

APU 起动发电实验台控制方式仿真研究*

臧小杰,曹博书

(中国民航大学 航空自动化学院,天津 300300)

摘要: 利用 Matlab 平台构建了起动发电实验台仿真模型,使用同步电机调速系统模拟航空发动机点火前的风阻性负载转矩与点火工作后的驱动转矩,研究了 APU 起动发电实验台的控制方式,证明了 APU 起动发电实验台控制方式的可行性。

关键词: 起动发电机;辅助动力装置;同步电机

中图分类号: TP312

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)01-0080-03

Simulation study of the APU starter experiment table's control model

Zang Xiaojie, Cao Boshu

(College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A simulation model of starter/generator experiment table is established on Matlab platform using synchronous motor speed control system to simulate APU's wind impedance load torque before start-up process and driving torque after start-up process. An APU starter/generator experiment table control mode is researched and the feasibility of the APU starter/generator experiment table control mode is proved.

Key words: starter generator; auxiliary power unit; synchronous machine

辅助动力装置 APU (Auxiliary Power Unit) 是装在飞机上的一套不依赖于机外任何能源、自成独立体系的小型动力装置。其功用是在地面为飞机提供电源和气源,用于向飞机电网供电、起动主发动机以及向飞机空调系统提供压缩空气,当飞机在飞行过程中遇到发动机停车故障时,也可作为应急动力源为飞机提供电源和气源。

APU 发动机起动时,起动发电机工作于电动方式,带动发动机转子旋转到一定转速后,发动机开始点火,起动机继续拖动,直到发动机进入自行工作状态后,起动发电机再进入发电状态,由发动机驱动达到额定电压频率后接入汇流条对负载供电。

从起动发电机驱动 APU 发动机起动到发动机正常工作,这一过程只需要 10 s 左右的时间,而起动发电机系统却变换了数次控制方式,这使得对起动发电系统的控制变得非常复杂,因此需要构建 APU 起动发电实验台研究其控制方式。本文利用 Matlab 平台构建了实验台仿真模型,设计了 APU 起动发电系统的控制方案。

1 实验台系统构成

目前大型民用客机(如波音 737)上的 APU 所使用的起动发电机多为同轴安装永磁发电机、励磁机和主发电机的三级式同步电机,而本文使用的起动发电机为同轴安装励磁机和主发电机的两级式同步电机,利用励磁电源代替永磁发电机,在保证不影响起动发电机电气特性的前提下简化了起动发电实验台的结构^[1-2]。

APU 发动机在点火之前为风阻性负载转矩,点火后为驱动转矩,本文使用永磁同步电机调速系统模拟发动机的转矩特性(模拟发动机的永磁同步电机简称为发动机电机),在能够模拟发动机转矩特性的前提下进一步简化了实验台的结构。实验台系统构成如图 1 所示。

图 1 中发动机电机、发动机电机控制器、变频器、三相电流表以及位置、转速传感器构成了永磁同步电机调速系统,用来模拟 APU 发动机的转矩特性;起动发电机、励磁电源、起动发电机控制器、变频器、三相电流电压表以及转速位置传感器构成了驱动及发电系统,用来驱动发动机电机提速以及对负载供电。

* 基金项目: 中央高校基本科研业务基金(ZXH2011B002)

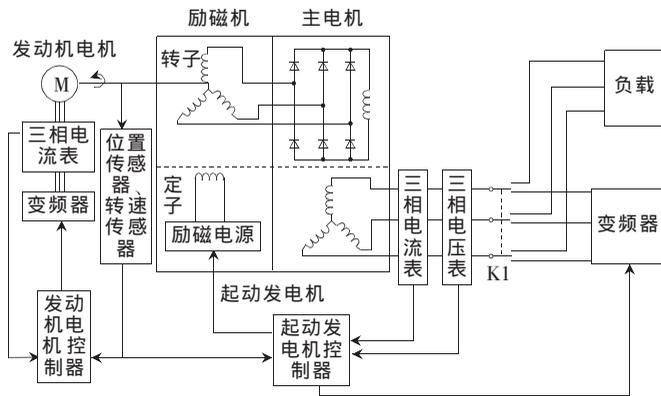


图1 起动发电机结构图

2 实验台控制方式

APU 起动发电系统从静止状态到正常运行的全过程如图 2 分为 4 个阶段，其中 Speed 为发动机电机转速； T_m 为发动机电机转矩，负值表示模拟发动机点火前的风阻性负载转矩，正值表示模拟点火后的拖动转矩； $T_{s/g}$ 为起动发电机的转矩，负值表示处于发电状态，正值表示处于电动状态。

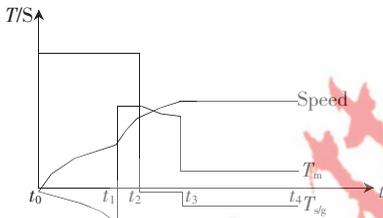


图2 起动发电系统转矩转速图

(1) $t_0 \sim t_1$ 阶段：起动发电机驱动发动机电机开始起动，这期间发动机电机模拟 APU 发动机点火前的风阻性负载转矩，因为航空发动机起动时的风阻性负载转矩是一种空气阻力性质的负载转矩，由流体力学可知 APU 发动机风阻性负载转矩如式(1)所示：

$$T_m = -T_1 - k\omega^2 \quad (1)$$

其中， T_1 为发动机摩擦转矩； k 为比例系数； ω 为航空发动机转速，负号表示转矩为负载性。

发动机电机经坐标变换到 d-q 坐标系后，可以得到 d-q 坐标系下的数学模型^[3]，此时电机的电磁转矩如式(2)所示：

$$T_e = 1.5p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (2)$$

其中， p 为电机极对数， ψ_f 为转子永磁体产生的磁链， L_d 、 L_q 为定子绕组变换到 d-q 轴后的电感， i_d 、 i_q 为定子电流在 d-q 轴的分量。

若使 $i_d = 0$ ， $i_q = i_s$ ，则变频器的控制方式为矢量控制，由式(2)可知，当 $i_d = 0$ 时电磁转矩为：

$$T_e = 1.5p\psi_f i_q \quad (3)$$

由式(3)和式(1)可知，模拟发动机起动的风阻性负载转矩 $T_e = -T_m = -T_1 - k\omega^2$ 时，发动机电机控制器产生的转矩给定值为 $T^* = -T_1 - k\omega^2$ ，控制变频器输出电流矢量

$$i_s = i_q = \frac{-T_1 - k\omega^2}{1.5p\psi_f}$$

为了尽快驱动发动机电机提速，起动发电机控制

器。输出最大的转矩给定值，通过变频器输出电流矢量，驱动起动发电机产生最大转矩。

在 t_1 时刻起动发电系统达到了 APU 发动机点火对应的转速(典型值为发动机正常工作转速的 25%)，此时发动机电机模拟发动机点火后的驱动转矩。为了尽快驱动起动发电系统提速，发动机电机控制器输出最大的转矩给定值，通过变频器输出电流矢量，驱动发动机电机产生最大转矩。

(2) $t_1 \sim t_2$ 阶段：发动机电机和起动发电机联合驱动，使起动发电系统尽快提速，发动机电机控制器和起动发电机控制器均输出最大的转矩给定值，通过变频器输出电流矢量，驱动电机产生最大转矩。

在 t_2 时刻起动发电系统达到 APU 发动机的自持转速(典型值为发动机正常工作转速的 70%)，此时起动发电机控制器输出零转矩给定值，通过变频器输出零电流矢量，使变频器和起动发电机之间的电流迅速减小，当电流减小到零时，开关 K_1 将起动发电机与变频器断开。

(3) $t_2 \sim t_3$ 阶段：发动机电机驱动起动发电系统继续提速。为了模拟 APU 发动机和液压马达通过游星齿轮联合驱动起动发电机，使其平滑提升至正常工作转速的过程，发动机电机控制器按照转速给定方式，将系统实际转速与给定转速相减，通过 PI 调节器产生转矩给定值，通过变频器输出电流矢量，驱动发动机电机提速。

起动发电机进入空载调压状态，通过调节励磁机的励磁电源控制起动发电机的空载端电压，使端电压在提速过程中保持为发电状态的额定电压。

在 t_3 时刻起动发电系统达到 APU 发动机正常工作的转速，对应的起动发电机也达到了发电状态的额定频率电压时，起动发电机控制器将控制开关 K_1 与负载连接，使起动发电机开始对负载供电。

(4) $t_3 \sim t_4$ 阶段：起动发电机对负载供电，发动机电机控制器仍然按照转速给定方式，通过变频器驱动发动机电机，补偿起动发电机发电时产生的负载转矩。

起动发电机控制器通过调节励磁机励磁电压补偿带载时电枢绕组产生的压降。

3 起动发电系统仿真模型建立与结果分析

起动发电系统的 Matlab 仿真模型图如图 3 所示。图 3 中：S/G_main 为起动发电机主电机，S/G_EX 为起动发电机的励磁机，主电机输出的转速信号引入到励磁机的转速输入端 W 表示主电机和励磁机同轴相连。为了表示励磁机产生励磁功率时对起动发电机造成的负载性转矩，输入到主电机 TL 的转矩为从连接轴 Mechanical Shaft 传入的转矩减去励磁机产生的电磁转矩。

EX_ctrl 为励磁机的励磁电源，通过调节励磁机励磁绕组的电压，在起动发电机处于电动状态时，使主电机的励磁电流在转速提升过程中保持恒定；在发电状态时，使主电机的端电压保持在额定电压。

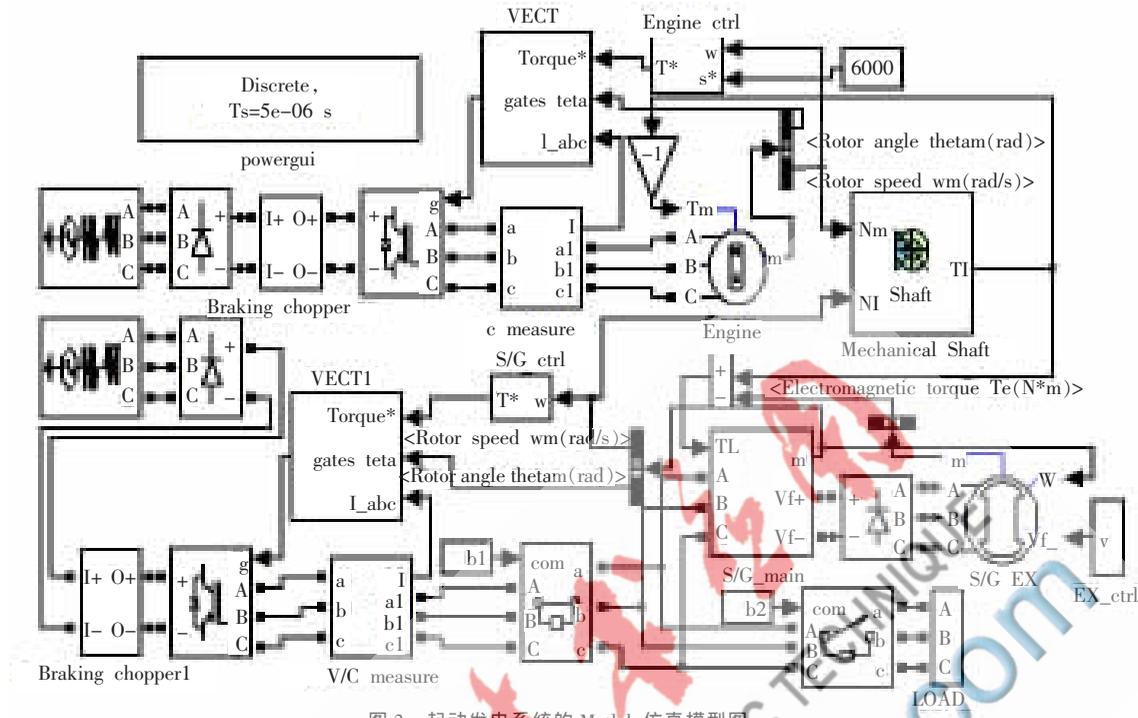


图3 起动发电系统的 Matlab 仿真模型图

Engine 为发动机电机, 发动机电机和起动发电机输出的转速信号输入到连接轴, 连接轴通过比较发动机电机和起动发电机的转速差产生扭差转矩, 扭差转矩以正负相反的方式输入到起动发电机和发动机电机的转矩输入端。

Engine_ctrl 为发动机电机控制器, S/G_ctrl 为起动发电机控制器。

起动发电系统 Matlab 仿真图如图 4 所示, 由图可以看出:

在 $t_0 \sim t_1$ 阶段, 发动机电机产生风阻性负载转矩, 起动发电机产生最大转矩, 但是在 t_0 时刻起动发电机输出的驱动转矩很小, 这是因为起动发电机的励磁机在零转速情况下无法产生励磁电流, 因此, 此时的电磁转矩主要由主电机励磁绕组中的剩磁链和定子绕组中的磁链相互作用产生。在 t_0 时刻后起动发电机主电机带动励磁机旋转, 励磁机电枢绕组输出的电流经整流器整流后输入到主电机励磁绕组中增强励磁磁场, 从而增强起动发电机的转矩输出能力, 可以从图 4 看出 t_0 时刻后起动发电机输出的转矩迅速上升直至达到设定的最大转矩。

在 $t_1 \sim t_2$ 阶段, 发动机电机和起动发电机均产生最大转矩, 联合拖动起动发电系统迅速加速。

在 $t_2 \sim t_3$ 阶段, 为了平滑过渡到 APU 发动机正常工

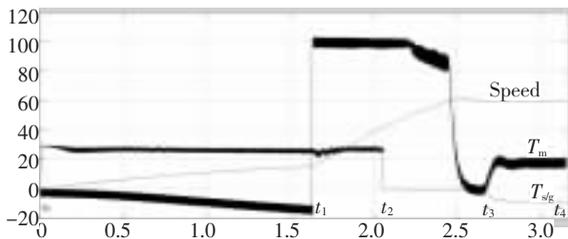


图4 起动发电系统的 Matlab 仿真结果

作的转速, 发动机电机输出的转矩越来越小, 起动发电机进入空载调压状态, 产生的空载转矩几乎为零。

在 $t_3 \sim t_4$ 阶段, 起动发电机带载, 由于起动发电机是一种感性电源, 在 t_3 时刻输出的电流是从空载电流开始逐渐增大的, 所以产生的负载转矩也逐渐增大。发动机电机按照转速给定方式对起动发电机发电时产生的负载转矩进行补偿。

本文完成了航空发动机起动发电实验台的 Matlab 模型建立, 利用永磁同步电机调速系统模拟航空发动机, 在充分考虑两级式同步电机电气及机械特性的前提下, 仿真研究了起动发电系统的控制方式。通过仿真实验证明了起动发电实验台控制方式的可行性, 为实际构建实验台提供了控制方案。

参考文献

- [1] 陈宝林, 严仰光, 陈广华, 等. 飞机起动/发电双功能系统电动状态单相交流励磁的研究[J]. 电工技术杂志, 2001(1): 7-8, 3.
- [2] 胡春玉. 电励磁无刷交流同步电机起动发电过程的仿真与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [3] ISFAHANI A H, SADEGHI S. Design of a permanent magnet synchronous machine for the hybrid electric vehicle[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008(45): 567-571.

(收稿日期: 2012-10-12)

作者简介:

臧小杰, 男, 1957 年生, 教授, 主要研究方向: 电气自动化。

曹博书, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 电气传动。