

一种高效无感 AC/DC 开关电源拓扑结构

崔俊国

(芜湖锐芯电子科技有限公司, 上海 201199)

摘要: 提出一种高效率无电感的 AC/DC 开关电源拓扑结构。通过对中间储能电容放电电压(放电时间)最终值的控制, 实现对该储能电容充电电压(充电时间)的控制, 进而实现 AC 周期内的输出端稳压恒流。在中间储能电容充放电过程中, AC 输入能量通过中间储能电容直接传输给负载端; 同时中间储能电容充电阶段存储的能量在中间储能电容放电阶段也全部传输给负载端, 从而提高了 AC 能量传输效率, 进而提高了整个电路的效率。在中间储能电容充放电过程中, AC 输入电压的时间变化率决定中间储能电容的充放电电流瞬时值, 进而决定了输入电流瞬时值。

关键词: 高效率; 开关电源; 无电感

中图分类号: TN86

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200247

中文引用格式: 崔俊国. 一种高效无感 AC/DC 开关电源拓扑结构[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 114–117.

英文引用格式: Cui Junguo. A high efficiency AC/DC switching mode power supply topology without inductor[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 114–117.

A high efficiency AC/DC switching mode power supply topology without inductor

Cui Junguo

(Wuhu Risingchip Electronic Technology, Co., Ltd, Shanghai 201209, China)

Abstract: This paper presents a high efficiency AC/DC switching power supply topology without inductor. Through the control of the final discharging voltage(discharge time) of the energy-storage capacitor, the initial charging voltage of the capacitor is controlled. So the output load can get the constant voltage or constant current. In the charging and discharging process of the energy-storage capacitor, the AC input energy is directly transmitted to the load terminal through the energy-storage capacitor. At the same time, the energy stored in the energy-storage capacitor is fully transferred to the load terminal. So this topology transition efficiency is high. In the charging and discharging process of the energy-storage capacitor, the rate of the AC input voltage determines the instantaneous value of the charging and discharging current of the energy-storage capacitor, and then determines the instantaneous value of the input current.

Key words: high efficiency; switching mode power supply; non-inductor

0 引言

近年来, 开关电源由于具有效率高、体积小、重量轻等许多优点而被广泛应用于通信、家电、电子、电气、能源、航空航天等领域^[1-2]。大多开关电源采用了变压器(电感)、功率半导体器件、电容和控制集成电路作为核心器件^[3], 其中电感和变压器是开关电源中少数不能标准化的器件之一^[4], 以用户定制生产为主, 属于劳动密集型产业。

鉴于这一现状, 本文提出一种高效率无电感的 AC/DC 开关电源拓扑结构及其控制方法, 该 AC/DC 电源电路在交流电源电压幅值高于中间储能电容电压与负载电压之和时, 交流电源对中间储能电容充电并向负载提供能量; 在交流电源电压幅值低于中间储能电容电压与负载电压之和, 并且交流电源电压幅值高于负载电压与中间储能电容电压之差时, 交流电源与中间储能电容共同

向负载提供能量, 中间储能电容放电。控制中间储能电容放电电压的幅值或放电时间, 可实现输出端稳压恒流。本文电路功率器件开关损耗低, 转换效率高, 并有较好的抗雷击浪涌的能力。最后用原理样机验证了本电路效率高达 94%。

1 基本拓扑与工作原理

本文提出的高效率无电感的 AC/DC 开关电源基本拓扑结构如图 1 所示。

本拓扑结构由整流桥(D1~D4)、限流充电可控放电桥式电路和负载滤波电容(C_2)组成。其中限流充电可控放电桥式电路是本电路的核心部分, 由二极管(D5 和 D6)、中间储能电容 C_1 和开关器件(M1 和 M2)构成。

根据电容的充放电平衡原理, 中间储能电容 C_1 充电时正的电压增加量和中间储能电容 C_1 放电时负的电压减少量相等, 可用式(1)表示:

《电子技术应用》2020 年 第 46 卷 第 9 期

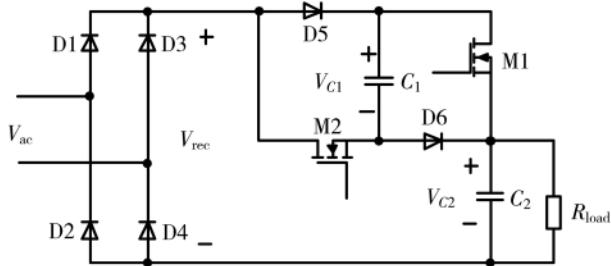


图 1 高效无感 AC/DC 电源拓扑结构

$$V_{C1(\text{charging})} = -\Delta V_{C1(\text{discharging})} \quad (1)$$

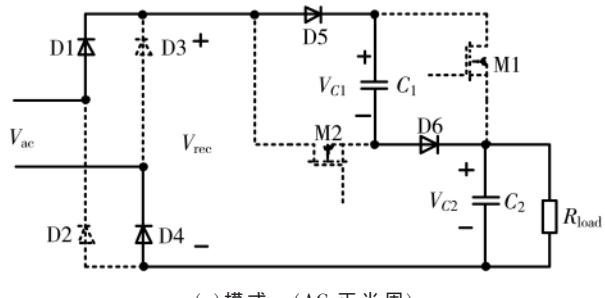
开关器件 M1 和开关器件 M2 工作在开关状态，根据中间储能电容 C_1 充放电状态(电流流向)，本拓扑结构分为 3 种工作模式。

1.1 工作模式一—工作状态分析

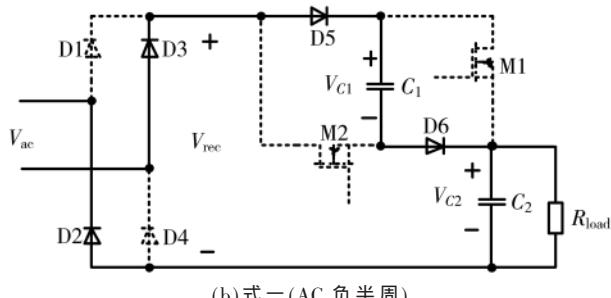
交流电源经由整流桥、二极管 D5、中间储能电容 C_1 及二极管 D6 向输出滤波电容 C_2 和负载 R_{load} 提供能量，中间储能电容 C_1 充电。工作模式一等效电路如图 2 所示。负载电流 $i_{R_{\text{load}}}$ 、输入电流 i_{in} 与输出电压 V_{C2} 、输入电压 V_{ac} 之间关系如下：

$$i_{R_{\text{load}}} = C_1 \cdot \frac{dV_{\text{ac}}}{dt} - (C_1 + C_2) \cdot \frac{dV_{C2}}{dt} \quad (2)$$

$$i_{\text{in}} = C_1 \cdot \frac{dV_{C1}}{dt} \quad (3)$$



(a) 模式一(AC 正半周)



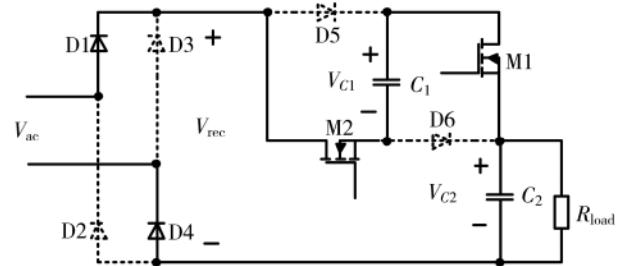
(b) 模式一(AC 负半周)

图 2 工作模式一等效电路图

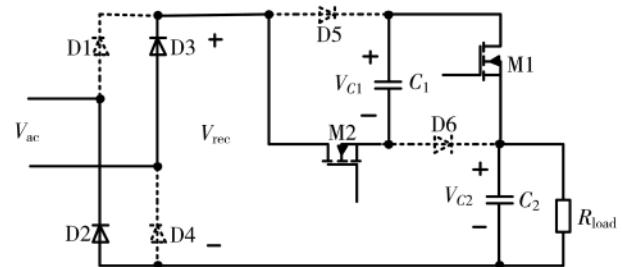
1.2 工作模式二—工作状态分析

交流电源经由整流桥、开关器件 M2、中间储能电容 C_1 及开关器件 M1 向输出滤波电容 C_2 和负载 R_{load} 提供能量，中间储能电容 C_1 放电。工作模式二等效电路如图 3 所示。

$$i_{R_{\text{load}}} = C_1 \cdot \frac{dV_{\text{ac}}}{dt} - (C_1 + C_2) \cdot \frac{dV_{C2}}{dt} \quad (4)$$



(a) 模式二(AC 正半周)



(b) 模式二(AC 负半周)

图 3 工作模式二等效电路图

$$i_{\text{in}} = -C_1 \cdot \frac{dV_{C1}}{dt} \quad (5)$$

1.3 工作模式三—工作状态分析

交流电源不对中间储能电容 C_1 充放电，也没有能量传输给输出滤波电容 C_2 和负载 R_{load} 。工作模式三等效电路图如图 4 所示。

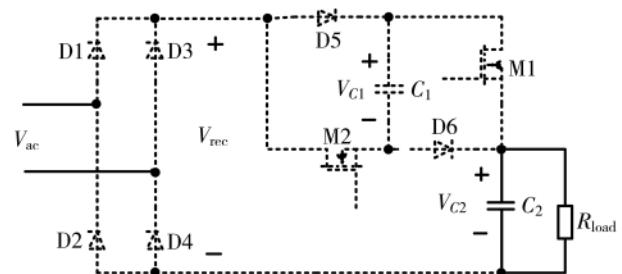


图 4 工作模式三等效电路图

$$i_{R_{\text{load}}} = \frac{V_{C2}}{R_{\text{load}}} \quad (6)$$

$$i_{\text{in}} = 0 \quad (7)$$

2 工作过程分析

因为 AC 输入电压的正半周期和负半周期的对称性，所以只需要分析交流输入的半个周期中本拓扑结构的工作状态，再根据同样的原理就可以分析本拓扑结构整个工作状态。以下主要分析 AC 输入的正半周工作状态。交流周期内主要波形如图 5 所示。

(1) t_0 时刻，输入 AC 电压过零点，给开关器件 M1 和开关器件 M2 的栅极开通驱动信号， $V_{\text{ac}(t)} < V_{C2(t)} - V_{C1(t)}$ ，整流桥未导通，开关器件 M1 和开关器件 M2 没有电流流过。

(2) $t_0 \sim t_1$ 时间段，输出电容 C_2 给负载供电。本文电路处于模式三工作状态。

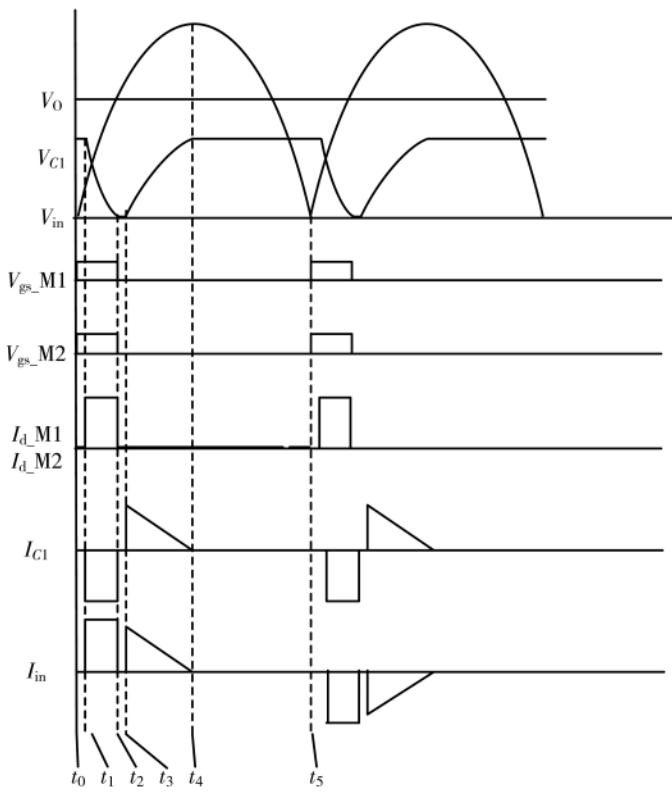


图 5 交流周期内主要波形

(3) t_1 时刻, $V_{ac_{(t)}} - V_{diode} < V_{C2_{(t)}} - V_{C1_{(t)}}$, 开关器件 M1 和开关器件 M2 零电压开通, 开始流过电流。

(4) $t_1 \sim t_2$ 时间段, 输入电压 V_{ac} 通过整流桥、M2、 C_1 、M1 向输出端供电, C_1 进入放电状态, C_1 电压逐渐降低, 输入电压 V_{ac} 和中间储能电容 C_1 共同向负载端传输能量。本文电路处于模式二工作状态。

在 $t_1 \sim t_2$ 时间段期间, 可以给开关器件 M1 或开关器件 M2 的栅极关断驱动信号, 切断 V_{ac} 经整流桥、M2、 C_1 、M1 到负载端的流通路径, 中间储能电容 C_1 没有彻底放电, 从而可以控制 $t_3 \sim t_4$ 的充电时间(充电电压初始值),进而控制模式一状态。

(5) t_2 时刻, $V_{ac_{(t)}} - V_{diode} = V_{C2_{(t)}}$, 开关器件 M1 和开关器件 M2 零电压关断, V_{ac} 经整流桥、M2、 C_1 、M1 到负载端的流通路径截至。

(6) $t_2 \sim t_3$ 时间段, 输出电容 C_2 给负载供电。本文电路处于模式三工作状态。

(7) t_3 时刻, $V_{ac_{(t)}} - 3V_{diode} = V_{C2_{(t)}} + V_{C1_{(t)}}$, 二极管 D5 和 D6 零电压导通, 形成 V_{ac} 经整流桥、D5、 C_1 、D6 到负载端的流通路径。

(8) $t_3 \sim t_4$ 时间段, 输入电压 V_{ac} 通过整流桥、D5、 C_1 、D6 向输出端供电, C_1 进入充电状态, C_1 电压逐渐升高, 输入电压 V_{ac} 向中间储能电容 C_1 和负载端传输能量。本文电路处于模式一工作状态。

(9) t_4 时刻, $V_{ac_{(t)}}$ 达到峰值, 中间储能电容 C_1 充电到

最大值, 充电结束, 二极管 D5 和 D6 零电流关断, V_{ac} 经整流桥、D5、 C_1 、D6 到负载端的流通路径截至。

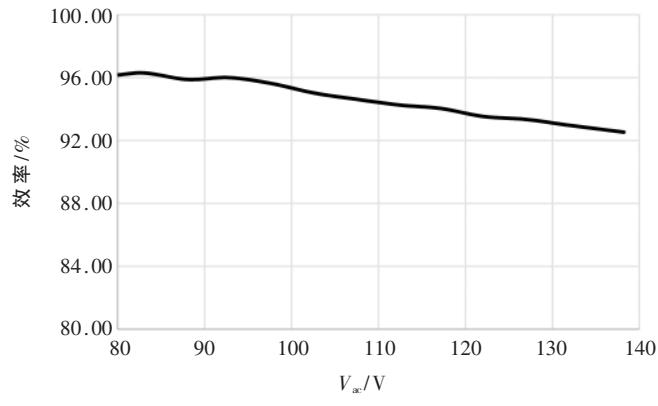
(10) $t_4 \sim t_5$ 时间段, 输出电容 C_2 给负载供电。本文电路处于模式三工作状态。

3 试验验证

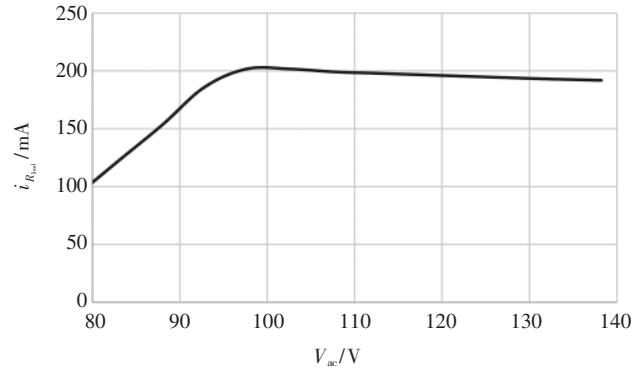
为了验证理论的正确性, 对本拓扑电路进行了试验验证。制作了 200 mA 的恒流源原理样机, 样机关键参数如表 1 所示。试验结果如图 6 所示。

表 1 样机参数

参数	数值
输入电压 V_{ac}	±120 VAC 15%/60 Hz
输出电流 $i_{R_{load}}$ /mA	200
额定输出电压 V_{C2}/V	100
中间储能电容 C_1	22 μF/100 V
输出滤波电容 C_2	100 μF/200 V



(a) 效率



(b) 线性调整率

图 6 样机试验结果

为了制作样机方便, 外置开关器件 M1 和 M2 的驱动电源, 即效率曲线中不包含开关器件 M1 和 M2 的驱动损耗。在此条件下, 20 W 的恒流源样机效率在 94% 左右。

4 原理拓扑延伸

本拓扑结构的核心部分是限流充电可控放电桥式电路, 其中中间储能电容 C_1 可以用图 7 所示的储能电容网络来替代, 这里选择逐流电路^[5]作为储能电容网

络，则：

(1)充电路径：交流电源经由整流桥、二极管D5、中间储能电容C₁及二极管D6向输出滤波电容C₂和负载R_{load}提供能量，转换为交流电源经由整流桥、二极管D5、储能电容网络(C₃、D8、C₄串联)、二极管D6向输出滤波电容C₂和负载R_{load}提供能量。

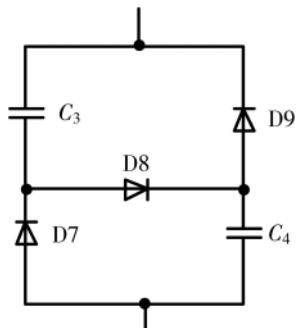


图7 储能电容网络

(2)放电路径：交流电源

经由整流桥、开关器件M2、中间储能电容C₁及开关器件M1向输出滤波电容C₂和负载R_{load}提供能，转换为交流电源经由整流桥、开关器件M2、储能电容网络(D7、C₃并联C₄、D9)及开关器件M1向输出滤波电容C₂和负载R_{load}提供能量。

5 结论

本文提出一种高效率无电感的AC/DC开关电源拓扑结构及其控制方法，详细分析了工作机理和工作过程，原理样机验证本拓扑结构效率高达94%，进一步分析了用逐流电路替代中间储能电容的可行性。本拓扑结构本质特征：

(1)中间储能电容C₁和负载电容C₂串联，由交流输入电源充电。

(2)中间储能电容C₁和交流输入电源串联，向负载

电容C₂放电。

试验证明，本拓扑结构有以下特点：

- (1)降压型拓扑结构。
- (2)功率开关器件零电压开通，工作在开关状态。
- (3)二极管零电流关断，无二极管反向恢复损耗。
- (4)有较好的抗击雷击浪涌的能力。

参考文献

- [1] 刁明君.开关电源的研究发展综述[J].通信电源技术, 2018, 35(7): 89–93.
- [2] 张治国, 谢运祥, 袁兆梅.高频LCC谐振变换器的分析与轨迹控制[J].中国电机工程学报, 2011, 31(27): 52–58.
- [3] ABDI B, RANJBAR A H, GHAREHPETIAN G B. Reliability considerations for parallel performance of semiconductor switches in high-power switching power supplies[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009(6): 2133–2139.
- [4] 钟景高, 王上衡, 王东.关于提升绕线电感器焊接可靠性研究[J].电子技术, 2017(7): 48–50.
- [5] 杨庆江, 刘晓红.提高无源逐流电路功率因数的一种方法[J].现代电子技术, 2011, 34(1): 200–202.
- [6] 韩德强, 冯云贺, 王宗侠, 等.Simics环境下故障注入的研究与实现[J].电子技术应用, 2015, 41(1): 21–24.

(收稿日期: 2020-03-29)

作者简介:

崔俊国(1976-)，男，博士，主要研究方向：电力电子、开关电源、隔离驱动等。

(上接第113页)

表3 光纤传输测试结果

帧数据容量	测试次数	出错次数
16 bit×64	50	0
16 bit×128	50	0
16 bit×256	50	0

确进行完整的数据通信。

4 结论

本文设计了一套基于FPGA的通用光纤通信系统，在硬件设计基础上通过FPGA逻辑实现了完整的数据传输流程。光纤通信有效速率可达1.6 Gb/s，该系统通用性强、结构简捷、性能可靠，具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 黄林达.基于PCI Express-FC协议高速数据传输模块的设计[D].成都:电子科技大学, 2015.
- [2] 朱琛, 崔镭, 邵春伟, 等.基于FPGA的高速光纤传输卡[J].电子与封装, 2018, 18(3): 22–25.

[3] 袁行猛, 徐兰天.基于FPGA的高速光纤通信基带板的设计[J].电子产品世界, 2018, 25(7): 58–61.

[4] 刘天华.数字图像远程光纤传输与以太网高速通信系统设计[D].重庆:重庆大学, 2018.

[5] 王国忠, 刘磊, 储成群.基于USB3.0高速图像数据传输系统设计[J].仪表技术与传感器, 2019(3): 107–109.

[6] 岳建民.红外阵列半实物仿真中光纤高速传输技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.

[7] 杨亚涛, 曲鸣, 曹广灿, 等.支持多安全运算模块的USB3.0控制器固件设计[J].电子科技大学学报, 2019, 48(2): 196–198.

[8] 陈国松.基于FPGA和USB3.0的图像信息采集与处理系统设计与实现[D].长春:吉林大学, 2019.

(收稿日期: 2020-04-10)

作者简介:

杨春玲(1965-)，女，教授，主要研究方向：电子系统设计、FPGA应用及算法硬件加速。

左令(1997-)，男，硕士研究生，主要研究方向：FPGA应用及算法硬件加速。

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