由硅钢片堆叠而成,气隙为大理石或陶瓷。为了降低铁芯振动的强度,可以采用低磁致伸缩(或负磁致伸缩)的硅钢片替换现有硅钢片^[15];也可以通过采用硬度更大的气隙材料达到减振的目的。

铁芯结构同样会影响振动的强弱。一方面,铁芯结构的变化会改变刚度矩阵,影响其受力后的振动情况;另一方面,铁芯受到的外力是磁致伸缩力和麦克斯韦力的矢量和,磁致伸缩力是体积力,仅作用在硅钢(铁轭和铁芯饼)部分,麦克斯韦力是表面应力,作用在铁芯饼与气隙的边界处,铁芯结构的变化会使2个力在空间内的作用位置发生变化,从而改变其矢量和,也会影响铁芯的振动。

(3) 磁场环境

铁芯所处的电磁环境主要是指铁芯内部 $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 的分布。当铁芯处于非磁饱和状态时(特高压并联电抗器设计磁密均小于饱和磁密),磁导率近似为一个常数,结合式(4)可知, $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{H}$ 线性相关。铁芯内部的 $\mathbf{B}$ 可以通过式(6)和式(7)计算。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mathbf{v}_x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{v}_y \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mathbf{v}_z \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} \right) = -\mathbf{J} + \boldsymbol{\sigma} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; $\mathbf{J}$ 为电流密度; $\mathbf{v}_x$ 、 $\mathbf{v}_y$ 和 $\mathbf{v}_z$ 分别为铁芯叠片在 x 、 y 和 z 方向上的磁阻率,磁阻率是磁导率的倒数。因此,电流密度 $\mathbf{J}$ 是影响磁场环境的主要因素。当特高压并联电抗器在额定状态下运行时,电流为定值,线圈参数是影响电流密度的重要因素。

电感是电抗器的重要参数,可由式(8)得到^[16]。

$$L = N^2 \mu_0 A_g / \delta \quad (8)$$

其中, L 为电抗器的电感值; μ_0 为真空磁导率; N 为绕组匝数; A_g 为气隙横截面积; δ 为气隙总长度。为了

保证电抗器提供的电感值不变,上述参数应保持不变,即线圈参数和气隙总长度应保持不变。

综上所述,设置附加阻尼、改变铁芯各组件的材料和调整铁芯结构是可行的特高压并联电抗器减振方向。但是,设置附加阻尼势必会在电抗器内部增加其他部件,这就使电抗器内部的绝缘设计更加复杂,同时还需要考虑新增部件的老化、散热等问题,因此在推广上存在困难。改变铁芯各组件的材料在理论上能够有效降低电抗器铁芯的振动,但也会较大幅度地提高电抗器的生产成本,同样难以推广。故本文主要研究铁芯结构(尤其是气隙结构)对特高压并联电抗器铁芯振动的影响。

2 特高压并联电抗器铁芯气隙结构调整方式

2.1 气隙结构调整方式

为了保证特高压并联电抗器外观结构和输出感性无功的不变,铁轭结构、铁芯柱直径和高度、气隙总长度均应保持不变。因此,本文研究气隙个数和气隙位置对特高压并联电抗器铁芯振动的影响。

(1)气隙个数调整方式。

麦克斯韦力的作用位置为铁芯饼与气隙的交界面,气隙个数的变化不仅会影响麦克斯韦力在空间内的作用位置,而且会改变上述交界面的数量,从而影响铁芯受力。

研究气隙个数对铁芯振动的影响可以在不改变气隙总长度的前提下,增加或减少气隙个数,设置对照试验。图 1 所示的特高压并联电抗器每柱包含 20 个气隙,综合考虑铁芯气隙数量变化可能造成的电抗值、损耗和散热性能的变化,本文规定气隙个数变化范围为 15~25,设置 15、17、19、21、23、25 个气隙作为对照组与现有电抗器进行对比研究。同时,各组气隙均匀分布在铁芯柱上,相邻气隙间距一致。

(2)气隙位置调整方式。

调整气隙位置同样可以改变铁芯受力在空间内的作用位置,因此也可以影响铁芯的振动。本文通过调节气隙位置,构造不同结构的特高压并联电抗器铁芯模型,研究不同模型对应的外力矢量和,计算并对比铁芯的振动位移均方根,总结气隙位置变化对铁芯振动的影响规律。

对于图 1 所示的含有多气隙的特高压并联电抗器而言,理论上存在无数多种气隙位置的排布方式,为了便于开展研究,本文采用少量(1~5 个)气隙代替原有的 20 个气隙,研究气隙位置变化对铁芯振动的影响,总结规律并分析原因。

此外,为了便于对气隙所处的位置做出说明,本文在铁芯柱上均匀设置了 5 个位置,规定气隙位置仅能在其中进行选择,分别记为 Δ_1 — Δ_5 。当气隙处于 Δ_1 位置时,其上边界直接与顶轭相接触;处于 Δ_5

位置时,气隙的下边界直接与底轭相接触;处于 Δ_3 位置时,气隙的高度中心与铁芯柱的高度中心重合;处于 Δ_2 和 Δ_4 位置时,气隙的高度中心分别位于铁芯柱的 3/4 和 1/4 高度中心。各气隙长度均相等,每个气隙的长度 m 由气隙个数 n 和气隙总长度 δ 共同决定,即:

$$m = \delta / n \quad (9)$$

在上述规定的前提下,铁芯气隙位置的排布方式被简化为 5 组 31 种,如表 1 所示。表中, A 组(A1—A5)、B 组(B1—B10)、C 组(C1—C10)、D 组(D1—D5)和 E 组(E1)分别表示单气隙、双气隙、三气隙、四气隙和五气隙。

表 1 气隙位置排布分组

Table 1 Grouping of air gap position arrangement

仿真模型编号	气隙位置	仿真模型编号	气隙位置
A1	Δ_1	C2	$\Delta_1\Delta_2\Delta_4$
A2	Δ_2	C3	$\Delta_1\Delta_2\Delta_5$
A3	Δ_3	C4	$\Delta_1\Delta_3\Delta_4$
A4	Δ_4	C5	$\Delta_1\Delta_3\Delta_5$
A5	Δ_5	C6	$\Delta_1\Delta_4\Delta_5$
B1	$\Delta_1\Delta_2$	C7	$\Delta_2\Delta_3\Delta_4$
B2	$\Delta_1\Delta_3$	C8	$\Delta_2\Delta_3\Delta_5$
B3	$\Delta_1\Delta_4$	C9	$\Delta_2\Delta_4\Delta_5$
B4	$\Delta_1\Delta_5$	C10	$\Delta_3\Delta_4\Delta_5$
B5	$\Delta_2\Delta_3$	D1	$\Delta_1\Delta_2\Delta_3\Delta_4$
B6	$\Delta_2\Delta_4$	D2	$\Delta_1\Delta_2\Delta_3\Delta_5$
B7	$\Delta_2\Delta_5$	D3	$\Delta_1\Delta_2\Delta_4\Delta_5$
B8	$\Delta_3\Delta_4$	D4	$\Delta_1\Delta_3\Delta_4\Delta_5$
B9	$\Delta_3\Delta_5$	D5	$\Delta_2\Delta_3\Delta_4\Delta_5$
B10	$\Delta_4\Delta_5$	E1	$\Delta_1\Delta_2\Delta_3\Delta_4\Delta_5$
C1	$\Delta_1\Delta_2\Delta_3$		

2.2 特高压并联电抗器铁芯振动计算方法

由于特高压并联电抗器生产制造成本极高,且现有传感技术不足以对在运特高压并联电抗器铁芯振动数据(尤其是铁芯饼振动数据)进行实时精确测量,综合考虑试验成本与难度,现阶段很难具备试验研究气隙结构对特高压并联电抗器铁芯振动影响的条件。基于有限元仿真的理论计算方法是当前最为常用的特高压并联电抗器铁芯振动特征研究方法^[6-14,17],本文采用文献[14,17]中给出的计及铁芯叠片规则与流-固耦合的特高压并联电抗器铁芯振动计算方法开展研究,计算过程简图见附录 A 中图 A1。该方法通过电抗器铁芯的电磁外力计算将电抗器铁芯受到的外力以麦克斯韦力和磁致伸缩力矢量和的方法进行计算;通过流-固耦合分析考虑了电抗器铁芯与变压器油间的流-固耦合作用对铁芯振动的阻尼作用;利用电抗器铁芯的振动方程将两者相结合,并借助有限元仿真手段计算铁芯的振动参数。

3 特高压并联电抗器铁芯振动计算结果

图 1 所示特高压并联电抗器的设计和运行参数

见附录B中表B1。为了说明气隙结构变化时铁芯振动相关参数的变化情况,选择铁芯振动的位移均方根 d 表征铁芯振动的强弱,铁芯内部电磁感应强度均值 B 表征铁芯内部磁场的大小,铁芯表面应力的平均值 σ_{ave} 表征铁芯承受外力的大小,并定义:

$$\sigma_{ave} = \frac{F}{S_{total}} = \frac{\int \sigma_{total} dS_{total}}{S_{total}} \quad (10)$$

其中, S_{total} 为铁芯的表面积; σ_{total} 为铁芯表面应力; F 为造成铁芯振动的外力标量。

3.1 气隙个数对铁芯振动的影响规律

基于1.1节中给出的特高压并联电抗器铁芯振动机制,结合表B1中给出的特高压并联电抗器设计和运行参数,采用文献[14,17]中给出的计算方法,计算了气隙个数为15、17、19、20、21、23、25时的3个振动相关参数,如表2所示。

表2 气隙个数对铁芯振动相关参数的影响

Table 2 Influence of air gap number on core vibration parameters

气隙个数	$d / \mu\text{m}$	$\sigma_{ave} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	B / T
25	35.481	1.632×10^5	0.442
23	33.029	1.517×10^5	0.443
21	30.648	1.405×10^5	0.446
20	29.538	1.347×10^5	0.447
19	28.210	1.291×10^5	0.449
17	25.802	1.177×10^5	0.452
15	23.453	1.065×10^5	0.455

分析表2可以发现:在本文研究的气隙个数范围(15~25)内,铁芯振动位移均方根会随着气隙个数的减少而减小,气隙个数越少则特高压并联电抗器铁芯振动的强度越弱。

3.2 气隙位置对铁芯振动的影响规律

采用与3.1节相同的方法对表1中给出的31种模型分别进行仿真计算,可以得到每种模型对应的3个振动相关参数如表3所示。分析表3可知:31种

模型对应的3个振动相关参数存在较大差异,即使在同一分组内仍然存在明显的差异,如以A组单气隙的位移均方根为例,最大值为A5的44.107 μm ,最小值为A2的23.261 μm ,两者相差了20.846 μm ;A—D组中振动位移均方根最小值分别为A2的23.261 μm 、B6的14.883 μm 、C7的13.620 μm 和D1的12.828 μm 。基于以上数据可以得出如下结论:气隙位置会对特高压并联电抗器铁芯的振动强度产生较大的影响,可以通过调节气隙位置的方法降低特高压并联电抗器的振动强度。

4 特高压并联电抗器铁芯振动相关参数分析

4.1 气隙个数影响铁芯振动的原理分析

结合1.1节中有关特高压并联电抗器铁芯振动机制的分析可知铁芯的受力是影响铁芯振动强弱的最直接原因。表2中的铁芯表面应力平均值也表明:铁芯气隙个数的减少会使铁芯表面应力平均值减小,铁芯的振动位移均方根也会相应地减小。利用式(11)可以计算铁芯振动位移均方根和铁芯表面应力平均值的Pearson相关系数 γ 为0.999 945,表明两者显著相关^[18],气隙结构变化时铁芯表面应力平均值的变化是造成铁芯振动参数变化的主要原因。

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = \frac{\sigma_{Cov}(\omega_1, \omega_2)}{\sqrt{\sigma_{Var}[\omega_1] \sigma_{Var}[\omega_2]}} \quad (11)$$

其中, ω_1 和 ω_2 为2组数据取值, $\sigma_{Cov}(\omega_1, \omega_2)$ 为 ω_1 和 ω_2 的协方差; $\sigma_{Var}[\omega_1]$ 和 $\sigma_{Var}[\omega_2]$ 分别为 ω_1 和 ω_2 的方差。

结合式(2)~(4)可知,铁芯内部的电磁感应强度是影响电抗器铁芯受力的主要原因之一,但是表2中给出的数据则表明铁芯内部的电磁感应强度均值随着气隙个数的减少出现了小幅增加。以15个气隙的电抗器模型为例,其电磁感应强度均值较正常的20个气隙增加了1.79%,这一增大的趋势与振动位移均方根和铁芯表面应力平均值的变化趋势是相反的。同时,铁芯内部电磁感应强度的变化幅度

表3 气隙位置对铁芯振动参数的影响

Table 3 Influence of air gap position on core vibration parameters

参数	数值										
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6
$d / \mu\text{m}$	25.269	23.261	26.292	39.861	44.107	26.672	20.205	17.770	21.590	19.404	14.883
$\sigma_{ave} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	1.097×10^6	9.880×10^5	9.902×10^5	1.350×10^6	1.471×10^6	1.147×10^6	8.288×10^5	6.986×10^5	8.454×10^5	7.834×10^5	5.819×10^5
B / T	1.723	1.442	1.105	1.444	1.723	1.707	1.058	0.829	1.088	1.035	0.699
参数	数值										
	B7	B8	B9	B10	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
$d / \mu\text{m}$	20.166	28.865	31.665	44.802	20.383	15.526	18.362	14.326	17.403	22.175	13.620
$\sigma_{ave} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	7.578×10^5	1.045×10^6	1.127×10^6	1.500×10^6	8.530×10^5	6.456×10^5	7.281×10^5	5.865×10^5	6.975×10^5	8.345×10^5	5.523×10^5
B / T	0.827	1.038	1.057	1.706	1.078	0.754	0.886	0.680	0.709	0.885	0.660
参数	数值										
	C8	C9	C10	D1	D2	D3	D4	D5	E1		
$d / \mu\text{m}$	16.517	22.548	33.092	12.828	14.648	16.176	17.743	17.646	13.225		
$\sigma_{ave} / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	6.540×10^5	8.606×10^5	1.193×10^6	5.469×10^5	6.137×10^5	6.664×10^5	7.147×10^5	7.034×10^5	5.701×10^5		
B / T	0.683	0.757	1.083	0.638	0.662	0.662	0.661	0.639	0.543		

与振动位移均方根和铁芯表面应力平均值的变化幅度(分别为20.60%和20.94%)相比也是极小的。因此,可以认为铁芯受力随气隙个数的变化不是由电磁感应强度的变化引起的。

分析铁芯表面应力变化的原因。根据式(1),铁芯振动受力是磁致伸缩力和麦克斯韦力的矢量和。磁致伸缩力是一种体积力,力的作用位置在硅钢部分,气隙个数的变化并不会影响硅钢部分的体积。同时,铁芯内部电磁感应强度的变化幅度也是极小的,由式(2)可知硅钢受力基本不变,因此磁致伸缩力也不会由于气隙个数的减少发生大幅变化。麦克斯韦力是一种表面应力,作用位置在气隙与铁芯饼的交界面,气隙个数的减少会直接造成麦克斯韦力总作用面积的减小。铁芯内部电磁感应强度变化不大,由式(3)可知交界面上的麦克斯韦应力张量不会发生明显变化,总作用面积的减小就会造成铁芯总麦克斯韦力减小。麦克斯韦力和磁致伸缩力的矢量和也会随之减小,这造成了铁芯振动强度的减弱。因此,可以得出如下结论:气隙个数的变化会以改变麦克斯韦力作用面积的方式影响铁芯的受力,从而改变铁芯的振动强度。在本文研究的气隙个数范围(15~25)内,特高压并联电抗器铁芯包含的气隙个数越少,铁芯振动位移均方根也越小。在特高压并联电抗器的设计生产中,可以在不影响设备其他性能的前提下,选择较少的气隙个数以获得更优的振动性能。

4.2 气隙位置影响铁芯振动的原理分析

4.1节对于表2数据的分析已经证明铁芯表面应力平均值是影响振动位移均方根的主要原因,这也为表3中各模型振动位移均方根存在差异提供了合理的解释。但是表3与表2不同的是各个模型铁芯内部的电磁感应强度均值也存在较大差异。为了研究电磁感应强度的变化是否是铁芯气隙位置调整时铁芯表面应力平均值变化的原因,本文绘制了铁芯表面应力平均值和电磁感应强度均值的对应曲线,如图2所示。

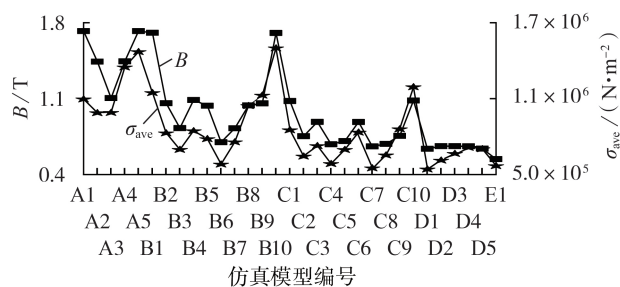


图2 电磁感应强度平均值与应力平均值的对应关系

Fig.2 Corresponding relationship between B and σ_{ave}

由图2可以发现,铁芯表面应力平均值与铁芯内部的电磁感应强度均值在整体上具有较为相似的变化规律,但是在某些模型上也存在着一定的差异。

为了更好地说明2个参数之间的相关性,本文利用式(11)计算得到2个参数的Pearson相关系数 γ 为0.887752,两者高度相关^[18]。因此,铁芯内部的电磁感应强度均值是影响铁芯表面应力的重要因素,但是还有其他因素会在一定程度上影响铁芯受力。基于第1节中对于电抗器铁芯振动机制的分析可知,气隙位置变化不仅会影响铁芯内部的电磁感应强度,还会影响铁芯受到的麦克斯韦力和磁致伸缩力在空间内的作用位置。正是上述两方面的因素共同作用使铁芯表面应力平均值发生了变化。

为了进一步证明上述分析的合理性,选择D1和D5这2个仿真模型进行比较,两模型均位于D组,为四气隙结构,且铁芯内部的电磁感应强度均值仅相差0.001 T。但是,D1对应的铁芯表面应力平均值为 $5.469 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,D5对应的铁芯表面应力平均值为 $7.034 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,两者相差了 $1.565 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 。

绘制2个模型电磁感应强度均值和表面应力平均值的分布图,见附录B中图B1。由图可见,D1的电磁感应强度分布图与D5的电磁感应强度分布图基本互为上下对称,而表面应力分布图则有明显差异。原因在于,D1和D5均为四气隙结构,两者的区别仅在于D1包含 Δ_1 位置的气隙,而D5包含 Δ_5 位置的气隙,其余气隙均一致。 Δ_1 位置与顶轭相连, Δ_5 位置与底轭相连,特高压并联电抗器的底轭通过基座固定在油箱底部,而顶轭无需固定。由于铁芯内的磁场分布基本不受铁芯底轭固定的影响,在进行磁场分析时 Δ_1 和 Δ_5 是完全等效的,所以两者的电磁感应强度分布基本互为上下对称。但底轭固定会影响铁芯的整体受力,在分析铁芯表面应力时 Δ_1 和 Δ_5 不再等效,D1和D5的表面应力分布也因此产生差异,从而使D1和D5的铁芯应力平均值和振动位移均方根产生了明显的区别。

比较D1和D5(或C2和C9)的振动位移均方根还可以得出如下结论,气隙位于 Δ_1 时铁芯的振动强度会比气隙位于 Δ_5 时的更小。采用相同的方法,结合表3中的数据可以对不同位置处气隙的振动参数做出排序,铁芯振动强度最大的位置为 Δ_5 ,最小为 Δ_2 ,5个位置由大到小可排序为 Δ_5 、 Δ_4 、 Δ_3 、 Δ_1 、 Δ_2 。因此,为了使铁芯的振动强度更小,特高压并联电抗器的气隙应远离底轭,并靠近铁芯柱的3/4高度中心。此外,分析B1、C1等模型的振动参数还可以发现,气隙不宜过于集中在相邻区域。在电抗器设计时,可以在保证散热、绝缘、损耗、电抗等方面性能不受影响的前提下,在靠近底轭的位置布置较少的气隙,而在靠近铁芯柱3/4高度中心的位置布置更多的气隙,同时还应兼顾气隙不过于集中的要求。

4.3 特高压并联电抗器铁芯减振设计方案

基于前文的研究结论,结合电抗器生产过程中

的工艺和技术要求,给出如下特高压并联电抗器铁芯减振设计方案:将气隙个数由20个调整为15个;保持最上端和最下侧气隙结构和位置不变,将最上端铁芯饼高度降低50 mm,最下侧铁芯饼高度增加50 mm,在这2个铁芯饼之间的气隙和铁芯饼结构保持不变但整体向上移动50 mm。

为了验证上述方案的减振效果,绘制了铁芯结构改进前后特高压并联电抗器铁芯的电磁感应强度均值、表面应力平均值和振动位移均方根的分布图,见附录B中图B2。同时,计算了现有电抗器铁芯结构和改进后铁芯结构的 d 、 B 、 σ_{ave} 和电抗 X ,见表4。

表4 改进效果对比

Table 4 Comparison of improvement effects

方案	$d/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{ave}}/(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	B/T	X/Ω
现有	29.538	1.347×10^5	0.447	1530.880
改进后	23.948	1.083×10^5	0.459	1560.960

此外,定义差异率 η 来表征2种方法参数之间差异的大小,如式(12)所示。

$$\eta = \left| \frac{\alpha_0 - \alpha_1}{\alpha_0} \right| \times 100\% \quad (12)$$

其中, α_0 和 α_1 分别为采用现有与改进后方案计算获得的参数值。结合表4可知, d 、 B 、 σ_{ave} 和 X 的差异率分别为18.925%、19.599%、2.685%和1.965%。

分析图B2和表4数据可以发现,虽然改进后铁芯的电磁感应强度分布发生了一定的变化(均值增加了2.685%),但铁芯的受力和振动性能都有了显著提高,铁芯表面应力均值和位移均方根分别降低了19.599%和18.925%。这证明了本文提出的特高压并联电抗器铁芯减振设计方案能够有效减弱特高压并联电抗器的铁芯振动强度。同时,改进前后电抗器绕组电抗值仅变化了1.965%,表明本文提出的改进方案不会对电抗器的电抗值产生较大的影响。

5 结论

本文针对特高压并联电抗器铁芯振动超标问题,研究了气隙个数和气隙位置对铁芯振动参数的影响规律。从特高压并联电抗器铁芯的振动机制出发,结合数值仿真技术系统性地研究了气隙结构变化时,铁芯内部电磁感应强度均值、铁芯表面应力平均值和铁芯振动位移均方根的变化规律与相互影响关系,得到了如下结论:

(1)特高压并联电抗器铁芯气隙个数和位置的变化会影响其振动性能,在本文研究的气隙个数范围(15~25)内,气隙个数越少,铁芯振动位移均方根越小,气隙位置越靠近底轭则振动越强,越靠近铁芯柱3/4高度中心则振动越弱;

(2)铁芯受力是影响其振动强弱的主要原因,铁

芯振动位移均方根与表面应力平均值的Pearson相关系数约为0.999945;

(3)铁芯表面应力平均值受到铁芯内部电磁感应强度均值以及麦克斯韦力和磁致伸缩力作用位置的共同影响,其中铁芯内部电磁感应强度平均值与表面应力平均值的Pearson相关系数约为0.887752,是影响铁芯受力大小的最重要因素。

最后,本文还提出了一种特高压并联电抗器铁芯减振设计方案,该方案能够使特高压并联电抗器铁芯振动的位移均方根降低18.925%,具有良好的减振效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 韩先才,孙昕,陈海波,等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.
- [2] 吴书煜,马宏忠,姜宁,等. 基于多物理场耦合的特高压并联电抗器振动噪声仿真分析与实验研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 122-127.
WU Shuyu, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Simulation analysis and experimental research on vibration and noise of UHV shunt reactor based on multi physical field coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 122-127.
- [3] 吴海涛,吕志宁,张浩,等. 并联电抗器运行异常分析及处理[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(8): 67-69.
WU Haitao, LÜ Zhining, ZHANG Hao, et al. Research on the abnormality of parallel connective reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(8): 67-69.
- [4] 常晨,刘兰荣,卢美林,等. 并联电抗器等效模型的振动噪声特性试验研究[J]. 电气技术, 2019, 20(2): 37-41, 47.
CHANG Chen, LIU Lanrong, LU Meilin, et al. Investigates the characteristics of vibration and noise based on the equivalent model to shunt reactor[J]. Electrical Engineering, 2019, 20(2): 37-41, 47.
- [5] 张鹏宁,李琳,纪锋,等. HVDC阳极饱和电抗器阻尼弹性体降振降噪试验研究[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3839-3845.
ZHANG Pengning, LI Lin, JI Feng, et al. Test study on reduction of vibration and noise to damping elastomer in HVDC anode saturable reactor[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3839-3845.
- [6] 闫荣格,赵路娜,袁彤,等. 基于负超磁致伸缩效应电抗器减振新方法的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(19): 254-258.
YAN Rongge, ZHAO Luna, BEN Tong, et al. A new vibration reduction method for reactors using NGMM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(19): 254-258.
- [7] YAN Rongge, ZHAO Luna, BEN Tong, et al. Design of lower vibration reactor[C] //International Conference on Electrical Machines & Systems. Sydney, Australia: IEEE, 2017: 1-5.
- [8] MATHIEU R, JEAN L B. Vibration reduction of inductors under magnetostrictive and Maxwell forces excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(12): 8403406.
- [9] 张鹏宁,李琳,聂京凯,等. 考虑铁芯磁致伸缩与绕组受力的高压并联电抗器振动研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13):

- 3130-3139.
ZHANG Pengning, LI Lin, NIE Jingkai, et al. Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriction and winding force[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3130-3139.
- [10] GAO Y, NAGATA M, MURAMATSU K, et al. Noise reduction of a three-phase reactor by optimization of gaps between cores considering electromagnetism and magnetostriction[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 2772-2775.
- [11] 张鹏宁, 李琳, 程志光, 等. 并联电抗器与变压器模型铁芯振动仿真与试验对比[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5273-5281.
ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5273-5281.
- [12] ZHANG Pengning, LI Lin, CHENG Zhiguang, et al. Study on vibration of iron core of transformer and reactor based on Maxwell stress and anisotropic magnetostriction[J/OL]. IEEE Transactions on Magnetics. (2018-10-30)[2020-07-14]. <https://doi-org-s./10.1109/TMAG.2018.2875017>.
- [13] 祝丽花. 叠片铁芯磁致伸缩效应对变压器、交流电机的振动噪声影响研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
ZHU Lihua. Study of affection from magnetostriction in laminated core on vibration noise of transformer and AC motor[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [14] 律方成, 郭佳熠, 程焕超, 等. 计及铁芯叠片规则与流-固耦合的特高压并联电抗器铁芯振动计算方法[J/OL]. 电网技术. (2020-02-22)[2020-07-14]. <https://doi-org-s./10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2503>.
- [15] 吴益明, 吴鹏, 刘红军, 等. 基于低磁致伸缩磁材的低噪声电抗器研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 268-272, 282.
WU Yiming, WU Peng, LIU Hongjun, et al. Research on low-noise reactors based on magnetic materials with low magnetostriction[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 268-272, 282.
- [16] ABBAS L, EBRAHIM R. Optimum design of core blocks and analyzing the fringing effect in shunt reactors with distributed gapped-core[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 101: 63-70.
- [17] LÜ Fangcheng, GUO Jiayi, NIU Leilei, et al. A new 3D method for reactor core vibration based on silicon steel lamination rules and application in UHV shunt reactors[J/OL]. Mathematical Problems in Engineering. (2019-10-23)[2020-07-14]. <https://doi-org-s./10.1155/2019/7290536>.
- [18] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-32, 53.
LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-32, 53.

作者简介:



郭佳熠

郭佳熠(1992—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为高电压与绝缘技术、特高压并联电抗器本体质量提升(E-mail: guojiayi@ncepu.edu.cn);

耿江海(1980—),男,河北邯郸人,高级工程师,博士,通信作者,主要从事高电压试验技术和外绝缘方面的教学和研究工作(E-mail: 1172101008@ncepu.edu.cn);

律方成(1963—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电气设备状态检测与故障诊断、灵活交流输电等(E-mail: lfc@ncepu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Influence of air gap structure on core vibration of UHV shunt reactor

GUO Jiayi^{1,2}, GENG Jianghai¹, LÜ Fangcheng^{1,2}, ZHAO Xiaoyu³, NIU Leilei^{1,2}, PAN Yirui¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Taking the influence of the number and position of air gaps on the core vibration of UHV (Ultra High Voltage) shunt reactor as the main research object, based on fully analyzing the core vibration mechanism of UHV shunt reactor, the vector sum of Maxwell force and magnetostrictive force is considered to be the main reason affecting the core vibration intensity. The possible structure types of core air gap are analyzed systematically, the real simulation model of UHV shunt reactor core with different air gap numbers and positions is built, and the influence rule of air gap structure on the core vibration of UHV shunt reactor is obtained by using the calculation method of multi physical field finite element simulation. Study results show that within the study range (the air gap number is between 15 and 25), the smaller the air gap number in the core of UHV shunt reactor, the weaker the core vibration intensity. The air gap position near the bottom yoke can enhance the core vibration intensity, while the air gap position close to the 3/4 height center of the core column can reduce the core vibration intensity. On this basis, a design scheme for core vibration reduction of UHV shunt reactor is proposed, which can reduce the root mean square displacement of core vibration by 18.925% by comparing with the existing core design scheme.

Key words: UHV shunt reactor; core; vibration; air gap number; air gap position

附录 A

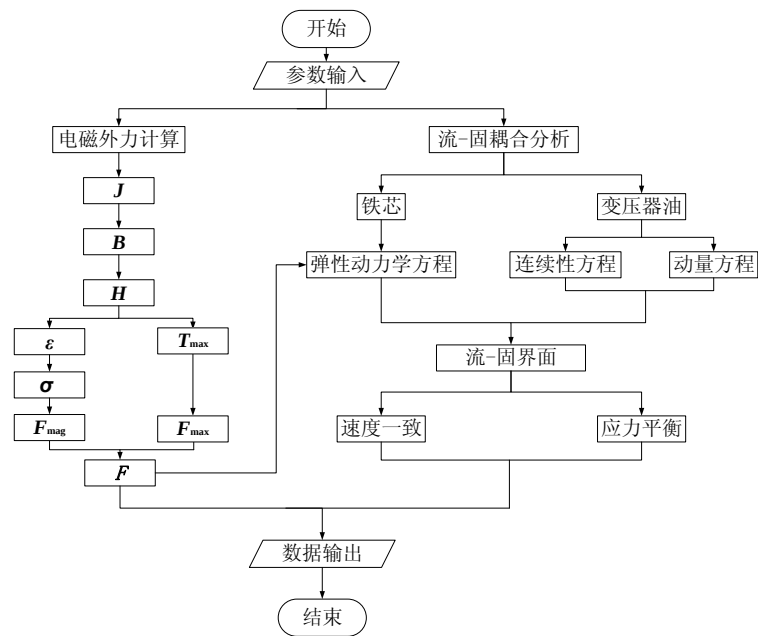


图 A1 特高压并联电抗器铁芯振动计算方法的计算过程简图

Fig.A1 Calculation process diagram of UHV shunt reactor core vibration calculation method

附录 B

表 B1 特高压并联电抗器设计和运行参数

Table B1 Design and operation parameters of UHV shunt reactor

参数	取值
额定电流/A	377.9
运行频率/Hz	50
硅钢片杨氏模量/MPa	1.95×10^5
硅钢片泊松比	0.27
硅钢片密度/ (kg m^{-3})	7 650
气隙杨氏模量/MPa	5.5×10^4
气隙泊松比	0.45
变压器油密度/ (kg m^{-3})	895
气隙密度/ (kg m^{-3})	2 600
压紧力/Pa	5×10^6
变压器油动力粘度/ (Pa s)	0.021
气隙总长度/mm	1 016.5
气隙-铁芯柱面积比	1
铁芯柱直径/mm	850

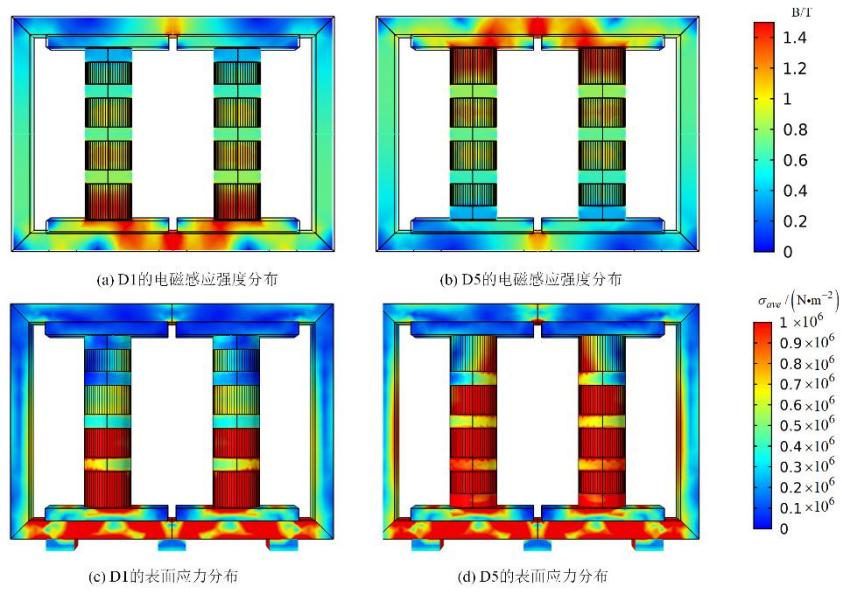


图 B1 D1 和 D5 的电磁感应强度与表面应力分布

Fig.B1 Distribution of B and σ_{ave} in D1 and D5

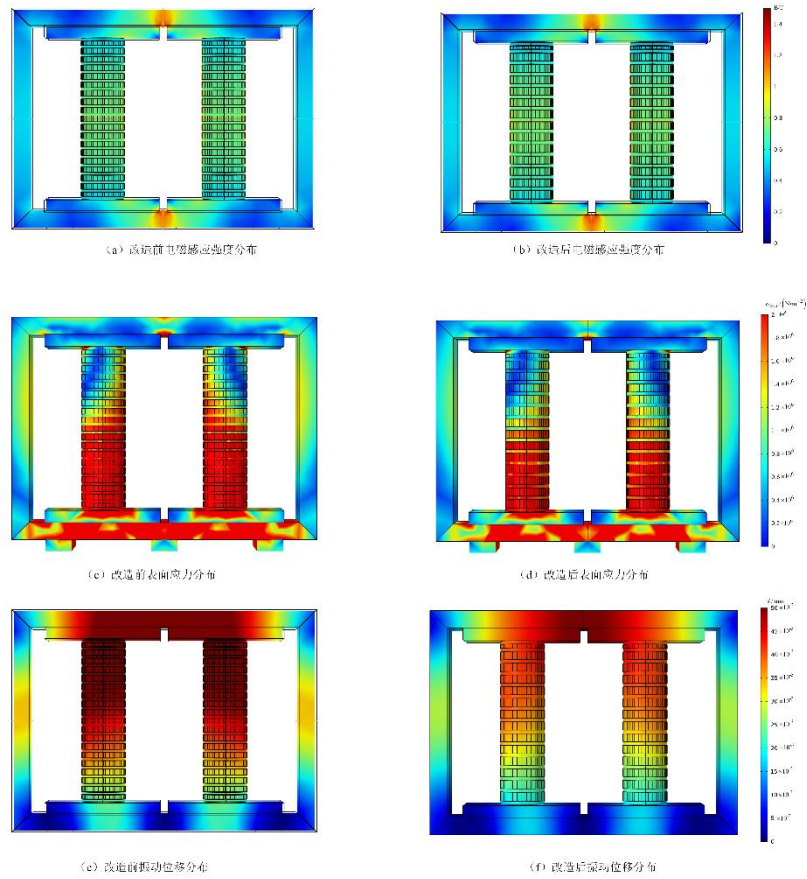


图 B2 改进效果对比

Fig.B2 Comparison of improvement effects