

基于弹载的高功率密度 LLC 变换器设计

吴振苇, 李双刚, 张丽, 何娇娇

(上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要: 传统脉冲宽度控制技术使得电源变换器中开关管工作在硬开关状态, 产生的功率损耗会导致效率降低, 选择适当的软开关技术可以有效降低开关损耗。针对某导弹型号 XX-11 设计了一款二次电源产品, 前级通过 PFC 电路以实现功率因数校正, 同时采取 LLC 谐振技术来实现软开关工作, 提高电源效率。介绍了 LLC 谐振电路工作原理, 用基波分析法对其建模, 分析了谐振参数的对变换器增益和输出效率的影响, 同时采用了磁集成的方法以提高功率密度。基于以上分析和设计, 制作了一台 630 W 的产品, 具有宽范围输入电压和高效率等优点。

关键词: 软开关; LLC 谐振变换器; 基波分析法; 磁集成; 定频控制

中图分类号: TN86

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200517

中文引用格式: 吴振苇, 李双刚, 张丽, 等. 基于弹载的高功率密度 LLC 变换器设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 109–113.

英文引用格式: Wu Zhenwei, Li Shuanggang, Zhang Li, et al. Design of LLC converter with high power density on the missile[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 109–113.

Design of LLC converter with high power density on the missile

Wu Zhenwei, Li Shuanggang, Zhang Li, He Jiaoqiao

(Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: The traditional pulse width control technology makes the switching tube in the power converter work in a hard switching state, and generates power loss that leads to efficiency decrease. Choosing the appropriate soft switching technology can effectively reduce the switching loss. This article designs a power supply product for a missile XX-11, where the front stage uses PFC circuit to achieve power factor correction, and adopts LLC resonance technology to realize the soft switching work of power tube. The switching loss is reduced, and the working efficiency of the converter is improved. The article introduces the working principle of LLC resonant circuit, uses FHA method and analyzes the influence of resonance parameters on converter gain and output efficiency, and adopts magnetic integration method to improve power density. Based on the above analysis and design, a 630W product was produced, and its electrical performance was tested and verified.

Key words: soft switching; LLC resonant converter; first harmonic approximation method; magnetic integration; fixed frequency control

0 引言

随着开关电源技术朝着高频化方向发展, 电源的开关频率逐步增大, 从而使变压器、电感等磁性元件的体积减小, 提高电源的功率密度。但是, 对于传统硬开关电路来说, 由于开关管工作于硬开关状态, 开关频率提高就意味着大大地增加了开关损耗, 从而降低了效率^[1]。LLC 谐振变换器作为热门的软开关电路之一, 综合了串联谐振变换器 SRC 和并联谐振变换器 PRC, 具有效率高、器件应力小等优点^[2]。LLC 变换器实现了桥臂开关管的 ZVS、副边整流管 ZCS, 从而大大减小了开关损耗与电磁干扰, 提升了电源功率密度, 利于电源高频发展。但其为实现宽范围输出电压, 一般采取调节开关频率的控制方式, 而开关频率变化范围过大不利于磁性元件的设计^[3], 同时也容易导致输出不稳定。本文采用了 Buck-LLC 两

级结构电路拓扑, 固定 LLC 变换器开关频率以提升电源效率, 控制 Buck 电路占空比以调节输出。

1 系统框图

如图 1 所示, 地面或载机提供 115 V/400 Hz 三相交流电源通过对外插头接入。接口处设计输入 EMI 滤波, 以满足电磁兼容需求。三相交流电源经三相整流及 PFC 电路后, 作为 DC/DC 变换器的输入, DC/DC 采用高效率的半桥 LLC 软开关拓扑, 输出加入适当的 LC 滤波, 满足纹波要求。针对输入电源中断的设计要求, 在辅助电源的输出端加入储能电容, 确保在输入恢复情况下控制电路在 50 ms 内仍处于工作状态。

电源变换器的输入和输出为磁隔离模式, 其上级产品为地面或载机提供的 115 V/400 Hz 三相交流电源, 下级为用电单机。二次电源单机产品在两者之间起到能量

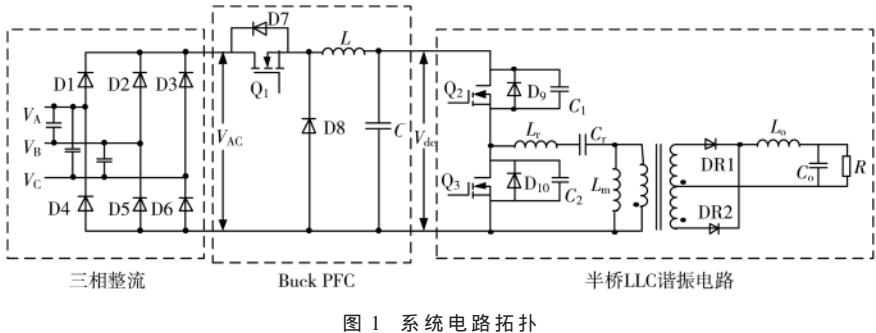


图 1 系统电路拓扑

转换与隔离的作用，在满足下级产品用电需求的同时必须保证一次母线的安全。

2 原理与设计

2.1 工作原理

LLC 谐振变换器的电路拓扑如图 1 所示，谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 、以及 L_m 组成了谐振网络，谐振网络是变换器的核心部分。

LLC 变换器有两个特征频率^[5]。当副边二极管 DR1 或 DR2 导通时，励磁电感不参与谐振，只有谐振电感 L_r 和谐振电容 C_r 参与谐振，此时谐振频率为：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

当副边两个二极管同时导通，此时励磁电感参与谐振， L_r 、 L_m 、 C_r 共同构成谐振网络，谐振频率为：

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}} \quad (2)$$

2.2 电路建模

对谐振元件 L_m 、 L_r 、 C_r 参数进行合理的设计，可以实现对原边开关管的零电压开通以及副边整流管零电流关断，从而大大降低开关损耗，提高变换器的工作效率^[6]，利用基波近似法可以对谐振电路建模分析^[7]。

输出整流电路等效为纯阻性负载 R_r ：

$$R_r = \frac{V_{rl}(t)}{I_{rl}(t)} = \frac{8}{\pi^2} \times \frac{V_o}{I_0} \quad (3)$$

折算到变压器原边为：

$$R_e = \frac{8}{\pi^2} n^2 \times \frac{V_o}{I_0} \quad (4)$$

$$Z = j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} + j\omega L_m // R_e$$

LLC 谐振电路模型可以等效为如图 2 所示电路，电压直流增益为：

$$M_{dc}(s) = \frac{1}{2n} \frac{sL_m // R_e}{sL_r + \frac{1}{sC_r} + sL_m // R_e} \quad (5)$$

为了简化分析，对电压增益进行归一化，定义归一化增益为： $M(f_n, k, Q) = 2nM_{dc}$ ，那么：

$$M(f_n, k, Q) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} - \frac{1}{f_n^2} \frac{1}{k}\right)^2 + Q^2 \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)^2}} \quad (6)$$

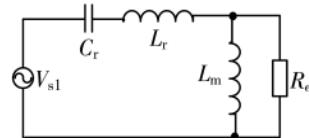


图 2 LLC 谐振器等效电路

归一后的频率为： $f_n = \frac{f}{f_s}$ ；谐振腔电

感比值： $k = \frac{L_m}{L_r}$ ；品质因素： $Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_e}$ 。

2.3 参数分析

如图 3 所示，当 k 一定时， Q 越小，峰值增益变大，理论上当负载等效电阻趋于无穷大时，电压增益也趋于无穷。但无论 Q 如何变化，增益曲线都会经过独立负载点(f_n, M)=(1, 1)，该点的电压增益与负载大小无关，即当负载全范围变化时输出电压保持恒定不变，且可以实现最高效率，谐振点应尽可能靠近该点^[7]。

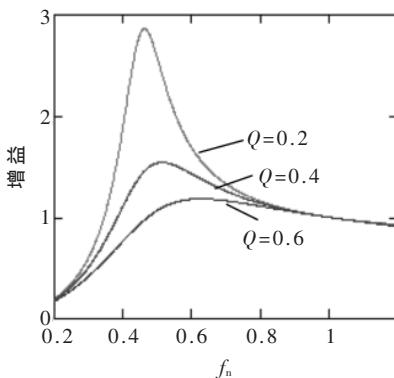


图 3 LLC 谐振器增益曲线

当开关频率满足 $f_s = f_r$ 时， L_r 与 C_r 共同参与谐振，原副边电流波形如图 4 所示，对电路中各电流进行分析：

原边电流为：

$$i_p(t) = \sqrt{2} I_{p_rms} \sin(2\pi f_r t - \theta) \quad (7)$$

励磁电流为：

$$i_{Lm}(t) = \frac{NV_o}{L_m} t - \frac{NV_o}{4L_m f_r} \quad (8)$$

副边整流后电流为：

$$i_2(t) = N|i_p(t) - i_{Lm}(t)| \quad (9)$$

那么原副边电流有效值可以计算得到：

$$I_{p_rms} = \frac{V_o \sqrt{8\pi^2 L_m^2 f_r^2 + 2N^4 R_L^2}}{8NR_L L_m f_r} \quad (10)$$

$$I_{s_rms} = \frac{\sqrt{2} \pi V_o}{4R_L} \sqrt{1 + \frac{(5\pi^2 - 48)N^4 R_L^2}{12\pi^4 L_m^2 f_r^2}} \quad (11)$$

当输入和输出要求确定后，原边、副边电流有效值只与 L_m 有关， L_m 越大，电流越小。 L_m 能够有效减小电流应力，而变压器中铜耗与电流的平方成线性关系，增大 L_m ，即能有效减小铜耗，提高变压器的工作效率。

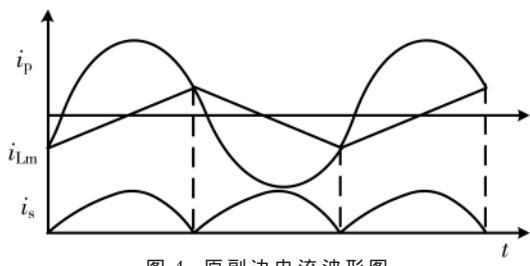


图 4 原副边电流波形图

2.4 效率分析

根据 LLC 等效电路, 对谐振器效率进行分析。输出功率可以计算为:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_e} = \frac{(MV_{sl})^2}{R_e} = \frac{2(MV_{dc})^2}{\pi^2 R_e} \quad (12)$$

对于变换器损耗功率为:

$$P_\Delta = \frac{2R(MV_{dc})^2 \left[1 + (1 + \frac{1}{k})^2 \frac{R_e^2}{L_m^2} \cdot \frac{1}{\omega^2} \right]}{\pi^2 R_e^2} \quad (13)$$

其中 $R = R_{ds} + R_{L1} + R_{Lm} + R_{Gx}$ 为等效电路中直流等效阻抗。

那么变换器的效率可以计算得到:

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_\Delta} = \frac{1}{1 + \frac{R}{Z} \left[\frac{1}{Q_L} + (1 + \frac{1}{k})^2 (\frac{f_m}{f})^2 Q_L \right]} \quad (14)$$

其中: $Q_L = \frac{R_e}{\omega_m(L_m + L_r)}$ 。

式(14)是多元函数, 令 $\frac{d\eta}{dQ_L} = 0$, 求得效率最大时的

负载情况: $Q_L = \frac{k(\frac{\omega}{\omega_m})}{1+k}$ 。

Q_L 可表征变换器的负载情况, 当 Q_L 从零增加, 即当负载从轻载变化到满载时, 效率均可以保证在 93% 以上, 如图 5 所示。

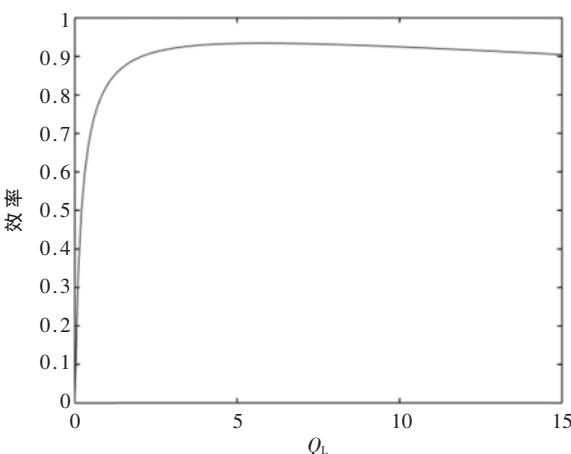


图 5 负载-效率关系图

2.5 磁集成技术

为实现变换器高功率密度, 利用磁集成技术将谐振

电感与变压器集成。LLC 变换器磁集成的实现有两种方法, 一种是利用变压器漏感来实现串联谐振电感, 另外一种是在磁芯上设置独立的绕组, 但这会增加电源的无用功率, 产生效率损耗。在本次设计中, 合理利用了变压器漏感, 选择第一种磁集成方式制作了高频平面变压器以提高功率密度, 降低损耗。

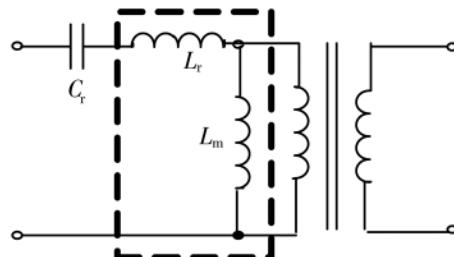


图 6 磁集成方案

2.6 控制电路

普通 LLC 变换器采取变频控制以实现较宽范围内的输出, 但这存在谐振参数设计复杂、电磁兼容、电源体积较大等问题^[6]。可以通过采用定频控制方式简化参数设计, 提高工作效率, 增大功率密度。当 LLC 变换器工作在固定频率时, 可以将谐振电路看做电力电子变压器, 输出输入电压比通过变压器匝比调整。

对于本电源产品, 主电路部分采用了 Buck-LLC 两级结构, 固定 LLC 谐振变换器的开关频率, 对其开环定频控制; 通过对 Buck 电路占空比双闭环控制以实现输出电压的调节^[8-11]。

3 仿真与实验

电源变换器在额定输入电源变化(360~440 Hz)范围内, 环境温度(高、低温)变化范围内, 应满足表 1 电源稳态要求和负载电源功耗要求。

表 1 输出性能指标

一次电源名称/V	变化范围/V	负载(稳态)/W
+28.5	+26~+36	≤ 630

基于以上分析, 设计谐振参数: L_m 为 12 μ H, L_r 为 0.35 μ H, C_r 为 800 nF; 平面变压器匝比为 3:2:2。

3.1 仿真波形

针对后级高效 LLC 软开关电路进行仿真, 控制回路采取开环定频控制, 得到如下波形: 图 7 为定频控制下变换器的互补驱动信号波形, 死区时间控制在 200 ns; 由图 8 可以看到原边开关管实现 ZVS 工作, 减小了开关损耗; 图 9 为变换器输出电压波形, 为 28.44 V, 纹波在 10 mV 以内, 满足输出要求。

3.2 实验波形

设计 LLC 的谐振频率在 300 kHz, 定频控制时工作频率固定在谐振点。图 10 为实验时实测开关管驱动波形, 频率为 277.9 kHz, 死区时间为 180 ns; 控制电路产生

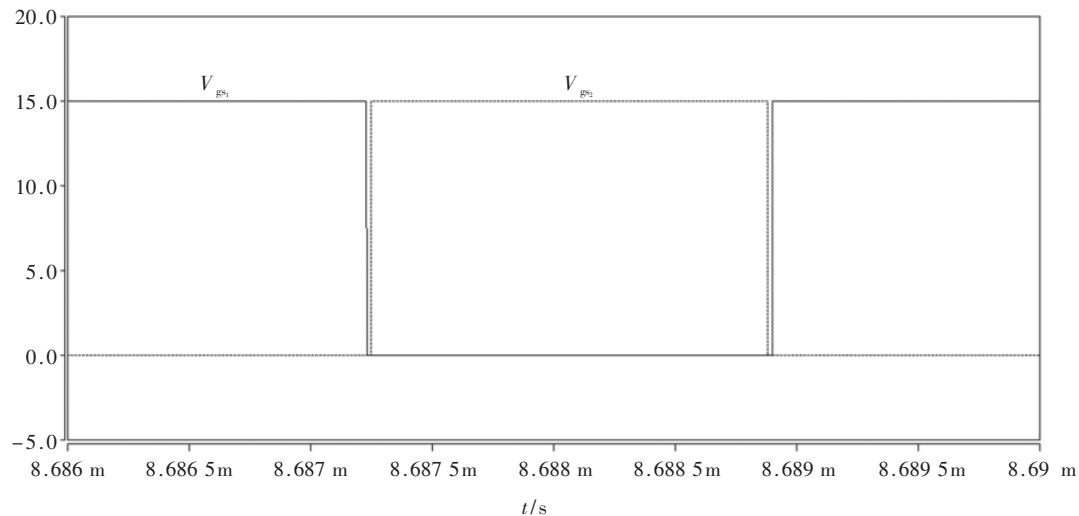


图 7 驱动信号波形

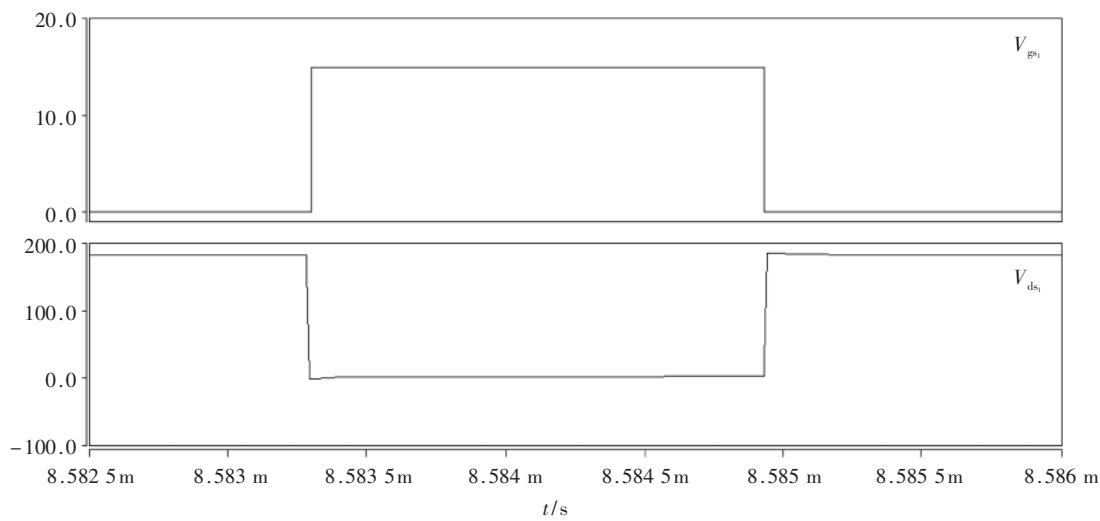


图 8 ZVS 工作

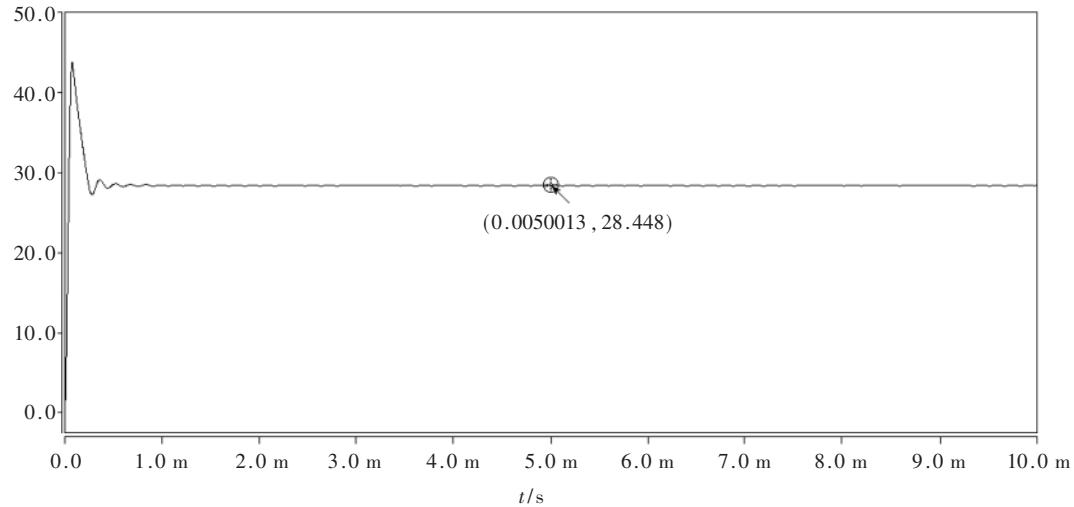


图 9 输出电压

互补的 PWM 波，以略小于 0.5 的占空交替控制桥臂功率管，两驱动波形之间的死区时间避免了桥臂直通。

谐振电流如图 11 所示，输出电压如表 2 所示。本部分测试了在不同输入条件下电源输出电压。改

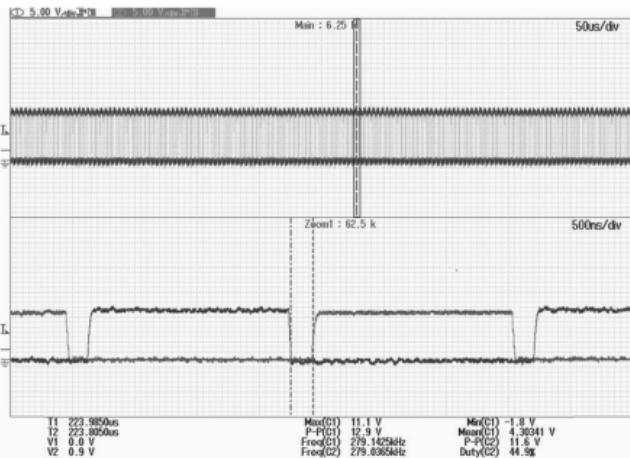


图 10 驱动波形

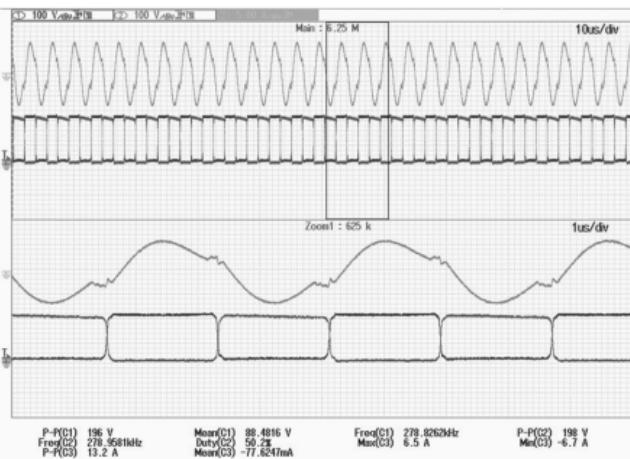


图 11 谐振电流波形

表 2 输出电压情况

输入电压	输出电压/V
100 V, 400 Hz	空载: 32.9797 满载: 29.8383
121 V, 400 Hz	空载: 32.9963 满载: 29.8382
115 V, 360 Hz	空载: 32.9645 满载: 29.8290
115 V, 440 Hz	空载: 32.9914 满载: 29.8334

变输入电压或频率，输出可保持一定的稳定性，电压满足输出要求(+26 V~+36 V)，符合设计指标。

4 结论

本文设计了某弹载型号电源产品，主要由整流-Buck-LLC 三部分构成。通过对 LLC 变换器工作原理和参数等分析，设计将 LLC 开关频率固定在谐振点，此时电路效率最高；同时采用了磁集成技术利用变压器漏感来实现串联谐振电感，以提高功率密度和效率。最后采用设计参数制作了一台 630 W 的实验样机，并对其进行

电气性能测试，样机达到了产品电性能指标，动态响应快，输出稳定性好，具有宽范围输入电压和高效率的优点。

参考文献

- [1] 王泽景, 王颖, 龚春英. 高降压比 LLC 谐振型直流变压器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 193–200.
- [2] 王付胜, 汪学胜, 江冯林, 等. 半桥三电平 LLC 变换器宽范围输出电压控制策略[J]. 电力电子技术, 2019(4): 122–124.
- [3] 封继军, 张振国, 刘冬, 等. LLC 谐振变换器的数学建模和损耗分析[J]. 电子科技, 2016, 29(4): 140–143, 146.
- [4] HU H B, FANG X, CHEN F, et al. A modified high-efficiency LLC converter with two transformers for wide input-voltage range applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1946–1960.
- [5] 金晗, 刘威, 姚文熙, 等. 半桥型 LLC 谐振变换器的损耗分析[J]. 电力电子技术, 2019(8): 36–40.
- [6] 张航, 赵晋斌, 屈克庆, 等. 高效率 LLC 谐振变换器的定频混合控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019(7): 92–98.
- [7] 姚宏伟, 章治国, 徐洋. 基于 Saber 的半桥 LLC 谐振变换器的参数设计与仿真[J]. 电工技术, 2018(21): 27–30.
- [8] 张晋玮, 周东方, 李建兵, 等. Buck+半桥 LLC 倍压谐振两级式 DC/DC 变换器[J]. 信息工程大学学报, 2012, 13(6): 682–687.
- [9] YANG G, DUBUS P, SADARNAC D. Double-phase high-efficiency, wide load range high-voltage LLC DC/DC converter for electric/hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 1876–1886.
- [10] 李浩昱, 李振伟, 赵雷, 等. 宽输入 LLC 谐振变换器多电平控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 48–57.
- [11] LEE J S, CHOI J W, BAEK J I, et al. Three-switch LLC resonant converter for high efficiency adapter with universal input voltage[C]. Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, 2017: 1095–1100.

(收稿日期: 2020-06-17)

作者简介:

吴振苇(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电源技术。

李双刚(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电源技术。

张丽(1991-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 电源技术。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所