

文章编号:1000-582X(2007)06-0021-04

基于软件集成平台的平面变压器优化设计

陆治国,舒畅,林风

(重庆大学电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:针对平面变压器绕组特殊结构,提出了一种基于 iSIGHT 软件集成平台的平面变压器优化设计方法。将电磁仿真软件 Maxwell 3D 和电路仿真软件 Saber 通过优化软件 iSIGHT 进行集成,研究了平面变压器的寄生效应,通过改变平面变压器原边与副边绕组之间的绝缘层厚度,调节绕组各寄生参数的大小,实现了降低危及开关安全运行的电压尖峰,改善开关电源的性能,最终获得平面变压器的最优设计,并通过仿真分析来验证理论分析的正确性。

关键词:平面变压器;寄生参数;iSIGHT 软件;优化设计

中图分类号:TM433

文献标志码:A

采用传统变压器的开关电源在向高功率密度和低造型方向发展时暴露出诸多限制。为了提高功率密度,就得提高变换器的开关频率,从而减小电路中无源元件的体积。但是对于传统绕线式变压器,当开关频率高于 100 kHz 时,变压器圆铜线的高频效应(主要为集肤效应和邻近效应)越来越显著,增加了变压器的损耗。为了削弱高频效应,可采用低造型铁芯以及印刷电路板平面绕组制作而成的平面变压器^[1]。

与传统绕线式变压器相比,平面变压器具有相当多优点,例如低造型,良好的散热特性,漏感小,可实现特性重现等等。然而,当开关频率高达数百千赫兹甚至大于 1 MHz 时,平面变压器同样受到诸如集肤效应和邻近效应等高频效应的影响。这些高频效应产生的交流电阻、漏感以及分布电容,增大了开关电源的损耗^[2],其中漏感和分布电容释放储能时产生危及功率开关安全运行的电压尖峰,降低了开关电源的性能,此外由于减小漏感与减小分布电容的要求相矛盾^[3],因此平面变压器的优化设计必须考虑所有寄生参数的影响。

1 平面变压器模型

1.1 平面变压器结构

平面变压器结构与传统变压器不一样。传统变压

器是在一般的铁氧体铁芯上套上绕有漆包线骨架的线圈,而平面变压器没有漆包线绕组,而是将扁平的连续铜质螺旋线腐蚀刻在敷铜薄膜材料(大多为 PCB 基材)上,或采用铜箔,然后叠放在铁芯上,其典型结构如图 1 所示。

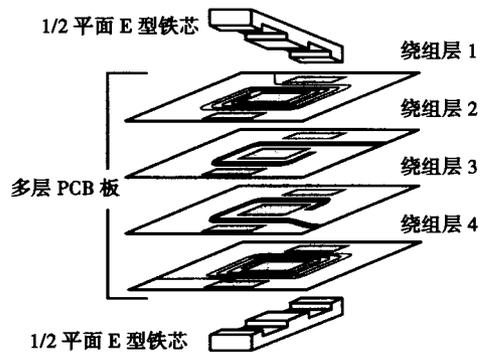


图 1 平面变压器的典型结构图

1.2 平面变压器寄生参数

随着工作频率升高,高频电流在线圈中流通产生严重的高频效应,产生的寄生参数大大降低了开关电源电路的性能,效率下降,产生电压尖峰、寄生振荡和电磁干扰等。为此,选择了综合考虑励磁电感、漏感、损耗和分布电容的变压器等效电路^[4],如图 2 所示。

收稿日期:2007-02-04。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59777021)。

作者简介:陆治国(1964-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事集成电力电子技术建模与仿真,电力电子变换器的数字控制技术研究(Tel)023-65112638;(E-mail)zglu2000@yahoo.com.cn。

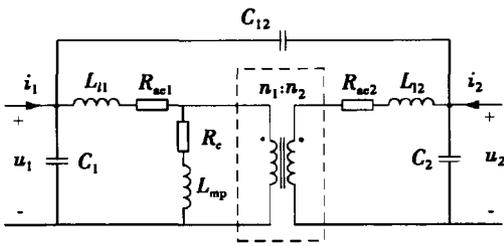


图2 变压器的等效电路图

由于工作频率高,变压器寄生参数在电路特性中起着重要的作用。存储在分布电容和漏感中的能量,在开关切换期间有可能产生损坏开关器件的高电压尖峰。这些尖峰在元件上引起的动态功率损耗和过大的应力,即为损坏器件的根源,平面变压器的设计优化目标即为尽量减小开关两端电压峰值。所以在平面变压器优化设计中,应该综合分析变压器的寄生参数,包括交流电阻、漏感及分布电容。

1.3 寄生参数计算

设计选用 Ansoft 公司的 Maxwell 3D 软件^[5]对平面变压器进行涡流场和静电场的仿真研究,求解出变压器各寄生参数,建立等效电路,以便对变压器进行优化。建立的平面变压器3D仿真模型如图3所示。

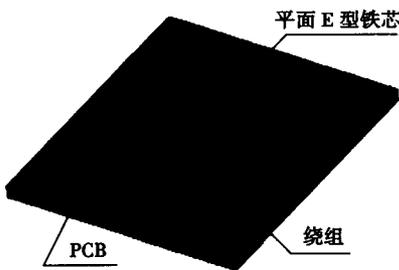


图3 Maxwell 3D 建立的平面变压器模型

首先对 Maxwell 3D 平面变压器模型进行涡流场仿真,就会得到一个阻抗矩阵 Z ,即是多导体系统交变电压和交变电流关系的综合,可以用下式表示:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

$$Z = \begin{bmatrix} R_{11} + sL_{11} & R_{12} + sL_{12} \\ R_{12} + sL_{12} & R_{22} + sL_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由于 Maxwell 3D 涡流场分析不考虑分布电容的效应,便可从阻抗矩阵 Z 中提取出如图4所示的所有寄生元件的参数值。

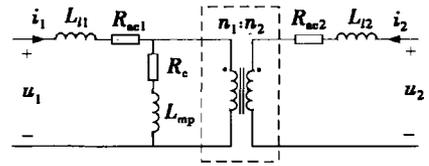


图4 涡流场仿真的变压器等效电路

图4中的阻抗矩阵 Z 可以表示为:

$$Z =$$

$$\begin{bmatrix} R_{ac1} + R_c + s(L_{l1} + L_{mp}) & \frac{n_2}{n_1}(R_c + sL_{mp}) \\ \frac{n_2}{n_1}(R_c + sL_{mp}) & R_{ac2} + \frac{n_2^2}{n_1^2}R_c + s\left(L_{l2} + \frac{n_2^2}{n_1^2}L_{mp}\right) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(2)与式(3)相等,可以得到图4中所有寄生元件的参数值如下:

$$R_c = \frac{n_1}{n_2}R_{12}, L_{mp} = \frac{n_1}{n_2}L_{12};$$

$$R_{ac1} = R_{11} - \frac{n_1}{n_2}R_{12}, L_{l1} = L_{11} - \frac{n_1}{n_2}L_{12};$$

$$R_{ac2} = R_{22} - \frac{n_2}{n_1}R_{12}, L_{l2} = L_{22} - \frac{n_2}{n_1}L_{12}.$$

然后对 Maxwell 3D 平面变压器模型进行静电场仿真,就会得到如式(4)所示的 2×2 维分布电容矩阵,便可从中提取出图2中的3个分布电容的参数值。最终便可求解出平面变压器所有寄生参数,得到完整的平面变压器等效电路模型。

$$C = \begin{bmatrix} C_1 + C_{12} & -C_{12} \\ -C_{12} & C_2 + C_{12} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2 平面变压器优化

平面变压器设计优化将以 iSIGHT 软件集成平台为核心,集成 Maxwell 3D 和电路仿真软件 Saber,用以综合分析平面变压器高频寄生参数对变换器电路暂态性能的影响,并采取有效方法尽可能地削弱寄生效应,找寻漏感与分布电容之间的平衡,尽可能减小因储能释放产生危及开关器件安全运行的电压尖峰,进而获得平面变压器的最优化设计。

iSIGHT^[6]可自动实现 Maxwell 3D 与 Saber 软件之间的数据互换,通过按一定的算法改变设计变量,监控该2个软件运行,分析优化运行结果,最终从中提取出平面变压器设计的最优项。图5显示了 iSIGHT 集成优化的过程,首先对平面变压器模型进行 Maxwell 3D 涡流场和静电场仿真,从结果中计算提取变压器各寄生参数;接着根据将新提取的寄生参数更改 Saber

软件中的平面变压器等效电路,仿真分析整个变换器电路,测量开关元件两端电压的峰值,由此 iSIGHT 完成一次迭代。完成一次迭代后, iSIGHT 按照设置的优化算法改变平面变压器原边与副边绕组之间的绝缘层厚度(初始值设为 0.4 mm),开始新一轮的迭代,直至获得开关元件两端电压峰值最小的变压器最优设计。

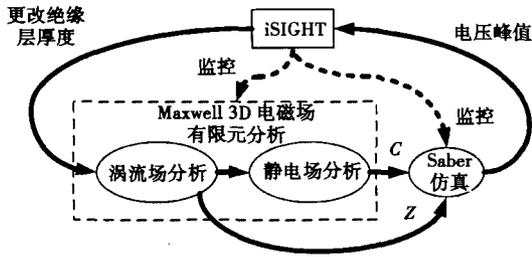


图5 iSIGHT 集成优化流程图

3 平面变压器设计优化结果

为了验证平面变压器设计优化方法的可行性和可靠性,将初步完成的平面变压器设计用于单端正激 DC-DC 变换器,变换器电路图如图 6 所示,图中虚线部分变压器模型采用如图 2 所示的变压器等效电路。

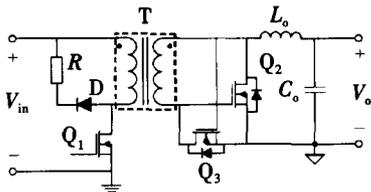


图6 单端正激同步整流 DC-DC 变换器电路图

以手动方式对平面变压器模型及变换器电路进行一次 Maxwell 3D 和 Saber 仿真后,便可着手创建 iSIGHT 监控这 2 个软件运行的控制脚本文件。集成了 Maxwell 3D 和 Saber 软件后, iSIGHT 依照该脚本文件自动对平面变压器进行仿真迭代,参数优化分析。在该设计中,平面变压器的优化只选择单个设计变量,即变压器原边与副边绕组的绝缘层厚度,以变换器电路开关器件 Q₁ 两端的电压峰值 V_{Q1} 最小化为优化目标。不同的绝缘层厚度产生不同的变压器漏感和分布电容,漏感和分布电容在开关关断期间释放储能,在开关器件 Q₁ 两端产生不同的电压峰值。多次迭代后, iSIGHT 便可从多个迭代结果中选择出电压峰值最小的最优平面变压器设计。

图 7 显示了 iSIGHT 集成软件的过程。图中 mands

即为 iSIGHT 迭代任务的名称。经过 Maxwell 3D 涡流场仿真复位(recover1)后,迭代任务 mands 首先进行 Maxwell 3D 涡流场仿真(eddy),结束时从结果中提取平面变压器的交流电阻和漏感等寄生参数(RL),接着进行 Maxwell 3D 静电场仿真复位(recover2)及仿真分析(elec),提取平面变压器的分布电容 C,最后根据新提取的一系列寄生参数更改 Saber 软件中的平面变压器等效电路,仿真分析整个变换器电路(saber),测量出开关元件两端电压的峰值,由此 iSIGHT 完成一次迭代。然后 iSIGHT 重新定义绝缘层厚度,开始新一轮的迭代。

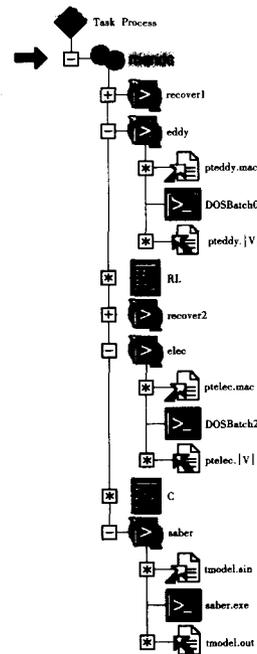


图7 iSIGHT 集成过程

经过 N 次迭代后的结果如图 8 所示,从中便可获得开关器件 Q₁ 电压峰值最低的最优平面变压器设计。从图 8(a)中可清楚地看出不同的绝缘层改变厚度值 Δd、分布电容 C 与漏感 L 的变化是相反的。通过定义开关器件电压峰值最小的优化目标, iSIGHT 寻找出了实现该优化目标的最佳绝缘层厚度,如图 8(b)所示。从图中可清楚地看出, iSIGHT 第 21 次迭代的绝缘层厚度即为实现开关器件电压峰值最小 147.51 V 的优化目标的最佳绝缘层厚度,该次迭代的绝缘层改变的厚度 Δd 为 0.581 mm,所以原副边绕组间的绝缘层厚度为 0.981 mm。表 1 列出了第 21 次迭代得出的平面变压器寄生元件的参数值。

表1 寄生元件的参数值

寄生参数	R _c /mΩ	L _{mp} /μH	R _{ac1} /mΩ	L _{l1} /μH	R _{ac2} /mΩ	L _{l2} /μH	C ₁ /nF	C ₂ /nF	C ₁₂ /nF
取值	10.744	372.505	15.888	0.133	1.323	0.007	0.016	0.002	0.027

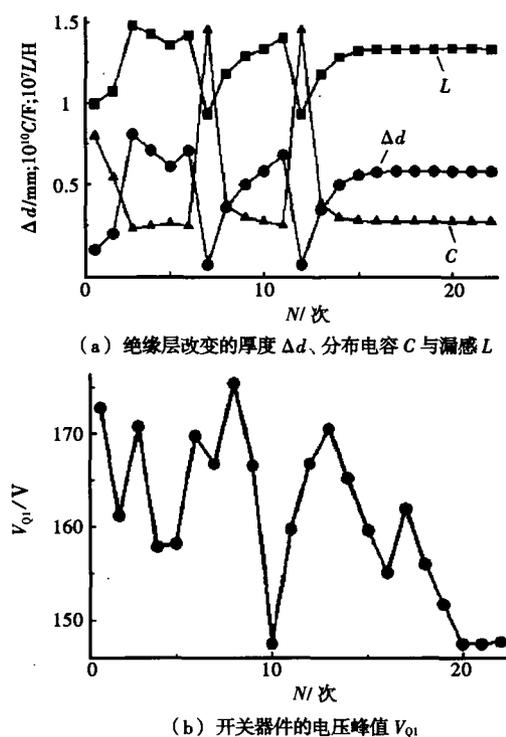


图8 iSIGHT 的迭代结果

4 结论

在综合分析已有的各种平面变压器寄生效应研究的基础上,提出了一种基于 iSIGHT 软件的平面变压器优化设计方法,将 Maxwell 3D 和 Saber 软件与 iSIGHT 集成,用以综合分析变压器的寄生效应。通过改变变

压器原边与副边绕组的绝缘层厚度,调节各寄生参数的大小,最大限度地降低寄生效应对电源性能的影响,从而达到优化平面变压器设计的目的。

提出的平面变压器优化设计能够大大缩短设计周期与提高设计质量,也能应用于其他电力电子磁性器件的优化设计中。

参考文献:

- [1] QUINN C, RINNE K, O'DONNELL T, et al. A review of planar magnetic techniques and technologies [J]. IEEE APEC, 2001, 1(2): 1175-1183.
- [2] HAN Y T, EBERLE W, LIU Y F. New measurement methods to characterize transformer core loss and copper loss in high frequency switching mode power supplies [J]. IEEE PESC, 2004, 2(6): 1695-1701.
- [3] ACKERMANN B, LEWALTER A, WAFFENSCHMIDT E. Analytical modelling of winding capacitances and dielectric losses for planar transformers [J]. IEEE Computers in Power Electronics, 2004, 1(8): 2-9.
- [4] 杨玉岗. 现代电力电子的磁技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [5] CHEN W, FENG L M, CHEN H L, et al. Analysis the inductive coupling effects on the differential mode EMI in power converter [J]. IEEE APEC, 2006, 21(3): 1169-1173.
- [6] 耿建光. 工程系统过程集成和设计优化——iSIGHT 中的过程集成与设计自动化 [J]. 军民两用技术与产品, 2002, 15(11): 45-48.

Optimizing Design of Planar Transformers Based on Integrated Software Platform

LU Zhi-guo, SHU Chang, LIN Feng

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A method of optimizing planar transformers' design based on integrated software platform iSIGHT is presented. Through integrating the circuit simulation tool Saber and Maxwell 3D to the optimization tool iSIGHT, the parasitic effects on planar transformers are studied carefully. Changing the thickness of the insulator layer between the primary and the secondary can obtain different values of parasitic parameters and a new method to avoid parasitic oscillations with dangerous high voltage spikes to improve the SMPS performance is established. Hence an optimal design of planar transformer is obtained. The final optimal simulation analysis results verify the correctness of above theoretical study.

Key words: planar transformer; parasitic parameters; iSIGHT; optimizing design

(编辑 李胜春)