

电磁场路耦合仿真技术原理及其在飞机供电系统中的应用

王显承*, 韩笑康

成都飞机设计研究所, 四川 成都 610041

摘 要: 飞机供电系统中涉及大量的电机及其控制系统, 随着多电、全电飞机技术的应用与发展, 对电机与控制器系统进行场路耦合的精确分析成为飞机供电系统设计、分析、优化的一个重要环节。本文针对目前常用的场路耦合算法的原理进行了比较分析, 对其收敛性能进行了仿真验证。仿真结果表明, 基于多回路场路耦合的联合仿真算法具有良好的数值收敛性, 适合于多有限元模型耦合的发电系统仿真。

关键词: 供电系统; 航空电源; 三级无刷交流发电机; 场路耦合; 联合仿真

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 11-0001-06

电机是飞机供电系统的重要设备, 随着多电、全电技术的发展, 在飞机供电系统中, 各类电机应用越来越广泛, 发电机电源功率也越来越大。为在设计、分析及优化过程中, 能对供电系统的性能和响应进行精确评估, 通常采用场路耦合联合仿真技术, 将电机有限元模型集成到供电系统仿真模型中进行综合仿真, 这种分析方法目前在很多场合已得到广泛应用^[1,2]。

目前, 通用的系统场路耦合仿真技术主要有诺顿法、戴维南法和多回路法等。在诺顿法中, 将有限元模型等效为恒流源模型集成到系统仿真模型中^[3,4]。在戴维南法中, 有限元模型被等效成等效阻抗与内电势模型^[5-7]。而在多回路法中, 电机被等效为一个无源集中阻抗参数模型^[8]。

由于涉及大量数值耦合运算, 联合仿真技术在多有限元模型耦合应用中通常易导致数值计算的误差, 甚至仿真结果的不收敛。本文首先对 3 种典型的联合仿真算法进行了理论分析, 并根据各种算法的特点, 结合飞机供电系统涉及多有限元模型的需求, 最终采用了基于多回路法的场路耦合联合仿真技术对发电系统进行仿真。

1 场路耦合联合仿真技术原理

目前, 电磁场有限元技术在电机等磁性非线性器件的

仿真中得到广泛应用。其基本思想是将连续的求解区域离散为一组求解单元, 在每个单元内对电磁场问题进行近似求解。假设 Ω 为二维电磁场求解域, Γ_1 为第一类边界, Γ_2 为第二类边界, 则该二维时变电磁场的定解问题可描述为:

$$\begin{cases} \nabla \times (\nu \nabla \times A_z) + \sigma \partial A_z / \partial t = J_z & (\Omega) \\ A_z = A_0 & (\Gamma_1) \\ \nu \partial A_z / \partial n = H_t & (\Gamma_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_z 为矢量磁位, J_z 为电流密度, H_t 为磁场强度切向分量, ν 为磁阻率。由式 (1) 可以得到其对应的等价条件的变分问题:

$$\begin{cases} F(A_z) = \min \\ A_z|_{\Gamma_1} = A_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $F(A_z)$ 为:

$$F(A_z) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\nu \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \nu \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy + \frac{1}{2} \sigma \iint_{\Omega} A_z \frac{\partial A_z}{\partial t} dx dy - \iint_{\Omega} A_z J_z dx dy - \int_{\Gamma_2} A_z H_t d\Gamma \quad (3)$$

在二维平面求解域中, 可采用三角形单元离散求解区域, 然后利用剖分插值, 离散化变分问题为普通多元函数的极值问题, 可以得到其方程组:

$$[K][A_z] + [M]p[A_z] = [P][i] \quad (4)$$

投稿日期: 2016-05-04; 退修日期: 2016-05-23; 录用日期: 2016-08-25

* 通讯作者. Tel.: 028-65020632 E-mail: wangxc6@sina.com

引用格式: WANG Xiancheng, HAN Xiaokang. Electromagnetic coupling co-simulation schemes and its application on aircraft electric power source [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (11): 01-06. 王显承, 韩笑康. 电磁场路耦合仿真技术原理及其在飞机供电系统中的应用 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (11): 01-06.

式中: K, M, P 均为有限元系数矩阵。求解式 (4) 即可得到磁位 A 的离散解 $[A_e]$ 。当采用电动机惯例时, 电机内的电路相电压方程为:

$$u(t) = R_s i(t) + L_{\sigma} \frac{di(t)}{dt} + p\psi(t) \quad (5)$$

式中: L_{σ} 为漏感由于电机各相通常外接各类电路元件, 包含线性与非线性器件, 其各回路可统一表示为:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + p\psi(t) + \gamma(i) \quad (6)$$

式中: r 为功率器件非线性压降。综合式 (4)、式 (6) 可以进行场路耦合求解, 对系统性能进行精确评估。在求解过程中, 一般可采用欧拉算法或者辛普森算法对方程进行时域离散化, 并采用牛顿-拉斐森算法迭代求解非线性方程。

图 1 为场路耦合算法求解流程图。在任意一个瞬态求解时刻, 在电路求解方程中, 首先构造电路方程, 包括有限元的等效电路模型, 并调用节点电压法进行方程求解。求解得到有限元等效模型的端电压或者电流激励参数后, 返回到有限元模型中, 作为有限元模型的外部激励参数, 同时, 在电路求解器中获得的电机位置信息返回到有限元模型中进行网格划分, 调用有限元求解器求解相应状态下的响应, 获取有限元等效模型的电压、电流或者电磁参数, 作为下一步电机等效模型的初始参数。

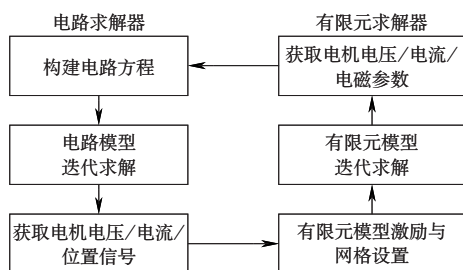


图 1 场路耦合求解算法

Fig.1 Flow chart of electromagnetic coupling scheme

由于电机的电压、电流或者电磁参数是通过有限元模型实时迭代计算获取, 因此, 通过场路耦合仿真计算, 可以对材料饱和、电机空间谐波因素等进行有效分析, 从而实现对发电系统性能的精确评估。

2 联合仿真算法比较

目前, 在系统仿真软件中, 普遍采用的方法主要有诺顿法、戴维南法以及多回路法。这些方法均将电磁有限元模型等效为一个参数实时变化的集中电路模型, 其中, 电磁参数均采用有限元法进行提取。在诺顿法中, 将有限元模型等效成受控电流源模式集成到电路仿真器中, 这种方法较为普遍, 大部分商用联合仿真软件均采用该方法。在戴维南

法中, 将电机模型等效为受控电压源与集中参数模型, 该方法在 Simplorer 与 Maxwell 联合仿真中得到应用。而在多回路法中, 电机模型采用电阻、电感和永磁磁链模型进行等效, 该方法目前在 EasiMotor 与 Portunus 的联合仿真中得到应用。

2.1 诺顿法联合仿真

诺顿法场路耦合联合仿真算法的原理是电机模型在有限元模型中建立, 通过接口集成到电路仿真求解器中。系统仿真软件与有限元之间在一个步长延时情况下交换电压、电流、转矩和位置信号。图 2 为诺顿法耦合分析原理示意图, 其中, 系统模型与有限元模型分别独立进行求解。在系统模型求解中, 包含了电机的诺顿等效电路以及机械运动等效模型。

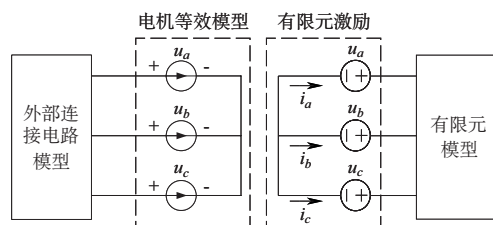


图 2 诺顿法场路耦合示意图

Fig.2 Norton's theorem coupling diagram

一般情况下, 该方法适用于对单一电动机与控制器的联合仿真, 可以应用于成品厂进行电作动器、伺服控制等情况的电机电磁设计分析需求。对于目前较为常见的三级无刷航空电源, 其系统通常包括永磁电机、励磁机和主发电机, 其中, 励磁机三相绕组输出在整流后一般与主发电机的励磁绕组直接相连, 如图 3 所示。当励磁机与主发电机均采用有限元模型对电源性能进行精确评估时, 诺顿法联合仿真可能会导致数值计算不收敛。这是由于励磁机与主发电机的模型均独立采用有限元进行计算, 其中各绕组的电流值反馈

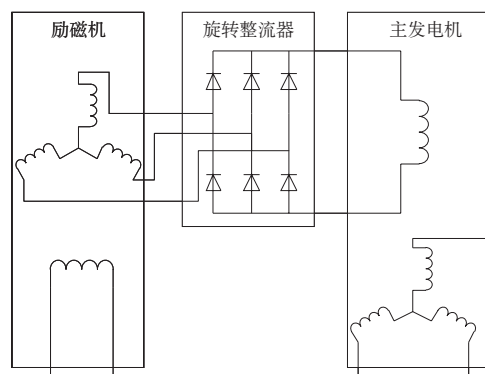


图 3 三级无刷航空电源原理图

Fig.3 Schematic of three stage generator system

到系统仿真模型中,作为恒流源参数进行电路计算。因为数值计算存在计算误差,作为旋转整流桥的输入和输出,励磁机电枢绕组中的电流与主发电机励磁绕组中的电流,通常无法保证计算结果的严格一致,这将导致整流桥二极管器件输入输出电流不守恒,从而引起数值计算的不收敛。

这种情况一般存在多有限元耦合仿真中,鉴于这种情况,不建议采用诺顿法进行耦合分析。受条件限制,当必须采用该方法时,可以考虑在电机等效模型中,并联阻值较大的旁路电阻,以防止计算发散,但是并联的虚拟电阻需要确保计算误差在可接受范围内。另外,在采用诺顿法对系统中的发电机进行联合仿真时,可能引起外部电路中的非线性器件(如二极管)的误导通,从而造成电压、电流波形在换向过程中的振荡不收敛。图4为某永磁同步发电机联合仿真模型及其输出电压波形,由于非线性二极管器件开关状态受有限元等效模型中受控电流源数值的控制,在换向过程中,若换向电流的数值计算结果大于二极管的反向截止电流,即可能出现数值计算错误导致电压、电流波形震荡不收敛情况,如图4(b)所示,图中虚线为数值计算收敛结果,实线为采用诺顿法不收敛结果。

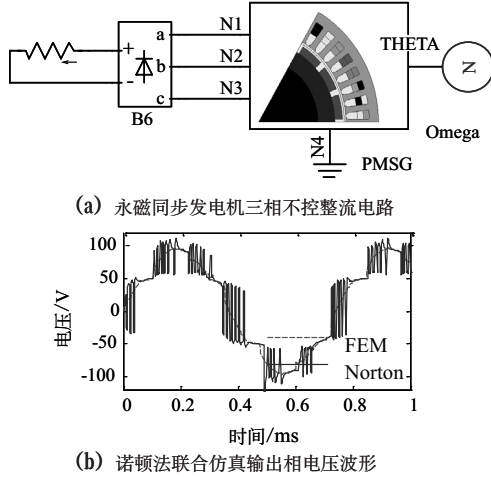


图4 永磁同步发电机三相不控整流电路联合仿真

Fig.4 Permanent magnet synchronous generator system with uncontrolled rectifier

2.2 戴维南法联合仿真

与诺顿法不同,在戴维南法迭代计算过程中,有限元模型反馈到系统仿真器中的参数包括绕组反电势、电阻、电感以及转矩信号,而电路求解器则返回电机的电流与位置信号,如图5所示。电机有限元模型在电路中采用戴维南电路进行等效,其各相支路一般采用反电势、电阻、漏感的串联电路进行等效,如图6所示。

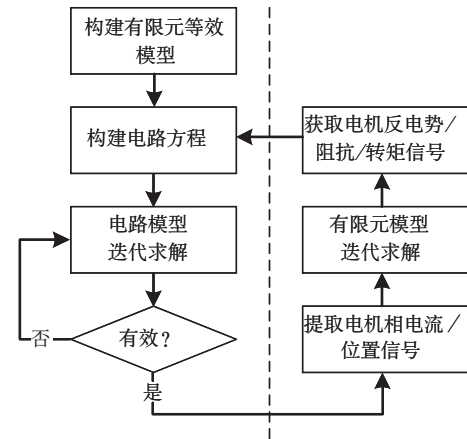


图5 戴维南法联合仿真原理

Fig.5 Flow chart of Thevenin's theorem based co-simulation

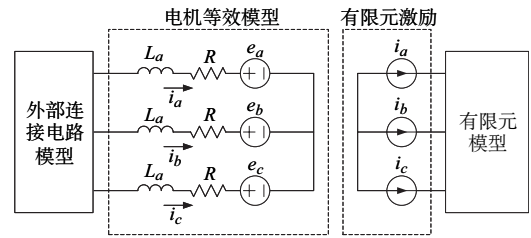


图6 戴维南法场路耦合等效模型

Fig.6 Thevenin's theorem coupling equivalent model

由于该方法在系统电路中采用的是戴维南等效电路,因此,对于图4所示的发电机不控整流电路,有限元模型中传递的相电压数值可以有效进行电路换向,从而避免仿真中出现图4(b)所示的电压、电流数值计算震荡不收敛情况。因此,该算法尤其适用于诸如永磁发电机接不控整流系统的成品的设计与研究。但是,对于变频控制场合,由于应用的阻抗参数为电机的电阻与漏抗,因此,对于PWM控制的联合仿真模型,其谐波电流可能导致较大的误差。

为了消除该错误,戴维南联合仿真方法需要进一步改进算法。通过将绕组磁链分为两部分^[5],一部分为绕组电流产生的电感,它包括外接绕组自感、互感产生的磁链,记为 Li ;另一部分包括由永磁体、鼠笼/阻尼条、涡流等产生的磁链,记为 Ψ 。从而可以将各相反电势的计算模型改为:

$$[e] = [L]p[i] + ip[L] + p[\Psi] = [L]p[i] + [e'] \quad (7)$$

式中: p 为微分算子, L 包含了各相绕组的自感与互感,而 e' 为永磁体、鼠笼/阻尼条、涡流等产生的等效反电势,并包含了部分电感变化引起的感应电势,可以通过有限元模型求解获得。优化的等效模型如图7所示。

需要注意的是,文献[5]在进行有限元数值求解时,将外部电路等效为端口网络,提取了其中的等效参数,该方

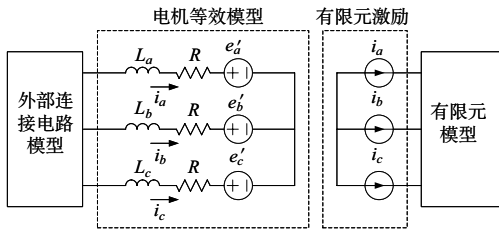


图7 改进型戴维南法场路耦合等效模型

Fig.7 Thevenin's thevrem coupliny equivalent model improved

法可以提高电机与外部电路的仿真精度与收敛速度,使得该算法也适于变频驱动电机的联合仿真,但也限定了该技术只能应用于单一电机与控制器的联合仿真。

2.3 多回路法联合仿真

交流电机多回路理论是建立在把电机看做多个有相对运动的回路组成的电路基础上的,对于一般性的电机,可以假设电机模型满足:(1)电机中包含 N_W 个绕组,包括电枢绕组和励磁绕组;(2)电机中包含 N_L 个阻尼回路,即包含 N_L 个阻尼条;(3)电机中包含 N_M 个永磁体。

在建立统一多回路模型时,通常仅建立绕组与阻尼回路的电压、磁链回路模型。而对于永磁体,由于其等效励磁电流为常数,因此,通常不需要单独列写回路方程,而是直接采用永磁体在各回路中产生的磁链来等效。对于任意第 k 个绕组的电压模型与磁链模型可以表示为:

$$u_{W_k} = R_{W_k} i_{W_k} + p\psi_{W_k} \quad (8)$$

$$\psi_{W_k} = L_{W_k} i_{W_k} + \sum_{W_n=1}^{N_W} M_{W_k W_n} i_{W_n} + \sum_{L_n=1}^{N_L} M_{W_k L_n} i_{L_n} + \sum_{M_n=1}^{N_M} \psi_{W_k M_n} \quad (9)$$

式中: i_{W_k} 为绕组电流; i_{L_k} 为阻尼回路电流; u_{W_k} 为绕组电压; ψ_{W_k} 为绕组磁链; R_{W_k} 为绕组电阻;电压、磁链的下标 W_n, L_n 的 M_n 分别代表绕组、阻尼回路、永磁体的第 n 个回路;对于任意阻尼回路 k ,其回路示意图可以用图8表示。

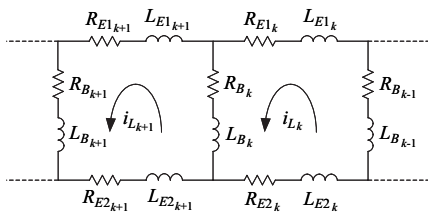


图8 阻尼回路示意图

Fig.8 Schematic of rotor damper loop

根据图9中可以得到阻尼回路的电压和磁链方程分别为:

$$0 = R_{B_k} (i_{L_k} - i_{L_{k-1}}) + R_{B_{k+1}} (i_{L_k} - i_{L_{k+1}}) + R_{E_k} i_{L_k} + p\psi_{L_k} \quad (10)$$

$$\psi_{L_k} = L_{L_k} i_{L_k} + \sum_{W_n=1}^{N_W} M_{L_k W_n} i_{W_n} + \sum_{L_n=1}^{N_L} M_{L_k L_n} i_{L_n} + \sum_{M_n=1}^{N_M} \psi_{L_k M_n} \quad (11)$$

式中: R_B 为阻尼条电阻, R_R 为电阻, ψ_C 为阻尼回路磁链,端环在模型(9)、(11)中,电感、永磁体磁链参数均为时间变量,随着位置、电机负载电流的变化而变化,同时模型(10)中的电阻参数由于受到阻尼绕组集肤效应的影响也将随着发电机转速变化而发生变化。当采用多回路法进行场路耦合仿真时,在模型中涉及的电阻、电感与磁链参数均实时通过有限元计算获得^[8],图9为多回路法联合仿真原理示意图。

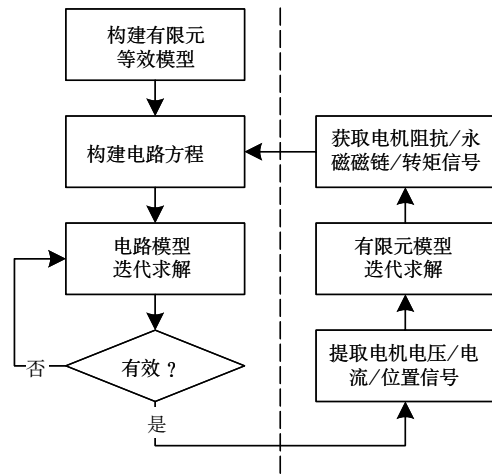


图9 多回路法联合仿真原理

Fig.9 Flow chart of multi-loop method based co-simulation

由于在模型中仅提供电感、电阻参数,而不涉及有限元模型中计算出来的绕组电压和电流参数,因此,在系统模型中进行联合仿真时具备非常好的收敛性能,可以支持多个多回路模型绕组之间的串联、并联分析,从而解决了系统仿真器中耦合多个有限元模型时容易造成的收敛性问题。该方法适用于三级无刷发电系统的联合仿真,也适用于复杂供电系统的联合仿真。

3 多回路法联合仿真方法在三级无刷交流发电系统中的应用

基于前述分析,多回路联合仿真方法适用于涉及多有限元模型的联合仿真的应用,可以有效对飞机供电系统进行精确的电磁耦合分析。本节采用多回路联合仿真方法,对某三级无刷交流发电系统建压启动过程进行了仿真分析。表1、表2为励磁机与主发电机的基本参数。

图10为三级无刷交流发电系统的原理图,该系统通过控制器检测不同负载下的输出电压,对励磁机的励磁电流进

行调节,从而维持主发电机输出电压的稳定。励磁机的励磁电流由同轴永磁机整流后提供。为了考虑励磁机和主发电机的饱和、谐波等因素,在很多情况(如启动过程、重载工况)下,需要励磁机和主发同时采用电磁场有限元模型进行分析。

表 1 励磁机参数

Table 1 Key parameters of the auxiliary exciter

参数	数值	参数	数值
机对数	3	转子槽数	54
额定转速 /rpm	8000	叠厚 /mm	19
定子外径 /mm	150	定子内径 /mm	109
转子外径 /mm	108	转子内径 /mm	68

表 2 主发电机参数

Table 2 Key parameters of the main generator

参数	数值	参数	数值
机对数	3	定子槽数	72
阻尼槽数	30	叠厚	75
定子外径 /mm	155	定子内径 /mm	105
转子外径 /mm	103.7	额定转速 /rpm	8000

图 11 为空载建压、突加负载过程中,励磁机励磁电流的响应曲线和主发电机的三相电压相应曲线,系统在零时刻开始空载建压,建压完成后,在 0.1 时刻突加 75% 阻性负载。根据图中响应曲线,场路耦合模型有效反应了启动过程与突加负载过程中由于非线性饱和引起的瞬态响应变化过程,系统的时间与空间谐波也可通过有限元模型得到反映。

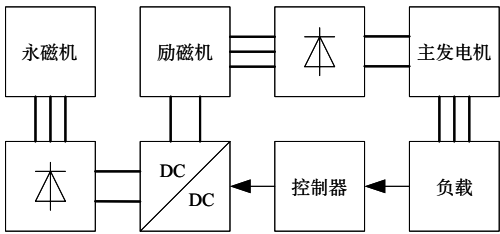


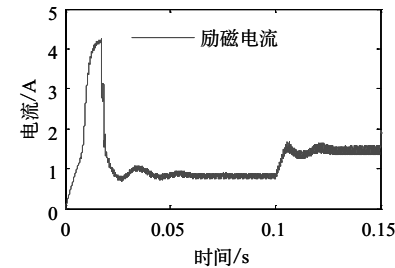
图 10 三级无刷交流发电系统

Fig.10 Three stage generator system

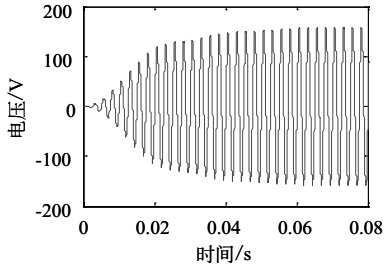
图 12 给出了励磁机和主发电机瞬态电磁场分析结果。在建压过程中,由于励磁电流非常大,励磁机会进入饱和阶段,而主发电机在建压完成后,会在局部磁场产生饱和,通过有限元模型耦合,可以对电机的电磁饱和特性进行精确评估。

4 结论

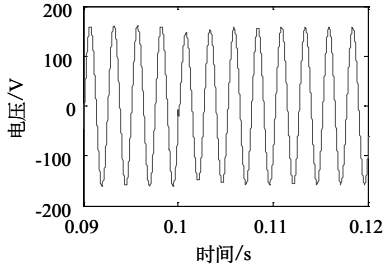
本文首先对 3 种常用的场路耦合联合仿真算法和多回路法进行了分析比较。结果表明,多回路联合仿真技术具有



(a) 励磁机励磁电流响应曲线



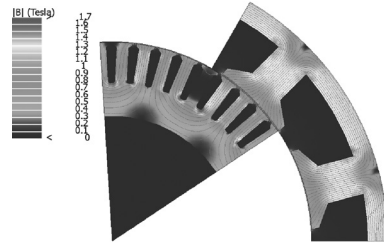
(b) 空载建压过程主发相电压波形



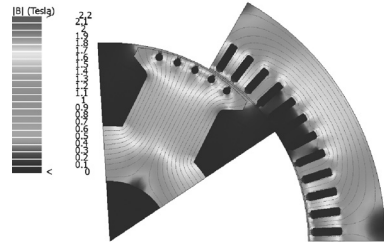
(c) 突加负载主发输出电压响应波形

图 11 三级交流发电系统仿真结果

Fig.11 Simulation results of the three stage generator system



(a) 励磁机电磁场分布



(b) 主发电机电磁场分布

图 12 电机瞬态电磁场分布

Fig.12 Flux density distribution

良好的收敛性能,能对电机及系统性能进行精确模拟,可在电气系统中耦合多个电磁场有限元模型进行联合仿真。由于联合仿真中采用有限元法对电机进行参数计算,因此,可以对电机的饱和、谐波、斜槽等因素进行精确模拟,适用于发电系统乃至供电系统的精确仿真评估。

AST

参考文献

- [1] Kang D H, Kim J W, Kisek D O, et al. Dynamic simulation of the transverse flux machine using linear model and finite element method[C]// 33rd Annual Conference of the IEEE, Industrial Electronics Society, 2007: 1304-1309.
- [2] Bangura J F. Directly coupled electromagnetic field-electric circuit model for analysis of a vector-controlled wound field brushless starter generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26 (4): 1033-1040.
- [3] Kanerva S. Data transfer methodology between a FEM program and a system simulator[J]. Electrical Machines and Systems, 2001, 2: 1121-1124.
- [4] Padilla J A, Sumner M, Gerada C, et al. Detection of inter-coil short circuits in the stator winding of a PM machine by using saliency tracking schemes[J]. Energy Conversion Congress and Exposition, 2011: 2520-2527.
- [5] Zhou P, Lin D, Fu W N, et al. A general co-simulation approach for coupled field-circuit problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42 (4): 1051-1054.
- [6] Zhu X, Cheng M, Zhao W, et al. A transient co-simulation approach to performance analysis of hybrid excited doubly salient machine considering indirect field-circuit coupling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (6): 2558-2560.
- [7] Lange E, Henrotte F, Hameyer K. An efficient field-circuit coupling based on a temporary linearization of FE electrical machine models[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (3): 1258-1261.
- [8] Liang W, Wang J, Lu T, et al. A new method for multiple finite-element models in cosimulation with electrical circuit using machine multiloop modeling scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (12): 6583-6590.

作者简介

王显承 (1967 —) 男,高级工程师。主要研究方向: 电气试验设施组建、试验设计规划、测试设备研制及试验方法研究。
Tel: 028-65020632 E-mail: wangxc6@sina.com

Electromagnetic Coupling Co-simulation Schemes and Its Application on Aircraft Electric Power Source

WANG Xiancheng*, HAN Xiaokang

Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610041, China

Abstract: A large number of motors and control systems are involved in aviation power system, with the application and development of multi-electric and all-electric aircraft technology, the electromagnetic coupling co-simulation of motor and control system becomes important to aviation power system's design, analysis and optimization. In this paper, the common electromagnetic coupling scheme was compared and analyzed. Moreover, the associated convergence performance was investigated and discussed based on aircraft electric power source application. It was revealed that the co-simulation scheme based on multi-loop technique offers reliable and affective simulation result.

Key Words: generation system; aviation power; three stage generator system; electromagnetic coupling; co-simulation

Received: 2016-05-04; Revised: 2016-05-23; Accepted: 2016-08-25

*Corresponding author. Tel. :028-65020632 E-mail: wangxc6@sina.com