

一种 LLC 谐振式软开关高频变换器 研究与实现

马 昭, 刘 浩

(西安航空学院 电子工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 该文对 LLC 谐振式高频变换器拓扑结构进行分析, 详细推导了传统的 LLC 谐振式变换器的直流电压增益模型, 提出了考虑高频变压器寄生参数和谐振电感寄生参数的优化改进方法, 建立数学模型分析得到了更为精确的直流电压增益模型, 进一步得到了传统增益曲线和改进后直流增益曲线对比图。以提出的改进增益模型为基础, 对谐振网络归一化电感比 K 和品质因数 Q 进行详细设计, 并得到了谐振槽参数的计算方法。该文还对 LLC 谐振变换器的硬件结构进行介绍, 根据 LLC 谐振变换器的指标, 最终搭建了硬件试验平台。试验结果表明, 该 LLC 谐振式软开关高频变换器参数设计能够实现开关网络的零电压开通、整流网络零电流关断软开关功能。

关键词: 谐振式; 软开关; 变换器; 全桥

中图分类号: TM46

文章编号: 1000-0682(2024)01-0009-04

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.002

Research and implementation of LLC resonant soft switching high-frequency converter

MA Zhao, LIU Hao

(Xi'an Aeronautical University, School of Electronic Engineering, Shaanxi Xi'an 710077, China)

Abstract: In this paper, the topology of LLC resonant high frequency converter is analyzed, the traditional DC voltage gain model is derived, and an improved method considering parasitic parameters of high frequency transformer and resonant inductor is proposed, a more accurate DC voltage gain model is obtained. Based on the proposed optimal gain model, the parameters of the resonant slot are calculated in detail. The simulation model is built by simulation software, and the theory is verified by simulation. Finally, the hardware test platform is built. The results show that the LLC resonant soft-switching high-frequency converter can realize soft-switching, and has the characteristics of high precision voltage-stabilized output and high efficiency.

Keywords: resonant; soft switching; high frequency converter; full bridge

0 引言

开关变换器频率增加, 开关电源的占地面积和容量将会减少, 因此增加功率密度、降低、减小功率

损耗以此来达到对开关电源的优化管理。但随着信息时代的进展, 谐振变换器顺应了对频率变换器的高频、高效、高永磁同步电动机比、高可靠性的需求。在宽输入电压和全负载范围内, LLC 谐振变换器可以实现变压器原边 MOS 开关管零电压开通 (ZVS) 和副边整流二极管零电流关断 (ZCS)。其次 LLC 谐振开关变换器又兼有空载工作能力及允许输入电压范围较宽的特点, 所以仅需一个谐振电容及变压器即可实现 LLC 拓扑谐振过程, 可进一步提高功率密

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目 (21JK0704)

第一作者: 马昭 (1990—), 男, 讲师, 研究方向为电力电子技术及应用。E-mail: 576772378@qq.com

度^[1]。此外,采用软磁材料制作的电感元件,使得整个电路具有良好的高频特性,从而保证变换器的高转换效率。传统 LLC 谐振式变换器在建立数学模型时不考虑寄生参数影响,进行控制参数设计时不能达到最优,变换器的性能往往会受到制约。

1 LLC 谐振变换器的拓扑结构

全桥 LLC 谐振变换器的拓扑结构如图 1 所示^[2]。主要组成:输入电压源 V_{in} ;开关器件 S_1, S_2, S_3 和 S_4 ;开关管 MOSFET 的输出电容 $C_{ds1}, C_{ds2}, C_{ds3}$ 和 C_{ds4} 构成的寄生电容及开关器件的体二极管;谐振电容 C_r 、谐振电感 L_r 和励磁电感 L_m 组成的谐振网络;二极管 D_1 和 D_2 构成的全波整流网络,将变压器二次侧的交流电整成脉动的直流电;输出电容 C_o 将脉动的直流电滤成低纹波平稳的输出电压; R_{load} 为变换器的输出负载。

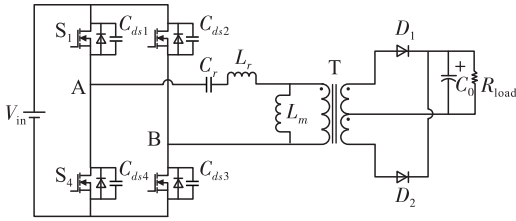


图 1 LLC 谐振变换器的拓扑结构图

2 LLC 谐振变换器的数学模型

2.1 LLC 谐振变换器的传统等效模型

采用基波近似法对 LLC 谐振变换器进行建模,可以得到 LLC 变换器的传统等效电路模型如图 2 所示^[3]。

$$A = \left| \frac{\frac{1}{j\omega C_p} \parallel j\omega L_m \parallel \left[\frac{n^2}{j\omega C_s} \parallel R_{ac} + j\omega(L_{k1} + n^2 L_k) \right]}{\frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_r \parallel \frac{1}{j\omega C_{Lp}} + \frac{1}{j\omega C_p} \parallel j\omega L_m \parallel \left[\frac{n^2}{j\omega C_s} \parallel R_{ac} + j\omega(L_{k1} + n^2 L_k) \right]} \right|$$

$$B = \left| \frac{\frac{n^2}{j\omega C_s} \parallel R_{ac}}{\frac{n^2}{j\omega C_s} \parallel R_{ac} + j\omega(L_{k1} + n^2 L_k)} \right| \quad (5)$$

根据式(2)和式(3),得到改进的直流增益曲线与传统直流增益曲线对比图,如图 4 所示。由图 4 可以看出,改进后的增益曲线比传统的增益曲线偏高,改进后的模型更符合电路实际模型,根据改进后的模型能设计出更为准确的控制参数。

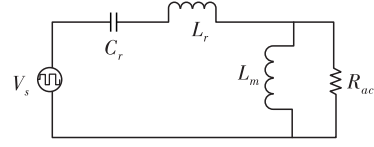


图 2 LLC 谐振变换器传统等效电路图

由图 2 可以得到全桥 LLC 谐振变换器的谐振电路的传递函数 $H(j\omega)$:

$$H(j\omega) = \frac{R_{ac} / j\omega L_m}{j\omega L_r + \frac{1}{j\omega L_r} + R_{ac} / j\omega L_m} \quad (1)$$

由式(1)可得谐振变换器直流增益的频域方程为:

$$M = \left| \frac{-\omega^2 L_m C_r R_{ac}}{-j\omega^2 L_m L_r C_r - \omega^2 C_r R_{ac} (L_m + L_r) + j\omega L_m + R_{ac}} \right| \quad (2)$$

2.2 LLC 谐振变换器的改进模型

为了得到更加准确的电路模型和直流电压增益,综合考虑谐振变换器的高频变压器与谐振电感的寄生参数,其改进等效模型如图 3 所示。

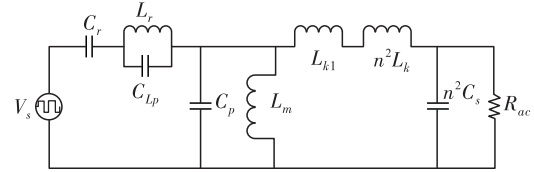


图 3 LLC 谐振变换器考虑 3 种寄生参数的改进等效电路图

其直流电压增益是:

$$M = A \cdot B \quad (3)$$

式中:

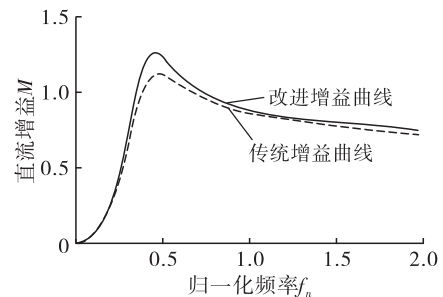


图 4 LLC 谐振变换器传统增益曲线和改进增益曲线图

3 LLC 谐振变换器的硬件设计

3.1 硬件结构及设计指标

LLC 谐振变换器硬件部分主要由 LLC 开关网络、LLC 谐振网络、高频变压器、全波整流负载、辅助

电源部分的 12 V 和 3.3 V、输入电压电流采样、输出电压电流采样、开关 MOS 管驱动电路以及由 STM32 为核心的控制单元构成。系统总体结构框图如图 5 所示, LLC 谐振变换器设计指标如表 1 所示。

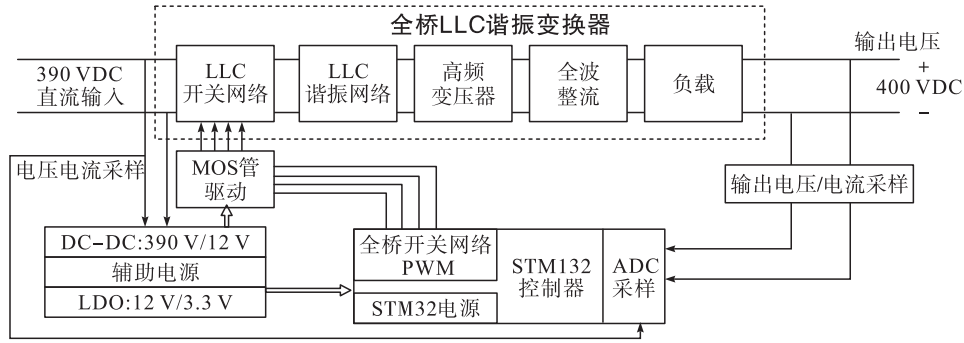


图 5 LLC 谐振变换器硬件结构

表 1 全桥 LLC 谐振变换器设计指标

参数	数值
输入电压额定值 V_{in_nom}/V	390
输出电压额定值 V_{o_nom}/V	400
输出功率 P_o/W	600
谐振频率 f_r/kHz	90
效率 $\eta/\%$	96

3.2 谐振网络归一化电感比 K 和品质因数 Q 设计

LLC 谐振网络的开关管要实现零电压开关, 则变换器必须工作在感性区域。使用基波分析法研究 LLC 谐振变换器等效模型时, 忽略了开关管自身寄生参数的影响, 而实际上, 寄生参数尤其开关管的输出电容的大小和其他杂散电容的大小对开关管实现零电压开通有很大影响^[4], 将寄生参数考虑进来能更准确的分析全桥 LLC 谐振变换器的软开关的特性与实现条件。

如图 1 所示为全桥 LLC 变换器开关网络电路, 其中假设 4 个 MOS 管的输出电容相等均为 C_{ds} , 考虑杂散电容 C_{stray} , 则有总寄生电容 C_{ZVS} 为:

$$C_{ZVS} = 4C_{ds} + C_{stray} \quad (6)$$

在实际工况中, 零电压开通实现要保证在死区时间内谐振槽内的循环电流比总寄生电容充放电所需的最小循环电流大, 该情况可确保开关管两端电压反向充电到零, 为零电压开通做好准备。该文采用极限化品质因数 Q 值的方法, 只要满足该 Q 值条件即可实现零电压开关。

当输入电压最大输出电压最小时, 变换器的工作频率最大, 直流增益最小为 M_{min} 。由谐振变换器归一化直流电压增益曲线可知, 空载条件下阻抗最

大, 谐振电流最小。空载条件下归一化最大开关频率 f_{n_max} 是:

$$f_{n_max} = \sqrt{\frac{1}{1 + K \left(1 - \frac{1}{M_{min}}\right)}} \quad (7)$$

则归一化电感比 K 的值为:

$$K = \frac{M_{min}}{1 - M_{min}} \cdot \frac{f_{n_max}^2 - 1}{f_{n_max}^2} \quad (8)$$

空载条件下最大输出阻抗 Z_{max} 为:

$$Z_{o_max} = \frac{4T_{dead}}{\pi C_{ZVS} \left[(K + 1) \frac{f_{s_max}}{f_r} - \frac{f_r}{f_{s_max}} \right]} \quad (9)$$

式中: T_{dead} 是死区时间。

可以得到最大品质因数 Q_{max} 为:

$$Q_{max} = \frac{Z_{o_max}}{R_{ac}} = \frac{4T_{dead}}{\pi C_{ZVS} \left[(K + 1) \frac{f_{s_max}}{f_r} - \frac{f_r}{f_{s_max}} \right] R_{ac}} \quad (10)$$

3.3 谐振槽参数设计

根据归一化增益模型可得谐振槽中谐振电感、励磁电感和谐振电容的表达式^[5]:

$$L_r = \frac{QR_{eq}}{2\pi f_r} \quad (11)$$

$$L_m = KL_r \quad (12)$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r R_{eq} Q} \quad (13)$$

由以上公式可知, 当归一化电感系数 K 和品质因数 Q 确定后, 谐振变换器的相关参数谐振电感、励磁电感和谐振电容便能够确定。

根据该文设计指标和谐振参数计算, 得到 LLC

谐振变换器参数设计如表 2 所示。

表 2 LLC 谐振变换器谐振参数设计表

参数	数值
变压器匝比 $N_p:N_s$	1:1.3
谐振电容 C_r/nF	22
谐振电感 $L_s/\mu\text{H}$	142
励磁电感 $L_m/\mu\text{H}$	780

4 试验分析

为验证设计结果正确性,制作试验电路板,搭建硬件试验平台,包括直流输入电源、LLC 谐振变换器和测试负载,其实物样机图如图 6 所示。

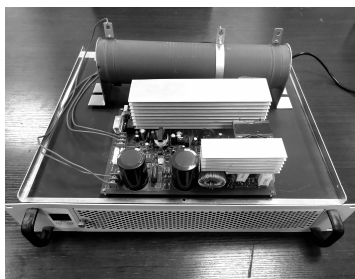


图 6 实验样机平台

LLC 谐振变换器输入直流电压 390 V,将负载调整至满载,用示波器测量 MOS 管的驱动 V_{gs} 和 V_{ds} 两端电压,得到 MOS 管驱动电压和漏源极间电压波形如图 7 所示。

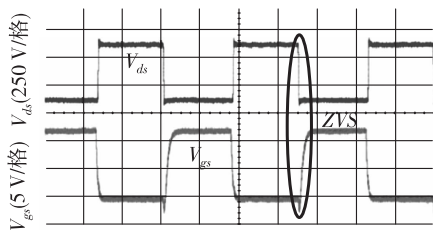


图 7 开关网络开关管零电压导通波形

由图 7 可以看出,MOS 管驱动电平变为高电平之前, V_{ds} 电压已经降为零,从而实现了开关器件的零电压开通。

同样,测量全波整流侧二极管两端的电压波形 V_d 和二极管的电流波形 I_d ,如图 8 所示。

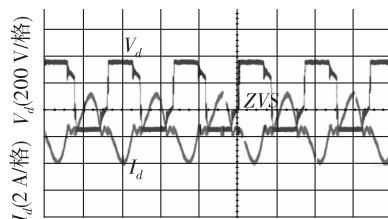


图 8 整流网络二极管零电流关断波形

由图 8 可以看出,整流网络中整流二极管在关断时刻其通过的电流已经降至 0,电流出现断续,实现了零电流关断。

5 总结

该文介绍了 LLC 谐振变换器的基本结构,建立了传统 LLC 谐振变换器的数学模型,并得到了直流增益频域方程。针对传统 LLC 变换器忽略寄生参数建模不精确,提出了 LLC 谐振式变换器的改进模型,并得到改进模型的直流电压增益表达式,以提出的优化增益模型为基础,详细给出了谐振槽参数的设计方法,并搭建了试验平台,通过波形分析,该设计能够实现 LLC 谐振变换器的开关管零电压开通和整流管零电流关断,达到了设计要求。

参考文献:

- [1] 朱辉明. LLC 谐振变换器的建模及控制技术研究[D]. 北京:北方工业大学,2022.
- [2] 黄鑫. 基于 GaN 器件的航天用高效率高功率密度电源模块研制[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [3] 苏祺钧. LLC 谐振变换器高性能控制策略研究[D]. 济南:山东大学,2022.
- [4] 左裕. 多模态宽电压范围双向隔离 LLC 谐振变换器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [5] 梁康,潘永雄,李键文,等. LLC 变换器谐振腔参数设计方法比较[J]. 电子设计工程,2022,30(19):179-184.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49

国际发行代号:BM529

定价:18.00 元/期 108.00 元/年

地址:西安市高新区沣惠南路 8 号

邮编:710075

电话:029-81871277

网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com>

电子邮箱:gyybbjb@126.com