

文章编号:1008-1534(2014)01-0020-04

# 三相 12/8 极高压开关磁阻电机设计及仿真

赵远征,李 斌,刘志忠,孙会琴

(河北科技大学电气工程学院,河北石家庄 050018)

**摘要:**根据开关磁阻电机的工作原理及结构,简要概述了电机参数设计方法、注意事项及步骤,给出了一台 12/8 极高压开关磁阻电机实验样机参数,利用 Ansoft/Maxwell 软件对电机参数进行了二维全场域的有限元分析和计算。得出了转矩脉动、绕组电流等波形以及电机磁力线分布、磁通密度云图分布。仿真结果和实验结果验证了参数设计方法的正确性,为今后开关磁阻电机的改进和优化提供了依据。

**关键词:**高压开关磁阻电机;电机设计;有限元分析

中图分类号:TM352 文献标志码:A doi: 10.7535/hbgykj.2014yx0105

## Design and simulation of extra-high voltage switched reluctance motor with three-phase 12/8 poles

ZHAO Yuanzheng, LI Bin, LIU Zhizhong, SUN Huiqin

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

**Abstract:** According to the structure and working principle of switched reluctance motor, the paper provides motor data's design methods, announcements and steps. It presents prototype parameters of a 12/8 poles extra-high voltage-switched reluctance motor. Finite element analysis on the motor parameters was made by using Ansoft/Maxwell software. The waveforms of torque ripple, the winding current, the distributions of magnetic force and magnetic flux density contours were obtained. The simulation results and experimental results prove the parameter design method to be correct, which provides reference for optimization and improvement of the existing switched reluctance motor in the future.

**Key words:** extra-high voltage switched reluctance motor; motor design; finite element analysis

开关磁阻电机是 20 世纪 70 年代开始研制,80 年代迅猛发展起来的一种新型电机<sup>[1]</sup>,它具有结构简单、控制容易、高效节能、调速范围广、高容错性、

简单可靠及成本低等一系列优点。随着电力电子技术和控制技术的不断成熟,开关磁阻电机发展迅猛,在许多领域得到了广泛的应用。高压开关磁阻电机具有扭矩大、电流小、节能等优点,节能的高压电机将是以后电机发展的趋势。通过优化设计和完善控制策略,可以将开关磁阻电机的噪声及转矩脉动降到很小,使其可靠性大大提高。

### 1 开关磁阻电机工作原理及结构

开关磁阻电机具有可变磁阻回路,工作在持续开关的模式下,采用的是凸极定子和凸极转子形式,即双凸极结构。电机运行遵循“磁阻最小原理”——磁通总是沿磁阻最小的路径闭合。

收稿日期:2013-07-03;修回日期:2013-11-06

责任编辑:李 穆

作者简介:赵远征(1987-),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事电机与电器的智能控制方面的研究。

E-mail:251846492@qq.com

赵远征,李 斌,刘志忠,等.三相 12/8 极高压开关磁阻电机设计及仿真[J].河北工业科技,2014,31(1):20-23.

ZHAO Yuanzheng, LI Bin, LIU Zhizhong, et al. Design and simulation of extra-high voltage switched reluctance motor with three-phase 12/8 poles[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2014, 31(1): 20-23.

## 2 开关磁阻电机的本体设计

由于开关磁阻电机的结构特殊<sup>[2]</sup>,与传统的交流电动机有着根本的区别。因此,它的设计与常规电机的设计有很大不同。

### 1) 相数和极数的选择

由于磁阻电机结构的特殊性,为保证其能够连续旋转,开关磁阻电机的相数和定、转子齿极数之间要满足以下约束关系:

$$N_s = 2kq,$$

$$N_r = N_s \pm 2k,$$

式中:  $N_s$  为定子齿极数;  $N_r$  为转子齿极数;  $q$  为电机相数;  $k$  为正整数。

### 2) 电负荷和磁负荷的选择

开关磁阻电机具有高电负荷、低磁负荷的特点,电机的运行特性、效率、温升等与它们的选择有很大的关系。

电负荷:沿电枢表面单位周长的安培导体数。电负荷  $A'$  的定义式为

$$A' = \frac{qN_{ph}I}{\pi D_a},$$

式中:  $N_{ph}$  为每相绕组匝数;  $I$  为绕组中电流的有效值;  $q$  为电机相数;  $D_a$  为转子外径(由于气隙很小,用转子外径代替定子内径)。

$A'$  的取值一般为 15 000~50 000 A/m。

磁负荷:气隙表面单位面积的平均磁通量,磁负荷的定义式为

$$B_\delta = \frac{\phi}{\tau_r l_\delta},$$

式中:  $\tau_r$  为转子极距;  $l_\delta$  为电枢计算长度,与定、转子的位置有关,计算复杂,一般取  $105l_a$  ( $l_a$  是电机铁芯长度);  $\phi$  为  $\theta_{off}$  位置下的每极磁通。

$B_\delta$  的取值一般为 0.3~0.6 T。

### 3) 转子外径 $D_a$

$$D_a = \sqrt{\frac{6.1 \times k_i P_{em}}{B_\delta A k_m n \times 105 \lambda}},$$

式中:  $k_i$  为峰值电流系数,一般取值 0.48~0.51;  $k_m$  为等效方波电流系数,一般取值 0.62~0.81,  $k_m \leq 1$ ;  $n$  为额定转速。

### 4) 细长比

铁芯长度与转子直径之比被称为细长比<sup>[3]</sup>,即

$$\lambda = \frac{l_a}{D_a}.$$

$\lambda$  的大小对电机的性能指标和经济指标是有影响的。参考中小型交流电机的经验数据,  $\lambda$  一般为 0.5~3.0,极数越大,比值越大。对于开关磁阻电机,典型的取值为  $\lambda=1$ 。

### 5) 定、转子外径的比值

$$\frac{D_a}{D_s} = 0.4 \sim 0.7.$$

最常用的设计比值为

$$\frac{D_a}{D_s} = 0.5 \sim 0.55.$$

### 6) 气隙的选择

开关磁阻电机存在 2 个气隙。定、转子磁极表面之间空气隙的距离为第 1 气隙  $g$ 。定子磁极表面到转子槽底之间空气隙的距离为第 2 气隙  $g_i$ 。为获得较大的电磁转矩和输出功率,应尽可能减小  $g$ ,但是,考虑到电机的震动和噪声以及电机的加工和装配,气隙也不能太小,一般可取同容量异步电机的气隙。

### 7) 定、转子极弧 $\beta_s, \beta_r$ 的选择

开关磁阻电机定、转子极弧<sup>[4]</sup>对电机的性能影响较大,  $\beta_s, \beta_r$  的选择遵循以下要求:起动性能好,尽可能大的输出转矩,获得尽可能小的最小电感,减少漏磁,保证必要的绕组空间。所以  $\beta_s, \beta_r$  应满足

$$\frac{\pi}{q(q-1)} \leq \beta_s \leq \frac{\pi}{q};$$

$$\beta_s \leq \beta_r \leq \frac{\pi}{q(q-1)}.$$

定、转子有一个最优的取值范围:

$$\beta_s = (0.3 - 0.42) \tau_r;$$

$$\beta_r = (0.9 - 1.4) \beta_s.$$

式中  $\tau_r$  为转子极距,且  $\tau_r = \frac{D_a \pi}{N_r}$ 。

### 8) 轴径

$$D_i = D_a - 2(g_i - g) - 2h_{cr}.$$

样机设计参数见表 1。

表 1 样机设计参数

Tab. 1 Design parameters of prototype

参数	数值	参数	数值
功率/W	36	气隙/mm	0.4
电源电压/V	300	定子极弧/(°)	12
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 500	转子极弧/(°)	14
相数	3	定子轭高/mm	6
定子极数	12	转子轭高/mm	10
转子极数	8	铁心长度/mm	32
定子外径/mm	96	线径/mm	0.8
定子内径/mm	53.8	每极串联匝数	80
转子外径	53	并联支路数	1
轴径	17	每极并联根数	1

## 3 Ansoft Maxwell 软件有限元仿真

Ansoft Maxwell 是一个功能强大、结果精确、

易于使用的二维/三维电磁场有限元分析软件<sup>[5]</sup>。能够大大缩短设计周期,能够全面、系统地分析电机性能,显示出极大的优越性。

### 1) 电机模型的建立

目前的仿真绝大多数是利用专家模块进行初步仿真,然后再导入到 2D 模块。但是这种方法有它的局限性,专家模块不能按照设计者实际设计的电机模型进行仿真。要想得到准确、可靠的结果,需要设计者自己建立模型。

根据样机设计参数,通过 CAXA 绘图软件,建立电机模型并转换为 Maxwell 所支持的文件格式。启动 Ansoft 软件,新建 Maxwell 2D Design 工程,将建立好的电机模型导入。

### 2) 参数设置

根据任务栏的提示,依次完成求解器、运动模型、边界条件、激励源、网格剖分、分析条件的设置。设置完毕后进行设计仿真。通过 Maxwell 2D 瞬态模块,设计者可以得到电机磁场、转矩、电流、磁链、电感等特性曲线,帮助设计者改进设计参数。

## 4 仿真结果及分析

图 1 为在额定转速下输出转矩波形图,可以看出样机的转矩脉动<sup>[6]</sup>较大,因此,对转矩脉动的控制仍然是目前亟待解决的问题。

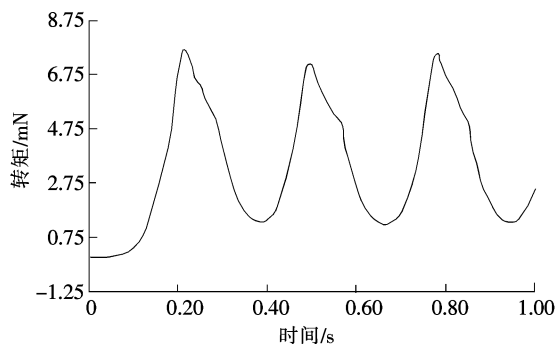


图 1 输出转矩波形图

Fig. 1 Output torque waveform figure

图 2 为绕组电流的波形。

图 3 为磁力线分布图,图 4 为磁通密度云图分布图。

由图 3 可知线圈通电时,定子槽和转子槽的边缘有略微的磁饱和现象,可以通过改进定、转子铁芯的设计来改善。

## 5 实验结果及分析

根据课题组研发的 1 台 4 kW/60 V 的开关磁

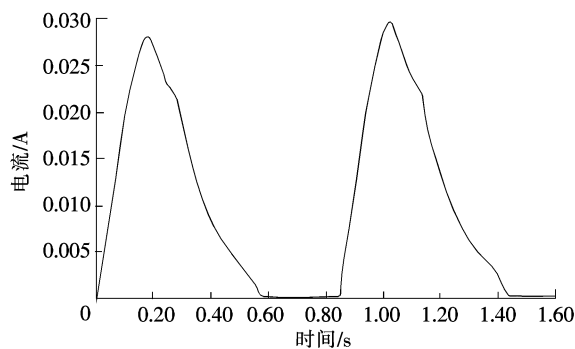


图 2 绕组电流波形图

Fig. 2 Winding current waveform figure

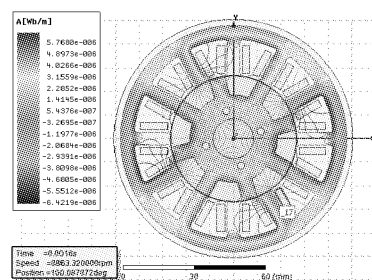


图 3 磁力线分布图

Fig. 3 Lines distribution of magnetic force

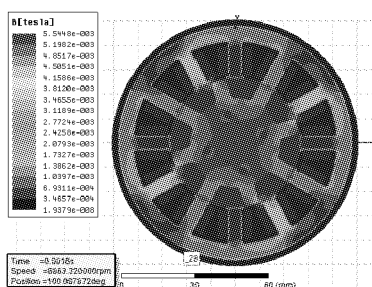


图 4 磁通密度云图分布图

Fig. 4 Distribution of magnetic flux density cloud

阻电机,搭建了实验平台,电机低速运行时,采用电流斩波控制方式<sup>[7]</sup>,电流呈现平顶波,任意改变控制电流,能够实现电机速度的变化,电机呈现恒转矩机械特性。低速时,A 相空载电流波形见图 5。

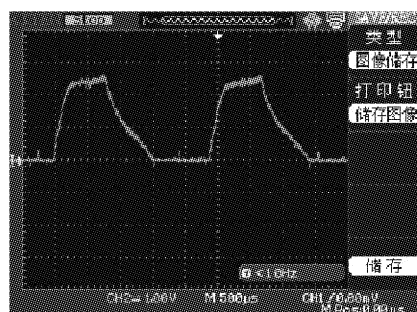


图 5  $n=500$  r/min, A 相空载电流波形

Fig. 5  $n=500$  r/min, A no-load current waveform

在高速运行时,采用APC控制方式<sup>[8]</sup>,其A相空载电流波形见图6。此时,电流峰值主要由旋转电动势限制,无法进行斩波,电机呈现恒功率机械特性<sup>[9]</sup>。

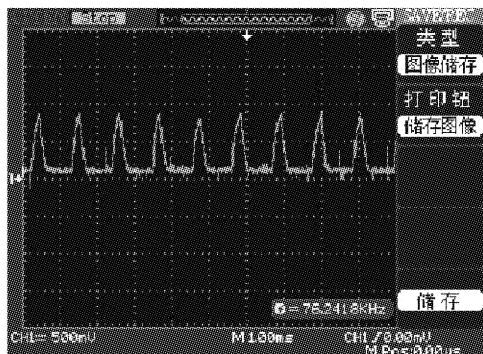


图6  $n=3\ 000$  r/min, A相空载电流波形  
Fig.6  $n=3\ 000$  r/min, A no-load current waveform

高速运行时, A相空载电压波形见图7。

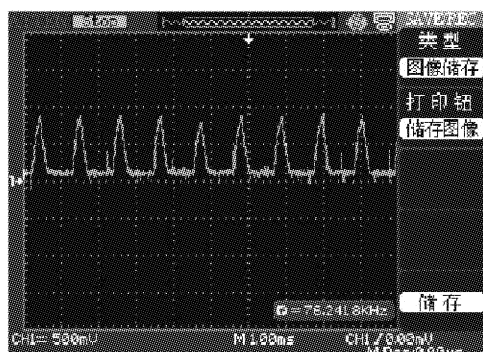


图7  $n=3\ 000$  r/min A相空载电压波形  
Fig.7  $n=3\ 000$  r/min, A no-load voltage waveform

## 6 结 语

本文从降低转矩脉动<sup>[10]</sup>出发,设计了一台三相12/8极高压开关磁阻电机,详细分析了电机设计时主要参数选取的条件及注意事项,然后利用Ansoft软件对所设计样机参数进行了仿真,得出了比较合理的结果。根据课题组搭建的实验平台,进行了实验,实验结果表明,理论与实践相符合,所设计的电机满足设计的要求。

## 参考文献/References:

- [1] 石小波. 电动车用开关磁阻电机低转矩脉动控制系统研究及实现[J]. 湖南大学学报, 2008, 35(6): 27-30.  
SHI Xiaobo. Switched reluctance motor of electric vehicles: The low torque ripple control system research and implementation[J]. Journal of Hunan University, 2008, 35(6): 27-30.
- [2] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.  
WU Hongxing. Switch Reluctance Motor System Theory and Control Technology [M]. Beijing: China Power Press, 2010.
- [3] 詹琼华. 开关磁阻电动机[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.  
ZHAN Qionghua. Switched Reluctance Motor [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992.
- [4] 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.  
WU Jianhua. Design and Application of Switched Reluctance Motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [5] CHEN Hao, PAVLITOV C. Large power analysis of switched reluctance machine system for coal mine[J]. Mining Science and Technology, 2009(19): 657-659.
- [6] 张 莲, 陈鸿雁. 开关磁阻电动机调速系统位置检测技术评述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2002, 16(3): 65-68.  
ZHANG Lian, CHEN Hongyan. Switched reluctance motor drive system position detection technology recitation [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2002, 16(3): 65-68.
- [7] 吴建华, 詹琼华, 林金铭. 开关磁阻电机的优化设计[J]. 微特电机, 1995(5): 10-12.  
WU Jianhua, ZHAN Qionghua, LIN Jinming. Optimization design of switched reluctance motor [J]. Micro & Special Motor, 1995(5): 10-12.
- [8] 刘东辉, 赵新伟, 李天宝, 等. 无位置传感器无刷直流电机数控调速器设计[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(4): 302-307.  
LIU Donghui, ZHAO Xinwei, LI Tianbao, et al. Nc sensorless brushless dc motor speed design [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34(4): 302-307.
- [9] 任志斌, 曾德墙. 基于极坐标的异步电机新型参数辨识方法[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(3): 218-223.  
REN Zhibin, CENG Deqiang. Based on polar coordinates a new parameter identification method of induction motor [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34(3): 218-223.
- [10] 詹琼华. 开关磁阻电动机[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.  
ZHAN Qionghua. Switched Reluctance Motor[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992.