

【航空电子电气工程】

航空静止变流器的仿真与分析

何 芳, 李荣贤, 刘聪慧

(山东航空学院 电气工程学院, 山东 滨州 256603)

摘 要:航空静止变流器是飞机上的重要电源设备,其功能是在飞机主电源失效时将低压直流电转变为交流电,以满足飞机应急状态下的交流用电需求,是飞机供电系统的最后一道“屏障”。通过分析航空静止变流器的结构及数学模型,建立了基于 PSIM 平台的仿真模型,并对 DC/DC-DC/AC 结构型的变流器进行了仿真分析。结果表明,该变流器在稳定性、抗冲击性和响应时间上都具有较大的优势,能满足飞机用电设备的电压要求。

关键词:静止变流器;DC/DC-DC/AC;抗冲击性;响应时间

中图分类号: V 242.2 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2024.01.008

0 引言

航空静止变流器是能把直流电能变换为交流电能的变流设备,由于其优越的性能,已逐渐取代传统的变流器成为现代飞机上的重要电源设备^[1]。航空静止变流器一般采用 DC/DC-DC/AC 两级变换方案^[2-3],其中 DC/DC 实现输出电压调节和电气隔离,其输入电压为 22~29 V^[4],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。文献[5]中,前级 DC/DC 变换器采用电压-电流双闭环控制。DC/AC 变换器将 160 V 直流电逆变为 115 V、400 Hz 的交流电。全桥和半桥电路是逆变器的经典拓扑^[6-7]。文献[8-9]给出了滞环电流控制的双 BUCK 逆变器的短路损耗影响因素。本文基于 PSIM 仿真平台对航空静止变流器构建了基于 SPWM 的双环反馈控制 DC-DC 升压电路、基于 PI 控制的单相桥式 DC/AC 逆变电路和三相桥式 DC/AC 逆变电路的模型,并针对不同类型的负载进行了仿真分析。仿真结果表明,该航空变流器模型具有较好的稳定性和较快的响应时间,能够满足飞机主电源失电后供电需求。

1 航空静止变流器的结构及数学模型

航空静止变流器主要由逆变器、滤波电路、控制电路和放大电路等组成。本文利用自动控制原理建立数学模型。

1.1 逆变器模型

逆变器是航空静止变流器的核心,基于 SPWM 的逆变器是现在的主流逆变器结构。当调制频率远大于输出电压频率时,其输出电压 U_0 和输入电压 U_i 的关系为 $U_0 = U_i = \frac{V_{ref}}{V_r}$ 。式中, V_{ref} 为参考电压有效值, V_r 为三角波峰值。此时逆变器可以近似等效为一个线性放大环节。

收稿日期:2024-04-21

基金项目:滨州学院实验技术项目(BZXYSYXM202305);山东省大学生训练计划项目(S202310449085)

第一作者简介:何 芳(1981—),男,山东枣庄人,讲师,硕士,主要从事电气自动化研究。

E-mail:hithefang@163.com

1.2 滤波电路模型

航空静止变流器的低次谐波分量在采用 SPWM 控制时已经基本滤除。滤波电路需要完成的目标是将剩余的高次谐波进行滤除,因此,航空静止变流器的滤波电路多采用二阶 LC 低通滤波器。

1.3 控制电路模型

控制电路主要采用 PID 控制策略^[9]。PID 控制是 DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器中常用的一种,它将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量,其控制原理为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

式中: K_p 作为比例系数用来表示该控制装置的偏离信号 $e(t)$; T_i 为积分时间常数,它的作用是去除静态误差,改善系统的无差性; T_d 为微分时间常数,它能在 $e(t)$ 变大前,将高效的校正信号导入该体系中,提高调整速率,减少调整周期。

1.4 放大电路模型

放大电路的作用是将电压进行放大或者进行相应缩小,所以可以将其等效为一个简单的比例放大环节。

1.5 DC/DC-DC/AC 结构型的变流器

根据不同的输入输出要求,航空静止变流器的典型结构一般分为 DA/AC 结构型和 DC/DC-DC/AC 结构型两种,本文主要研究的是 DC/DC-DC/AC 结构型的变流器,其结构如图 1 所示。

DC/DC 变换器是一个升压变换器,它将蓄电池的 24 V 左右的直流电变换为所需要的 160 V 左右(单相交流输出电压)或 600 V 左右(三相交流输出电压)直流电。而 DC/AC 逆变器可以将直流电逆变为 115 V、400 Hz 的正弦波交流电。

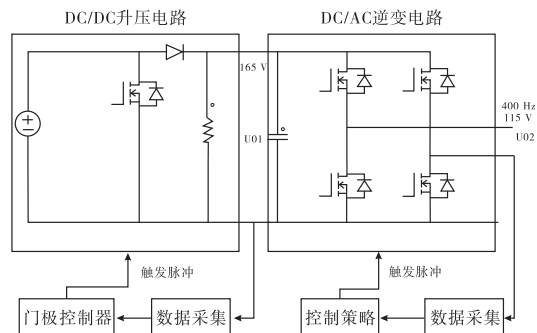


图 1 DC/DC-DC/AC 结构型变流器

2 航空静止变流器的建模与仿真分析

2.1 基于 SPWM 的双环反馈控制的 DC/DC 的升压电路的建模与仿真

基于 SPWM 的双环反馈控制的 DC/DC 升压电路利用电感电流、输出电压构建双环控制,将电压外环产生的控制量作为电流内环的参考电流,当外部条件发生变化时,电感电流能快速反映外部变化,使变换器快速进行调整。图 2 为 DC/DC 升压电路模型,其中控制电路采用基于 SPWM 的双环控制策略。在图 2 升压电路模型部分添加了电感电流传感器 ISEN2、输出电压传感器 VSEN2,传感器增益设置为 1。输入电源 VDC2 为航空蓄电池,其提供电压为 24 V 的直流电。

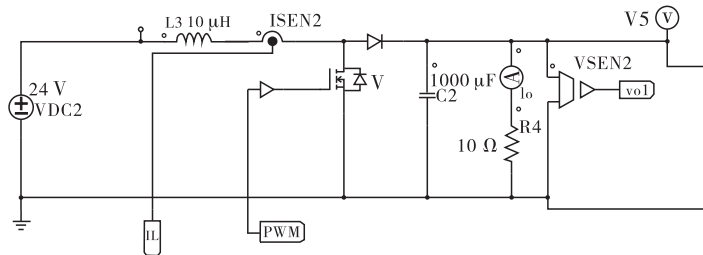


图 2 DC/DC 的升压电路模型

图 3 为 DC/DC 的控制电路模型。在图 3 双环反馈控制环路中,设定的期望输出电压为 165 V,电感电流内环 PI 控制器的最优参数比例系数为 1.9、积分系数为 0.01,电压外环 PI 控制器最优参数比例系数

为 7、积分系数为 0.009。限幅器限幅范围为(0,1),锯齿波 VTRI2 利用三角波信号发生器产生,频率为 100 kHz、幅值为 1 V、占空比为 1,其余参数默认为 0。

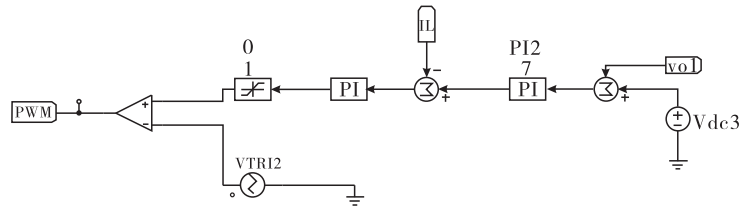


图 3 DC/DC 的控制电路模型

DC/DC 升压电路的仿真结果如图 4 所示。通过对图 4 波形的观察可知,在 PI 的最优参数下,DC/DC 升压电路能够在 0.01 s 内将 24 V 的直流电压升压为 165 V,为后续的 DC/AC 变换电路提供电压。该升压电路具有响应时间短,稳定性高的特点。

2.2 基于 PI 控制的单相桥式 DC/AC 逆变电路建模与仿真

图 5 为单相桥式 DC/AC 逆变电路模型。在图 5 逆变电路模型中,左端开口处与 DC/DC 升压电路输出端相连,由其提供 165 V 直流电,MOSFE 逆变桥用体二极管代替反并联二极管;逆变 LC 滤波器的 $L=1\text{ mH}$, $C=30\text{ }\mu\text{F}$;负载采用阻性负载,由 R_1 与 R_2 在 $t=0.025\text{ s}$ 时进行并联($R_1=R_2=20\text{ }\Omega$),模拟负载变化情形。输出电压由电压传感器 VSEN 进行测量,并将其增益设置为 0.01,即将测量值缩小为 1%。输出电压的有效值用 PSIM 元件库中的 RMS 元件进行测量,其频率应与参考电压 V_{ref} 的频率一致,此处设置为航空常用的频率 400 Hz。

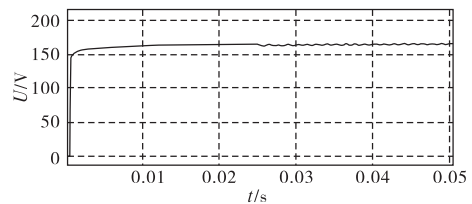


图 4 DC/DC 的升压电路输出电压波形

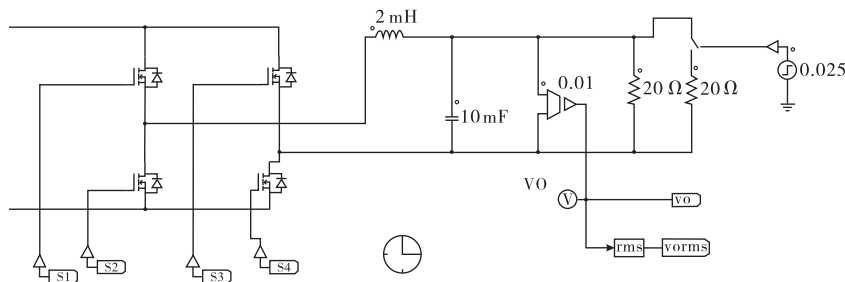


图 5 单相桥式逆变电路模型

图 6 为单相桥式 DC/AC 控制电路模型。在图 6 的控制电路模型中,设定的参考正弦交流信号 V_{ref} 的频率为 400 Hz、幅值为 1.15 V,其他参数设置为 0;由于输出电压测量传感器的测量值是实际值的 0.01 倍,故实际设置参考期望输出电压幅值为 115 V。

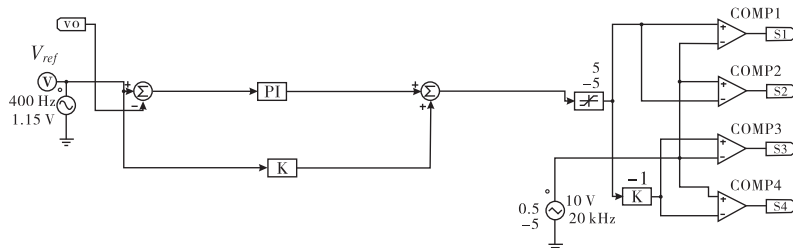


图 6 单相桥式控制电路模型

对单相桥式逆变电路及控制电路模型进行仿真得到的输出波形如图 7 所示。从图 7 仿真波形可知,

输出电压 V_o 与参考电压 V_{ref} 基本一致,能够在 5 ms 以内输出稳定的 115 V、400 Hz 单相交流电,且在 $t=0.025$ s 并联负载时,仅引起输出波形出现瞬时波动,且很快被 PI 控制器调整到正弦波。结果表明,该逆变器具有较短的响应时间和较好的抗冲击性。能够满足飞机用电设备不间断供电(ups)在 10 ms 内完成供电切换的要求。

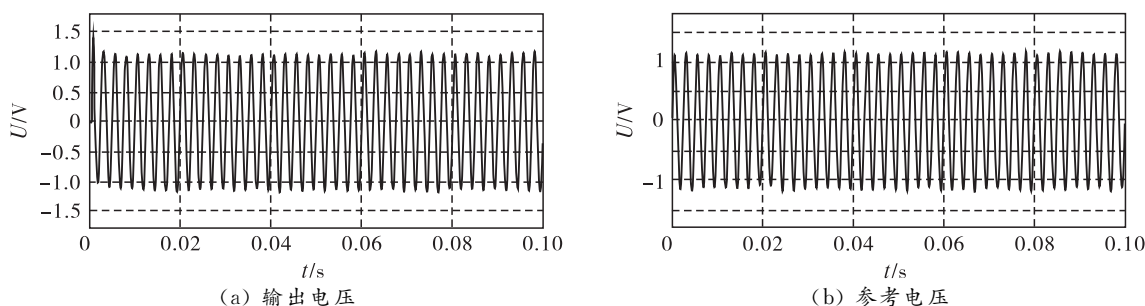


图 7 单相桥式逆变器输出电压仿真波形

2.3 基于 PI 控制的三相桥式 DC/AC 逆变电路建模与仿真

图 8 为三相桥式无源逆变功率电路模型,输入直流 $V_{DC}=600$ V,由 DC/DC 升压电路提供, $S_1 \sim S_6$ 为 P-MOSFET,并用其体二极管代替逆变桥中的反并联二极管。逆变输出经 LC($L=0.381$ mH, $C=40$ μ F) 滤波,得到正弦交流电。负载采用三相阻性负载 R_L ($R=2$ Ω)、三相阻感性负载 R_L ($R=2$ Ω , $L=0.001$ H)、三相阻容性负载 R_L ($R=2$ Ω , $C=0.001$ F) 三种方式。

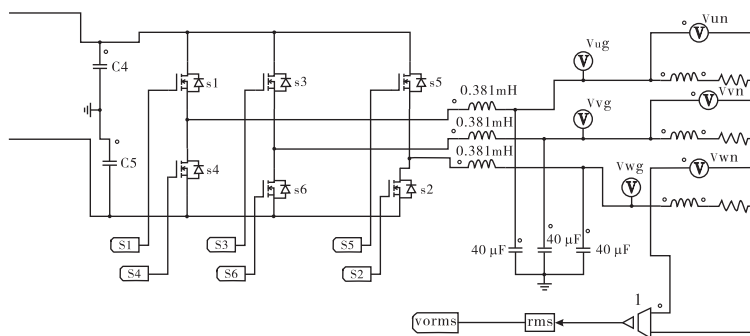


图 8 三相桥式逆变电路模型

在图 9 的控制电路中,输出电压与参考电压的差值经过采用 PI 调节器($k_p=0.009$, $k_i=0.00078$),获得当前的控制量 V_{pi} ,再经限幅器 LIM(上限为 5,下限为 0)限幅,获得当前调制信号的幅值 V_c 。幅值 V_c 再经 Vsin3c 子电路,生成与参考设置电压同频率、幅值为 V_c 的三相调制信号,各相相位差 120° 。将三相调制信号与双极性三角载波 U_c 进行比较可知,产生逆变桥开关管 $S_1 \sim S_6$ 的驱动 SPWM 脉冲,实现对逆变桥的逆变控制,使 DC/AC 输出期望的设置电压。

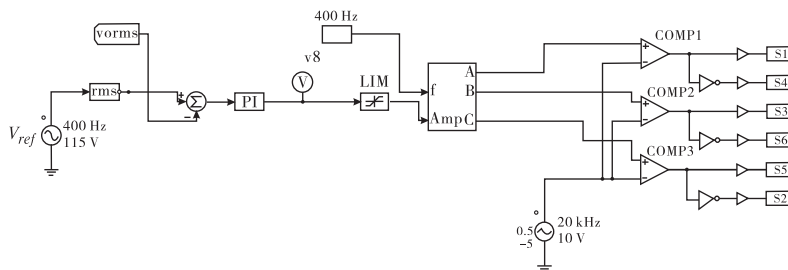


图 9 三相桥式控制电路仿真模型

图 10 为 Vsin3c 子电路的具体实现电路模型。由于模型中正弦函数 sin 利用的 PSIM 提供的 Sine(in

rad.)元件产生相应的三相正弦信号,故 B 相相位 120° 和 C 相相位 240° 需转换为弧度,分别为 2.094 395 1 和 4.188 790 1。

Vsin3c 子电路根据输入的频率 f 和幅值 A_{mp} ,按照三相正弦电压波形表达式进行计算得

$$\begin{cases} U_A(t) = U_m \times \sin(2\pi f \times t), \\ U_B(t) = U_m \times \sin(2\pi f \times t - \frac{2\pi}{3}), \\ U_C(t) = U_m \times \sin(2\pi f \times t - \frac{4\pi}{3}). \end{cases}$$

三相桥式 DC/AC 逆变电路带三相阻性负载时的仿真结果和三相桥式 DC/AC 逆变电路带三相阻感性负载时的仿真结果如图 11、图 12 所示。

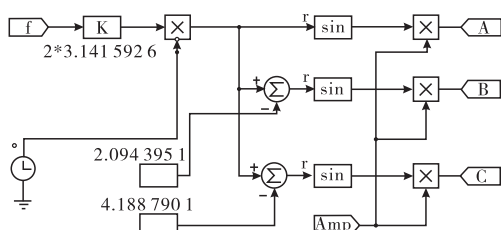


图 10 三相调制正弦信号生成电路模型

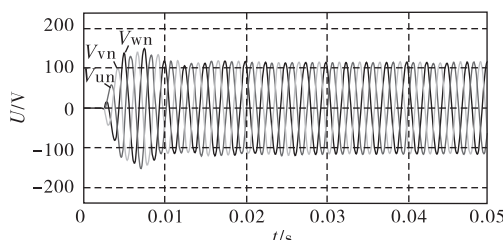


图 11 三相阻性负载时输出电压仿真波形

三相桥式 DC/AC 逆变电路带三相阻容性负载时的仿真结果如图 13 所示。

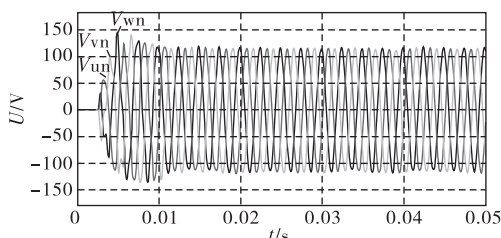


图 12 三相阻感性负载时输出电压仿真波形

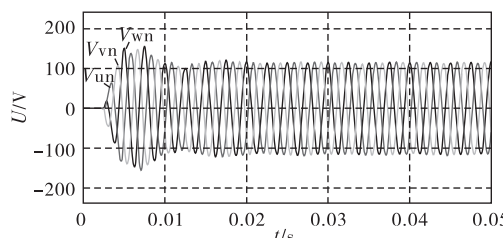


图 13 三相阻容性负载时输出电压仿真波形

由图 11~13 仿真波形可以看出,变流器在三相阻性负载、三相阻感性负载、三相阻容性负载 3 种情况下,系统都能在 10 ms 之前输出稳定电压为 115 V、频率为 400 Hz 的三相交流电。该系统响应时间短、稳定性好,满足了飞机用电设备不间断供电(ups)在 10 ms 内完成供电切换的要求。

3 结论

本文首先分析了航空静止变流器的结构组成及主要部分的数学模型,在此基础上建立了基于 SPWM 的双环反馈控制的 DC/DC 的升压电路、基于 PI 控制的单相桥式逆变电路、三相桥式逆变电路仿真模型,并对 DC/DC-DC/AC 结构型的变流器进行了仿真分析。结果表明,该变流器在稳定性、抗冲击性和响应时间上都具有较大的优势,能满足飞机用电设备的电压要求。

参考文献:

- [1] 战祥新,郝世勇,张溪. 基于 SPWM 控制的航空静止变流器仿真分析[J]. 电子测试,2021(17):64-66.
- [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,2003.
- [3] 张方华,龚春英,邓翔. 航空静止变流器的研究综述[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(1):19-26.
- [4] 中国人民解放军总装备部. 飞机静止变流器通用规范:GJB 3279A—2011[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2011.

- [5] 邓翔,韦徵,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.
- [6] 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.
- [7] 吴婷,肖岚,姚志垒.双降压式全桥逆变器[J].中国电机工程学报,2009,29(15):22-27.
- [8] 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.
- [9] 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:200810157068.5 [P].2009-01-28.

Simulation and Analysis of Aviation Static Converter

HE Fang, LI Rongxian, LIU Conghui

(Electrical Engineering College, Shandong University of Aeronautics,
Binzhou 256603, China)

Abstract: Aviation static converter is an important electrical power unit, and its function is to convert low-voltage DC power to AC power so as to meet the AC power demand of the aircraft in emergency when the main power supply of the aircraft fails, and it is the last “Barrier” of the aircraft power supply system. By analyzing the structure and mathematical model of aviation converter, a simulation model based on PSIM is established, and the DC/DC-DC/AC converter is simulated. The converter has great advantages in stability, shock resistance and response time, and can meet the voltage requirements of aircraft electrical equipment.

Keywords: static converter; DC/DC-DC/AC; impact resistance; response time

(责任编辑:王新亮)

引用格式 何芳,李荣贤,刘聪慧.航空静止变流器的仿真与分析[J].山东航空学院学报,2024,41(1):67-72.
HE F, LI R X, LIU C H. Simulation and analysis of aviation static converter[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2024, 41(1): 67-72.

本 刊 声 明

本刊已许可中国知网(中国学术期刊(光盘版)电子杂志社)、北京万方数据股份有限公司(万方数据电子出版社)、重庆维普资讯有限公司、超星期刊域出版平台等在其各自的系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行及在信息网络传播本刊全文。作者著作权使用费和稿酬(即包括印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)一并支付。如作者对本声明持有异议,请在投稿时说明。