



·脉冲功率技术·

一种带有升压结构的 LC 充电电源的设计*

杨少杰, 王邦继, 李 伟, 刘庆想

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

摘 要: 为使 LC 谐振充电方案具有更高的升压范围和提高其对供电电压的适应性, 采用了一种带有升压结构的电路拓扑, 使得 LC 谐振充电方案具有升压和降压工作能力, 同时采用了基于能量实时检测的控制算法, 使得该方案能够根据预设参数准确充电和放电, 增强了对供电电压波动的适应能力。初步的实验结果表明, 在供电电压波动的情况下, 该电源能够完成升降压的调节, 且最大电压偏差小于 5 V。

关键词: LC 谐振; 充电电源; 重复频率; 脉冲功率; 适应性

中图分类号: TN86

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230002

Design of an LC charging power supply with a boost structure

Yang Shaojie, Wang Bangji, Li Wei, Liu Qingxiang

(School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: LC resonant charging scheme is suitable for high repetition rate pulse power system because of its simple circuit structure and control method, small size and high power efficiency. To make the LC resonant charging scheme with a higher boost range and improve its adaptability to supply voltage changes, this paper adopts a circuit topology with a boost structure, which enables the LC resonant charging scheme to have the ability to boost and reduce voltage. At the same time, it uses a control algorithm based on real-time energy detection, which enables the scheme to accurately charge and discharge according to preset parameters, and enhances the adaptability to supply voltage fluctuations. The preliminary experimental results show that the power supply can complete the regulation of voltage rise and fall when the supply voltage fluctuates, and the maximum voltage deviation is less than 5 V, thus it has higher charging accuracy and better charging consistency.

Key words: LC resonant, capacity charging power supply, repetition rate, pulse power, adaptability

初级电源是脉冲功率系统的重要组成部分, 随着脉冲功率驱动技术围绕着高功率输出、高重频运行和小型紧凑化的方向发展^[1-4], 恒流充电方案的一些瓶颈问题也逐渐凸显出来: 恒流充电方案的系统体积和质量与自身平均功率和开关频率有关, 为了保持高重复频率时的充电精度和满足系统小型化的要求, 恒流充电电源的开关频率需进一步提高^[5-7], 但其电能效率也将进一步降低且存在散热困难等问题。LC 谐振充电方案凭借着其电路结构简单^[8-9]、电能效率高、散热需求小和系统尺寸与重量随重复频率的提高而明显减小的特点, 能够很好地满足高重频时的充电精度和小型化的需求^[10]。但 LC 谐振充电方案具有的输入电压适应性差、充电一致性较差、调压不方便和晶闸管触发电路被干扰会导致系统损坏^[11-12]等严重不足限制了其特殊优点的应用。针对 LC 谐振充电方案的上述缺陷, 本文提出了一种带有升压结构的电源拓扑, 采用基于实时能量采集的控制方法, 完善了 LC 谐振充电方案的功能使其更便于使用, 还使其具有更小的体积和质量。

1 工作原理

现有的 LC 谐振充电方案如图 1 所示。首先, 充电开关 S_1 开启, 前置的大容量滤波电容与充电电感 L_1 、回收复用电感 L_{12} 、储能电容 C_1 发生串联谐振, 对储能电容器 C_1 进行谐振充电。随后放电开关 S_3 导通, 储能电容器对负

* 收稿日期: 2023-01-05; 修订日期: 2023-06-08

联系方式: 杨少杰, warwithwind@163.com。

通信作者: 李 伟, liwei_chengdu@163.com。

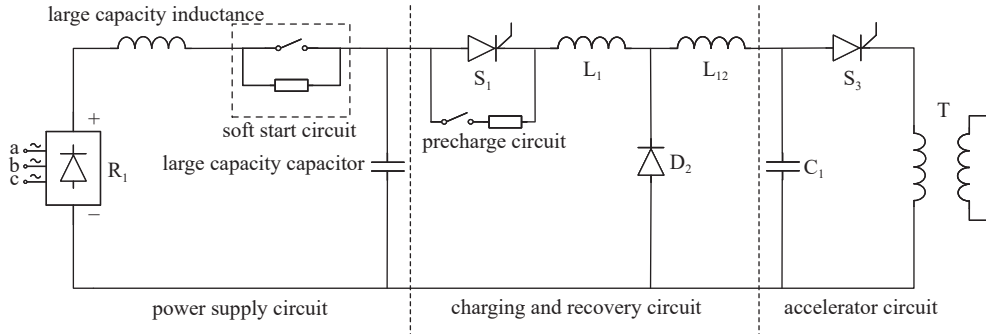


Fig. 1 Schematic diagram of existing LC resonant power supply
图 1 现有 LC 谐振电源原理图

载放电, 放电剩余电压一般极性为负。最后 C_1 和 L_{12} 发生谐振, 该过程为能量回收过程, 电流回零点时, 储能电容器 C_1 上的电压为正极性, 能量回收过程结束。

在电路结构方面, 三相供电时为了稳定供电电压和抑制电流谐波, 供电电路中需要大容量的滤波电容、滤波电抗器和软启动电路等, 抵消了 LC 谐振充电方案结构简单对应的小体积优势, 即在小型化方面存在不足; 另外, 在工作方法方面, 现有的 LC 谐振充电的改进方案中通过在能量回收过程结束前提前开通充电开关 S_1 的方式以实现调压功能, 不具备升压工作能力, 且充电过程与回收过程存在耦合, 使得控制电路的控制效果对供电稳定性、加速器电气参数与工作状态、检测与控制的响应速度和精度均具有较强的依赖性, 在抗干扰性、容错性和通用性方面存在不足。

提出的具有升压结构的 LC 谐振充电电源如图 2 所示。

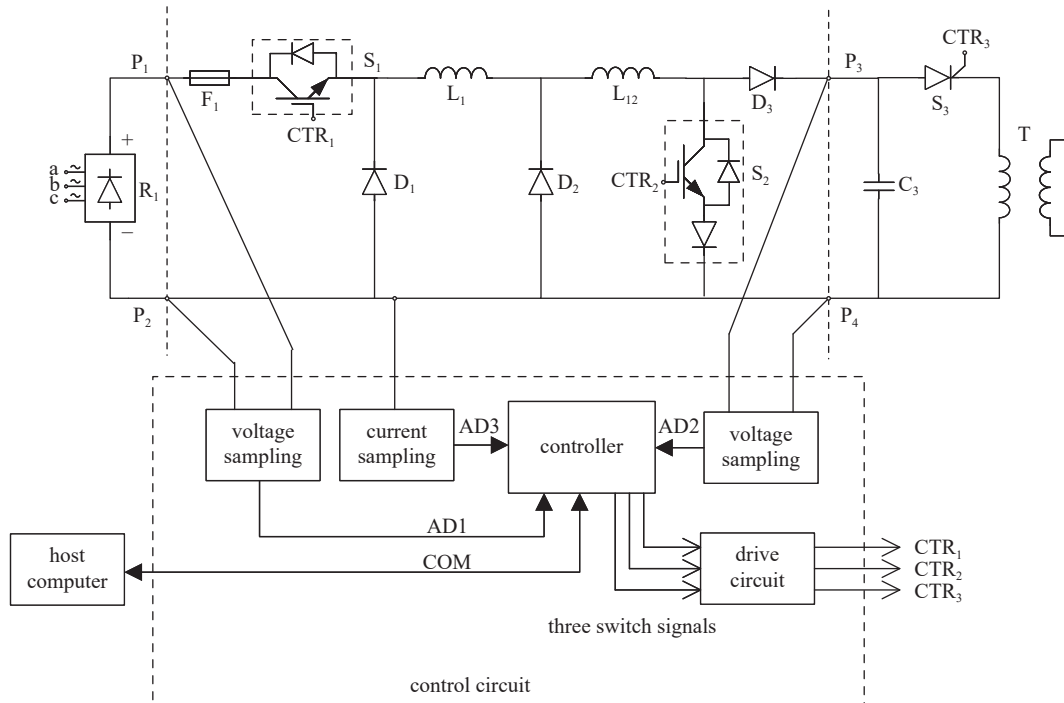


Fig. 2 Principle of power supply
图 2 电源工作原理

在电路结构上, 供电电路取消了大容量电抗器、软启动电路和大容量滤波电容。前置输入可以接电网, 也可以接电池。此时, 供电电压会在电路工作期间出现大幅变化。在充电和回收电路中, 增加了续流二极管 D_1 、防反二极管 D_3 和升压开关 S_2 。控制电路由三路采样电路、控制器和驱动电路构成。在控制方法上, 对输入系统的总能量进行实时的采集计算, 根据能量守恒定律, 在理想情况下, 输入系统的总能量与输出系统的总能量是相等的, 该系统输出的总能量反映为储能电容 C_1 上的电压大小, 所以, 只要通过控制开关输入系统的总能量, 就能控制储能电容 C_1 的电压大小, 增强了电路对供电电压的适应性。

引入了升压结构以后,电路有降压和升压两种工作方式。据准谐振能将储能电容 C_1 充到的最高电压 U_M 来确定电路的工作模式, U_M 可以由等效供电电压 U_e 和储能电容器的初始电压 U_0 推导得到,即

$$U_M = 2U_e - U_0 \quad (1)$$

当处于降压工作模式时,其工作方式和前文提到现有的 LC 谐振充电方案一致。控制器输出的信号 CTR1 控制着充电开关 S_1 的导通,此时升压开关并不工作,开关 S_2 处于关断状态。当充电开关 S_1 的开通时间达到 t_1 后,储能电容 C_1 上的电压将达到预期充电目标,充电开关 S_1 关断。

当处于升压工作模式时,控制器输出开关控制信号 CTR1 和 CTR2,此时充电开关 S_1 和升压开关 S_2 同时导通。供电电路经过回路 $F_1-S_1-L_1-L_{12}-S_2$,对充电电感 L_1 和回收复用电感 L_{12} 进行充电。当充电开关 S_2 的开通时间达到 t_2 后,两个电感所存储的能量达到预期,升压开关 S_2 关断,充电开关 S_1 保持开启状态。随后供电电路经过 $F_1-S_1-L_1-L_{12}-D_3-C_1$ 对储能电容 C_1 进行谐振充电,当充电开关 S_1 的开通时间达到 t_1 后,储能电容 C_1 上的电压将达到预期充电目标,充电开关 S_1 关断。回收和放电过程与前文提及的现有 LC 谐振充电方案一致。

不论是电路处于降压工作模式还是升压工作模式,控制器只需在充电完成后,储能电容电压稳定时,输出控制信号 CTR3,使得放电开关 S_3 导通,即可完成放电和回收过程。

定义充电电流瞬时值为 i ,充电电压瞬时值为 u ,储能电容器电容值为 C ,预设充电电压值为 U_{set} ,第二阶段的初始电流 I_y ,定义储能电容 C_1 电压为 u_c ,充电电感与储能电容组成的谐振电路的特征阻抗为 Z , t_1 为充电开关 S_1 的开通时间, t_2 为充电开关 S_2 的开通时间, I_y 为充电第二阶段的初始电流。根据谐振充电过程中的能量守恒可得

$$\int_0^{t_1} u i dt = \frac{1}{2} C (U_{set}^2 - U_0^2) \quad (2)$$

根据上述关系式可以得到充电开关的开通时间 t_1 。电路处于升压工作模式的时候,总共有两个充电阶段:第一阶段充电状态图如图 3(a) 所示,两路开关同时开启,电路处于电感储能阶段,该图反应了储能期间,电感电流随着时间线性变化的关系;第二阶段充电状态图如图 3(b) 所示,升压开关关闭,电路处于谐振充电阶段。

升压开关 S_2 闭合期间充电电感中储存的能量, L 为电路中两个电感的感量之和。

$$W_{S2} = 0.5 * L * I_y^2 \quad (3)$$

由图 3 中的几何关系可知,第二阶段的初始电流 I_y 的大小为

$$I_y = \sqrt{(U_{set} - U_e)^2 - (U_e - U_0)^2} / Z \quad (4)$$

结合式(3)和式(4)可得

$$W_{S2} = 0.5 * L * [(U_{set} - U_e)^2 - (U_e - U_0)^2] / Z^2 = 0.5 * (U_{set} - U_0) (U_{set} + U_0 - 2U_e) C \quad (5)$$

在充电的过程中,根据充电过程中能量守恒的关系,有如下关系式成立。

$$\int_0^{t_1} u i dt = W_{S2} \quad (6)$$

当输入系统的总能量达到电感所需储存的总能量时,升压开关 S_2 关断,可以得到升压开关的开通时间 t_2 。

2 仿真及实验

2.1 电路仿真

为验证方案的有效性,首先采用 Matlab/Simulink 软件进行仿真,其参数如下:充电电感 L_1 为 225 μ H,回收复用电感 L_{12} 为 78 μ H,储能电容 C_1 为 40 μ F,负载采用 3 μ H 的电感,其阻值为 150 m Ω 。充电机前置为电容器供电,初始电压为 100 V。取等效供电电压 $U_e=90$ V,储能电容器的初始电压 $U_0=0$ V,则可以得出 $U_M=180$ V。当预设充电电压 U_{set} 的值小于 180 V 时,升压开关不启动,本次电路工作在降压状态,否则升压开关开启,工作在升压状态。在预设充电电压为 150 V 和 200 V 时,设定工作模式为单次充电。其工作在降压工作模式和升压工作模式的电源工

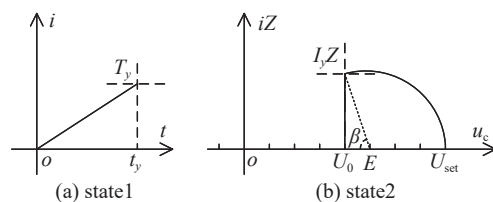


Fig. 3 Charging state diagram of the first stage and the second stage under boost operation mode

图 3 升压工作模式下第一阶段和第二阶段充电状态图

作波形仿真如图4所示。其充电过程中输入系统的总能量与系统所需总能量、系统升压所需总能量的变化关系如图5所示。预设充电电压为150V的时候,电路工作在降压工作模式。在充电零时刻,仅充电开关 S_1 开启,升压开关 S_2 保持关闭状态,当输入系统的总能量大于等于系统所需总能量的时候,充电开关 S_1 关闭,充电结束,其能量与开关的关系如图5(a)所示,本次充电过程中系统升压所需总能量 $W_{S_2}=0$ J,系统所需总能量 $W_{S_1}=0.45$ J,储能电容 C_1 上的充电电压为148.5V。预设充电电压为200V的时候,电路工作在升压工作模式。在充电零时刻充电开关 S_1 和升压开关 S_2 同时开启,系统输入总能量达到储能电感所需储存的总能量时,即输入系统的总能量大于等于系统升压所需总能量时,升压开关 S_2 关闭,充电开关 S_1 保持开通状态,此时,输入系统的总能量继续增加。当输入系统的总能量大于等于系统所需总能量的时候,充电开关 S_1 关闭,充电结束,其能量与开关的关系如图5(b)所示,本次充电过程中系统升压所需总能量 $W_{S_2}=0.08$ J,系统所需总能量 $W_{S_1}=0.8$ J,储能电容 C_1 上的充电电压为199.7V。仿真结果表明该电源具有更高的升压能力,其工作过程与原理分析相吻合。

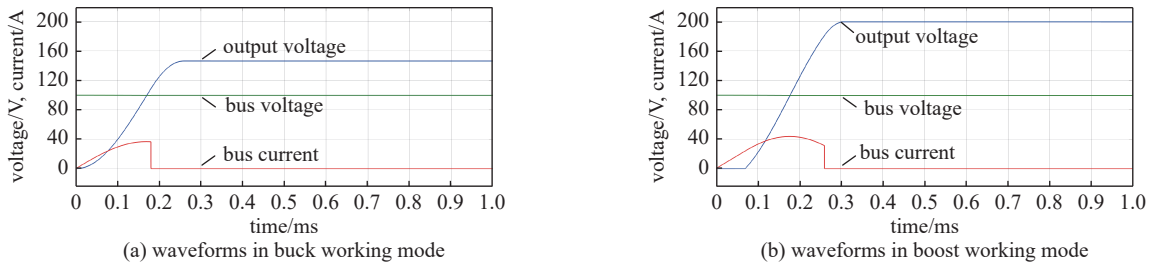


Fig. 4 Simulation of power supply waveform under two operating modes

图4 两种工作模式下电源的工作波形仿真

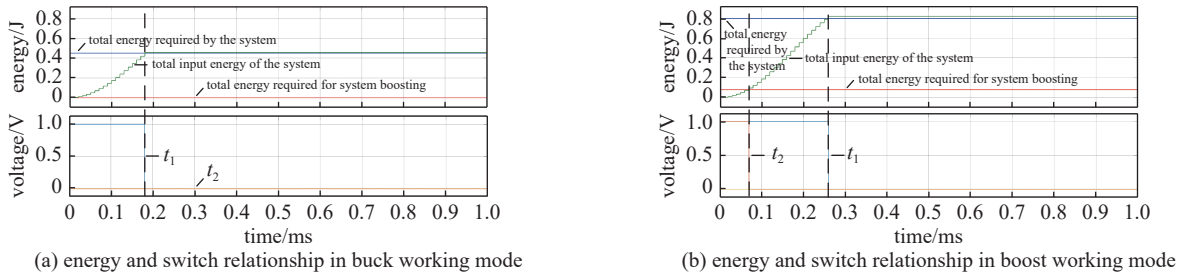


Fig. 5 Relationship between energy and switch in the system

图5 系统中能量与开关的关系

图6为 $U_{set}=200$ V时,单周期内母线电压变化时电源的工作波形,储能电容 C_1 上的充电电压为201.2V。

当充电机以1000Hz重复频率运行时,其母线电压,母线电流,储能电容器电压的波形如图7所示。图7(a)为预设充电电压为150V时,电源在降压模式下的工作波形,储能电容 C_1 上的充电电压变化范围为148.5~150.3V。图7(b)为预设充电电压为200V时,电源在升压模式下的工作波形,储能电容 C_1 上的充电电压变化范围为197.9~200.1V。

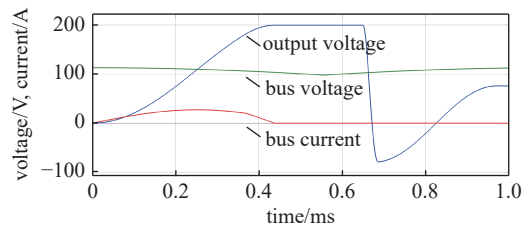


Fig. 6 Waveforms of supply voltage fluctuation in a single cycle

图6 单周期内母线电压变化时工作波形

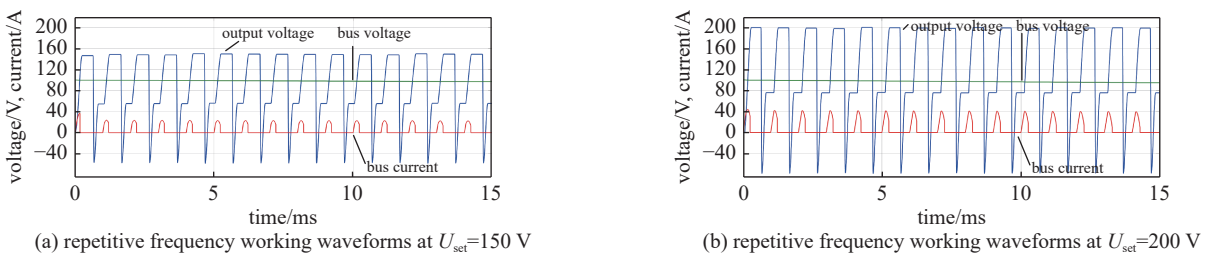


Fig. 7 1000 Hz repetition frequency simulation waveforms of power supply under two operating modes

图7 两种工作模式下电源1000Hz重复仿真波形

仿真结果表明,该电源能够以 1000 Hz 重复频率运行。

根据上述的仿真波形,该电源能够实现升压和降压两种工作模式,具有更广的电压输出范围,调压方便。在前置为电容器供电的情况下,供电电压存在波动,电源仍能正常工作,对输入电压具有较好的适应性。当电源以 1000 Hz 重频运行时,从仿真波形来看具有较高的充电精度和较好的充电一致性。仿真结果符合理论推导。

2.2 实验

基于上述仿真的设计参数,对本文所设计的脉冲充电电源进行样机的研制。电路中的能量传输存在损耗,需要对降压工作模式下的最大升压能力进行测量。如图 8(a)所示,CH1 是储能电容器电压波形,CH2 是母线电流波形,CH4 是供电电压波形。当充电开关一直处于开启状态,升压开关关闭,当电流过零点时,充电开关关断,此时充电开关的开通时间 t_1 约为 373.4 μs 时,达到降压工作模式下的最大升压,即 $U_M=180\text{ V}$,因而设定等效供电电压 $U_e=90\text{ V}$ 。分别设定 $U_{\text{set}}=150\text{ V}$ 和 $U_{\text{set}}=200\text{ V}$,电源工作在降压和升压工作模式下。图 8(b)为电源工作在降压模式下的波形,仅充电开关 S_1 启动,达到充电所需总能量时关断,此时充电开关的开通时间 t_1 约为 218 μs ,储能电容 C_1 上的电压约为 150.7 V,达到预期升压目标。图 8(c)为电源工作在升压模式下的波形,充电有两个阶段:第一个阶段升压开关 S_2 和充电开关 S_1 同时开启,电感储能;第二个阶段充电开关 S_1 关闭,对储能电容器进行谐振充电,此时充电开关的开通时间 t_1 约为 248 μs ,升压开关的开通时间 t_2 约为 111 μs ,储能电容 C_1 上的电压约为 195.2 V,达到预期升压目标。实验结果表明,该电路具有更高的电压升压能力,实验结果与原理分析相吻合。

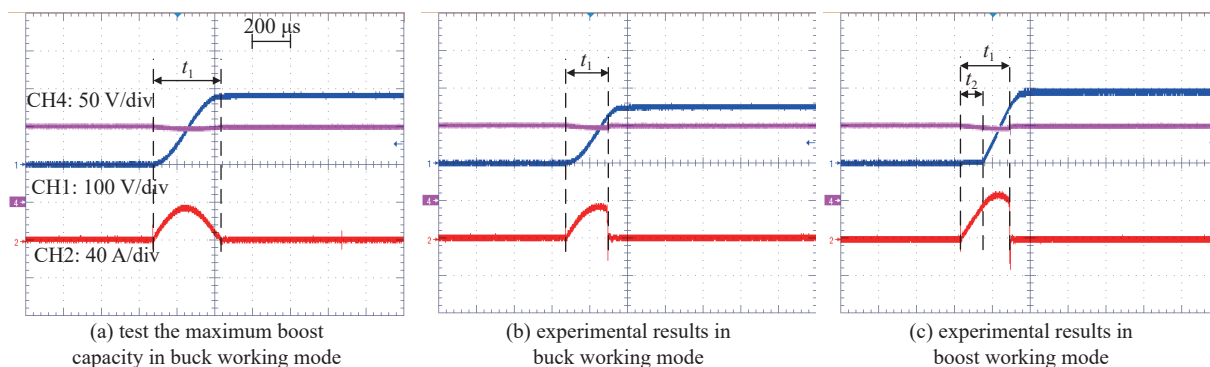


Fig. 8 Waveforms of the power supply

图 8 电源工作波形

图 9 给出了在预设充电电压为 $U_{\text{set}}=150\text{ V}$,供电电压波动的时候电源的工作波形。在电容器供电的情况下,随着系统中能量的转移,供电电容器不停的对后级补充能量,同时供电电容器本身存在掉电的现象,因而本次实验中,母线电压必然会出现波动的情况。CH1、CH2、CH3 通道分别表示的是储能电容电压、母线电流和母线电压在充电期间的变化。母线电压在供电期间一直处于下降状态,最低点仅为初始供电电压的 60% 左右,储能电容 C_1 上的最大充电电压约为 151.6 V,最小充电电压约为 149.3 V。实验结果表明该电源对供电电压波动具有一定的适应能力。

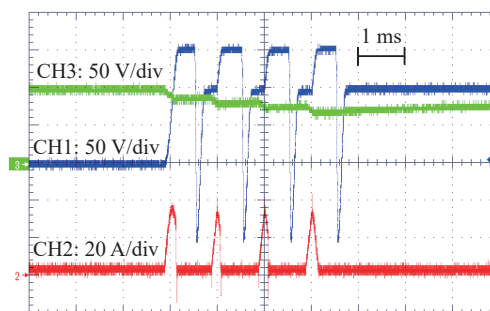


Fig. 9 Waveforms of power supply under unstable supply voltage

图 9 供电电压不稳定时电源的工作波形

图 10 给出了电源在预设电压在 $U_{\text{set}}=150\text{ V}$ 和 $U_{\text{set}}=200\text{ V}$ 的条件下,以 1000 Hz 的重复频率运行的波形,图 10(a)中储能电容器上的充电电压变化范围为 146~154 V,图 10(b)中储能电容器上的充电电压变化范围为 195.6 V~201 V。对于该充电电源来说,越高的采样频率越能准确的计算出输入系统的总能量变化情况,同时充电电压越高,其储能所需要的能量也就越大,单位采样周期内其计算出的输入系统的总能量也就越大,所造成的误差也就越小。随着采样频率和充电电压的提高,其精度也就越高。实验结果表明,该电源能够以 1000 Hz 重复频率运行。

3 结论

本文提出了一种带有升压结构的 LC 充电电源,相较于传统的 LC 谐振充电电源,其在结构上取消了大容量电抗器、软启动电路和大容量滤波电容,因而该改进方案具有更小的体积。通过引入了升压结构,使得储能电容器

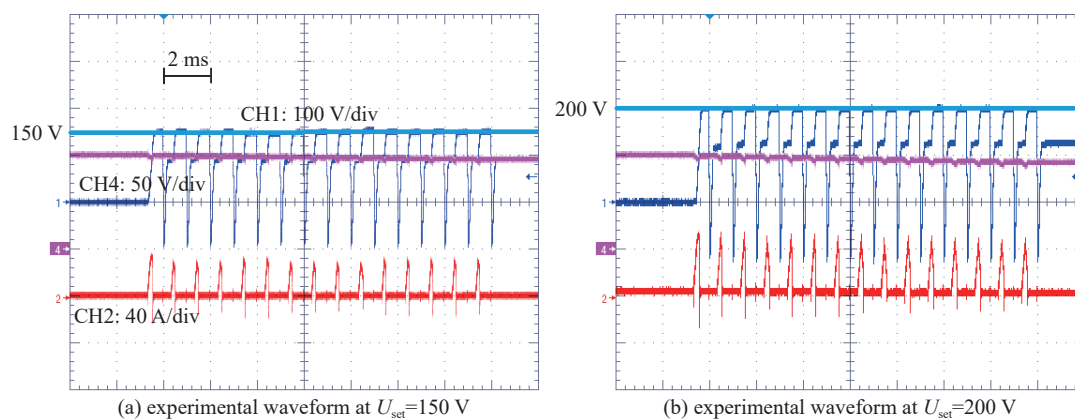


Fig. 10 1000 Hz repetition frequency waveforms of power supply under two operating modes

图 10 两种工作模式下电源 1000 Hz 高频波形

的电压具有更广的输出范围,并且调压方便。在控制方法上引入了基于实时能量检测的方法来解决输入电压波动的问题。充分发挥出 LC 谐振充电方案的电路结构简单、电效率高、高重频时体积小等优点,有利于脉冲功率系统的小型化。实验结果表明:(1)该设计方案能够根据需要将负载电容充到设定电压,验证了升降压的工作能力和控制方法准确性;(2)在供电电压变化条件下,充电电压仍然能够保持稳定,体现了控制方法对供电电压的适应性;(3)在 1 kHz 重频条件下,充电电压偏差约为 5 V,对充电偏差进行了分析;(4)实验结果与理论分析和仿真结果基本一致。

参考文献:

- [1] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025002. (Cong Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025002)
- [2] 钱宝良. 国外高功率微波技术的研究现状与发展趋势[J]. *真空电子技术*, 2015(2): 1-7. (Qian Baoliang. The research status and developing tendency of high power microwave technology in foreign countries[J]. *Vacuum Electronics*, 2015(2): 1-7)
- [3] Korovin S D, Rostov V V, Polevin S D, et al. Pulsed power-driven high-power microwave sources[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(7): 1082-1095.
- [4] 李名加, 康强, 常安碧, 等. 紧凑型重复频率高压脉冲变压器研制[J]. *高电压技术*, 2009, 35(2): 340-343. (Li Mingjia, Kang Qiang, Chang Anbi, et al. Development of a compact repetitive high-voltage pulse transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(2): 340-343)
- [5] 甘延青, 宋法伦, 李飞, 等. 高功率重复频率脉冲充电电源设计与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 065003. (Gan Yanqing, Song Falun, Li Fei, et al. Design and experimental research of high power repetitive pulse charging power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 065003)
- [6] 冯传均, 何决, 戴文峰, 等. 串联谐振高压电容充电电源设计及分析[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 055002. (Feng Chuanjun, He Yang, Dai Wenfeng, et al. Design and analysis of series resonant high voltage capacitor charging power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 055002)
- [7] 张天洋. 高功率脉冲驱动源的初级储能充电系统及其关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016. (Zhang Tianyang. Investigation of primary energy supply system in high power pulse generators and related technologies[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016)
- [8] 乔汉青, 樊亚军, 夏文锋, 等. 时基反馈控制的Tesla变压器初级电源[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 085005. (Qiao Hanqing, Fan Yajun, Xia Wenfeng, et al. Time-base feedback controlled primary source of Tesla transformer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 085005)
- [9] Jiang W, Matsuda T, Yatsui K, et al. High repetition-rate, low jitter pulsed power generator for excimer laser applications[C]//Proceedings of the 25th International Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. 2002: 605-607.
- [10] 李伟. 脉冲功率系统中能量回收电路的改进[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 055001. (Li Wei. Improvement of energy recovery circuit in pulsed power system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 055001)
- [11] 李亚维, 邓建军, 谢敏, 等. 800 kV/100 Hz高功率微波驱动电源控制系统[J]. *高电压技术*, 2009, 35(6): 1426-1429. (Li Yawei, Deng Jianjun, Xie Min, et al. Control system of 800 kV/100 Hz high power microwave power supply[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(6): 1426-1429)
- [12] Wu Lin, Wang Jun, Liu Zhigang, et al. Analysis and design of LC series converter considering effect of parasitic components[C]//Proceedings of 2012 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring. 2012: 126-130.