

用于双脉冲测试平台的环形空心电抗器设计^{*}

穆杨琨 赵志斌

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 北京 100096)

摘要: 针对双脉冲测试平台对电抗器紧凑化、小型化的需求,本文设计了一种环形空心电抗器,旨在解决传统螺线管型和干式空心电抗器磁场泄漏严重的问题。电抗器采用利兹线绕制,并基于等效电流环理论优化结构设计,通过理论分析和 Ansys 等电磁场仿真软件计算电抗器的电感值、寄生参数并验证其绝缘性能、热稳定性和动稳定性。基于其双层绕组结构,可提供 3 个电感值供使用。结果表明,环形空心电抗器具有高储能密度、低磁场泄漏和良好的稳定性,其储能密度约为传统螺线管型电抗器的 28.389 倍,且在双脉冲测试中表现出色。结论表明,该电抗器设计满足双脉冲测试平台的发展需求,可作为其紧凑化、小型化的重要技术手段。

关键词: 双脉冲测试;环形空心电抗器;磁场泄漏;利兹线;动稳定性;双层绕组结构;储能密度

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4050

Design of toroidal air-core reactors for double-pulse test platform

Mu Yangjun Zhao Zhibin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source,
North China Electric Power University, Beijing 100096, China)

Abstract: To meet the requirements of compactness and miniaturization for double-pulse test platforms, this paper proposes a design of a toroidal air-core reactor to address the severe magnetic field leakage issue associated with traditional solenoid and dry-type air-core reactors. The reactor is wound with Litz wire and optimized based on the equivalent current loop theory. The inductance value and parasitic parameters of the reactor are calculated through theoretical analysis and electromagnetic field simulation software such as Ansys, and its insulation performance, thermal stability, and dynamic stability are verified. Based on its dual-layer winding configuration, the reactor offers three selectable values to accommodate diverse testing scenarios. The results show that the toroidal air-core reactor has high energy storage density, low magnetic field leakage, and good stability, with its energy storage density being 28.389 times higher than that of traditional solenoid reactors. The reactor performs well in double-pulse testing. The conclusion indicates that the proposed reactor design meets the developmental requirements of double-pulse test platforms and can serve as an important technical means for their compact and miniaturized development.

Keywords: double-pulse testing; toroidal air-core reactor; magnetic field leakage; Litz wire; dynamic stability; dual-layer winding structure; energy storage density

0 引言

电抗器是一种用于抑制电流变化的电磁元件,能够实现电能与磁场能的相互转换。在电力系统中,电抗器广泛应用于无功功率补偿、系统功率因数调节、电压调节以及短路电流限制等场景。在电力电子领域,电抗器同样扮演着重要角色,尤其是在双脉冲测试电路中,作为负载电感,完成电能与磁场能的相互转换,是测试功率器件开通关断波

形中不可或缺的部分^[1]。

电抗器的研究现状涵盖了多个方面,包括可调电抗器、新型结构电抗器以及高频应用中的电抗器等。早期的磁放大器概念以及磁放大理论的引入为可调电抗器的发展奠定了基础^[1]。20 世纪 70 年代,晶闸管控制电抗器开始受到关注,其通过控制晶闸管的触发角来调节电抗值,在无功补偿等领域得到应用^[2]。1986 年前苏联学者提出的“磁阀”概念,推动了磁阀式可调电抗器的出现^[3]。

在新型结构电抗器方面,环型空心电抗器的研究取得了显著进展。通过建立宽频等效电路模型,掌握其瞬态电压分布特性^[4]。此外,新型无环流空心电抗器的成功研制,相比传统电抗器,在体积、温升等方面具有显著优势^[5]。在高频应用领域,针对碳化硅金属-氧化物半导体场效应晶体管(silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, SiC MOSFET)等新型功率器件的高频特性,开展了相关驱动电路设计研究,实现了高性能的驱动电路,并利用仿真软件对驱动电路进行了验证^[6]。这些研究为高频电抗器的开发提供了技术指导,尤其是在高频电力电子系统中, SiC MOSFET 的高频开关特性对电抗器的性能提出了更高要求。

现有的双脉冲测试电路通常使用螺线管型空心电抗器^[2]或干式空心电力电抗器^[1,3],但是这两类电抗器在使用过程中存在磁场泄漏严重的问题,可能会引发邻近元件异常耦合、并干扰操作人员健康^[7]。

为了避免这些问题,元件和人员需与工作中的电抗器保持一定距离,这严重制约了双脉冲测试平台的紧凑化和小型化。因此,减小电抗器的泄漏磁场并提高其储能密度是研制双脉冲测试平台的关键。

环形空心电抗器在运行时可以将产生的绝大部分磁场约束在其内部,从而有效解决磁场泄漏问题。本文提出了一种适用于双脉冲测试平台的环形空心电抗器设计方案,在降低泄漏磁场的同时,通过设计不同层的匝数,实现了多种可选的电感值,为双脉冲测试平台的不同电感值需求提供了解决方案。

1 环形空心电抗器的设计

1.1 环形空心电抗器的结构设计

本文所研究的电抗器采用利兹线(Litz wire)在环形塑料架上均匀缠绕而成^[8]。如图1所示。利兹线由多股绝缘导线周期性绞合而成,因此能够在高频下有效降低集肤效应和邻近效应的影响,是一种兼顾效率和成本的绕组形式。考虑到双脉冲实验过程中流过电抗器的电流变化速率较高,引发的集肤效应和邻近效应会干扰实验结果,因此采用利兹线绕制的电抗器相较于普通铜线方案更适合双脉冲实验使用。

根据等效电流环理论,绕组倾斜角应设置在环形结构的内表面^[9](靠近圆心的面)上,可以进一步减小磁场泄漏。串联线圈的绕向设计确保了绝大部分磁场被约束在线圈内部空间。

以第1、2层匝数均为20匝的电抗器为例制作出示意图。结构示意图如图2(a)所示,空心圆柱体为环形骨架,起支撑作用,其磁导率接近真空磁导率。电气连接示意图如图2(b)所示。

1.2 环形电抗器的电感值选择与设计

1) 电抗器电感值的选择

在绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar

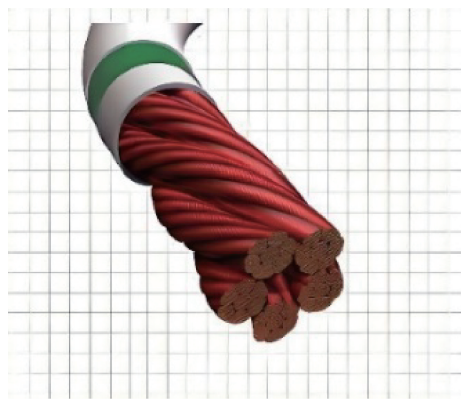
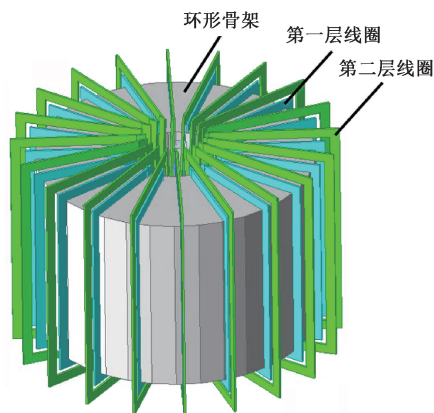


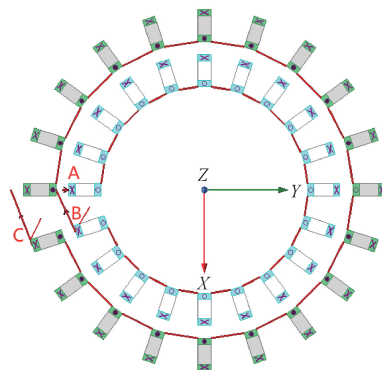
图1 利兹线示意图

Fig. 1 Diagram of Litz wire structure



(a) 环形电抗器结构示意图

(a) Diagram of the toroidal reactor structure



(b) 环形电抗器电气连接示意图

(b) Schematic of the electrical connection of the toroidal reactor

图2 环形电抗器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of toroidal reactor

transistor, IGBT)动态特性的双脉冲测试中,负载电抗器的电感值决定电流上升的速率。具体而言,若电感值过小,负载电流上升速度会过快,导致电流控制误差增大,从而影响测试的准确性^[10]。相反,较大的电感值能够有效限制电流变化率,降低负载电流上升速率,便于更精确地控制电流大小,但是电感值的增加也会带来一些问题,例如增加测试电

路的特征阻抗以及减少测试容量。此外,负载电流的上升速度也不能过慢,否则会使实验过程中母线电压跌落幅度过大,不能反映实际工况。

因此,电感值的选择需要在电流控制精度、测试容量和母线电压稳定性之间进行权衡。如图 2 所示,本文设计的环形电抗器采用双层线圈绕组结构,并配备 A、B、C 三个端子。通过任意连接其中两个端子,可实现一个特定的电感值,从而为用户提供了 3 种不同电感值的选择。

2) 环形电抗器电感值的设计

对于线圈绕制环形骨架的截面为矩形的环形电抗器,其自感的计算模型如图 3 所示,根据《电感计算手册》中给出的“环形线圈的电感”公式,可以计算其电感值。

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} n_1^2 h \ln \frac{D + \Delta R}{D - \Delta R} \quad (1)$$

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} n_1 n_2 h \ln \frac{D + \Delta R}{D - \Delta R} \quad (2)$$

式中: L_1 为电抗器中第 1 层线圈的自感值; μ_0 为真空磁导率,大小为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ T/A}$; n_1 为电抗器中第 1 层线圈的匝数; h 为绕组中心线匝的轴向尺寸; D 为线圈的平均直径; ΔR 为绕组中心线匝的径向尺寸; M_{12} 为电抗器中第 1 层线圈与第 2 层线圈间的互感值; n_2 为电抗器中第 2 层线圈的匝数。

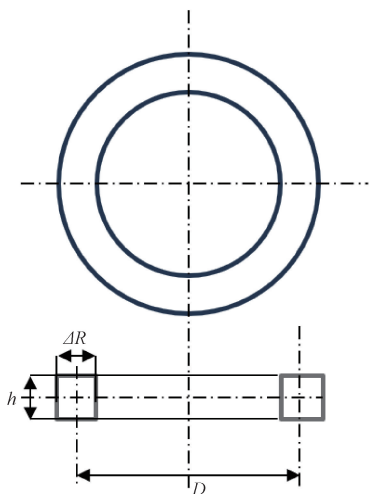


图 3 环形电抗器轴向、径向尺寸说明

Fig. 3 Explanation of axial and radial dimensions of circular reactor

当使用式(1)、(2)计算电感值时,需基于以下假设条件:一是将导线视为无限细;二是将不同层线圈的尺寸视为相等;三是假设不同层线圈的轴线完全重合;四是假设线圈的线匝完全均匀绕制;五是忽略集肤效应。

然而,由于电抗器的实际工作环境较上述 5 条假设存在差异,因此通过式(1)、(2)得到的计算结果只能作为理论指导,更准确的电感值还需通过 Ansys 等电磁场仿真软件的计算或专业测量仪器进行。

寄生电容的存在会在一定程度上对双脉冲实验的流过待测器件电流波形、待测器件两端电压质量^[11]产生一定影响。由式(3)可知,寄生电容的增加还会引起电抗器自谐振频率^[12]的下降,可能严重干扰双脉冲实验的电流、电压波形,影响实验数据的可靠性。

计算电抗器自谐振频率的相关公式如下:

$$C_{eq} = 1/\omega_0^2 L \quad (3)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_{SR} \quad (4)$$

$$f_{SR} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C_{eq}}} \quad (5)$$

式中: C_{eq} 为电抗器的等效电容值; ω_0 为电抗器的自谐振角频率; f_{SR} 为电抗器的自谐振频率; L 为电抗器的电感值。

经 Ansys 电磁场仿真软件计算,连接环形电抗器 A、C 端口的总等效寄生电容值为 835 pF,最大电感值为 300.0 μH ,由式(3)、(4)、(5)计算得到的自谐振频率为 318 kHz。而双脉冲实验中流经负载电抗器的电流频率主要集中在 2 kHz 以内^[13],因此可以认为寄生电容对于双脉冲实验的影响很小,可以忽略不计。

2 环形空心电抗器的宽频等效电路模型

2.1 环形电抗器宽频电路模型的建立

双脉冲测试时,环形电抗器两端的电压存在振荡,故具有较宽的频率分布范围。为了计算环形空心电抗器匝间的电压波形、电压分布,需要考虑寄生电容、寄生电阻等杂散参数,建立其宽频等效电路模型,为绝缘设计提供理论基础。

本文以单个线匝为基本单元,建立了环形电抗器的宽频等效电路模型如图 4 所示,单元总数(总匝数)为 $2N$,节点总数为 $(2N+2)$ 。

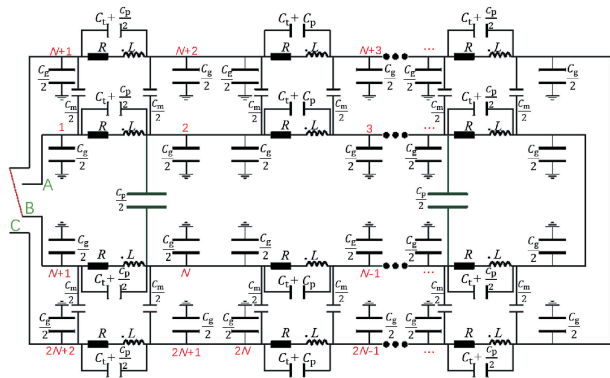


图 4 电抗器宽频等效电路模型

Fig. 4 Wideband equivalent circuit model of reactor

在图 4 中, R 为每个线匝的电阻, L 为每个线匝的自感,每两个电感支路之间都有互感, C_l 为每个线匝的并联等效电容。 C_g 为单个线匝对地电容,本文将其分为两半分别并联在每个线匝单元的两端, C_p 是同层线圈的相邻线匝之间的电容,同样将其分为两半分别并联在每个线匝单元

的两端。 C_m 是不同层线圈的相邻线匝之间的电容,本文仍将其分成两半分别并联在每个线匝单元的两端。考虑到屏蔽效应,不相邻线匝间的互电容远小于相邻线匝间的互电容^[14],再考虑到设计的繁琐和仿真的耗时,本文忽略不相邻线匝间的互电容。

2.2 宽频等效电路参数计算

1) 线匝电阻值的估算

本文主要关注冲击电压下起始一小段时间的电压峰值,而线匝损耗电阻对此段电压峰值的影响较小^[15]。因为双脉冲测试中流过电抗器的电流既有直流分量也有交流分量,利兹线又大大抑制了集肤效应、邻近效应的作用^[16],因此,对线圈损耗电阻进行估算即可。本文采用文献^[17]给出的电阻计算公式。

$$R = (1 + k_r)R_0 \quad (6)$$

$$k_r = k_1 a \frac{2N^2 + 1}{3} \quad (7)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{\omega \beta \sigma \mu_0}{2}} \quad (8)$$

式中: R 为单个线匝的高频电阻; R_0 为单个线匝的直流电阻; a 为导线矩形截面高度; N 为单个线匝的匝数, N 取 1; ω 为角频率; σ 为导体电导率; μ_0 为自由空间磁导率; β 由式(9)计算:

$$\beta = \frac{\text{裸线匝高度} \times \text{线匝总数}}{\text{线匝高度}} \quad (9)$$

2) 线匝电感、电容值的计算

本文采用有限元法计算线匝的自感、互感和电容参数。线匝的自感值仅由其结构参数决定。由于线匝沿电抗器环向分布具有空间周期性和对称性,因此在电抗器的结构参数和直径确定后,线匝之间的互感和电容值仅由线匝之间的夹角大小决定^[4]。

耦合系数 k 的定义为:

$$k = \frac{M_{12}}{L_1 L_2} \quad (10)$$

式中: M_{12} 为两个线匝之间的互感值; L_1 和 L_2 分别为两个线匝的自感值。

不同线匝之间的耦合系数计算结果如图 5(a) 所示,当夹角为 0 时,耦合系数为 1,代表线匝自感值。

计算同层线圈的线匝之间电容值可用平行板电容公式进行近似计算,为了更大程度计及边缘效应的影响,在线匝距离上增加匝绝缘的厚度,计算公式为:

$$C_p = [\epsilon(2h + 2\Delta R)(a + 2\delta)]/2\delta \quad (11)$$

式中: ϵ 为介质介电常数; h 为绕组中心线匝的轴向尺寸; ΔR 为绕组中心线匝的径向尺寸; a 为矩形导线截面高度; δ 为单边匝绝缘厚度。

计算不同层线圈的线匝之间电容值也可用平行板电容公式进行近似计算,计算公式为:

$$C_m = [\epsilon(2h + 2\Delta R)(b + 2\delta)]/2\delta \quad (12)$$

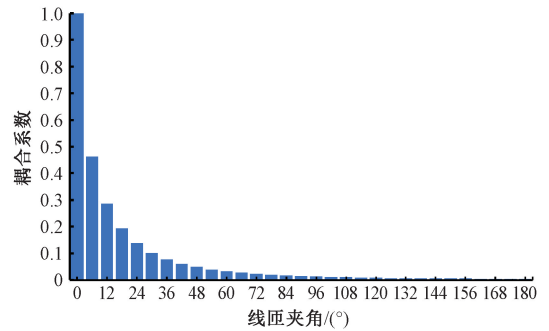
式中: b 为矩形导线截面宽度。

联立式(3)、(4)、(5)可推导出单个线匝并联等效电容值的计算式,公式如下:

$$C_t = \frac{1}{4\pi^2 L f_{SR}^2} \quad (13)$$

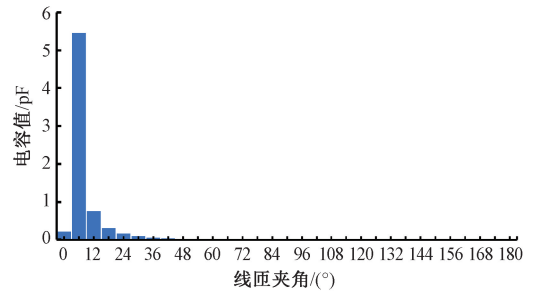
式中: L 为单个线匝的电感值, f_{SR} 为单个线匝的自谐振频率。

不同层线匝之间的电容值计算结果如图 5(b) 所示,夹角为 0 时代表线匝自身的并联等效电容量。



(a) 线匝耦合系数随夹角的变化

(a) Variation of coil coupling coefficient with the angle



(b) 匝间电容随夹角的变化

(b) Variation of capacitance between coil turns with the angle

图 5 线匝耦合系数和匝间电容随夹角的变化

Fig. 5 Variation of coils' coupling coefficient and the capacitance between coil turns with included angle

从图 5 可以看出,同层非相邻线匝之间的电容值远小于同层相邻线匝之间的电容值,因此忽略同层非相邻线匝之间的电容是合理的。又因为不同层非相邻线匝之间的电容值小于同层非相邻线匝之间的电容值,因此忽略不同层非相邻线匝之间的电容也是合理的。

综上所述,在计算匝间电容值时,只需考虑同层相邻线匝之间的电容和不同层相邻线匝之间的电容。

然而,从图 5 中可以看出,非相邻线匝之间的耦合系数并不是远小于相邻线匝之间的耦合系数,因此不能忽略非相邻线匝之间的互感效应。

由于电抗器线匝相对于地面沿环向均匀分布,故可以认为每个线匝的对地电容均相等^[18]。

综上所述,环形空心电抗器等效电路参数计算结果如表 1 所示。

表 1 环形空心电抗器等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters of the toroidal air-core reactor

环形空心电抗器等效电路参数	数值
单个线匝的交流电阻(R)	2.06 m Ω
不同层线圈的相邻匝间电容值(C_m)	136.05 pF
单个线匝并联等效电容值(C_l)	0.96 pF
单个线匝的自感值(L)	292.94 nH
单个线匝的对地电容值(C_g)	1.84 pF

3 环形电抗器的绝缘、热稳定性、动稳定性校验

3.1 环形电抗器的绝缘校验

本文设计了一台环形空心电抗器样机,其结构如图 6 所示。



图 6 环形空心电抗器样机

Fig. 6 Prototype of toroidal air-core reactor

为了制造一个双层绕组的环形电抗器样机,首先需要利用光敏树脂材料通过精密铸造工艺制备一个具有特定几何参数的空心圆柱体。该圆柱体的外径设定为 180 mm,内径为 100 mm,高度为 200 mm。

在制备过程中,需确保材料的均匀性和结构的完整性,以满足后续绕组工艺的需求。在完成空心圆柱体的制备后,需对外表面进行精密切削以形成导线槽。导线槽的设计需满足特定的几何参数要求,以适应利兹线的特性。在机械加工过程中,考虑到加工误差对最终产品性能的影响,通常需要在设计导线槽尺寸时加入一定的裕度。针对导线槽的加工,为确保利兹线能够正确嵌入且保持足够的机械强度和电气性能,导线槽的宽度和深度的设计需要在利兹线截面的尺寸基础上增加 10% 的裕度。

具体而言,导线槽的宽度应为利兹线截面宽度的 1.1 倍,即 $1.1 \times b = 1.1 \times 1.8 = 1.98$ mm,而导线槽的深度则为两条利兹线截面高度之和的 1.1 倍,即 $2 \times 1.1 \times a = 2.2 \times a = 2.2 \times 2.2 = 2.42$ mm。这里的 a 和 b 分别表示利兹线

截面的高度和宽度。

采用计算机数字控制(computer numerical control, CNC)铣削机械加工技术对外表面进行导线槽的加工。加工过程中,需严格控制加工精度,以确保导线槽的宽度和深度满足设计要求。导线槽的加工质量直接影响到利兹线的嵌入质量和电抗器的电磁性能,因此,加工精度的控制至关重要。

加工完成后,利兹线将被嵌入导线槽中。由于导线槽的宽度和深度均经过精确计算,可确保利兹线紧密贴合于导线槽内,从而提高电抗器的机械稳定性。

在绕制过程中,需特别注意保持利兹线的张力和应力,避免因张力不均或应力集中导致机械损伤。

层间绝缘材料采用聚酰亚胺薄膜,其单层厚度为 0.05 mm,其介电强度为 100 kV \cdot mm $^{-1}$,由此可以推断电抗器的理论层间击穿电压大于 $2 \times 0.05 \times 100 = 10$ kV。

环形电抗器样机结构参数包括环形骨架的直径、绕组的匝数、利兹线的规格如表 2 所示。

表 2 环形空心电抗器样机主要结构参数

Table 2 Structural parameters of the prototype of toroidal air-core reactor

环形空心电抗器样机结构参数	数值
环形骨架内径/外径	100 mm/180 mm
环形骨架高度	200 mm
环形骨架材料	光敏树脂
单层线匝数	60
层数	2
线匝总数	120
利兹铜导线的横截面 $a \times b$	2.2 mm \times 1.8 mm
连接 A、B 端子对应电感值	76.9 μ H
连接 B、C 端子对应电感值	90.9 μ H
连接 A、C 端子对应电感值	300.0 μ H

如图 7 所示,本文针对英飞凌 600 V/75 A 型号为 IKW75N60 T 的 IGBT 芯片展开电路仿真测试,利用 LTspice 软件搭建了包含环形电抗器宽频模型的双脉冲仿真电路,其中母线电容初始电压设置为 500 V,连接电抗器 A、C 端子选用 300.0 μ H 电感值,并依此设计实验过程中流过电抗器的最大电流为 50 A。在此电路中,负载电抗器的高压端电位等于母线电容电压,低压端电位则近似等于 IGBT 集电极电压。

线圈各节点编号如图 8 所示,A 端子对应的节点 1 和 C 端子对应的节点($2N+2$)分别为电抗器的首节点和末节点,将 A、C 端子直接接入测试电路。通过 LTspice 电路仿真软件对本文所提出的宽频等效电路模型进行计算,得到匝间电压波形,如图 8 所示。

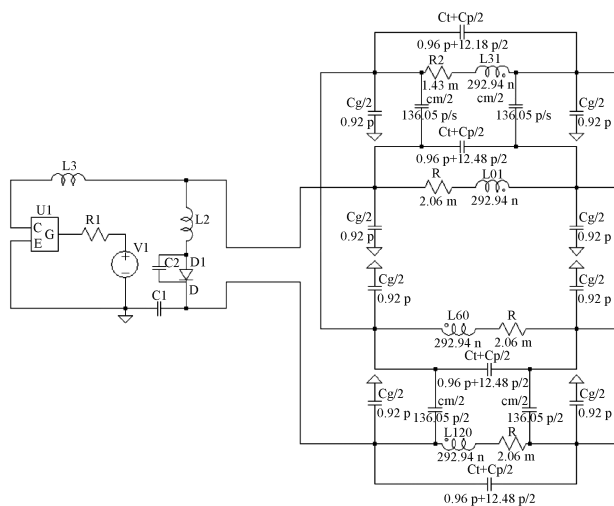


图7 双脉冲测试电路的局部放大图

Fig. 7 Local enlargement of the dual-pulse test circuit

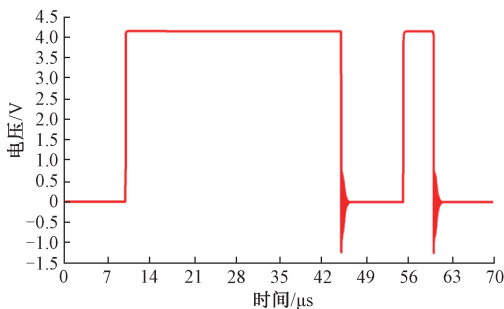


图8 负载电抗器匝间最大电压波形

Fig. 8 Waveform of maximum interturn voltage in the load reactor

本文所研究的环形空心电抗器宽频电路模型在双脉冲电压作用下的瞬态电压分布特点如下:

相邻匝之间的电压波形基本一致,电压值在各线匝之间分布非常均匀,因此最有可能发生绝缘击穿的地方是负载电抗器的两个端子之间和首尾相邻线匝之间。又考虑到采用利兹线的绝缘层材料为聚酰亚胺薄膜,其单层厚度为 0.05 mm,其介电强度为 $100 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$,据此计算出电抗器样机的击穿电压达到 10 kV。

根据 IEC-60243:2013 标准,在直流绝缘测试实验中,电压应从零开始以一定的速率升高。利用 ZJC-100 kV 高压试验机对环形空心电抗器连接 A、B 端子进行绝缘实验,由于其工作环境为通入逐渐增加的直流电流,因此仅需进行直流耐压实验即可。

直流耐压实验电压以 0.5 kV 为增量逐渐增大。当直流电压从 0 V 上升至 10 kV 时,电抗器始终未发出“滋滋”电流声,仪器也未检测到漏电流。连接 A、B 端子,连接 B、C 端子,连接 A、C 端子,均经过步骤相同的 5 次测试,结果均未观察到局部放电信号,故可以认为电抗器的直流绝缘强度大于 10 kV。

对电抗器宽频电路模型的仿真结果表明,负载电抗器

在整个双脉冲测试过程中所承受的最大电压为母线电容电压。又因为母线电容电压不得高于 IGBT 器件的额定电压,因此电抗器所承受的最大电压也不应超过器件的额定电压。为确保安全,在设计电抗器绝缘时,通常会至少保留 IGBT 器件额定电压 1.5 倍的裕度。例如,若待测 IGBT 器件的额定电压为 U_e ,则电抗器绝缘设计需至少满足 $1.5U_e$ 的耐压要求。

综上所述,电抗器样机的绝缘强度达到 10 kV,可满足额定电压低于 6.67 kV 的 IGBT 器件在双脉冲实验的绝缘条件。

3.2 环形电抗器热稳定性校验

在 IGBT 双脉冲实验中,通过电抗器的大电流波形如图 9 所示,电流在 $120 \mu\text{s}$ 时刻达到最大值 1 000 A,假设拖尾电流持续时间为 9 ms,根据电流波形可以对时间积分 $\int I^2 R dt$,可以计算出环形电抗器上的发热量^[19]。

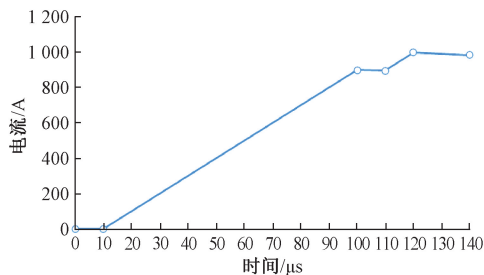


图9 双脉冲电流激励波形

Fig. 9 The waveform of double-pulse current excitation

进而可以根据式(14),计算导线的温度上升值:

$$Q = \int I^2 R dt = cm\Delta t \quad (14)$$

式中:Q 为发热量,c 为导线材料的比热容,m 为金属导线的质量。铜的比热容为 $0.39 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,铜的密度为 $8.96 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,电抗器的铜线体积约为 0.12 dm^3 。通过式(14)计算,连接 A、B 端子,电抗器在发热 825.28 J 的情况下,温升为 1.97°C 。

该温升是在完全绝热、拖尾电流持续时间取 9 ms 情况下的计算结果,由于导线绝缘层、环形骨架和周围空气均具有一定的散热能力,而且拖尾电流持续时间一般远小于 9 ms,故电抗器内部的实际温升会远小于 1.97°C 。

连接 B、C 端子和连接 A、C 端子通入如图 9 双脉冲电流的温升计算过程同理,其理论温升计算结果均为 1.97°C ,其实际温升结果均远小于 1.97°C 。由计算温升结果可知,双脉冲实验中电抗器的发热量很小,可以忽略不计。

3.3 环形电抗器动稳定性校验

样机采用利兹线绕制,绕制过程中确保线匝均匀分布,避免张力不均和机械应力集中。绕制完成后,样机经过绝缘处理和机械固定,确保其高电压和大电流环境下的稳定性。

通过 Ansys Workbench 将电磁场计算与瞬态结构场

耦合,将电磁场计算得到的电磁力面密度导入瞬态结构场作为激励^[20]。基于此方法,对电抗器样机模型中图 2(b)显示的 A、B 端子,在通入如图 9 双脉冲电流情况下的机械响应进行了仿真分析。

对连接 A、B 端子通入双脉冲电流的仿真结果包括各位置的变形量、法向应力值和剪切应力值随时间的变化关系,具体如下:

图 10 显示电磁力面密度,这是瞬态结构场分析的激励源。

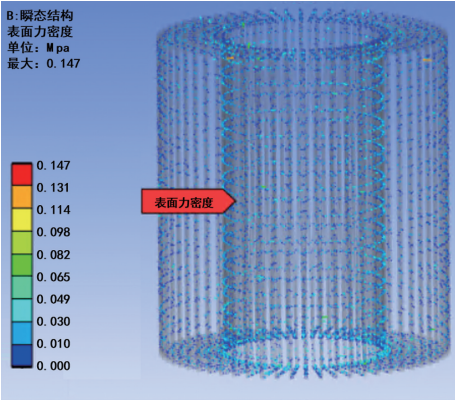


图 10 瞬态结构场的电磁力面密度激励

Fig. 10 Electromagnetic force surface density excitation in the transient structural field

图 11 显示电抗器在双脉冲电流作用下的变形量分布。仿真结果显示,最大变形量为 39.8 μm 。考虑到电抗器铜线最短处的长度为 4 cm,这一变形量相对较小,不会引起电抗器的明显结构变化。

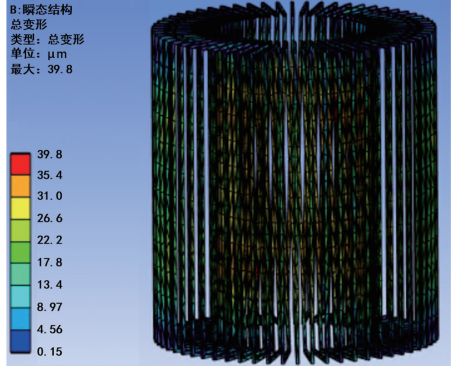


图 11 通入双脉冲电流时电抗器变形效果
Fig. 11 Deformation effect of the reactor during the excitation of double-pulse test current

图 12 展示了电抗器内部的法向应力分布。仿真结果显示,铜线所受的最大法向应力为 9.78 MPa,远低于铜材料的拉伸屈服强度(250.80 MPa)。

图 13 通过观察剪切应力数据,铜线所受最大剪切应力值是 4.02 MPa,远小于铜材料的抗剪强度(210 MPa)。

连接 B、C 端子和连接 A、C 端子通入同样双脉冲电流

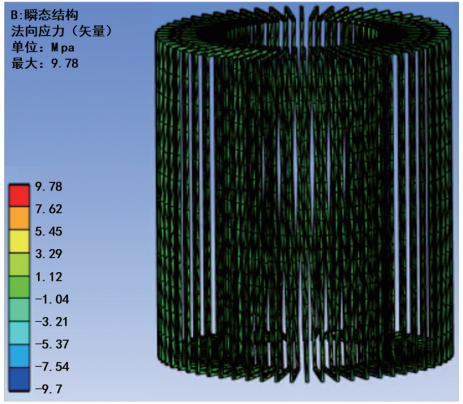


图 12 通入双脉冲电流时电抗器内部法向应力
Fig. 12 Normal stress inside the reactor during the double-pulse test current application

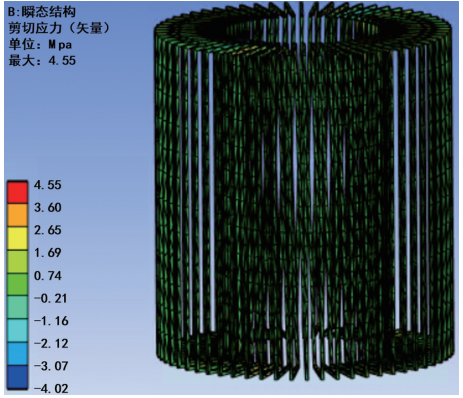


图 13 通入双脉冲电流时电抗器内部剪切应力
Fig. 13 Shear stress inside the reactor during the double-pulse test current application

过程中的最大变形量、最大法向应力、最大剪切应力与连接 A、B 端子的计算结果基本一致,远低于安全极限。

此外,电抗器样机在通入电流过程中的变形量、法向应力以及剪切应力均与双脉冲实验电流的最大值呈正相关关系。在通入最大值为 1 000 A 的双脉冲电流时,其变形量和应力水平均在安全范围内,表明其机械性能安全可靠。

因此,可以认为在通入最大值不大于 1 000 A 的双脉冲电流时,电抗器的机械性能始终安全可靠,鉴于绝大部分双脉冲实验电流最大值不高于 1 000 A,故可以认为该电抗器样机的机械强度可以满足绝大部分双脉冲实验。

4 环形电抗器在双脉冲测试平台中的应用

4.1 储能密度分析

储能密度是电抗器最重要的特性指标之一^[21],其计算公式为:

$$\mu = \frac{\frac{1}{2}LI^2}{V} \quad (15)$$

式中: μ 为环形电抗器的储能密度; I 为流过环形电抗器的电流,由外部电路决定; V 为环形电抗器的体积。对于此处的体积有 3 种不同的概念。一种概念是材料体积(不计内部空气,仅计算电抗器材料的体积)、空间体积(电抗器本体占用的空间体积)和等效体积(考虑电抗器周围磁场影响的体积)。

其中,等效体积最贴近实际应用。由于电抗器周围有较强磁场^[5],导致电抗器周围一定区域内器件和操作人员无法靠近^[22],因此引入等效体积。

本文采用等效体积,按照 ICNIRP 规定的磁感应强度阈值,计算电抗器储能密度。以连接环形电抗器 A、B 端子通入如图 9 电流为例,采用艾科思 GS-35 一体式高斯计对电抗器周围磁感应强度进行测量,测量结果为:在环形电抗器周围 610 mm 范围内,磁感应强度均^[23]超过 $6.25 \mu\text{T}$, $6.25 \mu\text{T}$ 为 ICNIRP 安全规定的临界值。建议操作人员保持安全距离,金属器件亦应避免靠近该区域。计算得出环形电抗器的等效体积 $V_1 = 0.951 \text{ m}^3$,最大储能密度 $\mu_1 = 157.729 \text{ J/m}^3$ 。

本文选用如图 14 所示电感值同为 $300 \mu\text{H}$ 的传统螺线管型电抗器,同样通入如图 9 电流作为对照实验。



图 14 电感值为 $300 \mu\text{H}$ 的传统螺线管型电抗器

Fig. 14 The traditional solenoid-type reactor with an inductance value of $300 \mu\text{H}$

采用艾科思 GS-35 一体式高斯计对电抗器周围磁感应强度进行测量,测量结果为:在螺线管形电抗器周围 1 861 mm 范围内,磁感应强度均超过 $6.25 \mu\text{T}$, $6.25 \mu\text{T}$ 为国际非电离辐射防护委员会(international commission on non-ionizing radiation protection, ICNIRP)的安全规定的临界值,其泄露磁场远比环形电抗器更大。建议操作人员保持安全距离,金属器件亦应避免靠近该区域。测得传统螺线管型电抗器的等效体积 $V_2 = 26.998 \text{ m}^3$,最大储能密度 $\mu_2 = 5.556 \text{ J/m}^3$ 。环形电抗器的最大储能密度约为传统螺线管型电抗器最大储能密度的 28.389 倍,远高于传统电抗器。体现了本文环形电抗器的高储能密度优点。

4.2 电抗器样机在双脉冲测试平台中的应用

试将电抗器样机应用于双脉冲测试平台,测试了其在 IGBT 动态特性测试中的性能。将 A、C 端子接入双脉冲电路所得波形如图 15 所示。

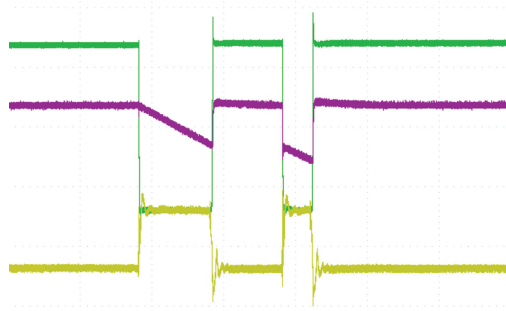


图 15 应用电抗器测得双脉冲实验波形

Fig. 15 Application of a reactor to measure dual-pulse experimental waveforms

再连接 A、B 端子,连接 B、C 端子应用电抗器,测得 IGBT 各开关动态参数均与厂商技术手册中的提供的参考数据相差不大,可以正确反映 IGBT 实际工况。结果表明,该电抗器样机可以应用在双脉冲测试平台中。

5 结 论

本文设计的环形空心电抗器通过其独特的结构,有效解决了传统电抗器在双脉冲测试中磁场泄漏严重的问题。实验和仿真结果表明,环形空心电抗器在高储能密度、低磁场泄漏、良好的绝缘性能、热稳定性和动稳定性方面表现出色。其采用的利兹线绕组形式进一步提高了测试精度,使其成为双脉冲测试平台紧凑化、小型化发展的重要技术手段。

在本文提出的双层线圈环形空心电抗器设计基础上,未来可以进一步探索更多层电抗器的设计与应用。通过进一步增加绕组的层数,多层电抗器能够提供更多的电感值选择,也在有限的空间内实现更高的储能密度。

参考文献

- [1] 杨芳,唐小亮,周亚兵,等.可调电抗器综述[J].广东电力,2021,34(1):21-29.
YANG F, TANG X L, ZHOU Y B, et al. Review of adjustable reactor [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1): 21-29.
- [2] 樊鑫茹.基于双脉冲测试的 IGBT 功率模块失效分析[D].西安;西安电子科技大学,2021.
FAN X R. Failure analysis of IGBT power module based on double pulse test [D]. Xi'an; Xidian University, 2021.
- [3] 缪金,秦军,费彬,等.基于辐照度分析的干式空心电抗器局部放电定位方法[J].广东电力,2024,37(3):

- 98-108.
- LIAO J, QIN J, FEI B, et al. Partial discharge localization method of dry-type air-core reactor based on irradiance analysis[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(3):98-108.
- [4] 韩释瑶, 崔翔, 侯彦明, 等. 环型空心电抗器瞬态电压分布特性的分析[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 413-421.
- HAN SH Y, CUI X, HOU Y M, et al. Distribution characteristics of transient voltage for toroidal air-core reactors[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 413-421.
- [5] 张明泽, 王炳杰, 张健, 等. 新型无环流空心电抗器电磁结构设计方法及工程应用[J]. *高电压技术*, 2024, 50(12):5301-5309.
- ZHANG M Z, WANG B J, ZHANG J, et al. Design method and engineering application of electromagnetic structure for novel non-circulating air-core reactor[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(12):5301-5309.
- [6] LI W, WANG T, WANG J, et al. Research on switching characteristics based on optimization design of SiC MOSFET drive circuit[J]. *Instrumentation*, 2024, 11(2): 64-71.
- [7] 徐英剑. 基于铝板屏蔽的共面式无线电能传输磁场泄露抑制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- XU Y J. Magnetic field leakage suppression study of coplanar wireless energy transmission based on aluminum plate shielding[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [8] 赵志刚, 刘朝阳, 贾慧杰, 等. 圆形利兹线绕组高频损耗三维快速计算模型[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(19):7901-7911.
- ZHAO ZH G, LIU CH Y, JIA H J, et al. Fast three-dimensional calculation mode for high frequency loss of circular Litz-wire windings [J], *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(19):7901-7911.
- [9] 邱智勇, 傅恺宁, 陈为. 环形电感磁场泄漏分析与改善[J]. *电源学报*, 2025, 23(4):360-368.
- QIU ZH Y, FU K N, CHEN W. Analysis and improvement of magnetic field leakage in toroidal inductor[J]. *Journal of Power Supply*, 2025, 23(4): 360-368.
- [10] 张浩. 压接型 IGBT 动态特性测试平台中高储能密度电感的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- ZHANG H. Research on high energy storage density inductors in press-pack IGBT dynamic characteristic test platform[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [11] 屠腾, 张方华, 张钊荣, 等. 基于矩阵磁结构的平面电感寄生电容优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(7):2825-2833.
- TU T, ZHANG F H, ZHANG ZH R, et al. Optimal design of parasitic capacitance based on matrix magnetics for planar inductor [J]. *Proceedings of CSEE*, 2024, 44(7): 2825-2833.
- [12] 李玉东, 王胜超, 王福豪, 等. 新型宽增益 LLC 谐振变换器的研究与设计[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(13): 38-47.
- LI Y D, WANG SH CH, WANG F H, et al. Research and design of a novel wide gain LLC resonant converter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(13):38-47.
- [13] 赵卫超, 焦超群, 张浩. 用于压接 IGBT 动态测试平台的高储能密度电感[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(1): 133-136.
- ZHAO W CH, JIAO CH Q, ZHANG H. High energy storage density inductor for crimping IGBT dynamic test platform[J], *Power Electronics*, 2021, 55(1):133-136.
- [14] 韩释瑶. 环型空心电抗器的宽频建模及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- HAN SH Y. Wideband modeling and application of toroidal air-core reactors [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [15] BARROS C A, MURALI P, SWAMINATHAN M, et al. Proposed inductor power loss metric and novel embedded toroidal inductor for integrated voltage regulators[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, 11(11): 1935-1947.
- [16] 薄强, 王丽芳, 张玉旺, 等. 无线充电系统实际 Litz 线绕平面线圈高频电阻分析与计算[J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(4):1-8.
- BO Q, WANG L F, ZHANG Y W, et al. Analysis and calculation of high frequency resistance in non-ideal Litz wire planar coils for wireless power transfer systems [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(4):1-8.
- [17] 周荣浩, 杨勇, 张庆, 等. 金属高频电阻及测量修正方法[J]. *大学物理*, 2020, 39(9):34-40.
- ZHOU R D, YANG Y, ZHANG Q, et al. Some thoughts regarding physics experimental courses at medical college based on student-centered teaching[J]. *College Physics*, 2020, 39(9):34-40.
- [18] 李文, 赵威, 王福谦. 计及边缘效应的平行板电容器单位长度电容的计算[J]. *数学的实践与认识*, 2023, 53(10):136-141.

- LI W, ZHAO W, WANG F Q. The calculation of capacitance per unit length of a parallel plate capacitor with edge effect [J]. Mathematics in practice and theory, 2023, 53(10): 136-141.
- [19] 杨黎, 陈意龙, 张月华, 等. 基于磁热耦合的超大容量干式空心限流电抗器金属结构件温度场研究及试验验证[J]. 变压器, 2025, 62(1): 35-40.
- YANG L, CHEN Y L, ZHANG Y H, et al. Research and experimental verification of temperature field of metal structure of ultra-large capacity dry-type air-core current-limiting reactor based on magnetic-thermal coupling[J]. Transformer, 2025, 62(1): 35-40.
- [20] 张旭飞, 张锋阳, 刘欣超, 等. 三轴标准振动台簧片解耦结构遗传算法多参数优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 167-176.
- ZHANG X F, ZHANG F Y, LIU X CH, et al. Multi-parameter optimization design for leaf-spring decoupling structure of tri-axial standard vibrator based on the genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 167-176.
- [21] HUANG W, LEHMAN B. Inversely coupled inductors with small volume and reduced power loss for switching converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 6779-6783.
- [22] 程佳君, 陈翰, 刘翔宇, 等. 基于通信频率的电磁波人体信道损耗与辐射安全分析研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(12): 173-180.
- CHENG J J, CHEN H, LIU X Y, et al. Research on body channel loss and radiation safety of electromagnetic wave based on communication frequency[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 173-180.
- [23] 康瑞, 郭彦青, 段志强, 等. 弧形永磁体外部磁场的均匀性分析[J]. 电子测量技术, 2024, 47(16): 1-7.
- KANG R, GUO Y Q, DUAN ZH Q, et al. Uniformity analysis of external magnetic field of curved permanent magnet[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(16): 1-7.

作者简介

穆杨琚, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁储能器件。

E-mail: 1960500283@qq.com

赵志斌(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为电磁场数值计算、高压大功率电力电子器件封装与测试。

E-mail: zhibinzhao@ncepu.edu.cn