

文章编号:1000-6893(2009)06-1119-07

高效率模块化航空静止变流器的研制

张方华, 龚春英

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

High Efficiency Modular Aeronautic Static Inverter

Zhang Fanghua, Gong Chunying

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

摘 要: 基于通用化、系列化和模块化的研制思想, 致力于研究提高航空静止变流器(ASI)的变换效率、减轻系统重量、提高可靠性和维护性等核心技术问题。从总体研制方案、核心技术和系列化基础模块 3 个层面出发, 采用功率扩展性能好、变换效率高、可靠性高的推挽正激电路和双降压式逆变器研制了 DC-DC 变换模块、DC-AC 变换模块等单元模块, 组合成 4 种航空静止变流器基础模块。研制的系列化基础模块, 整机变换效率均比国外同类产品提高 4.5% 以上, 并且在体积、重量、可靠性和可维护性等方面均具有明显优势。

关键词: 逆变器; 标准化; 模块化; 推挽正激变换器; 双降压式逆变器

中图分类号: TM464; V242 **文献标识码:** A

Abstract: One main trend in the development of aeronautic static inverter (ASI) is its modularization, generalization, and standardization. This article made a study on achieving higher efficiency, lighter system weight, higher reliability, and maintainability of ASI. Because of their good power expansibility and high efficiency and reliability, the push-pull forward converter and dual buck inverter are selected as the main topology to develop the DC-DC converter module and the DC-AC inverter module, and four ASI basal modules are combined by them. The four ASI modules have improved the efficiency by 4.5% as compared with similar products manufactured at home and abroad, and have obvious advantages in terms of weight, volume, reliability, and maintainability.

Key words: electric inverter; standardization; modularization; push-pull forward; dual buck inverter

在机载二次电源研制中贯彻通用化、系列化和模块化思想, 开展高性能航空静止变流器(Aeronautic Static Inverter, ASI)基础模块的研制是重要的研究方向。ASI 是重要的机载机电设备, 相对于包含旋转部件的旋转变流机而言, 可靠性大幅度提高; 并且由于其隔离变压器和滤波器均工作在高频状态, 重量也大幅度减轻。至 20 世纪 90 年代末, 国外著名 ASI 厂家(如 AII, KGS electronics 等)均已形成系列化产品, 为生产、使用和维护提供了很大的方便。而国内 ASI 种类少, 多根据具体飞机型号研制, 研发周期长、费用高、维护性差, 距离标准化要求有很大差距。为全面提高 ASI 的可靠性、维修性和电气性能, 替代现役飞机中可靠性低的旋转变流机和技术水平较低的 ASI, 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, 开

展 27 V 低压直流输入的高性能基础模块的研制工作, 具有重要意义。而为了适应我国新型飞机发展的需要, 开展 270 V 高压直流输入的高性能基础模块的预先研究工作, 也具有重要意义。

电气性能、体积和重量是 ASI 的重要性能指标。提高整机变换效率可以减少系统散热量, 进而减小体积和散热器重量; 并可减小元器件热应力和疲劳强度, 提高系统可靠性。因此整机变换效率是 ASI 的核心电气性能指标。

开展不同功率等级 ASI 的基础模块的研究, 提出适用的电路拓扑和控制方法, 研制可靠性高、维修性好、电气性能优异、小型轻量化和系列化的 ASI 基础模块, 是我国飞机二次电源研究的重要方向。

1 模块化静止变流器的总体研制思路

基于通用化、系列化和模块化的研制思想, 从提高机载二次电源的可靠性、维修性和综合电气性能等角度出发, 研制高电气性能、高可靠性的

ASI 基础模块。

(1) 提高 ASI 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、系统变换效率及冷却方式等密切相关。首先,从电路拓扑角度看,欲提高系统可靠性,应尽量避免选用存在桥臂开关管直通缺陷的桥式逆变电路,并且应考虑选用开关器件少的电路拓扑。其次,应研究提高系统变换效率的核心技术,以减小系统的热应力,使模块内部元器件疲劳强度减轻,这样就从源头上提高了系统可靠性;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。因此,选取合适的主电路拓扑并研究提高系统变换效率是提高 ASI 可靠性的关键。

(2) 提高 ASI 维修性

ASI 的维修性是一项与产品的寿命周期费用密切相关的综合指标。标准化是提高机载二次电源的维修性的重要思路。本文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由基础模块,通过串联、并联技术可方便地进行功率容量的扩展。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、控制电路、保护电路和驱动电路等单元也具有通用性。

通用化模块组合的思想有助于降低研制成本、缩短研制周期,并且可将某些现有模块技术应用用于未来机载二次电源产品的研发^[1]。另外组合式的结构也为机务维护提供了便利。

(3) 提高 ASI 的综合电气性能

优异的综合电气性能是系列化 ASI 基础模块的核心技术要求。需要从主电路拓扑、控制方案、机械和散热设计以及参数优化等诸方面通盘考虑。

2 模块化静止变流器的构成与工作原理

2.1 27 V 直流输入单相 ASI 的构成与工作原理

(1) 系统构成

本系统的功能是将 27 V 直流输入,转换成 115 V/400 Hz 单相交流电,输出功率分为 500 VA 和 1 000 VA 两种规格,结构框图如图 1 所示。主电路由 DC-DC 变换和 DC-AC 变换两部分构成,另有控制电路、机内电源、驱动电路和保护电路。各部分分别构成相对独立的模块形式,体现了系列化和模块化(组合化)的研究思路。

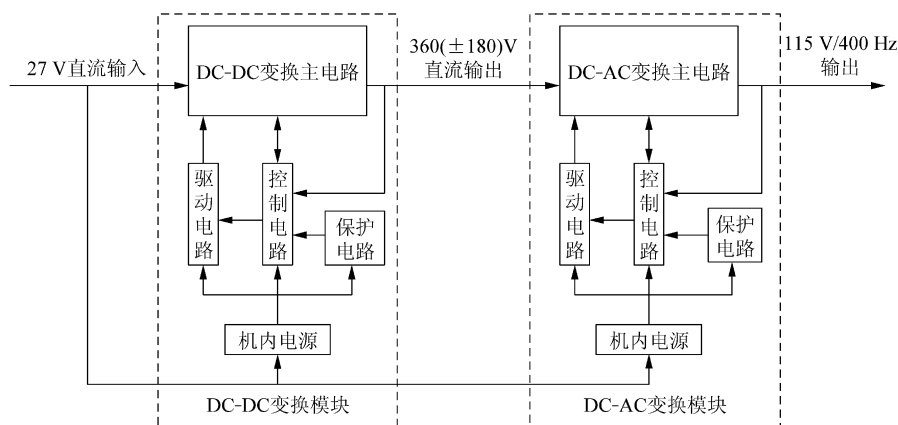


图 1 500 VA/1 000 VA 静止变流器框图

Fig. 1 Schematic diagram of 500 VA/1 000 VA ASI

(2) DC-DC 单元模块的工作原理

DC-DC 变换模块将 27 V 直流变换为 ± 180 V 直流输出。由推挽正激变换器主电路、电压电流双闭环控制电路、驱动电路、机内电源和保护电路组成。图 2 为推挽正激电路的主电路拓扑^[2],与推挽变换器相比,增加了一个箝位电容 C 。

在推挽正激电路中,有两个开关管,它们互相交错导通;任一开关管开通时另一开关管承受的

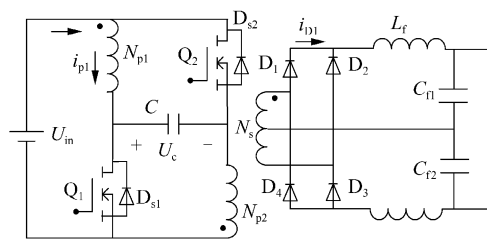


图 2 推挽正激 DC-DC 变换器主电路图

Fig. 2 Main topology of push-pull forward DC-DC converter

电压应力为: $U_{ds} = U_{in} + U_c \approx 2U_{in}$, 因此开关管漏源极电压可以由箝位电容有效箝位, 电压尖峰小, 降低了开关器件的电应力。由于箝位电容的存在, 使得在开关管 Q_1 与 Q_2 均不导通时, 原边电流在 $U_{in}^+ \rightarrow N_{p1} \rightarrow C \rightarrow N_{p2} \rightarrow U_{in}^-$ 构成的回路中环流, 使得输入电流纹波小, 电磁干扰小, 有利于输入滤波器的优化设计。副边采用全桥整流电路, 输出滤波电感等效开关频率为开关频率的 2 倍, 减小了滤波元件尺寸; 整流二极管采用碳化硅势垒二极管, 允许工作结温达 175°C , 反向恢复损耗和导通损耗小, 提高了变换效率和可靠性。推挽正激电路的输入输出关系为: $U_{odc} = nDU_{in}$, 其中 n 为变压器变比, D 为开关管导通占空比。

DC-DC 单元模块控制电路以脉冲宽度调制 (PWM) 芯片 SG1525 为核心, 采用输出电压和电感电流双闭环控制方案, 输出电压稳定、动态性能好, 驱动电路采用 9 A 输出驱动芯片 UCC27321, 驱动能力强, 开关管开关速度快, 减小了开关损耗。

(3) DC-AC 单元模块的工作原理

DC-AC 变换单元将 DC-DC 变换得到的 360 V (± 180 V) 直流电转换为 115 V/400 Hz 交流电。图 3 为 DC-AC 单元模块采用的双降压式逆变器主电路^[3-5]。在实际电路中, 容性负载和阻性负载时电感电流均超前于输出电压, 感性负载时根据滤波参数和功率因数的不同, 电感电流可能滞后于输出电压也可能超前于输出电压。本文以容性负载为例, 对滞环电流控制双降压式逆变器的工作模态进行分析, 各模态等效电路如图 4 所示, 输入电容等效为两恒压电源。

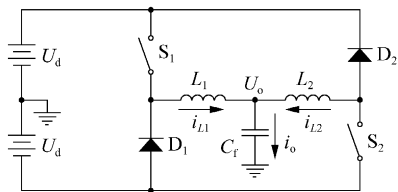
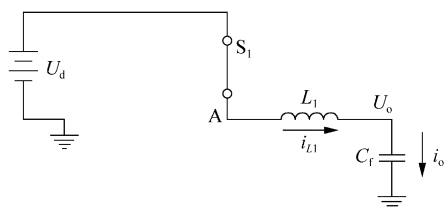
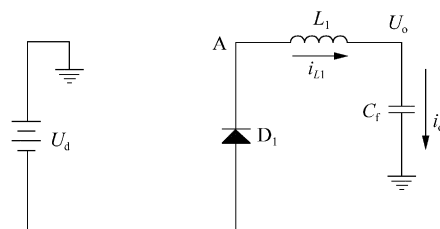


图 3 双降压式逆变器主电路图

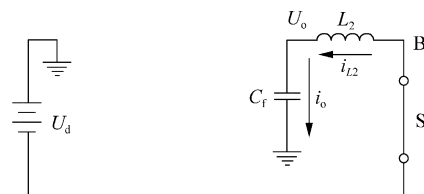
Fig. 3 Main topology of dual buck DC-AC inverter



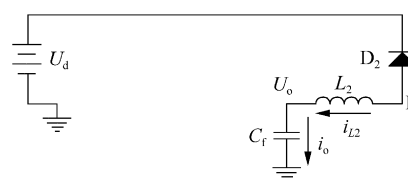
(a) 模态 1



(b) 模态 2



(c) 模态 3



(d) 模态 4

图 4 DC-AC 逆变单元各工作模态等效电路

Fig. 4 Equivalent circuits of inverter

模态 1: 当 $i_{L1} \geq 0$, S_1 导通, S_2 关断时, 上电源 U_d 释放能量。在输入和输出电压作用下, 电感电流以 $(U_d - U_o)/L_1$ 的斜率上升。 D_1 的电压应力为 $2U_d$ 。

模态 2: 当 $i_{L1} \geq 0$, 开关管 S_1 和 S_2 都关断时, 由于电感电流不能突变, 所以 D_1 导通, 变换器向下电源 U_d 回馈能量。在输入和输出电压共同作用下, 电感 L_1 中电流以 $(U_d + U_o)/L_1$ 的斜率下降。由于 S_1 关断, D_1 导通, 则 S_1 的电压应力为 $2U_d$ 。

模态 3: 当 $i_{L1} < 0$, S_2 导通, S_1 关断时, 下电源 U_d 释放能量。电感电流以 $(U_d + U_o)/L_2$ 的斜率下降。 D_2 的电压应力为 $2U_d$ 。

模态 4: 当 $i_{L1} < 0$, 开关管 S_1 和 S_2 都关断时, 由于电感电流不能突变, 所以 D_2 导通, 变换器向上电源 U_d 回馈能量。电感 L_2 中电流以 $(U_d - U_o)/L_2$ 的斜率上升。 S_2 的电压应力为 $2U_d$ 。

双降压式逆变电路的每个桥臂由开关管与二极管串联而成, 克服了桥式逆变电路的直通问题, 且逆变器的续流电流流过快恢复二极管, 反向恢复损耗小, 逆变单元变换效率高。

电压基准由基准正弦波发生器产生, 由振荡分频电路、阶梯波合成电路和有源滤波电路三部分组成。振荡分频电路用于产生时钟信号; 阶梯波合成电路由两片可预置计数器 CD4018 组成,

用来合成具有 18 块阶梯的阶梯波形;阶梯波通过有源滤波器滤除高次谐波,获得谐波含量很小的基准正弦波输出,其总谐波含量 $\text{THD} < 0.3\%$ 。控制电路由电压比例积分调节器和滞环比较器两部分构成。即控制方案采用电压电流瞬时值反馈双闭环控制,其中电流环为滞环控制,使电感电流在环宽范围内跟踪给定电流,稳定性和动态性能好。

(4) 电路板布局及各电路参数的优化

在功率电路中,电路板布局关系到变换效率、电磁干扰、开关管电压尖峰、稳定性和可靠性等诸多方面。通过综合考虑热点分布、电磁兼容等因素,采用控制电路和主电路分离的两层结构。通过对主电路参数(如 DC-DC 变换单元箝位电容量值、开关频率)、磁性元件(如高频功率变压器、DC-DC 与 DC-AC 变换单元的滤波电感)、主功率器件(如 DC-DC 变换单元主功率开关管及整流二极管、DC-AC 变换单元主功率开关管及续流二极

管)以及整流二极管的无损吸收电路等技术细节问题的细致研究对比,最终保证了该 ASI 的高变换效率。

2.2 27 V 直流输入三相 ASI 的构成与工作原理

(1) 系统构成

系统功能是将 27 V 直流输入,转换成 115 V/400 Hz 三相交流电,输出功率为 1 500 VA。27 V 直流输入 1 500 VA 三相 ASI 系统构成如图 5 所示。主电路由 DC-DC 变换和 DC-AC 变换两部分构成。DC-DC 变换模块的主电路拓扑、控制电路、驱动电路等均与上述单相 ASI 的 DC-DC 变换相同,只是根据功率容量不同,而选取和设计不同的主功率开关管、高频功率变压器、滤波器等。而 DC-AC 变换部分主电路由 3 个相对独立的双降压式 DC-AC 变换单元组合而成,充分体现了通用化、模块化(组合化)的研究思路,缩短了研发周期。

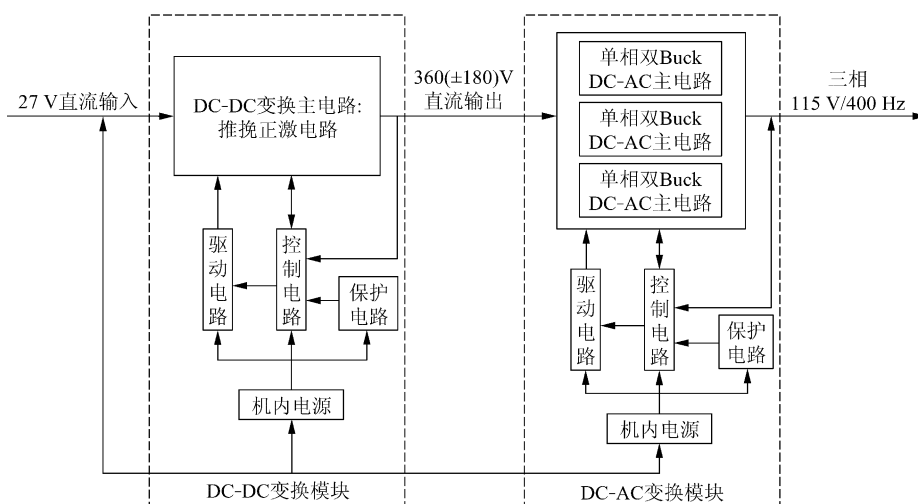


图 5 27 V 直流输入 1 500 VA 三相 ASI 系统构成

Fig. 5 System diagram of 1 500 VA three-phase ASI

(2) 工作原理

DC-DC 模块的工作原理和 500 VA/1 000 VA 单相 ASI 的 DC-DC 模块工作原理相同^[6],只是更换了部分主电路元件,增大了功率容量。

三相 DC-AC 逆变器由 3 个单相双降压式 DC-AC 逆变单元组合而成。由于可以共用半桥输入电容的中点,因此 3 个 DC-AC 模块可以共用 DC-DC 变换单元,这是它相对于全桥逆变器的显著优点。三相双降压式逆变器中每个 DC-AC 变换单元的工作原理与单相 ASI 的 DC-AC 工作原理类似。只要将单相基准正弦波组合成三相基准正弦波即可。此外,为了减小体积、节约成本,本

文仅用一个电流传感器采样电感电流的精密整流方案,其工作原理可参见文献[7]。

2.3 270 V 直流输入单相 ASI 的构成与工作原理

本系统的功能是把 270 V 高压直流电转换成 115 V/400 Hz 单相交流电,功率容量为 500 VA,仍采用 DC-DC 模块和 DC-AC 模块两级式结构。DC-DC 变换模块将 270 V 直流转换成 ± 180 V 直流稳压输出。由半桥主电路、电压电流双闭环控制电路、驱动电路、机内电源和保护电路组成。半桥结构具有开关管电压应力低的优点。DC-AC 变换模块工作原理和 27 V 直流输入 500 VA

ASI 相同。

3 系列化 ASI 基础模块测试结果

本文研制了 4 种系列化基础模块。这些基础模块不仅提高了可靠性和维修性,而且具有优异的电气性能、质量轻且体积小。

3.1 测试数据

ASI 的输出电压为 $115\text{ V} \pm 2\text{ V}$, 输出频率为 $400\text{ Hz} \pm 0.1\text{ Hz}$, 输出电压谐波含量 $\text{THD} < 1\%$ 。其他主要测试数据见表 1。

表 1 ASI 基础模块测试数据

Table 1 Main testing data of ASI module

模块	输入电压/V	输出功率/VA	整机效率/%
1	18~34	500	92.4
2	18~34	1 000	91.7
3	18~34	1 500	91.8
4	240~300	500	92.2

模块	2/3 阻性不平衡负载下 U_0 对称性	整机质量/kg	尺寸/(mm×mm×mm)
1	—	2.2	200×160×60
2	—	2.6	200×160×60
3	不平衡 $< 2\text{ V}$ 相角偏移 $< 2^\circ$	3.8	270×190×60
4	—	2.2	200×160×60

3.2 测试波形

(1) 单相 ASI 实验波形

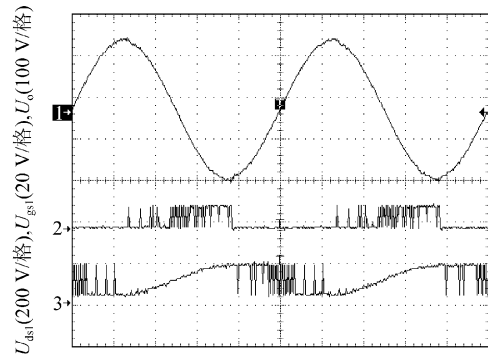
图 6(a)~(d) 分别为 27 V 直流 500 VA/115V/400 Hz 单相 ASI 在空载、阻性、感性和容性满载条件下的实验波形(其中 1 通道:输出电压波形,2 通道:驱动电压波形,3 通道:开关管漏、源极电压波形);图 6(e)和(f)分别为 27 V 直流 500 VA/115 V/400 Hz 单相 ASI 在突加负载和突卸负载时的实验波形(其中:1 通道:输出电压波形;2 通道:电感电流波形)。

27 V 直流 1 000 VA 单相 ASI 基础模块以及 270 V 直流 500 VA/115 V/400 Hz 单相 ASI 基础模块,由于后级 DC-AC 变换单元均采用滞环电流控制的双降压式逆变技术,因此输出波形与 27 V 直流 500 VA 单相 ASI 基础模块关键波形基本相同。

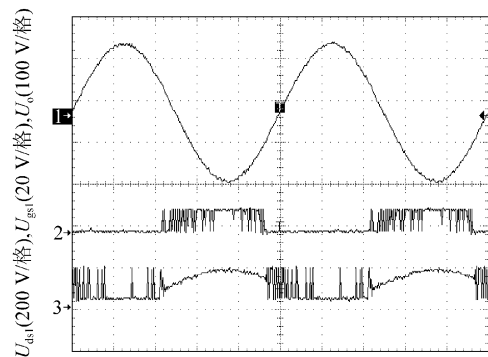
(2) 三相 ASI 实验波形

图 7 给出了 27 V 直流 1 500 VA 三相 ASI 的阻性满载、C 相短路、A 相突加负载情况下的实

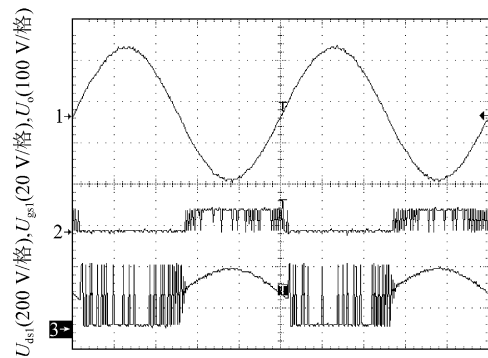
验波形,其中图 7(a)和(b)中 3 个通道分别为三相输出电压波形,图 7(c)中 3 个通道的波形分别为:1 通道为 A 相输出电压;2 通道为 B 相输出电压;3 通道为 A 相电流基准。



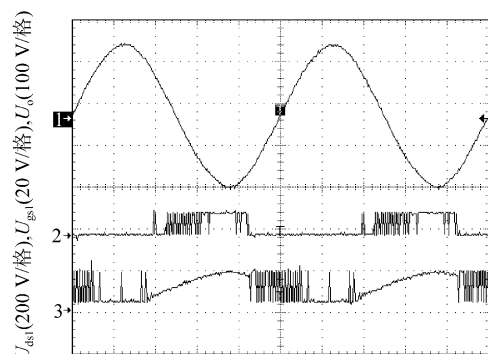
(a) 逆变器空载波形



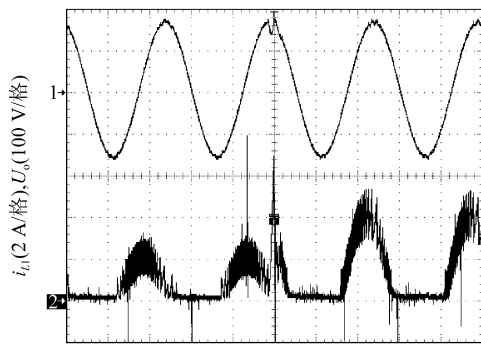
(b) 逆变器阻性满载



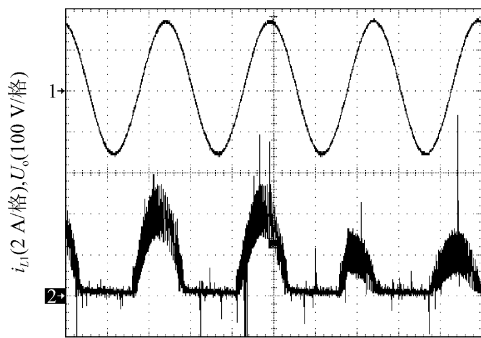
(c) 逆变器感性满载波形



(d) 逆变器容性满载波形

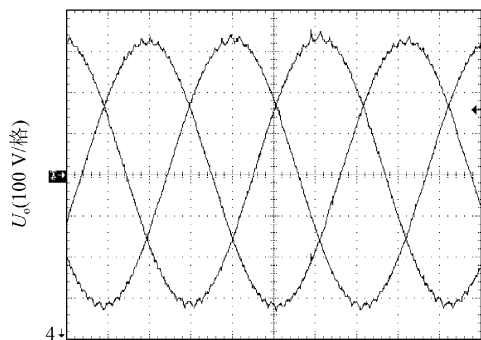


(e) 阻性负载突加波形

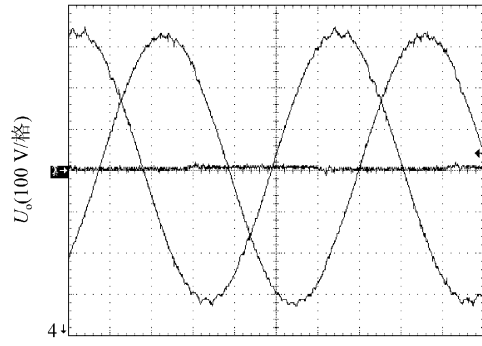


(f) 阻性负载突卸波形

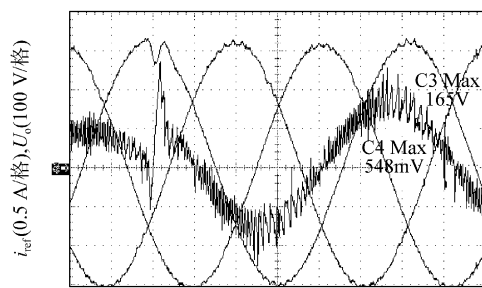
图6 500 VA 单相 ASI 基础模块主要波形
Fig. 6 Main waveforms of 500 VA ASI module



(a) 逆变器阻性满载



(b) C相短路时的输出波形



(c) 阻性负载突加波形

图7 1 500 VA 三相 ASI 基础模块主要波形
Fig. 7 Waveforms of 1 500 VA three-phase ASI module

4 与当前国外同类样机性能的综合比较

本文研制的 ASI 基础模块,综合性能优于国外著名机载二次电源制造商的产品性能。表 2 列举了本文样机和国外著名机载二次电源制造商(如 KGS electronics 公司、Avionic instruments 公司,简称 AII)的产品在关键参数方面的比较,数据来源于两家公司的官方网站^[8-9]。由表 2 数据可见,本文的系列化样机的变换效率均比国内外同类产品提高 4.5% 以上,并在体积、质量等方面优于国外现有产品。

表 2 研制的 ASI 基础模块与国外产品性能对比

Table 2 Contrast of performance of researched modules and existing products

公司/型号	输入电压/V	输出电压/V	输出功率/相数	额定 THD/%	输出频率/Hz	额定效率/%	质量/kg	尺寸/(mm×mm×mm)
KGS/SC50	20.0~36.5	115±5%	500 VA/单相	0.7	400±1.0	87.0	2.22	205×161×86
AII/1A500-1A-1	22.0~37.0	115±2%	500 VA/单相	2.0	400±1%	80.0	5.67	317×147×162
本文/基础模块 1	20.0~32.0	115±2	500 VA/单相	0.8	400±0.1	92.4	2.20	200×160×60
KGS/SC100	20.0~36.5	115±3	1 000 VA/单相	2.5	400±0.4	87.0	3.40±0.14	269×161×86
AII/1B1000-1G-48	22.0~37.0	115±3	1 000 VA/单相	2.0	400±1%	80.0	6.13	305×216×104
本文/基础模块 2	20.0~32.0	115±2	1 000 VA/单相	0.8	400±0.1	91.7	2.60	200×160×60
KGS/SEA150	20.0~36.5	115±3	1 500 VA/三相	2.5	400±0.4	87.0	7.13±0.20	336.5×165×158
AII/1500-1C-1952	22.0~37.0	115±3	1 500 VA/三相	2.5	400±0.4	87.0	7.94	292×140×203
本文/基础模块 3	20.0~32.0	115±2	1 500 VA/三相	1.0	400±0.1	91.5	3.80	270×190×60
AII 和 KGS	240.0~300.0	未有定型产品						
本文/基础模块 4	240.0~300.0	115±2	500 VA/单相	0.8	400±0.1	92.2	2.20	200×160×60

5 结束语

本文贯彻了通用化、系列化和模块化的研制思想,研制了4种系列化ASI基础模块。该总体方案可缩短产品的研发周期、减少研制的盲目性、降低系列化产品的研制费用、提高产品的可靠性和维修性,并可将相关模块单元直接应用于开发后续型号产品中。该系列化样机的研制,必将加快国内机载二次电源的升级换代,为满足今后飞机需要提供可选型号的货架产品,并可实现相对主机需求的超前发展。样机测试数据说明,各基础模块整机变换效率比国内外同类产品至少提高4.5%,在体积、质量等方面有明显改善,其他各项电气性能指标均满足GJB181—2003的要求。根据该技术成果研制系列化ASI产品,将可全面替代机载旋转变流机,并可替代现役飞机ASI中一些技术水平低的产品。系列化样机中270V输入ASI的技术成果,可直接应用于飞机变频交流电源中,有助于提升我国飞机二次电源的技术水平。

参 考 文 献

- [1] 谢少军,陈万,李飞.一种新型航空静止逆变器的研究[J].航空学报,2003,24(6):546-550.
Xie Shaojun, Chen Wan, Li Fei. Research on a novel aircraft static inverter[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(6):546-550. (in Chinese)
- [2] 张方华.双向DC-DC变换器的研制[D].南京:南京航空航天大学自动化学院,2004.
Zhang Fanghua. Research on bi-directional DC-DC converter[D]. Nanjing: College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [3] 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. Novel current mode controlled bi-buck half bridge inverter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(2): 122-126. (in Chinese)
- [4] 王慧贞,单任仲,洪峰,等.组合式三相双 Buck 宽变频逆变器[J].南京航空航天大学学报,2007,39(6):695-700.
Wang Huizhen, Shan Renzhong, Hong Feng, et al. Three-phase dual buck inverter combined with wide variable frequency[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 39(6): 695-700. (in Chinese)
- [5] 洪峰,刘军.滞环电流控制型双BUCK逆变器[J].电工技术学报,2004,19(8):73-77.
Hong Feng, Liu Jun. Hysteresis current controlled dual buck half bridge inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8):73-77. (in Chinese)
- [6] 马海啸,龚春英,严仰光.电流滞环控制半桥双降压式逆变器输出滤波器设计[J].中国电机工程学报,2007,27(13):98-103.
Ma Haixiao, Gong Chunying, Yan Yangguang. Output filter design of half bridge dual-buck inverter using hysteresis current controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13):98-103. (in Chinese)
- [7] 马海啸,毛赛君,龚春英,等.半桥双降压式逆变器电流检测及控制方法改进[J].南京航空航天大学学报,2006,38(3):276-280.
Ma Haixiao, Mao Saijun, Gong Chunying, et al. Improvement of control method and current sensing of half bridge dual buck inverter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(3):276-280. (in Chinese)
- [8] Electronics products; 400 Hz sinewave static inverters[EB/OL]. (2007-10-18)[2007-12-10]. <http://www.kgselectronics.com/>.
- [9] Products and service; static inverters[EB/OL]. (2007-06-25)[2007-12-10]. http://www.avionicinstruments.com/p_inverters.

作者简介:

张方华(1976—)男,博士,副教授。主要研究方向:航空电源系统,电力电子变换器的相互作用分析。

Tel:025-84891773

E-mail:zhangfh@nuaa.edu.cn

龚春英(1965—)女,博士,教授。主要研究方向:航空电源,新能源发电技术。

Tel:025-84891773

E-mail:zjnjgcy@nuaa.edu.cn

(责任编辑:鲍亚平,张利平)