

电动车用开关磁阻电机设计与优化方法^{*}

陈 飞, 瞿遂春, 邱爱兵, 沈 杰
(南通大学, 江苏 南通 226019)

摘 要: 根据电动车的性能要求, 提出了一种电动车用开关磁阻电机(SRM)设计、优化方法。首先对电机进行了预设计, 随后用 Ansoft 软件校验了电机性能。对电机主要结构参数进行了分析和优化, 得到最优结果。

关键词: 开关磁阻电机; 预设计; 结构参数; 优化

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)10-0114-05

A Design and Optimization Method of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle

CHEN Fei, QU Suichun, QIU Aibing, SHEN Jie
(Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: By the performance requirements of the electric vehicle, a design and optimization method of switched reluctance motor (SRM) for electric vehicle was presented. First, the motor was pre-designed, then used the Ansoft to check motor performance. The main structural parameters of the motor were analyzed and optimized to got the optimal result.

Key words: switched reluctance motor; pre-design; structure parameter; optimization

0 引 言

目前国家正大力发展新能源技术, 电动车因势而起, 得到了快速的发展, 如景区内的观光车、小区里的治安巡逻车等。电动车作为一种新兴的代步用车, 不仅绿色环保而且在未来有极大的发展潜力。目前电动车驱动电机主要有永磁电机、异步电机、直流电机等。

作为一种新型电机, 开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)由于其结构简单^[1]、制造成本低、调速范围宽^[2]、控制灵活且效率高等优点, 与传统的电动车驱动电机相比有较大的竞争力, 而且能满足电动车起动转矩大、起动电流小的需求^[3], 所以在电动车驱动领域中有较大的发展潜力。

因为 SRM 的定、转子呈双凸极结构^[4], 且绕组为脉冲电流、磁路非线性、局部磁路高度饱和, 所以传统电机的设计方法不适用 SRM。本文在

对电机性能特点分析的基础上对电机进行预设计, 利用 Ansoft 软件校对与优化电机的结构参数, 对电机进行性能仿真^[5], 得到最优结果。

1 SRM 预设计

根据电动车的性能要求以及经济性, 针对三相 6/4 结构的 SRM 进行预设计。其额定电压 $U_N = 60 \text{ V}$, 额定功率 $P_N = 4.5 \text{ kW}$, 额定电流 86.2 A , 额定转矩 $17.19 \text{ N} \cdot \text{m}$, 额定转速 $n_N = 2\ 500 \text{ r/min}$, 电机效率 83%, 冷却方式为风冷。

电机电磁功率

$$P_{em} = P_N \frac{1 + \eta}{2\eta} \quad (1)$$

电机细长比

$$\lambda = \frac{l_a}{D_a} \quad (2)$$

式中: λ ——1.2;

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61473159)

作者简介: 陈 飞(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电机及其控制。

D_a ——转子外径;

l_a ——铁心长度。

转子外径

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{6.1 \times k_i P_{em}}{B_\delta A k_m n \times 1.05 \lambda}} \quad (3)$$

式中: k_i ——峰值电流系数, 取 0.5;

B_δ ——磁负荷, 预取 0.445 T;

A ——电负荷, 预取 25 000 A/m;

k_m ——方波电流系数, 取 0.8;

n ——额定转速。

铁心长度 $l_a = \lambda D_a$, 定子外径 $D_s: D_a/D_s$ 取 0.5。

定子极弧 $\beta_s = (0.34 \sim 0.45) \tau_r$, 转子极弧 $\beta_r = (0.34 \sim 0.5) \tau_r$, 其中 τ_r 为转子极距。

$$\text{定子极宽 } b_{ps} = (D_a + 2g) \sin \frac{\beta_s}{2},$$

$$\text{转子极宽 } b_{pr} = D_a \sin \frac{\beta_r}{2},$$

$$\text{定子轭高 } h_{cs} = (1.2 \sim 1.4) \frac{b_{ps}}{2},$$

$$\text{转子轭高 } h_{cr} = (1.2 \sim 1.4) \frac{b_{pr}}{2}.$$

每相绕组串联匝数可由式(4)确定:

$$N_{ph} = \frac{3.04 N_r U \theta_c}{n B_\delta D_a l_\delta} \quad (4)$$

式中: N_r ——转子极数;

U ——绕组端电压;

θ_c ——导通角;

l_δ ——有效铁心长度。

由上述预设计得到电机主要尺寸如表 1 所示。

表 1 SRM 尺寸参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
功率/kW	4.5	定子极弧/(°)	30
铁心长度/mm	100	定子轭高/mm	14
转速/(r·min ⁻¹)	2 500	转子外径/mm	82
气隙/mm	0.3	转子内径/mm	32
电压/V	60	转子极弧/(°)	32
定子外径/mm	164	转子轭高/mm	16

2 基于 Ansoft 的 SRM 数值仿真

2.1 在 RMxpert 中的仿真

根据表 1 中的数据, 在 Ansoft 中 RMxpert 分析

模式^[6]下设置电机的各个参数, 得到电机的结构模型如图 1 所示。对电机模型仿真求解后得到主要性能参数曲线, 如图 2~4 所示。图 2 为转速-输出转矩曲线图, 表明 SRM 在起动时有着较大的起动转矩, 符合车辆大起动转矩的要求。



图 1 SRM 模型图

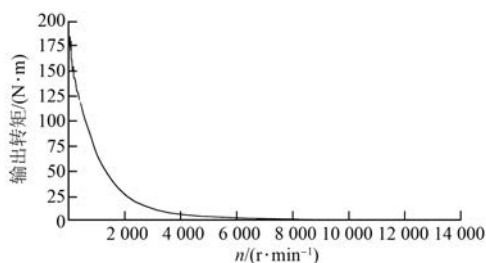


图 2 转速-输出转矩曲线

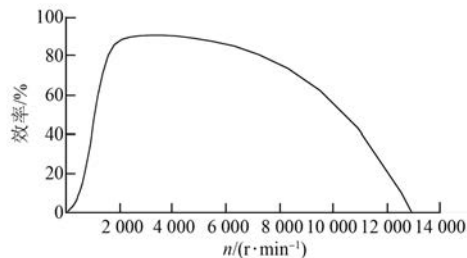


图 3 转速-效率曲线

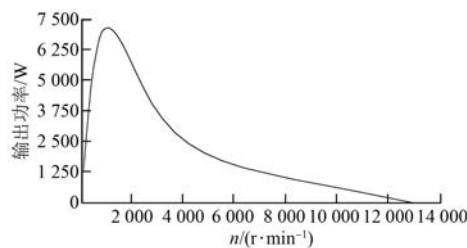


图 4 转速-输出功率曲线

从图 3、图 4 可以看出, 当 SRM 运行在额定条件下时电机的效率、输出功率都符合电动车的设计要求, 表明了电机前期参数设计正确。

2.2 在静磁场中的仿真

图 5(a)~(d)给出了 SRM 在额定电流下,转子位置角分别为 0°、15°、30°、45°时的磁力线分布图。

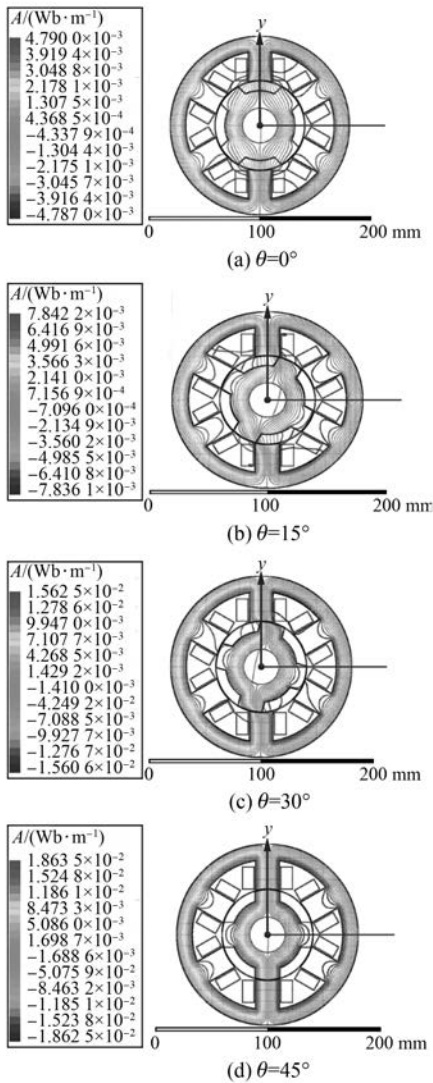


图 5 单相励磁 SRM 磁力线分布图

图 6 所示为 SRM 在一个转子齿距内,电流为 0~90 A 时的转矩曲线。图 7 为 SRM 电感特性曲线。当转子位置角在 0°~45°时,转矩为正,转矩随电流的增大而增大,对应图 7 中的电感上升区;当转子位置角在 45°~90°时,转矩为负,转矩亦随电流的增大而增大,对应图 7 中的电感下降区。

图 8 为 SRM 的磁化曲线簇。当转子位置角较小时,磁路不饱和,随着转子位置角增大,磁路的饱和程度逐渐增加。

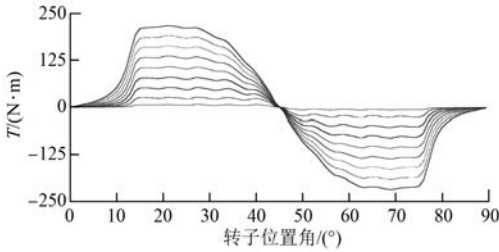


图 6 矩角特性曲线

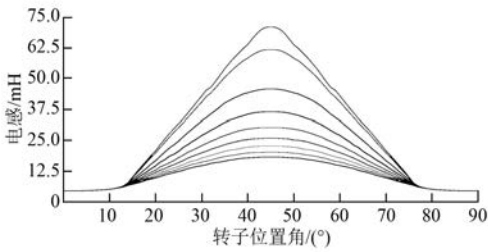


图 7 电感特性曲线

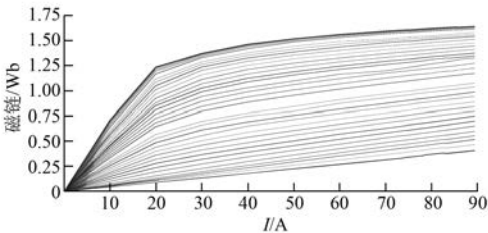


图 8 磁化特性曲线

2.3 在瞬态场中的仿真

图 9 为电机网格剖分图,为了提高气隙磁密的计算准确度,气隙部分网格剖分较密。图 10 为电机转矩波形图,表明 SRM 具有较大转矩脉动。

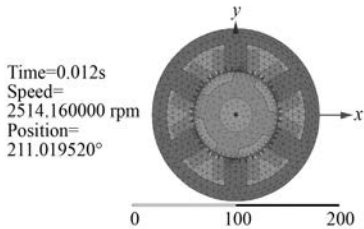


图 9 SRM 网格剖分图

图 11 为 SRM 在导通区为-2°~28°时三相电流波形,绕组通电后,电流迅速上升,在电感的下降区续流电流较小。

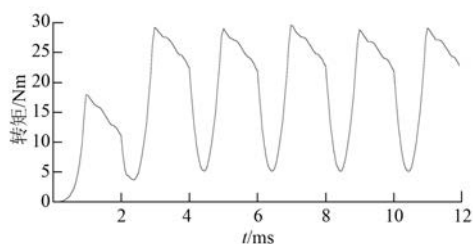


图 10 SRM 转矩波形图

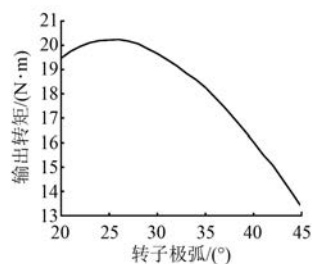


图 13 转子极弧-输出转矩

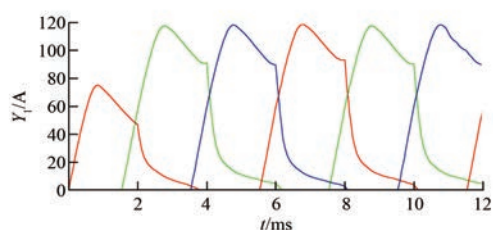


图 11 SRM 三相电流波形图

3 SRM 主要结构尺寸优化

为了满足 SRM 能自启动的要求^[7],应满足如下条件:

$$\begin{cases} \beta_s \geq \frac{4\pi}{N_s N_r} \\ \beta_r \geq \beta_s \end{cases} \quad (5)$$

对于三相 6/4 结构的电机,定子极弧最小为 30° ,转子极弧大于定子极弧。

图 12、图 13 为不同定、转子极弧时的输出转矩曲线。

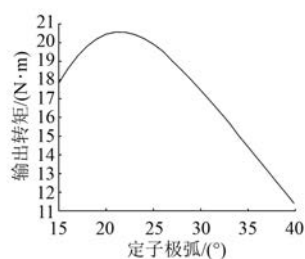


图 12 定子极弧-输出转矩

由图 12 可知,定子极弧在 22° 左右时输出转矩最大,定子极弧大于 22° 之后输出转矩呈下降趋势。图 13 表明转子极弧在 26° 左右,输出转矩为最大,转子极弧大于 26° 之后输出转矩呈下降趋势。

考虑到电机的自启动要求,SRM 中确定定、转子极弧分别为 30° 、 32° 。此时输出转矩能达到额定转矩,满足电动车自启动及额定转矩的要求。

图 14、图 15 为不同定、转子轭高时的输出转矩曲线。

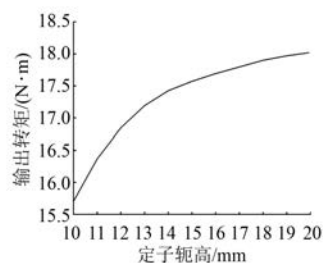


图 14 定子轭高-输出转矩

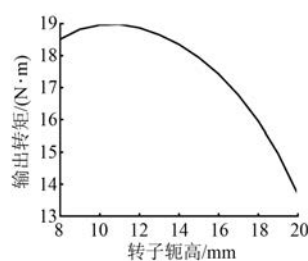


图 15 转子轭高-输出转矩

定子轭高增大,则电机外径增大,由图 14 可知,输出转矩随定子轭高的增加而增加,定子轭高小于 14.5 mm 时输出转矩增幅较大,定子轭高大于 14.5 mm 时输出转矩增幅较小。为了得到较大的转矩密度,定子轭高的优化值取 14.5 mm。

由图 15 可知,在转子外径一定的情况下,转子轭高在 11 mm 左右,输出转矩最大。表 2 为优化后 SRM 结构参数。

表 2 优化后 SRM 结构参数			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
功率/kW	4.5	定子极弧/(°)	30
铁心长度/mm	98	定子轭高/mm	14.5
转速/(r·min ⁻¹)	2 500	转子外径/mm	82
气隙/mm	0.3	转子内径/mm	32
电压/V	60	转子极弧/(°)	32
定子外径/mm	163	转子轭高/mm	11

4 结 语

本文根据电动车的性能要求,提出了 SRM 电机的设计及优化方法:

(1) 对 SRM 进行了预设计;

(2) 利用 Ansoft 软件对 SRM 进行了静态及瞬态仿真,得到了 SRM 的性能曲线,验证了预设计的准确性;

(3) 对 SRM 的主要尺寸进行了优化,得到了优化值。

【参 考 文 献】

[1] 王宏华.开关磁阻电动机调速控制技术[M].北京:

机械工业出版社,2014.

[2] 陈坤华,孙玉坤,孙智权,等.混合动力汽车用开关磁阻电机设计[J].电源技术,2015,39(5): 994-996.

[3] 韩帅,王艳,殷天明.电动汽车用外转子开关磁阻电机设计与控制系统仿真[J].电机与控制应用,2013,40(10): 45-49.

[4] 宋受俊,葛乐飞,刘虎成,等.开关磁阻电机设计及多目标优化方法[J].电工技术学报,2014,29(5): 197-204.

[5] 凌岳伦,王勉华,王岩,等.基于 Ansoft 开关磁阻电机建模与控制策略的仿真研究[J].电机技术,2010(2): 20-23.

[6] KABIR M A, HUSAIN I. Design of mutually coupled switched reluctance motors (MCSRMs) for extended speed applications using 3-phase standard inverters [J].IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(2): 436-445.

[7] 徐新明,卞永明,杨濛,等.15 kW 开关磁阻电机调速系统仿真与测试[J].自动化仪表,2015,12(36): 23-27+30.

收稿日期: 2016 -12 -12

(上接第 105 页)

3 结 语

基于传统传递矩阵法,针对汽轮发电机复杂转子系统结构来进行分析,采用刚性轴和带惯量的质量点的等效方法来进行处理,并利用 SolidWorks 进行数值处理,实现了对汽轮发电机转子系统的临界转速计算。该方法经过多组案例分析验证了其实用性和准确性,并在其他更为复杂的转子系统进行了推广应用。

【参 考 文 献】

[1] 朱常兴,王殿友,朱常权,等.传递矩阵法与有限元计算电机转子临界转速的对比分析[J].电机与控制应用,2015,42(1): 57-60.

[2] 闻邦椿,顾家柳,夏松波,等.高等转子动力学[M].北京:机械工业出版社,1999.

[3] 卢露,刘德志,魏克银.各向同性支撑结构转子的临界转速研究[J].船电技术,2007,27(5): 269-272.

[4] 郑龙席,李晓丰,秦卫阳.计算转子临界转速的两种方法及对比分析[J].风机技术,2009(6): 35-38.

[5] 李育锡,王三民.改进整体传递矩阵法计算复杂转子系统临界转速[J].航空动力学报,2005,20(3): 413-417.

[6] 屈维德,唐恒龄.机械振动手册[M].北京:机械工业出版社,2000.

[7] 钟一钊.转子动力学[M].北京:清华大学出版社,1987.

收稿日期: 2016 -07 -12