

## 航空静止变流器的研究综述

张方华 龚春英 邓翔

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

**摘要:**航空静止变流器实现机载直流电到交流电的转换,是航空电源系统的重要组成部分。本文从拓扑和控制等方面回顾了近年的研究历程,讨论了提高航空静止变流器的功率密度、效率、输入/输出性能等的关键技术。分析了航空静止变流器的适用拓扑,采用反向恢复损耗问题小的拓扑,并采用交错移相控制技术等,可提高滤波器的等效开关频率,减轻被动元器件的重量。在 DC-DC 变换器的电压环中增加陷波滤波器,在 DC-AC 逆变器的电压环中增加谐振控制器,显著改变了特定频率处的变换器输出阻抗,解决了单相航空静止变流器的输入端的低频电流纹波问题,显著提升了航空静止变流器的输出电压调整率。在提高基础模块性能的基础上,研究了具有抗干扰能力强的组合控制技术,为航空静止变流器的标准化奠定了基础。

**关键词:**航空静止变流器;低频纹波;谐振控制器;模块化;双 Buck 逆变器

**中图分类号:**TM464; V242 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)01-0019-08

## Review of Aeronautic Static Inverter

Zhang Fanghua, Gong Chunying, Deng Xiang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Aeronautic static inverters (ASIs) convert the DC bus voltage to constant frequency AC voltage, which is an important part of the aircraft power system. Research progress in recent years from the aspects of topologies and control techniques is reviewed. The key techniques to improve the ASI's power density, efficiency, input/output performance are highlighted. The topologies with small reverse recovery losses and the interleaving phase-shift control technology can increase the equivalent operating frequency of the filters and reduce the weight of passive components. By introducing a notch filter into the voltage loop of DC-DC converter, the output impedance at twice line frequency is significantly increased and the low-frequency current ripple in the input of the single-phase ASIs can be reduced. By introducing a resonant controller into the voltage loop of DC-AC converter, the output voltage regulation of ASI can be significantly improved. On the basis of improving the performance of basic module, the combination control technology of strong anti-interference ability is researched, which has laid the foundation for the standardization of ASI.

**Key words:** aeronautic static inverter; low-frequency ripple; resonant controller; modularization; dual-buck inverter

**基金项目:**国家自然科学基金(51007039)资助项目。

**收稿日期:**2013-10-20; **修订日期:**2013-12-23

**作者简介:**张方华,男,教授,博士生导师,1976年4月生;研究方向:直流变换器、高可靠性航空静止变流器、LED驱动、电力电子系统的稳定性和电能质量;研究成果:国防科学技术进步奖二等奖、国防科学技术进步奖三等奖、国防科学技术发明奖二等奖、教育部科学技术发明奖二等奖以及中达青年学者等。

**通信作者:**张方华, E-mail: zhangfh@nuaa.edu.cn.

在飞机二次电源中,航空静止变流器(Aero-nautic static inverter, ASI)将发电机或航空蓄电池的电能转换为恒频交流电给飞控、仪表等用电设备提供高品质的电能,是航空电源系统的重要组成部分。从飞机电气系统的层面来看,机载设备的高效率意味着能源消耗或发热量的减少,有助于降低航空静止变流器的热疲劳强度,提高可靠性;而且高功率密度意味着飞机载重量的降低,有助于提高飞机的续航里程。因此,高功率密度、高效率是机载电能变换设备的内在需求。

随着功率半导体器件的发展,20世纪70年代航空静止变流器取代旋转变流机,提高了二次电源的维护性和可靠性。目前国内主要的航空静止变流器规格为28 V直流输入,单相或三相115 V/400 Hz输出。近年来随着飞机用电容量的显著增加,一些新型飞机开始采用270 V高压直流母线,出现了高压270 V输入的变流器。一般采用图1所示的两级变换方案。DC-DC变换器将28 V或270 V DC转换为180 V DC或360 V DC,分别供后级全桥或半桥型DC-AC逆变器使用。为减轻系统重量,均在DC-DC级通过高频变压器隔离,而不采用400 Hz的中频变压器。电力电子技术的发展,为航空静止变流器的功率质量比、变换效率等关键技术指标的大幅度提高创造了空间。本文将围绕ASI的功率质量比、变换效率、低频纹波抑制、模块化等,从功率变换拓扑和控制技术等方面进行阐述。



图1 两级式航空静止变流器框图

Fig. 1 Block diagram of two-stage aeronautic static inverter

## 1 航空静止变流器的变换拓扑

### 1.1 DC-DC变换器的拓扑(以28 V输入为例)

DC-DC变换器将28 V DC转换为180 V DC(以后级为全桥型电路为例),实现输出电压调节和电气隔离。按照文献[1]的要求,DC-DC变换器的正常输入电压范围为22~29 V;可承受的瞬变电压范围为18 V历时15 ms,50 V历时12.5 ms。

原理上讲,所有隔离型DC-DC变换器均可用于该场合。但一般而言,为提高ASI的可靠性,建议选取开关管数量较少的方案。例如推挽正激电路<sup>[2]</sup>、单端反激电路等。推挽正激电路具有开关管电压有效箝位、含输入内置滤波器等优点,适于

28 V输入场合。

交错并联技术<sup>[3]</sup>可以使滤波器的工作频率提高为主开关器件的开关频率的 $n$ 倍( $n$ 为交错并联相数),在不增加开关损耗的情况下,进一步减轻被动元器件的重量,并能实现一定程度的冗余、容错,在较大功率的应用中应用价值高。

### 1.2 DC-AC逆变器的拓扑

DC-AC变换器将180 V DC(以全桥逆变器为例)逆变为115 V/400 Hz的交流电。

全桥和半桥电路是逆变器的经典拓扑,但由于存在主开关管的反并联寄生二极管反向恢复损耗大、存在桥臂直通可能性等问题,影响桥臂工作可靠性。主开关管的反并联寄生二极管反向恢复造成的电压、电流尖峰,限制了开关频率的进一步提高,开关频率通常被限制在20 kHz以下。为了满足逆变器输出总谐波含量(Total harmonic distortion, THD)的要求,需要降低输出滤波器的截止频率,增加了滤波器的质量,因此降低了功率质量比。为了提高逆变器的可靠性,并提高开关频率,以减轻被动元器件的质量,主要有两类做法:

(1)仍采用桥式电路,主要从3个方面着手:①采用软开关逆变技术<sup>[4]</sup>;②采用IGBT与SiC基肖特基二极管组合的器件<sup>[5]</sup>;③采用导通电阻大、但反向恢复电荷小的新型MOSFET<sup>[6]</sup>。但上述方案存在方案复杂或损耗大的问题,工作频率无法显著提高。

(2)采用无桥臂直通可能性的逆变拓扑。研究较多的有Z源逆变器<sup>[7]</sup>和双Buck逆变器(图2)两类。①Z源逆变器中,即使同一桥臂开关管在干扰情况下误导通也不会造成灾难性的后果,获得了广泛的研究。但Z源逆变器仍存在几个方面的缺陷:(a)升压比大时,逆变器调制比低,器件综合电压、电流应力大,整机变换效率不高<sup>[8]</sup>; (b)直流侧存在右半平面零点、轻载时Z源电感电流断续,桥臂电压不易控制<sup>[8-9]</sup>; (c)Z源的被动元器件多,且需采用较大的电感值,功率密度不高<sup>[10]</sup>; (d)在启动瞬间Z源电容充电,启动冲击电流大<sup>[11]</sup>; (e)主开关的反并联二极管仍存在反向恢复,开关频率无法大幅度提高。在功率密度和变换效率要求高的机载应用场合,目前仍未见应用。②双Buck逆变器及其衍生拓扑<sup>[12-15]</sup>。由于双Buck逆变器的桥臂是开关管与二极管串联的结构,反向恢复过程短,电磁干扰小;且两个开关管 $S_1, S_2$ 之间有较大的电感,不存在桥臂直通的问题,可靠性高。双Buck逆变器最初提出时采用两组直流变换器输出电压的差得到正弦波,环流能量较大。文献<sup>[13]</sup>采

用半周期滞环控制,解决了环流能量问题;且由于续流回路流通快恢复二极管而不是 MOSFET 的反并联二极管,因此无反向恢复问题,可大幅度提高开关频率。但双 Buck 逆变器的滤波电感半周期工作,且工作在直流偏置状态,磁心利用率低,质量大;为此,文献[15]提出了带有耦合电感的方案,如图 3 所示。该方案使滤波电感磁心工作在双向磁化状态,并解决了直接耦合时的环流问题;滤波电感的磁心利用率与全桥逆变器的滤波电感的磁心利用率持平,是优选的拓扑方案。

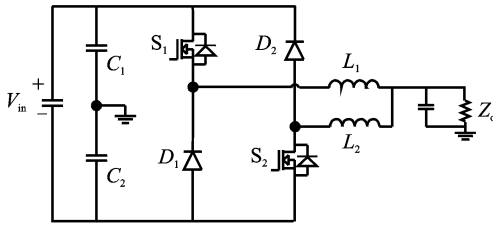


图 2 双 Buck 逆变器  
Fig. 2 Dual-buck inverter

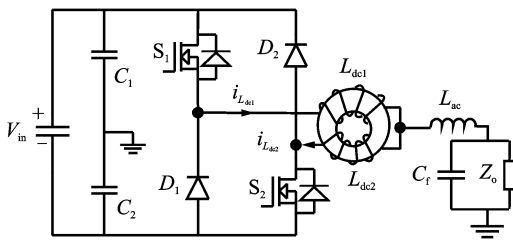


图 3 带耦合电感的双 Buck 逆变器  
Fig. 3 Dual-buck inverter with coupled inductor

## 2 航空静止变流器的控制方法

### 2.1 DC-DC 变换器的控制方法

#### 2.1.1 DC-DC 变换器的通用控制方法

DC-DC 变换器主要完成电压变换功能,采用单电压环控制即可。为了提高动态响应速度,一般采用电压-电流双闭环的控制方式。

#### 2.1.2 输入电流低频纹波的产生原因和抑制方法

由于 DC-AC 逆变器部分的输出功率是周期性变化、前级 DC-DC 变换器的高频斩波变换等原因,航空静止变流器的输入电流中可能含有一些谐波成分。从二次电源系统层面看,过大的输入电流纹波将对供电电源造成不利影响,影响二次电源系统可靠性。RTCA/DO-160G<sup>[16]</sup> 规定的输入电流纹波限值,如表 1 所示。

对单相航空静止变流器而言,输入电流纹波主要含有高频开关造成的高频纹波和输出级输出功率周期性变化造成的低频纹波,前者较易通过输入

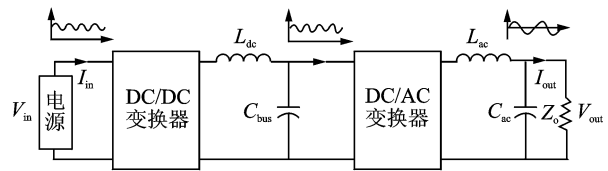
滤波电路解决,因此后文主要讨论输入电流中的低频电流纹波。

表 1 ASI 的输入电流纹波限值(RTCA/DO-160G)

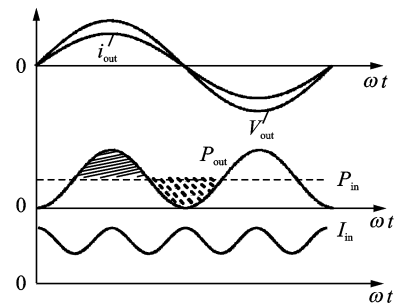
Tab. 1 Limit value of input current ripple of ASI(RTCA/DO-160G)

输入电压	28 V DC		270 V DC		
功率等级	0.4~1 kW	>1 kW	<1 kW	1~10 kW	>10 kW
输入电流纹波比( $\Delta I/I$ )	$\leq 14\%$	$\leq 7\%$	$\leq 28\%$	$\leq 14\%$	$\leq 7\%$

图 4(a)为低频纹波电流的传输过程,图 4(b)为波形图。设输出电压为  $V_{out}(t) = V_m \sin(\omega t)$ , 输出电流为  $I_{out}(\omega t) = I_m \sin(\omega t)$ , 则输出功率为:  $P_{out}(\omega t) = \sqrt{2} V_m \sin(\omega t) \sqrt{2} I_m \sin(\omega t) = V_m I_m (1 - \cos(2\omega t))$ 。由于输出功率含有两倍输出频率的成分,因此若单相航空静止变流器的母线解耦电容较小,则母线电容无法提供足够的低频能量缓冲,输入电流将含有两倍输出频率的脉动电流。DC-DC 变换器的输出功率将处于低频脉动状态,不仅增加了直流电源的无功功率负担,而且影响 DC-DC 变换器效率<sup>[17]</sup>;在燃料电池或太阳能电池作为供电电源的场合降低了燃料电池寿命或影响最大功率跟踪效率<sup>[18-19]</sup>。



(a) 低频电流纹波传输过程



(b) 低频电流纹波波形示意图

图 4 ASI 的电流低频纹波的传输过程及波形

Fig. 4 Transmission process and waveform of low-frequency current ripple in ASI

从原理上来看,抑制低频电流纹波的方案主要有两类:

(1) 在直流侧增加双向 DC-DC 变换器,如图 5 所示。在主逆变器输出功率较小时,直流变换器 1

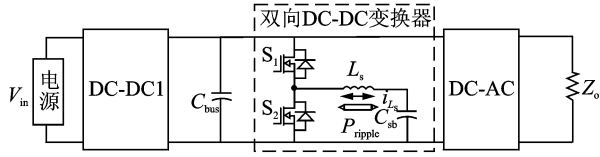


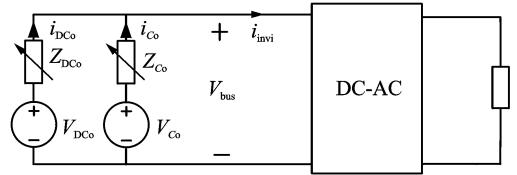
图5 直流侧增加双向DC-DC变换器的低频纹波能量处理原理图

Fig. 5 Schematic diagram of processing low-frequency ripple energy by adding a bi-directional DC-DC converter in DC side

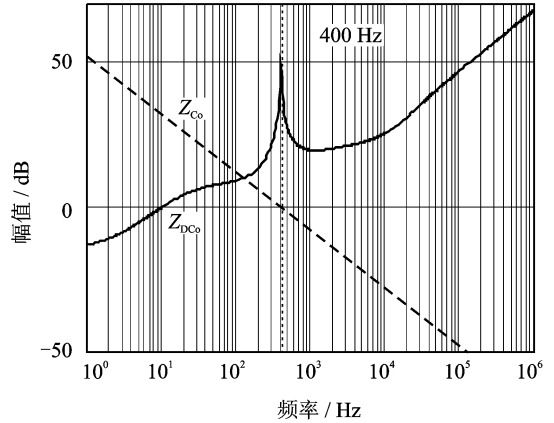
中多余的能量将通过双向DC-DC变换器给电容 $C_{sb}$ 充电;在主逆变器输出功率较大时, $C_{sb}$ 中储存的能量通过双向DC-DC变换器与直流变换器1一起向主逆变器提供能量。由于允许 $C_{sb}$ 的电压大幅度波动,需要的电容量大幅度减小,提供了薄膜电容替代电解容的可能性。但该外加的双向DC-DC变换器体积/质量大,仅在功率容量大(大于10 kW)时才有优势<sup>[19]</sup>,在功率较小时采用双向变换器与主DC-DC变换器共用功率开关的集成方式<sup>[18]</sup>,但增加的电路部分的二次谐波环流能量增加了损耗。从本质上讲,该双向DC-DC变换器为两倍输出频率的功率提供了低阻抗的流通回路。但该类方案存在功率密度低、控制复杂的缺陷。

(2)低带宽电压-电流双闭环控制。文献[20]中,前级DC-DC变换器采用电压-电流双闭环控制,通过大幅度降低电压环带宽,使电压环输出端的两倍输出频率分量衰减,从而不引入到DC-DC变换器的电流环中,将输入电流中的低频纹波含量降低到5%以下。为抑制逆变器后级带来的120 Hz的低频纹波,文献[20]中电压环截止频率仅2 Hz。对前级DC-DC变换器而言,极低的电压环截止频率将显著降低其动态响应,引起逆变器输出电压的削顶现象或增加后级半导体器件的电压应力。

从物理概念上来看,在两级式单相逆变器中,可以认为前级DC-DC变换器与母线电容并联向后级DC-AC逆变器供电,如图6(a)为等效电路;前级DC-DC变换器由 $V_{DCo}$ 与 $Z_{DCo}$ 串联等效,母线电容由 $V_{Co}$ 与 $Z_{Co}$ 串联等效。为减小两级式单相航空静止变流器的输入侧的低频纹波电流含量,希望前级DC-DC变换器在特定频率处的输出电流小。从两电源并联供电的角度,如果前级DC-DC变换器在特定频率处的输出阻抗较大,则电流将主要由阻抗小的支路分担。图6(b)给出了预期的DC-DC变换器与母线电容的等效串联阻抗示意图。按照图6(b)的阻抗目标,则可以使DC-DC变换器输出



(a) 前级DC-DC与母线电容并联供电示意图



(b) 前级DC-DC与母线电容等效输出阻抗示意图

图6 前级DC-DC变换器与母线电容并联供电及预期的等效输出阻抗

Fig. 6 Parallel power supply schematic diagram and expected equivalent output impedance of DC-DC converter and bus capacitors

电流中的低频分量减小。

从物理概念上看,降低DC-DC变换器电压环增益,可增大DC-DC变换器的输出阻抗。降低DC-DC变换器的带宽可以达到此目标,但传统的降低带宽的做法将影响系统的动态响应。由于前级DC-DC变换器的低频纹波仅出现在800 Hz处(某些半桥逆变器为400 Hz,如图6(b)所示),因此可以考虑仅降低DC-DC变换器在该频率点上的电压环增益。由于陷波滤波器可以在特定频率处使电压环增益大幅度衰减,从而大幅度提高特定频率点上的输出阻抗,使该低频纹波由母线电容承担。文献[21]提出电压环输出端采用陷波滤波器的控制方式,控制框图如图7所示,详细分析可参考文献[22,23]。

## 2.2 DC-AC逆变器的控制方法

DC-AC逆变器有特定谐波消除、正弦脉宽调制、滞环电流控制等大量经典的控制方法。在此基础上,本文主要针对航空静止变流器中存在的一些特殊的问题进行探讨。

### 2.2.1 DC-AC逆变器的比例-谐振(Proportion-resonant, PR)控制

航空静止变流器中,输出电压的稳压精度在 $\pm 1\%$ 以内,由于输出频率为400 Hz,电感的电压

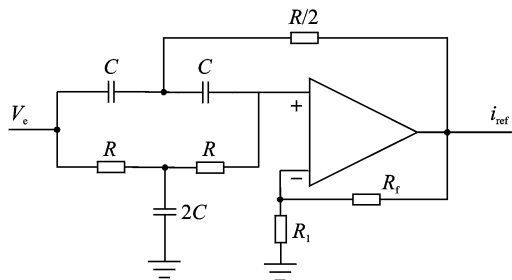
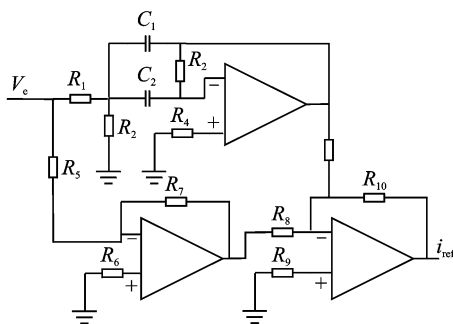


图 7 带有陷波滤波器的控制框图

Fig.7 Control block diagram with notch filter



(a) 谐振控制器的控制框图

降大,输出电压调整率的问题相较于工频输出的逆变器更为严重。为提高输出电压调整率,可采取负载电流前馈控制、输出滤波电容电流反馈控制,但这两种控制方法削弱了或消除了输出负载电流的信息,难以实现输出短路时的电流限制<sup>[24]</sup>。文献<sup>[25]</sup>在输出电压环中采用比例-谐振控制器,显著提高输出频率处的闭环增益,相当于降低了输出频率处的输出阻抗,提高了输出电压调整率。

DC-AC 逆变器的电压环中谐振控制器的控制框图如图 8(a) 所示,引入谐振控制器后系统开环幅相特性曲线如图 8(b) 所示。谐振控制器的引入显著提高了系统在输出电压基波频率 400 Hz 处的开环增益,而对开环截止频率及其他点处的幅值和相位没有产生影响,在保证系统稳定性不受影响的前提下,提高了 DC-AC 逆变器的电压调整率。

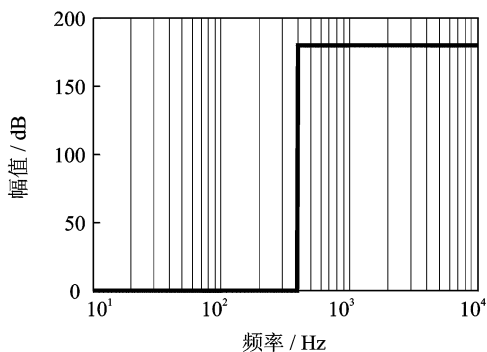
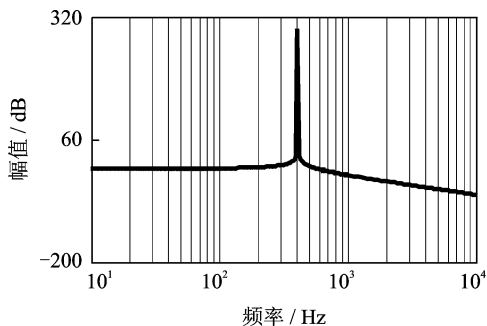
### 2.2.2 DC-AC 逆变器的短路损耗降低

为提高航空静止变流器所在系统的可靠性,文献<sup>[1]</sup>要求航空静止变流器在短路状态下具有输出 3 倍短路电流的能力,该过程的持续时间不小于 5 s。输出短路状态下,输出电压接近为 0,DC-AC 逆变器工作在高输出电流状态下,因此开关损耗很大,容易引起变流器故障。

文献<sup>[26]</sup>中,给出了滞环电流控制的双 Buck 逆变器的短路损耗影响因素,其中逆变器的输入电压越低,损耗越小。因此,在输出短路期间,降低 DC-AC 逆变器的输入电压,可以显著降低开关损耗,不仅提高了可靠性,而且减小了 DC-AC 逆变器的输出滤波电感的设计裕量,减轻了质量。基于上述分析,文献<sup>[27]</sup>给出了降低短路损耗的控制方法。基本控制思路为,在短路状态下,降低 DC-DC 变换器的输出电压(即 DC-AC 逆变器的输入电压),从而有效地降低短路损耗。

## 3 航空静止变流器的模块化

在机载设备中贯彻“通用化、系列化和模块化”



(b) 引入谐振控制器后系统开环幅相特性曲线

图 8 引入谐振控制器的控制框图及系统幅相特性曲线  
Fig.8 Control block diagram and system characteristic curves after introducing resonant controller in voltage loop of DC-AC inverter

(“三化”)的思想,对全面提高航空静止变流器的可靠性、维修性和电气性能,形成可选型号的货架产品,并实现相对主机需求的超前发展,降低产品的寿命周期费用,具有重要意义。所谓产品通用化,是指同一类型不同规格或不同类型的产品和装备中,用途相同、结构相近似的零部件,经过统一以后,可以彼此互换的标准化形式。系列化是使某一类产品系统的结构优化、功能最佳的标准化形式,它通过对同一类产品发展规律的分析研究,经过全面的技术经济比较,将产品的主要参数、型式、尺寸、基本结构等作出合理的安排与计划,以协调同类产品和配套产品之间的关系。“模块化”是按照标准化的原则,设计并制造出一系列通用性较强的

单元,根据需要拼合成不同用途的物品的一种标准化的形式。为实现上述思想,开展高性能航空静止变流器基础模块的研制是重要工作,有助于实现装备标准化。

### 3.1 模块化的总体思路

基于“三化”的研制思想,从提高机载二次电源的可靠性、维修性、综合电气性能等角度出发,定义、研制电气性能好、可靠性高、维修性好的“三化”ASI基础模块,并考虑基础模块内部基本单元的模块化,是中国飞机二次电源研究的重要方向。

#### (1) 提高航空静止变流器的可靠性

可靠性是机载设备的首要要求。机载二次电源的可靠性与主电路拓扑、变换效率、冷却方式等密切相关。从电路拓扑角度看,应尽量避免选用存在桥臂开关管直通缺陷的拓扑,并且优先选用开关器件少的电路拓扑。其次,提高系统变换效率,降低模块内部元器件环境应力(热应力和电应力),并为采用不存在风机等旋转部件的自然冷却方式创造了条件。

#### (2) 提高航空静止变流器的维修性

机载二次电源的“三化”研究是从标准化工作出发的重要思路。在系列化基础模块的研制过程中遵循的思路为:①研制具有通用性的“DC-DC变换模块”和“DC-AC变换模块”,组合构成各个基础模块;②为扩展功率容量,研究基础模块的组合、并联技术<sup>[28]</sup>;③在“DC-DC变换模块”和“DC-AC变换模块”的模块内部,其“机内电源”“控制、保护电路”“驱动电路”等单元也具有通用性。

### 3.2 三相组合式逆变器的控制方法

考虑到应用系统中的空间分布,文献[29]采用输出电源线实现基础模块间的通信,通过采集输出电压信号,实现三相基础模块的组合,避免了高频、弱电同步信号易受干扰的问题。图9为三相组合式逆变器的控制框图。

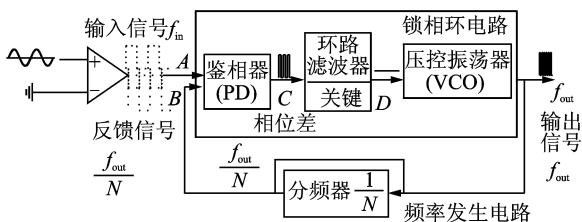


图9 三相组合式逆变器的控制框图

Fig. 9 Control block diagram of three-phase modular inverter

## 4 航空静止变流器的测试数据及分析

### 4.1 测试数据

本文以28 V输入,115 V/400 Hz/1 kW输出的航空静止变流器为例,给出主要的测试结果。

图10给出了引入陷波滤波器后的实验波形。自上而下依次为:母线电压、直直变换器输入电流、逆变器输出电压。可见:加入陷波滤波器后直直变换器输入电流低频纹波值为5%,很好地抑制了低频纹波。

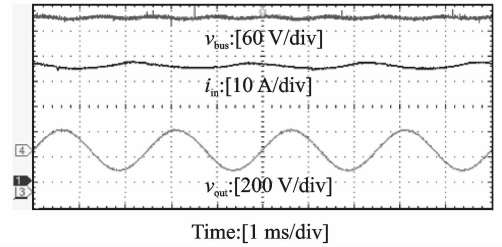


图10 引入陷波滤波器实验结果

Fig. 10 Experimental results after introducing notch filter

图11给出了阻性负载时加与不加PR控制器的外特性曲线。不加PR控制器的双闭环控制逆变器外特性比较软,从空载到满载,输出电压跌落接近2 V。而采用PR控制的逆变器从空载到满载,输出电压仅降低0.1 V,外特性非常硬。

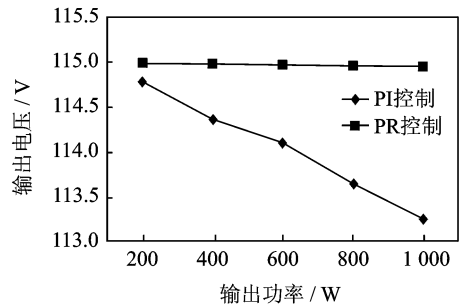


图11 不同控制方式的逆变器外特性

Fig. 11 External characteristics of inverters with different control methods

图12给出了该航空静止变流器效率曲线。1 kW的航空静止变流器样机质量为2.7 kg,与国外著名二次电源厂家KGS Electronics的样机相比,整机质量减少了0.7 kg,整机变换效率提升了约3%。

### 4.2 航空静止变流器的研究分析

图13给出了国内航空静止变流器的功率质量比曲线以及效率曲线。图14给出了1 kVA航空

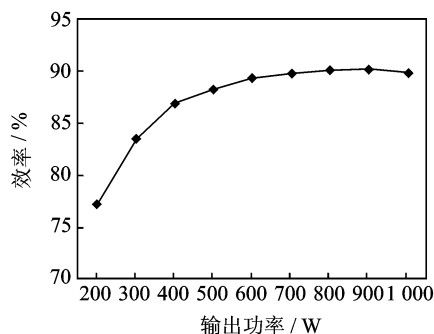


图 12 ASI 的效率曲线

Fig. 12 Efficiency curve of ASI

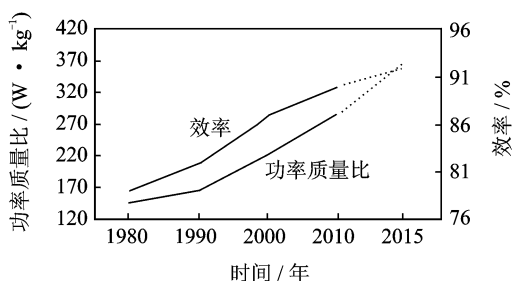
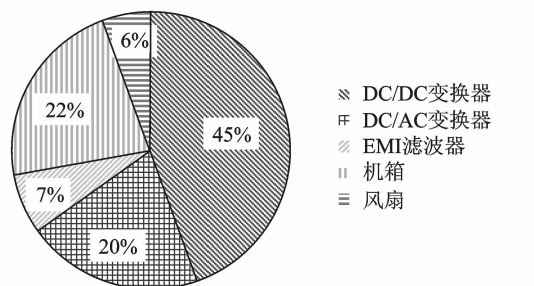
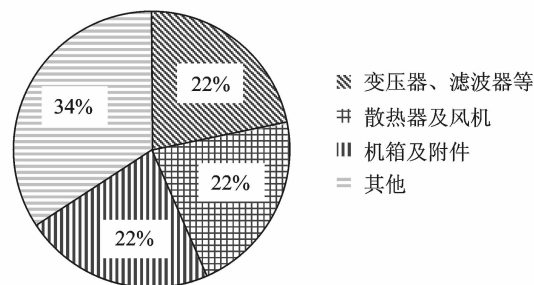


图 13 ASI 的功率质量比曲线以及效率曲线

Fig. 13 Power to weight ratio curve and efficiency curve of ASI



(a) 1 kVA ASI 质量分布I



(b) 1 kVA ASI 质量分布II

图 14 1 kVA ASI 质量分布

Fig. 14 Weight distribution of 1 kVA ASI

行航空静止变流器的功率集成和热设计研究,并研究适于高温场合应用的宽禁带半导体开关器件在航空静止变流器中的应用。

## 5 结 论

航空静止变流器是航空电源系统的重要组成部分。本文从拓扑和控制等方面回顾了近年的研究历程,研究了提高航空静止变流器的功率密度、效率、输入/输出性能等的关键技术。得出的主要结论如下:

(1)采用交错并联技术、选用无反向恢复损耗问题的 DC-AC 逆变器拓扑、采用磁集成技术等是减轻被动元器件的质量的重要技术手段。

(2)在 DC-DC 变换器的电压环中增加陷波滤波器,增加了 DC-DC 变换器在特定频率处的输出阻抗,减小了单相航空静止变流器的输入端的低频电流纹波。

(3)在 DC-AC 逆变器的电压环中增加比例谐振环节,显著提升了输出电压调整率。

(4)ASI 基础模块应具有抗干扰能力强的组合、并联功能,是 ASI 标准化的重要基础。

(5)功率集成技术、热管理、宽禁带半导体开关器件的应用将有助于航空静止变流器功率密度的进一步提高。

## 参考文献:

[1] 中华人民共和国解放军总装备部. GJB3279A—2011 飞机静止变流器通用规范[S]. 北京:中华人民共和国解放军总装备部军表出版发行部,2011.

[2] 张方华. 双向 DC/DC 变换器的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.

[3] Lee F C, Wang Shuo, Kong Pengju, et al. Power architecture design with improved system efficiency, EMI and power density[C]// IEEE Power Electronics Specialist Conference, Rhodes, Greece; IEEE, 2008: 4131-4137.

[4] Sun Pengwei, Lai Jih-Sheng, Liu Chuang, et al. A 55-kW three-phase inverter based on hybrid-switch soft-switching modules for high-temperature hybrid electric vehicle drive application [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 2012, 48(3): 962-969.

[5] Vieillard S, Meuret R. High efficiency, high reliability 2 kW inverter for aeronautical application [C]// 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark; EPE Association, 2007: 1-8.

[6] Kang Won-Seok, Yeon Jae-Eul, Kim Hee-Jun, et al. Reliability improvement of FB inverter in HID lamp ballast using UniFET II MOSFET family [C]// IEEE

静止变流器质量分布。由图 14(b)的质量分布可见,变压器、滤波器等被动元器件占总量的 22%;散热器及风机占总量的 22%,机箱及配件占总量的 22%。因此,为进一步提高功率密度,应深入进

- INTELEC, Amsterdam, Netherlands; IEEE, 2011; 1-5.
- [7] Peng Fangzheng. Z-source inverter[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 2003, 39(2): 504-510.
- [8] Shen Miaosen, Peng Fangzheng. Operation modes and characteristics of the Z-source inverter with small inductance or low power factor [J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2008, 55(1): 89-96.
- [9] Poh C L, Vilathgamuwa D M, Gajanayake C J, et al. Transient modeling and analysis of pulse-width modulated Z-source inverter [J]. IEEE Trans on Power Electron, 2007, 22(2): 498-507.
- [10] Rajakaruna S, Jayawickrama L. Steady-state analysis and designing impedance network of Z-source inverters [J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2010, 57(7): 2483-2491.
- [11] 汤雨, 谢少军, 张超华. 改进型 Z 源逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 28-34.  
Tang Yu, Xie Shaojun, Zhang Chaohua. Improved Z-source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 28-34.
- [12] 张方华, 龚春英, 刘军. 高效率模块化航空静止逆变器的研制[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1119-1125.  
Zhang Fanghua, Gong Chunying, Liu Jun. High efficiency modular aeronautic static inverter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(6): 1119-1125.
- [13] 刘军. 一种新颖的双降压式半桥逆变器研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
- [14] 吴婷, 肖岚, 姚志奎. 双降压式全桥逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 22-27.  
Wu Ting, Xiao Lan, Yao Zhilei. Dual buck full-bridge inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 22-27.
- [15] 张方华, 王旭东, 肖旭. 一种三电感双 Buck 逆变器: 中国, 103107720A[P]. 2013-05-15.
- [16] SC-135 Environmental Testing. DO-160G-2010 Environmental conditions and test procedures for airborne equipment[S]. USA: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2010.
- [17] 朱成花. 直流分布式电源系统子系统相互作用分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [18] Shimizu T, Suzuki S. Control of a high-efficiency PV inverter with power decoupling function[C]// IEEE ECCE Asia. Jeju, South Korea; IEEE, 2011: 1533-1539.
- [19] Wang Ruxi, Wang Fei, Boroyevich D, et al. A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage [J]. IEEE Trans on Power Electron, 2011, 26(5): 1430-1443.
- [20] Liu Changrong, Lai Jih-Sheng. Low frequency current ripple reduction technique with active control in a fuel cell power system with inverter load [J]. IEEE Trans on Power Electron, 2007, 22(4): 1429-1436.
- [21] 韦微, 龚春英, 邓翔, 等. 两级式直交逆变器输入电流低频脉动抑制方法: 中国, 101877549A[P]. 2010-11-03.
- [22] 邓翔, 韦微, 龚春英, 等. 一种新颖的抑制两级式直交逆变器输入电流低频脉动的方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 24-29.  
Deng Xiang, Wei Zheng, Gong Chunying, et al. A novel technique for low frequency input current ripple reduction in two-stage DC/AC inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(30): 24-29.
- [23] Wei Zheng, Deng Xiang, Gong Chunying, et al. A novel technique of low frequency input current ripple reduction in two-stage DC-AC inverter[C]// IEEE IEC-ON. Montreal QC: IEEE, 2012: 139-143.
- [24] 马海啸, 龚春英. 负载电流前馈双闭环控制逆变器的研究 [J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 32(3): 30-35.  
Ma Haixiao, Gong Chunying. Research on double closed-loop controlled inverter with load current feedback [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications; Natural Science, 2012, 32(3): 30-35.
- [25] 马海啸, 陈凯, 龚春英. 双 Buck 逆变器的建模与优化设计 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 35-41.  
Ma Haixiao, Chen Kai, Gong Chunying. Modeling and optimization design of dual-buck inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 35-41.
- [26] 刘军, 严仰光. 一种新颖的滞环电流型双降压式半桥逆变器 [J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(2): 122-126.  
Liu Jun, Yan Yangguang. A novel hysteresis current controlled dual buck half bridge inverter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003, 35(2): 122-126.
- [27] 刘大刚, 陈杰, 龚春英, 等. 一种提高电流控制型逆变器输出短路运行可靠性的方法: 中国, 101355319 [P]. 2009-01-28.
- [28] 王建华, 刘磊, 张方华, 等. 组合式三相逆变器锁相控制策略 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 79-84.  
Wang Jianhua, Liu Lei, Zhang Fanghua, et al. Phase-locked control method for three-phase combined inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 79-84.
- [29] 张方华, 陈新, 王建华, 等. 三相逆变器组合运行方法: 中国, 101436832[P]. 2009-05-20.



