

小功率 18/24 结构开关磁阻电机仿真研究

顾俊,刘闯,王云林,吴玉飞

(南京航空航天大学自动化学院,江苏南京 210016)

摘要:开关磁阻电机已用于电动汽车上,但运用在小功率的电动自行车上还不多见。文中主要对比了两种结构方案,分别为三相 36/24 结构电机和 18/24 结构电机。提出的两种电机结构均为外转子,既配合轮毂电机的安装,又可以在有电机外径限制下增大气隙直径和电机出力。基于 Ansoft Maxwell2D 的有限元场路一体化分析,建立了电机性能仿真模型。在得出磁化曲线族的基础上,通过数值计算,计算和分析不同结构方案下 SRM 起动转矩、电机出力、效率以及过载能力,结果 18/24 综合性能更优,选择三相 18/24 结构 SRM 作为最终方案,并对其进行了结构优化。最后得出结论:通过仿真研究,18/24 结构电机可以满足电动车的各种性能指标。

关键词:开关磁阻电机;有限元;外转子

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)08-0141-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.036

Research of Low-power 18/24 Switched Reluctance Motor Simulation

GU Jun, LIU Chuang, WANG Yun-lin, WU Yu-fei

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Switched reluctance motor has been used in electric cars, but used in low-power electric bicycle is not too much to see. Compare the two kinds of structures, three-phase 36/24 structure motor and 18/24 structure motor respectively. The two kinds of motor structures are outer rotor, not only can fit hub motor installation, but also can increase air gap diameter and motor output under limited diameter. Based on Ansoft Maxwell2D finite element field analysis, establish the motor performance simulation model. Based on the magnetization curves, through the numerical calculation, calculate and analyze the starting torque, motor output, efficiency and overload capacity in the different structures, then choose three phase 18/24 SRM as a final project, and analyze the structure optimization. Conclusion is obtained that through the simulation, 18/24 structure can satisfy all kinds of electric motor performance.

Key words: switched reluctance motor; finite element; outer rotor

0 引言

电动车采用电机作为其主要原动力有许多优点:零排放,高效率,不使用化石燃料,低噪,平滑运行。作为绿色环保交通工具的电动车,未来发展潜力和发展空间无可限量。

目前国内电动自行车采用的驱动电机主要是低速永磁无刷直流轮毂式电机。无刷直流电机(BLDC)由于没有电刷,不会产生电刷磨损等疲劳问题,故不需要更换电刷这个维护工作,而且电机工作噪声小。因此,其工作高效可靠、维护简单,可实现宽转速范围内的平滑调速,但控制系统相对复杂,成本高。开关磁阻电机(简称 SRM)系统与 BLDC 系统有相似特性,同样拥有

优秀的驱动能力和效率^[1-3]。

开关磁阻电机本体为双凸极结构,依靠凸极效应工作,转子励磁无需永磁,更不需要电刷和换向器,结构简单坚固,驱动控制与 BLDC 类似,需要位置闭环,属于方波控制,调速简单有效,可采用 PWM 调压调速,实现平滑运行^[4-6]。

开关磁阻电机作为一种拥有低速大转矩特点的电机,尤其适用于电动车驱动场合。SRM 在大功率的电动汽车已研制成功,在小功率的低速场合应用仍有待开发,比如电动自行车。

SRM 可控参数多,调速性能好,主要控制参数有开通角、关断角、相电流幅值以及电源电压,低速时采

收稿日期:2012-11-08

修回日期:2013-02-20

网络出版时间:2013-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(509770744)

作者简介:顾俊(1984-),男,硕士,研究方向为电机本体设计与电机驱动控制;刘闯,博士生导师,研究方向为开关磁阻电机、高效新能源发电机等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1553.002.html>

用电流斩波控制 (CCC), 高速时采用角度位置控制 (APC)。传统 SRM 的 APC 主要以单相自感随转子位置角的变化率来实现机电能量转换, 这样相间控制独立可靠^[7-9]。

一般来说开关磁阻电机要求定子齿数多于转子齿数, 这样可以减少每相绕组的开关频率, 减少损耗, 但考虑到侧重于减小转矩脉动, 从而控制电机的噪声影响, 也可以采用转子齿数多于定子齿数。转子齿数多于定子齿数的电机起动转矩死区也会小, 所以选取 18/24 结构的开关磁阻电机作为样机, 但是作为定子齿数少于转子数的 18/24 结构的开关磁阻电机, 铁心中频率变高, 铁损也会相应变大^[10]。

1 结构方案

考虑到对 SRM 性能影响较大的结构参数主要有定子外径、转子外径、铁芯长度、气隙大小和定转子极弧大小, 而电机外径和轴长有所限制, 所以优化主要从相数、定子结构和尺寸、转子结构与尺寸、极弧系数对于电机性能的影响。对于常规的 SRM 设计, 定转子极数、极弧选择应满足^[11]:

- 1) 电机具有正反转的自起动能力。
- 2) 增大最大电感 L_{\max} 与最小电感 L_{\min} 比值。
- 3) 减小相间互感。

文中提出三相 18/24 结构和 36/24 结构两套方案, 均为外转子结构 SRM。

2 基于 Ansoft 的有限元仿真

根据 SRM 的设计指标, 应用 SRM 电磁设计的经验, 对主要结构参数进行了前期设计, 然后利用有限元软件, 进行分析校核, 多次调整设计参数, 最后获得优化的结果^[12]。

2.1 前期设计

SRM 常类于异步电机的参数进行设计, 有关专著已经对其进行了论述。额定转速为 400r/min、额定功率为 350W、额定转矩为 8Nm、效率 $\eta = 75\%$ 为额定工作点。由于定转子极弧比的变化, 平均转矩和最大电感会发生很大变化。参考值应在 1.2 ~ 1.8 之间。

2.2 基于 Ansoft 的 SRM 模型

文中主要运用 Ansoft 机电系统中的 Rmxprt, Maxwell2D。Rmxprt 是电机初步设计软件, 里面含许多电机模型, 其中就有 SRM 设计模型。Maxwell2D 是一种集准确、易用、全面于一体的二维电磁有限元软件, 包括静电场、静磁场、涡流场、瞬态场, 可以分析电机、变压器等电磁装置稳态瞬态响应和工作特性。其中瞬态求解器可用于求解设计运动和任意波形的设备, 获得

精确的预测性能。该模块能同时求解电磁场及运动等强耦合的方程, 可以解决上述复杂装置的性能分析。

Maxwell 的具体过程为: 创建二维模型, 包括软件中创建或者从其他软件中导入有限元模型, 赋予材料属性, 添加绕组; 设置边界条件, 剖分网格; 设置外电路; 后处理, 计算分析结果^[13]。

文中在 Maxwell 中建立了 SRM 电机有限元模型, 以 18/24 为例, 建立外电路模型, 通过软件设置将外电路中绕组和有限元中线圈耦合起来, 进行电磁分析。

在得到电机单相磁化曲线族的基础上, 可以根据 SRM 的数学模型中的电压方程和转矩方程, 通过电路和磁路的耦合来计算电机的稳态性能。采用不对称半桥作为主电路, 当主开关导通时, 电源给相绕组励磁; 当主开关关断后, 相电流通过二极管续流, 其电压方程如式(1)所示。

$$u = \frac{d\psi}{dt} + iR = \frac{\partial\psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\psi}{\partial\theta} \frac{d\theta}{dt} + iR \quad (1)$$

将有限元计算得到的电机磁链曲线族 $\psi = f(i, \theta)$ 作为输入量, 求解 $\partial\psi/\partial i$ 和 $\partial\psi/\partial\theta$, 进而通过数值计算求解式(1)构成的 SRM 数值模型, 可以得到 SRM 相电流的数值解。在完成相电流解析之后, 就可以对电机性能进行仿真分析。

2.3 三相 36/24 结构和 18/24 结构 SRM 的仿真对比

考察电机起动性能、额定点的效率和出力以及过载能力, 将三相 18/24 结构与四相 36/24 结构作对比, 确定样机最终采用的方案。首先需要在 Ansoft 中建立不同定转子模型, 通过有限元方法得到磁化曲线族, 然后通过上述数值模型, 得到两种方案性能对比。

图 1 为两种结构方案下, 通过有限元单相恒流仿真, 得到的对齐和不对齐位置的磁化曲线。图 2 为两种结构方案下, 不饱和电感变化曲线对比图。从图中可以看到, 18/24 结构最大和最小电感都比 36/24 结构大, 总体来讲 ΔL 较大, 单相一次充放电周期中, 磁共能变化和出力大。

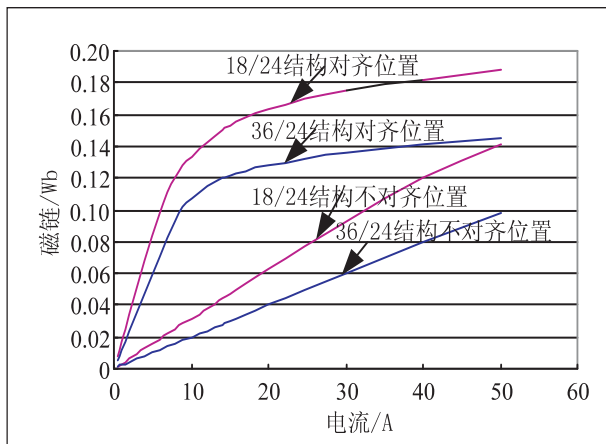


图 1 18/24 和 36/24 磁化曲线对比

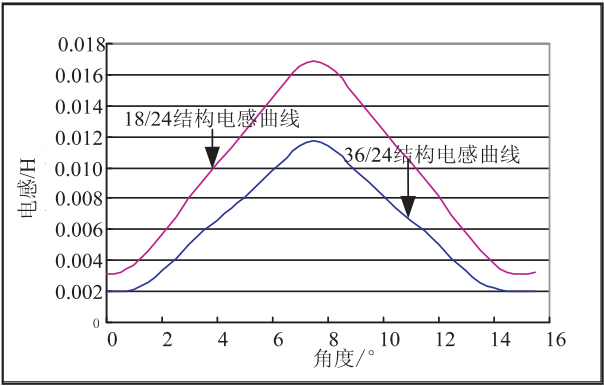


图 2 18/24 和 36/24 电感曲线对比

2.4 起动转矩和过载能力比较

作为车辆驱动用的电机,一般会处于频繁起动加速的工况下,因此电机的低速性能是考察其方案好坏的重要指标。

施加恒流 18A,每相半周期导通,得到两种方案各自静态起动转矩以及由此计算得到平均转矩,18/24 方案相比于 36/24 方案,静态起动转矩的平均值较大,转矩脉动较小,电机的起动性能较优。

一般情况下,SRM 在低速下采取斩波控制,通过对低速时的开通关断角以及斩波限参数的设定,得到了低转速下两种电机在额定载和倍载下的斩波限和效率曲线图,如图 3 和图 4 所示,18/24 所需要的斩波限更小,但效率相差不大,综合考虑,18/24 这种结构的电机更适合低速下频繁起动。

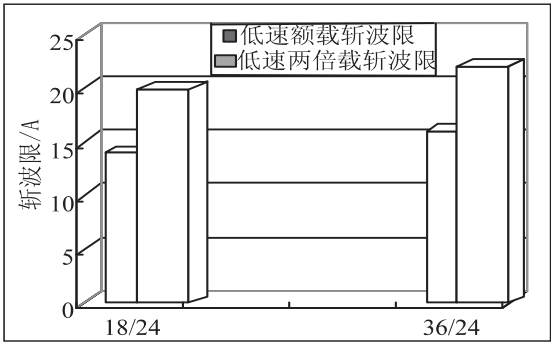


图 3 18/24 和 36/24 斩波限对比

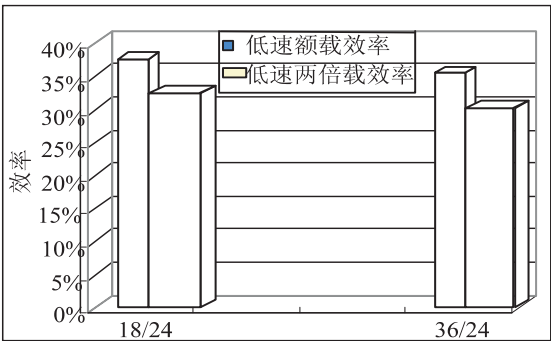


图 4 18/24 和 36/24 效率对比

2.5 电机额定工作点的效率比较

为了合理地比较两种方案电机的效率,需要在输

出相同的转矩条件下,进行对比分析。通过比较 18/24 结构具有更小的相电流峰值,有利于开关器件的选择。两种方案额定工作点仿真参数及其结构对比如表 1 所示。

表 1 两种方案额定工作点仿真参数及结果对比

	18/24 结构	36/24 结构
开通角/°	-2	-3
关断角/°	5	4
转矩/Nm	7.44	7.41
相电流有效值/A	13.5	15.7
效率	67.7%	62.1%

仿真主要针对额定点,每相半周期导通。在供电电压 48V,额定转速 400rpm 下,开通角相对于相自感最小值位置提前 1°到 4°,每相半周期导通,不设斩波限。

18/24 结构的电机不仅比 36/24 结构出力大,而且效率还比后者高,究其原因,可以从图 1,2 中看出,三相 18/24 结构的开关磁阻电机 $\partial L/\partial \theta$ 值最大,在输出转矩相同的条件下,根据公式 $T = 0.5 \times i^2 \times \partial L/\partial \theta$,电流最小,对应的绕组铜损就小,损耗就小。还有考虑到后者槽满率大,导线布线会紧张,铜的损耗大。

综上所述,文中对于开关磁阻电机已有一定的研究基础和实践经验,本研究拟采用三相 18/24 开关磁阻电机。

2.6 18/24 结构电机的优化

不同定转子极宽对于 SRM 平均电磁转矩、起动能力以及转矩脉动的影响不同。对于定子而言,定子极宽和槽面积的大小分布,体现了电机铁与铜的博弈关系。目前 SRM 定子齿常采用带极靴结构,此种方法可以在不牺牲电机出力的情况下,有效提高槽面积大小,可以提供更多的砍线空间,减小绕组电阻和铜损。

三相 18/24 结构方案中,三种不同定子齿极尺寸结构,分别是小极宽、大极宽、小极宽带极靴。

通过 SRM 基本磁化曲线解析分析可以得到,在相同的绕组匝数下,小极宽具有较小的 L_{\max} 与 L_{\min} ,大极宽具有较大的 L_{\max} 与 L_{\min} ,小极宽带极靴则相对于小极宽应具有略大的 L_{\max} 与 L_{\min} 。分别建立三种定子齿结构的有限元模型,仿真得到不饱和电感曲线如图 5 所示。

有限元结果与静态定性分析得到了相同的电感曲线结果,分析电感曲线可知,在相同供电情况下,小极宽相比于大极宽、小极宽带极靴有更高的电流脉冲,这是因为当定子齿宽变小时,无论在最大电感位置、最小电感位置亦或是中间位置,定转子间相对气隙变大,而气隙增大时,磁路磁阻变大,电感变小,电感对电流变

化抑制作用减小,相电流的变化率变大,电流上升变快,脉冲值更高。根据公式(2)

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (2)$$

可知,由于相电流幅值更大,小极宽具有更高的合成转矩,定子齿宽越小,对电机出力就会越有利。但是,这只是考虑了电机出力,没考虑效率、起动转矩以及转矩脉动等问题。

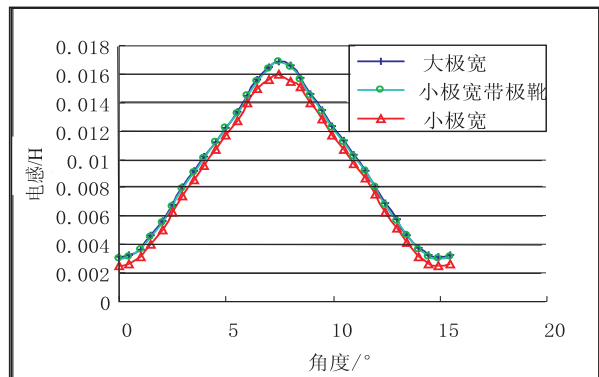


图 5 三种不同齿结构电感曲线

3 结束语

通过起动转矩及过载能力比较,以及电机额定工作点效率比较和效率曲线比较,可以看出,三相 18/24 结构方案相比于三相 36/24 结构方案,综合性能更具有优势。在选择 18/24 结构方案基础上,对电机结构进行定子齿形优化,最后采用带极靴的定子齿结构,此种结构具有起动能力、电机出力、效率等方面的综合优势。文中采用的轮毂电机轴长较短,端部电阻占据比较大,造成铜耗过大,系统效率下降。此外,此电机端部电感对电机性能有较大影响,暂未考虑。综上所述,文中采用三相 18/24 结构 SRM 作为样机方案。

参考文献:

[1] Kalan B A, Lovatt H C, Prout G. Voltage control of switched

reluctance machines for hybrid electric vehicles [C]//PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. [s. l.]: [s. n.], 2002: 1656-1660.

[2] Uematsu T, Wallace R S. Design of a 100 kW switched reluctance motor for electric vehicle propulsion [C]//Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. [s. l.]: [s. n.], 1995: 411-415.

[3] 刘迪吉. 开关磁阻调速电动机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[4] Ahn Jin-Woo, Oh Seok-Gyu, Moon Jae-Won, et al. A three-phase switched reluctance motor with two-phase excitation [J]. IEEE Trans. on IA, 1999, 35(5): 1067-1074.

[5] 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: 110-112.

[6] 樊小明, 朱学忠, 刘迪吉. 新型四相关关磁阻电机主电路研究 [J]. 电力电子技术, 1997(2): 6-8.

[7] 詹琼华, 吴莹, 郭伟. 开关磁阻电机绕组连接方式的研究 [J]. 电机与控制学报, 2002, 6(2): 93-95.

[8] Zhang Dong, Dong Lei, Qin Ming, et al. Winding Structure of Switched Reluctance Motor Based on Three-Phase Bridge Converter and Its Influence on Torque Ripple [C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics. [s. l.]: [s. n.], 2010: 626-630.

[9] 周涛, 詹琼华, 王双红. 电动自行车用经济型开关磁阻电动机驱动系统 [J]. 微特电机, 2006(5): 24-26.

[10] Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications [M]. [s. l.]: CRC Press, 2001.

[11] 曹志亮, 冬雷, 朱学忠. 电动摩托车用开关磁阻电机控制策略研究 [J]. 微电机, 2000, 33(6): 13-15.

[12] 王长华, 王秩雄, 宋爱民. 一种超宽带天线的分析设计 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(3): 193-195.

[13] Wang Xilian, Zhang Yihuang, Wang Xudong. Optional-angle Controller of Switched Reluctance Motor Based on EPROM [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems. [s. l.]: [s. n.], 2001: 600-603.

(上接第 132 页)

[9] Chien Hung-Yu, Huang Chenwei. A Lightweight Authentication Protocol for Low-Cost RFID [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2010, 59(1): 95-102.

[10] Phan R C W. Cryptanalysis of a New Ultralightweight RFID Authentication Protocol-SASI [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2009, 6(4): 316-320.

[11] Rizomiliotis P, Rekleitis E. Security Analysis of the Song-Mitchell Authentication Protocol for Low-cost RFID Tags [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(4): 274-276.

[12] Yoon Eun-Jun, Yoo Kee-Young. Two Security Problems of RFID Security Method with Ownership Transfer [C]//Proc. of

IFIP International Conference on Network and Parallel Computing. China, Shanghai: [s. n.], 2008: 68-73.

[13] Erguler I, Anarim E. Attacks on an Efficient RFID Authentication Protocol [C]//Proc. of 10th IEEE International Conference on Computer and Information Technology. Bradford: [s. n.], 2010: 1065-1069.

[14] Kang Soo-Young, Lee Im-Yeong. A Study on New Low-Cost RFID System with Mutual Authentication Scheme in Ubiquitous [C]//Proc. of IEEE International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering. Busan: [s. n.], 2008: 527-530.

小功率18/24结构开关磁阻电机仿真研究

作者：[顾俊](#)，[刘闯](#)，[王云林](#)，[吴玉飞](#)，[GU Jun](#)，[LIU Chuang](#)，[WANG Yun-lin](#)，[WU Yu-fei](#)

作者单位：[南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京, 210016](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

ISTIC

年，卷(期)：2013(8)

本文链接：http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201308036.aspx