

一种磁阻电机建模与多款软件耦合使用的优势

冯 号, 黎 英, 蔡星全

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 磁阻电机电感非线性、电磁环境复杂多变, MATLAB 对于复杂电磁参数处理能力有限且不能精确反映电机实际运行工况。设计了一款新型磁阻电机并对 Maxwell、Simplorer 与 MATLAB 耦合使用的可行性进行研究。通过理论计算、分析, 推算了新型磁阻电机的数学模型。基于 Motor-CAD 搭建电机模型。基于 Maxwell 对电机参数进行优化并阐述了 ECE 模型提取过程。基于 Simplorer 建立了驱动电路模型。基于 MATLAB/Simulink 建立直接转矩控制(DTC)主电路模型, 之后耦合进行联合调试。仿真结果表明基于 DTC 的新型磁阻电机的转矩脉动更低, 多款软件的耦合仿真分析是可行的, 且能够精确反应磁阻电机实时工况和任意时刻磁力线分布。丰富了电机设计途径的多样性。

关键词: 磁阻电机; 电机建模; MATLAB; Maxwell; Simplorer; ECE 模型; 联合仿真

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)02-0045-05

doi: 10.12177/emca.2020.201

A Kind of Reluctance Motor Modeling and Multiple Software Coupling Advantages

FENG Hao, LI Ying, CAI Xingquan

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The inductance of the reluctance motor is nonlinear and the electromagnetic environment is complex and changeable. MATLAB has limited processing capabilities for complex electromagnetic parameters and cannot accurately reflect the actual operating conditions of the motor. A novel reluctance motor is designed and the feasibility of using Maxwell, Simplorer and MATLAB in coupling is studied. Through theoretical calculation and analysis, the mathematical model of the novel reluctance motor is calculated. The motor model is built based on Motor-CAD. Based on Maxwell, the motor parameters are optimized and the ECE model extraction process is explained. Based on Simplorer, a driving circuit model is established. The main circuit model of direct torque control is established based on MATLAB/Simulink, and then coupled for joint debugging. The simulation results show that the torque ripple of the novel reluctance motor based on direct torque control is lower, the coupling simulation analysis of multiple software is feasible, and it can accurately reflect the real-time operating conditions of the reluctance motor and the distribution of magnetic field lines at any time. The diversity of motor design approaches is enriched.

Key words: reluctance motor; motor modeling; MATLAB; Maxwell; Simplorer; ECE model; co-simulation

收稿日期: 2020-11-16; 收到修改稿日期: 2020-12-30

作者简介: 冯 号(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机本体设计。

黎 英(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机控制与电力电子等方面的教学与科研。(通信作者)

0 引言

磁阻电机属于同步电机。磁阻电机仅使用硅钢片叠压而成不存在稀土材料的消耗,降低了电机的造价,且由于磁阻电机的特殊结构,使其具有结构简单、耐高温、转矩密度高等优点。但磁阻类电机缺点是转矩脉动过大,难以满足精密行业的应用需求^[1]。磁阻类电机的典型代表是开关磁阻电机和同步磁阻电机,同步磁阻电机的概念提出是在 20 世纪初^[2],限制于当时电机制造的工艺水平,很难做出满意的结构凸极比,与相同容量的感应电机相比,同步磁阻电机的体积过大,且转矩更加不稳定。目前,同步磁阻电机要达到满意的转矩稳定性和体积的合理性,不仅需要配备复杂的控制环境,而且在必要的情况下,需使用永磁体镶嵌在转子导条空缺处以提高电机性能,与磁阻电机低廉可靠的基本属性背道而驰。开关磁阻电机已经取得了丰富的应用场景,但双凸极结构、电感特性的复杂多变使电机的转矩难以平稳且效率较低^[3]。

直接转矩控制(DTC)主要作用于电机磁链和转矩,控制拓扑结构简易,通过控制电压矢量来形成磁链和转矩的双闭环控制^[4]。文献[5]探讨了 DTC 是否可以与异步电机一样应用在磁阻类电机中,以此为基础,在控制转速不变的情况下,改变磁链参考值,电机转矩脉动明显,说明磁链参考值的设定尤为重要^[6-7]。

目前,电机设计类软件种类众多且各自的侧重点不同,这对于电机研发是有利的。但是,缺点是不同的软件互不相通,不利于电机的联合开发调试。由此,本文以 Simplorer 为基准点,耦合 Motor-CAD、Maxwell、MATLAB/Simulink 3 款软件,进行新型磁阻电机的联合仿真、调试验证。结果表明,3 款软件基于 Simplorer 是可以进行耦合仿真。

1 设计思路

基于引言部分的阐述,本文从电机几何结构、控制以及多款软件的耦合使用来展开论述。

在已有成果的基础上,设计了一款 36/12 结构的磁阻电机,其基本结构是:定子为隐极式结构,定子槽型为梨形槽,定子绕组按分布式绕组缠

绕,节距和极距均为 3,转子为凸极结构。

下列是本文所作流程。

- (1) 数学模型分析。
- (2) 基于 Motor-CAD 软件快速建立磁阻电机基本模型。
- (3) 应用有限元仿真软件 Maxwell 对磁阻电机基本模型进行参数优化寻求最优解,并确定新型磁阻电机的主要尺寸。
- (4) 基于 Simplorer 建立电机驱动电路。
- (5) 基于 MATLAB/Simulink 软件建立 DTC 主电路。
- (6) 以 Simplorer 为基准点,耦合 MATLAB/Simulink、Maxwell 进行联合仿真。

2 新型磁阻电机理论分析

2.1 新型磁阻电机基本工作原理

磁阻类电机运行遵守“磁阻最小原理”^[8],磁阻电机通电产生磁场,磁力线沿磁阻最小路径闭合。当定子绕组某一相通电时,如果定子的磁极中心线与转子的 d 轴不重合,磁力线扭曲,而磁力线的闭合回路磁阻应是最小,此时就会有磁阻性质的转矩作用于转子,迫使转子转动,直至磁力线不再存在扭曲现象,磁阻力消失。

2.2 新型磁阻电机数学模型

磁阻电机因为电感特性具有非线性关系和磁路饱和严重,所以难以建立精确的数学模型。但对于电机运行特性和电磁性能的分析研究,数学模型的建立又是至关重要的。因此,为了简化磁阻电机数学模型建立多因素影响,本文提及“理想电机”概念,即电机应符合:(1)忽略相与相之间磁耦合现象;(2)硅钢片叠压而成的定、转子磁路不存在饱和现象;(3)剩磁、集肤效应、涡流效应等在一定程度上忽略不计;(4)定、转子齿槽表面光滑,气隙磁密随正弦变化^[9]。

2.3 三相静止坐标系下的数学模型

本文所建立的新型磁阻电机符合“单元电机”的定义,因此以下阐述均以单元电机讲解。图 1 为“单元”磁阻电机示意图,三相互差 120° 的定子绕组分别是 x 轴、 y 轴、 z 轴,按电机惯例电流与电压方向相反。由磁阻类电机基本运行原理以及上述描述,规定磁力线最小闭合路径为 d 轴,反之则为 q 轴。

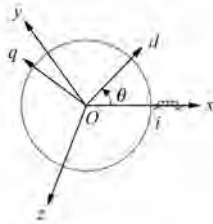


图1 “单元”磁阻电机示意图

在上述规定下,基于三相静止坐标系建立新型磁阻电机电压矩阵方程式:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 为相电压瞬时值; R_s 为相电阻; i_x 、 i_y 、 i_z 为电流瞬时值; λ_x 、 λ_y 、 λ_z 为磁链瞬时值。

DTC 中参考磁链的设置极其重要。新型磁阻电机绕组磁链具体表达式为

$$\begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_x & L_{xy} & L_{xz} \\ L_{yx} & L_y & L_{yz} \\ L_{zx} & L_{zy} & L_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: L_x 、 L_y 、 L_z 为绕组自身电感; L_{xy} 、 L_{xz} 、 L_{yx} 、 L_{yz} 、 L_{zx} 、 L_{zy} 为 A 相与 B 相、B 相与 C 相、C 相与 A 相之间的电感。

基于傅里叶分析,电机选取定子 36 极,转子 12 极,可以避免高次谐波电感分量对电机性能产生不利影响,且 36/12 结构的新型磁阻电机也符合“单元”电机的概念,便于分析。

3 新型磁阻电机本体建模

模型建立阶段所使用软件的侧重点在 Motor-CAD 中。在 Motor-CAD 中搭建磁阻电机几何模型并确定电机主要尺寸初值。

首先,定义电机基本类型为磁阻同步电机,在径向界面下设置电机定子的槽数、定子铁心直径、定子内径、齿宽、槽深等具体数据,电机转子的极数、气隙、转轴直径等具体数据。在轴向界面下检查径向界面设置的电机各个结构数据的合理性;然后,在绕组排布下的径向接线,结合具体的线圈视图,依次按照 A 相、B 相、C 相的顺序设置绕组为分布式以及每相具体匝数,验证绕组铜满率(槽面积)、绕组占满率以及端部绕组每匝平均长

度的合理性。之后,赋予电机定、转子材料均为 M350-50A,线圈绕组材料为铜,如果电机符合“单元”电机概念,设置电机对称系数为 4,由此减少软件对于电脑资源的占用并节省时间。确定磁阻电机线电流、驱动方式及转速等参数并求解。最后,查看求解结果,导出工程文件为 vbs 格式。

表 1 为磁阻电机主要尺寸的具体数据。图 2 为磁阻电机定、转子结构示意图。图 3 为磁阻电机绕组的线圈视图。图 4 为基于 Motor-CAD 建立的磁阻电机模型。

表 1 磁阻电机主要尺寸的具体数据

参数名称	参数值
转子极数	12
定子铁心直径/mm	155
定子内径/mm	98
齿宽/mm	5.5
槽深/mm	16
槽圆角半径/mm	2.45
定子槽肩高/mm	0.3
槽开口/mm	0.5
定子槽肩角	30
气隙/mm	0.3
转轴直径/mm	35

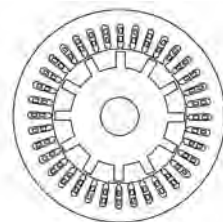


图2 磁阻电机定、转子结构示意图

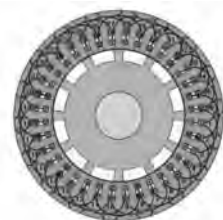


图3 磁阻电机绕组的线圈视图

基于 Motor-CAD 建立模型后,在 Maxwell 软件中运行 vbs 脚本并同时自动求解,以省略

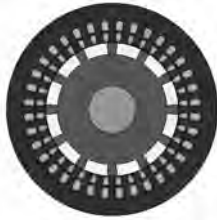


图4 基于 Motor-CAD 建立的磁阻电机模型

Maxwell 软件对于 36/12 结构磁阻电机参数优化的一系列操作,但要注意的是本文在 Simplorer 中所控制的对象是使用 ECE 提取而来。

在进行 Simplorer 与 MATLAB/Simulink 联合仿真时,若控制对象是从 Maxwell 软件直接导入到 Simplorer 中,基于此进行联合仿真时会耗费大量时间,极不利于联合仿真的灵活性。由此,采用 ECE 等效电路模型,用于电机整体驱动系统性能调试。ECE 等效电路模型是基于表格的电路模型,表格参数来源于有限元计算,即一个基于查询表数据的等效电路模型,查询表数据取自于提前计算好的场量结果数据,包括基于查询表输入变量插值的所有外部激励和运动部件位置组合工作状态。

ECE 等效电路模型是基于 Maxwell 外电路提取的。现介绍具体实现方式,首先,在 Maxwell 文

件中采用外电路作为三相线圈的激励。其次,在外电路中分别添加 ground 模块、ECE3_Model 模块以及 ECER_Model 模块。最后,需要特别注意的是 ECE3_Model 模块和 ECER_Model 模块中绕组的名称和 Maxwell 中的绕组名称须一致。

4 主电路及驱动电路建模

4.1 驱动电路建模

基于 Simplorer 搭建磁阻电机驱动电路,如图 5 所示。其中,控制对象是 ECE 等效电路模型。 $R_1、R_2、R_3$ 均为 1.272Ω , $L_1、L_2、L_3$ 均为 0.0335 H 。传统 DTC 中通过开关表会产生 IGBT 的导通与关断信号,而 MATLAB 和 Simplorer 2 款软件之间并无直接相接接口,信号无法直接传递至电压型逆变器 IGBT 中,图 5 左侧显示的 1~6 分别为 6 个输入端口,具有将 MATLAB 中 IGBT 导通与关断信号传递至 Simplorer 中电压型逆变器的作用。SimulinkData 模块主要负责 Simplorer 与 MATLAB/Simulink 的数据交换^[10]。Simplorer 中元器件 VM_ROT1、SM_ROT1 和 FM_ROT1 等可以实时获取电机的转速、转子位置角和转矩等参数。

4.2 主电路建模

耦合 Simplorer 模块的 DTC 如图 6 所示。

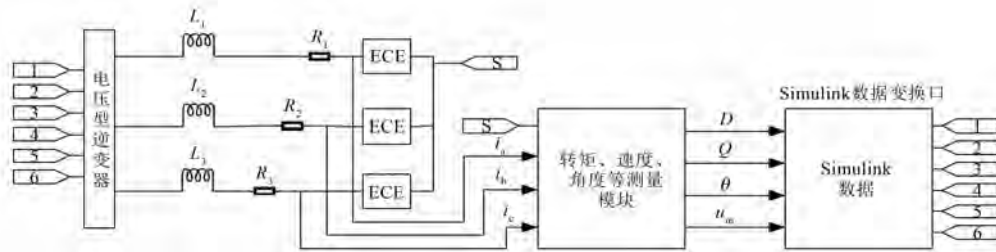


图5 耦合 MATLAB 模块的驱动电路

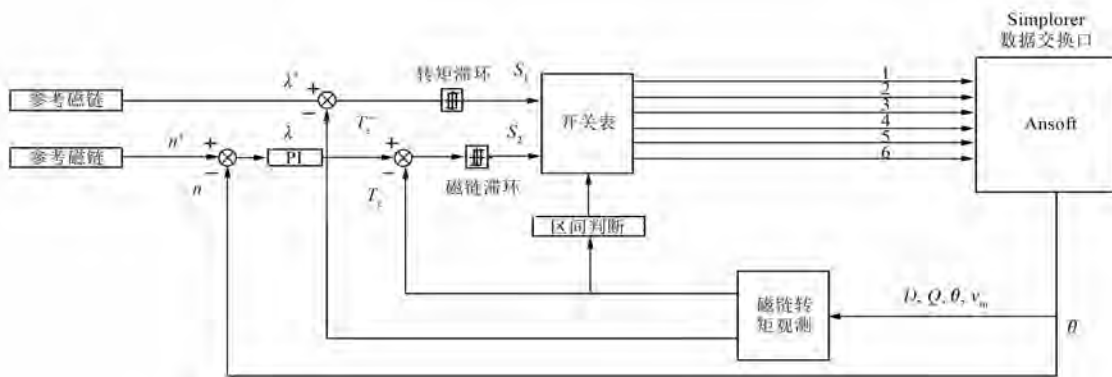


图6 耦合 Simplorer 模块的 DTC

Ansoft 模块是基于 S-Function 模块建立,主要用于 MATLAB/Simulink 与 Simplorer 之间的数据交换。DTC 的工作原理:参考转速和实际转速作差通过 PI 模块之后产生实时转矩值,实时转矩值和实际转矩比较通过转矩滞环形成 S_2 开关信号,参考磁链和磁链转矩观测器比较之后通过转矩滞环形成 S_1 开关信号,由 S_1 、 S_2 开关信号共同控制开关表,开关表产生 Ansoft 模块所需要的 1~6 具体状态,以应用于电压型逆变器三相桥臂的开通和关断,逆变器通过开关状态形成电机运行所需要的电压波形^[11]。

5 联合仿真结果分析

基于 DTC 中的 Ansoft 模块及驱动电路中的 SimulinkData 模块,Simplorer 和 MATLAB 2 款软件至此互为耦合,但须注意的是 2 款软件的仿真时间、最小步长及最大步长要一致。参考转速设置为 1 000 r/min,参考磁链设置为 0.25 Wb,电压型逆变器电源设置为 380 V。进行 MATLAB/Simulink、Simplorer 和 Maxwell 3 款软件联合仿真计算。

由图 7 可见,新型磁阻电机磁力线均匀分布在每个转子齿上且漏磁少,转子的每个齿都均匀受到磁力线扭曲所产生的切向磁拉力,正因为如此,新型磁阻电机的转矩脉动才会更加平稳,磁感应强度最大值处于 0.001 6~0.001 9 Wb/m 之间。

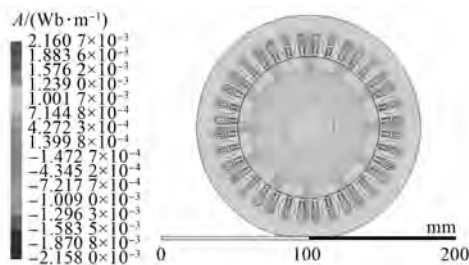


图 7 磁力线分布

由图 8 可见,新型磁阻电机转矩脉动处于平稳状态时最大值为 42.478 6 N·m,最小值为 27.276 1 N·m,平均电磁转矩为 30.841 3 N·m,根据公式计算可知^[7],新型磁阻电机的转矩波动系数为 0.493。

在 MATLAB/Simulink 中建立传统 DTC 模型,在 Maxwell 中建立新型磁阻电机本体模型,通过 S-Function 模块与 SimulinkData 模块可以使 2 款软件相结合,以解决 MATLAB 仿真过程中不能反

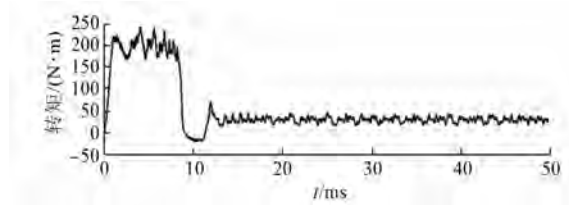


图 8 电磁转矩

映电机电磁实时变化的短板。说明可以通过磁力线分布图观察电机仿真时间过程中,任意时刻磁力线具体分布。

6 结 语

本文以新型磁阻电机建模与 DTC 电路图搭建为载体,详细阐述了 Maxwell、Simplorer 与 MATLAB 3 款软件耦合使用过程, Motor-CAD 建立模型锥形的流程以及 ECE 等效电路模型的提取过程,旨在为电机设计者提供更加有效和便捷的途径。

通过 Motor-CAD 快速建立磁阻电机基本模型,在 Maxwell 中进行一系列参数优化在短时间内寻求到电机主要尺寸最优解。在新型磁阻电机有限元仿真过程中,电机剖分较细的电机模型,对于计算机硬件要求较高,特别在联合调试的情况下,很难达到理想的仿真速度,这对于电机的研发周期极其不利。为此,本文采用 ECE 等效电路模型,提高了仿真速度,且仿真精度高。

【参考文献】

- [1] 谢卫才,黄守道,石安乐. 开关磁阻电机调速系统发展动向[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2004, 14(4): 20.
- [2] 刘晓盼. 同步磁阻电机的优化设计及控制驱动[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [3] 李俊卿,李和明. 开关磁阻电机发展综述[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(1): 1.
- [4] KANG J K, SUL S K. New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1076.
- [5] TAKAHASHI I, NOGUCHI T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, 22(5): 820.

(下转第 56 页)

- for the oil industry [C] // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019.
- [3] LIANG X, EL-KADRI A. Factors affecting electrical submersible pump systems operation[C]//2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2018.
- [4] BRINNER T R, MCCOY R H, KOPECKY T. Induction versus permanent-magnet motors for electric submersible pump field and laboratory comparisons [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 174.
- [5] 孟大伟, 刘智慧, 徐永明, 等. 双分数槽集中绕组低速潜油电机的设计分析[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(1): 44.
- [6] ZHANG B, LIU Z, DING H, et al. Study on unit combination type direct-driven submersible permanent magnet motor [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [7] CUI J, XIAO W, ZOU W, et al. Design optimization of submersible permanent magnet synchronous motor by combined DOE and Taguchi approach [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(6): 1060.
- [8] HUANG X Z, LI L Y, ZHOU B, et al. Temperature calculation for tubular linear motor by the combination of thermal circuit and temperature field method considering the linear motion of air gap [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3923.
- [9] DINAROVICH K R, RUSTEMOVICH U R, RAMILEVICH F D, et al. The stator slot manufacturing technology influence on the submersible thyatron motors output parameters[C]// 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019.
- [10] IONEL D M, POPESCU M, DELLINGER S J, et al. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3): 658.
- [11] LIU Y. Calculation and analysis of 3D temperature field in steady state of the submersible motor[C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010.
- [12] 杜军驻, 仇汝臣. 石油粘度-温度数学模型与密度的关联研究[J]. 广西化工, 2012, 41(7): 6.
- [13] ZHAO M, RAN X, SHANG J. Influences of 3D fluid field for submersible permanent magnet motors on thermal field distribution [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.
- [14] 孟大伟, 刘宇蕾, 张庆军, 等. 潜油电机整体三维温度场耦合计算与分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(1): 52.

~~~~~

(上接第 49 页)

- [ 6 ] WANG M. Direct torque controlled system based on PI regulator for switched reluctance motor drive[ C ]// 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, 2007.
- [ 7 ] 冯号, 黎英, 蔡星全. 新型磁阻电机的结构设计及转矩优化[ J ]. 微特电机, 2020, 48(3): 17.
- [ 8 ] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 4-7.
- [ 9 ] 陈文纯. 电机瞬变过程[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [ 10 ] 赵鲁. 基于 Simplerer 场路耦合多物理域联合仿真[ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 278-298.
- [ 11 ] 冯宇驰. 电动汽车永磁同步轮毂电机直接转矩模型预测控制研究[ D ]. 长春: 吉林大学, 2020.