

双管反激电源的分析与设计

曹昕鸷¹, 王鹿军²

(1. 浙江机电职业技术学院 电气电子工程学院, 浙江 杭州 310053; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310007)

摘要:针对反激电源主开关管关断时候的电压应力过大和变压器气隙漏感导致的电压尖峰过大的问题,对双管反激电源的拓扑结构及工作原理进行了详细分析,构建了双管反激电源工作在 DCM 模式时的能量传递模型,论证了变压器匝比与变压器原边漏感的磁复位时间及最大占空比和回馈能量大小的关系,推导出了双管反激电源主要参数的通用设计公式;利用其设计公式,设计了一个实际工作于 DCM 模式的 30 W 双管反激电源,同时利用 Saber 仿真软件,研究了双管反激电源的主开关管、副边整流二极管和原边续流二极管的工作电流。仿真结果表明:变压器匝比参数选择合适,充分削弱了通过续流二极管回馈的能量,电源工作稳定。将仿真结果与实验样机所测结果进行了比较,结果显示两者基本吻合,说明设计公式可用作双管反激电源主要参数的设计工具。

关键词:双管反激;辅助电源;能量传递;Saber 仿真

中图分类号: TM919

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1337-03

Analysis and design of dual switch flyback

CAO Xin-zhi¹, WANG Lu-jun²

(1. College of Electrical & Electronic Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Aiming at too much voltage stress on the main switch and voltage spikes from transformer air gap leakage inductance when switching off, experimental study on the topology and operation principle of dual switch flyback were carried out. The energy transfer model of dual switch flyback in DCM was built, and the result was revealed that the transformer turns ratio impacts magnetic reset time of the primary leakage inductance which has influence on maximum duty cycle and energy returned. The design formulas on the main parameters of the dual switch flyback was deduced. With the design formulas, a 30 W dual switch flyback in DCM was designed. The Saber simulation was established, to research the operating current in main switches. The results indicate that the transformer turns ratio is appropriate and energy feedback is weakened. Some calculated results are verified by the experimental data, which shows they are reasonable. The design formulas can be used as a design tool to develop more efficient dual switch flyback.

Key words: dual switch flyback; auxiliary power; energy transfer; Saber simulation

0 引言

反激电源因具有拓扑结构简单、成本低廉、输入输出隔离等优点而被大量应用在变频器的辅助电源中。在三相的变流电路中,辅助电源的输入常取自主功率电路三相整流后的直流母线电压,若研究者采用普通的单管反激电源,则主开关管在关断时候的电压应力过大,另外反激电源的变压器常因加入气隙而具有较大漏感,导致主开关管在关断时产生很大的电压尖

峰^[1-3]。

双管反激电源可以克服普通反激电源主开关管电压应力过大的缺点。在主开关管关断时,两个续流二极管将主开关管的最高电压嵌位在输入电压,此时将有一部分能量回馈给输入电压源而没有传递到变压器副边。由于反激电源工作在 CCM 模式时,传递函数具有右半平面零点,通常研究者采用电流模式控制以实现反馈稳定^[4],故在实际应用中,反激电源大多工作在 DCM 模式。

收稿日期: 2012-06-14

作者简介: 曹昕鸷(1979-),男,吉林吉林人,讲师,主要从事电力电子、智能控制等方面的研究. E-mail: caoxin_zhi@yahoo.com.cn

本研究详细分析双管反激电源工作在 DCM 模式时的能量传递过程,推导主要参数的计算公式,并根据这些公式设计一个直流母线输入电压为 265 V ~ 355 V 的双管反激电源,最后通过 Saber 仿真和实验样机验证本研究的分析与结论。

1 拓扑结构及工作原理

双管反激电源的拓扑结构如图 1 所示。正常工作时, Q_1 、 Q_2 同时开通和关断。当 Q_1 、 Q_2 开通时, D_1 、 D_2 、 D_3 截止,直流输入电压 V_i 加在变压器原边,变压器原边电流线性上升至最大值。当 Q_1 、 Q_2 关断时,变压器原边与副边电压极性反向。在 Q_1 、 Q_2 关断瞬间 D_1 、 D_2 、 D_3 均导通, D_1 、 D_2 导通将变压器原边电压嵌位在输入电压,此时将有一部分能量通过 D_1 、 D_2 回馈给输入电压源, D_3 导通将变压器原边励磁电感储存的能量向输出负载转移,并将原边励磁电感的电压嵌位在输出电压反射到原边的电压。一段时间后, D_1 、 D_2 截止,变压器原边电感储存的能量全部向输出负载转移,假设电路工作于 DCM 模式,在下一个开关周期到来之前变压器副边电流下降到 0, D_3 截止^[5]。

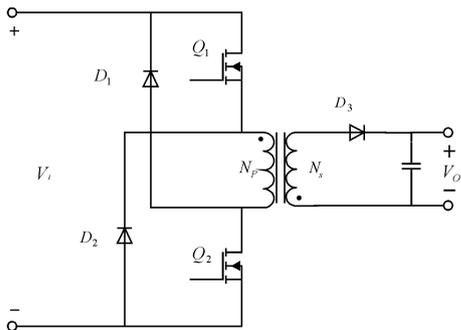


图 1 主电路拓扑图

Q_1 、 Q_2 — 主开关管; D_1 、 D_2 — 原边续流二极管; D_3 — 副边整流二极管

2 能量传递过程分析

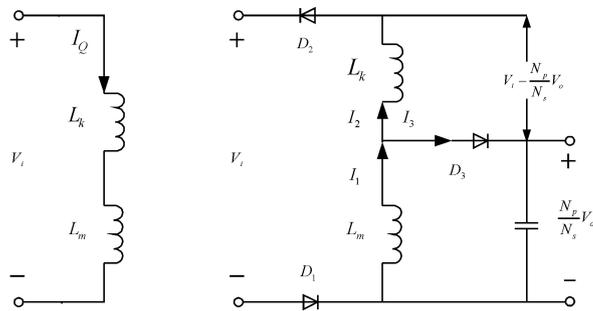
为便于分析,本研究假设开关管和二极管均为理想器件,不考虑其正向导通压降和寄生参数。

2.1 开关管导通阶段的工作情况

开关管开通时的等效电路如图 2(a) 所示。变压器初级绕组相当于一个电感,输入的能量储存在该电感中。设变压器初级绕组的电感为 L_p ,在开关管导通的时间里,电感电流线性上升至最大值 I_p 。几个关键点的电流波形如图 3 中 0 ~ t_1 段的电流波形所示。变

压器原边电感存储的能量可表示为:

$$E = \frac{L_p I_p^2}{2} = \frac{V_i^2 \cdot T_{on}^2}{2L_p} \quad (1)$$



(a) 主开关管开通时等效电路图 (b) 主开关管关断时等效电路图

图 2 等效电路图

L_m — 变压器原边励磁电感; L_k — 变压器原边漏感; I_1 — 流过原边励磁电感的电流; I_2 — 通过 L_k 回馈到输入电压源的电流; I_3 — 变压器副边反射到原边的电流

2.2 开关管关断阶段的工作情况

开关管关断后,变压器原边与副边的电压极性都反向,将变压器副边电压电流反射到原边,得到的等效电路图如图 2(b) 所示。其中, L_m 两端的电压被嵌位在 $(N_p/N_s) \cdot V_o$, L_k 两端电压等于输入电压与 L_m 两端电压之差,电流 I_3 表征流向负载的电流。

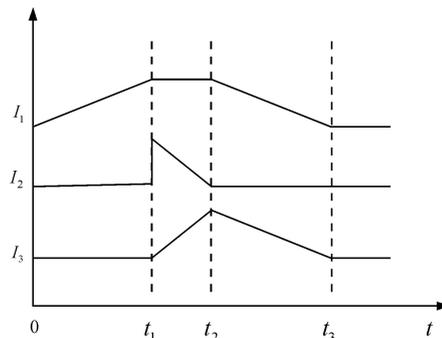


图 3 一个开关周期中的电流波形

I_1 — 原边励磁电感电流; I_2 — 续流二极管电流; I_3 — 变压器副边反射到原边电流

一个开关周期中的电流波形如图 3 所示:

(1) $t_1 \sim t_2$ 阶段。开关管刚关断后, D_1 、 D_2 、 D_3 均导通,通过 L_k 的初始电流等于在开关管导通时原边流过的最大电流 I_p ,该电流经过续流二极管回馈能量,流过续流二极管的电流可表示为:

$$I_2 = I_p - \frac{V_i - \frac{N_p}{N_s} V_o}{L_k} (t - t_1) \quad (2)$$

经过 $\Delta t = L_k I_p / (V_i - N_p V_o / N_s)$ 的时间, I_2 降为 0,

能量回馈过程结束,在此段时间内,回馈的能量可表示为:

$$E_f = \frac{V_i \cdot I_p \cdot \Delta t}{2} = \frac{V_i \cdot L_k \cdot I_p^2}{2(V_i - \frac{N_p}{N_s} V_o)} \quad (3)$$

假设原边漏感与励磁电感相比很小,则 I_1 在 $t_1 \sim t_2$ 的时间内保持不变,由图 2 中的等效电路得该段时间内表征流向负载的电流 I_3 可表示为:

$$I_3 = I_1 - I_2 = \frac{V_i - \frac{N_p}{N_s} V_o}{L_k} (t - t_1) \quad (4)$$

(2) $t_2 \sim t_3$ 阶段。此时开关管已关断许久, L_k 已经磁复位, D_1 、 D_2 截止, D_3 导通。此时 I_3 可表示为:

$$I_3 = I_p - \frac{\frac{N_p}{N_s} V_o}{L_m} (t - t_2) \quad (5)$$

不考虑电路损耗,在一个开关周期中,由输入电压源传递给变压器原边电感的能量为式(1)中所示的 E ,该能量在开关关断后分成两部分,一部分如式(3)所示回馈给输入电压源,另外一部分传递给负载。由式(3)可知,要想减少回馈给输入电压源的能量,就需要减小 L_k 和匝比^[6]。

3 主要参数计算公式

3.1 变压器匝比的选择

变压器匝比显著影响原边漏感的复位时间,为保证电路工作于 DCM 模式并使能量尽可能地传递到负载,研究者需要尽可能地减小匝比以加快变压器原边漏感的复位时间^[7],但匝比过小将影响最大导通时间和励磁电感的选择,在实际电路中可以取经验值,即:

$$\frac{N_p}{N_s} = 0.7 \frac{V_i}{V_o} \quad (6)$$

3.2 最大导通时间的计算

在选定了变压器匝比后,最大导通时间可通过变压器原边的伏秒平衡计算。设变压器原边的磁复位时间为 T_r ,则有如下关系式:

$$V_i \cdot T_{on\ max} = \frac{N_p}{N_s} V_o \cdot T_r \quad (7)$$

考虑变压器原边漏感电流的复位时间以及电路寄生参数的影响,需保留一定的死区时间,可以取:

$$T_r + T_{on\ max} = 0.8T \quad (8)$$

将式(8)与式(9)联立,最大导通时间可表示为:

$$T_{on\ max} = \frac{0.8T \cdot \frac{N_p}{N_s} V_o}{V_i + \frac{N_p}{N_s} V_o} \quad (9)$$

3.3 原边励磁电感的计算

原边励磁电感根据输入功率和输出功率的关系计算,设双管反激电源的效率为 80%,则有关系式:

$$P_{in} = \frac{L_p I_p^2}{2T} = \frac{V_i^2 \cdot T_{on}^2}{2L_p T} = \frac{1.25V_o^2}{R} \quad (10)$$

由式(10)知,电路输入输出参数确定时, L_p 与 T_{on}^2 成正比,且有:

$$L_{p\ max} = \frac{V_i^2 \cdot T_{on\ max}^2 R}{2.5T \cdot V_o^2} \quad (11)$$

4 实验结果

本研究根据对能量传递过程的分析及主要参数的计算公式设计了一个 30 W 双管反激电源。其输入直流电压为 265 V ~ 355 V,输出为 24 V/1.25 A,开关频率为 60 kHz,变压器原副边匝比为 9:1,变压器原边励磁电感为 2.08 mH,控制芯片采用 UC3844。

主电路拓扑结构如图 1 所示。

4.1 Saber 仿真实验结果

Saber 是美国 Synopsys 公司的一款 EDA 软件,具有非常强大的电力电子电路仿真功能,可方便地仿真磁性元件^[8]。该仿真中选用线性变压器,与理想变压器相比,可以更准确地反映实际反激变压器的工作特性。

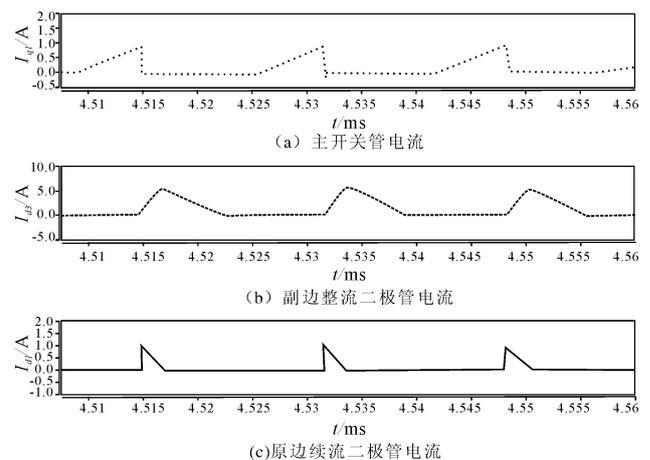


图 4 Saber 仿真中的电流波形

Saber 仿真中的电流波形如图 4 所示。

图 4 中,主开关管关断后,原边续流二极管电流从最大值开始线性下降,副边整流二极管电流线性上升,

(下转第 1349 页)

功完成对实验室数据进行监测、处理及分析,为企业改进产品的性能提供了数据支持。

参考文献 (References):

- [1] 董 潇. 太阳能行业新 10 年格局 [N]. 中华工商时报, 2010-12-24(1).
- [2] 顾博文, 赵 颖, 胡 晔, 等. 太阳能热水器行业分析报告 [R]. [出版者不详], 2011.
- [3] 徐 雷, 徐 扬. WCF 服务编程 [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [4] 来兴华, 张水平, 尚文静. 基于 WCF 的自助缴费系统的设计与实现 [J]. 微计算机信息, 2008, 23(4-3): 29-31.
- [5] 陈 江, 陈建国, 陈国富. 基于 WCF 框架的分步式车辆调

度系统 [J]. 工业控制计算机, 2009, 22(6): 79-80.

- [6] 年福丰, 刘秋让. 基于 WCF 的异构数据源集成系统的研究和实现 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(11): 3116-3119.
- [7] 顾 悦, 王建军. 基于 WCF 的远程数据访问技术研究 [J]. 电脑知识与技术, 2010, 31(6): 8675-8676.
- [8] 国家标准化工作委员会. GB/T 17049-2005 全玻璃真空太阳集热管 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [9] 国家标准化工作委员会. GB/T 4271-2007 太阳能集热器热性能试验法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [10] 国家标准化工作委员会. GB/T GB18708-2002 家用太阳能热水流热性能试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[编辑: 李 辉]

(上接第 1339 页)

续流二极管电流下降到 0 后, 整流二极管电流上升到最大值, 然后再线性下降。若要减小通过续流二极管回馈的能量, 则要选择合适的匝比^[9], 使流过续流二极管的电流迅速下降到 0 V。

4.2 样机实验结果

实验样机电压波形如图 5 所示。

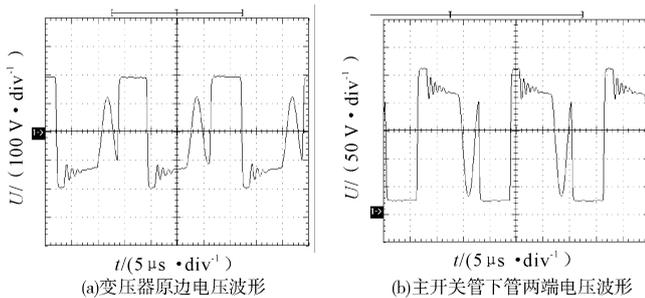


图 5 实验样机电压波形

图 5 中, 在不考虑振荡时, 变压器原边电压分别为正输入电压、负输入电压、副边反射电压和 0。但当原边励磁电感刚刚复位时, MOS 管寄生电容与变压器原边电感之间会发生谐振, 通过减小励磁电感可以减小振荡, 为验证式 (11) 的合理性, 该实验样机中的励磁电感取值偏大, 故图 5 中电压为零的时刻没有明显地显示出来。

5 结束语

与单管反激电源相比, 双管反激电源具有开关管应力小、工作可靠性高的优点^[10], 但是其所需元器件较多, 电路工作过程复杂。研究者在设计双管反激电

源时, 需要考虑原边漏感馈能过程的影响, 合理选择匝比, 以使原边漏感能够迅速复位。

利用本研究提供的公式, 专业人员可方便地设计工作于 DCM 模式的双管反激电源的主要参数, 使回馈的能量较小。

参考文献 (References):

- [1] 顾晓明, 顾亦磊, 杜 宇, 等. 双管反激型 DC/DC 变换器的研究 [J]. 电力电子技术, 2004, 38(3): 34-36.
- [2] 张兰红, 陈道炼. 反激变换器开关应力抑制技术研究 [J]. 电力电子技术, 2002, 36(2): 29-31.
- [3] 封心歌. 高压双管反激变换器的设计 [J]. 现代雷达, 2004, 26(6): 57-59.
- [4] PRESSMAN A I. Switching Power Supply Design [M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [5] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [6] 韩明武, 刘兆元, 马吉志. 双端反激式变换器漏感效应的研究 [J]. 电子器件, 2008, 31(3): 963-965.
- [7] 蔡 伟, 赵丽华. 基于 UC3844 的多路输出双管反激电源设计 [J]. 电源世界, 2008, 6(6): 65-67.
- [8] 郭世明, 黄念慈. 电力电子技术 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2002.
- [9] 石小丽, 张代润, 郑 越. 基于 UC3844 的多路输出双管正激电源设计 [J]. 电源技术应用, 2007, 6(6): 38-44.
- [10] 付登萌, 陶生桂. 基于 TOPSwitch 的反激式 DC/DC 电源设计 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 68-69.

[编辑: 李 辉]