

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2017.4.131

中图分类号: TM743(V242.2)

文献标志码: A

基于行为模型的飞机电源系统建模仿真 技术研究

王丹阳¹, 张惠娟², 徐红专², 戴泽华¹, 杨善水¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016; 2. 航空机电综合
航空科技重点实验室电子工程部, 南京 211106)

摘要: 针对新型飞机电源系统部件种类多、控制复杂以及电路级仿真运算量大、速度慢的特点, 提出了基于行为模型的飞机电源系统电能部件的建模方法。从电能部件的输入输出出发, 依据功率平衡关系, 并且结合受控源, 来描述部件功能特征。利用 Simulink 软件, 建立了系统中的关键部件的行为模型, 并且构建了整个电源系统仿真模型。通过该模型, 开展了飞机电源系统的特性仿真研究。仿真结果表明, 所建立模型简单、方便、可以反映部件和系统的行为特性, 仿真速度比电路模型更快。

关键词: 航空; 飞机电源系统; 行为模型; 仿真; Simulink

Modeling and Simulation of Aircraft Power System Based on Behavioral Model

WANG Danyang¹, ZHANG Huijuan², XU Hongzhuan², DAI Zehua¹, YANG Shanshui¹

(1. College of Automation and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Department of Electrical Engineering, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero
Electromechanical System Integration, Nanjing 211106, China)

Abstract: Considering the feature of quantity of components control complex, and the circuit-level model simulation computes heavily and slowly in new aircraft power system, this paper proposed the modeling approach based on behavior model. According to the input/output feature of the electric components, this method combined the power balance equation with the controlled sources to described the function characteristics. Then, some key components in the system is modeled using Simulink, and the simulation model of the entire power system is established according to the power grid structure of the aircraft to carry out the study of the system characteristic. The simulation results show that the model is simple and convenient, and it can reflect the behavior characteristics of the components and the system pretty well.

Keywords: aeronautics; aircraft power system; behavioral model; simulation; Simulink

随着航空科技的迅猛发展, 飞机上的各种电子电气设备越来越多, 对电能的需求量越来越大^[1], 导致飞机供电系统的结构、规模和控制方式都越来越复杂, 使得飞机供电系统设计、研制和维护变得愈发困难, 要求越来越高。

文献[2]利用 Saber 仿真软件, 建立起详细的飞机同步发电机及其调压器、整流器及逆变器的模型, 构成恒速恒频供电系统, 利用该系统模型进行故障情况模拟和故障保护; 文献[3]分析了交流同步发电机的数学模型, 采用 Saber 软件建立了简单的交流供电系统的仿真模型, 并进行了供电特性的仿真; 文献[4]利用 LabVIEW 软件设计变频交流电源系统供电网络的仿真模型, 以模拟不同供电状态切换时飞机电网的动态重构过程, 验证供电逻辑关系

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277093)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51277093)

的正确性及容错供电的能力。前两篇文献均建立精确的数学模型,能够较为精确地仿真出发电机的电气特性,但是该种建模方式不适合于复杂供电系统仿真模型的集成,并且仿真速度慢。文献[5]建立了逻辑模型,用以模拟电网的动态重构,仿真速度快,但不能反映飞机电网功率参数的实际变化。

本文提出一种基于行为模型的飞机电源系统关键部件建模方法。行为模型并不特别关注部件内部具体构成电路,而是根据建模对象的输入、输出静态和动态表现进行提炼^[6-8]。本文从部件行为出发,根据功率平衡关系,结合受控源来描述部件特定的输入/输出,并在 Simulink 中建立飞机电源系统中关键部件的行为模型。既能实现部件的主要功能、准确模拟关键部件的特性,又具有建模过程简单、仿真速度快的优点。

1 行为模型的建模方法

1.1 基于受控源的行为模型建模方法

图 1 是某新型多电飞机供电系统的结构。交流一次电源系统包括 4 台主交流发电系统 L1、L2、R1 和 R2,2 台辅助动力装置发电系统 APUL、APUR 和 1 台应急交流发电系统 RAT,以及若干地面电源插座等组成。发电机采用了高压 230/400 V、360~800 Hz 的变频交流体制。二次电源由 ATRU、TRU 和 ATU 等组成,采用了高压±270 V 直流电源、115/200 V、360~800 Hz 的变频交流以及 28 V 低压直流的混合供电体制。配电系统采用分布式配电方式,具有负载分析和自动管理的功能。

研制这样的大系统,必须采取分析、仿真和实验

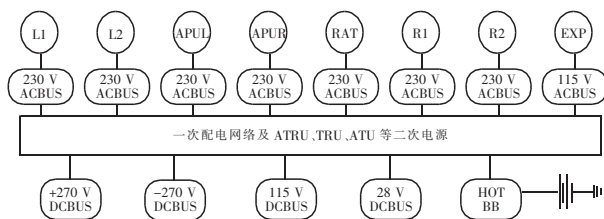


图 1 新型飞机电气系统结构框图

Fig.1 Structure Blook diagram of a certain more electric aircraft power supply system

验证等各种设计手段相结合的方法。其中飞机电源系统建模仿真^[9],具有重要的地位。先进的系统集成仿真技术对于提高飞机供电系统系统的可靠性、生命力和可维修性、降低成本等方面意义十分重大。

由于本供电系统部件种类多,控制复杂,仿真中如果所有部件均采用建立电路级的模型方法,则系统仿真运算量大,仿真速度慢,甚至不能收敛而导致仿真崩溃。

供电系统中包括自耦变压器 ATU、变压整流器 TRU、自耦变压整流器 ATRU 等在内的电能变换部件的共同特点是:输出作为其他负载的电源,输出电压与输入电压有关,输出的电流和功率取决于所带负载的大小;从整个供电系统看,它们还是电网中的负载,部件输入的电压取决于电网电压,输入电流又取决于它们的输出即负载电流。因此可以基于受控电压源和受控电流源建立这些部件的行为模型。

其行为特征通常表现在稳态特性和动态特性两个方面。以受控电压源和受控电流源建立的模型如图 2 所示,可以反映其稳态特性。

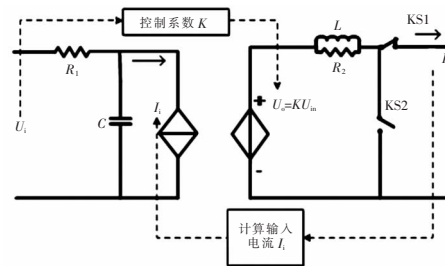


图 2 基于受控源变换的行为模型结构

Fig.2 Schematic of behavior model based on controlled source

图 2 中,设输入电压为 U_i ,输入电流为 I_i ;输出电压为 U_o ,输出电流为 I_o ;部件的变换效率为 η ,输入功率因数为 $\cos \varphi$ 。则根据功率平衡得到输入和输出的约束关系为

$$U_i I_i \eta \cos \varphi = U_o I_o \tag{1}$$

对于直流输入或输出,其电压、电流是平均值, $\cos \varphi=1$;对于交流输入或输出,其电压、电流为正弦波的有效值。

添加电阻、电容、电感的网络实现变换器动态特性的模拟。在输出端串联电阻 R_2 与电感 L 并联

的支路模拟变换器的输出阻抗,以模拟突加和突卸负载时输出电压受到的影响;在输入端串电阻 R_1 然后并接一个电容 C 模拟输入阻抗,以模拟部件突接上电网时引起的电流冲击。

此外,为了能更好地体现部件特点,方便电源系统整体仿真,在输出端设置常开开关 $KS2$, 闭合 $KS2$ 开关,可以模拟该部件对地短路故障;输出串接一个常闭开关 $KS1$, 断开 $KS1$, 可以模拟输出开路故障。

1.2 部件规范化

搭建整个电源系统模型前,对每个关键部件模型加以规范化,并进行统一封装和接口设置以及定义。飞机电源系统的部件规范化,不仅有利于本文中电网模型的搭建,而且有利于建立其他不同结构的系统级模型,方便不同功能模块的更换,也有利于对各部件供应商提出统一的建模规范。

2 基于行为模型的供电系统关键部件建模

2.1 自耦变压整流器

自耦变压整流器^[9](ATRU)是飞机供电系统中典型的交流-直流变换部件。一种 12 脉冲变压整流器如图 3 所示。经分析计算,该 ATRU 的直流输出电压平均值为 $U_d=1.35U_1$, 其中 U_1 为输入线电压;而输入电流谐波次数为 $12k\pm 1$ 次,最低次数为 11 次;输出电压含 $12k$ 次谐波,最低为 12 次谐波,脉动系数 $S_{12}\approx 1.4\%$ 。该 12 脉波自耦变压器的谐波含量比较小,因而在对 ATRU 进行行为特性分析及建模时,可以忽略谐波部分。

自耦变压整流器 ATRU 的行为特征,可以从稳

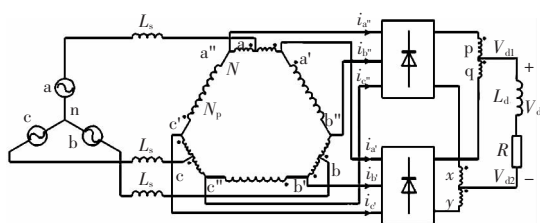


图 3 12 脉波自耦变压整流器

Fig.3 12-pulse autotransformer rectifier unit

态特性和动态特性两个方面考虑。其稳态特性可以描述为:两路输入可以进行两种电压等级的变换,其中一路输入是 230/400 V、400 Hz 三相交流电,另一路输入是 115/200 V、400 Hz 三相交流电,其输出均为 ± 270 V 直流电,ATRU 的效率约为 0.95。动态特性可以描述为:当 ATRU 的输入电压在允许范围内变动时,其直流输出也相应的发生变化,当负载发生变化时,ATRU 的输出电压和输入电流也会受到相应的影响而发生变化。

基于行为模型的建模方法,结合上述 ATRU 的行为归纳,以及所建基于受控源的自耦变压整流器的 Matlab 仿真模型,基于受控源的 ATRU 建模原理如图 4 所示。

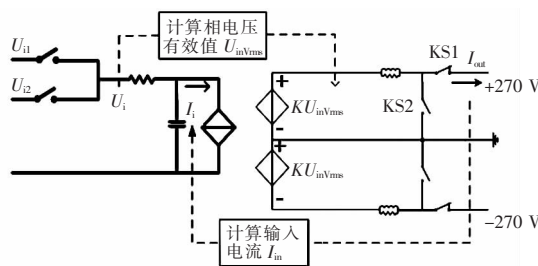


图 4 ATRU 行为模型建模原理

Fig.4 Schematic of the ATRU behavior model

由于 ATRU 为不控整流,其输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_i/U_o = 230/270 \tag{2}$$

输入功率乘以效率就是输出的功率,即

$$3\eta U_i I_i \cos \varphi = 2U_o I_o \tag{3}$$

由此得到输入电流的表达式为

$$I_i = 2U_o I_o / (3\eta U_i \cos \varphi) \tag{4}$$

式中: I_i 为相电流有效值,建模时认为三相电流平衡,各相电流有效值 $I_{ia}=I_{ib}=I_{ic}=I_i$; U_i 为输入相电压有效值;变换效率 $\eta=0.95$;功率因数 $\cos \varphi=1$ 。

此外,在输出端串联 1 个电阻与电感的并联支路,以模拟负载突加和突卸时引起的电压波动;在输入端并接 1 个电容,以模拟部件突接上电网时引起的电流冲击,从而实现对其动态特性的仿真。

2.2 自耦变压器

自耦变压器(ATU)是输出和输入共用一组线圈的特殊变压器,其原理如图 5 所示。

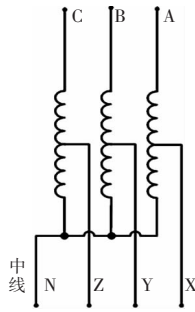


图 5 自耦变压器原理

Fig.5 Schematic of auto transformer

该自耦变压器 ATU 的稳态特性主要表现为可以进行双向电压变换。正向变换时,输入是230/400 V、400 Hz 三相交流电,输出 115/200 V 同频率三相交流电,降压比为 2:1;反向变换时,输入 115/200 V、400 Hz 三相交流电,输出 230/400 V 同频率三相交流电,升压比为 1:2,其变换效率约为 0.95。而 ATU 的动态特性则体现在当负载发生变化时,其输入和输出电压和电流也会随负载的变化而受到相应的影响。

$$\begin{cases} U_i/U_o = 230/115 \\ 3\eta U_i I_i \cos \theta_i = 3U_o I_o \cos \theta_o \end{cases} \quad (5)$$

基于受控电压源和受控电流源的建模方法分析,以及上述 ATU 的特有行为归纳,可以建立基于受控源的自耦变压器的行为模型。图 6 为 ATU 规范化模型的封装示意。

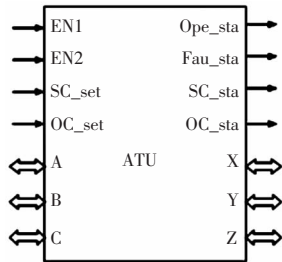


图 6 ATU 模型规范化封装

Fig.6 Normalization packaging of the ATU model

2.3 变压整流器

本系统中的变压整流器(TRU)的功能是将输入的 230/400 V、400 Hz 三相交流电变换为 28 V 直流电。由于其建模方法与 ATRU 和 ATU 类似,不再赘述,TRU 模型的规范化封装如图 7 所示。

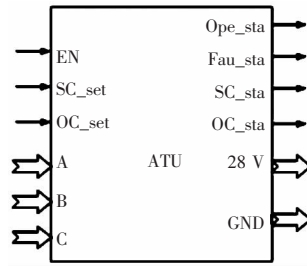


图 7 TRU 模型规范化封装

Fig.7 Normalization packaging of the TRU model

2.4 起动/发电机

与大容量电源飞机相适应的起动/发电机一体化技术具有高度集成、高功率密度及无刷化的特点,是新型飞机电源系统的典型特征^[10]。

航空变频交流起动发电机兼有电动机和发电机的功能。在发动机起动时作为电动机工作,带动发动机转子旋转到一定转速后喷油点火,使发动机进入自行工作状态。此后发动机反过来传动电机,使其成为发电机向用电设备供电,

考虑到现有的起动/发电一体化^[11]的建模方法的难度和复杂性,以及较慢的仿真速度且不易于与功率网络集成,本文根据起动/发电机在不同阶段的功能特性,将发电机和电动机的功能分开建模,通过控制接触器的通断来实现不同功能之间的转换,以实现起动/发电机的不同阶段的功能,起动/发电机的建模原理如图8所示。

发电部分,以函数发生器与受控源相结合的方式描述交流励磁机和主同步发电机的性能。电动部分则从电动机典型的行为特征出发,根据相关资料文献及实验数据,拟合电动机转速、转矩和功率因数曲线,结合函数发生器及受控源建立模型。该方式不仅可以简化模型,而且可以提高仿真速度。

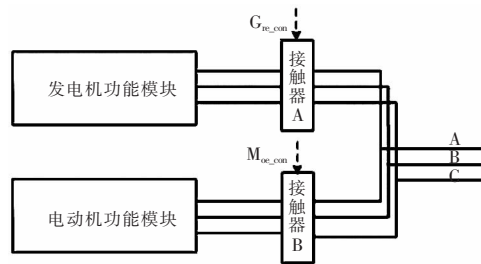


图 8 起动/发电机建模原理

Fig.8 Schematic of the S/G behavior model

3 仿真结果

图 1 中新型飞机电网的第 1 通道如图 9 所示,图中起动电路略,利用所建的 ATRU、ATU 等部件行为模型。在 Simulink 中建立的系统仿真模型,如图 10 所示。该系统由 1 台起动/发电机作为主电源,1 台 ATRU、1 台 ATU 和 1 台 TRU 作为二次电源,以及若干负载。

起动/发电机起动时的转速波形如图 11 所示。飞机发动机起动完毕后,起动发电机便从电动工作模型,切换到发电机工作模式,稳定工作时发电机输出电压为 230/400 V、360~800 Hz 可调。

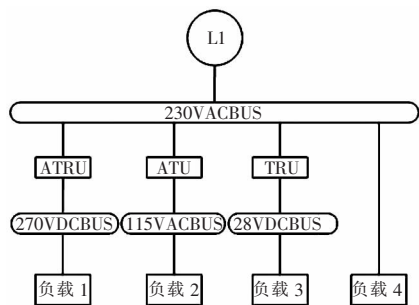


图 9 飞机电源系统单通道示意

Fig.9 Single channel of aircraft power supply system

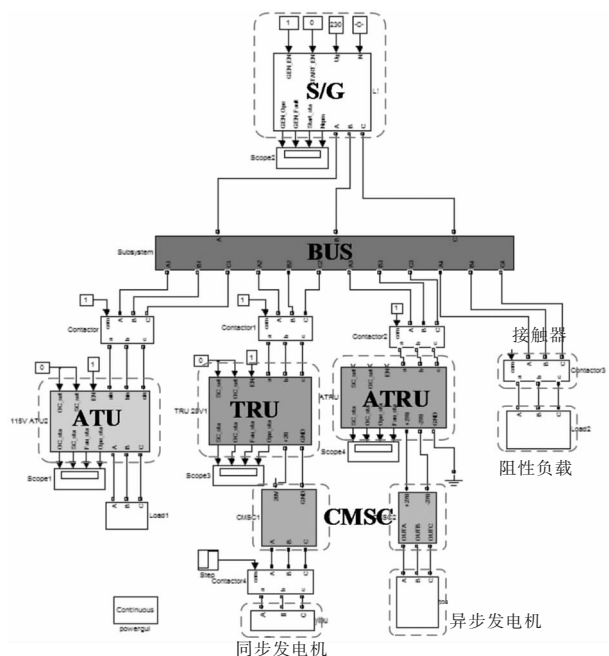


图 10 单通道 Simulink 仿真模型

Fig.10 Simulation model of single channel in Simulink

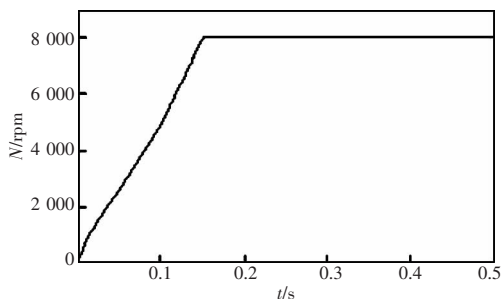


图 11 起动时起动/发电机转速波形

Fig.11 Waveform of speed when S/G starting

以系统突加负载为例,此时起动/发电机的输出电压由于负载的突然增加而发生波动,其波形如图 12 所示。而输出电流由于负载的增加明显增大,其波形如图 13 所示。变压整流器 TRU 的输出电压也由于负载的影响有所变化,如图 14 所示。自耦变压整流器 ATRU 的输出电压也由于负载改变的影响而有所变化,如图 15 所示。

由仿真结果可以看到,飞机电源系统中关键部件的行为模型以及集成后的系统模型不仅能准确表现部件和系统的稳态特征,也能在一定程度上反映动态性能,且仿真速度比电路级仿真模型快。

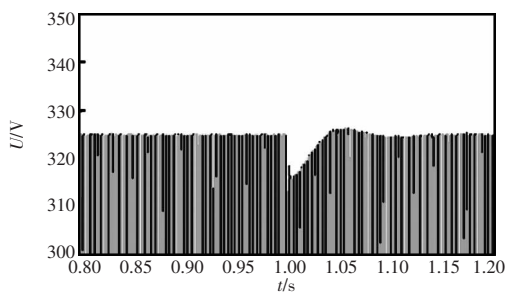


图 12 加载时起动/发电机输出电压波形

Fig.12 Output voltage waveform of S/G with loading

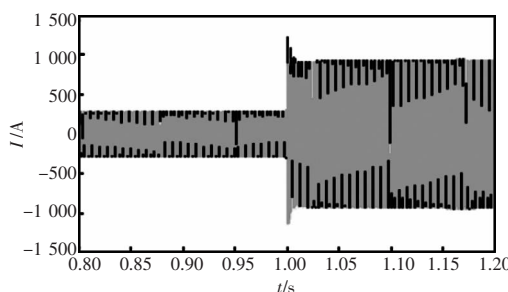


图 13 加载时起动/发电机输出电流波形

Fig.13 Output current waveform of S/G with loading

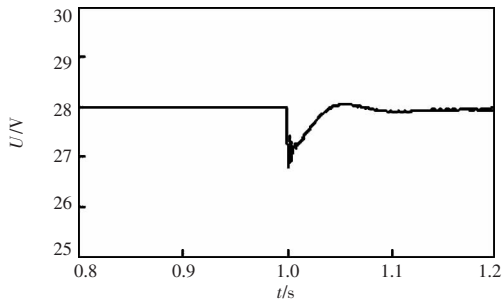


图 14 加载时 TRU 输出电压波形

Fig.14 Output voltage waveform of TRU with loading

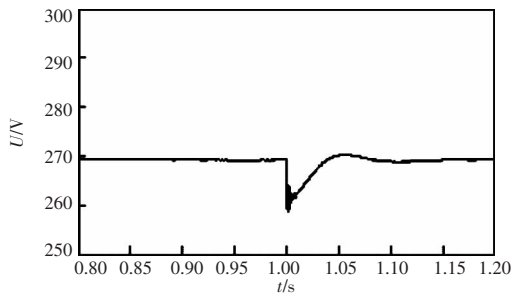


图 15 加载时 ATRU 输出正向电压波形

Fig.15 Positive output voltage of ATRU with loading

4 结语

本文主要对飞机电源系统的仿真建模技术包括飞机电源系统的关键部件建模、整体系统建模等进行了一定的研究。由于该系统主要研究整个飞机电网设计的合理性以及电网控制策略和重构方式的正确性,在不同的电网运行状态下,着重研究讨论每个部件是否可以正常工作,能否给电网提供电能或者从电网消耗能量。因而,采用基于行为的建模方法合理可行,而且可以在保证仿真精度的基础上兼顾仿真速度。

本文根据飞机电源系统中各关键部件的稳态和动态特性,并结合功率平衡方程及受控源特点,讨论了基于部件行为特征的建模方法。利用 Matlab/Simulink 软件,根据此建模方法,建立了起动/发电机、ATRU、ATU 等关键部件的行为模型,并利用规范化的部件行为模型搭建飞机电源系统的总体仿真模型。通过仿真实验研究了飞机电源系统的特性,仿真结果表明,这些模型不仅能够较准确地表现出相应的稳态特性和动态特性,而且与传统的部

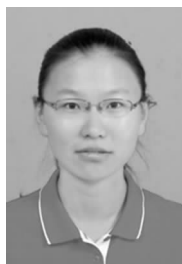
件电路级模型相比,模型简单,仿真速度快,而且规范化的模型接口也便于系统集成或者其他结构电网模型的搭建。

参考文献:

- [1] Jones R I. The more electric aircraft: the past and the future [C]. Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft, IEE Colloquium on. Lodon, UK, 1999.
- [2] 吴小华, 徐刚. 飞机供电系统的 Saber 仿真[J]. 计算机仿真, 2008, 25(2):70-73.
Wu Xiaohua, Xu Gang. Saber simulation of aircraft power supply system[J]. Computer Simulation, 2008, 25(2): 70-73(in Chinese).
- [3] 李晓东, 满毅. 民用飞机交流供电系统的 Saber 仿真[J]. 机电信息, 2012, 27:111-113.
Li Xiaodong, Man Yi. Saber simulation of AC power supply system for civil aircraft[J]. Mechanical and Electrical Information, 2012, 27 :111-113(in Chinese).
- [4] 程智勇, 杨善水, 孟乐轩. 基于 LabVIEW 的飞机变频交流供电系统仿真技术[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版, 2010, 24(3):44-50.
Cheng Zhiyong, Yang Shanshui, Meng Lexuan. The research on the simulation of aircraft variable frequency AC power supply system based on LabVIEW[J]. Journal of Nanchang Hang-kong University:Natural Sciences, 2010 (3): 44-50(in Chinese).
- [5] Bozhko S V, Wu T, Hill C I, et al. Accelerated simulation of complex aircraft electrical power system under normal and faulty operational scenarios[C]. 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 2010:333-338.
- [6] Crespo-Cadenas C, Reina-Tosina J, Madero-Ayora M J. Volterra behavioral model for wideband RF amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(3):449-457.
- [7] Wu T, Bozhko S V, Asher G M, et al. Accelerated functional modeling of aircraft electrical power systems including fault scenarios [C]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2009: 2537-2534.
- [8] Pedro J C. A glimpse on behavioral modeling technology for microwave transistors[C]. Wireless and Microwave Tech-nol-

- ogy Conference(WAMICON), 2013 IEEE 14th Annual, 2013: 1-6.
- [9] 任志新. 多脉冲自耦变压整流器(ATRU)的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2008.
- Ren Zhixin. Research on multi-pulse autotransformer rectifier units(ATRU)[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and astronautics, 2008(in Chinese).
- [10]戴卫力, 王慧贞, 严仰光, 等. 航空起动/发电系统的发展趋势与研究现状[J]. 航空科学技术, 2010(5):28-32.
- Dai Weili, Wang Huizhen, Yan Yangguang, et al. Development trend and current situation of starter-generatorfor aircraft engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010 (5): 28-32(in Chinese).
- [11]张新伟, 骆光照, 马升潘, 等. 一体化起动/发电机起动控制器设计[J]. 微特电机, 2013, 41(1):35-39.
- Zhang Xinwei, Luo Guangming, Ma Shengpan, et al. Design of starting controller for integrated starter/generator[J]. Small and Special Electrical Machines, 2013, 41(1):35-39 (in Chinese).

- [12]王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 5版. 北京:机械工业出版社, 2009.



王丹阳

作者简介:

王丹阳(1991-),女,通信作者,硕士研究生,研究方向:飞机自动配电技术,E-mail:wangdy1991@163.com。

张惠娟(1980-),女,硕士,高级工程师,研究方向:机电控制、机电综合,E-mail:zhagnhuijuan56@sina.com。

徐红专(1972-),男,硕士,研究员,研究方向:航空机电控制系统及设备研究,E-mail:hongzhuan_xu@163.com。

戴泽华(1989-),男,博士研究生,研究方向:航空供配电系统,E-mail:dzh275532447@hotmail.com。

杨善水(1969-),男,博士,副教授,研究方向:航空供配电系统,E-mail:yshanshui@nuaa.edu.cn。