

基于响应面法的多绕组中频变压器绝缘结构优化设计

陈 彬¹, 曹红霞^{1b}, 王帅兵², 刘瑞勇³, 唐 波¹

(1. 三峡大学 a. 湖北省输电线路工程技术研究中心; b. 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663;

3. 国网湖北省电力有限公司直流公司, 湖北 宜昌 443000)

摘 要:中频变压器功率密度高、体积小、绕组结构复杂、局部电应力强, 变压器设计必须充分考虑电热应力裕量以保证可靠性。本文采用增加静电环和角环的方法对初级绕组端部区域的电场强度进行抑制; 采用静电场有限元分析方法计算多绕组变压器的电场强度分布; 结合灵敏度分析方法研究静电环和角环各个尺寸参数对电场强度的影响程度, 确定最大电场强度的决定性影响因素; 利用响应面法构建与电场强度相关的响应面函数, 对变压器绝缘结构进行优化。结果表明: 以一台 50 kW、10 kHz 多绕组中频变压器为例, 通过上述响应面函数得到静电环和角环的最优尺寸, 可以使短时工频耐压试验下的最大电场强度降低 15.4%, 额定运行工况下的最大电场强度降低 17.5%, 证明响应面法可应用于多绕组变压器绝缘结构的设计。

关键词:多绕组变压器; 灵敏度分析; 响应面法; 绝缘结构

中图分类号: TM432 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.04.012

Optimization design of insulation structure of multi-winding medium frequency transformer based on response surface method

CHEN Bin¹, CAO Hongxia^{1b}, WANG Shuaibing², LIU Ruiyong³, TANG Bo¹

(1. a. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line; b. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China;

3. DC Company State Grid Hubei Electric Power Company, Yichang 443000, China)

Abstract: Medium frequency transformers have high power density, small volume, complex winding structure, and strong local electrical stress, so the design of transformer must fully consider the electro-thermal stress margin to ensure reliability. In this paper, the method of adding electrostatic ring and angle ring were proposed to suppress the electric field strength at the end of primary winding, and the electric field strength distribution of multi-winding transformer was calculated by electrostatic field finite element analysis method. Combined with the sensitivity analysis method, the influence of the size parameters of electrostatic ring and angle ring on the electric field strength was studied to determine the decisive factors of the maximum electric field strength. The response surface function related to electric field strength was constructed by response surface method to optimize the insulation structure of transformer. The results show that the optimal sizes of electrostatic ring and angle ring are obtained by the above response surface function through taking a 50 kW, 10 kHz multi-winding medium-frequency transformer as an example, which can reduce the maximum electric field strength by 15.4% and 17.49% under short-term power frequency withstand voltage test and rated operating conditions, respectively. It is proved that the response surface method can be applied to the insulation structure design of multi-winding transformer.

Key words: multi-winding transformer; sensitivity analysis; response surface method; insulation structure

0 引言

为了实现不同能量形态的电能变换和不同场景的特定需求, 电力电子变压器(power electronic

transformer, PET)功率模块的拓扑类型复杂多样, 主要有双有源桥(dual active bridge, DAB)、具有 AC 端口的级联 H 桥(cascaded H-bridge, CHB)型 DAB 及由这些功率模块经多绕组变压器磁耦合构成的多源有源桥(multiple active bridge, MAB) DC/DC 变换器^[1-2]。相比于 DAB, MAB 具有更大的优势, 其可以

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52107006); 湖北省自然科学基金面上项目(2021CFB149)

大幅减少高频变压器、低压单元、通信系统和辅助电源等辅助元件的使用数量进而降低系统成本、降低用于滤除直流电流纹波的电容值、降低回流功率、提高系统效率和功率密度^[3-6]。多绕组中频变压器是MAB变换器的内部核心器件,可以起到电压变换、能量传输和电气隔离的作用,其绝缘性能的好坏决定电力电子变压器性能的优劣,也成为限制其大容量化、中频化发展的重要因素^[7]。因此,合理设计变压器主绝缘结构对变压器的绝缘性能和可靠运行十分重要。

变压器的绝缘特性分析主要是针对变压器的电场进行分析,其不仅与绝缘材料的电气特性有关,还与绝缘结构密切相关^[8-9]。为了实现变压器高压侧绕组与低压部分间的电应力柔化,须对变压器的绝缘结构进行优化,使其电场强度尽可能降低。目前,很多文献对变压器绝缘特性进行了分析。文献[10]介绍了导线类型对中频变压器电场分布的影响,对比了导线类型、绕组排布方式对电场强度的影响,但并未具体提出降低电场强度的方法。LÜ F C等^[11]采用有限元分析软件ANSYS对110 kV电力变压器主绝缘结构的电场分布进行了分析计算,并对静电环的形状、绝缘层的厚度和主空道距离进行设计,结果表明该设计有效降低了绝缘结构表面的最大电场强度。HUANG P等^[12]分析了绕组类型以及绕组交叉换位对电场强度的影响,但并未提出优化变压器绝缘的设计方法。陈生洋^[13]针对变压器绕组端部的非均匀电场问题进行了分析,采用有限元法计算得到最大电场强度值及其位置,并改善了电场分布。尹浩^[14]分析了现有绝缘设计的数值方法和简化解析方法,针对简化解析方法的不足采用添加静电环以及屏蔽层的方法对电场强度进行改善。目前有很多变压器绝缘结构优化算法,GAO Y H等^[15]提出了基于粒子群算法的电力变压器主绝缘设计,但粒子群算法在处理优化问题时需要大量反复调用建模、仿真和优化的程序,优化效率较低,而且如果适应度函数选择不当,会导致局部搜索能力变差,降低搜索效率。

响应面法(response surface method, RSM)是一种数学优化和统计的方法,其建立的近似模型具有独立性和方便易行的优势,因此得到广泛应用。响应面法在保证精度和效率的前提下,能快速、方便地处理多种优化问题。本文首先利用灵敏度分析方法研究不同参数下静电环和角环对电场强度的影响,确定电场强度的决定性影响因素。然后,采用响应面法对多绕组中频变压器的静电环结构进

行优化,构建出与电场强度相关的响应面函数,并对优化前后的电场强度进行对比,验证该方法的有效性。

1 多绕组中频变压器结构与电场计算方法

1.1 MAB变换器拓扑结构及变压器结构

为解决PET容量、电压等级与单个功率模块器件耐压、耐流要求之间的矛盾,常使用中压端口串联、低压端口并联的连接方式。通常MAB全桥功率模块数量为4个,拓扑结构为“三变一”和“二变二”形式的四有源桥,前者为非对称结构,后者为对称结构^[16]。图1为CHB功率模块和MAB功率模块示意图,级联H桥型PET输入侧半桥子模块均位于同一相中,中间级MAB变换器为“三变一”和“二变二”形式的四有源桥。由于非对称结构的变换器需要更高的额定电流来获得低电压,而绕组不能承受过高的电流,因此一般选择对称结构的变压器。另外,为了保证变压器漏电感等电磁参数的对称,绕组结构通常选择图1所示的对称结构。

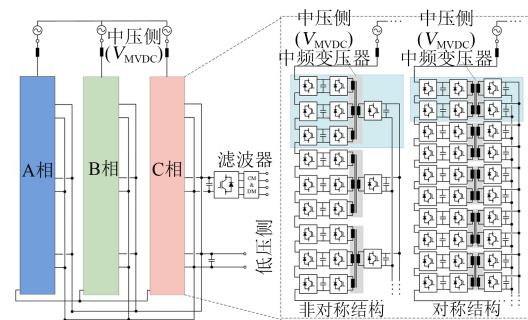


图1 级联H桥型PET示意图

Fig.1 Schematic diagram of cascaded H-bridge PET

本文针对前期设计的一台额定传输功率为50 kW,额定频率为10 kHz,初、次级绕组额定工作电压等级均为1 kV的多绕组中频变压器进行绝缘结构优化设计。变压器的铁心选择安泰科技PC1346型纳米晶合金铁心,变压器匝间绝缘材料采用聚酰亚胺薄膜和Nomex纸^[17],全环氮固封干式中频变压器采用环氧树脂固体绝缘材料实现电气设备的整体绝缘,可大幅减小绝缘距离、减小设备体积、有效增大功率密度。

绝缘设计要以变压器的电场强度和绝缘材料的抗电性能为依据。变压器绝缘分为主绝缘和纵绝缘,主绝缘包括初、次级绕组之间以及绕组与铁心之间的绝缘和端部绝缘;纵绝缘包括匝间绝缘和层间绝缘。在变压器主绝缘的设计中,初、次级绕组之间的试验电压与短时工频试验下的耐电场强度有关。图2为多绕组中频变压器模型结构,其初

级绕组与PET的中压侧H桥连接,次级绕组与PET的低压侧H桥连接。PET的中压侧电压 V_{MVDC} 通常为10 kV,该侧的工频交流耐压要求为35 kV。因此,多绕组中频变压器初级绕组对地短时工频耐受电压选择为35 kV。中频变压器模型设计参数如表1所示。

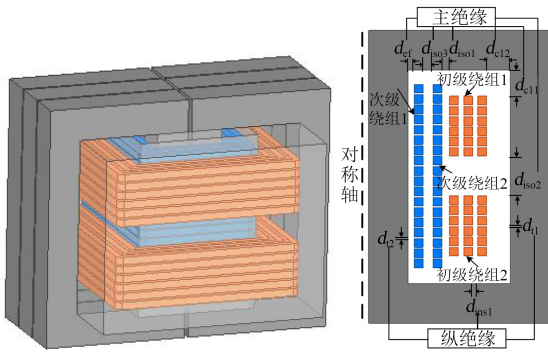


图2 中频变压器模型结构

Fig.2 Medium frequency transformer model structure

表1 中频变压器模型设计参数

Tab.1 Design parameters of the medium frequency transformer model

项目	参数	数值
铁心	垂直于铁心卷绕方向的厚度/mm	25
	铁心窗口宽度/mm	65
	铁心窗口高度/mm	135
	铁心厚度/mm	30
	铁心叠压个数	3
导线	初级绕组层数及每层匝数	3×6
	次级绕组层数及每层匝数	1×18
	初级绕组利兹线外轮廓尺寸/mm ²	5.5×5.5
	次级绕组利兹线外轮廓尺寸/mm ²	5.5×5.5
绕组间距	初级绕组与上下铁轭间距 d_{c1} /mm	17
	初级绕组与铁心旁轭间距 d_{c12} /mm	9.5
	初级与次级绕组隔离间距 d_{iso1} /mm	5
	两个初级绕组的隔离间距 d_{iso2} /mm	25
	两个次级绕组的隔离间距 d_{iso3} /mm	6.5
	次级绕组与铁心中柱间距 d_{c2} /mm	4
	初级和次级绕组匝间距 d_{i1} 、 d_{i2} /mm	1
初级绕组层间距 d_{ins1} /mm	3.5	

1.2 多绕组中频变压器电场计算方法

由于多绕组中频变压器结构较为复杂,需要在满足精度的情况下进行如下简化:①作为平行平面场处理;②在考虑容性电流时不考虑阻性电流的影响;③假设变压器与周围其他设备的距离比变压器本身尺寸大得多。中频变压器绕组区域的最大电场强度出现在初、次级绕组相邻区域的端部,为了降低最大电场强度,本文在该区域附近加入静电环

和角环^[18]。静电环金属层为铜导体,外绝缘和绝缘圈均为电缆纸,其相对介电常数为3.5。角环为木浆制成的绝缘材料,其相对介电常数为4.1。

短时工频耐压试验是校验绕组与地、绕组之间主绝缘强度的有效方法。在短时工频耐压试验中,变压器的被试绕组及与它相连的元件均承受同一试验电压,而非被试绕组则短路接地。因此初级绕组和静电环电位均设置为35 kV,将次级绕组和铁心的电位设置为零电位,变压器端部绝缘如图3所示。

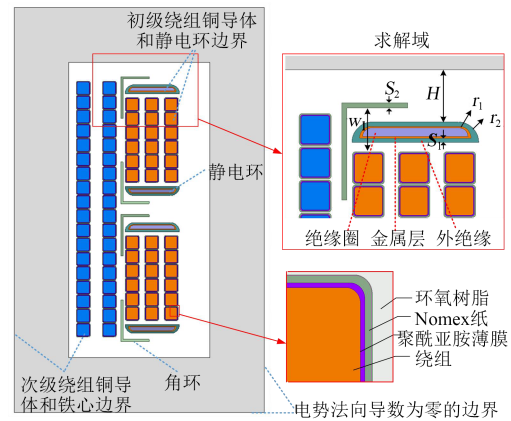


图3 变压器端部绝缘示意图

Fig.3 Terminal insulation diagram of transformer

平面直角坐标系中的静电场边界条件可以用式(1)表示。

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, (x,y) \in G \\ \varphi = U_0(x,y), (x,y) \in \Gamma_1 \\ \varphi = 0, (x,y) \in \Gamma_2 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, (x,y) \in \Gamma_3 \\ \left(\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^- = \left(\varepsilon_2 \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)^+, (x,y) \in \Gamma_{in} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: φ 为电位; G 为求解域; Γ_1 为初级绕组铜导体、静电环边界; Γ_2 为次级绕组铜导体、铁心边界; Γ_3 为电势法向导数为零的边界; ε 为介电常数; Γ_{in} 为铜导体、环氧树脂、铁心和绝缘纸等不同媒质分界面衔接条件; $\partial \varphi$ 、 ∂n 为电位的法向导数。

2 基于响应面法的绝缘结构优化方法

基于响应面法的绝缘结构优化设计流程如图4所示。首先,结合灵敏度分析方法筛选出对电场强度影响最大的结构因子;然后,运用响应面法对静电环和角环的结构进行优化。

2.1 灵敏度分析

变压器主绝缘设计中必须要确定静电环和角

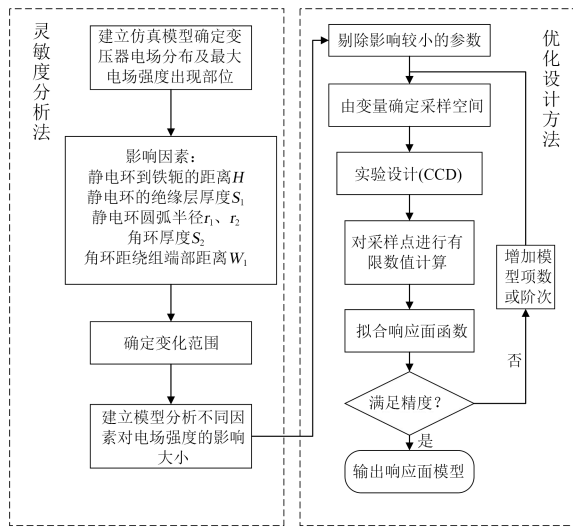


图4 绝缘结构优化设计流程图

Fig.4 Flow chart of insulation structure optimization design

环的结构和尺寸,保证在短时工频耐压下不发生击穿和局部放电。因此,需要明确静电环和角环各个几何参数对最大电场强度的影响程度,确定影响电场强度的决定因素。采用灵敏度分析方法,保持其他变量不变,某个单一变量按照合适的步长进行改变,通过有限元法计算出空间最大场强的变化率。选取静电环绝缘层到铁轭的距离 H 、静电环内侧曲率半径 r_1 、静电环外侧曲率半径 r_2 、静电环绝缘层厚度 S_1 、角环距绕组端部距离 w_1 、角环厚度 S_2 作为变量。变压器中静电环和角环的各个参数初始值、步长及变化范围如表2所示。

表2 各参数初始值及变化范围

Tab.2 Initial values and variation ranges of each parameter

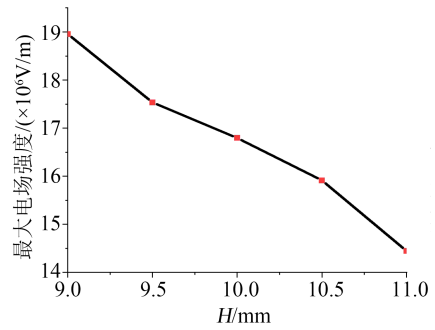
参数	初始值	变化范围	步长
H/mm	11.0	9.0~11.0	0.5
r_1/mm	2.0	2.0~4.0	0.5
r_2/mm	4.0	4.0~6.0	0.5
S_1/mm	1.0	0.6~1.2	0.2
w_1/mm	8.5	7.5~10.5	1.0
S_2/mm	1.0	0.5~2.0	0.5

根据表2得到各个因素下的电场强度大小如图5所示。由图5可知,静电环圆弧的内侧曲率半径、外侧曲率半径、绝缘层厚度和静电环绝缘层到铁轭的距离均对最大电场强度有较大影响;而角环距绕组端部距离和角环厚度对最大电场强度的影响并不显著,可将它们视作与最大电场强度无关的变量。因此,在以下分析中忽略角环的影响,角环参数分别取初始值。虽然角环对最大场强的影响较小,但可改善变压器端部电场强度,增大变压器线

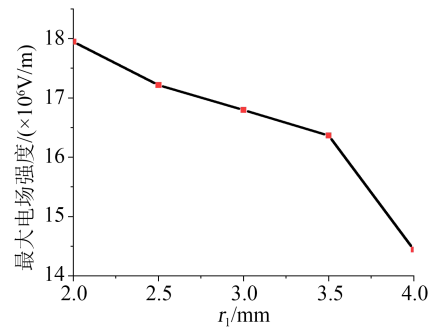
圈端部到铁轭和线圈端部的爬电距离。

2.2 响应面法基本原理及误差分析

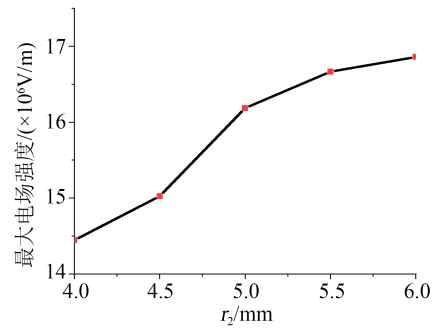
利用响应面法研究实际问题时,独立变量与响应值之间的关系是未知的。因此,需要通过一个合适的多项式近似函数表明独立变量和响应值的关系,合理的试验设计方法可以减少反复建模仿真的过程,提高优化效率。



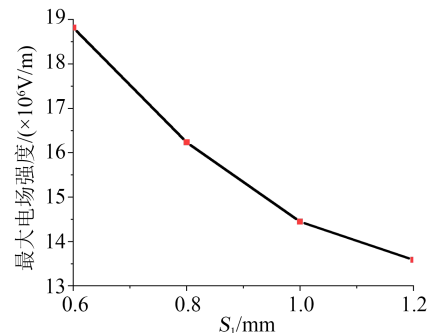
(a) H



(b) r_1



(c) r_2



(d) S_1

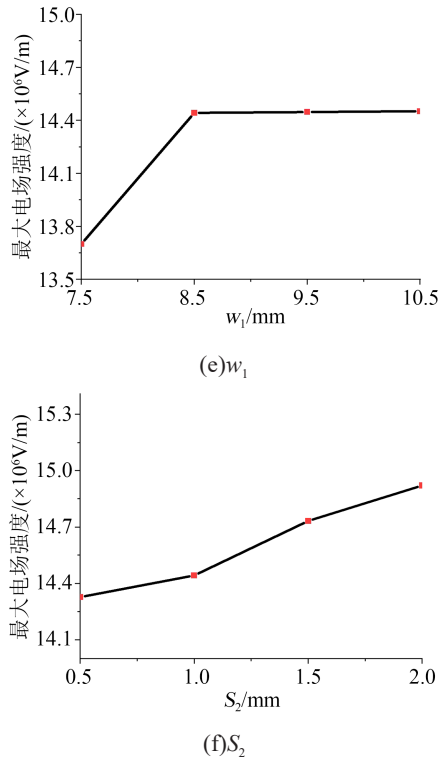


图5 不同因素对电场强度的影响大小

Fig.5 Influence of different factors on the electric field strength

响应面函数一般无法获取,可通过最小二乘法得到响应面的近似函数。在实际运用中,为保证模型的简单性和拟合精确度,通常优先选择二次多项式。二次多项式表达式为式(2)。

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

式(2)中: \hat{y} 为目标函数; β_0 、 β_j 、 β_{jj} 、 β_{ij} 为多项式系数; x_j 、 x_i 为试验变量; n 为试验变量个数^[19]。

假设待求响应面函数需要进行 k 次试验,则式(2)可变为式(3)。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} \cdots x_{1n} & x_{11}^2 \cdots x_{1n}^2 & x_{11} x_{12} \cdots x_{1n} x_{1n-1} \\ 1 & x_{21} \cdots x_{2n} & x_{21}^2 \cdots x_{2n}^2 & x_{21} x_{22} \cdots x_{2n} x_{2n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{k1} \cdots x_{kn} & x_{k1}^2 \cdots x_{kn}^2 & x_{k1} x_{k2} \cdots x_{kn} x_{kn-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \cdots \beta_n \\ \beta_{11} \cdots \beta_{nn} \\ \beta_{12} \cdots \beta_{n-1} \end{bmatrix}^T + (\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_k)^T \quad (3)$$

式(3)中: μ 为 y 的误差; T 为转置。

根据无偏估计的极值问题,利用式(3)使误差的平方和最小,因此得到多项式系数为式(4)。

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

将 β 值带入式(3),进而得到响应面模型。模型预测的总效率由决定系数(R^2)解释。 R^2 是回归平方和与总平方和的比值,其值越接近1,说明精度越

高,其计算公式为式(5)。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

式(5)中: y 为样本值; \bar{y} 为样本均值; n 表示试验变量个数。

2.3 响应面试验设计

响应面模型的拟合精度与样本点在设计空间的分布密切相关^[20],本文采用中心复合设计(central composite design, CCD)对绝缘结构进行优化。待优化变量有4个,因此编码值 $\alpha = 2^{n/4} = 2^{4/4} = 2$,表3为变量和编码值的对应关系。

表3 试验因素水平

Tab.3 Level of test factor

变量	水平				
	$-\alpha$	-1	0	1	α
H	9.0	9.5	10	10.5	11.0
r_1	2.0	2.5	3	3.5	4.0
r_2	4.0	4.5	5	5.5	6.0
S_1	0.6	0.8	1	1.2	1.4

根据表3的试验因素水平得到试验变量取值和仿真计算结果,如表4所示。根据表4中的试验数据,利用式(4)求得初始响应面模型的各项系数如表5所示。

表5给出了各参数95%的置信区间(confidence intervals, CI),置信区间可检验各项参数的显著性。若置信区间CI上、下界之间不包含0,说明此项为显著项;反之则为不显著项,需将其剔除。但在最终模型中是否需要剔除此项还要结合方差分析的结果来决定,方差分析如表6所示。

另外,模型的 R^2 为94.39%,表明此模型可以解释94.39%的试验变化,模型的拟合度较好。由于显著性水平为0.05, P 值小于0.05表示模型项是显著的。因此可以得到 A 、 B 、 D 、 CD 、 A^2 和 D^2 是显著参数,最终响应面方程式为式(6)。

$$y = 12.63 - 0.14H - 0.12r_1 - 0.27S + 0.10r_2S + 0.1H^2 + 0.31S^2 \quad (6)$$

2.4 诊断分析和扰动分析

为了进一步验证模型的适用性,根据 Design-Expert 对模型进行诊断分析。图6为残差正态概率图。从图6可以看出,残差呈正态分布,残差点均匀分散于一条直线附近,虽然某个点有微小的偏移,但对结果影响不大,表明该模型拟合得好。图7为预测值和实际值的对比图。从图7可以看出,预测

表4 试验数据

Tab.4 Test data

试验次数	距离/mm	内径/mm	外径/mm	厚度/mm	最大电场强度/(kV/mm)	试验次数	距离/mm	内径/mm	外径/mm	厚度/mm	最大电场强度/(kV/mm)
1	9.5	2.5	4.5	1.2	12.987	16	10.5	3.5	4.5	1.2	12.509
2	10.5	3.5	5.5	1.2	12.752	17	10.5	2.5	5.5	0.8	13.310
3	10.5	2.5	4.5	1.2	12.807	18	9.0	3.0	5.0	1.0	13.404
4	9.5	3.5	5.5	1.2	12.980	19	10.0	3.0	5.0	1.0	12.634
5	9.5	2.5	4.5	0.8	13.708	20	9.5	2.5	5.5	0.8	13.545
6	10.0	4.0	5.0	1.0	12.510	21	10.5	3.5	5.5	0.8	12.984
7	10.5	2.5	5.5	1.2	12.925	22	10.0	3.0	4.0	1.0	12.400
8	10.5	3.5	4.5	0.8	13.217	23	10.0	3.0	5.0	0.6	14.410
9	10.0	3.0	5.0	1.4	13.230	24	10.0	3.0	5.0	1.0	12.634
10	9.5	3.5	5.5	0.8	13.214	25	10.0	3.0	5.0	1.0	12.634
11	10.0	2.0	5.0	1.0	12.858	26	11.0	3.0	5.0	1.0	12.590
12	9.5	2.5	5.5	1.2	13.200	27	10.5	2.5	4.5	0.8	13.504
13	10.0	3.0	6.0	1.0	12.810	28	9.5	3.5	4.5	0.8	13.393
14	10.0	3.0	5.0	1.0	12.634	29	10.0	3.0	5.0	1.0	12.634
15	10.0	3.0	5.0	1.0	12.634	30	9.5	3.5	4.5	1.2	12.710

表5 响应面模型系数

Tab.5 Response surface model coefficients

参数	回归系数	自由度	标准误差	95%CI下界	95%CI上界
截距	12.63	1	0.043	12.54	12.730
$A-H$	-0.14	1	0.021	-0.19	-0.094
$B-r_1$	-0.12	1	0.021	-0.17	-0.076
$C-r_2$	0.037	1	0.021	-8.392×10^{-3}	0.083
$D-S_1$	-0.27	1	0.021	-0.310	-0.220
AB	-3.687×10^{-3}	1	0.026	-0.052	0.060
AC	-0.013	1	0.026	-0.069	0.043
AD	-2.438×10^{-3}	1	0.026	-0.058	0.054
BC	-7.937×10^{-3}	1	0.026	-0.048	0.064
BD	0.018	1	0.026	-0.038	0.074
CD	0.100	1	0.026	0.045	0.160
A^2	0.100	1	0.020	0.062	0.150
B^2	0.026	1	0.020	-0.016	0.069
C^2	6.510×10^{-3}	1	0.020	-0.036	0.049
D^2	0.310	1	0.020	0.270	0.350

表6 方差分析

Tab.6 Analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F0	P值
模型	5.53	14	0.4	35.84	<0.000 1
$A-H$	0.47	1	0.47	42.59	<0.000 1
$B-r_1$	0.36	1	0.36	32.29	<0.000 1
$C-r_2$	0.033	1	0.033	3.03	0.102 3
$D-S_1$	1.69	1	1.69	153.11	<0.000 1
AB	2.176×10^{-4}	1	2.176×10^{-4}	0.020	0.890 2
AC	2.678×10^{-3}	1	2.678×10^{-3}	0.24	0.629 3
AD	9.506×10^{-3}	1	9.506×10^{-3}	8.62×10^{-3}	0.927 2
BC	1.008×10^{-3}	1	1.008×10^{-3}	0.091	0.766 5
BD	5.293×10^{-3}	1	5.293×10^{-3}	0.48	0.499 0
CD	0.16	1	0.16	14.75	0.001 6
A^2	0.30	1	0.30	27.17	0.000 1
B^2	0.019	1	0.019	1.72	0.210 0
C^2	1.163×10^{-3}	1	1.163×10^{-3}	0.11	0.749 9
D^2	2.64	1	2.64	239.48	<0.000 1
残差	0.17	15	0.011	—	—
纯误差	0	5	0	—	—
总和	5.70	29	—	—	—

值与实际值之间有良好的—致性。

图8和图9分别为残差和预测值、残差和试验次数对应关系图。从图8和图9可以看出,残差均分布在一个水平带内,表明二次多项式可以满足拟合精度,可以作为此设计的响应面函数。

响应面模型的摄动分析如图10所示。根据图10不仅可以看出各变量的变化趋势,也可以判断各个变量对电场强度的影响作用。摄动图的斜率可以反映响应面对于每个变量的影响程度。由图10可知,电场强度随着外侧曲率半径 r_2 的增大而增大,

随着内侧曲率半径 r_1 、绝缘层厚度 S_1 和距离 H 的增大而减小。其中绝缘层厚度 S_1 和距离 H 的曲线较陡,说明这两个变量对电场强度的影响较大。

响应曲面图可以表示两个变量之间的相互作用,也可以反映不同因素水平对响应值的影响程度。对距离 H 和内侧曲率半径 r_1 、外侧曲率半径 r_2 和绝缘层厚度 S_1 交互项部分的响应曲面如图11所

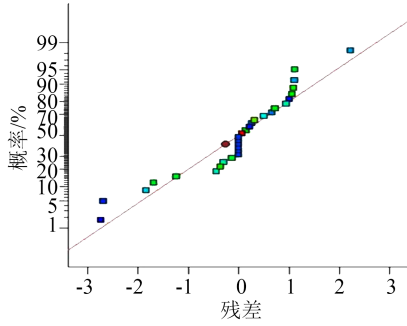


图6 残差的正态概率分布

Fig.6 Normal probability distribution of residuals

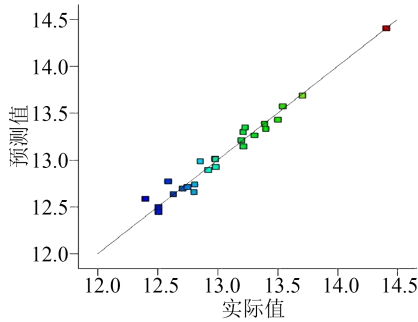


图7 预测值与实际值的对应关系

Fig.7 The relationship between the predicted values and the actual values

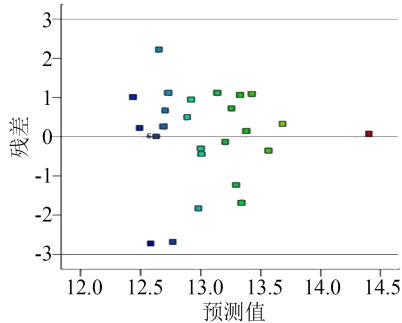


图8 残差与方程预测值的对应关系

Fig.8 The relationship between residual and predicted value of equation

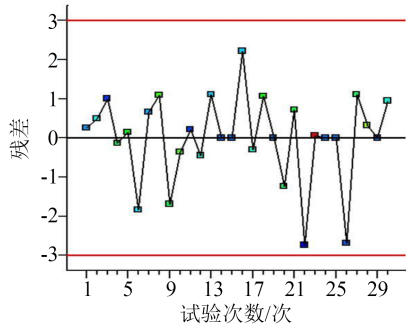


图9 残差与试验次数的对应关系

Fig.9 The relationship between residual and the number of test

示。由图 11 可知,两个变量交互作用时,都会使最大电场强度增大或减小。从曲面图的变化趋势可

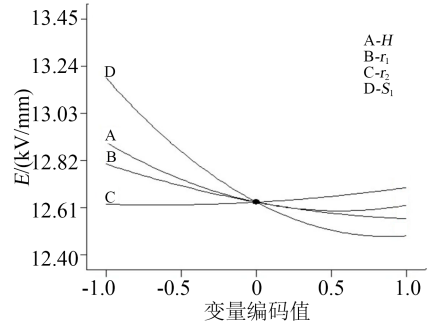
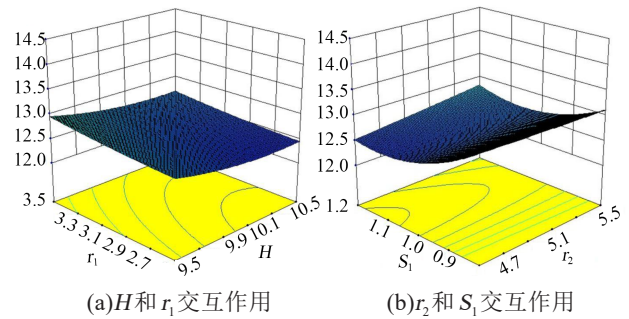


图10 摄动图

Fig.10 Perturbation diagram



(a)H和r₁交互作用 (b)r₂和S₁交互作用

图11 部分三维曲面图

Fig.11 Partial three-dimensional surface drawing

知,与静电环外侧曲率半径 r_2 相比,随着绝缘层厚度 S_1 的变化,最大电场强度值变化幅度更大,说明 S_1 对响应值的影响程度更大,与摄动图变化规律相同。

2.5 优化结果分析

依据以上对响应面模型的分析,得到各变量的最优值,优化结果如表 7 所示。根据表 7 变量的取值,进一步仿真得到初级绕组对地短时工频耐压下的电场强度分布如图 12 所示。由表 7 可知,采用响应面法对变压器静电环结构进行优化后电场强度明显降低,下降率为 15.4%。由图 12 可知,根据有限元仿真提取出的最优变量组合情况下的最大电场强度为 12.321×10^6 V/m,根据响应面函数计算出相同情况下的最大电场强度为 12.238×10^6 V/m,两者之间的偏差为 83 000 V/m。

在额定运行工况下,初、次级绕组的工作电压均为 1 kV,假设实际的输入串联连接模块为 12 个,中频变压器初、次级绕组之间的耐受电压水平 V_{iso} 等

表7 短时工频耐压下的优化结果对比

Tab.7 Optimization results under short-time power frequency withstand voltage

优化前后	变量				电场强度 /($\times 10^6$ V/m)	下降率 /%
	H/mm	r_1 /mm	r_2 /mm	S_1 /mm		
优化前	11.00	2	5	1.20	14.458	—
响应面法	10.26	4	4	1.14	12.238	15.4
仿真值	10.26	4	4	1.14	12.321	14.8

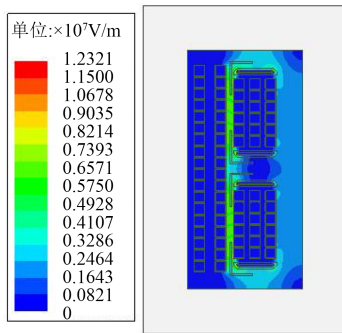
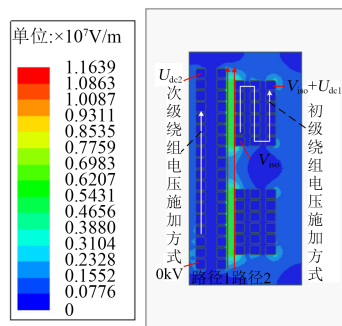


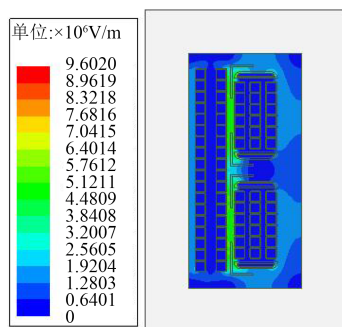
图 12 短时工频耐压下的电场强度分布云图

Fig.12 Electric field strength distribution under short-time power frequency withstand voltage

于 26.4 kV。初、次级绕组的电压沿各匝线圈均匀分布,初级侧线圈采用 C 型法^[21]进行缠绕,即从下至上绕制完第 1 层,在第 2 层绕制时顺序更改为从上至下的方式,图 13(a)中对各匝施加的激励电压进行了标注,图 13(b)与其电压施加方式相同。对于未添加静电环和角环的模型以及通过响应面法优化后的模型进行有限元分析,得到优化前后的电场分布如图 13 所示。从图 13 可以看出,优化前、后电场强度分别为 11.6×10^6 V/m、 9.6×10^6 V/m。图 14 为不同路径优化前后电场强度的对比。从图 14 可以看出,添加静电环和角环后初、次级绕组之间的电场强度均有大幅度降低。在此工况下,中频变压器的电场强度降低了 17.5%。



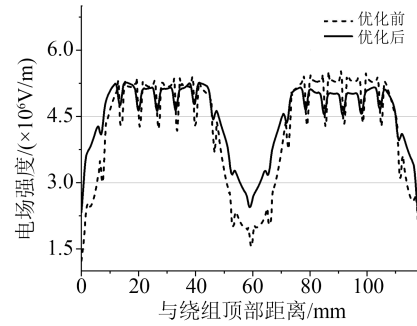
(a)优化前电场强度分布



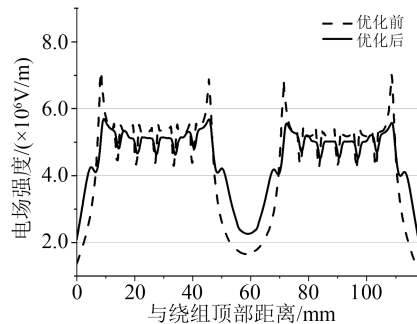
(b)优化后电场强度分布

图 13 额定运行工况下的电场强度分布云图

Fig.13 Electric field strength distribution under normal operating condition



(a)沿路径 1 的电场强度



(b)沿路径 2 的电场强度

图 14 不同路径优化前后的电场强度对比

Fig.14 Comparison of electric field strength before and after optimization of different paths

3 结论

本文通过灵敏度分析方法,得到静电环参数对电场强度的影响较大,角环参数对电场强度的影响较小,可以忽略角环参数变化对电场强度的影响。此外,构建了电场强度和静电环相关参数之间的响应面函数,通过方差分析、诊断分析和摄动分析说明该函数具有良好的拟合效果。通过响应面函数得到各变量的最优值,使得短时工频耐压试验下的最大电场强度降低了 15.4%,额定运行工况下的最大电场强度降低了 17.5%。

参考文献:

- [1] COSTA L F, CARNE G D, BUTICCHI G, et al. The smart transformer: A solid-state transformer tailored to provide ancillary services to the distribution grid[J]. IEEE Electronics Magazine, 2017, 4(2):56-67.
- [2] 赵彪,宋强,刘文华,等.用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4295-4303.
- [3] COSTA L F, HOFFMANN F, BUTICCHI G, et al. Comparative analysis of multiple active bridge converters configurations in modular smart transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1):191-202.
- [4] ZHAO B, SONG Q, LIU W H, et al. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system[J]. IEEE Transactions on Power

- Electronics,2014,29(8):4091-4106.
- [5] 张科科,齐磊,崔翔,等.多绕组中频变压器宽频建模方法[J].电网技术,2019,43(2):582-590.
- [6] PANDIT S, R.KMISHRA, CHAUHAN G. Estimation and methods of equalizing leakage reactance for multi-winding transformers[C]//2018 20th National Power Systems Conference. Tiruchirappalli, India:IEEE,2018.
- [7] 蔡定国,唐金权.干式变压器用绝缘材料、绝缘结构与系统综述[J].绝缘材料,2019,52(10):1-8.
- [8] 赵峰,卢铁兵,王冰.有限元法在特高压变压器绝缘设计中的应用[J].绝缘材料,2013,46(1):66-69,74.
- [9] 陈鹏,肖祥,黄杨珏,等.干式变压器用高性能硅橡胶绝缘材料研究[J].绝缘材料,2019,52(11):35-38.
- [10] 贝冠祺,王全保.小功率变压器[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [11] LÜ F C, LI D R, GUO Y X, et al. Optimal design of compact main insulation structure of PETT[C]//2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems. Pattaya, Thailand,IEEE:2015.
- [12] HUANG P, MAO C, WANG D. Electric field simulations and analysis for high voltage high power medium frequency transformer[J]. Energies,2017,10(3):371.
- [13] 陈生洋.电力变压器主绝缘电场仿真及结构优化[D].沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [14] 尹浩.高频变换变压器漏感与绝缘综合设计[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [15] GAO Y H, WANG S B, GAO D. Influence of main insulation structure in power transformer to electric filed distribution[C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China:IEEE,2011.
- [16] COSTA L F, BUTICCHI G, LISERRE M. Optimum design of a multiple-active-bridge DC - DC converter for smart transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(12):10112-10121.
- [17] CHEN B, LIANG X, WAN N. Design methodology for inductor-integrated litz-wired high-power medium-frequency transformer with the nanocrystalline core material for isolated DC-link stage of solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(11):11557-11573.
- [18] 张立国,杜建平,张志强,等.移相变压器主、纵绝缘结构的研究[J].绝缘材料,2018,51(5):40-46.
- [19] ZHANG Y P, HO S L, FU W N. Applying response surface method to oil-immersed transformer cooling system for design optimization[J] IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-5.
- [20] 刘刚,刘西娅,刘尧,等.基于响应面法的变压器静电环绝缘优化设计[J].高电压技术,2022,48(10):4163-4171.
- [21] 王泽庭,李敬文,樊生文.60kW高频高压变压器的绝缘研究[J].绝缘材料,2017,50(6):43-47.

收稿日期:2020-09-14 修回日期:2022-10-22

作者简介:陈彬(1989-),男(汉族),河南焦作人,博士,主要从事电力装备电磁特性模拟与测量技术、新型电工磁性材料综合特性模拟与测量技术的研究。