

# 反激型开关电源的软缓冲技术

林周布, 张文雄, 林元尊

(福州大学, 福州 350002)

**摘要:**提出一种有别于 RC 缓冲电路的软缓冲电路新技术,它结合电流型 PWM 控制,利用反激型变换器中的耦合电感器与外加小容量电容器构成 LC 谐振电路,能以高性价比完成关断感性负载的暂态缓冲,并能消除二极管的反向恢复不良特性。对此电路进行的分析、计算机仿真与实验测试结果都表明该技术可行。

**关键词:**变换器;缓冲/反激型;开关电源

**中图分类号:** TN86 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-100X(2001)03-0024-03

## The Soft Snubber Technology for Flyback Switch-mode Power Supply

L IN Zhou-bu, ZHANG Wen-xiong, L IN Yuan-zun

(Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** A new technology called soft snubber circuit which is different from RC snubber circuit is proposed. Combined with current-mode PWM control, it can snub the transient of switching off the inductive load and remove the bad reverse recovery feature of the diode by the LC resonant circuit constructed of additional small capacitors and the coupling inductor in flyback converter with high ratio of performances to cost. The circuit analysis, computer simulation and experimental results verified that the technology is applicable.

**Key words:** converter; snubber/flyback; switch-mode power supply

## 1 引言

反激型开关电源电路的主要特点是电路简单、成本低、可靠性高、稳压范围宽,故许多家用及办公室电子电器采用了此种电路。由于我国许多地区的交流市电的供电质量不良,即电压波动范围大、电磁干扰严重,以及许多电器工作时负载变动范围很大,因而电器故障中电源所占的比例很高。一般采用成本最低的自反激型开关电源电路,即振铃型开关电源,图 1 即为此类型开关电源主电路图。由于主控开关管工作在硬开关状态,因此常用较廉价的 RC 型缓冲电路技术,减缓开关的过渡过程,并将开关管在开关过渡期间的开关损耗转移至缓冲电路上。这样虽然不能提高电路效率,但能有效地降低加在开关管上的电压尖峰,减小开关管的开关损耗,扩大开关管的安全工作区,降低开关管的耐压要求,在低价位上保证了电路的工作可靠,故不失为一种权宜之计。

近年来,由于国内外对电子电器的电磁兼容性要求更高,电子电器市场竞争日益激烈,在提高产品

电磁兼容性要求的同时,降低生产成本成为生产厂商追求的目标。要在低价位上提高产品的电磁兼容性,就不宜采用价廉的自反激型电路,这是由于该电路的开关频率随工作条件变化而变,难以在很宽的工作频率范围下满足电磁兼容性要求。以图 1 电路为例,轻载时工作频率高达 200kHz,重载时约为 60kHz。要提高产品电磁兼容性性能,就要采用成本较高的它激式定频反激型电路,即 FLYBACK 变换器技术<sup>[1]</sup>。但提高产品任何一项成本,对国内厂商来说都是难以接受的。要弥补这一部分的附加成本,只有寻找降低电源电路其它方面成本的途径。显然最合理的技术手段是降低机内工作损耗,提高电源的工作效率,降低元器件参数要求,简化电路,从而间接降低成本。传统的缓冲电路采用的是如图 1 所示的 RCD 及 RC 尖峰吸收电路,虽然它可以使功率开关管的耐压要求降低,从而能使用价格较低 MOSFET 管,但由于缓冲电路损耗太大,发热严重,需要用大功率电阻(如高达 5W)和高压高频大容量电容器,这又使得机内局部区域温度升高,影响周围半导体器件,降低工作可靠性,而且还增加了整机的一部分成本。因此,改善缓冲电路性能,是提高开关电源效率的最有效、合理的技术措施。

目前国内在这方面的的工作分为两大途径。其一为改良性方法<sup>[2]</sup>,即在传统缓冲技术基础上,改变暂态能量的泄放方式,设法将有损耗的缓冲电路改

**基金项目:**本文受福建省自然科学基金资助,项目编号为:A0010007。

**收稿日期:**2001-01-16

**定稿日期:**2001-03-28

**作者简介:**林周布(1952),男,高级工程师,研究方向为电力电子技术及其应用。

变为无损耗的缓冲电路;其二为构造新型的电路拓扑,将硬开关电路改为软开关电路。前者<sup>[3]</sup>要附加二极管、功率电感器、电容器,在传统缓冲电路基础上,去掉耗能电阻,在开关管开通时再将吸收电容器上的电场能量转换为附加电感器的磁能,在下一个关断阶段将此磁能回馈给输入电压源或负载,以构成损耗很低的缓冲电路。其特性类同传统缓冲电路,只能解决开关关断或开通两个暂态阶段中的一个阶段的缓冲,并且一个暂态阶段缓冲的实现是以增大另一个暂态阶段的硬开关效应为代价。若两者都要实现无损耗的缓冲,则电路相当复杂。此外还由于能量多次回馈时回馈电流产生附加损耗,及对工作条件的依赖性很强,难以在不同工作条件下取得良好缓冲效果。为了克服前者缺陷,后者利用增加的辅助电力电子器件、功率电感器、电容器等构成辅助有源谐振换流电路,选择适当的辅助控制电路,使开关管在每个开关暂态过渡期间都工作在零电压或零电流状态,从而在开关关断或开通两个暂态阶段都能实现开关功率损耗最小。显然,这两种方法都因增加功率电感器、电力电子器件等增大了成本、体积、重量。总的来说<sup>[4]</sup>,前者代价大,效果不够好,后者虽然效果优于前者,但除了代价更大外,还因使用了有源软开关电路而增大了电路与控制的复杂度,推广应用受到了很大的限制。为此,寻找性价比更优越的软开关电路一直是电力电子技术领域的热门研发课题。我们运用柔性工程方法提出一种有别于上述三种电路的软缓冲电路技术,它结合电流型 PWM 控制,能以最简单的无源软缓冲方式、最少附加元器件、最低成本代价、较少的附加损耗完成对电子开关高速关断感性负载的暂态缓冲过程并能消除输出二极管的反向恢复不良所产生的电路缺陷。

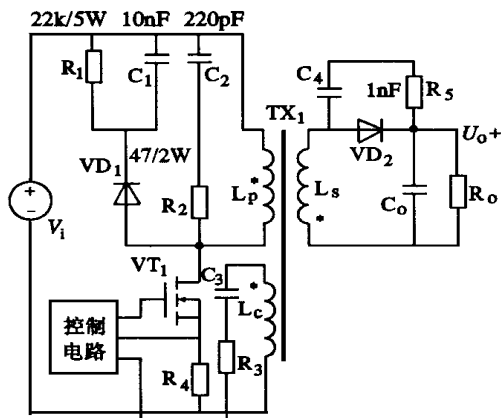


图1 传统的振铃型反激变换器主电路图

## 2 软缓冲电路原理

对于反激型开关电源,由于开关管的负载为感

性负载,故其主要开关缺陷就是在大电流下高速断开感性负载以及二极管的反向恢复不良所产生的电路缺陷。基于电磁感应定律,除了存储在耦合电感器上的电磁能量被次级负载电路吸收外,仅在断开点(电子开关管上)存在由漏感所产生的磁能( $0.5L_{LEAK}I_M^2$ ),假如不被电路吸收,则根据 $U_L = L_{LEAK}di/dt$ ,将激起高电压,足以击穿电子开关,为此需缓冲电路予以有效的吸收。在满负载下,对图1电路: $L_{LEAK}=0.045\text{mH}$ , $I_M=1.7\text{A}$ , $f=58.8\text{kHz}$ ,则 $P_L=0.5L_{LEAK}I_M^2f=3.8\text{W}$ 。此时,整机输出约为67W,这样仅漏感磁能一项,被缓冲电路吸收的损耗功率就要占输出功率的5.67%。电子开关在断开载流感性负载时,为避免激起高感应电压,载流感性负载释放的磁能要用一低阻抗电路吸收掉,或者用电抗性质相反的电容器来吸收储能,但为了保证开关电路的连续性,必须在下一次断开前将此电容器存储的电场能量释放掉,如果将此载流感性负载释放的磁能馈入到与输出电路相并联的一个LC谐振槽中,利用二阶并联谐振特性,一方面减缓该电流源磁能的暂态过程,另一方面则利用并联谐振时具有较高电势将存储的电磁能传递给负载,合适地控制该电流源强度,就能实现最低损耗的暂态能量释放目的。在反激型开关电路中,耦合电感器就是这个LC谐振槽的L元件,C为外加的电路元件。由于高频工作条件,为了有效实现谐振储能与放能,谐振频率必须高于电路工作频率数倍,这样C电容量取值很小(数百皮法量值),低值高压高频电容器(用瓷介电容)的价格不高,采用电流型PWM控制就能合适地控制电流源强度,不必增加电子器件,故整个软缓冲电路的成本很低。

图2为加入软缓冲电路的反激型开关电源主电路图。图中两个电容器 $C_2$ (680pF)、 $C_4$ (470pF)即为软缓冲电路所增加的元件。由于使用了该项技术,缓冲吸收电阻 $R_1$ 从原来的22k增大为82k,功率则从原来的5W降为2W,取消了原设计初级RC缓冲电路与次级二极管缓冲电路,此外缓冲电容器 $C_1$ 的容量由原设计的10nF减为4.7nF。耦合电感器的初级绕组电感量从0.955mH提高到1.45mH,这样选用的主功率开关管的额定电流从5A级降为4A级。新设计采用了固定频率( $f=52\text{kHz}$ )的高性能电流型PWM技术。虽然,高性能电流型PWM技术由于使用集成块而提高了一些成本,但软缓冲技术则比传统缓冲电路的成本降低了不少,两者相抵,成本反而略减。

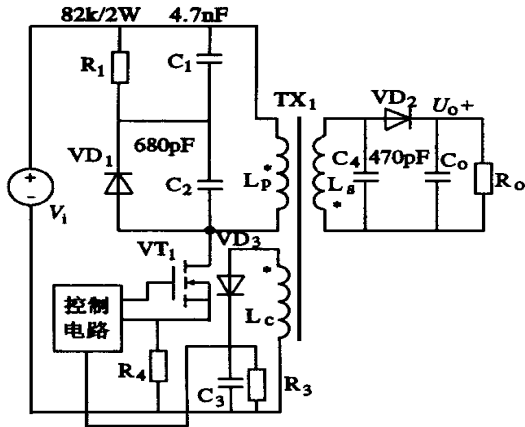


图 2 软缓冲 Flyback 变换器主电路图

为了进一步说明图 2 的工作原理,将图 2 按照开通 ( $t_0 - t_1$ )、导通 ( $t_1 - t_2$ )、关断 ( $t_2 - t_3$ )、阻断 ( $t_3 - t_4$ ) 一个开关周期四个开关阶段绘出其等效电路图如图 3 所示。

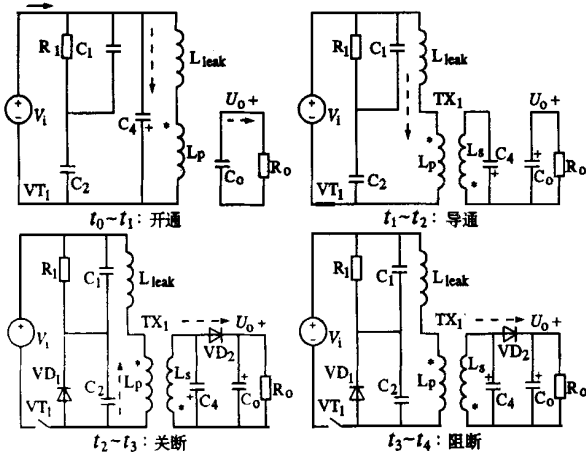


图 3 软缓冲 Flyback 变换器各开关阶段的等效电路图

$VT_1$  开通时,由于  $C_4$  的作用,二极管  $VD_2$  的关断为软关断,但  $C_4$  也与  $C_2$  共同造成容性开通缺陷;在  $VT_1$  关断时,由  $C_4$  与  $C_2$  共同吸收关断磁能,增加了缓冲作用。由于 LC 谐振电路对缓冲作用较强且可吸收、消耗部分谐振能量,故耗能电阻  $R_1$  的作用减弱,可提高其阻值降低其功率。结合定频电流型控制,可最佳设定谐振参数,关键是在保证不降低缓冲效果下使电容  $C_2$ 、 $C_4$  容量最小。结合电流控制型 PWM 控制  $VT_1$  的导通时间,使 LC 并联谐振的部分电磁能量在  $VT_1$  关断时通过  $TX_1$ 、 $VD_2$  转为负载吸收的能量,故此缓冲方法为部分耗能。由于谐振软化了开关管的开关过渡期间工作点轨迹,实现了  $VT_1$  关断过程的软性过渡,因此所提出软缓冲电路有别于传统缓冲电路,亦有别于软开关电路。

### 3 实验验证

对图 1、图 2 两种不同缓冲电路用 PSPICE 软件

进行了计算机仿真,结果分别示于图 4、图 5。

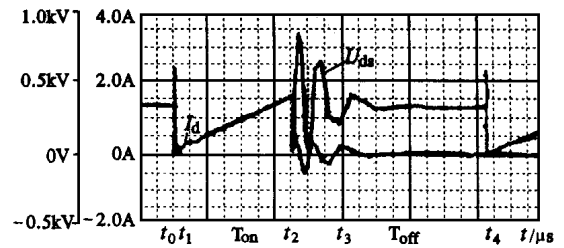


图 4 图 1 开关管电压、电流仿真波形图

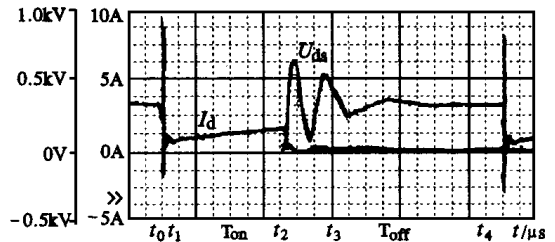


图 5 图 2 开关管电压、电流仿真波形图

对这两种缓冲电路进行了同等条件下的实验,结果如下:满负载下,交流输入电源电压为 220V 时,变换器开关管  $VT_1$  的漏-源极电压波形  $U_{ds}$  与漏极电流波形  $I_d$  分别示于图 6 与图 7。

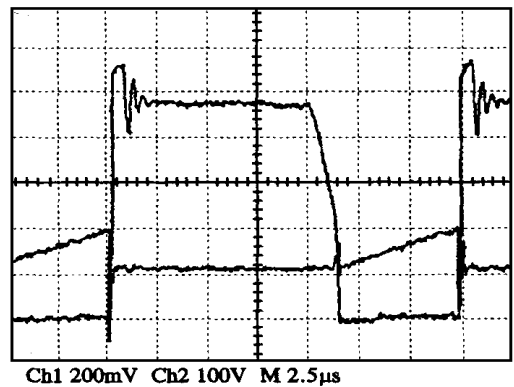


图 6 图 1 开关管电压、电流测试波形图

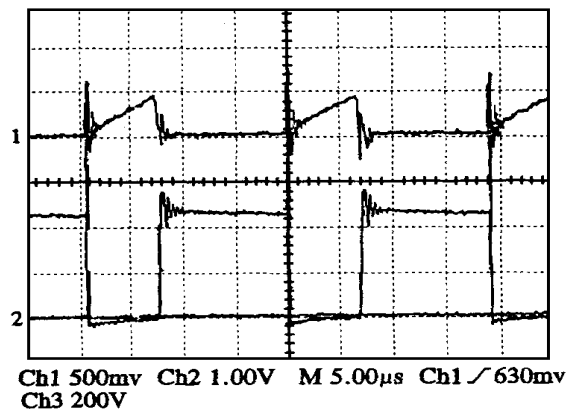


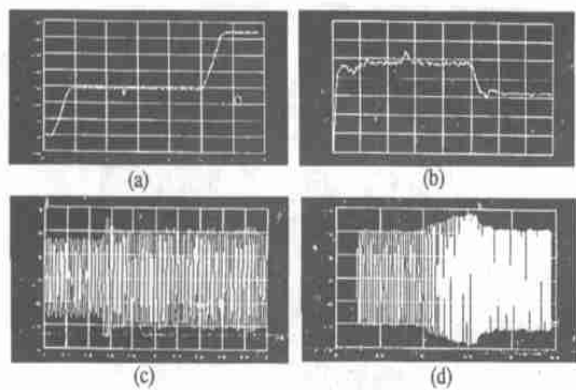
图 7 图 2 开关管电压、电流测试波形图

图 6 对应于传统缓冲电路,其中漏极电流波形  $I_d$  由源极电阻  $R_{13}$  (0.1  $\Omega$ ) 上的电压波形来体现,此

(下转第 50 页)

$R_s = 0.687$  ,  $R_r = 0.842$  ,  $L_s = 83.97$  mH ,  
 $L_r = 85.28$  mH ,  $M = 81.36$  mH ,  $J = 0.03$  N · s<sup>2</sup> · m ,  $T_e$   
 $= 12$  Nm ,  $n_c = 1500$  r / min .

电机启动时通过积分器加上一个 150rad/s 的  
给定,在 5 秒左右进行弱磁升速,速度升至 325rad/  
s。转子在 2~3 秒间突加一负载转矩,如图 4 所示。



(a) 速度响应波形  
(b) 转子磁链响应波形  
(c) a 相电流响应波形(2~4s)  
(d) a 相电流波形(4~6s)

图 4

图 4a 和 4b 为电机的转速与转子磁链的响应曲

(上接第 26 页)

时  $I_{dm}$  达到 1.7A。图 7 对应于软缓冲电路,其中漏  
极电流波形  $I_d$  由源极电阻  $R_{13}$  (0.33 ) 上的电压波  
形来体现,此时  $I_{dm}$  达到 1.3A。更有重大意义的是  
图 7 中在最大漏极电流处,电流以一定的斜坡下降,  
从而使漏极电流波形与截止态的漏-源极电压波形  
错开。此外,由于传统缓冲电路不能消除二极管反  
向恢复特性产生的关断漏电效应,故在开通时图 6  
电流波形叠加了一个较宽的高幅值三角电流波,图  
7 则只有很窄的高幅值电流尖峰,这是开关管的容  
性开通缺陷问题,由于电容器容量很小,故平均损耗  
不大。由计算机仿真与实验结果可知,软缓冲电路  
的效果确实有效。

对图 1 与图 2,在同等条件下测试满载效率结  
果:传统缓冲电路为 74%;软缓冲电路为 78%。测  
试空载损耗结果:图 1 为 5.4W;图 2 为 3.4W。

## 4 结 论

结合定频电流型 PWM 控制的软缓冲电路在反  
激型电感储能式开关变换器的应用是有效的,它不  
仅克服了传统缓冲电路的缺陷、提高了电路的效率,

线。图 4c 和 4d 为电机 a 相电流波形。

实验结果表明,该系统具有良好的动态和静态  
性能,并且系统运算稳定、可靠,具有很好的应用前  
景。

## 参考文献:

- [1] Marino R. et al. Adaptive Input-output Linearizing Control of Induction Motors[J]. IEEE Trans. on Automat. Contr., 1993,38(2):208~221.
- [2] Sastry S. S. et al. Adaptive Control of Linearizable Systems[J]. IEEE Trans. on Automat. Control, 1989,34(11):1123~1131.
- [3] 陈伯时,徐荫定. 电流滞环控制 PWM 逆变器异步电动机的非线性解耦控制系统[J]. 自动化学报. 1994(1):50~56.
- [4] 陈冲,齐虹等. 感应电动机的非线性解耦控制. 电工技术学报[J]. 1996(12):7~12.
- [5] 李序葆,赵永健. 电力电子器件及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1999:394~395.
- [6] 赵金等. 鼠笼式异步电动机伺服系统[J]. 电气传动,1996(6):18~19.

而且能以很低的成本、最少的附加缓冲元件、简单的  
电路、较少的附加损耗完成对电子开关高速关断感  
性负载的暂态缓冲过程,并消除输出二极管反向恢  
复不良所产生的电路缺陷。虽然,它的缓冲性能不  
如软开关电路,在开通时的波形不太好,但由于储能  
式开关变换器的容性开通能量损耗不大,故在低价  
位的电子电器产品上有其实际应用意义,值得推广。

## 参考文献:

- [1] 熊熙烈. 松下 KX-F50B 传真机电源维修[J]. 无线电, 1996(10):30~31.
- [2] 丁道宏. 电力电子技术[M]. 北京:航空工业出版社, 1992.
- [3] Mark K. et al. A Comparison of Voltage-Mode Soft-Switching Methods for PWM Converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1997,12(2):376~386.
- [4] Chung H. Sh. H. et al. A Zero-Current-Switching PWM Flyback Converter with a Simple Auxiliary Switch[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1999,14(2):329~341.