

航空三级式发电系统非线性建模与硬件在环实现

李添幸, 杜浩然, 刘勇智, 朱佩荣, 景博, 王龙

(空军工程大学航空工程学院, 710038, 西安)

摘要: 针对航空三级式发电系统在故障诊断与状态监控研究中进展缓慢的问题, 对系统的非线性关系和信号传递逻辑进行了研究, 建立了发电系统的非线性模型, 构建了硬件在环测试平台。首先利用电流-磁链神经网络, 拟合了电机电流-磁链的非线性关系; 其次提出变参数平均值模型的改进型, 准确预测了旋转整流器的输出电压降; 最后分析了系统的信号传递逻辑, 完成了对系统的非线性建模。结合航空三级式发电系统的非线性模型和 RT-LAB 实时仿真机完成了硬件在环测试平台的构建, 并利用 GJB 181B—2012 标准对平台进行了有效性验证和控制能力的验证。验证结果表明, 在小型单发飞机所需的发电系统输出功率为 $45\text{ kV}\cdot\text{A}$ 的条件下, 平台输出三相交流电的稳态电压为 113.0174 V 、电压不平衡度为 0.2532 V 、电压调制幅度为 2.0596 V , 满足 GJB 181B—2012 标准对供电品质的要求, 并且还可以在 $30\sim 50\text{ kV}\cdot\text{A}$ 内跟踪任意指定输出功率。该平台利用非线性建模技术、硬件在环技术打破了传统航空发电系统研究中对于实验环境的要求, 可以降低研究成本、缩短研究周期, 对于航空发电系统的控制器研究以及航空发电系统的更新换代具有加速功能。

关键词: 航空三级式发电系统; 非线性; 硬件在环

中图分类号: V242.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202411020 **文章编号:** 0253-987X(2024)11-0205-12

Nonlinear Modeling and Hardware-in-the-Loop Implementation of Three-Stage Aircraft Power Generation Systems

LI Tianxing, DU Haoran, LIU Yongzhi, ZHU Peirong, JING Bo, WANG Long

(Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To address the sluggish progress in fault diagnosis and condition monitoring of three-stage aircraft power generation systems, this paper investigates the system's nonlinear relationships and signal transmission logic by developing a nonlinear model of the power generation system and a hardware-in-the-loop test platform. Initially, a current-flux linkage neural network is utilized to model the nonlinear relationship of motor current-flux linkage. Subsequently, an improved variable parameter average value model is introduced to accurately predict the output voltage drop of the rotary rectifier. Finally, the signal transmission logic of the system is analyzed to finalize the nonlinear modeling process. The hardware-in-the-loop test platform is established by combining the nonlinear model of the three-stage aircraft power generation system with the RT-LAB real-time simulator, and its effectiveness and control capability are verified against GJB 181B—2012. The verification results show that under the requirement of a $45\text{ kV}\cdot\text{A}$ output power for small single-engine aircraft, the three-phase AC output maintains a stable voltage of

收稿日期: 2024-03-07。 作者简介: 李添幸(1990—), 男, 讲师; 刘勇智(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项

目: 陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-269)。

网络出版时间: 2024-07-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240710.1002.002>

113.017 4 V, with a voltage unbalance of 0.253 2 V and a voltage modulation amplitude of 2.059 6 V, meeting the power supply quality standard required by GJB 181B—2012. Additionally, the platform can precisely track any specified output power within the 30 to 50 kV · A range. This platform leverages nonlinear modeling technology and hardware-in-the-loop methodology to eliminate the traditional requirements for experimental environments in aircraft power generation system research. It can lower research costs, shorten project durations, and expedite research on aircraft power generation system controllers and upgrades.

Keywords: three-stage aircraft power generation system; nonlinear; hardware-in-the-loop

随着多电飞机概念的发展,电能作为飞机的一种二次能源得到更加广泛的使用^[1-3]。具有良好供电品质的电能直接影响着飞机的飞行安全。在任何使用领域,多电化都是飞机发展的必然趋势,Boeing 787、Airbus A380 和 F-35 等都是多电飞机的典型代表^[4-7]。发电系统作为飞机的电能来源,其性能直接决定了飞机的供电品质。Chen 等阐述了未来飞机电源系统的几种可能形式^[4]:

- (1) 恒频交流电源系统(115 V/400 Hz AC);
- (2) 交直流混合电源系统(115 V/360-800 Hz AC 和 270 V DC);
- (3) 高压交直流混合电源系统(230 V/360-800 Hz AC 和 ± 270 V DC);
- (4) 高压直流电源系统(± 270 V DC)。

无论是交流发电系统还是直流发电系统,线绕转子式发电机都是目前飞机发电系统的最优选择^[8]。线绕转子式发电系统不仅可以在不同电能形式的电源系统中应用,还被广泛的认为是启动发电系统的最优方案。三级式发电机是飞机线绕转子式发电机最普遍的形式^[8]。航空三级式发电系统具有无刷、自励、可调、稳定等优点^[9],可以极大地保证飞机电力系统的稳定和强生命力,结构如图 1 所示,其中 u 为电压, i 为电流,下标 a、b、c 表示电枢端绕组、f 表示励磁端绕组、pe 表示副励磁机、me 表示主励磁机、mg 表示主发电机。

由图 1 可见,三级式发电系统分为副励磁机(永磁同步发电机)、主励磁机(旋转电枢式同步发电机)、旋转整流器(三相桥式不控整流电路)、主发电机(线绕转子式发电机)和调压控制器。调压控制器由脉冲宽度调制(PWM)信号发生器和整流电路组成。航空三级式发电系统是飞机电能的主要来源,其工作状态直接决定着飞机的飞行安全和任务的达成。航空三级式发电系统是一个非线性、强耦合的复杂系统,对其的故障诊断和状态监控研究一直进展缓慢。文献[10-11]提出此系统故障频率最高、故障代价最大的

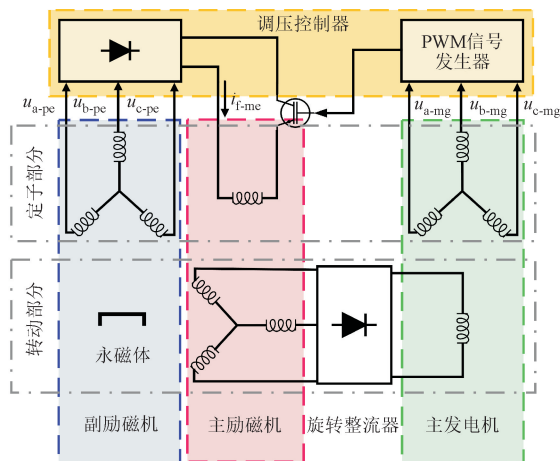


图 1 航空三级式发电系统结构图

Fig. 1 Aviation three-stage power generation system structure diagram

两种故障分别是旋转整流器故障和主发电机励磁绕组匝间短路故障。此类故障都发生在系统的转动部分上,故障的特征信号难以直接获取,并且由于系统非线性对故障的特征信号存在干扰,因此系统的故障诊断和状态监控存在困难,相关研究仅停留在部件级^[12-13],对全系统的故障诊断和状态监控研究进展缓慢。搭建航空三级式发电系统硬件在环测试平台可以促进相关研究,此平台还可以加快研究周期,降低研究成本,是研究该系统不可逆故障的方案之一。

搭建航空三级式发电系统硬件在环平台需要对此系统的非线性关系及信号传递逻辑进行研究。系统的非线性关系主要来源于电机的非线性关系和旋转整流器的非线性关系。目前,对于电机的非线性关系,主流解决办法是使用有限元分析(FEA)完成对电机非线性关系的模拟^[14-16]。但是,此方法计算代价大,会引发硬件在环测试平台中的超时问题,并且航空三级式发电系统中涉及 3 个电机的串行连接,直接使用有限元分析的手段不可取。旋转整流器为三相桥式不控整流电路,此电路中最难解决的非线性问题是由于换相延迟导致的输出电压降问题^[17]。对于此电路结构,文献[18-19]等使用固定

参数的平均值模型描述旋转整流器的工作状态,在频域分析中取得了一定成果,但未进行时域分析。Jatskevich 等提出了旋转整流器的变参数平均值模型,利用变参数准确估计了三相桥式不控整流电路的输出电压降,但此模型涉及到参数扫描问题,对于具体电路的参数扫描设置存在难度^[20-21]。同时,航空三级式发电系统中蕴含的信号传递逻辑会对硬件在环测试平台的搭建构成困难,需要对三级式起动发电系统的具体电路结构进行信号传递分析。

硬件在环技术在汽车、电网等领域已经获得了广泛的应用^[22-26],此技术具有缩短研发周期、降低研究成本等优点,并且对于不可逆故障、极端工况等问题也是最可行的研究手段。在装备成本剧增的条件下,运用此技术可以对昂贵设备开展故障诊断和状态监控研究。本文利用 RT-LAB 实时仿真机,搭建了航空三级式发电系统的硬件在环测试平台,并按照 GJB 181B—2012 标准对其进行了有效性验证,结果表明平台在验证环节表现良好,相关参数满足 GJB 181B—2012 的要求,对于航空三级式发电系统的故障诊断与状态监控研究具有重要意义。

1 航空三级式发电系统的工作原理

开关磁阻电机、感应电机等具有功率密度限制、输出转矩脉动大等问题;永磁同步电机是永磁体励磁,励磁能力不可控,具有故障条件下无法消磁的限制。因此,上述提到的几种电机在飞机起动发电一体化技术中的应用前景不如线绕转子式电机^[11]。技术成熟、结构可塑性强的三级式起动发电系统被广泛认为是发电机最可能的基本构型。其基本结构如图 1 所示,系统主要由航空三级式发电系统主体和发电控制单元(GCU)组成。

三级式发电系统的工作原理如下。飞机发动机输出转矩,带动系统转动部分旋转。副励磁机由永磁体励磁,永磁体产生励磁磁场,转轴带动永磁体旋转,磁场随着永磁体的旋转而旋转,从而切割副励磁机电枢绕组,产生三相交流电。副励磁机产生的三相交流电经过整流电路后输出直流电给主励磁机励磁绕组,主励磁机励磁绕组上产生励磁磁场。主励磁机电枢绕组位于转动部分上,由转轴带动旋转,与主励磁机励磁绕组上产生的励磁磁场发生相对运动,在主励磁机电枢绕组上产生三相交流电。主励磁机产生的三相交流电经过旋转整流器整流后,产生直流电用于主发电机的励磁。主发电机励磁绕组上产生的磁场随着励磁绕组的旋转而旋转,切割主发电机电枢绕组,在主发电机电枢绕组上产生三相交流电输出,或经过整流电路整流后输出直流电。主发电机输出电压被

调压控制器采集,经过处理后输出 PWM 控制信号,用于控制与主励磁机励磁绕组串联的开关管。通过控制主励磁机的励磁电压从而达到对系统输出电压的控制,使系统输出满足供电品质的电能。

2 航空三级式发电系统的非线性建模

搭建航空三级式发电系统的硬件在环测试平台,需要对系统的非线性关系和信号传递逻辑进行研究,建立具有高保真度、高计算效率、强解释性的非线性模型。

2.1 电机的非线性分析与建模

系统结构中涉及一个永磁同步电机和两个电励磁同步电机,电机的非线性关系直接影响着硬件在环测试平台的有效性与准确性。对于电机而言,非线性关系主要蕴含在电流和磁链的关系中,磁场饱和、空间谐波等现象都影响着电流与磁链的关系。传统的 dq 模型采用固定电感参数的形式,此形式可对电机状态进行大致的估计,但精度难以满足硬件在环测试平台的要求,也无法达到 GJB 181B—2012 的供电品质要求。

本文采用单隐层前馈神经网络直接拟合电流与磁链的关系,保持 d 轴和 q 轴的强耦合关系,相比于传统电机的 dq 模型可以更好地反应电机的非线性关系。将电流-磁链神经网络嵌入到电机的数学模型中,保持了电机的可解释性。以主励磁机为例,具体电机模型如下

$$\text{励磁绕组} \begin{cases} \psi_{f-me}(t) = \int (u_{f-me}(t) - R_{f-me} i_{f-me}(t)) dt \\ i_{f-me}(t) = f_{NN}^{-1}(\psi_{d-me}(t), \psi_{q-me}(t), \\ \psi_{f-me}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (1)$$

$$d \text{ 轴绕组} \begin{cases} u_{d-me}(t) = \frac{d}{dt} \psi_{d-me}(t) - i_{d-me}(t) R_{d-me} - \\ \psi_{q-me}(t) \omega \\ \psi_{d-me}(t) = d_{NN}(i_{d-me}(t), i_{q-me}(t), \\ i_{f-me}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (2)$$

$$q \text{ 轴绕组} \begin{cases} u_{q-me}(t) = \frac{d}{dt} \psi_{q-me}(t) - i_{q-me}(t) R_{q-me} + \\ \psi_{d-me}(t) \omega \\ \psi_{q-me}(t) = q_{NN}(i_{d-me}(t), i_{q-me}(t), \\ i_{f-me}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_f 、 ψ_f 、 i_f 和 R_f 分别表示励磁绕组的励磁电压、励磁磁链、励磁电流和励磁电阻; u_d 、 ψ_d 、 i_d 和 R_d 分

别表示 d 轴绕组的电枢电压、磁链、电流和电阻; u_q 、 ψ_q 、 i_q 和 R_q 分别表示 q 轴绕组的电枢电压、磁链、电流和电阻; θ 表示电角度; ω 表示电角速度; 下标 NN 表示单隐层前馈神经网络。

式(1)~式(3)为主励磁机的非线性模型。模型中各绕组的磁链方程采用了多输入单输出单隐层前馈神经网络的形式, 将 d 轴、 q 轴和励磁绕组的电流、磁链耦合在一起, 同时解决了电机的非线性及耦合问题。利用电机的真实参数建立电机的有限元模

型, 首先然后利用有限元分析软件中参数扫描能力, 将电机的非线性关系扫描为电流-磁链 lookup 表, 最后利用电流-磁链 lookup 表训练单隐层前馈神经网络, 得到电流-磁链神经网络。该模型比传统定电感参数的电机 dq 模型在非线性和耦合关系上具有更好的拟合能力; 比直接利用有限元分析软件进行联合仿真具有更好的计算效率; 并且由于电流-磁链神经网络的应用, 模型具有了预测未知工况的能力。副励磁机和主发电机与主励磁机的原理类似, 相关模型如下

$$d \text{ 轴绕组} \begin{cases} u_{d-pe}(t) = \frac{d}{dt}\psi_{d-pe}(t) - i_{d-pe}(t)R_{d-pe} - \psi_{q-pe}(t)\omega \\ \psi_{d-pe}(t) = d_{NN}(i_{d-pe}(t), i_{q-pe}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (4)$$

$$q \text{ 轴绕组} \begin{cases} u_{q-pe}(t) = \frac{d}{dt}\psi_{q-pe}(t) - i_{q-pe}(t)R_{q-pe} + \psi_{d-pe}(t)\omega \\ \psi_{q-pe}(t) = q_{NN}(i_{d-pe}(t), i_{q-pe}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{励磁绕组} \begin{cases} \psi_{f-mg}(t) = \int (u_{f-mg}(t) - i_{f-mg}(t)R_{f-mg})dt \\ i_{f-mg}(t) = f_{NN}^{-1}(\psi_{d-mg}(t), \psi_{q-mg}(t), \psi_{f-mg}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (6)$$

$$d \text{ 轴绕组} \begin{cases} \psi_{d-mg}(t) = \int (u_{d-mg}(t) + i_{d-mg}(t)R_{d-mg} + \psi_{q-mg}(t)\omega)dt \\ i_{d-mg}(t) = d_{NN}^{-1}(\psi_{d-mg}(t), \psi_{q-mg}(t), \psi_{f-mg}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (7)$$

$$q \text{ 轴绕组} \begin{cases} \psi_{q-mg}(t) = \int (u_{q-mg}(t) + i_{q-mg}(t)R_{q-mg} - \psi_{d-mg}(t)\omega)dt \\ i_{q-mg}(t) = q_{NN}^{-1}(\psi_{d-mg}(t), \psi_{q-mg}(t), \psi_{f-mg}(t), \theta(t)) \end{cases} \quad (8)$$

副励磁机为永磁同步发电机, 利用永磁体励磁, 没有励磁绕组的结构, 永磁体产生的励磁磁场直接作用于 d 轴和 q 轴绕组, 并在相应的绕组中产生对应的磁链。在进行参数扫描时, 永磁体对绕组产生的效果也会扫描进电流与磁链的关系中, 从而保证了电机的非线性关系。式(1)~式(8)表示了航空三级式发电系统的 3 个电机部分, 单隐层前馈神经网络只用于拟合电流与磁链的关系, 因此在保证模型高保真度和高计算效率的前提下, 模型的可解释性同样保持在高水平上。

2.2 旋转整流器的非线性分析与建模

旋转整流器在发电系统转子端, 位于主励磁机和主发电机之间, 将主励磁机输出的三相交流电整流为直流电, 供主发电机励磁。旋转整流器采用三相桥式不控整流电路的基本结构, 如图 2 所示。

旋转整流器输入端连接主励磁机电枢绕组, 输出端连接主发电机励磁绕组。由于其输入输出端电路都是感性电路, 电路存在严重的换相延迟, 输出电压存在一定程度的电压降。针对此现象, Jatskevich 等提出了变参数平均值模型^[20-21], 表示如下

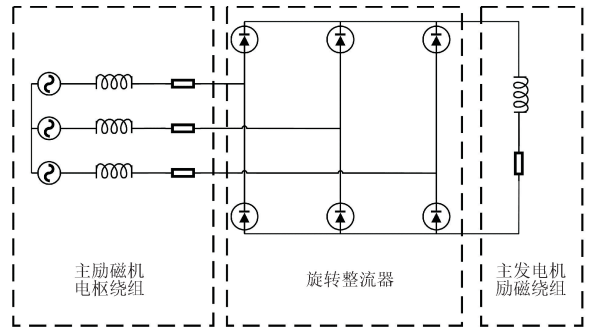


图 2 旋转整流器电路图

Fig. 2 Rotary rectifier circuit diagram

$$\text{模型主体} \begin{cases} \bar{u}_q(t) = \bar{\alpha}(t)\bar{u}_f(t)\cos(\bar{\delta}(t)) \\ \bar{u}_d(t) = \bar{\alpha}(t)\bar{u}_f(t)\sin(\bar{\delta}(t)) \\ \bar{i}_f(t) = \bar{\beta}(t)\sqrt{(\bar{i}_d(t))^2 + (\bar{i}_q(t))^2} \\ \bar{\delta}(t) = \arctan\left(\frac{\bar{u}_d(t)}{\bar{u}_q(t)}\right) = \\ \arctan\left(\frac{\bar{i}_d(t)}{\bar{i}_q(t)}\right) - \bar{\varphi}(t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{扫描参数} \quad Z = \frac{\bar{u}_f(t)}{\sqrt{(\bar{i}_d(t))^2 + (\bar{i}_q(t))^2}} \quad (10)$$

$$\text{更新参数} \left\{ \begin{aligned} \bar{\alpha}(t) &= \frac{\sqrt{(\bar{u}_d(t))^2 + (\bar{u}_q(t))^2}}{\bar{u}_f(t)} \\ \bar{\beta}(t) &= \frac{\bar{i}_f(t)}{\sqrt{(\bar{i}_d(t))^2 + (\bar{i}_q(t))^2}} \\ \bar{\varphi}(t) &= \arctan\left(\frac{\bar{i}_d(t)}{\bar{i}_q(t)}\right) - \arctan\left(\frac{\bar{u}_d(t)}{\bar{u}_q(t)}\right) \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: $\bar{u}_q(t)$ 、 $\bar{u}_d(t)$ 、 $\bar{i}_q(t)$ 和 $\bar{i}_d(t)$ 分别表示输入三相交流电在 dq 坐标系下 q 轴电压分量、 d 轴电压分量、 q 轴电流分量和 d 轴电流分量; $\bar{u}_i(t)$ 和 $\bar{i}_i(t)$ 表示三相桥式整流电路的输出电压和输出电流; Z 表示模型需要扫描的参数, 由负载性质决定; $\bar{\alpha}(t)$ 、 $\bar{\beta}(t)$ 表示三相桥式整流电路的输入输出变比; $\bar{\delta}(t)$ 表示主励磁机的功角; $\bar{\varphi}(t)$ 表示输入端电流滞后电压的角度, 由负载性质决定。

式(9)~式(11)中所有变量均利用下式在三相桥式整流电路输出电压脉动周期 T_{sw} 中取平均值

$$\bar{f} = \frac{1}{T_{\text{SW}}} \int_{t-T_{\text{SW}}}^t f(t) dt \quad (12)$$

式中: $f(t)$ 表示式(9)~式(11)中涉及的变量参数。对于输入端频率为 1 kHz 的交流电, T_{SW} 为 $1/(1\,000 \times 6)$ s。

式(9)~式(11)中建立的电路模型在 dq 坐标系下,输入端的三相交流电从 abc 坐标系投影到 dq 坐标系。变参数的平均值模型工作原理如下:先通过更改输出端负载的性质调整 Z ,同时扫描出对应的 $\bar{\alpha}(t)$ 、 $\bar{\beta}(t)$ 和 $\bar{\varphi}(t)$,建立 lookup 表;当模型运行时计算出 Z ,利用查表的方法得到对应的变比,利用变比完成对于系统状态的解算。此方法存在参数扫描的过程,负载端参数扫描任务量大,目标不明确,负载的性质严重影响着模型的结果。由此,根据旋转整流器的负载性质提出变参数平均值模型的改进型

$$\text{模型主体} \left\{ \begin{aligned} \bar{u}_i(t) &= \frac{1}{\bar{\alpha}(t)} (\bar{u}_q(t) \cos(\bar{\delta}(t)) + \bar{u}_d(t) \sin(\bar{\delta}(t))) \\ \bar{i}_q(t) &= \frac{1}{\bar{\beta}(t)} \bar{i}_i(t) \cos(\bar{\delta}(t) + \bar{\varphi}(t)) \\ \bar{i}_d(t) &= \frac{1}{\bar{\beta}(t)} \bar{i}_i(t) \sin(\bar{\delta}(t) + \bar{\varphi}(t)) \\ \bar{\delta}(t) &= \arctan\left(\frac{\bar{u}_d(t)}{\bar{u}_q(t)}\right) \\ \bar{\varphi}(t) &= \arctan\left(\frac{\bar{i}_d(t)}{\bar{i}_q(t)}\right) - \arctan\left(\frac{\bar{u}_d(t)}{\bar{u}_q(t)}\right) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\text{参数更新} \begin{cases} \bar{\alpha}(t) = \frac{\sqrt{(\bar{u}_d(t_1))^2 + (\bar{u}_q(t_1))^2}}{\bar{u}_f(t_1)} \\ \bar{\beta}(t) = \frac{\bar{i}_f(t_1)}{\sqrt{(\bar{i}_d(t_1))^2 + (\bar{i}_q(t_1))^2}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: t_1 表示系统前一状态的时间; $\bar{\alpha}(t)$ 、 $\bar{\beta}(t)$ 的初值分别为 $\pi/3\sqrt{3}$ 、 $\pi/2\sqrt{3}$ 。

式(13)、(14)在变参数平均值模型的基础上,通过引入迟滞环节避免了模型建立前的参数扫描工作。模型通过变比的初值进行启动,然后由前一时刻的状态进行变比计算,用于当前时刻系统状态的求解,从而完成对于旋转整流器的模拟。该模型既保留了变参数平均值模型准确预测输出电压降现象的优点,又避免了建模时需进行参数扫描的工作,具有高保真度和高计算效率特性。

2.3 系统的信号传递逻辑分析

如图 1 所示,航空三级式发电系统由多个部件组成,部件之间存在大量的信号传递,此系统中存在两个关键的信号传递逻辑,分别是:

(1)旋转整流器与同步发电机之间的信号传递逻辑:

(2)调压控制器与主励磁机励磁绕组之间的信号传递逻辑。

Jatskevich 等阐述了两种旋转整流器的信号传递逻辑^[20-21],如图 3 所示。

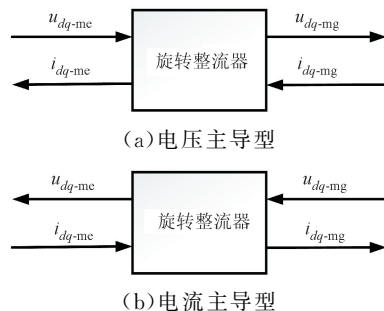


图 3 旋转整流器的信号传递逻辑

Fig. 3 Signal transfer logic of the rotary rectifier

图 3 的两种信号传递逻辑均可驱动系统运行,但由于旋转整流器前后连接的都是同步电机,还需要结合同步电机的性质对其进行深入分析。主励磁机励磁绕组产生励磁磁场,励磁磁场与电枢绕组发生相对运动,在电枢绕组中产生感应电动势;感应电动势再结合负载的具体形式,得到电枢电流;电枢电流又会产生电枢磁场,从而影响励磁磁场,形成电枢反应。根据电枢反应原理,旋转整流器接受主励磁机的信号为电压信号,反馈给主励磁机的信号为电流信号。因此,旋转整流器的信号传递逻辑采用图 3(a)的形式。

调压控制器是航空三级式发电系统高供电品质的有效保证。系统的电压调节主要是通过调压控制器采集主发电机的输出电压,取有效值三相平均后和参考值进行比较,得到 PWM 控制信号,从而控制主

励磁机的励磁完成对系统输出的调节。调压控制器与主励磁机的连接电路如图 4 所示,其中 u_{dc} 、 i_{dc} 分别表示 PWM 信号控制的开关管前端电路的电压和电流。图 4 所示的电路位于系统副励磁机和主励磁机之间,从中可以看出,调压控制器通过控制与主励磁机励磁绕组串联的开关管,从而控制绕组上的励磁电压,完成对系统的控制。主励磁机励磁绕组反并联续流二极管,保证了励磁绕组上电流连续变化,避免了电流突增突降对电机绕组的冲击,起保护作用。

由于开关管和续流二极管的存在,整流电路输出电压和输出电流与主励磁机励磁绕组输入电压和输入电流不一致,需要对此进行信号传递逻辑分析。结合 PWM 控制信号,建立了如图 5(a)所示的信号传递逻辑。图 5(a)中利用两个 PWM 调压控制信号控制开关,完成了对连接电路电压通道和电流通道信号的模拟,图 5(a)中所示的连接逻辑可以解决开关管前后电压、电流信号不一致的问题,符合实际信号的传递逻辑。

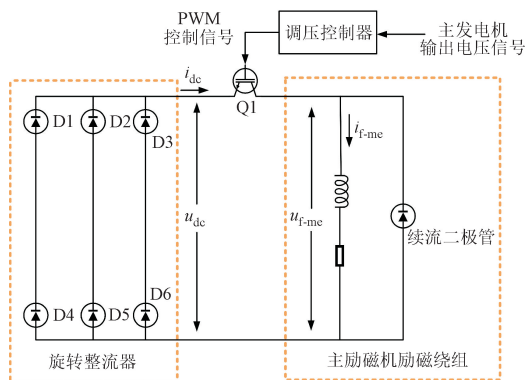
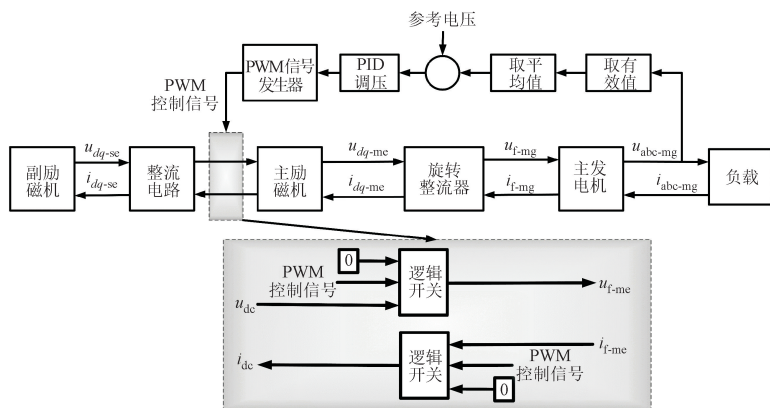


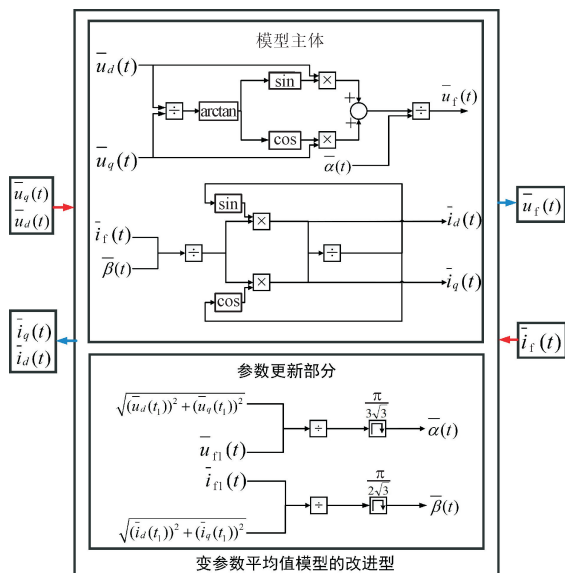
图 4 调压控制器与主励磁机励磁绕组之间的连接电路

Fig. 4 Connecting circuit between voltage regulator and main exciter field winding

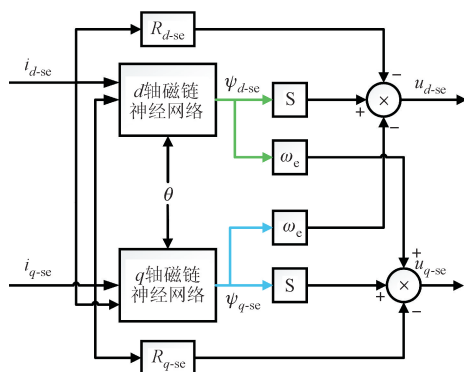
根据系统的非线性关系及信号传递逻辑分析,可以得出全系统的非线性模型,为建立航空三级式发电系统的硬件在环测试平台奠定基础。系统及主要部件的非线性模型如图 5 所示,其中 S 表示微分运算,1/S 表示积分运算。



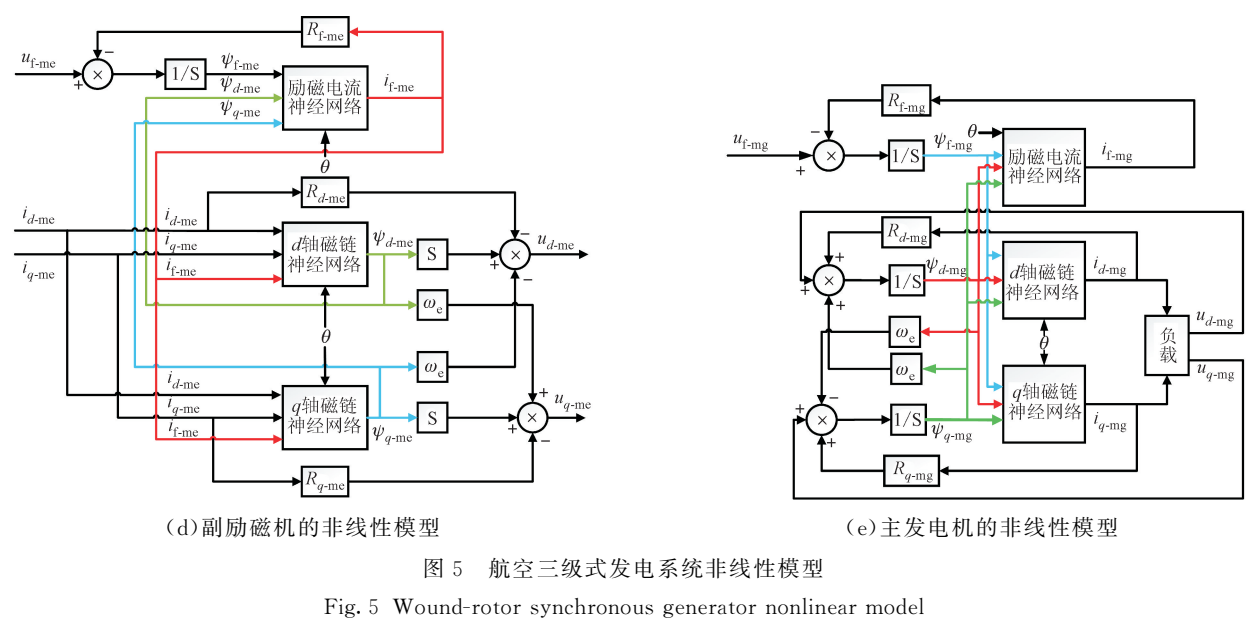
(a) 全系统信号传递逻辑



(b) 旋转整流器的非线性模型



(c) 主励磁机的非线性模型



3 航空三级式发电系统硬件在环实现

3.1 平台构建

运用硬件在环技术可以解决当前产品研发费用高、周期长等问题,同时硬件在环技术还是研究不可逆、不可控故障最有效最可行的办法。对于飞机航空三级式发电系统而言,系统的故障诊断和状态监控直接决定着飞机的工作状态。旋转整流器和主发电机励磁绕组作为系统故障率最高、故障代价最大的两个部件,由于两者的位置位于发动机带动的转轴上,与其状态相关的电参数无法直接测量。使用其他位置的电参数又会受到信号传递过程中非线性因素的影响,能够反应上述两者的状态信息被模糊。因此,系统的状态监控和故障诊断研究一直进展缓慢。利用数字孪生、智能算法等技术,搭建航空三级式发电系统的硬件在环测试平台,对飞机发电系统的状态监控和故障诊断展开研究,更有利于研究系统的故障机理。在系统层面进行研究还可以分析故障的传递和耦合机理,将航空三级式发电系统的故障诊断和状态监控研究置于系统级别展开分析。

本文选用 RT-LAB 实时数字仿真平台搭建系统的硬件在环测试平台。RT-LAB 实时数字仿真平台是一种用于动力和电气工程领域的科学仪器,可以与 MATLAB/Simulink 无缝集成,实现 Simulink 模型与真实环境的实时交互。平台构建流程如图 6 所示。

图 6 表示了飞机发电系统硬件在环测试平台的构建流程,共分 3 部分。第 1 部分,利用 ANSYS Electronics Desktop 软件,对飞机发电系统的电机部分进行有限元建模,利用软件的参数扫描功能提

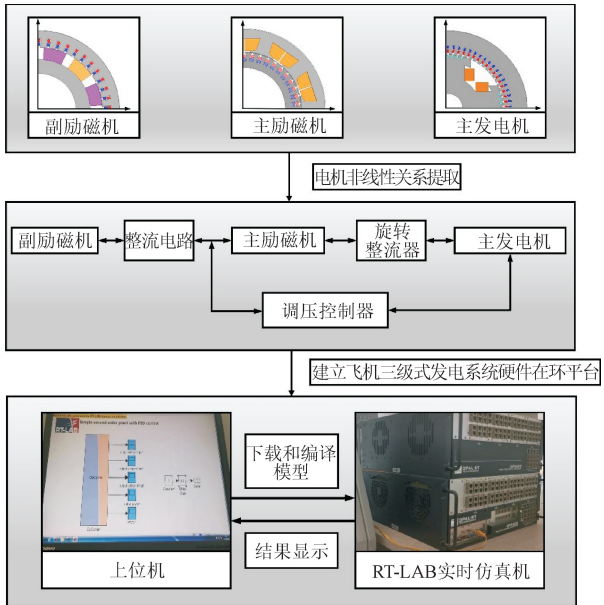


图 6 硬件在环平台构建流程

Fig. 6 Hardware-in-the-loop platform building process

取各电机电流-磁链的非线性关系。第 2 部分,利用 2.1 节提出的方法,用电流-磁链非线性关系数据训练单隐层前馈神经网络,再将神经网络嵌入到电机的数学模型中,得到电机的非线性模型。分析飞机发电系统各子系统之间的信号传递逻辑,而后在 MATLAB/Simulink 软件中搭建飞机发电系统全模型。第 3 部分,根据 RT-LAB 实时仿真机的编译规则,对飞机发电系统模型进行改造,模型包括副励磁机、整流电路、主励磁机、旋转整流器、主发电机、发电机控制器以及调参与结果显示部分。调参与结果显示部分位于上位机中,其余 6 部分编译到 RT-

LAB 实时仿真机中运行,为避免出现超时现象,编译到 RT-LAB 中的每个部分分别调用仿真机的一个核进行解算。各部分之间利用 Opcomm 模块进行信息传递。硬件在环平台的仿真解算步长设置为 0.05 ms,时长设置为手动停止。硬件在环平台构建完成后结合 GJB 181B—2012 标准对其进行检验。

3.2 有效性和控制能力验证

本文利用系统的真实参数建立了非线性模型,利用有限元分析结合电流-磁链神经网络的方法,解决了电机中的非线性关系,利用变参数平均值模型的改进型,解决了旋转整流器输出电压降问题,并将模型运用于硬件在环测试平台中,最后利用 GJB 181B—2012 标准对平台的有效性及其控制能力进行了验证。

(1) 有效性验证。将硬件在环测试平台设置到主发电机输出功率为 45 kW 的状态,首先进行旋转整流器的非线性模型有效性验证。利用有限元软件 ANSYS Electronics Desktop 构建发电系统中 3 个电机的电磁模型,在 Simplorer 软件环境中用电力电子元器件搭建发电系统的整流电路以及调压控制器,并调用 3 个电机的电磁模型进行联合仿真。采集旋转整流器的输出电压,所得结果与本文提出的变参数模型的改进型结果进行比较,结果如图 7 所示。

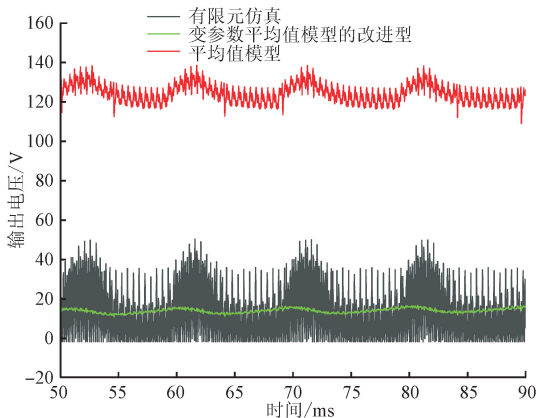


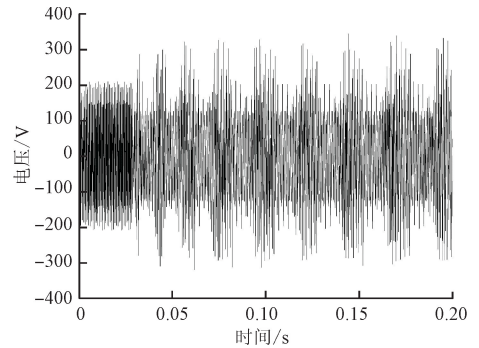
图 7 旋转整流器各模型的输出电压比较

Fig. 7 Comparison diagram of output voltage of each model of rotary rectifier

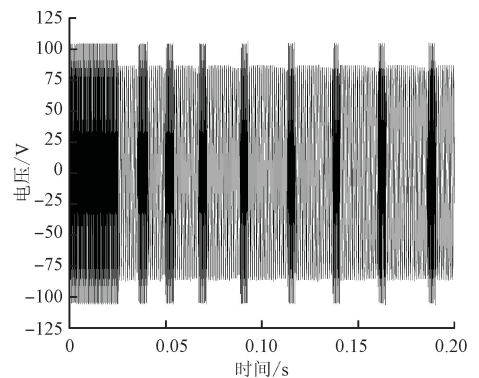
图 7 中变参数平均值模型的改进型输出电压平均值为 12.603 13 V, 联合仿真中的有效值为 12.593 03 V, 而理想换相的输出电压平均值为 124.150 97 V。旋转整流器前后级电路都是电机绕组,输入输出电路呈现强烈感性,换相延迟现象的程度很高,理想换相的固定参数平均值模型无法对其

电压降落的程度进行有效预测,而本文提出的变参数平均值模型的改进型在式(12)提到的脉动周期中可以有效预测电压降落现象。

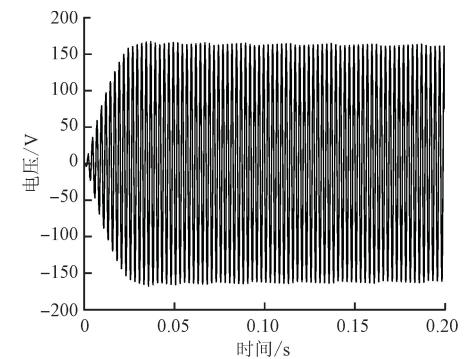
利用平台的可观测性对每一级电机进行输出电压监控,并结合 PWM 控制信号进行分析,相关结果如图 8 所示。



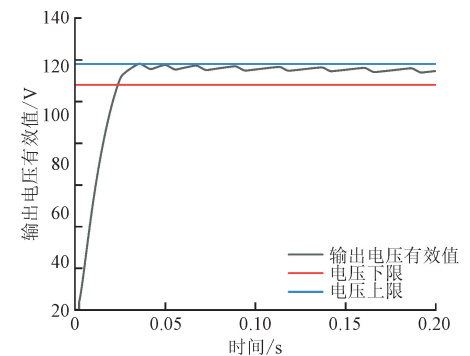
(a) 副励磁机输出电压波形



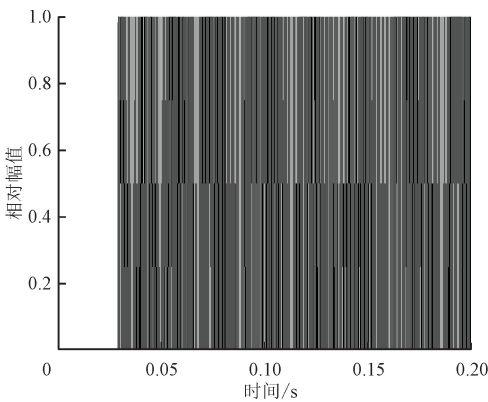
(b) 主励磁机输出电压波形



(c) 主发电机输出电压波形



(d) 主发电机输出电压有效值



(e)PWM 调压控制信号

图 8 系统输出功率为 45 kW 时各部分的输出波形
Fig. 8 Output waveform of each part of the system when the system output power is 45 kW

从图 8 可以看出,为了保证系统输出电压在 108~118 V 之间,调压控制器在 0.029 3 s 开始工作,调压控制器利用 PWM 控制信号控制主励磁机

励磁绕组通断。当主励磁机励磁绕组接通时,副励磁机电枢绕组中形成完整回路存在电流流过。由于副励磁机电枢绕组通过整流电路后连接主励磁机励磁绕组,呈感性,副励磁机中的电枢反应为消磁反应,副励磁机输出电压降低。当主励磁机励磁绕组断开时,电枢反应消失,副励磁机输出电压回升,在系统调压后出现图 8(a)中有规律、往复的电压波动。同样受 PWM 控制信号的影响,主励磁机励磁绕组的励磁电压在电路接通时上升,电路断开时下降,影响着励磁绕组上的励磁电流,使主励磁机输送给主发电机的励磁电压可以保证最终系统的输出电压满足要求。调压控制器将主发电机的输出电压控制在 108~118 V 的规定范围之内,如图 8(c)、8(d)所示。按照 GJB 181B—2012 标准,对系统在转速为 12 000 r/min、输出功率为 45 kW 的状态进行检验。根据检验要求取系统稳定工作状态 1~2 s 的输出电压进行供电品质检验,结果如表 1 所示。

表 1 根据 GJB 181B—2012 的硬件在环测试平台输出检验

Table 1 Hardware-in-the-loop test platform output inspection based on GJB 181B—2012

状态	参数	标准范围	平台输出值
稳态特性	稳态电压/V	相电压有效值的平均值应在 108.0~118.0 V	113.017 4
	电压不平衡/V	各相电压均方根值的最大差值应小于 3.0 V	0.253 2
	电压调制幅度/V	稳态电压最大值与最小值的差值应小于 2.5 V	2.059 6
	畸变系数	交流畸变与基波分量方均根值之比应小于 0.05	0.013 5
	波峰系数	每半波交流电压峰值与均方根之比的绝对值应在 1.31~1.51	1.397 9~1.416 7
	直流分量/V	交流整周波瞬时电压的平均值应在 0.10~-0.10 V	0.000 229 1
	稳态频率/Hz	频率的平均值应在 393~407 Hz	400
瞬态特性	峰值电压/V	每半波瞬时电压的最大值应在±271.8 V	-161.263 9

系统输出的三相交流电在稳态特性和瞬态特性方面都满足 GJB 181B—2012 标准,平台输出的交流电也符合标准,可以利用该平台对飞机的发电系统进行故障诊断和状态监控研究。

(2)调压能力验证。为深入探究验证系统的调压控制能力,对系统进行输出功率为 30~50 kW 的指定功率跟踪实验。调节主发电机后接负载,使系统的输出功率在 30~50 kW 间变化,相关结果如图 9 所示。

从图 9(a)、图 9(b)中看出,系统可以完成对指定输出功率的跟踪,在 30~50 kW 之间的任意指定输出功率都可以被系统跟踪。输出功率在指定功率附近以 1 kW 的幅度波动,输出功率波动幅度占总输出功率值不足 3.4%,并且可以通过调整调压控

制器中的相关参数将波动幅值进一步减小,提升系统的性能。图 9(c)、图 9(d)显示了主发电机的输出电流波形,该波形与输出功率波形一致,在输出电压稳定的前提下,系统通过调整输出电流来对指定功率进行跟踪。图 9(e)、9(f)和图 9(g)中显示了主发电机的输出电压波形和输出电压有效值,在系统跟踪指定输出功率时,输出电压存在波动,但输出电压有效值一直保持在 GJB 181B—2012 标准要求的范围之内。图 9 表示了系统具有很高的输出功率跟踪能力,指定功率在 30~50 kW 范围内变化的条件下,系统不仅可以输出电压稳定在标准范围内,还可以完成对指定功率的跟踪,具有满足要求的调压控制能力。这说明可以利用此平台进行航空三级式发电系统的故障诊断和状态监控研究。

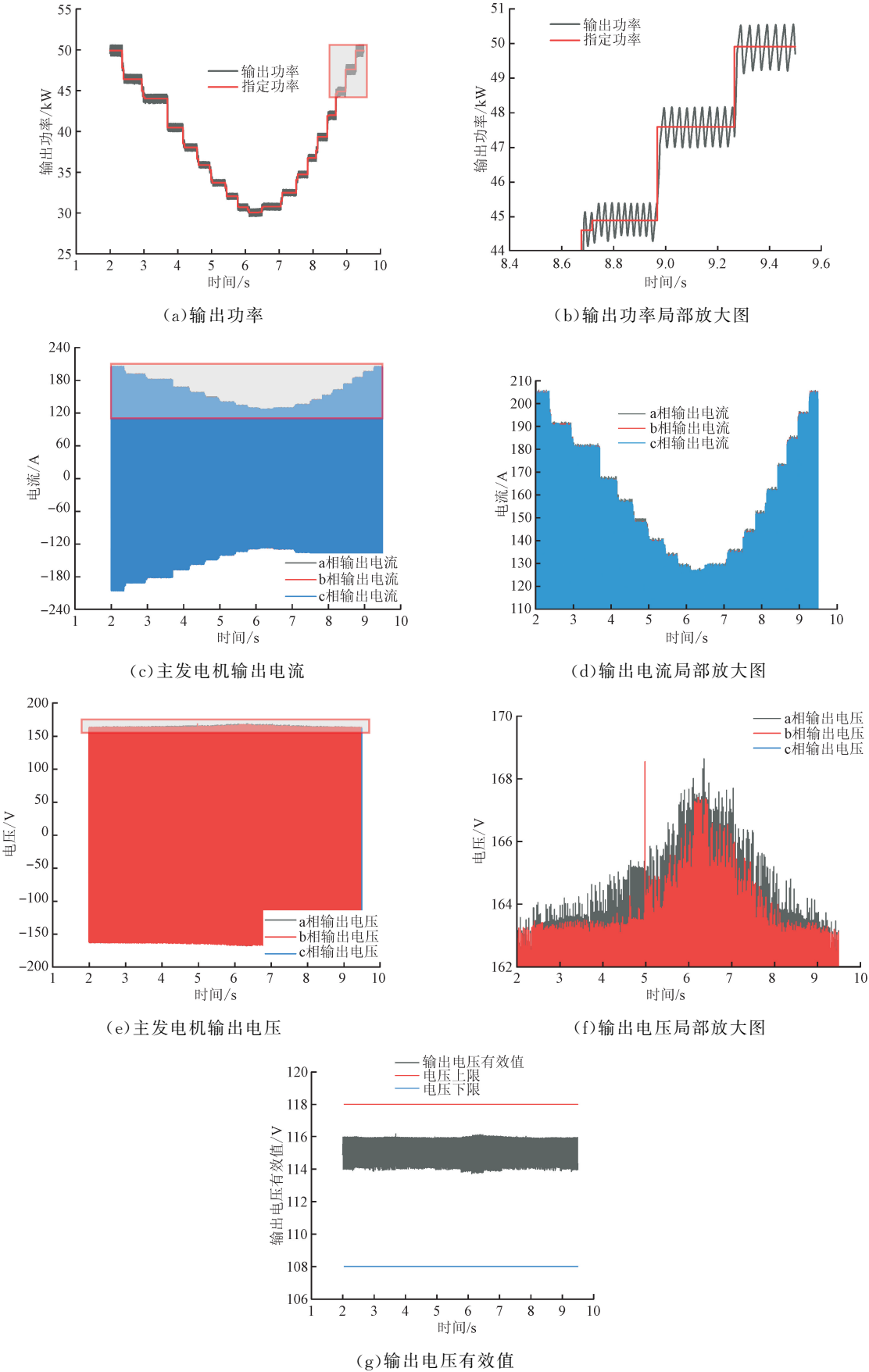


图 9 系统调压控制能力验证

Fig. 9 Verification of system voltage regulation control capability

4 结束语

航空三级式发电系统的故障诊断和状态监控研究有利于增强飞机电力系统的稳定性,提高飞机电力系统的生命力。面对航空三级式发电系统故障诊断和状态监控研究中的传统难点,旋转整流器故障和主发电机匝间短路故障无法利用传统手段获得相关故障信号,可以建立硬件在环测试平台对其进行研究。本文分析了系统的非线性关系和信号传递逻辑,利用电流-磁链神经网络解决了电机的线性关系,提出了变参数平均值模型的改进型,解决了旋转整流器输出电压降问题,并结合调压控制器分析了全系统的信号传递逻辑,构建了航空三级式发电系统的非线性模型。在此基础上,搭建了航空三级式发电系统的硬件在环测试平台,利用 GJB 181B—2012 标准对平台进行了供电品质检验,平台输出满足要求。本文所搭建的平台在有效性与控制能力方面均表现良好,可用于航空三级式发电系统的故障诊断和状态监控研究,加快了飞机智慧电网的形成。

参考文献:

- [1] BUTICCHI G, WHEELER P, BOROYEVICH D. The more-electric aircraft and beyond [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(4): 356-370.
- [2] SAYED E, ABDALMAGID M, PIETRINI G, et al. Review of electric machines in more-/hybrid-/turbo-electric aircraft [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2976-3005.
- [3] 张卓然, 许彦武, 姚一鸣, 等. 多电飞机电力系统及其关键技术 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(5): 969-984.
ZHANG Zhuoran, XU Yanwu, YAO Yiming, et al. Electric power system and key technologies of more electric aircraft [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(5): 969-984.
- [4] CHEN Jiawei, WANG Chengjun, CHEN Jie. Investigation on the selection of electric power system architecture for future more electric aircraft [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(2): 563-576.
- [5] CANO T C, CASTRO I, RODRÍGUEZ A, et al. Future of electrical aircraft energy power systems: an architecture review [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1915-1929.
- [6] ROBBINS D, BOBALIK J, DE STENA D, et al. F-35 subsystems design, development, and verification [M]//HAMSTRA J W. *The F-35 lightning II: from concept to cockpit*. Reston, VA, USA: AIAA, 2018: 365-398.
- [7] MARÉ J C, FU Jian. Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(3): 857-870.
- [8] WANG Yinli, NUZZO S, ZHANG He, et al. Challenges and opportunities for wound field synchronous generators in future more electric aircraft [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2020, 6(4): 1466-1477.
- [9] 刘勇智, 吕永健, 范冰洁, 等. 航空电机学 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2020: 172-175.
- [10] BATZEL T D, SWANSON D C. Prognostic health management of aircraft power generators [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 473-482.
- [11] JIAO Ningfei, LI Zijie, MAO Shuai, et al. Aircraft brushless wound-rotor synchronous starter-generator: a technology review [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(6): 7558-7574.
- [12] JIAO Ningfei, HAN Xu, WEI Zhihuang, et al. Online fault diagnosis for rotating rectifier in wound-rotor synchronous starter-generator based on geometric features of current trajectory [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(4): 2952-2963.
- [13] SUN Chenghao, LIU Weiguo, HAN Xu, et al. Fault diagnosis of a rotating rectifier in a wound-rotor synchronous starter/generator in the generation mode [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2022, 8(4): 4569-4582.
- [14] LEE J H, KWON Y C, SUL S K. High-fidelity induction motor simulation model based on finite element analysis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(10): 9872-9883.
- [15] SAYED A, ALIPRANTIS D, GE Hao, et al. Coupled finite element and extended-QD circuit induction machine model: part I formulation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(3): 2556-2564.
- [16] SAYED A, ALIPRANTIS D, GE Hao, et al. Coupled finite element and extended-QD circuit induction machine model: part II implementation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(3): 2565-2573.
- [17] SUDHOFF S D, WASYNCZUK O. Analysis and average-value modeling of line-commutated converter-synchronous machine systems [J]. *IEEE Transactions*

- on Energy Conversion, 1993, 8(1): 92-99.
- [18] WANG Shuang, RUAN Xinbo, HE Yuying, et al. Small-signal impedance modeling and analysis of variable-frequency AC three-stage generator for more electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 206-216.
- [19] AREERAK K N, WU T, BOZHKO S V, et al. Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4): 2574-2589.
- [20] JATSKEVICH J, PEKAREK S D, DAVOUDI A. Parametric average-value model of synchronous machine-rectifier systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 9-18.
- [21] JATSKEVICH J, PEKAREK S D, DAVOUDI A. Fast procedure for constructing an accurate dynamic average-value model of synchronous machine-rectifier systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 435-441.
- [22] GIACOMUZZI S, DE CARNE G, PUGLIESE S, et al. Synchronization of low voltage grids fed by smart and conventional transformers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2941-2951.
- [23] SPARN B, KRISHNAMURTHY D, PRATT A, et al. Hardware-in-the-loop (HIL) simulations for smart grid impact studies [C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 8586357.
- [24] 邵玉龙. 电动汽车 BMS 关键技术研究及硬件在环测试系统构建 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [25] 王喆. 电传动履带车辆机电联合制动控制策略与试验技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [26] 宋世欣. 分布式驱动电动汽车控制策略及硬件在环实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 204 页)

- MA Yuan, SUN Jingyang, LI Yanzhong, et al. Experimental study on the effects of pressurization rate on bubble point pressure of porous metallic screens [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(11): 192-198.
- [24] LI Jian, MA Yuan, LI Yanzhong, et al. The impact of vapor blockage on the outflow rate of screen channel liquid acquisition devices [J]. Micromachines, 2022, 13(2): 322.
- [25] LI Jian, LI Yanzhong, MA Yuan, et al. Performance analysis and improved design of screen channel liquid acquisition device for hydrogen [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(56): 23856-23870.
- [26] DARR S R. Hydrodynamic model of screen channel liquid acquisition devices for in-space cryogenic propellant management [D]. Gainesville, USA: University of Florida, 2016.
- [27] DARR S, HARTWIG J. Optimal liquid acquisition device screen weave for a liquid hydrogen fuel depot [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(9): 4356-4366.
- [28] HARTWIG J W, MANNJ A Jr. A predictive bubble point pressure model for porous liquid acquisition device screens [J]. Journal of Porous Media, 2014, 17(7): 587-600.

(编辑 杜秀杰)