文章编号：1672-2892(2011)05-0651-04

LLC变换器PSPICE仿真的收敛性及参数优化

刘海成

(信息工程大学 信息工程学院，河南 郑州 450002)

摘 要：针对LLC变换器使用PSPICE仿真器进行DC分析和瞬态分析时经常遇到不收敛的问题进行实验，列出了5种有效改进方法。比较了LLC谐振变换器3个参数优化设计的各种方案，提出并验证了运用PSPICE进行多参数优化设计的方法。实验表明，合理运用PSPICE，在谐振开关电源设计中常常会取得比其他方法(软件)更令人满意的效果。

关键词：LLC谐振变换器；PSPICE仿真；收敛；参数优化

中图分类号：TN86 **文献标识码**：A

Convergence of PSPICE simulation and optimization design for LLC resonant converter

LIU Hai-cheng

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: Study of high frequency switching power has focused on Inductor-Inductor-Capacitor(LLC) resonant converter recently, and simulation with Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis(PSPICE) for switching power has become an important computer-aided analysis and design measure. To solve the non-convergence problems encountered in using the PSPICE simulator for switching power DC analysis and transient analysis, experiments were carried out on how to improve the convergence problem about the LLC PSPICE circuit simulation. Five improved effective methods were listed. Various programs proposed for the design optimization of three parameters of the LLC resonant converter were compared, and the multi-parameter optimization method using PSPICE was presented and validated. Experiments results show that the reasonable use of PSPICE can obtain more satisfactory results than using other methods (software) in the design of switching power supply.

Key words: LLC resonant converter; PSPICE simulation; convergence; optimization design

LLC串联谐振变换器由于结构简单、效率高、输入范围宽等优点，近几年得到了快速发展，受到了国内外学者的普遍关注[1-5]。但是谐振变换器需调整参数较多，参数选择范围大，使得该类变换器的设计和调试工作复杂而耗时，利用计算机进行辅助设计已成为开关电源电路分析和设计的主要手段。在现有仿真软件中(如PSPICE,MATLAB,EWB,Protel,SABER,SIMPLIS等)，PSPICE凭借其强大的运算能力、简便的绘图功能、可视化的仿真环境以及丰富的算法工具箱，成为开关电源电路分析和设计的有力工具，应用广泛。但是在开关电源的PSPICE仿真中，存在电路设计完全正确，却无法得到仿真结果的情况[6-9]，即程序不收敛的问题。该问题是执行仿真中最难解决的问题之一。文献[6]就此问题提供了一些解决方法，在实际应用中效果较好，但在仿真开关电源主回路时，尤其是含有变压器模型时，仍不能很好地避免不收敛现象的发生。本文就此问题进行了探讨，并结合仿真结果，就LLC变换器3个主要参数的优化选择进行了讨论。

1 LLC谐振变换器的原理及参数设计

串联型LLC谐振变换器的原理图如图1所示。在变压器原边，主开关S_1和S_2构成1个半桥型结构，串联谐振电感L_r、串联谐振电容C_r和并联谐振电感L_m构成LLC谐振网络。由于谐振电路连接在半桥的中点，因此谐

收稿日期：2010-11-11；修回日期：2011-02-09

振电容 C_r 同时起到隔直的作用。在变压器副边，由整流二极管 D_3 和 D_4 组成具有中间抽头的全波整流电路。在串联型 LLC 谐振变换器中，产生 2 个谐振频率 f_{r1} 和 f_{r2}：

$$f_{r1}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_rC_r}},\quad f_{r2}=\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r+L_m)C_r}}$$

f_{r1} 由 L_r 和 C_r 谐振决定，此时 L_m 两端电压被输出电压箝位，不参与谐振；f_{r2} 由 L_m,L_r 和 C_r 决定。设计中通常使变换器工作频率在 $f_{r2}\leqslant f\leqslant f_{r1}$ 范围内，随着负载加大，工作频率会增大。变换器功率开关管实现零电压开关(Zero Voltage Switching, ZVS)，且输出整流二极管零电流关断，不存在反向恢复问题。

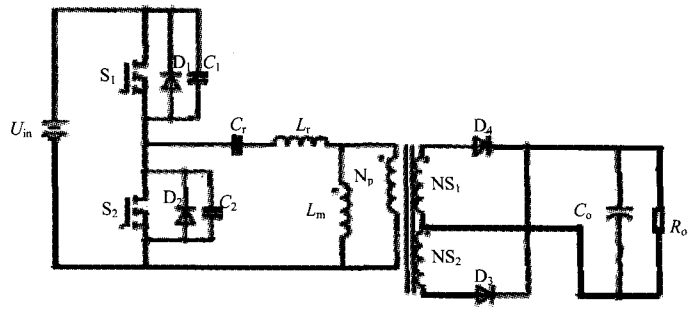


Fig.1 Architecture of LLC resonant converter
图 1 串联型 LLC 谐振变换器结构

本文中 LLC 谐振变换器要求如下：输入直流 U_{in}=270 V~230 V，输出直流 U_o=48 V，电流 I_o=20 A，纹波系数<1%，(输入稳定度和负载稳定度指标略)。按照 LLC 变换器设计步骤[9]，考虑输出整流二极管导通压降，假设 U_f=1 V，则主回路变压器变比为 $n=\frac{U_{in_min}}{U_o+U_f}D$，此处 $U_{in_min}=270$ V，D 为占空比，取 D=0.5，则 n=2.7，开关频率选择为 $f_{r1}=100$ kHz，设 $k=\frac{L_m}{L_r}$，$L_{rm}=L_r+L_m$，LLC 电路参数选择的关键就是要保证在全范围的输入电压的情况下，电路从空载到满载都能工作在 ZVS 状态下。LLC 谐振变换器的设计主要围绕 3 个参数——变压器变比 n、谐振网络的品质因数 Q、励磁电感与串联谐振电感的比值 k 进行的。

次级折算到初级的等效电阻为 $R_e=\frac{8n^2(U_o+U_f)}{\pi^2I_o}=14.477\ \text{k}\Omega$。

采用基波近似法[9]，变换器在正常输入且满载时为满足电压增益为 1，需 $\frac{f_{r1}}{f_{r2}}=\sqrt{1+k}$，以负载获得最大功率为设计条件时，回路品质因数 $Q=\frac{2\pi f_{r1}L_r}{R_e}=\frac{f_{r1}}{f_{r2}(1+\frac{1}{k})}=\frac{k}{\sqrt{k+1}}$，取 k=4，则 $Q_L=1.789$，$C_r=\frac{Q_L}{2\pi f_{r2}R_e}=0.44\ \mu\text{F}$，

$L_{rm}=\frac{R_e}{2\pi f_{r2}Q_L}=28.7\ \mu\text{H}$，$L_r=\frac{1}{k+1}L_{rm}=5.63\ \mu\text{H}$，$L_m=\frac{k}{1+k}L_{rm}=22.96\ \mu\text{H}$。

2 LLC 谐振变换器的仿真及收敛注意事项

据此可以建立 LLC 变换器的 PSPICE 仿真模型，如图 2 所示。

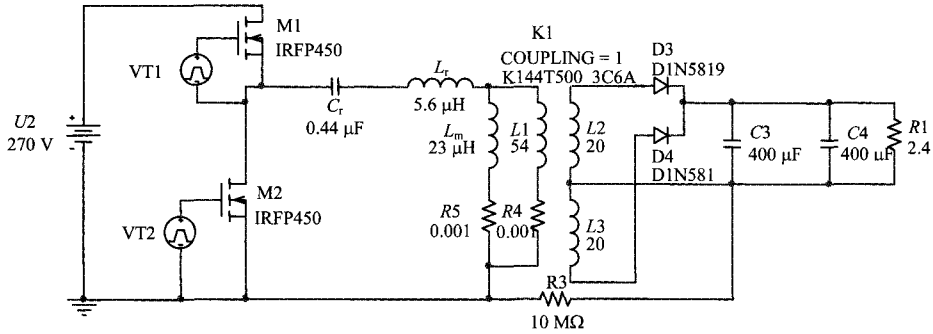


Fig.2 PSPICE model of LLC resonant converter
图 2 LLC 变换器的 PSPICE 仿真模型

为使仿真收敛，需要注意以下事项：

1) 模型正确。直接使用 POWERMOSFET 厂家的 PSPICE 模型，或采用参数相近的 PSPICE 库中的参数，或修改现有模型参数。

2) 注意不要形成变压器和/或电感回路，若有可能，可以适当增加小电阻与电感串联(如图 2 在 L1,Lm 上串电阻 R4,R5)。

3) 修改变压器磁芯模型与实际相符。如上图中变压器采用的非线性磁芯 K144T500_3C6A，其模型为.model K144T500_3C8 ako:K3C8 CORE(Area=2.13 Path=16.5)，要特别注意修改参数 Area 和 Path，必要时可以利用模型编辑器(PSPICE MODEL EDITOR)对非线性磁芯的磁滞回线(B-H 回线)进行修改，提取 Jiles-Atherton 参数，根据参数选取所需要的磁芯[7-8]。

4) 适当设置初值，调整开关频率。

5) 修改性能分析参数。如迭代次数 ITL4；修改迭代精度 RELTOL：设置计算电压和电流时的相对精度，内定值为 0.001%；VNTOL：设置计算电压时的精度，内定值为 1.0 V；ABSTOL：设置计算电流时的精度，内定值为 1.0 pA；CHGTOI：设置计算电荷时的精度，内定值为 0.01 pC。如果电路的主要参数是电压，可适当增大电压绝对精度 VNTOL 项；如果电路主要参数是电流，可适当增大电流绝对精度 ABST0I 项；如果计算参数中电压和电流混合，则可增大 2 个绝对精度或增大电压电流相对精度 RELTOL 项[6]。

一般经过以上修改，多数电路都可顺利进行仿真。仿真波形如图 3。

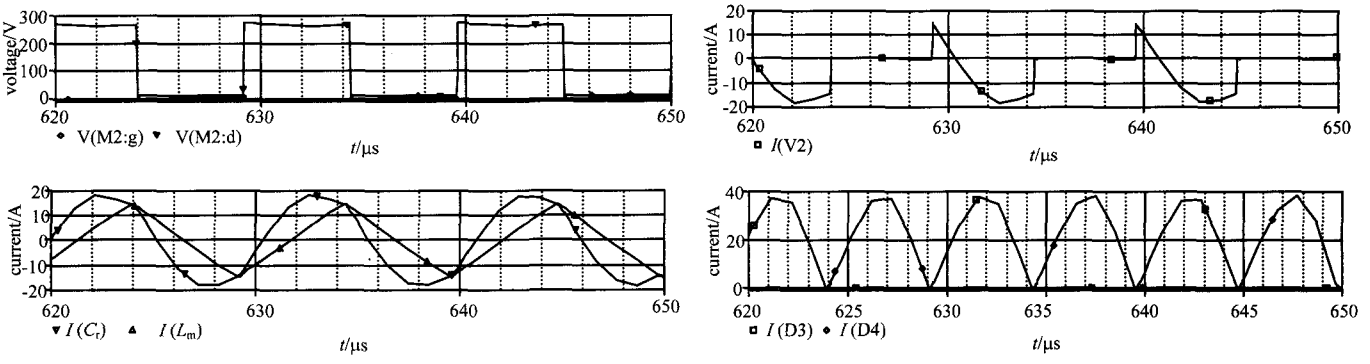


Fig.3 Simulation waveform of LLC resonant converter
图 3 LLC 谐振变换器仿真波形

3　LLC 谐振变换器的参数优化

借助仿真工具，对 LLC 谐振变换器进行时域范围内的仿真，可较为精确和直观地反映出变换器的特性，能够设计出可行的方案，但是变换器的 3 个变量 LLC 怎样合理组合才是最优的，目前还没有特别成熟的方法。文献[9]给出了一种采用实验和仿真结果建立基于 Matlab 环境下的开关电源神经网络模型的方法，以及利用该非线性神经网络模型结合遗传算法理论对开关电源的电路参数进行优化设计的方法；文献[5,10]分别给出了结合模型计算，从不同角度进行优化设计的方法。采用神经网络进行建模，可以很好与遗传算法结合，便于 Matlab 仿真，但神经网络的模型与 PSPICE 仿真模型还是有一定出入的，因此其优化结果只具有理论指导意义。基于公式推导的模型，主要是基于基波的分析方法，在工作频率偏离谐振频率较大时，计算结果与实际出入也较大。还有就是用 PSPICE 的仿真结果，再结合遗传算法进行优化设计，此种方法需要将仿真结果从 PSPICE 输出后导入 Matlab 才能运行。

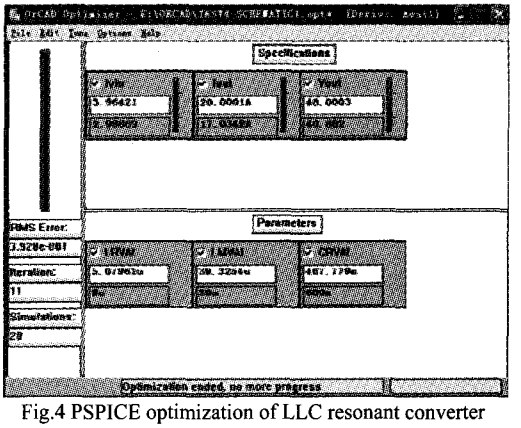


Fig.4 PSPICE optimization of LLC resonant converter
图 4 LLC 变换器的 PSPICE 优化结果

图 4 为 PSPICE Optimizer 优化结果的截图。PSPICE 自带的优化工具 Optimizer 的优化设计，需在电路原理图中放置优化卡 optimizer parameters，设置好待优化的参数，运行 CAPTURE\PSPICE\RUN Optimizer 命令，设定优化指标，运行 Optimizer parameters\tune\Update performance 命令可得相应结果。

特别需要注意待优化参数值的设置要加{}，比如 C_r 的值应设为{CrVal}，而不是 CrVal。图 4 中，初始值为 $L_r=8\,\mu H$, $L_m=30\,\mu H$, $C_r=660\,nF$，优化指标为变换器的效率最高，此处作了一个转换，即 270 V 输入直流电压源电流最小，约束条件为输出电压 48 V，输出电流不小于 20 A，优化后的结果为 $L_r=5.0796\,\mu H$, $L_m=39.3254\,\mu H$,

$C_r = 467.779\,\text{nF}$，可以看出，完全满足设计指标。优化设计后电路的仿真波形如图 5 所示，可以看出，输入电流 I(V2)比优化前有明显减小。

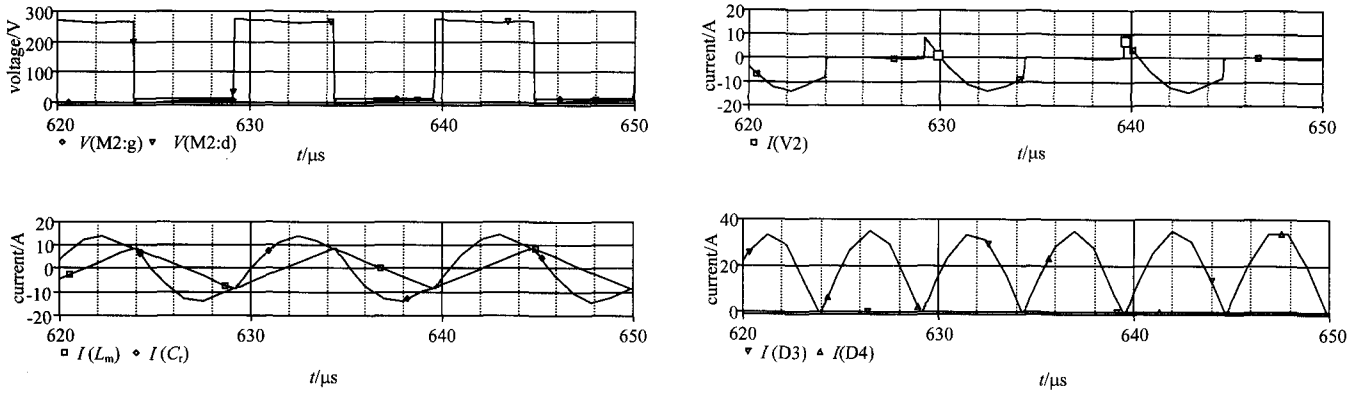


Fig.5 Simulation waveform of LLC resonant converter after optimization
图 5 优化后 LLC 谐振变换器仿真波形

4 结论

对于 LLC 谐振变换器进行分析和设计，借助于 PSPICE 仿真避免了繁杂的电磁计算，结果比较直观，可缩短产品开发周期，降低产品成本。只要使用时注意有关事项，瞬态分析的不收敛是可以避免的。借助 PSPICE Optimizer 实现多参数的优化问题，与其他方法相比具有简便快捷，与实际设计逼近较好的特点。随着 PSPICE 功能的进一步完善，它将会适用于更多领域。

参考文献：

[1] Yang Bo,Lee C Fred,Zhang A J,et al. LLC resonant converter for front end DC/DC conversion[C]// IEEE APEC. Dallas:[s.n.], 2002,2:1108-1112.
[2] Liu Rui,Lee C Q,Upadhyay A K. The LLC-type series resonant converter-variable switching frequency control[C]// Proceedings of IEEE 32nd Midwest symposium on circuits and systems. Urbana:[s.n.], 1989:509-512.
[3] Liu Rui,Lee C Q. Analysis and Design of the LLC-type series resonant converter[J]. Electronics Letters, 1988,24(24): 1510-1511.
[4] 陆治国,余昌斌. 新型 LLC 谐振变换器的分析与设计[J]. 电气应用, 2008,27(1):65-68.
[5] 陈伟,王志强. 半桥 LLC 谐振变换器稳态建模及分析[J]. 通信电源技术, 2008,25(4):40-43.
[6] 吴少琴,宋宁. PSPICE 仿真中收敛问题研究[J]. 现代电子技术, 2008,20:24-26.
[7] 张东辉,严萍,高迎慧,等. PSPICE 电路仿真中变压器模型的使用[J]. 电气应用, 2007,26(1):21-26.
[8] 贾新章. ORCAD/PSPICE 9 实用教程[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000.
[9] 余明扬,蒋新华,王莉,等. 开关电源的建模与优化设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(2):165-169.
[10] 黄志武,秦惠. SABER 仿真在 LLC 谐振变换器开发与设计中的应用[J]. 通信电源技术, 2008,25(2):74-77.

作者简介：



刘海成(1966-)，男，河南省巩义市人，硕士，副教授，主要研究方向为高频功率电子学、人工神经网络、模拟电路故障诊断等.email:liuhaichengzz@126.com.