

# 变频调速异步电机优化电磁设计

肖金凤, 何楚衡, 潘文涛  
(南华大学, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 为抑制变频电源的高次谐波对变频调速异步电机的影响, 提出从定转子槽配合的优化选择、转子槽形及气隙的优化设计、建立电机模糊自适应设计模型这几个方面进行变频调速异步电机的优化电磁设计。为提高现有变频调速异步电机电磁设计软件的实用性, 利用 Visual Basic 6.0 开发出一种变频调速异步电机的优化电磁设计软件, 完成了一台 11 kW 变频调速异步电机的电磁设计。设计结果表明, 所设计的电机性能好, 提出的优化电磁设计方法是可行的, 开发的电磁设计软件输出性能良好, 能够达到设计要求, 具有实用性。

**关键词:** 变频调速异步电机; 高次谐波; 优化设计

**中图分类号:** TM921.51; TM302 TM343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)01-0033-04

## Optimal Electromagnetic Design of Variable Frequency and Speed Regulation Asynchronous Motors

XIAO Jin-feng, HE Chu-heng, PAN Wen-tao  
(University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** In order to restrain the influences of higher harmonic of the variable frequency source to variable frequency and speed regulation asynchronous motor, optimal electromagnetic design method of variable frequency and speed regulation asynchronous motor, such as optimal stator and rotor slot matching, optimal design of rotor slot type and airgap, constructing variable frequency and speed regulation motor fuzzy self-adaptive design model are presented. Used the Visual Basic 6.0 as a tool, the optimal electromagnetic design software of variable frequency and speed regulation asynchronous motor is developed to improve practicability of prior design software. The 11 kW inverter-driven asynchronous motor is designed by the electromagnetic design software. The result indicates that the good performance of the motor, feasibility of the optimal design method and the practicability of the optimal electromagnetic design, the performance of the software is excellent to accord with the request of design.

**Key words:** variable frequency and speed regulation asynchronous motor; higher harmonic; optimal design

## 0 引言

变频调速异步电机由变频装置供电, 由于变频器的输出电压和电流中包含一系列的高次谐波, 使电机效率降低, 温升升高, 低速运行时产生转矩脉动, 高速运行时产生较大的振动和噪声<sup>[1-4]</sup>。变频调速异步电机的谐波抑制方法一直是传动领域中的研究热点<sup>[1-5]</sup>。本文以抑制变频调速异步电机的谐波为目的, 从改动和优化变频调速异步电机设计出发, 提出了变频电机的优化电磁设计方法。文献[5]提出了变频调速异步电机自适应设计模型优化电磁设计方法, 本文将模

糊控制应用至电磁优化设计中, 得到模糊自适应设计模型, 可进一步提高设计电机的性能。文献[6]分析的变频三相异步电动机设计 CAD 系统功能强大, 操作方便, 但该系统设计前需输入变频器控制参数, 不同变频器其参数不同, 使得设计的电机应用范围受到限制。本设计将利用 Visual Basic 6.0 开发变频调速异步电机的电磁设计软件, 设计时只需从主窗口输入电机在额定状态下的主要性能参数, 即可通过计算机自动优化, 得到气隙、定转子槽形尺寸、电机损耗效率等输出性能参数。

## 1 优化电磁设计

### 1.1 定转子槽配合的优化选择

在变频异步电机槽数设计方面,定转子槽配合的约束得到放宽,槽配合时主要考虑避免一阶定、转子齿谐波产生的低阶力波( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ),这些力波可能与定子的固有频率接近,发生共振<sup>[7]</sup>。

(1) 削弱力波的槽配合。为削弱变频电机齿谐波产生的力波,要求槽配合满足表 1 的要求。

表 1 变频调速异步电机槽配合

避免力波次数	槽配合要求
0	$Z_1 - Z_2 \neq 0, 2p$
1	$Z_1 - Z_2 \neq \pm 1, 2p \pm 1$
2	$Z_1 - Z_2 \neq \pm 2, 2p \pm 2$
3	$Z_1 - Z_2 \neq \pm 3, 2p \pm 3$

表中: $Z_1$ 为定子槽数, $Z_2$ 为转子槽数, $p$ 为电机极对数。更高次力波引起的振动幅值小,一般中小型电机中可不予考虑。

(2) 对笼型电动机,定子槽数越多,谐波损耗越少,异步附加转矩越小;定子槽数大于转子槽数还可降低杂散损耗。

(3) 转子采用奇数槽,这样可以减少同步寄生转矩,避免启动时产生堵转。

(4) 采用 5/6 短矩系数可大大削弱 5 次谐波和 7 次谐波产生的附加转矩影响,对变频电机减少高次谐波影响起到十分重要的作用。

### 1.2 转子槽形优化设计

(1) 为了抑制高次谐波损耗的增加,异步电机转子应采用集肤效应小的特殊槽形,槽面积尽可能大,槽形宜浅不宜深,槽形总体上宽下窄;采用直槽而非斜槽转子结构,以减少其负载损耗<sup>[8]</sup>。

(2) 采用磁性槽楔,不但能减小有效气隙,降低空载电流,改善功率因数,还能降低气隙谐波磁势分量,减小谐波磁势引起的附加损耗和其他不良影响。

(3) 在定、转子槽数相同的情况下,可选择不同的转子槽形、尺寸,进行效率和功率因数优化设计,从而最终确定高效优化的电磁设计方案。

### 1.3 气隙的优化设计

电机的气隙增大,将使励磁电流增加,电机功率因数下降,同时气隙中的谐波磁场也将降低,附加损耗减少;另外,气隙的增大可以使定、转子结构配合部件的加工精度和同心度适当降低,减小加工的难度和时间。

普通电机气隙通常采用经验公式

$$g = \frac{D_i}{100} \left( 1 + \frac{9}{2^p} \right)$$

式中: $g$ ——电机的气隙(mm);

$D_i$ ——电机定子内径(cm);

$p$ ——电机极对数。

变频电机气隙应比同容量普通电机气隙稍大一些。

### 1.4 基于模糊自适应设计模型的电磁优化设计

文献[5]给出了变频调速异步电机不同定子槽形的定子设计公式,一旦给定定子电密、气隙磁密、定子齿轭磁密( $J_1, B_g, B_d, B_{y1}$ )等参数,定子结构和主要尺寸就完全确定,并随槽形和定子内外径比值的改变而改变。这些公式使变频调速异步电机的设计完全由其电密和磁密的设定值控制,消去了传统设计中的经验参数,同时还将这些电密和磁密的设定与变频调速系统中电机的运行性能建立了关系。

文献[5]以此为基础进行了基于自适应模型的电磁优化设计。在该自适应模型中,定子内外径之比是不确定的,这个变量的选取对电机性能有很大影响。本设计则将模糊控制应用到系统设计中,建立一个变频调速异步电机模糊自适应模型。通过模糊自适应过程不断调整,以达到同时满足定、转子电磁负荷设定的目的。变频调速异步电机模糊自适应设计流程见图 1。

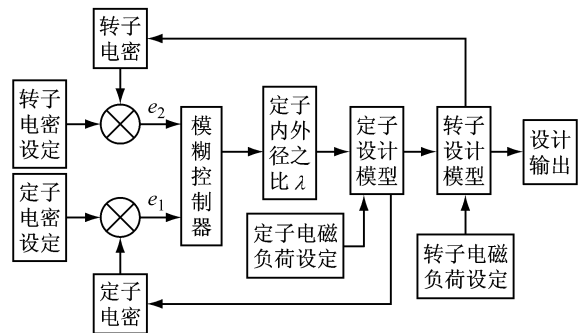


图 1 变频调速异步电机模糊自适应设计流程图

## 2 变频电机电磁设计软件开发

本设计软件是在 Windows 平台上用 VB6.0 开发的,适用于 Win98 以上的操作系统,视窗化设计,全汉化显示,界面友好,人机交互,提高了工作效率。图 2 为该软件编写的结构框图。

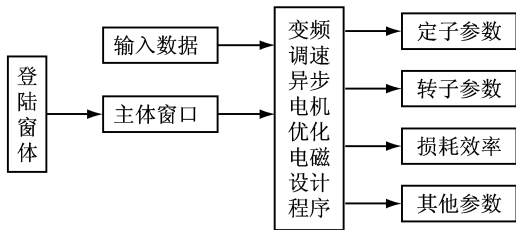


图 2 电磁设计软件结构框图

电磁设计程序采用 VB 语言编写。优化电磁计算方法以文献 [5], [8] ~ [10] 为基础,并对其提出的电磁计算方法进行改良,将模糊控制应用至文献 [5] 提出的异步电机自适应设计模型中,得到了异步电机模糊自适应设计模型。

## 3 设计实例

现利用开发的变频调速异步电机电磁设计软件进行 11 kW 变频调速异步电机的电磁设计。

### 3.1 数据输入主体窗口

其主要额定参数输入主体窗口见图 3。

电机额定数据	
额定功率 (kw)	11
相数	3
额定电压 (v)	380
绝缘等级	F
极对数	2
绕组接法	三角形
额定效率	0.89
相带	60
额定功率因数	0.88

返回 计算 关闭

南华大学电气工程学院 指导老师:肖金凤、曹继植 设计者:潘文涛

图 3 额定参数输入界面

点击界面上的“计算”,软件将自动优化,得出定子参数、转子参数、电路参数、电流及损耗等,然后进行整体优化,得出最佳设计方案。

### 3.2 计算结果

定、转子参数见图 4、5,损耗及效率见图 6。

定子参数	
定子内径 (m)	0.157
定子外径 (m)	0.245
定子铁心长 (m)	0.173
气隙长 (mm)	0.566
定子叠压系数	0.95
定子槽数	36
定子槽距 (cm)	12.33
定子黄距 (cm)	1.37

绕组参数 单位: mm

绕组层数	1	h01	0.8
并联支路数	1	h11	1.15
每槽导体数	29	h21	14.05
线径 (mm)	1.3	b01	3.8
并绕根数	2	b1	7.7
绕组系数	0.9598	r1	5.1

返回

南华大学电气工程学院 指导老师:肖金凤、曹继植 设计者:潘文涛

图 4 定子参数

转子参数	
定子内径 (m)	0.078
定子外径 (m)	0.156
定子铁心长 (m)	0.173
转子叠压系数	0.95
转子槽数	27

转子槽距 单位: mm

h02	2.2
h12	18.3
b22	7.2
b02	1.0
b12	9.5

返回

南华大学电气工程学院 指导老师:肖金凤、曹继植 设计者:潘文涛

图 5 转子参数

损耗参数 单位: w	
定子铜损耗	573.9
转子铜损耗	322.7
杂散损耗	161.1
机械损耗	140.0
铁损耗	222.6
总损耗	1420.3
实际效率	0.89

返回

南华大学电气工程学院 指导老师:肖金凤、曹继植 设计者:潘文涛

图 6 损耗及效率

设计结果如下: (1) 定转子槽配合为 36/27; (2) 转子槽形选择上宽下窄的平底槽; (3) 气隙比同容量普通电机气隙稍大,增大 0.055 75 mm。效率为 89%,与设计要求完全相符,故设计的变频调速异步电机性能良好,满足设计要求。

## 4 结 语

变频调速异步电机应用日益广泛,对其设计

也提出了更高更快的要求。本文提出了变频调速异步电机的优化电磁设计方法。利用 Visual Basic 6.0 研制了变频调速异步电机的电磁设计软件。实例设计结果表明本文介绍的电磁设计方法有效、正确、先进,开发的电磁设计软件设计准确、方便实用。

### 【参考文献】

- [1] 刘吉仿,李伟力,程树康. 异步变频电机发展综述 [J]. 微电机, 2007, 40(6): 76-79.
- [2] 魏华雄. SPWM 逆变供电下感应电机谐波分析及仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2004.
- [3] Jia Wu, Fred C Lee. Elimination of low-frequency harmonics caused by PWM in a three-phase soft-switched boost rectifier [C] // IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 483-488.

- [4] 许春家. 变频调速电动机的设计特点 [J]. 防爆电机, 2008, 43(3): 6-7.
- [5] 郭向东, 赵争鸣. 大中型变频调速高效电动机的优化电磁设计 [J]. 电工技术杂志, 2003(3): 42-44.
- [6] 李辉, 韩力, 王亚峰, 等. 变频三相感应电动机设计及其 CAD 系统开发 [C] // 四川省电工技术学会电机专业委员会学术年会, 2001(13): 90-93.
- [7] 李莉, 刘玉庆. 变频调速异步电机槽配合的探讨 [J]. 电机技术, 2001(4): 6-8.
- [8] 何春波, 刘生. 变频调速异步电动机转子槽优化设计 [J]. 防爆电机, 2007, 42(1): 44-48.
- [9] 关慧, 赵争鸣. 变频调速异步电机的优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 194-199.
- [10] 周黎民. 鼠笼式变频调速异步牵引电机的计算程序 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2006, 29(3): 20-21.

收稿日期: 2008-08-31

(上接第 19 页)

负载转矩  $60 \text{ N} \cdot \text{m}$  时输出的电磁转矩波形和转速波形; 图 5(e) 为电机在 2 s 时加负载转矩  $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、4 s 时加负载转矩  $60 \text{ N} \cdot \text{m}$  的转速波形; 图 5(f) 为电机在 0 s 时加负载转矩  $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、2 s 时加负载转矩  $60 \text{ N} \cdot \text{m}$  的转速波形。

由图 5 可看出: 在电机空载起极限幅运行 2 s 后, 突然给其加负载, 电机的响应速度很快, 在 2 s 之内就可完成响应, 进入稳态运行 ( $910 \text{ r/min}$ ); 当负载转矩由  $50 \text{ N} \cdot \text{m}$  增加到  $60 \text{ N} \cdot \text{m}$  时, 电机的响应过程基本没有变化。可见, BLDCM 的转速、电流双闭环调速控制系统对负载的扰动具有很强的适应性和抗负载扰动的能力。

在正常负载情况下, 转速调节器和电流调节器均不饱和; 稳态时, 依靠调节器的调节作用, 它们的输入偏差电压都是零。因此, 调速控制系统具有绝对硬的静特性 (无静差)。当电动机的相电流上升时, 转速调节器的输出也上升; 当相电流上升到某数值时, 转速调节器的输出达到限幅值, 转速环失去调节作用, 呈开环状态, 此时, 只有电流环起作用, 调速系统表现为电流无静差, 实现了过电流的自动保护。

## 4 结 语

由上文分析可以看出, BLDCM 的调速原理和

直流电机相同, 组成的调速系统类似。因此, 它具有直流电动机调速的一系列优点, 如过载能力强 (电流环实现了过电流的自动保护)、使用寿命长、具有宽的调速范围等; 另外, BLDCM 的双闭环调速控制系统比正弦波 PMSM 的控制系统结构简单, 实现方便, 大大降低了控制系统的成本。仿真结果表明, 由 BLDCM 组成的伺服系统, 具有响应快、控制精度高、抗干扰能力强的特点, 可满足电动汽车对电动机的要求。

### 【参考文献】

- [1] 张春梅. 电动汽车直接转矩控制系统仿真 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(5): 118-122.
- [2] 张海涛, 林辉. 高精度机电伺服控制系统 [J]. 微特电机, 2007(2): 35-37.
- [3] 李新华, 万海. 电动汽车 BLDCM 设计中的若干问题 [J]. 湖北工学院学报, 2004, 19(5): 17-21.
- [4] 李华德. 交流调速控制系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [5] 杨耕, 罗应立. 电机与运动控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 阮毅, 陈维钧. 运动控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

收稿日期: 2007-08-14