

三级同步发电机硬件在环仿真

梁铜川¹, 王显承², 邹毅军³, 李鸿彪⁴, 王智慧⁵

(1.上海科梁信息工程股份有限公司, 上海市, 中国, 200233; 2.成都飞机设计研究所, 四川省成都市, 中国, 610091; 3.上海科梁信息工程股份有限公司, 上海市, 中国, 200233; 4.上海科梁信息工程股份有限公司, 上海市, 中国, 200233; 5.陕西航空电气有限责任公司, 陕西省西安市, 中国, 710077)

摘要: 依据三级同步发电机的数学模型, 利用 RT-LAB、MATLAB/Simulink 和 MATLAB/SimPowerSystems 提供的模型库对三级无刷同步发电机永磁机、励磁机、主发电机和功率变换器等部分进行建模, 其中各电机的参数均由有限元分析得到, 以此提高仿真精度。仿真数学模型经仿真平台 RT-LAB 实时化, 配套相应的外围调节电路与真实的发电机控制器连接, 构成了三级同步发电机硬件在环仿真系统。最后用同一个发电机调压器分别对虚拟电机和实物电机进行控制, 从电能质量的稳态特性以及动态特性等方面进行了对比试验, 结果表明该硬件在环仿真系统能够很好的反应实际发电机的运行特性, 为控制器开发与测试提供了有力的工具。

关键词: 实时仿真; 三级同步发电机; 硬件在环

中图分类号: V226

Hardware-In-Loop Simulation of Three-Stage Synchronous Generator

Liang Tong-chuan¹, Wang Xian-cheng², Zou Yi-jun³, Li Hong-biao⁴, Wang Zhi-hui⁵

(1.Shanghai Keliang Information Engineering co.,Ltd, Shanghai, China, 200233; 2.Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Sichuan, Chengdu, China, 610091; 3.Shanghai Keliang Information Engineering co.,Ltd, Shanghai, China, 200233; 4.Shanghai Keliang Information Engineering co.,Ltd, Shanghai, China, 200233; 5.AVIC Shanxi Aero Electric co.,Ltd, Shanxi, Xian, China, 710077;)

Abstract: According to the mathematical model of the three-stage synchronous generator, taking use of the model library from RT-LAB, MATLAB/Simulink and SimPowerSystems to model the three-stage brushless synchronous generator, permanent magnetic motor, excitation machine, main generator, power inverter and other parts, among all, using finite element analysis to get the parameters of all kinds of motors to improve the precision of simulation. Implementing of the real time simulation mathematical model by using RT-LAB and respectively connecting peripheral regulating circuit with real generator controller, the hardware in loop simulation system of three-stage synchronous generator is made. Carrying the comparison experiments from stability properties and dynamic properties of electrical power quality by way of controlling of the virtual generator and the real generator using generator voltage regulator, it states that the performance properties of the real generator are good reflected via the hardware in loop simulation system, which provides the powerful tool for development and testing of controllers.

Key words: Real-Time; three-stage synchronous generator; Hardware-In-Loop

1 引言

三级无刷同步发电机可以通过调节励磁, 在转速变化的情况下能较好保证输出电能质量, 广泛应用在航空、

船舶等领域^[1]。为了提高三级无刷同步发电机的控制性能和验证控制策略的合理性, 在产品开发初期会对电机及配套的控制方式进行仿真研究; 之后利用设计出来的实物控制器与电机联调进行各类工况试验来验证软硬件的可行性。然而仿真与试验存在脱节, 通常难以将仿真得到的控制参数直接应用于实物控制器。

随着计算机技术与实时仿真技术的发展, 仿真与试验得以紧密结合。应用各类建模软件建立电机本体、功率变换器主拓扑电路等被控对象的数学模型依靠多核

作者简介: 梁铜川(1988.09-), 男, 甘肃正宁, 工程师, 硕士, 电力电子; 王显承(1967.01-), 男, 重庆綦江, 高级工程师, 本科, 航空供电系统的设计研究与试验验证; 邹毅军(1975.10-), 男, 湖北武汉, 高级工程师, 硕士, 数字化测试技术; 李鸿彪(1987.01-), 男, 山西平遥, 工程师, 硕士, 电力电子与电力传动; 王智慧(1976.02-), 男, 陕西周至, 高级工程师, 硕士, 航空发电技术及电力系统稳定性研究。

CPU 强大的数据处理能力使模型能实时运行, 并通过数字量和模拟量接口将实物控制器与实时运行的模型连接, 从而可利用实物控制器控制虚拟对象, 构成硬件在环仿真系统 (HIL) [2]。硬件在环是一种新颖的工程应用形式, 其特点具有可靠性高、方便方案设计与验证、缩短开发周期、减小开发成本。本文基于 RT-LAB 实时仿真平台建立了三级无刷同步发电机、功率变换器和 I/O 接口等实时仿真模型, 并将实时仿真模型与真实的发电机调压器连接构建了三级无刷同步发电机硬件在环仿真系统。最后用同一个发电机调压器分别对虚拟电机和实物电机进行控制, 从电能质量的稳态特性以及动态特性等方面进行了对比研究。

2 三级无刷同步高压直流发电机结构

三级无刷同步高压直流发电机其结构如图 1 所示。图 2 为三级无刷同步发电机电路等效示意图, 该发电机是由主发电机、励磁机、旋转整流器、永磁副励磁机组成[3]。主发电机为凸极旋转磁极式同步电机, 转子上有阻尼绕组; 励磁机为旋转电枢式同步电机, 励磁绕组装在定子上, 电枢绕组装在转子上; 励磁机的电枢绕组通过旋转整流器和主发电机的励磁绕组相连; 副励磁机为旋转磁极式永磁发电机, 为控制电路和励磁机励磁回路供电。

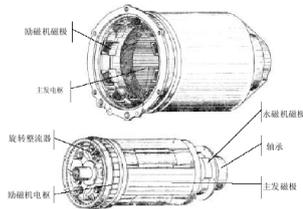


图 1 三级同步发电机结构图

Figure 1. Structure of three-stage synchronous generator

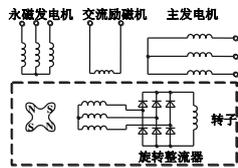


图 2 三级同步发电机电路等效图

Figure 2. Equivalent circuit of three-stage synchronous generator

3 三级无刷同步高压直流发电机数学模型

三级无刷同步高压直流发电机本体结构可分为永磁发电机 (副励磁机)、旋转电枢式同步电机 (励磁机)、旋转磁极式同步电机 (主发电机) 三个部分。建立实时仿真模型时分别对这三个部分建模, 下面介绍各自的数学模型。

3.1 永磁发电机 (副励磁机) 数学模型

电压平衡方程如下:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d - \frac{\lambda \omega_e}{L_q}$$

式中 $i, v, R, L, \omega_e, \lambda$ 为电流、电压、电阻、电感、电角速度和磁链, d, q 为 d 轴和 q 轴变量。

3.2 同步电机 (主发电机) 标么值数学模型

3.2.1 dq 坐标下电压平衡方程

电压平衡方程可表示如下[4,5]:

$$\overline{u}_d = -\overline{R}_s \overline{i}_d + \frac{1}{w_{base}} \frac{d}{dt} \overline{\psi}_d - \overline{\omega}_e \overline{\psi}_q$$

$$\overline{u}_q = -\overline{R}_s \overline{i}_q + \frac{1}{w_{base}} \frac{d}{dt} \overline{\psi}_q + \overline{\omega}_e \overline{\psi}_d$$

$$\overline{u}_f = \overline{R}_f \overline{i}_f + \frac{1}{w_{base}} \frac{d}{dt} \overline{\psi}_{fd}$$

$$\overline{u}_{kd} = \overline{R}_{kd} \overline{i}_{kd} + \frac{1}{w_{base}} \frac{d}{dt} \overline{\psi}_{kd} = 0 \quad (2)$$

$$\overline{u}_{kq1} = \overline{R}_{kq1} \overline{i}_{kq1} + \frac{1}{w_{base}} \frac{d}{dt} \overline{\psi}_{kq1} = 0$$

$$\overline{u}_{kq2} = \overline{R}_{kq2} \overline{i}_{kq2} + \frac{1}{w_{base}} \frac{d}{dt} \overline{\psi}_{kq2} = 0$$

式中, 励磁绕组、交直流轴阻尼绕组的电流和电压参数带有上标 $\bar{\cdot}$ 表示该值为折算到标么值的结果, 公式中变量与下标的定义为: $u, \psi, R, i, \omega_{base}$ 为电压、磁链、电阻、电流和角频率基值; s, f, k 为定子绕组、励磁绕组与阻尼绕组变量。励磁绕组和阻尼绕组侧的标么值是折算到定子侧的值比定子侧的基值。

3.2.2 dq 坐标下磁链平衡方程

磁链平衡方程可表示如下:

$$\overline{\psi}_d = -\overline{L}_s \overline{i}_d + \overline{L}_{md} (-\overline{i}_d + \overline{i}_f + \overline{i}_{kd})$$

$$\overline{\psi}_q = -\overline{L}_s \overline{i}_q + \overline{L}_{mq} (-\overline{i}_q + \overline{i}_{kq1} + \overline{i}_{kq2}) \quad (3)$$

$$\overline{\psi}_{fd} = \overline{L}_f \overline{i}_f + \overline{L}_{md} (-\overline{i}_d + \overline{i}_f + \overline{i}_{kd})$$

$$\overline{\psi}_{kd} = \overline{L}_{kd} \overline{i}_{kd} + \overline{L}_{md} (-\overline{i}_d + \overline{i}_f + \overline{i}_{kd})$$

$$\overline{\psi}_{kq1} = \overline{L}_{kq1} \overline{i}_{kq1} + \overline{L}_{mq} (-\overline{i}_q + \overline{i}_{kq1} + \overline{i}_{kq2})$$

$$\overline{\psi}_{kq2} = \overline{L}_{kq2} \overline{i}_{kq2} + \overline{L}_{mq} (-\overline{i}_q + \overline{i}_{kq1} + \overline{i}_{kq2})$$

式中变量与下标的定义为: l, m 为漏感与磁化电感变量。

3.3 同步电机 (励磁机) 标么值数学模型

在三级无刷同步高压直流发电机中，励磁机和主发电机都属于同步电机，电压方程和磁链方程类似，两者的区别在于励磁机没有阻尼绕组。

4 硬件在环 HIL 仿真建模

利用 RT-LAB 和 SimPowerSystems 提供的丰富的模型库，在分析三级无刷同步高压直流发电机数学模型基础上，建立三级式电机实时仿真模型。仿真系统的设计如图 3 所示，使用 MATLAB 软件建立永磁机、励磁机、主发电机以及 IO 接口模型，使其运行在实时仿真平台上；仿真器模拟量输出的电压幅值范围为-16V~16V，而永磁机和主发电机输出的电压范围远超过仿真器的输出量程，因此永磁机和主发的输出电压在模型中要按比例缩小，使其两者的电压不能超出仿真器模拟量卡的输出能力。模拟调压器接受的永磁机和主发电电压信号一个是给整个调压板供电，另一个参与 PI 调节控制输出电压，在调压器接受这两组信号之前，必须用功率放大器对其还原（同比例放大）。调压板输出的驱动信号经信号调理箱到达仿真器的数字量输入接口，控制模型中 MOSFET 管导通、关断。以此构成了三级同步发电机硬件在环仿真系统，对于负载侧相当于一套真实的发电系统。

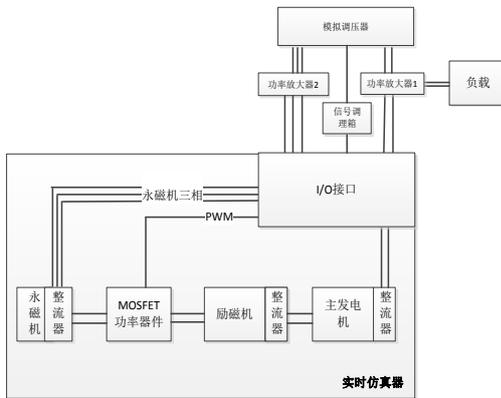


图 3 三级同步发电机硬件在环仿真设计框图

Figure 3. Hardware-in-loop simulation frame of three-stage synchronous generator

依据实时仿真器要求的建模规则，将三级式无刷同步发电机硬件在环实时仿真模型划分为四部分如图4所示，包括I/O接口配置子系统；模型状态监控子系统；实时仿真平台资源监控子系统；三级式发电机及控制子系统。

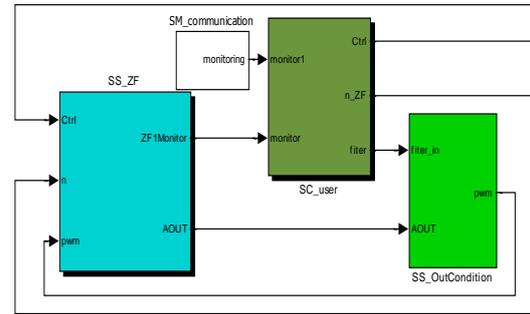


图 4 三级同步发电机硬件在环实时仿真模型

Figure 4. Hardware-in-loop real-time simulation model of three-stage synchronous generator

在此硬件在环系统中，功率放大设备选择的是德国 SPS 公司生产的四象限线性功率放大设备，其放大模式对于交流信号有两个档位，对于直流信号有三种档位，依据输出信号的幅值选择功率放大器的档位。I/O 配置子系统如图 5 所示，包括 PWM 驱动信号的采集和永磁机、主发电机输出电压按功率放大器的放大倍数同比例缩小。

三级无刷同步发电机仿真模型如图 6 所示，包括永磁机模型、励磁机模型、主发电机模型和整流器的模型等。整流器采用的是不控整流，两个主发电机相位相差 30° 相角，主发电机输出端接 12 脉冲不控整流桥，使其输出电压变为直流。

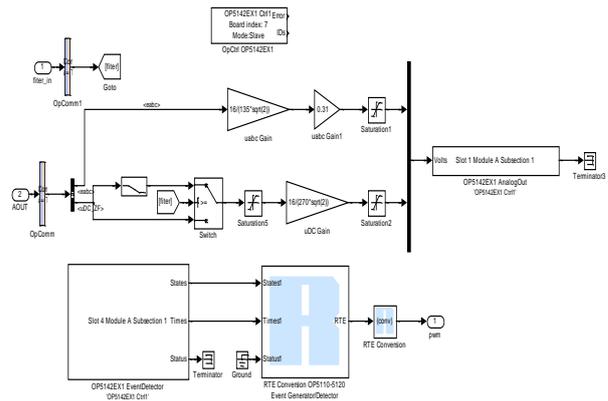


图 5 I/O 配置子系统模型

Figure 5. Model of I/O configurable subsystem

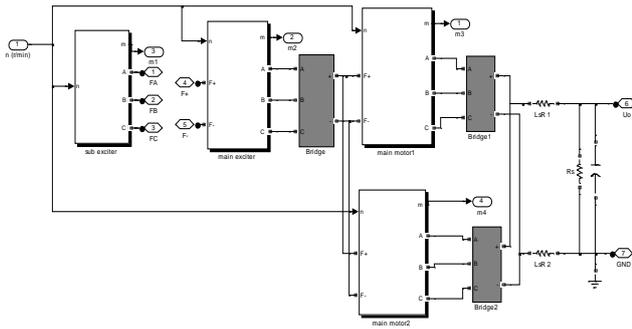


图 6 三级同步发电机模型

Figure 6. Model of three-stage synchronous generator

主发电机模型如图 7 所示,包括角度计算、 $3s/2r$ 变换、电动势计算和等效电路实现等。

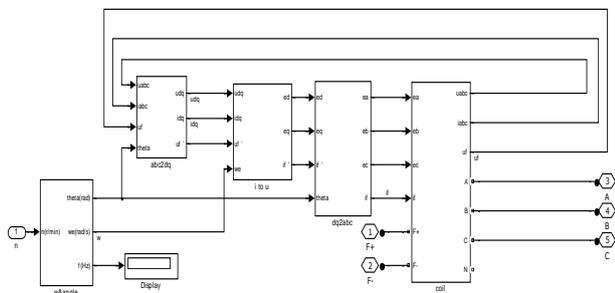


图 7 主发电机模型

Figure 7. Model of main generator

5 仿真与实验结果对比

将模拟调压板、四象限功率放大设备、信号调理箱、实时目标机以及上位机相连接构成三级无刷同步发电机硬件在环实时仿真系统如图 8 所示,图上只展示了四象限功率放大设备和仿真目标机的实体图。



图 8 三级同步发电机硬件在环实时仿真系统

Figure 8. Hardware-in-loop real-time simulation system of three-stage synchronous generator

5.1 稳态特性对比

设置三级无刷同步发电机硬件在环实时仿真模型的步长为 $20\mu s$, 首先对硬件在环仿真系统和全物理试验系统的稳态特性进行对比, 对比结果如表 1 所示。

表 1 电机稳态实验结果
Table 1. Experimental result of steady state

电机转速 (r/min)\ 负载电流 (A)	稳态电压 (全实物 \HIL)	脉动幅度 (全实物 \HIL)	畸变系数(全实 物\HIL)
13500\10	280.2\270.6	0.32\0.31	0.00051\0.00032
13500\120	280.4\270.3	0.62\0.51	0.00021\0.00012
25000\10	280.1\270.4	0.37\0.41	0.00061\0.00052
25000\120	280.6\270.3	0.62\0.68	0.00011\0.00022

稳态试验结果表明, 虚拟电机和实物电机的稳态特性都符合国军标 181A 对电源品质的要求。

5.2 动态特性对比

依据国军标 181A 对发电机动态特性进行测试, 真实发电机输出端的电压考虑到飞机上导线及各类损耗, 电压的调节点设置为 280V。

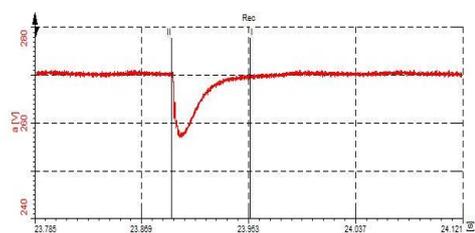


图 9 HIL 13500r/min 主发电机 10-120A 突加

Figure 9. HIL 13500r/min main generator 10-120A abrupt change of load

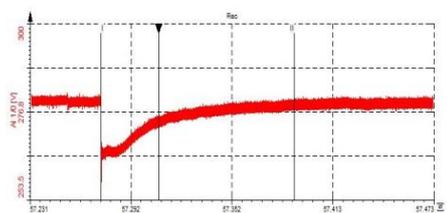


图 10 实物发电系统 13500r/min 主发电机 10-120 突加

Figure 10. Virtual generation system 13500r/min main generator 10-120A abrupt change of load

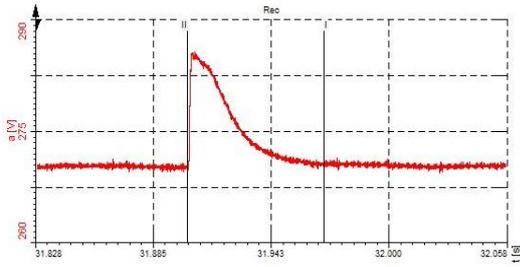


图 11 HIL 13500r/min 主发电机 120-10A 突卸

Figure 11. HIL 13500r/min main generator 120-10A abrupt change of load

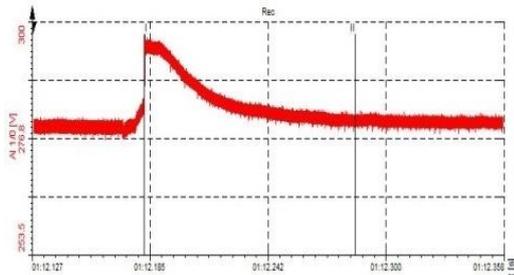


图 12 实物发电系统 13500r/min 主发电机 120-10A 突卸

Figure 12. Virtual generation system 13500r/min main generator 120-10A abrupt change of load

在硬件在环试验模型中，设置电机转速为 13500r/min，空载状态下起动机发电，发电机进入稳态之后对其进行加载、卸载试验。同样的工况对实物电机进行加载、卸载试验，得到电机输出端电压的变化过程。对比图 9、图 10，电机在 13500r/min 转速下，虚拟电机表现出电压的下降时间、超调量和动态过程时间都与真实电机一致，当负载突增时，主发电机输出电压有一个很明显的下降过程，由于调压器存在的原因，电压经过一段时间后，发电机输出端电压恢复到稳定运行状态。通过对比图 11、图 12 可见，虚拟电机和真实电机表现出来的上升时间、超调量和动态过程时间一致。

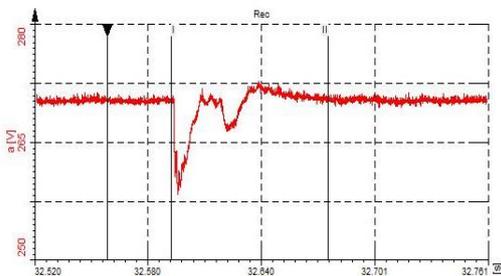


图 13 HIL 25000r/min 主发电机 10-120A 突加

Figure 13. HIL 25000r/min main generator 10-120A abrupt change of load

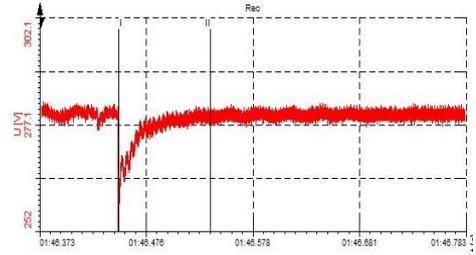


图 14 实物发电系统 25000r/min 主发电机 10-120A 突加

Figure 14. Virtual generation system 25000r/min main generator 10-120A abrupt change of load

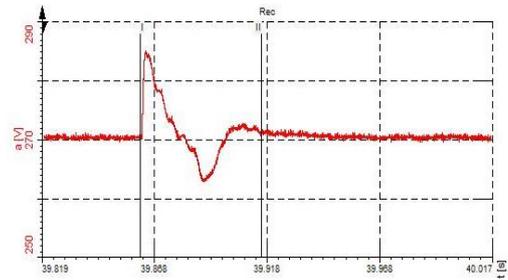


图 15 HIL 25000r/min 主发电机 120-10A 突卸

Figure 15. HIL 25000r/min main generator 120-10A abrupt change of load

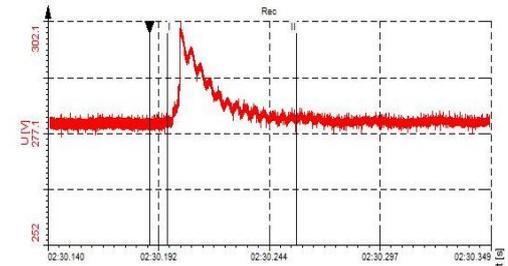


图 16 实物发电系统 25000r/min 主发电机 120-10A 突卸

Figure 16. Virtual generation system 25000r/min main generator 120-10A abrupt change of load

提高发电机的转速至 25000r/min，对发电机极限转速下动态调压特性测试。图 13、图 14、图 15、图 16 依次给出来电机在高转速状态下硬件在环和实物试验电机电压的调节过程。

6 结论

采用数学方程建立的三级同步发电机模型，经实时仿真平台 RT-LAB 实时化，配套相应的外围调节电路与真实的发电机控制器连接，构成了三级同步发电机硬件在环仿真系统。与真实电机的对比实验结果表明，虚拟电机得到的动态电压调节特性与真实电机一致，证明了所提建模方法和硬件在环仿真系统的正确性。

致谢

首先非常感谢上海科梁信息工程股份有限公司给我提供一份成长的平台，在平时的工作中，邹毅军先生和李鸿彪先生给予我很大的帮助；涉入航空领域之后，王智慧主任和王显承主任对我的工作进行了详细的指导，在此对以上领导和专家表示由衷的感谢。

References (参考文献)

- [1] Gu Chenglin, Chen Qiaofu, Xiong Yongqian. Electric machinery [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.
辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M], 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [2] Dufour, C., Dumur, G., Paquin, J. N., et al. A PC-based Hardware in the loop Simulator for the Integration Testing of Modern Train and Ship Propulsion Systems [J]. Power electronics specialists conference, 2008, 444-449.
- [3] Shen Songhua. Power Supplies for Aircrafts [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.
沈颂华. 航空航天器供电系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [4] Krause, P.C., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems 2nd Edition, Wiley-Interscience, 2002, Section 4.
- [5] Ong, Chee-Mun., Dynamic Simulation of Electric machinery using MATLAB/SIMULINK, Prentice Hall PRT, 1997, Section 7.