

# 高频LLC谐振转换器中集成磁件的3D建模

Wayne. Water, Junwei

澳大利亚陆格里菲斯大学工程学院

**摘要:** 本文提出了一种磁集成平面变压器的新结构。这里介绍的变压器具有许多优点，是LLC谐振转换器的理想选择。通过控制磁棒到磁芯的距离，LLC电路所需谐振电感的调整非常简单。然而，它需要结合使用能量方法（由于绕组和插入磁棒的正交结构）而进行3D FEM仿真磁场分析。本文介绍了所设计的磁性元件的仿真结果。根据原型的测量结果，它们非常精确。为了优化谐振阻抗，我们已经研究了磁棒的不同插入配置。

**关键词:** LLC谐振转换器，DC-DC电源转换器，有限元方法，磁集成，平面变压器

## 1 简介

LLC 谐振转换器中有四个主要元件（如图 1 所示）：电感（谐振电感和磁化电感），谐振电容，开关和变压器。本文介绍的研究工作主要集中在磁性元件集成，它是专门用于电感器和变压器。通过磁性集成，组件总数量会减少，因而转换器系统可受益于总体量和制造成本的降低。

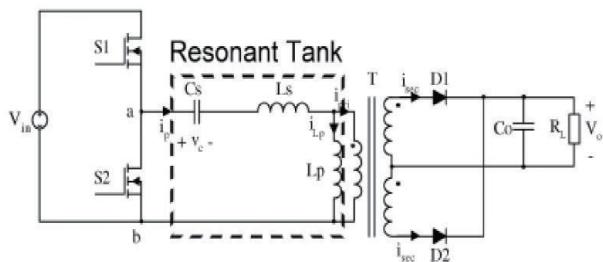


图 1 半桥 LLC 谐振电路

本文介绍了一种 EE 型磁芯平面变压器的结构。它具有低高度、紧凑和易于制造的优点。许多研究人员已经研究了磁集成 [1] - [6]。在 [3] 和他们以前的研究工作中，介绍了一些有趣的设计。通过在两个 E 型磁芯之间使用额外的 I 型磁性材料，这些设计大多采用磁性集成系统的 top-up 结构。参考文献 [4] 具有与 EER 磁芯设计类似的 top-up 结构。[5] 使用两个 C 磁芯，一个磁芯用作谐振电感，另一个磁芯用作变压器。此外，[6] 在变压器磁芯的窗口内有磁性插入。而由于三个主要原因，本文所介绍的设计比上述设计具有优势。首先，它利用变压器的现有空间来放置磁性插棒；其次，由于消除了谐振电感器所需的导线，传导损耗更少；最后，与变压器窗口区域中的磁性插棒相比，

谐振电感更易于控制。

## 2 设计方法

### 2.1 变压器结构

对于磁棒而言，引入的平面变压器的尺寸为  $53\text{mm} \times 38\text{mm} \times 17\text{mm}$  和  $36\text{mm} \times 8\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。磁棒位于原边和副边绕组之间（与磁芯距离为 1mm），原边由励磁线组成，副边为铜片。第一个原型的额定功率为 1kW，输出电压为 36V，额定输入电压为 216V（电压比为 18 : 3），谐振频率为 90kHz，电感比为 5，磁化电感为 175uH，谐振电感为 33uH。

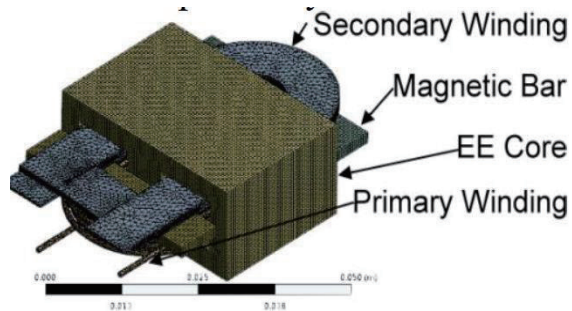


图 2 本文介绍的 LLC 变压器

### 2.2 数值计算和能量方法

采用基于有限元法（FEM）频域的数值方法被用于分析高频变压器的涡流和磁通分布。高频变压器的非线性磁场可由下列矢量势方程确定，其中 A 和 J 分别为磁矢量势和电流密度， $\nu$  为磁通量， $\sigma$  为电导率。能量函数由线性技术进行推导。

$$\nabla \times (\mathbf{i} \nabla \times \mathbf{A}) + \sigma (\partial \mathbf{A} / \partial t) = \mathbf{J}. \quad (1)$$

磁通法可用于简单结构的磁场分析 [7]。磁通法使用麦克斯韦方程组，该方程具有更高的准确度并预测频域中的磁性行为（考虑到 HF 电流效应）。然而，一旦磁结构更加复杂，能量方法是更好的解决方案，并且仍然提供可接受的结果 ([8]、[9])。储存在该区域的能量表示为 (2)，其中  $\mu$  是导磁率， $H$  是磁通强度， $I_p$  是原边绕组中的电流。

$$E_{Stored} = \frac{\mu}{2} \iiint H^2 dv = \frac{1}{2} L I_p^2 \quad (2)$$

### 3 仿真和测试结果

第一个原型是在磁棒和磁芯之间的距离为 1 毫米的情况下建立的，其中两个磁性元件的相对磁导率均为 120。使用 HP 4285A (75kHz 至 30MHz) 精密 LCR 测量仪获得测量结果，其中  $L_m$  为磁化电感， $L_{eq}$  是谐振电感（也称为漏电感）。表 1 中所示的比较结果表明，仿真和测量结果都与设计要求一致。

表 1 仿真和测试结果的电感验证

	$L_m$ (nH)	$L_{eq}$ (nH)
Design requirement	175	33
3D simulation result	175.83	33.04
Testing result at 90 kHz - 25 ° C	173.34	32.16

在短路条件和开路条件下的通量密度仿真结果如图 3 所示。结果表明，变压器在空载或重载情况下工作在饱和区域（在 25°C 时  $B_{sat}=450\text{mT}$ ）。另外，通过 3D 仿真，磁通量方向的可视化变得更容易（在我们的新颖结构中，2D 仿真无法实现这一点）。磁通方向图详见图 4，其中磁通以正交角从磁芯向磁棒循环。

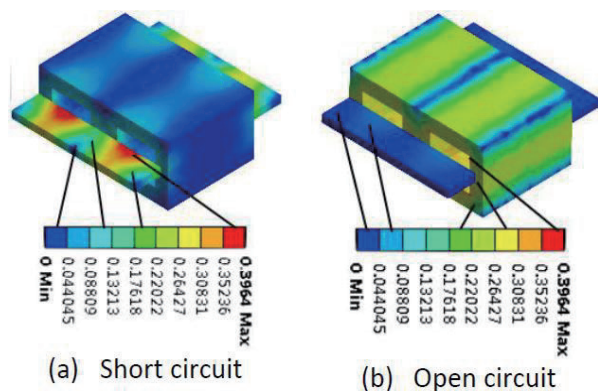


图 3 磁通量分布的 3D 仿真

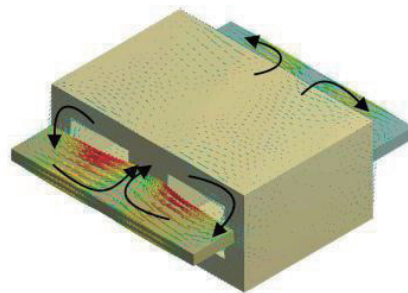


图 4 磁通方向的示意图

此外，表 2 显示了通过将磁棒置于绕组之间的窗口区域（插入穿过窗口，与所介绍的设计相比具有 90 度角）的不同配置之间的电感比较。通过使用相同尺寸的磁棒，系统可达到的最大  $L_{eq}$  值为 29.93uH。通过进一步将磁性插入的长度从 36 毫米增加到 50.4 毫米， $L_{eq}$  的增益仅为 5.03uH。相比之下，本文所介绍的设计的最大  $L_{eq}$  值为 108.736uH，而没有通过消除气隙（磁芯和插入之间），增加插入长度。

此外，涡流的仿真结果（将在全文中介绍）表明，如果原边绕组有多个叠层，那么一旦磁芯插入磁芯窗口内，则会导致更严重的邻近效应。峰值电流密度是没有磁性插入情况下的两倍。另一方面，这里介绍的设计对当前的分布影响不大。设计的唯一缺点是在原型制造之前需要重复的仿真工作和设计过程。这是因为  $L_m$  随着气隙距离的每次调整而变化。但是，随着最近计算能力的提高，这已经不成问题。

表 2 不同配置的磁棒插入装置之间的电感比较

	$L_m$ (uH)	$L_{eq}$ (uH)
No insertion	175.67	12.99
Insertion inside of core	175.81	29.93
Insertion outside of core	175.90	19.93
Insertion length increased to 50.4 mm	175.84	34.96

### 参考文献

- [1] C. Deng, D. Xu, Y. Zhang, Y. Chen, Y. Okuma and K. Mino, "Impact of dielectric material on passive integration in LLC resonant converter," Power Electronics Specialists