

基于不同电机极对数对开关磁阻电机性能的影响研究

孔庆奕^{1,2}, 容焱¹, 李艳超¹, 刘尚合², 王福星³, 齐文达¹, 骆志昆¹

(1. 河北交通职业技术学院 轨道交通系, 河北 石家庄 050035;

2. 陆军工程大学 电磁环境效应国家级重点实验室, 河北 石家庄 050003;

3. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180)

摘要: 针对电机本体结构的改变可能会引起的电机性能的变化, 采取实验研究法对两种额定参数相同的四相 8/6 极和四相 16/12 极相同功率不同结构的开关磁阻电机 (SRM) 进行实验研究。对两种不同极数结构 SRM 的绕组自感、互感、转矩大小及脉动影响和绕组电流等方面进行了电磁仿真分析。结果表明: 8/6 极开关磁阻电机与 16/12 极相比, 前者具有各相绕组自感值大、互感值大、转矩大等优点, 后者具有转矩脉动小的优点。此项研究对 SRM 电机本体设计和 SRM 的选型具有重要的指导意义。

关键词: 开关磁阻电机; 结构参数; 电机性能

中图分类号: TM933 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19437

Research on Performance of Switched Reluctance Motor Based on Different Motor Poles

KONG Qingyi^{1,2}, RONG Ye¹, LI Yanchao¹, LIU Shanghe², WANG Fuxing³, QI Wenda¹, LUO Zhikun¹

(1. Department of Urban Mass Transit, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang

050035, Hebei, China; 2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment Effect,

Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, Hebei, China; 3. Tianjin Research

Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

Abstract: Aiming at the change of motor structure may cause the change of motor performance, the experimental study was carried out on two kinds of switched reluctance motor (SRM) with the same power of the four phase 8/6 pole and four phase 16/12 pole with the same rated parameters. Electromagnetic simulation analysis of self-inductance, mutual inductance, torque and pulsation effect and winding current of two different SRM windings was carried out. The results show that compared with 16/12 pole, 8/6 pole switched reluctance motor has large self-inductance value, large mutual inductance value, large torque, small torque ripple, small current and good performance. The research has important guiding significance for the design of SRM motor body and SRM selection.

Key words: switched reluctance motor (SRM); structural parameters; motor performance

开关磁阻电机 (SRM) 作为一种新兴的控制电机近年来得到了飞速的发展。SRM 结构简单、造价低、可靠性高, 并且具有优良的调速和启动性能, 在多个领域得到了广泛的应用, 例如航天领域、压缩机和电动汽车领域^[1-3]。但是, 由于 SRM 本身的双凸极结构特点, 使得电机在运行过

程中存在着较大的转矩脉动, 引起噪声过大, 造成噪声污染和电能损耗^[4]。因此, 采取何种措施解决转矩脉动过大的问题成为一个亟待解决的问题。以往的转矩脉动问题都是从控制策略入手分析, 而电机结构本身参数的改变 (例如电机极数的变化) 也会引起电机性能和转矩脉动的变

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51577048); 中国博士后 63 批基金项目 (2018M633754);

河北交通职业技术学院科学技术研究项目 (ZR2017-01)

作者简介: 孔庆奕 (1983-), 男, 博士, 副教授, Email: kongqingyi1983@163.com

通讯作者: 容焱 (1983-), 女, 博士研究生, 讲师, Email: 75944090@qq.com

化^[5]。本文通过仿真实验验证的方法分析了电机极对数不同对电机性能的影响。

1 电机极数结构的选择

在电机常见参数如额定电压、输出功率、转速等基本性能确定的前提下,电机内部采取何种结构形式才能使电机性能达到最佳状态?目前,针对开关磁阻内部电机结构的研究较少,内部设计尚未形成统一标准。

应用在电动汽车领域的SRM电机结构类型主要有4种类型:三相6/4极、三相12/8极、四相8/6极和四相16/12极^[6-9],文献[10]对三相6/4极开关磁阻电机调速系统(SRD)和四相8/6极SRD做了对比分析,研究表明,无论是用作电动机还是发电机,从提高电机单位体积容量及系统效率出发,开发和应用三相6/4极开关磁阻电机更有利^[4,11-13]。以上研究是针对相数不同的电机结构进行研究,对于相数相同但结构不同的开关磁阻电机目前还没有进行相关的研究^[13-14]。本文选取四相8/6极和四相16/12极两种SRM结构类型的电机进行仿真分析,分析电机极对数不同对SRM电机性能参数的影响。

2 两种SRM的结构参数和仿真建模

选取的两种极数不同结构电机均采用定子绕组四相制,为了更好地对比分析,两种电机结构参数基本一致,差别仅在于电机内部定转子的极数不同。设计两种电机,其中8/6极电机采取定子8极,转子6极;16/12极电机采取定子16极,转子12极。实验采取SRM电机具体参数如表1所示。

表1 两种SRM主要参数
Tab.1 Two main parameters of SRM

参数	电机结构	
	四相8/6极	四相16/12极
额定功率/kW	5	5
额定电压/V	72	72
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 100	6 100
定子外径/mm	155	155
转子外径/mm	85	86
定子齿宽/mm	14.09	6.59
转子齿宽/mm	18.54	9.21
铁心叠长/mm	102	102
第一气隙/mm	0.4	0.4
轴径/mm	32	32

应用 Ansoft 电磁仿真软件对两种电机进行建模仿真,结构示意图如图1所示。

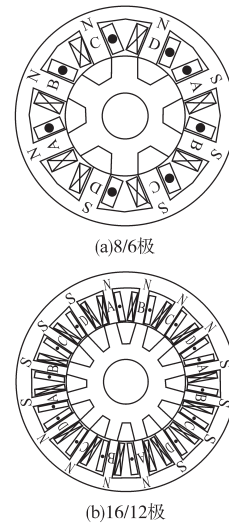


图1 四相8/6极结构和四相16/12极结构
Fig.1 Four-phase 8/6 pole structure and four-phase 16/12 pole structure

3 实验结果对比分析

在 Ansoft 电磁仿真环境中,输入电机必要的参数,创建电机模型对两种不同结构的SRM进行数值仿真分析,对两种极数不同结构的SRM电机的绕组自感、互感、转矩大小和绕组电流进行对比。

3.1 绕组自感的比较

通过仿真软件测量出两种SRM电机的各自自感特性曲线,如图2所示。

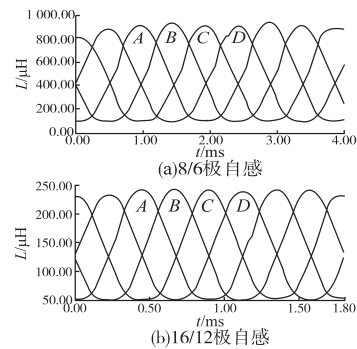


图2 自感特性曲线

Fig.2 Self-inductance characteristic curves

由图2可知,两种极数不同结构电机,每相绕组的自感变化规律基本趋于一致,但自感幅值差别较大。以A相绕组为例进行说明,两种结构的电机A相自感参数测定值如表2所示。

由表2的数据可以看出,参数相同但电机极对数不同的两种开关磁阻电机的自感值相差较大,最大值相差近670 mH,自感最小值相差也

近 53 mH。电机的转矩和自感的变化率成正比,8/6极电机的自感变化率是16/12极的2倍多。

表2 两种结构自感参数比较(A相)

Tab.2 Comparison of two structural self-inductance parameters (A phase)

电机结构	$L_{\max}/\mu\text{H}$	$L_{\min}/\mu\text{H}$	$L_{\text{avg}}/\mu\text{H}$	自感变化率/%
8/6	913.2	103.7	449.3	9.2
16/12	241.2	50.6	129.6	4.5

造成自感值相差的原因主要和磁力线路径与电机结构本身相关。首先,对于最大自感值而言,电感大小取决于磁链和电流。图3是16/12极和8/6极两种不同极数结构电机在自感最大值时的自感回路,前者的每极匝数和极宽均减小1倍,理论上分析会导致最大自感值16/12极只有8/6极的25%,如表2所示,计算仿真数值也验证了这一结论。对于最小自感值而言,理论分析16/12极的自感数值也应该为8/6极的25%,但是如表2所示,16/12极和8/6极最小自感的差值不再遵循25%原则,而是前者最小自感值约为后者的50%。造成最小自感值差异的变化不仅和结构参数有关,而且与磁力线的路径有很大关系。在自感最小时,定、转子的磁极完全不重合时,定、转子之间气隙值很大,气隙在整个磁路中所占磁阻值很大,磁势大部分都消耗在气隙上,造成整个磁路的磁饱和程度较低,16/12极和8/6极两种不同极数结构的电机气隙磁路路径近乎相同,因此造成两种不同结构电机的最小自感值差别不再遵循25%原则,而是相差将近50%。

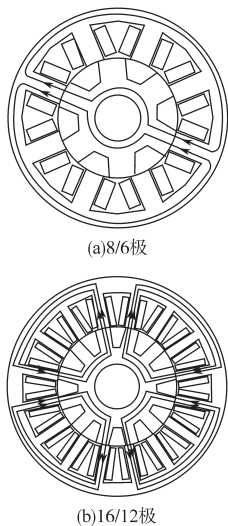


图3 最大自感回路

Fig.3 Maximum self-inductance loop

3.2 绕组间互感的比较

开关磁阻电机在正常工作时,相邻两相绕组会依次通过励磁电流,但是在换相期间,相邻两相绕组间会同时导通,导通时间将近 15° 电角度,因此在相邻导通两相会产生互感,非相邻两相之间同时导通时间很短,因此互感值可以忽略不计。

图4是8/6极和16/12极两种磁极不同结构的SRM电机的互感特性曲线。可以看出,不同结构的互感曲线差别很大,没有规律可言。在数值上,不同结构的SRM电机互感幅值差别较大,而且出现了负值情况。为了更加清晰地分析互感对自感的影响,现将两种不同结构的SRM的A、B两相的互感和A相的自感值进行比较,如表3所示。

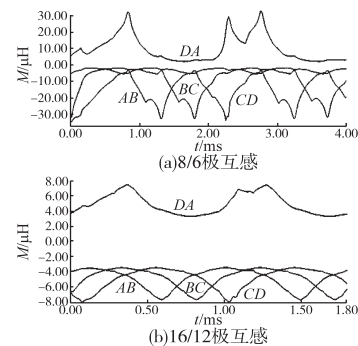


图4 互感特性曲线

Fig.4 Mutual inductance characteristic curves

表3 两种结构互感参数比较(A相、B相)

Tab.3 Comparison of two structural mutual inductance parameters (A, B)

电机结构	A, B相间互感/ μH			A相自感/ μH		
	M_{\max}	M_{\min}	M_{avg}	L_{\max}	L_{\min}	L_{avg}
8/6	31.8	2.1	9.5	913.2	103.7	449.3
16/12	7.6	3.1	4.7	241.2	50.6	129.6

从表3可以看出,两种结构SRM的互感值差别较大,其中对于互感平均值而言,8/6极电机是16/12电机的2倍,并且前者的平均值占到自感平均值的2.16%,后者的互感平均值为其自感平均值的4%左右。对于互感最大值来说,8/6极SRM是16/12极SRM的4倍,而最小互感值两种电机差别不大。

3.3 转矩和脉动系数的大小比较

电机的转矩和脉动系数是衡量电机性能的两个重要参数。转矩越大,电机做功能力越强;转矩越小,会出现电机效率低下甚至带不动物体的问题。所以,转矩的大小对传动轴载荷的确定与

控制、传动系统工作零件的强度设计以及原动机容量的选择等都具有重要的意义。转矩脉动系数也严重影响着电机性能,脉动系数越大,电机的噪声越大。从电机的优化设计考虑,希望电机的转矩大,同时脉动系数小。应用电磁仿真软件,对两种不同结构的SRM电机进行数值仿真,得到如图5所示的两种电机的转矩特性曲线。

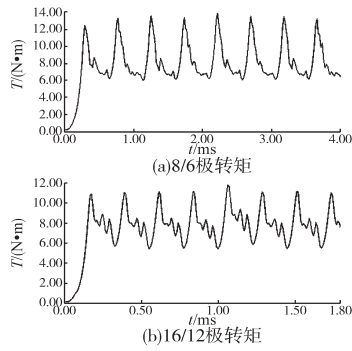


图5 四相8/6极与四相16/12极SRM转矩曲线
Fig.5 SRM torque curves of four-phase 8/6 pole and four-phase 16/12 pole

由图5可知,8/6极SRM的转矩平均值约为8.21 N·m,转矩介于5.83~12.02 N·m之间。16/12极SRM平均转矩约为7.96 N·m,转矩介于5.87~11.85 N·m之间。整体来看,两种结构电机转矩差别不大,8/6极电机的转矩性能略高于16/12极电机。

电机转矩的脉动系数 k 是指转矩波动的最大转矩 T_{max} 和最小转矩 T_{min} 的转矩幅值差与平均转矩 T_{avg} 的比值,如下式:

$$k = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (1)$$

由式(1)看出, k 和转矩幅值差相关,转矩幅值差越大,产生的电机脉动也就越大,相应的电机噪声也就越严重。由图5可知,8/6极的转矩最大最小差值约为7.19 N·m,脉动系数 k_1 为0.87。16/12极转矩幅值差值约为5.74 N·m,脉动系数 k_2 为0.72。两种电机定转子之间磁极重叠面积比例不同造成了转矩幅值的差异,面积重叠的比例越高,转矩幅值差就越小,脉动系数也就相应的降低,16/12极与8/6极SRM相比脉动系数 k 减小约17.2%左右,利于降低电机振动噪声,但是后者与前者相比转矩也相应减小了20%。所以16/12极SRM电机脉动系数比8/6极SRM小,噪声性能改善,但是转矩也减小了,可以应用于对噪声要求较高,动力性能要求不高的场合。

3.4 绕组电流的比较

进一步考察两种结构SRM的定子绕组的电流特性曲线,如图6所示。由图6可以看出,8/6极SRM和16/12极SRM绕组电流波形基本趋势一致,这是由于两种极数不同SRM电机均采用定子绕组四相制连接方式,所以绕组电流趋于一致。但是二者相比较而言,明显8/6极电机要低于16/12极电机,这是由于两种电机的极数结构不同导致的绕组匝数和极宽不同。绕组电流值越小,对降低开关管的伏安容量越有利。

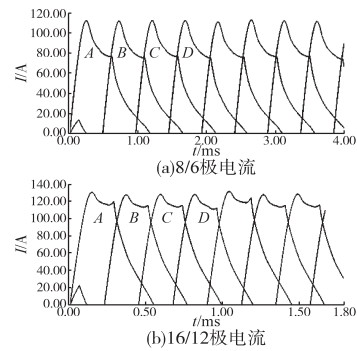


图6 绕组电流特性曲线
Fig.6 Winding current characteristic curves

4 结论

本文基于Ansoft电磁仿真软件对参数相同、定转子结构不同的两种8/6极和16/12极SRM进行了对比分析,得出如下结论:

1)两种电机磁极结构分布不同和参数设置的差异,导致两种SRM电机的自感大小不同,8/6极SRM与16/12极SRM相比,最大自感值相差较大,最小自感值差别较小,前者比后者自感率变化大;两种电机的自感变化规律基本趋于一致。

2)两种不同结构的SRM均会在换相期间产生互感,不同磁极结构的SRM互感特性曲线没有规律可言,并且8/6极的互感对自感影响小于16/12极磁极结构。

3)磁极结构的差异,造成定、转子之间重叠面积比例系数的差异,16/12极电机和8/6极电机相比,转矩差别不大,数值上前者略低于后者,但是脉动系数会相应减小,有利于电机的噪声控制。

4)8/6极SRM和16/12极SRM相比,绕组电流曲线趋于一致,电流的幅值和平均值,8/6极电机明显要低于16/12极电机。电流值越小,对降低开关管的伏安容量越有利,利于延长开关管使用寿命。

综上所述,定、转子磁极结构不同会对开关磁阻电机的性能产生一定的影响,上述研究成果为进一步深入开展SRM电机本体结构设计、提高转矩、降低转矩脉动、减小电机噪声等电机的优化设计奠定了基础。

参考文献

- [1] 祖层,孙玉坤,陈凯峰. 12/14混合定子磁悬浮开关磁阻电机磁链特性及磁链建模研究[J]. 电测与仪表,2014,51(17):42-48.
- [2] 何林,邢树华,高洁,等. 开关磁阻电机调速系统的建模与仿真[J]. 电测与仪表,2011,48(9):22-25.
- [3] 朱曰莹,赵桂范,杨娜. 电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化[J]. 电工技术学报,2014,29(11):88-98.
- [4] Vijayakumar K, Karthikeyan R, Paramasivam S, *et al.* Switched Reluctance Motor Modelling, Design, Simulation, and Analysis: A Comprehensive Review[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008,44(12):4605-4617.
- [5] Li W, Sheng M, Huo F. Optimal Design and Finite Element Analysis of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles [C]//2008 IEEE Vehicle Power Propulsion Conference, 2008: 1-5.
- [6] 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.
- [7] Pang Xianbai, Zhan Haijun, Wang Shuhong, *et al.* Flux Density Calculation of Air Gap for Switched Reluctance Motor Considering Magnetic Saturation Based on Sub-domain Method [J]. *Compel*, 2018,37(6):2081-2092.
- [8] Takemoto M, Chiba A, Akagi H, *et al.* Radial Force and Torque of a Bearing Less Switched Reluctance Motor Operating in a Region of Magnetic Saturation [J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2004,40(1):103-112.
- [9] 林委,严欣平,黄嵩,等. 8/6极开关磁阻电机磁极分布与电感参数研究[J]. 微电机,2014,47(8):7-10.
- [10] 蒯松岩,汤锐智,马金洋,等. 基于电感模型的开关磁阻电机参数优化[J]. 电工技术学报,2015,30(7):97-104.
- [11] 马霁旻,王杜,曲荣海,等. 基于有取向硅钢的轴向磁通开关磁阻电机准三维解析分析与设计[J]. 电工技术学报, 2018,33(17):4069-4077.
- [12] 吴红星,张志鑫,吴键,等. 三相开关磁阻电机新型结构[J]. 微电机,2017,50(2):77-83.
- [13] 孙健,刘闯,卿湘文. 6/2结构高速开关磁阻电动机设计研究[J]. 微电机,2007,40(5):21-24.
- [14] 张懿,章玮,姚叔春. 基于高频脉冲注入法的开关磁阻电机转子初始位置判定研究[J]. 机电工程,2018,35(7):755-759.

收稿日期:2018-08-22

修改稿日期:2018-10-24