

一种混合滞环控制的 LLC 控制器应用研究

王 博

(西安铁路职业技术学院 牵引动力学院, 陕西 西安 710026)

摘要:为优化 LLC 变换器的瞬态性能、间歇工作特性及轻载效率,提出了一种 LLC 的混合滞环控制方法及变换器实现方案。在深入分析混合滞环控制原理、对称半桥 LLC 变换器设计方法的基础上,给出基于混合滞环控制的模拟控制器应用方法及 200 W 对称半桥 LLC 变换器的关键参数设计,包括控制器外围电路设计,对称半桥电路设计,驱动电路设计,LLC 谐振腔各项参数设计等,并通过实验样机进行详细验证。实验结果表明,所提出的混合滞环控制方法及控制器的应用设计科学可行。

关键词:混合滞环控制; LLC 谐振变换器; UCC25640x; 脉冲频率控制

中图分类号: TM464

文章编号: 1000-0682(2024)03-0100-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.018

Research on the application of LLC controller with hybrid hysteresis control

WANG Bo

(School of Traction Power, Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Shaanxi Xi'an 710026, China)

Abstract: To optimize the transient performance, burst mode characteristics, and light load efficiency of LLC converter, a hybrid hysteresis control method and converter implementation scheme for LLC are proposed. On the basis of in-depth analysis of the principle of hybrid hysteresis control and the design method of symmetrical half bridge LLC converter, the application method of analog controller based on hybrid hysteresis control and the key parameter design of 200W symmetrical half bridge LLC converter are proposed, including peripheral circuit design of the controller, symmetrical half bridge circuit design, switcher driving circuit design, LLC resonant parameter design, and they are detailed verified through the experimental prototype. The experimental results indicate that the proposed hybrid hysteresis control method and the application design of the controller are scientifically feasible.

Keywords: hybrid hysteresis control; LLC resonant converter; UCC25640x; pulse frequency control

0 引言

LLC 谐振变换器以其高的整机效率、高的功率密度、出色的电磁兼容特性广泛应用于各类电源产品,如电动汽车充电系统、数据中心直流电源、LED 驱动电源、模块电源、各类消费电子产品适配器等。LLC 变换器在全负载的工作范围内,原边开关管可实现零电压开通,副边整流管可实现零电流关断,可有效减小 LLC 变换器开关管开关损耗,提高系统效率^[1-3]。同时,开关管及二极管工作在零电压开通与零电流关断状态,电路中的 dv/dt 、 di/dt 非常小,使得变换器系统具有卓越的电磁兼容特性,且可以

做到较高的开关频率,有利于缩小磁元件体积,提升系统功率密度^[4-6]。

LLC 变换器最常用的控制方式为 PFM,通过有限的频率变化范围最大化的获取变换器的增益。目前大多数文献资料所述的 LLC 变换器控制方法为直接频率控制,类似于电压模式控制,控制系统易于实施。但缺点是控制模型表现出二阶或三阶特性, Bode 图随输入电压和负载变化,环路带宽有限,相位裕度低,动态响应较慢^[7-8]。在混合滞环控制 (Hybrid Hysteresis Control, HHC) 中,开关频率是通过确定的带阈值的谐振电容电压来控制循环调整阈值,其特点是控制系统为一阶系统,易于进行系统环路补偿,而且具有较高的带宽。为此,提出了一种基于模拟控制器 UCC25640x 的混合滞环控制实现方案,以实现最佳的线路和负载瞬态性能,这种控制方法使环路补偿器更易于设计,易于实现变换器轻负

收稿日期: 2024-01-04

基金项目: 西安铁路职业技术学院 2023 年度院级课题(XTZY23K13)

第一作者: 王博(1983—),男,陕西蒲城人,硕士,讲师,研究方向为 DC-DC 谐振变换技术、新型功率器件应用技术。

载的控制,而且系统效率较高。在改进控制系统瞬态特性的同时也可减小输出滤波电容,从而降低系统成本与体积^[9-11]。

1 对称半桥 LLC 电路分析

1.1 LLC 电路结构

对称半桥式 LLC 电路如图 1 所示,电路中原边开关管 Q_1 、 Q_2 采用变频控制,以固定占空比 50% 交替工作,将直流输入 U_i 变换为高频开关次的方波电压。由谐振电感 L_r 、谐振电容 C_{r1} 、 C_{r2} 与变压器励磁电感 L_m 组成谐振腔。方波的电压激励在谐振腔产生正弦交流电流,该电流经过隔离变压器将能量耦合至副边。由 D_1 、 D_2 两个二极管组成的全波整流电路,将变压器副边的交流能量整流为直流,并经过一定的电容滤波后输出稳定的直流电压 U_o 。

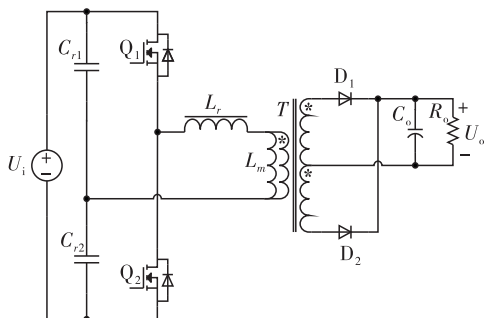


图 1 对称半桥 LLC 变换电路

1.2 工作状态分析

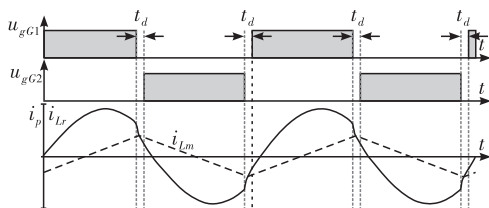


图 2 开关频率 f_s 大于谐振频率 f_r

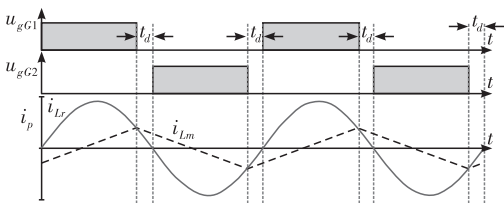


图 3 开关频率 f_s 等于谐振频率 f_r

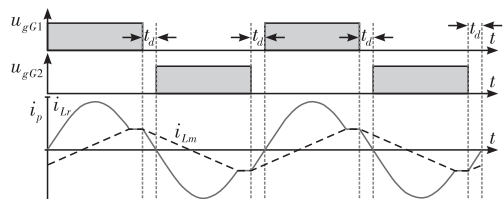


图 4 谐振频率 f_{r1} 大于开关频率 f_s 大于谐振频率 f_{r2}

LLC 变换器实际工作的开关频率 f_s 与输入电压、输出负载等有关,其中 f_{r1} 与 f_{r2} 为两个谐振频率,如式(1),电路关键波形如图 2、3 及 4 所示。

当 $f_s > f_{r1}$ 时, L_r 与 C_r 发生谐振, L_m 不参与谐振;变换器能够实现原边开关管零电压开通,但副边整流二极管无法实现零电流关断。当 $f_s = f_{r1}$ 时, L_r 与 C_r 发生谐振;原边开关管零电压开通,副边整流二极管零电流关断;原边电流呈正弦波,变换器工作在最理想的状态;但在实际应用中由于输入电压及输出负载等方面的因素,变换器不可能持续工作在谐振状态。当 $f_{r2} < f_s < f_{r1}$ 时,当变换器空载或轻载时,谐振电感 L_r 、励磁电感 L_m 共同与谐振电容 C_r 谐振;当变换器重载时,谐振电感 L_r 与谐振电容 C_r 谐振;变换器原边开关管零电压开通,副边整流二极管零电流关断。当 $f_s < f_{r2}$ 时,变换器谐振腔电压滞后于电流,原边开关管无法实现零电压开通,但可以实现零电流关断,变换器应尽量避免工作在此区域。

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

2 混合滞环控制的 LLC 变换器

2.1 控制器关键技术

UCC25640x 实现 LLC 变频控制的原理与其他控制器不同,其内部无需压控振荡模块,外部 LLC 原、副边电路也无需电流采集元件构成必要的峰值电流及平均电流控制系统,控制系统的频率控制由输出电压反馈量及谐振腔谐振电容电压决定,如图 5 所示。

首先,在控制器内部设置有较高压摆率与灵敏度的检测模块,能够针对自适应死区时间,对谐振电容电压进行检测,与其他控制器相比,鲁棒性更强。控制器的频率控制原理可使 LLC 变换器的传递函数成为一阶系统,从而获得卓越的瞬态特性及较高的带宽,并通过频率补偿实现固有稳定性。这种“burst”的软开启和软关闭可以有效降低“burst”模式工作期间的可听噪声。“burst”之间的关断时段由次级环路调节器基于反馈引脚电流而终止。在轻负载的小增益工作状态下,控制器自动切换到“burst”模式,且“burst”模式设置软启动和软关闭的工作状态,使得控制更加稳定,新型控制方案具有卓越的瞬态性能,可实现极低的待机功耗与低的可听噪声骚扰。

第二,在 LLC 变换器各项功能较为完善的基础上,控制器较高的集成度,可显著减少变换器所使用

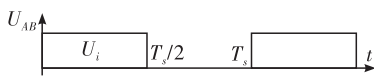


图6 变换器桥臂中点电压

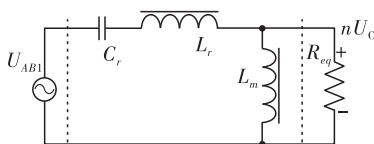
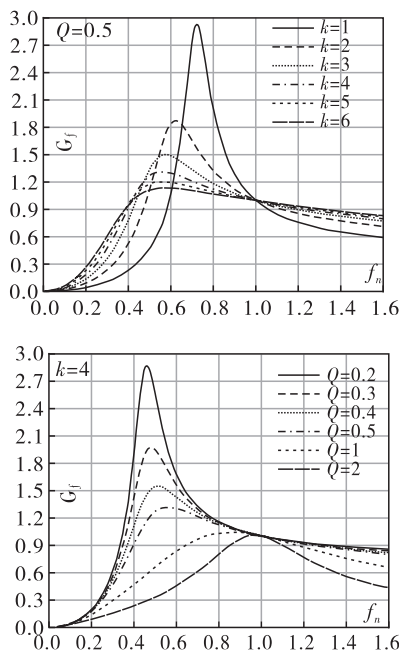


图7 变换器电路等效模型

图8 谐振腔增益曲线(分别固定 k 和 Q)

电感系数过大,系统最大增益会减小,有不满足系统增益要求可能性;工作频率范围变大,或者导致系统调节特性变差。但大的励磁电感也可减小谐振腔电流,从而提升效率。品质因数选取过大也会导致最大增益减小。品质因数过小会导致谐振电感变小,从而相对提高电感系数,影响系统效率。为此,从工程设计上考虑,电感系数与品质因数要折中,电感系数一般在3~8之间,电感系数确定后,尽可能选取最大的品质因数^[3]。

3 样机设计及实验验证

为验证混合滞环控制方法在 LLC 变换器控制中的科学性,及 UCC25640x 控制器在工程设计中的可行性,搭建 200 W 的 LLC 变换器实验样机,系统详细参数如表 1 所示。

3.1 关键器件设计及选型

(1) 谐振腔及变压器设计

根据样机输入与输出电压、输出电流、输出功率等参数,结合工程设计经验,确定开关频率范围为

85~210 kHz,谐振频率为 115 kHz。由输入电压范围可确定品质因数 Q 为 0.5 左右,电感系数 k 为 4。变压器匝比 n 可按式(10)计算得到。由等效负载电阻与品质因数即式(2)(6)(8)可计算出谐振电感与电容的参数,进而结合电感系数,可推算出变压器原边励磁电感。

$$n = \frac{U_i/2}{U_o} \quad (10)$$

(2) MOSFET 及二极管选型

根据 200W 对称半桥 LLC 变换器原边电压与电流规格,考量自然冷却的系统散热条件,每个支路选择 100V/120A 封装为 TO-220 的 MOSFET 作为主开关管,副边采用全波整流,选择 60V/30A 封装为 TO-220 的肖特基二极管作为全波整流二极管,如表 1 所示。

表 1 LLC 变换器实验样机关键参数

项目	参数
输入电压与范围	额定 72 VDC(65 VDC~86 VDC)
输出电压、电流及功率	12 VDC/17 A/200 W
振频率与开关频率范围	115 kHz(100 kHz~180 kHz)
变压器磁芯、励磁电感 L_m 及匝比	PQ32-12; 7.5 μ H; 6:2:2:3 (V_{CC})
谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r	1875 nH/20 A; 薄膜电容 470 nF \times 2
主开关管 (Q_1/Q_2)	MOSFET 100 V/120 A/TO-220
整流二极管 (D_1/D_2)	肖特基二极管 60 V/30 A/TO-220
输出滤波电容 (C_o)	铝电解电容 16 V/220 μ F \times 5

(3) 控制器外围关键电路设计

基于变换器的功率等级及工作电压, MOSFET 驱动采用控制器自有的自举驱动电路。构成混合滞环控制的谐振电容电压检测由 V_{CR} 引脚配置实现;输出电压反馈与普通控制器一致,采用线性光耦与基准电压源构成,将反馈信号送至 FB 引脚。同时实现系统三级过流保护的触发源同样来自谐振电容电压检测,通过外部的一阶滤波器引入 I_{SNS} 引脚。输入电压检测及过、欠压保护由 BLK 引脚配置。

3.2 实验结果分析

测试所搭建实验样机,图 9~14 中 u_{out} 为输出电压波形、 u_{G1} 、 u_{G2} 为开关管 Q_1 、 Q_2 的驱动电压波形; i_p 为谐振腔电流波形。图 9 为 LLC 变换器工作在“burst”模式的波形,可见谐振电流在开启和关闭时刻电流逐渐增大,控制器工作于软开启与软关闭的状态。图 10、11 及 12 分别为变换器工作频率小于、等于及大于谐振频率的波形,理论设计谐振频率

115 kHz, 图 11 实测为 117 kHz, 此刻谐振电流波形近似于正弦波; 低频与高频谐振腔电流波形与理论分析一致。图 13 为变换器工作在轻载 0.5 A 持续 10 ms 到满载 18 A 持续 10 ms 的负载瞬变的工况, 其中 i_{out} 为输出电流波形。此刻, 对于变换器的瞬态性能是较为严酷的考验, 从波形可见输出电压 u_{out} 的纹波在 40mV 以内, 满足大多数直流供电需求。图 14 为负载从 0.5 A 跳变 18 A 的波形, V_{CR} 为控制器采集的谐振电容电压, 由波形可见, V_{CR} 电压信号能够有效反应谐振电流。

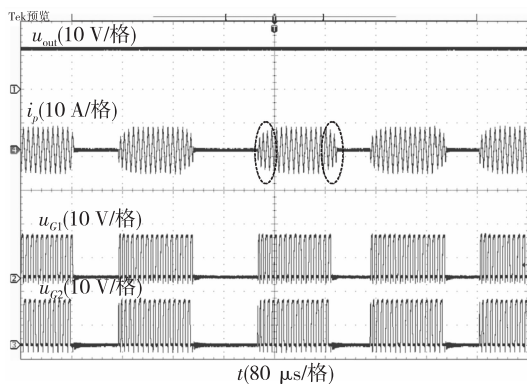


图 9 burst 模式输入 72 V 输出 12 V/0.1 A

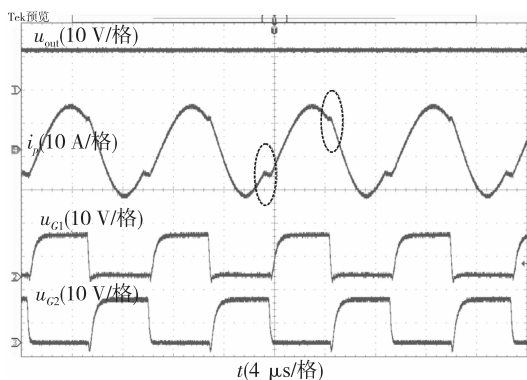


图 10 $f_s < f_n$, 输入 65 V 输出 12 V/18 A

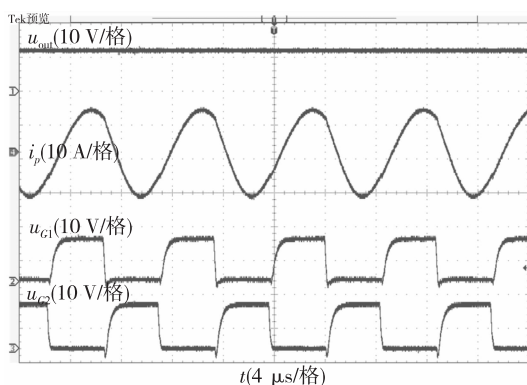


图 11 $f_s = f_n$, 输入 75 V 输出 12 V/18 A

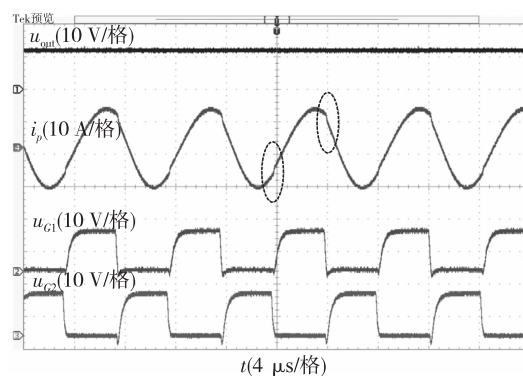


图 12 $f_s > f_n$, 输入 85 V 输出 12 V/18 A

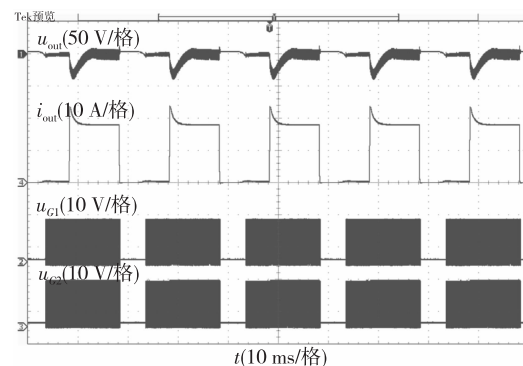


图 13 输入 75 V 输出 12 V/0.5 A - 18 A

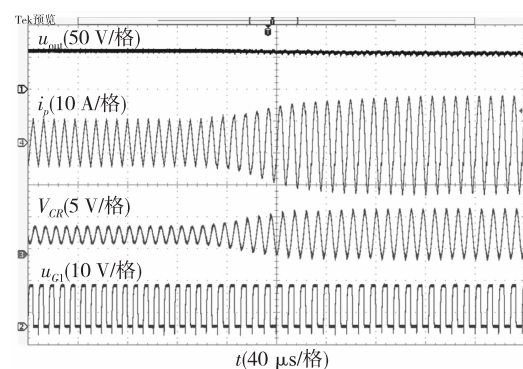


图 14 输入 75 V 输出 12 V/0.5 A - 18 A

4 结论

LLC 常用的控制采用 PFM, 瞬态响应与轻载效率不理想, burst 模式音频噪声也较大。提出的混合滞环控制方式中频率控制量来自于谐振电容电压与输出电压, 控制系统传递函数变为一阶, 使环路补偿更易实现, 控制系统稳定性与鲁棒性更优。同时, 给出了混合滞环控制的模拟控制器应用及 LLC 变换器系统实现方案。所搭建的 200 W 对称半桥 LLC 样机验证了系统实现方案、控制器外围电路及各项详细设计方法可行, 可应用于中小功率场合的 LLC 谐振变换器的工程设计中。

(下转第 134 页)

文章采用休哈特控制图法对江苏省级计量实验室 3 支二等标准铂电阻温度计标准器进行期间核查,均得到了核查通过的结论,确保其测量过程处于受控状态,并采用高一等级计量标准比较法验证期间核查结论。

基于休哈特控制图法的期间核查,核查结果易于分析,便于计量标准器具质量跟踪和数据质量控制,可以排除干扰因素,剔除异常值。文章通过 25 d 数据试验,每 5 d 为一组,得出了实验室用的水三相点瓶最佳测量时间为第 2、3 d。

期间核查的数据,可为计量建标的稳定性考核提供数据支持。高一等级计量标准核查的方法同样适用于实验室计量标准器具的期间核查,有助于提高气象计量人员的业务水平。后续将持续核查试验,根据大数据分析和长期控制图走势,为评估计量标准器具的稳定周期进一步努力。

参考文献:

- [1] 叶德培,黄耀文,丁跃清. 一级注册计量师基础知识及专业实务[M]. 北京:中国质检出版社,2017.
- [2] 孟祥军,刘垒,吕东平,等. 计量实验室中的期间核查[J]. 中国计量,2020(06):49-52.
- [3] 李琪,李皓,杨栋. 设备期间核查方法适用性研究[J]. 计量与测试技术,2020,47(06):80-83.
- [4] 陈平. 气象计量标准装置期间核查方法研究[J]. 气象水文海洋仪器,2020,4:48-54.
- [5] 赵泉钦,胡帆,杨敏,等. 计量标准装置期间核查的方法和实例[J]. 计量与测试技术,2022,49(08):89-91.
- [6] 况严,黄元媛,黄桂荣,等. 休哈特控制图在透射式烟度计检定装置核查中应用[J]. 计量与测试技术,2023,50(04):71-73.
- [7] 刘洪涛,龚熙. 数字气压计标准装置期间核查的方法和实例[J]. 计量科学与技术,2020(12):66-69.
- [8] 范巧成,郑磊,姜荣华. 一种准确可靠的期间核查方法[J]. 计量学报,2015,36(6):662-665.
- [9] 邱萍,闫小克,汪洪军,等. 金属外壳水三相点容器[J]. 计量学报,2022,43(2):196-200.
- [10] 周艺,关卫军,陈卓. 标准铂电阻温度计期间核查方法的运用[J]. 工业计量,2022,32(3):64-65.
- [11] 标准铂电阻温度计检定规程:JJG160—2007[S]. 2007-12-14.
- [12] 用于标准铂电阻温度计的固定点装置校准规范:JJF1178—2007[S]. 2007-09-14.
- [13] 李文博,颜平江,武灿灿. 气压检定箱校准方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(01):72-76.
- [14] 魏明明,李芬. 二等铂电阻温度计校准装置校准结果的验证[J]. 电子测量技术,2023,46(19):177-181.
- [15] 潘阿娟,陈江波,李卫兵. 二等铂电阻温度计标准装置不确定度评定[J]. 工业计量,2020,30(SI):78-79+103.

(上接第 104 页)

参考文献:

- [1] 俞珊. 一种快速动态响应的 LLC 变换器控制策略[J]. 电子器件,2022,45(02):305-310.
- [2] 高贺. LLC 电路启动及轻载控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [3] 刘志成. 通信电源用的半桥 LLC 谐振变换器研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [4] 班鹏程. 磁集成 LLC 谐振变换器的分析和设计[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- [5] 张永明,林嘉伟,陈俊尧,等. 计及 DCM 的电动汽车充电机 LLC 谐振变换器参数设计与优化[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(02):150-156.
- [6] 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.
- [7] 屠腾,张方华,余文浩,等. 边界限定条件下的 LLC - DCX 优化设计[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4748-4758.
- [8] 郑宏,严序文,袁雪凯,等. 基于磁控制的双谐振腔 LLC 谐振变换器[J]. 电子器件,2022,45(03):551-556.
- [9] 朱田华,卓放,赵方舟,等. 基于多谐波阻抗模型的 CLLC 谐振变换器轻载多移相控制分析与设计[J]. 中国电机工程学报,2021,41(01):326-339+422.
- [10] 万芳燕,董纪清. 基于屏蔽-对消技术的 LLC 变换器共模噪声抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(21):7956-7965.
- [11] FEI Chao, LEE F C, LI Qiang. High-efficiency high-power-density LLC converter with an integrated planar matrix transformer for high-output current applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11):9072-9082.