

基于 Maxwell 2D 的永磁辅助同步磁阻电机的参数化建模及分析

魏超, 孙德强, 任延生, 杜杰, 倪伟
(中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502)

摘要: 根据永磁辅助同步磁阻电机(PMASRM)复杂的结构特点, 基于 ANSYS Maxwell 2D 软件平台, 介绍参数化绘制几何模型的过程, 并对结构参数进行优化设计。对恒转矩区间采用最大转矩电流比(MTPA)控制策略、恒功区间采取弱磁控制求解电机电压、电流、内功率因数角、转矩的具体步骤进行了详细说明, 为同类电机设计提供了较为实用的分析手段。

关键词: 永磁辅助同步磁阻电机; 结构参数化; 最大转矩电流比; 弱磁控制

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)12-0055-06

Parametric Modeling and Analysis of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor on Maxwell 2D Software

WEI Chao, SUN Deqiang, REN Yansheng, DU Jie, NI Wei
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China)

Abstract: According to the complex structure characteristics of the permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM), the process of parameterization and geometric model establishment was introduced based on the ANSYS Maxwell 2D software platform, and the structural parameters were optimized. Furthermore, the specific procedures of using maximum torque per ampere (MTPA) control strategy in constant torque region and field weakening control in constant power region to get motor voltage, current, internal power factor angle and torque were illustrated in detail. It provides a more practical analysis method for the design of the same kind of motor.

Key words: permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASRM); structure parameterization; maximum torque per ampere (MTPA); field weakening control

0 引言

现有同步磁阻电机转子通常设计成具有多层空气磁障的结构。当同步磁阻电机的转子磁障中插入永磁体后, 便形成了永磁辅助同步磁阻电机(PMASRM)。PMASRM 结合了永磁同步电机(PMSM)和同步磁阻电机的特点, 充分利用了磁阻转矩和永磁转矩, 具有功率密度高、效率高、体积小、质量轻等优势, 且使用少量的永磁体便可以达到与传统永磁电机相当的输出性能。同时,

PMASRM 拥有较低反电动势以及较宽的恒功区间的优势, 加之成本也比传统永磁电机低, 使得其被各行业所关注^[1]。国内对该类型电机的研究主要集中在各大高校, 如清华大学于 1998 年率先在国内期刊上介绍了永磁同步磁阻电机^[1]; 湖北工业大学于 2014 年针对电动大巴驱动用铁氧体 PMASRM 进行了有限元分析并发表论文^[2]; 华中科技大学、大连理工大学、天津大学、重庆大学、福州大学、哈尔滨工业大学等也相继加入到了对该类型电机的研究中。格力电器股份有限公司对该

作者简介: 魏超(1984—), 男, 工程师, 研究方向为电励磁同步发电机及永磁同步电机设计与应用。

孙德强(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为永磁同步电机设计与应用。

任延生(1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为同步电机设计与应用。

类型电机进行了较为深入系统的研究,并由黄辉等^[3]出版了国内具有代表性的专著《永磁辅助同步磁阻电机设计与应用》。目前该类型电机主要集中在几十千瓦的小功率阶段和电动汽车领域。由于转子特殊的磁障结构使 PMASRM 设计难度较大,且目前尚未有成熟的经典计算程序可供使用,所以使部分设计单位和制造企业望而却步。现代计算机仿真软件为该类型电机的设计提供了一种设计技术。

ANSYS Maxwell 作为一款功能强大的有限元分析软件,可以通过场的方式完成几乎所有的电机计算分析,已被业界所广泛使用。

在 Maxwell 2D 几何建模阶段提供了多种建模方式,主要包括 RMxpri、外部模型导入、直接点线面 3 种建模方式。这 3 种建模方式有着各自的特点,但均存在模型不易修改,或模型修改后需要重新进行设置,无法快速实现对几何参数进行优化设计的缺点。

本文基于 Maxwell 2D,对 PMASRM 进行了参数化建模,同时对整个过程进行了阐述,提高了设计和优化效率。

1 数学模型

在给定条件下,不考虑退磁和涡流等影响,建立 PMASRM 在 d - q 坐标系下的数学模型,可以得到电压、磁链、电磁转矩的方程分别为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T &= p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \\ & p\psi_f i_s \cos\beta + \frac{1}{2}p(L_d - L_q) i_s^2 \sin 2\beta = \\ & p\psi_f i_q + p(L_d - L_q) i_d i_q \end{aligned} \quad (3)$$

式中: R_s ——电枢电阻;

i_d 、 i_q —— d 轴电流和 q 轴电流;

ω_r ——转子电角速度;

L_d 、 L_q —— d 轴电感和 q 轴电感;

ψ_f ——永磁磁链;

p ——极对数;

β ——电流与 d 轴夹角, $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{i_d}{i_q}\right)$;

i_s ——定子电流, $i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ 。

当 $\psi_f = 0$ 时,式(1)~式(3)即为同步磁阻电机数学模型的方程。

PMASRM 空间矢量图如图 1 所示。

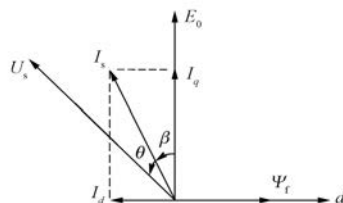


图 1 PMASRM 空间矢量图

PMASRM 与 PMSM 控制类似,是典型的控制器和电机本体紧密结合的机电一体化设计。该系统由电动机本体、控制器、转子位置传感器 3 部分组成,其中常用的位置传感器有光电编码器或者旋转变压器。PMSM 在起动之前一定要提前预测出转子永磁磁极的精确位置信息,才能使逆变电路根据转子磁场的角度来控制定子绕组的电流频率和相位,从而使电机与控制器相结合。

2 几何建模思想

在 Maxwell 2D 中构造几何图形如图 2 所示。

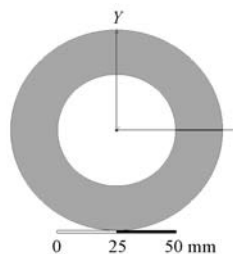


图 2 简易几何模型

将几何图形的每一个端点坐标(X, Y, Z)通过已知的几何参数,经数学计算后以表达式的形式表述。如:构造定子冲片时可以将内径、外径设置为变量,分别定义为 s_{os} 和 s_{is} ,如图 3 所示。

Name	Value	Unit	Evaluate
Segment Type	Line		
Point1	$s_{is}/2, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}$	25 mm, 0 mm, 0 mm	
Point2	$s_{os}/2, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}$	45 mm, 0 mm, 0 mm	

图 3 简易几何模型参数设置

通过调整参数 s_{os} ,可以方便地实现模型的即时更改,如图 4 所示。

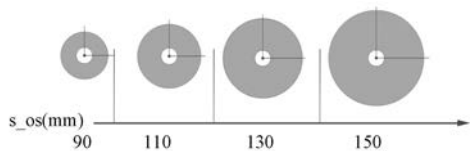


图4 简易几何模型参数快速变换

3 定子模型建立

介绍了常用定子模型的建立,槽形以矩形槽为例作介绍。

3.1 绘制定子槽形

如图5所示,在绘图区草绘一个槽形的大致形状,共包括10个点,并草绘冲片内外圆,包括2个点。

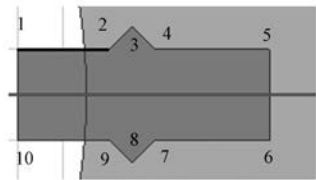


图5 定子槽形草绘

3.2 定义槽形变量

依据定子槽形定义和定子冲片相关的参数,具体如表1所示。

表1 变量定义

参数名称	初始值
槽口高 s_{hs0}/mm	1
槽肩高 s_{hs1}/mm	3
槽净高 s_{hs2}/mm	48
槽肩宽 s_{bs1}/mm	10
槽宽 s_{bs2}/mm	9
定子内径 s_{is}/mm	320
定子外径 s_{os}/mm	476
定子槽数 n_{sl}	72

3.3 编辑定子槽形坐标

依据表1已知参数修改定子槽型每一点的坐标,共10个点(图5序号与表2序号对应)。

3.4 定子冲片

根据软件自带的工具,圆周阵列已修改完成的定子槽形,阵列数量为定子槽数 n_{sl} ,冲片和阵列所得的定子槽形经布尔运算后得到冲片的整体

表2 定子槽形坐标

点	表达式(X,Y,Z) “,”为英文
1	$s_{is}/2-1\text{ mm}, s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
2	$s_{is}/2+s_{hs0}, s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
3	$s_{is}/2+s_{hs0}+\cos(30^\circ)^2 \cdot s_{hs1}, s_{bs2}/2+s_{hs1} \cdot \sin(30^\circ) \cdot \cos(30^\circ), 0\text{ mm}$
4	$s_{is}/2+s_{hs0}+s_{hs1}, s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
5	$s_{is}/2+s_{hs0}+s_{hs1}+s_{hs2}, s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
6	$s_{is}/2+s_{hs0}+s_{hs1}+s_{hs2}, -s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
7	$s_{is}/2+s_{hs0}+s_{hs1}, -s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
8	$s_{is}/2+s_{hs0}+\cos(30^\circ)^2 \cdot s_{hs1}, -(s_{bs2}/2+s_{hs1} \cdot \sin(30^\circ) \cdot \cos(30^\circ)), 0\text{ mm}$
9	$s_{is}/2+s_{hs0}, -s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$
10	$s_{is}/2-1\text{ mm}, -s_{bs2}/2, 0\text{ mm}$

模型,如图6所示。

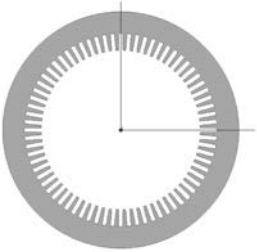


图6 定子模型

4 转子模型建立

根据需要草绘 PMASRM 转子冲片几何模型,如图7所示。第 i 层磁障定义如图8所示。参考图8中的各个端点,通过几何关系,以第3层为例,对每一坐标点使用函数表达式进行定义,具体如表3所示。

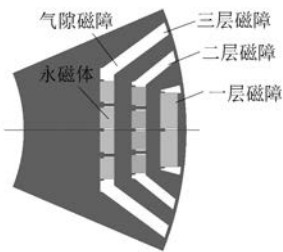


图7 PMASRM 转子冲片几何模型

参考该方法,可以对永磁体进行参数建模,最终通过布尔运算,形成整个转子。

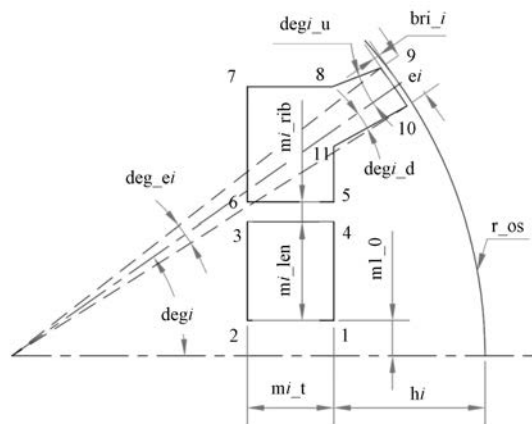


图 8 第*i*层磁障参数定义

表 3 转子磁障坐标

点	表达式 (X,Y,Z) “,”为英文
1	$r_{os}/2-h3, m3_o, 0 \text{ mm}$
2	$r_{os}/2-h3-m3_t, m3_o, 0 \text{ mm}$
3	$r_{os}/2-h3-m3_t, m3_o+m3_l, 0 \text{ mm}$
4	$r_{os}/2-h3, m3_o+m3_l, 0 \text{ mm}$
5	$r_{os}/2-h3, m3_o+m3_l+m3_r, 0 \text{ mm}$
6	$r_{os}/2-h3-m3_t, m3_o+m3_l+m3_r, 0 \text{ mm}$
7	$r_{os}/2-h3-m3_t, (r_{os}/2-bri_3) \cdot \sin(deg3+deg_e3/2) - [(r_{os}/2-bri_3) \cdot \cos(deg3+deg_e3/2) - (r_{os}/2-h3)] \cdot \tan(deg3-deg_u), 0 \text{ mm}$
8	$r_{os}/2-h3, (r_{os}/2-bri_3) \cdot \sin(deg3+deg_e3/2) - [(r_{os}/2-bri_3) \cdot \cos(deg3+deg_e3/2) - (r_{os}/2-h3)] \cdot \tan(deg3-deg_u), 0 \text{ mm}$
9	$(r_{os}/2-bri_3) \cdot \cos(deg3+deg_e3/2), (r_{os}/2-bri_3) \cdot \sin(deg3+deg_e3/2), 0 \text{ mm}$
10	$(r_{os}/2-bri_3) \cdot \cos(deg3-deg_e3/2), (r_{os}/2-bri_3) \cdot \sin(deg3-deg_e3/2), 0 \text{ mm}$
11	$r_{os}/2-h3, (r_{os}/2-bri_3) \cdot \sin(deg3-deg_e3/2) - [(r_{os}/2-bri_3) \cdot \cos(deg3-deg_e3/2) - (r_{os}/2-h3)] \cdot \tan(deg3-deg_d), 0 \text{ mm}$

5 仿真优化分析

5.1 基本设置

完成电机的几何建模后,按照流程完成瞬态场分析前的基本设置,如图 9 所示。

5.2 参数优化

为了更加清晰地表述对结构的参数化分析,

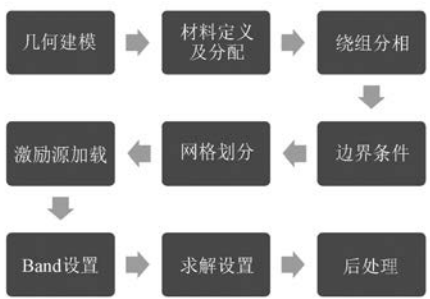


图 9 仿真流程

以某型号 PMASRM 为研究对象,基本参数如表 4 所示。以表 4 的基本参数为输入条件,对电机的几何参数进行参数化扫描计算,寻找最优方案。

表 4 某型号 PMASRM 基本参数

参数名称	参数值
功率/kW	425
最大电压/V	2 343
最大电流/A	300
起动转矩/(N·m)	9 500
极对数	4
定子电阻 R_s/Ω	0.156
端部漏感 L_s/mH	0.27
恒功转速范围/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	600~3 300

本部分以第 3 层磁障尾部张角 deg3 作为优化对象进行说明。根据几何形状限制,初设 deg3 角度范围 17.5°~19.5°,扫描步长 0.2°。该设置通过 Optimetrics 进行配置,如图 10 所示。



图 10 Optimetrics 设置

对三相绕组施以正弦电流作为激励。具体表达式为

$$\begin{cases} i_a = I_{\max} \sin\left(\frac{2\pi p n t}{60} + \theta\right) \\ i_b = I_{\max} \sin\left(\frac{2\pi p n t}{60} + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_c = I_{\max} \sin\left(\frac{2\pi p n t}{60} + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_{\max}$ ——相电流幅值,需要预先定义;

p ——极对数,需要预先定义;

n ——转速,需要预先定义;

t ——时间;

θ ——内功率因数角,需要预先定义。

起动阶段采用最大转矩电流比(MTPA)控制策略,并初设内功率因数角为 48° ,相电流有效值取 285 A。经计算得到平均转矩和转矩脉动与张角 $\deg 3$ 的曲线如图 11、图 12 所示。

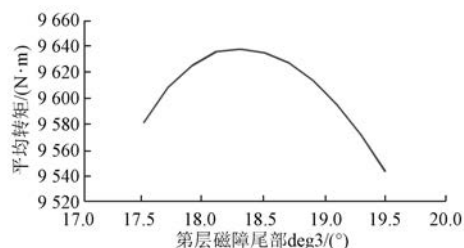


图 11 平均转矩-deg3 变化曲线

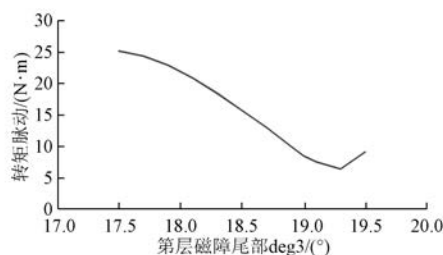


图 12 转矩脉动-deg3 变化曲线

起动阶段以转矩脉动和平均转矩作为衡量标准。当张角 $\deg 3$ 为 19° 时,转矩脉动较小且平均转矩符合起动要求。

通过该方法可以对其他几何参数(如磁钢宽度、厚度等)进行参数化分析,查找寻优。

5.3 工作点求解

不同工作点求取主要包括电压、电流、功率(或转矩)、内功率因数角的计算。

以电流源作为激励,相电压瞬态值可以依据式(5)进行求解:

$$u(t) = R_s \cdot i(t) + L_s \frac{di(t)}{dt} + \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: R_s ——定子相电阻;

L_s ——绕组端部漏感;

$i(t)$ ——定子相电流瞬态值;

$\psi(t)$ ——相瞬态磁链。

该部分的实现可以通过在 Results/Output Variables 中编辑相关公式实现。

5.3.1 基速以下工作点求取

基速以下常采用 MTPA 控制方式。首先选取基速下任意一转速,电流取 285 A,为最大限制电流的 0.95 倍,0.05 倍裕量,在 $46^\circ \sim 53^\circ$ 范围内扫描内功率因数角,得到最佳内功率因数角为 49° ,如图 13 所示。

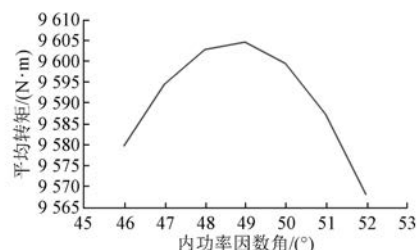


图 13 转矩-内功率因数角

在电流和内功率因数不变条件下,对转速在 $0 \sim 600 \text{ r/min}$ (基速) 范围内进行扫描计算,并绘制曲线,如图 14 所示。

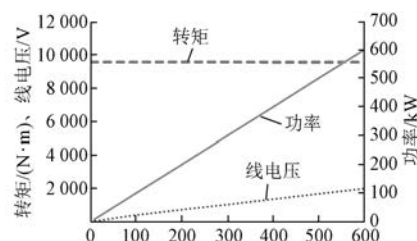


图 14 基速以下特性曲线

5.3.2 基速以上工作点

当转速达到基速以后,电机进入弱磁控制阶段。该阶段存在多变量,通过对电流以及内功率因数角 2 个变量同时进行扫描计算,查找同时满足约束条件电压与转矩时对应的电流与内功率因数角。

设置转速为 3300 r/min ,电流扫描范围 $104.5 \sim 107.0 \text{ A}$,内功率因数扫描范围 $77^\circ \sim 78^\circ$ 。仿真计算后获取转矩-内功率因数曲线和线电压-内功率因数曲线如图 15、图 16 所示。查找 2 条曲线同时满足电压 2343 V 以及转矩 $1230 \text{ N}\cdot\text{m}$ (425 kW) 的电流及内功率因数角,分别为 106 A , 77.36° 。

重复上述方法,以电压和转矩(或功率)为约束条件计算并查找到不同转速下电流及内功率因

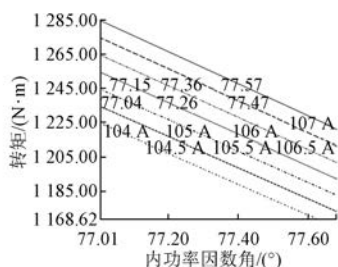


图 15 平均转矩-内功率因数角和电流

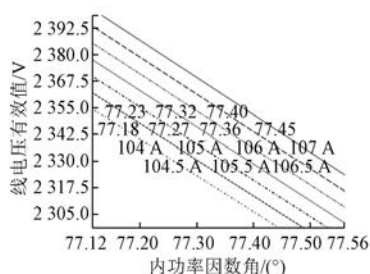


图 16 线电压-内功率因数角和电流

数角。

6 结 语

本文通过 ANSYS Maxwell 2D 参数化建模,实现了模型变化的即时性,使得设计人员能够快速掌握 PMASRM 性能与结构参数的之间的变化关系,降低了设计难度,提高了电机设计的质量和优化效率。通过该技术的运用得出以下结论:

(1) 结构参数化有助于对电机的各个参数进行优化,提高电机优化质量。

(2) 以参数化建模方法具有通用性、可借鉴性,设计人员可以依据需要,设计出更加多样性的电机结构,并根据几何关系对结构进行参数化,并进行参数寻优,完成优化设计。

【参考文献】

- [1] 赵争鸣.新型同步磁阻永磁电机发展及现状[J].电工电能新技术,1998(3): 22.
- [2] 李新华,阮波,徐竟成,等.电动大巴永磁辅助磁阻同步电动机仿真分析[J].微特电机,2014,42(3): 1.
- [3] 黄辉,胡余生.永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [4] 唐任远.现代永磁电机:理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 刘慧娟.Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [6] 李正.永磁电机的设计[M].西安:西安电子科技大学出版社,2016.
- [7] 李新华,汪斯敏,易梦云,等.钕铁硼永磁磁阻同步电机及其仿真分析[J].微特电机,2018,46(8): 49.
- [8] 沈建新,蔡顺,郝鹤,等.同步磁阻电机分析与设计(连载之十二)永磁辅助同步磁阻电机的设计研究[J].微电机,2017,50(3): 79.

收稿日期: 2019-09-23

(上接第 32 页)

- [5] 刘颖,周波,方斯琛.基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 80.
- [6] 段广仁.线性系统理论[M].2版.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.
- [7] 王伟颖.永磁同步电机抗负载扰动控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [8] SENJYU T, SHINGAKI T, UEZATO K. Sensorless

vector control of synchronous reluctance motors with disturbance torque observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 402.

- [9] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M].4版.北京:机械工业出版社,2015.
- [10] 胡寿松.自动控制原理[M].5版.北京:科学出版社,2007.

收稿日期: 2019-09-11