

航空发电机交流瞬态电压测试与分析

董 潭 党幼云 李婧瑜 张 翠 罗 辉

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘要: 分析航空发电机交流瞬态电压产生的过程原因,根据交流无刷发电机原理结构图和相关的数学模型的基础上,用 MATLAB/Simulink 环境下进行发电机的仿真,得到的瞬态电压信号。根据 GJB 181-2003《飞机供电特性》的相关要求,确定航空发电机交流模式下的电压瞬变和频率瞬变等瞬变参数,利用 MATLAB 进行编程,对采集到的信号进行分析处理,并在进一步对信号采用零相位滤波来减少输出的延时,最后得到相应的交流电压和交流频率的信号,对比其包络线,以判断是否符合相关要求。

关键词: 航空发电机;交流瞬态电压;MATLAB 仿真

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Measurement and analysis of AC transient voltage of aviation generator

Dong Tan Dang Youyun Li Jingxuan Zhang Cui Luo Hui

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Analysis the reasons for transient voltage of aviation generator, Based on the AC brushless generator principle, the structure diagram and the related mathematical model, the transient voltage signal is obtained by simulation of generator under MATLAB/Simulink environment. According to the relevant requirements of "GJB 181-2003" aircraft power supply characteristics, The transient parameters such as voltage transients and frequency transients under the AC mode of an aircraft generator are determined, and the signals are analyzed and processed by using MATLAB, and to reduce the output delay further by zero phase filter of wave signal, and finally get the corresponding signal the AC voltage and frequency, compared to its envelope, to determine whether to comply with the relevant requirements.

Keywords: aviation generator; AC transient voltage; MATLAB simulation

0 引言

随着飞机上的用电设备数量和种类的不断增多,航空发电机的供电品质对飞机的安全起着至关重要的作用,所以在飞机的制造过程中,航空发电机的各项性能参数指标要严格的把控,其中一个重要性能参数就是交流瞬态电压(包括交流电压的瞬变和频率的瞬变)。考虑现实原因和要到检测间采集数据的麻烦步骤,可通过模拟仿真可以较为方便的得到电信号,为后面的实验打下了基础。文献[1-2]给出了相应的发电机原理模型及原理方程式,但对发电机的整流器的建模设计都太过于复杂,造成实验不必要的浪费。文献[3]是通过建立飞机电源系统的传递函数利用 MATLAB 进行的仿真,但没有用到 Simulink 模块中的框图形式。文献[4]详细介绍了瞬态参数的分析和处理方法,可是用的是 LabVIEW 进行分析处理。本文是通过发电机的 Simulink 仿真得到加载或卸载瞬态过程的电信号^[5-8],在

用 MATLAB 编写程序, MATLAB 很多函数都可以直接调用,很大程度上省去了一些算法编程的过程。而且在滤除高次谐波的基础上,又加入零相位滤波,再经计算得到相应的瞬变电压和频率的参数,其满足 GJB 181A-2003《飞机供电特性》的测量要求^[9]。

1 飞机瞬态电压产生的原因

飞机的瞬态电压参数的分析,主要测量的是两个参数,即交流电压的瞬变和频率的瞬变^[10]。

1.1 交流电压的瞬变

在电力系统中,无论原动机的转速变化还是负载的突变都会引起电压的瞬变,电压瞬变通常是指电压超出稳态极限,并且能在一段时间内回到稳态极限的变化状态。其中把电压瞬变持续时间较长($>500 \mu\text{s}$)的现象称为电压涌浪,它主要是由于供电系统中负载突然变化(卸载或加载)而引起发电机汇流条电压在短时升高和短时下降的现象。

把电压瞬变持续时间较短 ($< 500 \mu\text{s}$) 的现象称为电压尖峰,它通常由于切换感性器件时所产生的高频电流而引起的。相比于电压浪涌,电压尖峰的幅值要大很多,而且随机出现的几率很大,所以测量电压尖峰需要专用的相关设备。因此,不对电压参数这一参数进行研究。

在实际测量瞬态浪涌电压,要根据 GIB 181A—2003《飞机供电特性》中的规定,瞬变期间过压极限不得超过 180 V,欠压极限不能低于 80 V,交流瞬态浪涌电压曲线是按照相应的包络线进行规定的,纵坐标是以 1 V 的电压方均根为基准值,图 1 所示为正常交流电压瞬变包络线。

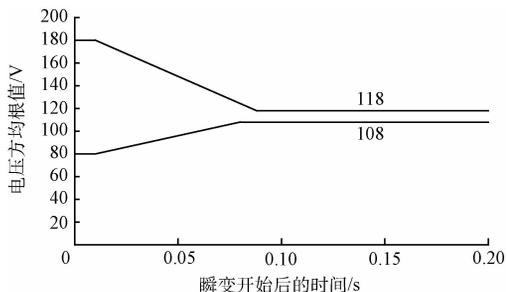


图 1 正常交流电压瞬变包络线

1.2 频率的瞬变

频率瞬变指频率超出稳态的极限但在一定时间内能回到稳态极限范围之内过程。它是由于输入转速的突然变化以及负载突变所引起的短暂变化过程。在整个过程中,最初一段由发电机电磁变化而引起的瞬变,即电磁瞬变。它的出现使得输出的电压产生相角的偏移,而相角的变化必会引起频率改变。根据 GJB 181A-2003《飞机供电参数》的要求,频率瞬变要满足图 2 所示的包络线。

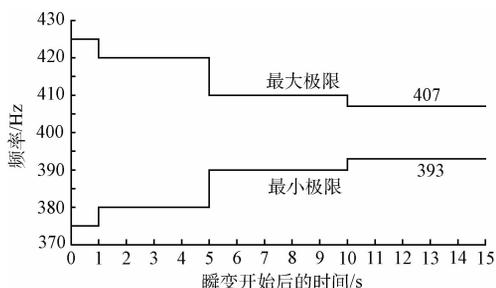


图 2 正常交流频率瞬变包络线

2 软件实现及测试原理

2.1 航空交流发电机

在当今的航空领域中,大多采用交流无刷发电机,结构原理如图 3 所示,其基本组成包括:主发电机、交流励磁机、副励磁机、还有二极管(或晶闸管)构成的旋转整流器。励磁机的电枢绕组在转子,励磁绕组在定子上,对励磁机在定子上的励磁绕组提供励磁(由副励磁机提供),其转子电枢绕组将产生交流电压,经过三相旋转整流器后,在转子向主

发电机在转子的励磁绕组供电,根据电磁感应原理,使得主发电机在定子的电枢绕组上感应出三相交流电压。这样的设计可以满足在高空高速运行的特殊要求,还有效的减少了发电机体积,同时无刷的设计,也大大提高了整个供电系统的可靠性和降低故障率。

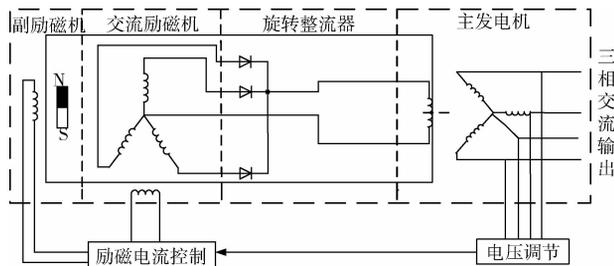


图 3 交流无刷发电机构成原理

2.2 发电机仿真及信号的产生

航空飞机的供电系统中,瞬态电压及瞬态频率都是由供电设备的工作状态发生突然变化而引起电压,频率瞬间上升或下降的短暂动态过程。交流瞬态参数是否满足 GJB181A—2003 的要求,对飞机能否安全飞行意义重大。由于资源的限制,所以考虑航天发电机的电压信号的产生用 MATLAB 中的 Simulink 模块进行虚拟仿真,使其产生幅值为 115 V 的频率 400 Hz 三相交流信号,各行相差 120° 。交流无刷发电机的模型如图 4 所示^[9]。其部分相应的数学推导方程可参考文献[11-12]。图 5 所示为发电机内部模型,图 6 所示为发电机外部模型。

有了发电机 Simulink 模型,进行仿真实验,在仿真前设置 step 模块,设置 step time 为 0.35 s,其实现的功能就是图 4 中的断路器在 0.35 s 后动作,发电机的负载变化,实现在时间 0.35 s 这一刻开始的电压瞬变直到稳定的动态短暂过程。在 scope2 中看到相应的仿真电压波形,为了更进一步研究瞬变电压和瞬变频率,采集数据频率要为 80 kHz,所以要在 scope2 的设置相应的采样频率 (Sampling 的选项卡中选 Sample time 后面填写为 1/80 000),再进行数据的保存(在波形图设置中勾选 Save data to workspace 选项),有助于后面用 MATLAB 进行信号数据的处理。

3 信号的检测和实现

若要信号已经产生,由于搭建发电机模型中难免会用到电力电子元件和一些非线性负载,致使仿真出的信号会有或多或少的谐波分量(毛刺),所以在进行瞬变电压和频率检测前,调取采集的电压信号,首先用低通滤波器消除数据中混有很多的高频噪音,但对滤除后的信号还要做进一步处理,不允许滤波输出有延时,所以还要求对信号进行零相位滤波^[13-16]。

零相位滤波是先将输入序列按顺序滤波,然后将所得

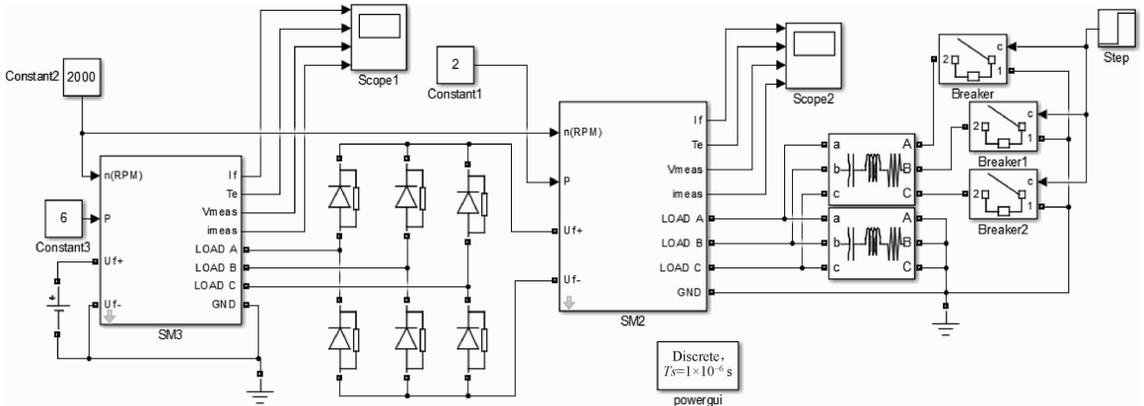


图 4 无刷发电机总体模型的搭建

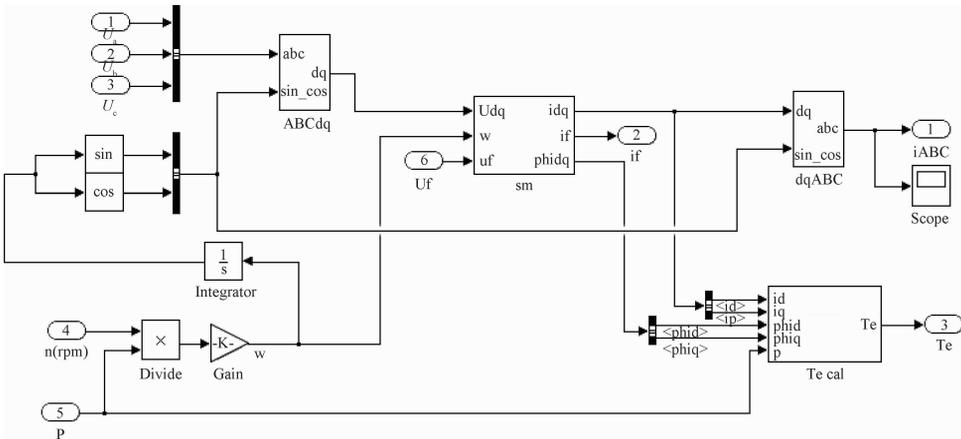


图 5 发电机的内部模型搭建

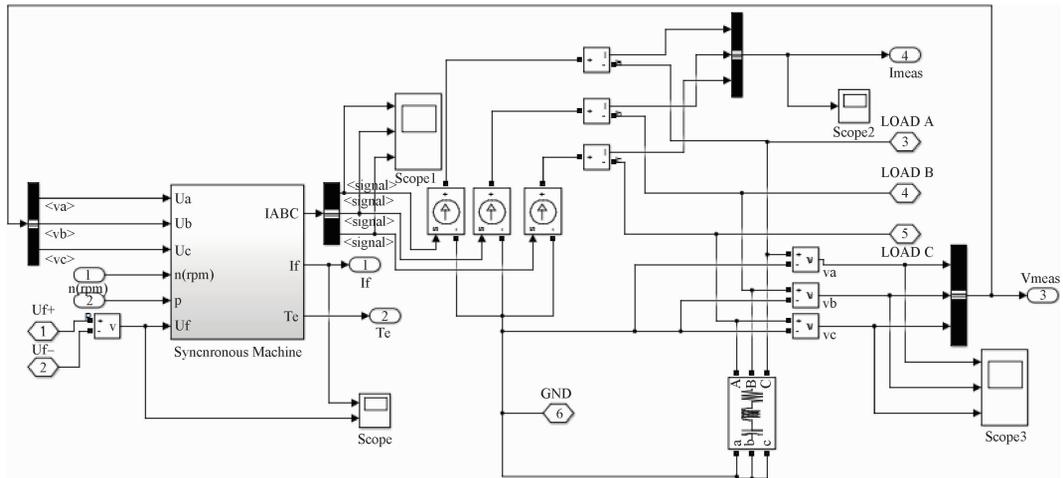


图 6 发电机外部模型的搭建

的结果的结在时域翻转后反向通过滤波器,在将所得的结果在时域翻转后输出。设有输入序列 $x(n)$, 经过两次时域翻转后得 $y(n)$, 则有:

$$Y(z) = X(z)H(1/z)H(z) \quad (1)$$

$x(n)$ 通过传递函数为 $G(z) = H(1/z)H(z)$ 的系统得到输出为 $y(n)$ 。其中滤波器 $H(z)$ 的响应函数为:

$$H(z) \Big|_{z=e^{j\omega}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_M z^{-M}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_N z^{-N}} \Big|_{z=e^{j\omega}} = \frac{\sum_{m=0}^M b_m e^{-jm\omega}}{1 + \sum_{n=0}^N a_n e^{-jn\omega}} = |H(z)| e^{j\varphi(\omega)} \quad (2)$$

零相位滤波在 MATLAB 编辑器中可以直接进行调

用,调用格式为:

$$Y = \text{filtfilt}(b, a, x)$$

式中: b 和 a 为数字滤波器系数, x 为滤波器的离散输入, y 为滤波器的输出。

求取峰值电压的方法很多,但在 MATLAB 编写时,可以直接调用其工作箱中已有的峰值检测函数 `findpeaks`。可以求出瞬态过程中每周波的电压峰值和相应的发生时间,这种方法相比数学方法简单的多,而且还在一定程度上缩短了实验时间。下来将峰值电压值除以 $\sqrt{2}$ 即得到瞬态浪涌电压。瞬变频率在具体实现时和交流电压瞬变的参数处理一起进行,在通过前面求出的各峰值来求出各周波的平均周期,再根据频率是周期的倒数,求出各个周波的频率。最后计算的结果填充到 GJB 181A-2003 制定的交流电压瞬变和交流频率瞬变包络线图中,根据实验图 7、8 的结果显示,参数符合标准。

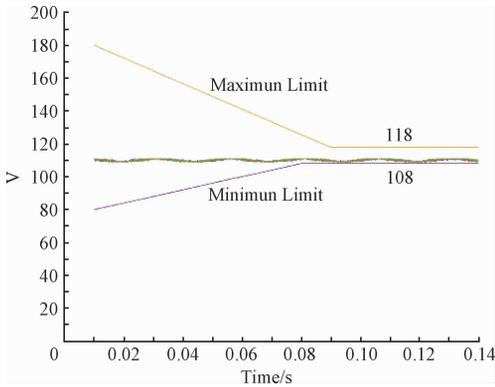


图 7 交流电压瞬变包络线

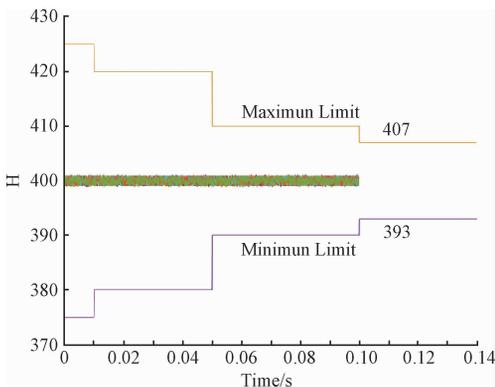


图 8 交流频率瞬变包络线

4 结 论

在航空供电系统中,检测突加,突卸中的瞬态各参数是重要的指标之一。本文根据国标《飞机供电特性》的要求,先通过 MATLAB/Simulink 进行发电机仿真,得到相应的原始信号,在利用 MATLAB 编写程序,对信号进行滤波处理,本文提出了零相位滤波,减少了输出的相位差和延时误差,使数据更接近真实值,再用软件现有的函数求出瞬态电压

浪涌和频率,填充包络线,该测量编程很大程度上减少了有些方法的建模编程,简化了算法,节约了实验时间。

参考文献

- [1] 侯亚敏. 无刷励磁同步发电机励磁控制系统的研究[D]. 广州:华南理工大学,2013:10-21.
- [2] 姚骏. 交流励磁机励磁电源的研究与分析[D]. 重庆:重庆大学,2013:6-8.
- [3] 刘建英. 基于 MATLAB 的飞机电源系统仿真[J]. 中国民航学院学报,2004,22(Z1):91-92.
- [4] 雷涛. 飞机供电系统参数测试方法研究及系统设计[D]. 西安:西北工业大学,2006:51-59.
- [5] 李红梅,陈涛. 永磁同步发电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报. 2015,29(5):638-645.
- [6] 罗国云,严东超,张海荣. 同步发电机励磁调节系统建模与仿真[J]. 设计与分析,2003(3):19-23.
- [7] 王瑾,谢少军,严仰光. 飞机无刷交流发电机设计原理及实验仿真研究[J]. 北京航空航天大学学报,1999,31(5):485-491.
- [8] 陈超,黄建,梁旭. 基于虚拟仪器技术的直升机电源试验系统设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(1):89-93.
- [9] 国防科学技术工业委员会. GJB 181A—2003 飞机供电特性[S]. 北京:总装备部军标出版社,2003.
- [10] 顾方鹤. 飞机瞬态电压研究[J]. 民用飞机设计与研究,2001(3):19-22.
- [11] 周高峰,赵则祥. MATLAB/Simulink 机电动态系统仿真及工程应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2014:241-271.
- [12] 李岩,苏学军. 基于 MATLAB/SIMULINK 同步发电机电路模型仿真[J]. 青岛大学学报,2003,18(5):69-71.
- [13] 杨卫朋,张勇,何博. 飞机交流电源变频电路低通滤波器设计与仿真[J]. 航空科学技术,2014,25(3):35-39.
- [14] 杨德友,王博,蔡国伟. 基于改进自适应局部迭代滤波的谐波检测方法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(10):2274-2280.
- [15] 常广,鄢素云,王毅. 零相位数字滤波器在非平稳信号处理中的应用[J]. 北京交通大学学报,2011,35(6):49-56.
- [16] 宋宁. 基于全相位的自适应数字滤波器设计方法[J]. 电子测量,2013(Z1):97-100.

作者简介

董潭,硕士研究生,主要研究方向为 110 kW 航空发电机的性能测试与分析。

E-mail: 657791517@qq.com

党幼云(通信作者),1962 年出生,教授,研究方向为电力电子电源技术与运动控制系统。

E-mail: xk-dyy@qq.com