

航空地面电源发电机励磁系统仿真设计与实现

赵徐成, 刘章龙, 赵 辉, 杨 阳

(空军勤务学院 航空四站系, 江苏 徐州 221000)

摘要: 受系统规模和复杂性、安全性等的限制, 很多航空地面电源的实验无法直接在原型系统上进行; 为了实现真实地模拟航空地面电源发电机励磁系统, 方便检测其实际工作状况和进行仿真实验, 提高可靠性和安全性; 以某型航空地面电源车发电机励磁系统为研究对象, 对系统模型的建立和仿真进行了分析, 选用 Matlab 软件平台对系统模型进行了仿真和试验; 仿真和试验结果验证了该设计方案的可行性, 表明了该模型能够真实地反映航空地面电源发电机励磁系统的实际运行特性, 具有较好的动态性能; 该设计可为未来航空地面电源的分析和设计提供新的思路和方法, 同时也可新型航空地面电源的研制提供试验平台。

关键词: 航空地面电源; 励磁系统; PID 控制; Matlab 仿真

Simulation Design and Realization of Excitation System of Aerial Ground Power Supply

Zhao Xucheng, Liu Zhanglong, Zhao Hui, Yang Yang

(Department of Aviation Four Stations, Air Force Logistics College, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Restricted by system size and complexity, security etc, a lot experiments about Aviation ground power cannot conduct directly on the prototype system. The purpose of this paper is in order to realize the real simulation of the excitation system of the Aviation ground power generator, convenient to detect the actual working condition and the simulation experiments, and improve the reliability and security. This paper analyzed the system modeling and simulation based on one of the Aerial Ground Power Supply. Simulation and experiments are performed on the system by Matlab. The feasibility of the design was proved. The simulation results show that the model is able to reflect the real operating characteristics of the excitation system of the Aviation ground power generator and has better dynamic performance. The work of this paper can present a new idea and method for the analysis and design of the future Ground Power Supply and offer experimental platform for new type Ground Power Supply equipment.

Keywords: aerial ground power supply; excitation system; PID control; Matlab simulation

0 引言

航空地面电源是一种集发电与供电功能于一体的移动式航空地面电站, 主要是为飞机地面通电检查机载用电设备和地面起动机服务, 其品质的高低直接影响飞机性能的发挥和飞行安全。军用的车载式航空地面电源装备通称航空电源车^[1]。

受系统规模和复杂性、安全性、经济性以及实际测量手段的限制, 在设计、分析和研究航空地面电源时很多电力系统的实验都无法直接在原型设备上, 因此本文采用系统仿真工具来分析其电力系统。本文以某型航空地面电源车发电机励磁系统为研究对象, 对系统模型的建立和仿真进行了分析, 建立了该型电源车发电机励磁系统的模型, 并通过仿真实验对其不同工作状态下的输出特性进行分析, 验证了仿真系统的可行性。考虑到该电源车发电机励磁系统规模较小, 数学模型计算编程复杂, 需要进行控制及电路系统的混合仿真, 为此选用 Matlab 作为系统仿真分析的软件平台。

1 电源车励磁系统结构和工作原理

为了满足飞机对地面交流电源的要求, 该型航空电源车上安装了一台三相中频同步无刷交流发电机, 用以发出 115 V/

200 V、400 Hz 的交流电。图 1 为发电机的原理图。为了方便分析, 将其分解为主发电机、交流励磁机和旋转整流器三部分来加以分析。

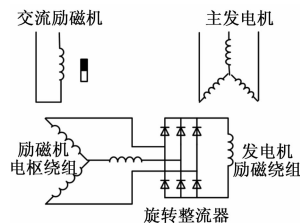


图 1 旋转整流器式无刷发电机原理图

1.1 励磁系统结构

该型电源车采用的是旋转整流器无刷交流励磁系统, 交流励磁机与主发电机同轴同机座安装。励磁机定子产生磁场, 主极铁心用低碳钢板制成, 其中一个磁极为永久磁铁, 用来保证电机可靠地自励建压, 其余磁极上都套有励磁绕组, 由自动电压调节器输出给励磁电流。励磁机转子为电枢^[2]。其原理如图 2 所示。

该型电源车使用的 WZT-2 自动电压调节器由三相电压综合采样电路, 比较、放大和校正网络, 电压给定电路, 驱动电路, 功率开关电路以及直流电源电路, 前馈补偿电路等单元组成, 如图 3 所示。

1.2 励磁系统工作原理

由图 2 可以看出: 交流励磁机的励磁绕组经自动电压调节

收稿日期: 2015-10-13; 修回日期: 2015-12-14。

作者简介: 赵徐成(1961-), 男, 江苏徐州人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事航空地面保障装备方向的研究。

刘章龙(1991-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事航空四站保障技术与信息化方向的研究。

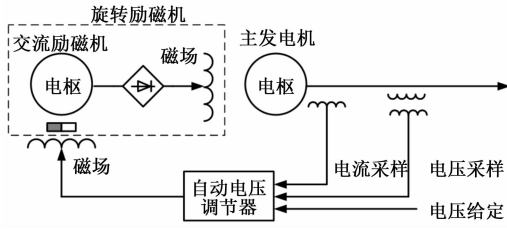


图 2 励磁系统原理框图

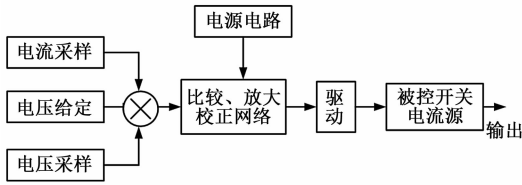


图 3 电压调节器工作原理方框图

器接到主发电机定子三相输出的某一项上, 励磁机电枢绕组发出的三相中频电经三相桥式整流后又为主发电机励磁。在发电机正常运行时, 当发电机端电压出现波动而产生微小的电压偏差时, 自动电压调节器能根据这一偏差迅速地增大或减小供给励磁机的励磁电流, 从而维持发电机的端电压几乎不变。

2 电源车励磁系统的数学模型

2.1 无刷交流励磁系统的数学模型

构成无刷交流励磁系统的基本元件有: 交流励磁机、整流器、滞后超前补偿器、放大器、励磁系统稳定反馈电路等。本文参考 IEEE 推荐的 AC1A 型励磁机模型^[3], 建立交流励磁系统数学模型。无刷交流励磁系统的数学模型如图 4 所示。

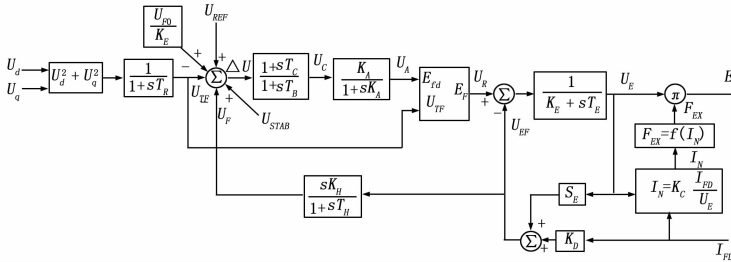


图 4 无刷交流励磁系统的数学模型方框图

模型用于模拟该电源车的无刷交流励磁系统, 系统由交流励磁机和不可控整流桥两部分组成。在该数学模型中, 用反馈系数 K_D 来表示励磁电流对励磁机电压 U_E 的去磁效应, 用饱和函数 S_E 的反馈来表示励磁机的饱和效应, 用曲线 F_{EX} 和系数 K_C 来表示在换弧过程引起的励磁机输出电压的降低。

2.2 交流励磁机和整流器数学模型

图 4 所示的励磁系统数学模型方框图充分考虑了由电枢反应而引起的负荷调节^[4]。模型中 I_{FD} (主发电机的磁场电流) 表示励磁机的负载电流, 而电枢反应的去磁效应则通过负反馈 $K_D I_{FD}$ 体现。即有:

$$U_E = \frac{1}{K_E + sT_E}(U_R - S_E U_E - K_D I_{FD})$$

其中: U_E 为励磁机的内电动势, T_E 为励磁机的时间常数, U_R 为比例饱和环节的输出电压, S_E 为励磁机的饱和函数, K_E 为励磁机的放大倍数, K_D 为电枢反应系数。

考虑了负载电流对交流励磁机输出电压动态特性的去磁效应, 若已知励磁机的特性曲线, 则:

$$K_D = \frac{U_E - E_{FD}}{E_{FD}} - \frac{K_C}{\sqrt{3}}$$

其中: E_{FD} 为主发电机的励磁电压, K_C 为整流器换相压降系数。

交流励磁机采用三相桥式全波整流电路对输出电压进行整流。当整流器从空载时的负载电流变到短路状态的负载电流时, 根据换相压降的不同, 整流电路运行在 3 个不同方式中的某一种。这时可定义换流器调节为换相压降的函数^[5], 其表达式如下:

$$E_{FD} = U_E F_{EX}$$

$$\text{其中: } F_{EX} = f(I_N), I_N = K_C \frac{I_{FD}}{U_E}$$

其中: F_{EX} 为整流器换相函数。随着换弧角 γ 的变化, 整流桥有 3 种不同性质的换弧状态, 3 种运行方式的函数 $f(I_N)$ 表达式如下:

$$f(I_N) = \begin{cases} 1.0 - 0.577 I_N, & \gamma < 60^\circ \\ \sqrt{0.75 - I_N^2}, & \gamma = 60^\circ \\ 1.732(1.0 - I_N), & \gamma > 60^\circ \end{cases}$$

一般情况下, 整流桥均在 $\gamma < 60^\circ$ 的范围内工作, 只在某些特殊情况下 (比如灭磁) 才工作在大于或等于 60° 的范围内^[6]。式中 I_N 为整流器的负载电流, K_C 为整流器换相压降系数。其值取决于励磁机等效换相电抗 X_r , 对于第一种换相状态, $K_C = \frac{3\sqrt{3}X_r}{\pi R_{fAB}}$, 为励磁系统阻抗的标么基值, X_r 为励磁机次暂态电抗和负序电抗的平均值。 I_{FD} 为主发电机的励磁电流。

2.3 电压差模型

每个励磁系统的主要输入信号是整流滤波器输出 U_{TF} 。在第一个相加点, 电压调节器参考电压 U_{REF} 减去信号 U_{TF} , 再加上补偿器输出 U_F , 如果使用电力系统稳定器, 则再加上它的输出 U_{STAB} , 这样产生的动作信号来控制励磁系统。初始励磁电压 U_{F0} 的设置可以使系统从稳态条件下运行。

同步电机端电压经整流滤波后输出为:

$$U_{TF} = \sqrt{(U_d)^2 + (U_q)^2} \frac{1}{1 + sT_R}$$

励磁系统的电压差信号为:

$$\Delta U = U_{REF} + V_{F0}/K_E - U_{TF} + U_{STAB} - U_F$$

其中: T_R 为整流滤波器时间常数, U_d 、 U_q 分别为发电机 d 轴和 q 轴电枢端电压, ΔU 为综合后的电压差信号, K_E 为励磁机的放大倍数, U_F 为反馈环节输出电压。

2.4 PID 调节器模型

补偿器、放大器和反馈稳定环节 3 个环节合成作用体现了 PID 调节器的调节作用。其中补偿器模型体现的是 D 微分作用, 放大器模型体现的是 P 放大作用, 反馈稳定环节体现的是 I 积分作用^[7]。

补偿器的输出为:

$$U_C = \Delta U \frac{1 + sT_C}{1 + sT_B}$$

其中: T_B 、 T_C 分别为补偿器滞后和超前补偿的时间常数, U_C 为补偿器输出电压。

放大器的输出为:

$$U_A = U_C \frac{K_A}{1 + sT_A}$$

其中： U_A 、 K_A 、 T_A 分别为放大器的输出电压、增益和时间常数。

反馈稳定环节的输出为：

$$U_F = U_{EF} \frac{sK_H}{1 + sT_H}$$

$$U_{EF} = S_E U_E + K_E U_E + K_D I_{FD}$$

其中： K_H 为反馈环节增益， T_H 为反馈环节的时间常数。

比例饱和环节的模型为：

$$U_R = E_F$$

$$0 \leq E_F \leq E_{fmax}, \text{ 且 } E_F = E_{fd}$$

$$E_{fmax} = \begin{cases} \text{常数} & K_p = 0 \\ K_p U_{TF} & K_p \geq 0 \end{cases}$$

其中： E_F 和 E_{fmax} 分别为比例饱和环节的输出电压和其最大值， E_{fd} 为电压调节器输出电压， K_p 为比例饱和环节的增益。

至此，励磁系统的数学模型已推导完毕。

3 电源车励磁系统的仿真

3.1 励磁系统的仿真模型

根据上文中对励磁系统建立的数学模型，在 Matlab 中利用 Simulink 建立仿真模型^[8]，如图 5 所示。

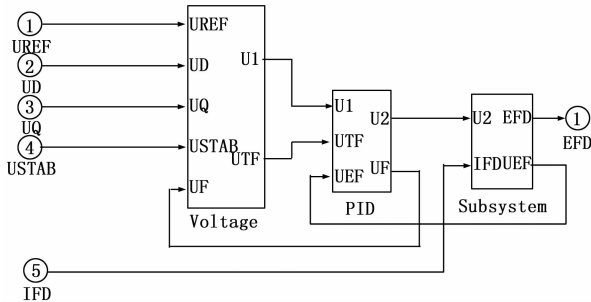


图 5 励磁系统的仿真框图

其中 Voltage 模块的功能是计算电压差。PID 模块实现的是 PID 调解器的作用，包括补偿器环节、放大器、反馈环节和比例饱和环节。proportional saturation 模块实现的是比例饱和环节的作用^[9]。

3.2 仿真试验分析

下面通过实验分析如图 5 所示由发电机励磁系统组成的简单系统的运行波形曲线。

图 5 为负载功率因数和外接电阻标么值均设置为 1，额定频率恒定为 400 Hz，三相加平衡负载时得到的。a 相电枢电流和端电压随时间变化的曲线如图 6 所示，由于外接电阻的标么值为 1，因此电压和电流输出标么值皆为 1，两者变化曲线重合。由于三相所加负载是平衡的，其它两相的波形曲线与 a 相同。

图 7 所示为发电机空载情况下， $t=0.015$ s 时，发电机负荷由额定负载加到额定负载的两倍，负载功率因数为 1，且保持发电机转速恒为同步转速不变。其它参数与图 6 一样。由图 7 的仿真结果可知，负载的增加使电流上升，电压下降，在励磁系统的作用下，电压又恢复到原来值，而电流则上升到一个更大值。由此可知所建模型能够满足同步发电机励磁调节系统静态和动态基本性能指标。

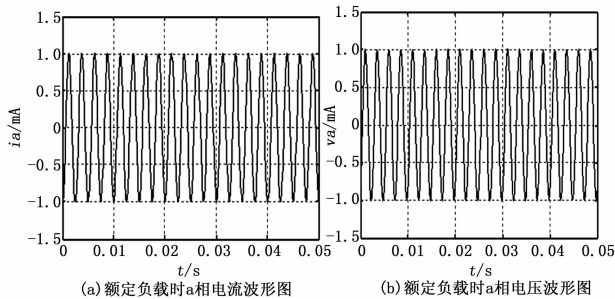


图 6 波形图

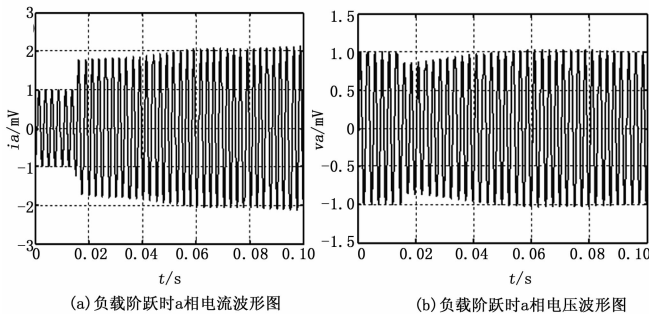


图 7 波形图

4 总结

本文在讨论了飞机对地面电源供电性能要求的基础上，结合地面电源目前的状况和发展趋势，指出了电力系统数字仿真在地面电源保障中的必要性和重大意义。以某型电源车为研究对象，通过 Matlab 仿真软件平台，建立了该型电源车励磁系统的仿真模型，并经仿真试验验证了所建仿真模型的正确性，达到了用系统仿真工具方法来分析航空地面电源发电机励磁系统的研究目的。该设计可为未来航空地面电源的分析和设计提供新的思路和方法，同时也可新型航空地面电源的研制提供试验平台。

参考文献：

- [1] 蒋超, 王保成. 航空电源车站装备与保障 [M]. 徐州: 空军勤务学院, 2013.
- [2] 王余奎, 赵徐成, 常军, 等. 基于 Saber 仿真的电源车励磁调压系统改进设计 [J]. 大功率变流技术, 2011 (3): 44-50.
- [3] 韩文虹, 赵小丽. 基于 TS 模糊 PID 控制模型的发电机控制器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 386-388.
- [4] 孙朝霞, 李文明, 李书明. 基于 RTW 技术的水电站励磁系统建模及仿真实现 [J]. 系统仿真技术, 2014.
- [5] 沈文平. 同步发电机励磁控制系统研究 [J]. 电机信息, 2009, 36: 32-33.
- [6] 程启明, 胡晓青, 周卉云, 等. 同步发电机励磁系统的最优控制仿真 [J]. 上海电力学院学报, 2011, 27 (3): 275-279.
- [7] 张立霞, 王高山, 汪友华, 等. 暂态稳定分析典型励磁模型仿真研究 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (1): 77-80.
- [8] 钟麟, 王峰. MATLAB 仿真技术与应用教程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [9] 曹程杰, 莫岳平, 刘洁. 基于 MATLAB 模块化模型的水轮发电机组仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2): 68-71.