

# 基于多端Flyback拓扑的功率变换系统研究

杜吉飞<sup>1,2</sup>, 穆云飞<sup>1</sup>, 李小滨<sup>2</sup>, 赵凌志<sup>3</sup>, 缪永丽<sup>3</sup>, 王丽<sup>3</sup>, 孙强<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津

<sup>2</sup>珠海泰坦电力电子集团有限公司, 广东 珠海

<sup>3</sup>天津农学院工程技术学院, 天津

收稿日期: 2023年3月24日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

## 摘要

反激式功率变换器结构简单, 转换效率高, 损耗小, 能提供多路直流输出, 因而得以广泛应用。本文首先分析了当前功率变换器的研究现状与发展趋势, 明确了设计与改进的方向。其次, 分析了单端Flyback型功率变换器的工作原理, 并对一些重要模块进行了详细的研究。对于变换器功率因数不高的问题、谐波治理的问题, 提出了改进思路, 进行了电路拓扑结构优化。仿真实验结果表明, 本文所设计的基于反激式拓扑的功率变换系统具有电路结构简单、效率高、电路稳定性高、电路损耗小等特点, 能实现单相输入交流电压转变为多路隔离输出的直流电压, 具有很高的应用价值。

## 关键词

功率变换器, 反激式拓扑, 多路输出

# The Study on Power Converter System Based on Multi-End Flyback Topology

Jifei Du<sup>1,2</sup>, Yunfei Mu<sup>1</sup>, Xiaobin Li<sup>2</sup>, Lingzhi Zhao<sup>3</sup>, Yongli Miao<sup>3</sup>, Li Wang<sup>3</sup>, Qiang Sun<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin

<sup>2</sup>Zhuhai Titans Power Electronics Group Co., Ltd., Zhuhai Guangdong

<sup>3</sup>College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin

Received: Mar. 24<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

As an important type of power converter, flyback switching power supply has simple circuit structure, high conversion efficiency, small loss, and it can provide multi-channel AC output, so it is widely

\*通讯作者。

文章引用: 杜吉飞, 穆云飞, 李小滨, 赵凌志, 缪永丽, 王丽, 孙强. 基于多端 Flyback 拓扑的功率变换系统研究[J]. 动力系统与控制, 2023, 12(2): 98-104. DOI: 10.12677/dsc.2023.122010

used. In this paper, the feasibility of using a single-ended flybackpower converter to realize a certain voltage level of DC is verified. Firstly, the current research status and development trend of switching power supply are analyzed, and the direction of design and improvement is made clear. Secondly, the working principle of single-ended flybackpower converter is analyzed, and some important modules are studied in details. For the common problems of switching power supply, such as low power factor and harmonic control, this paper puts forward the improvement idea and carries out the circuit structure optimization. The simulation results show that the power converter employing flyback topology in this paper has the characteristics of simple circuit structure, high circuit stability, less test ripple and so on. It can realize the transformation of single-phase input AC voltage into multi-channel isolated output DC voltage, and has a high practical value.

## Keywords

Power Converter, Flyback Topology, Multi-Output

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

随着经济社会的发展,电能运用领域的不断拓展,也对电能的转换提出了新的要求。不同的电压等级的交直流电源适用于不同的场合。尤其是在电气控制等领域,对直流电源的需求日益增加。在现代电子设备设计中,节约电源成本,提高电源转换效率日益受到人们的关注[1][2]。开关电源的产生与发展伴随着电力电子技术,并与之相辅相成,互相促进。

20世纪50年代,开关电源领域开始受到科学家和技术人员的关注,美国科学家罗耶在1955年发明了直流变换器,它首次采用了脉冲宽度调制控制,开启了开关电源研究的大门。接下来的十几年中,伴随着高频开关器件的发展,开关电源的研究转入高频领域[3][4]。如今,+5V、+12V、+24V等电压等级的直流电较为常见,这些直流电一般通过开关电源变换后得来。在生活中,开关电源广泛用于手机充电、USB接口供电、电脑供电等,让我们的生活丰富多彩。在工业、航天、国防等重点领域,开关电源是各种控制系统的重要组成部分,起到不可替代的作用,是名副其实的众多“幕后英雄”之一。

## 2. 反激式开关电源工作原理

### 2.1. 反激式开关电源基本流程

反激式开关电源的基本流程图如下图1所示,其中包括功率因数补偿模块、滤波模块、整流模块、降压变压器、稳压模块、采样反馈模块和直流输出模块等。

在交流输入模块中,220V的工频交流电通过功率因数补偿模块、滤波模块后流入开关电源的整流模块的交流侧。整流模块的直流侧与降压变压器的一次侧相连。降压变压器的二次侧与滤波模块相连。滤波模块与稳压模块相连。经过稳压模块得到的直流电在直流输出模块中对外电路输出。在直流输出模块中的直流电通过采样模块反馈给稳压模块,实现反馈控制,因而得到更为稳定的直流输出电压。

### 2.2. 单端反激式开关电源拓扑结构分析

反激变换器(Flyback Converter)主要由功率开关管VF(这里使用的是IGBT)、整流二极管VD、电容 $C_f$ 和变压器 $T$ 构成。反激式开关电源的基本结构如下图2所示。

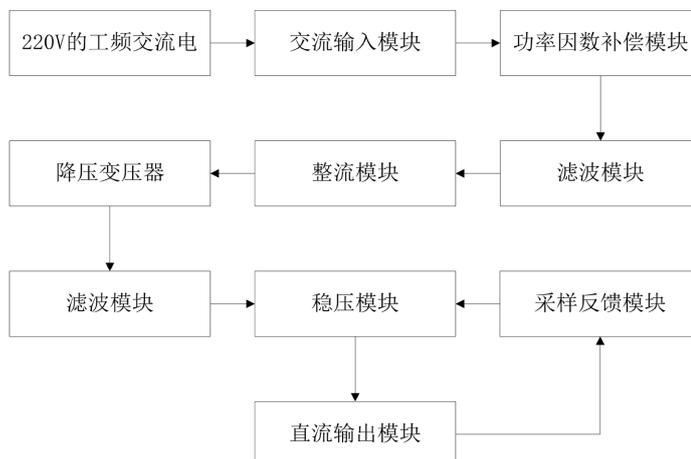


Figure 1. Flow chart of flyback switching power supply

图 1. 反激式开关电源的基本流程图

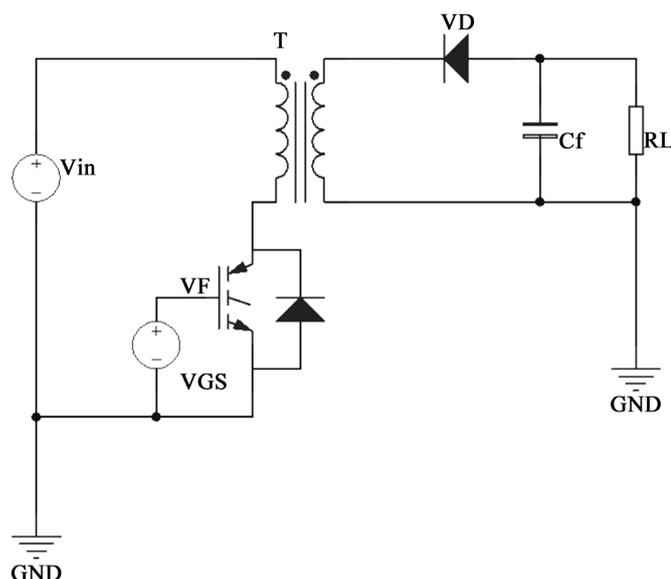


Figure 2. Schematic diagram of flyback switching power supply

图 2. 反激式开关电源基本原理图

简而言之，反激式变换器工作过程分两步：

1) 当开关管 VF 导通时，一次侧绕组将输入端电能转换为磁能存储进铁芯。此时，二极管 VD 承受反向电压而关断，负载 RL 通过电容 Cf 维持一定的电压。

2) 当开关管 VF 关断时，二极管 VD 承受正向电压而开通，铁芯中存储的磁能通过二次侧绕组给电容充电，同时给负载供电。

### 2.3. 反激式开关电源工作模式分析

对于反激式开关电源来说，有两种工作模式，即电流连续工作模式和电流断续工作模式。电流连续工作模式是指变压器两个绕组的合成磁动势在一个周期中不为零，即变压器铁芯中的磁通恒不为零；电流断续工作模式是指变压器两个绕组的合成磁动势在开关管截止期间有一段时间为零，即变压器铁芯中的磁通在开关管截止期间有为零的时刻。假设变压器一次侧匝数为  $W_1$ ，二次侧匝数为  $W_2$ ，开关管 VF 的

占空比为  $D$ ，工作频率为  $f_s$ ，输入电压为  $V_{in}$ ，故有临界断续电流：

$$I_{OG} = I_o = \frac{V_{in}}{2Lf_s} \frac{W_1}{W_2} (1-D)D = 4I_{OG\max} (1-D)D \quad (1)$$

在电流连续工作续模式下，变压器铁芯中的磁通为零的时间(死区时间)为零。开关管每次开始导通时变压器铁芯中储存的磁能还有残留，这种剩余的磁能会随着工作时间延长而积累，导致变压器一次侧绕组电流不断呈阶梯形式上升。这就是连续工作模式下磁芯饱和的问题。当磁心饱和时，磁感应强度基本不变， $dB/dt$  近似为零，根据法拉第电磁感应定律，将不会产生自感电动势去抵消母线电压，又因为一次绕组线圈的电阻很小，母线电压几乎全部加在开关管上，开关管会瞬时损坏。

在断续工作模式下，死区时间保证了磁通的及时复位。因此，断续工作模式下开关电源工作稳定，在实际运用中广为采纳。而在断续工作模式下，反激式开关电源存在三种开关模式，如图 3 所示。

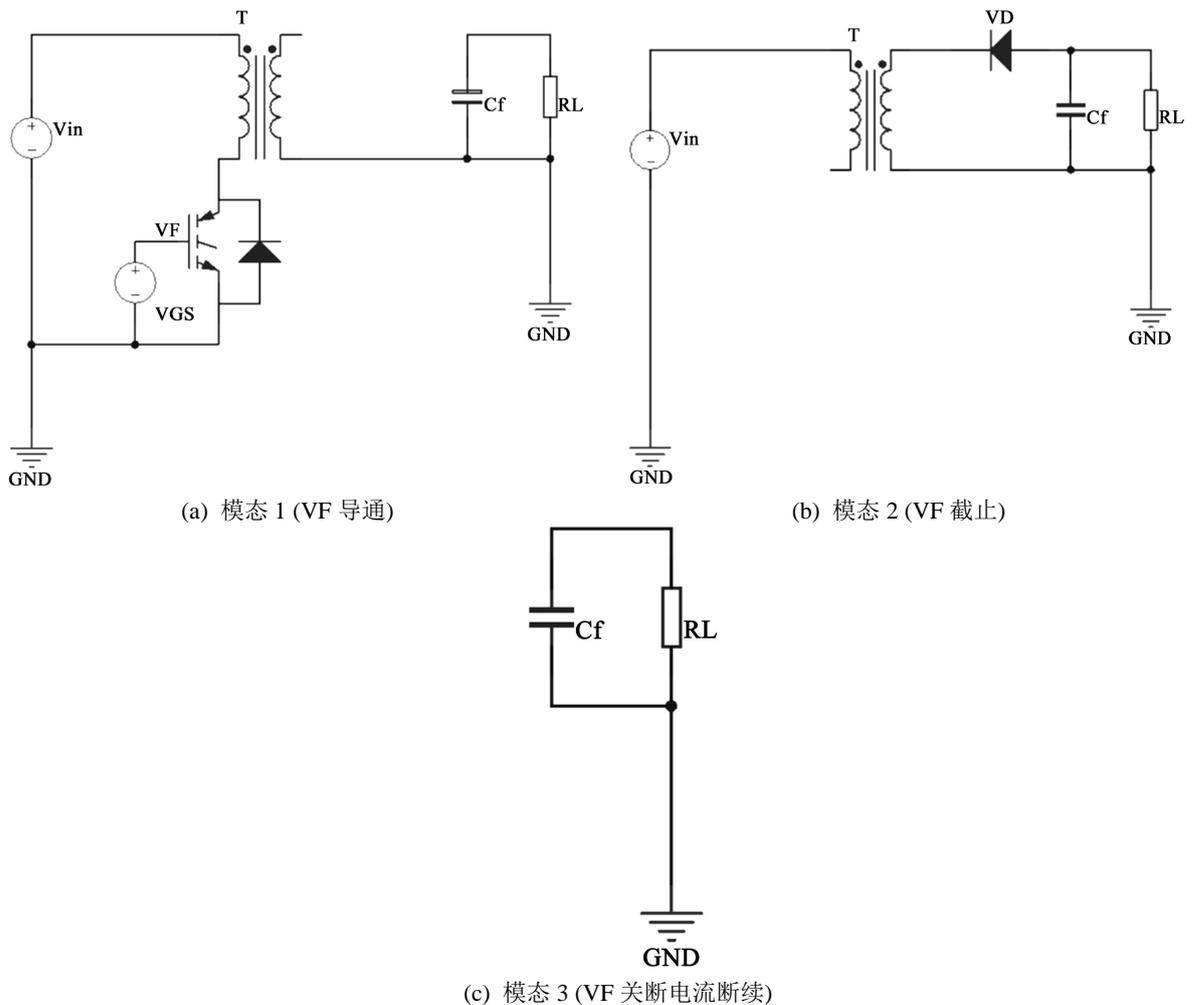


Figure 3. Switching mode

图 3. 开关模式

在模式 1 中，开关管 VF 导通，二次绕组不构成回路。整个变压器仅在一次侧有电流，一次侧的电流实现了从电能向磁能的转换。在这种状态下，铁芯磁通和一次侧电流从零开始线性增加。当将要进入模式 2 时，一次侧电流  $I_p$  达到最大值  $I_{p\max}$ ：

$$I_{p\max} = \frac{W_2}{W_1} \frac{1}{1-D} I_o + \frac{V_{in}}{2L_1 f_s} D \quad (2)$$

在模态 2 中, 开关管 VF 关断, 变压器二次侧电压只要大于输出电压(亦是电容  $C_f$  两端电压), 则二次侧通过二极管 VD 形成回路, 通过二次侧电流实现了从磁能向电能的转换。在这种状态下, 铁芯磁通从最大值开始线性减小至零。刚刚进入模态 2 时, 流过 VD 的电流的最大值为:

$$I_{s\max} = \frac{W_1}{W_2} I_{p\max} = \frac{1}{1-D} I_o + \frac{W_1}{W_2} \frac{V_{in}}{2L_1 f_s} D \quad (3)$$

在模态 3 中, 开关管 VF 仍然处于关断状态, 但变压器二次侧的电压低于电容电压, 因而变压器一次侧和二次侧均不形成回路, 仅仅靠电容维持负载电压。在这种状态下, 铁芯磁通为零, 变压器回归初始状态。而在实际的工作电路中, 开关管的开关频率变的很高, 加之滤波器的广泛使用, 输出电压的纹波减少, 电路的输出基本稳定。

电流断续时, 反激式开关电源输出电压  $V_o$  不仅与占空比  $D$  有关, 且与负载电流  $I_o$  有关, 具体表达式如下:

$$V_o = \frac{V_{in} W_2}{W_1} \frac{D}{1-D} = \frac{V_{in}^2 D^2}{2L_1 f_s I_o} \quad (4)$$

开关管 VF 和二极管 VD 工作分别承受一定的电压, 因此选择器件时, 其额定电压要大于其承受电压的最大值。开关管 VF 和二极管 VD 承受电压的最大值分别为:

$$V_{VF} = V_{in} + \frac{W_1}{W_2} V_o = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (5)$$

$$V_D = V_o + \frac{V_{in} W_2}{W_1} \quad (6)$$

### 3. 反激式开关电源仿真验证

通过上述对反激式开关电源进行的一系列分析、研究工作, 对反激式开关电源工作机理进行了系统地分析验证。最后, 还需进行电路模型搭建以及仿真分析的工作, 如图 4 所示。整个电路的工作原理: 输入电压经过整流桥将 220 V 交流电整流得到平均值为 198 V 的脉动直流电压, 然后通过电解电容 C1 将直流电压中交流部分滤除掉, 得到的直流电压通过电阻 R6 的分压作用给电容 C18 进行充电, 当电容 C18 的电压达到 UC2844 的启动电压门槛值时, UC2844 开始工作, 开始输出驱动脉冲, 6 引脚输出驱动信号控制开关管的通断。当 UC2844 启动后由反馈绕组 Np2 供能, 当开关管 IGBT1 导通时, 输入电压加在一次侧绕组 NP1 上, 二次侧绕组 NS1、NS2、NS3 的产生的感应电压为上负下正, 而整流二极管 VD2、VD14 因反偏而截止, 反之二极管 VD15 导通, 负载 P5 和 P12 由储能滤波电容 C15 与 C23 的放电供能。而负载 N15 由变压器直接供能并向电容 C21 进行充电。当开关管 IGBT1 截止时, 二次侧绕组感应电压为上正下负, 整流二极管导通, 负载 P5 和 P25 直接由变压器进行供电, 负载 N15 由电容 C21 放电得到供能。

为了详尽探讨前述理论分析以及验证所搭建仿真电路模型中各部分功能, 通过对电路进行仿真模型搭建和参数调试, 进而得到如图 5 所示仿真实验波形。

从图 5 的波形图可以看出, P5 电压上升时间约为 6 ms, 电压最后能稳定在 +5 V 左右。N15 电压上升时间约为 7 ms, 电压最后也能稳定在 -15 V 左右。P25 电压上升时间约为 9 ms, 电压最后也能稳定在 25 V 左右。三个输出波形的仿真结果显示, 电路输出波形超调量均在 5% 之内, 上升时间很短, 稳态误差在 5% 内。综合分析以上电路波形, 所设计电路经 220 V、50 Hz 的交流输入后能实现 +5 V、-15 V 和

+25 V 三路隔离输出的直流电压。

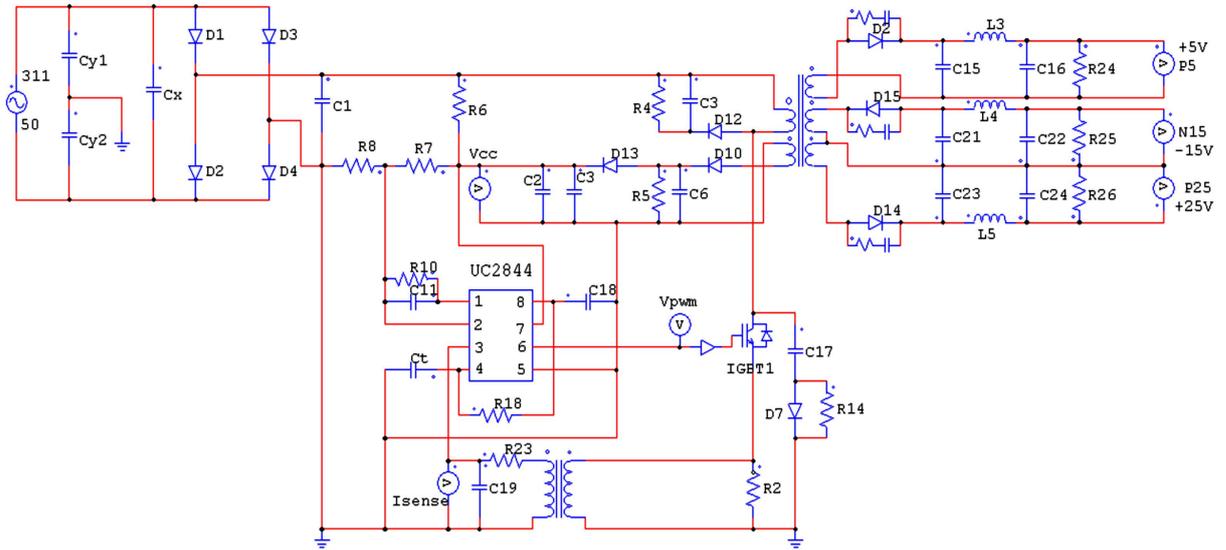


Figure 4. Simulation model

图 4. 仿真电路模型

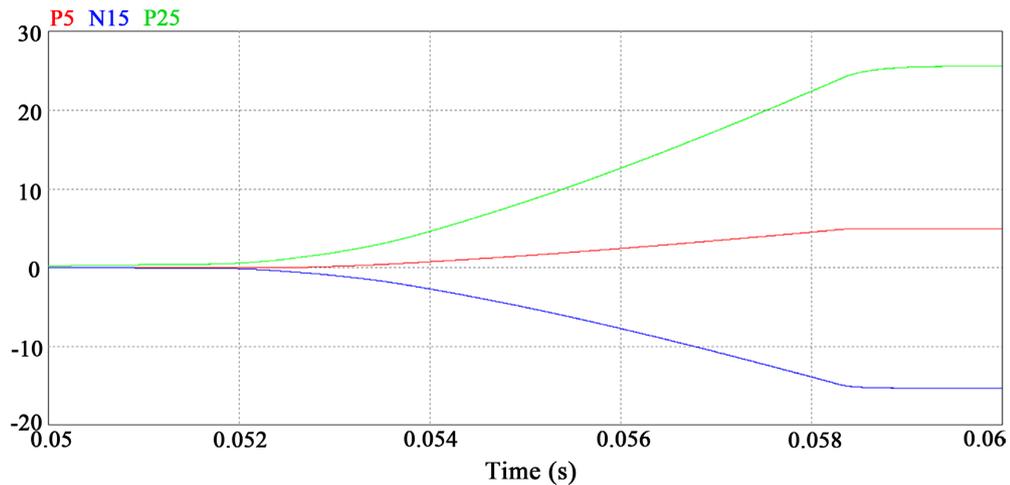


Figure 5. Simulation experimental results

图 5. 仿真实验结果

## 4. 结论

本文首先分析了当前功率变换器的研究现状与发展趋势，明确了设计与改进的方向。其次，分析了单端 Flyback 型功率变换器的工作原理，并对其工作模式进行了详细的研究。对于变换器功率因数不高的问题、谐波治理的问题，进行了电路拓扑结构优化。仿真实验结果表明，本文所设计的基于反激式拓扑的功率变换系统具有电路结构简单、效率高、电路稳定性高、电路损耗小等特点，能实现单相输入交流电压转变为多路隔离输出的直流电压，具有较高的应用价值。

## 基金项目

天津市教委科研计划项目(2020KJ093, 2022KJ029); 国家级大学生创新训练计划项目(202210061014)。

### 参考文献

- [1] 顾伟康. 单端反激式开关电源变压器的设计[J]. 通信电源技术, 2021, 38(1): 59-62.
- [2] 李国洪, 陈华玉, 李文兵. 适用于电机控制的开关电源设计[J]. 天津理工大学学报, 2017, 33(6): 37-40.
- [3] 韩召成, 文定都, 胡正国, 等. 基于 OB2273 的单端反激式开关电源设计[J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(4): 39-43.
- [4] 刘芳, 王群杰, 白倩. 一种原边反馈反激式数字化 LED 驱动电路[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(5): 79-84.