

# 磁反馈控制DC/DC变换器的设计

设计了一种采用电压控制模式磁反馈的DC/DC变换器。该控制方式采用变压器实现控制电路的一次侧、二次侧隔离,通过幅度调制及解调过程使次级误差信号传递到一次侧,实现误差信号的反馈,相比于光耦隔离具有更强的稳定性及更好的抗辐射能力。设计了电路并对其进行仿真分析,将其与有源钳位正激变换器结合,设计了一台低压大电流输出DC/DC电源,仿真及实验结果表明电源具有较好的静态特性及较高的效率,验证了方案的可行性。

李祥忠<sup>1</sup> 朱 彬<sup>2</sup> 王善良<sup>1</sup> 姜洪宇<sup>3</sup> 卢俊龙<sup>3</sup>/1.深圳市中兴昆腾有限公司  
2.中国人民解放军96623部队 3.哈尔滨工业大学深圳研究生院



李祥忠/工程师

电源系统作为航天器的动力来源,具有不可替代的作用,航天器高昂的成本更对电源系统的高效可靠提出了极为苛刻的要求。

传统的单端正激电路为硬开关模式,开关损耗大,需要磁复位电路<sup>[1]</sup>,为了解决这些问题,研究人员于20世纪90年代首次提出了有源钳位正激变换器<sup>[2]</sup>,实现了开关管的零电压开关,减小了开关损耗,对于提升电源的功率密度具有极大的意义,而且省去了磁复位电路,开关管上的电压应力也得到了大幅降低<sup>[3]</sup>,适用于空间用电源。

电源主电路要求输入输出侧在隔离的情况下,控制电路也要实现信号的隔离,目前开关电源的隔离反馈常采用光耦隔离,这种方式结构简单、使用方便且成本较低,在民用变换器场合得到了较为普遍的应用。但是在某些环境恶劣的场合,尤其是国防及航天领域,光耦是不能使用的,这是因为光耦器件自

身工作线性度较低,其电流传输率在工作电流、偏置电压和工作环境温度的综合影响下,会发生较大的变化。在空间辐照和带电粒子的影响下,电流传输率的变化会进一步加剧,影响控制环路的带宽和稳定性。为了解决这个问题,可采用变压器隔离反馈的方式实现信号隔离,磁反馈技术具有很好的可重复工作性、优越的温度稳定性、较强的抗辐射能力以及长期的工作寿命<sup>[4]</sup>,其在航天电源中的应用具有较大意义。

## 磁反馈DC/DC变换器

变换器主电路采用有源钳位正激,该电路可以实现变压器的自动复位,并且实现了开关管的软开关,为了提高电源效率,二次侧采用同步整流技术。图1为磁反馈有源钳位正激变换器的示意图。图1中, $C_1$ 为钳位电容; $Q_1$ 为主开关管; $Q_2$ 为钳位开关管; $VD_1$ 和 $VD_2$ 分别为主开关管和钳位开关管的体二极管; $C_s$ 为主开关管DS间的寄生电容。

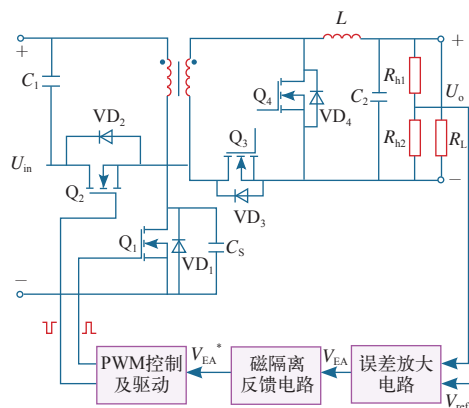


图1 磁反馈有源钳位正激变换器的示意图

钳位电容 $C_1$ 和钳位开关 $Q_2$ 组成了有

### 关键词/Keywords

开关电源·  
磁反馈·  
有源钳位·  
高可靠性·

深圳市科技创新计划项目(CXZZ20120615163423014)。

源钳位电路, 该电路与主开关和主变压器的两端并联, 钳位电容 $C_1$ 及极间电容 $C_s$ 与变压器一次绕组的励磁电感发生谐振时, 便创造了主开关零电压开关的条件, 实现了软开关。不仅如此, 钳位电容还能在主开关关断期间将其两端电压钳位固定在某个定值为

$$U_{cl} = \frac{DU_{in}}{1-D} \quad (1)$$

式中,  $D$ 为占空比, 这样开关管上不会产生较大的电压应力, 有利于开关管的选择。

钳位电容 $C_1$ 的设计对电路特性有重要影响, 因此, 应综合考虑电路的稳态和瞬态特性, 确定 $C_1$ 的大小。当开关频率为 $f_s$ 时, 可按下式计算钳位电容 $C_1$ 的临界值

$$C_1 \geq \frac{(1-D)^2}{\pi^2 L_M f_s^2} \quad (2)$$

式中,  $L_M$ 为变压器的励磁电感。在计算出钳位电容的临界值之后, 再根据钳位电容电压纹波要求, 按照下式可确定钳位电容的容值

$$\frac{\Delta U_{cl}}{U_{cl}} = \frac{(1-D)^2}{8L_M C_1 f_s^2} \quad (3)$$

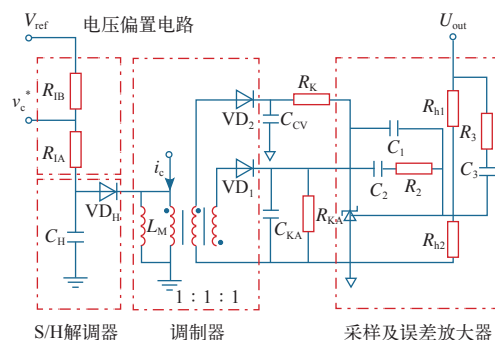
控制电路部分对输出电压进行采样, 与基准电压比较放大后形成的误差信号经过磁反馈电路隔离后与PWM比较器中的锯齿波比较形成驱动波形, 进而实现电源的电压环隔离控制。

## 幅度调制磁反馈控制

### 1. 电路设计及工作原理

图2为本文所采用的幅度调制磁反馈电路的具体原理图, 该结构主要由采样及误差放大电路, 调制解调电路及电压偏置电路构成。其中, 误差放大器电路及补偿电路由TL431及外围电路实现。电容 $C_{KA}$ 的作用是在电源工作在高频状态时使TL431能够呈现较低的输出阻抗。调制部分的DC/DC变换器采用反激式的结构, 利用变压器实现信号隔离, 在此基础上还增加了一个正激线圈用于给TL431提供一个足够大的阴极电流保证其正常工作, 在设计耦合变压器 $T_c$ 时要注意留有一定的裕量防止线圈饱和。该变压器由外部方波载流电

源 $i_c$ 激磁实现调制。S/H解调器则相当于一个峰值探测器, 由二极管 $VD_H$ 和保持电容 $C_H$ 组成。由于变压器是按照反激方式工作的, 所以电容 $C_H$ 上的误差信号 $V_{EA}^*$ 是被误差信号 $V_{EA}$ 反向采样所得, 再与电阻 $R_{IA}$ 和电阻 $R_{IB}$ 分压得到控制信号 $v_c^*$ 进入PWM控制芯片产生PWM驱动波形, 实现电压环路的控制。



压峰值等于误差电压 $V_{EA}$ ，方向相反。当励磁电感完全去磁后，所有二极管反向截止，保持电容 $C_H$ 再通过 $R_{IA}$ 和 $R_{IB}$ 放电。

## 仿真分析

为了验证幅度调制磁反馈方案的可行性，采用Simetrix/Simplis电力电子专用仿真软件对设计方案进行仿真验证。

### 1. 磁反馈仿真

设置变换器额定输出为5 V，设置输出电压为一个4~6 V的振荡三角波，对磁反馈电路各节点的波形进行测试，图4为各节点的波形对比图。图4中， $V_{OS}$ 为输出电压； $V_{EA}$ 为采样后误差放大器的输出误差信号； $V_{EA}^*$ 为经过隔离反向后的误差信号； $V_C^*$ 为最终的控制信号，用以与PWM比较器中的锯齿波比较形成驱动波形。可以看出，输出电压在额定值上下振荡时，控制电路能够有效地发出相应控制信号，反馈误差信号的隔离效果较好，能够实现误差信号的无畸变隔离传输。

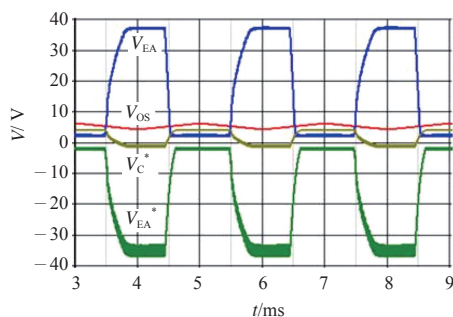


图4 磁反馈各节点波形对比

此外，从图4中还可以看出，经过反激式的隔离变换，输出侧的误差信号能够无畸变反向传递，再经过分压偏置形成最终控制信号，但隔离线圈的调制过程会造成一定的时间延迟，图4中也可以看出信号产生了一定程度的滞后。

### 2. 采用磁反馈的有源钳位正激电路仿真

为了验证磁反馈电路在电源系统的实际控制效果，对采用这种控制方式的有源钳位正激电源进行仿真测试，如图5所示。设置仿真时间为15 ms，0~5 ms电源空载运行，5~10 ms电源为7 A负载供电，10 ms时刻电源卸掉负载。通过对电源输出电

压电流的检测观察系统稳态、动态特性。从图5中可以看出电源的起动特性较好，稳态及动态特性达到理想效果。

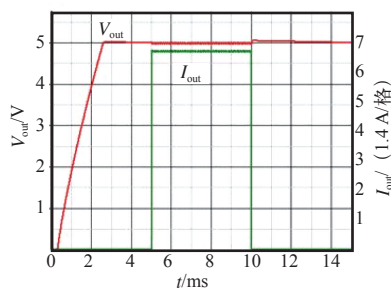
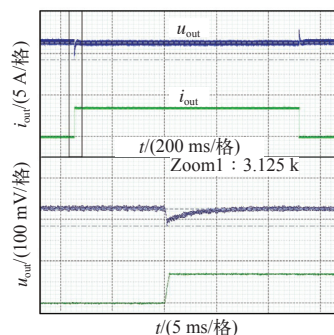


图5 负载切换输出电流电压波形

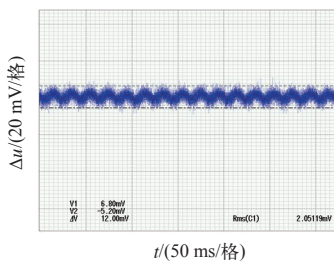
## 实验验证

为了验证本文提出磁反馈方式的可行性，本文设计了一台36~75 V输入，5 V/10 A输出的电源样机，开关频率200 kHz，主电路拓扑选择有源钳位正激变换器，主开关管选择IR公司的IRFB42N20D型MOS管，钳位电容取220 nF，输出储能电感为3.9  $\mu$ H，滤波电容为1.35 mF。

图6a为电源进行负载切换时的输出电压电流波形，由图6a可知，负载由0~7 A切换瞬间有41.5 mV的波动，低于输出电压的1%。如图6b所示，



(a) 0~7 A动态特性



(b) 输出电压纹波

图6 实验波形

(下转第125页)

验结果表明该线路符合标准要求。

2) 试验频率。综合国内外有关技术资料,选择合适的试验装置和工频试验变压器,使得试验设备的重量和频率范围合适是个比较重要的问题。从本次试验来看,电缆长度越长,电容量越大,所需输出电流越高,因此长距离电缆试验应尽量减少试验设备谐振频率,以降低试验电流。

3) 试品最大长度。容量大是试品电缆最大的特点之一,在7.9 km长试品试验中,频率在30 Hz时,最大总电流已经接近试验设备的上限,若频率及单位电容量不变,采用本试验设备最大理论试验长度为8.67 m。

2013年12月3日~25日220 kV邢姚I线、220 kV邢姚II线、220 kV姚文线和220 kV兴姚线等试验证明,本串联谐振耐压试验方案在长距离大容量电缆线路理论和现场试验方面均是可行实用的,对国内全面实施推广相关试验具有重要的意义。

#### 参考文献

- [1] 刘玮,肖勇. 220 kV交联超长电缆现场交流耐压试验[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 831-832.
- [2] 王伟,李云财,马文月,等. 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆技术基础[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005.
- [3] 赵金明,段肖华. 变频串联谐振技术在高压电缆交接试验中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(4): 23-25.
- [4] GB 50150—2006 电气装置安装工程——电气设备交接试验标准[S]. 北京:中国计划出版社, 2006.
- [5] GB/Z18890—2002 额定电压220 kV ( $U_m=252$  kV) 交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件试验方法和要求[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [6] GB/T 16927.2—2013 高电压试验技术 第2部分:测量系统[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.

(收稿日期:2014-04-21) **EA**

(上接第94页)

系统纹波电压较小,为12 mV。因此,采用磁反馈不仅能达到较好的静态特性,而且动态特性也较为出色。

图7为电源不同负载电流时的效率曲线,由曲线可知,电源能够达到85%以上的效率,最高可达到90.7%。

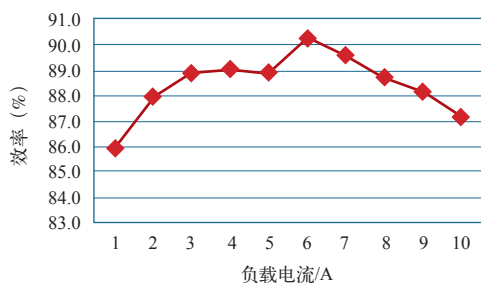


图7 效率曲线

#### 结束语

设计了基于幅度调制磁反馈方式的有源钳位正激变换器,说明了其原理及工作过程。仿真和

实验结果表明,磁反馈方式具有较高可靠性的同时能够达到良好的控制稳定性和静态特性,适用于工作环境恶劣的场合;有源钳位正激电路能够有效降低开关损耗,效率可达90%以上。磁反馈方式的DC/DC变换器适合航天电源的应用。

#### 参考文献

- [1] 赵瑞杰,陶学军,田素立. 新型有源钳位正激软开关变换器的研究[J]. 电子技术应用, 2011, 37(11): 73-79.
- [2] Harada K, Sakamoto H. Switched Snubber for High Frequency Switching[C]. IEEE Power Electronics Specialist Conference, 1990: 181-188.
- [3] 彭国平,杨旭,鱼振民. 有源钳位正激变换器的分析和设计[J]. 电工技术杂志, 2003(10): 29-33.
- [4] 任红,罗浩,韩全胜,等. 双电源转换开关电器的选择及应用[J]. 电气应用, 2005(8): 2-9.

(收稿日期:2014-04-29) **EA**