

## 交流励磁工频同步电机传动系统仿真及研制

解 仑<sup>1)</sup> 鲁亿方<sup>1)</sup> 王志良<sup>1)</sup> 薛为民<sup>2)</sup> 孙一康<sup>1)</sup>

1)北京科技大学信息学院,北京 100083 2)北京联合大学自动化学院,北京 100083

**摘 要** 描述交流励磁工频同步化调速电机的结构,对其矢量控制系统、循环变流器、交流励磁工频同步化调速电机进行了仿真数值分析.结果表明,变频侧定子力矩电流在突加负载时仅有微小变化,速度响应的超调量也比较小,电机工频侧定子磁链比较平滑,未受动态过程的影响,具有较强的鲁棒性.仿真分析与实验结果达到较好的吻合.

**关键词** 中压变频传动控制系统;交流励磁工频同步化调速电机;循环变流器;磁场定向矢量控制算法

**分类号** TM 344.4

采用交流励磁工频同步化调速电机传动控制系统具有以下优势:整套电动机机组的机械轴细而长,转动惯量变得很小,动态响应大幅度提高;可以避免采用中压变频器;变频器容量仅是电机的滑差功率,控制系统成本非常低廉;节能效果显著<sup>[1]</sup>;没有滑环和碳刷,维修简单、易行,适用于易燃、易爆和严禁停机等工况;可以在额定转速的70%~130%范围内连续调节;功率因数很高甚至可以达到1,谐波含量少,有利于净化电网,使电网更加安全、有效地运行.

## 1 仿真分析

本文分为以下三部分对交流励磁工频感应电机传动控制系统进行了仿真分析.

(1)建立负载电机的仿真模型.根据交流励磁工频感应电机的数学模型<sup>[2]</sup>,将其变换为一般的代数方程形式,并按1#电动机定子、2#电动机定子形式分离开,即得到交流励磁工频感应电机的离散数学模型:

$$\begin{pmatrix} I_{1n} \\ I_{2n} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11n} & Y_{12n} \\ Y_{21n} & Y_{22n} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_{1n} \\ U_{2n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_{c1n} \\ I_{c2n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $I_n$ 为定子电流向量, $Y_n$ 为等效导纳矩阵, $I_n$ 为等效电流源向量.当考虑交流励磁工频感应电动机转速变化的动态过程时,就可以采用预报-校正

正算法,将一个仿真步长的电动机转速近似不变,电动机方程为线性模型,仍然可以按照式(1)离散化,对于转速迭代直至收敛.

(2)建立适用于本系统计算机仿真的功率开关元件的仿真数学模型.本系统采用六脉波循环变流器,其输出电压为:

$$U_N = \frac{\sum_{j=1}^3 S_a(i,j)U_{\varphi}}{\sum_{j=1}^3 S_a(i,j)} - \frac{\sum_{j=1}^3 S_b(i,j)U_{\varphi}}{\sum_{j=1}^3 S_b(i,j)} \quad (2)$$

式中, $U_{\varphi} = U_m \sin[\omega_s t - (j-1) \times 120^\circ]$ ;  $i=1,2,3$ ;  $j=1,2,3$ ;  $S_a(i,j)=1$ 或 $S_b(i,j)=1$ 表示六脉波循环变流器中所对应的反并联的两只晶闸管中有一只导通;而 $S_a(i,j)=0$ 或 $S_b(i,j)=0$ 表示所对应的反并联的两只晶闸管都不导通,此两个开关矩阵中的所有元素的值均由循环变流器控制系统中的触发控制器来决定. $U_m$ 表示交流励磁工频感应电动机的2#电动机定子侧整流变压器副边相电压幅值; $\omega_s$ 表示供电网频率.

(3)建立控制系统的仿真模型.对于系统中三输入量的非线性控制环节如下所示:

$$\begin{aligned} Y_i(n+1) = & y_i(n) + F_{k1}(n)u_{k1}(n+1) + F_{k2}(n)u_{k2}(n+1) + \\ & F_{k3}(n)u_{k3}(n)u_{k3}(n+1) - F_{k1}(n)u_{k1}(n) - \\ & F_{k2}(n)u_{k2}(n) - F_{k3}(n)u_{k3}(n) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $F_{k1}(n) = \frac{\partial f}{\partial u_{k1}} \Big|_{u_{k1}(n), u_{k2}(n), u_{k3}(n)}$ ,  
 $F_{k2}(n) = \frac{\partial f}{\partial u_{k2}} \Big|_{u_{k1}(n), u_{k2}(n), u_{k3}(n)}$ ,  
 $F_{k3}(n) = \frac{\partial f}{\partial u_{k3}} \Big|_{u_{k1}(n), u_{k2}(n), u_{k3}(n)}$ .

收稿日期 2003-07-9 解 仑 男 35岁,工程师,博士

\* 高效轧制国家工程研究中心投资的工程开发项目以及国家自然科学基金资助项目(No.69975002)

将(3)离散化,可以得到诸如乘法器、直角坐标/极坐标变换器及其反变换器、矢量旋转变换器等交流励磁工频感应电机矢量控制系统中的多输入量的非线性控制环节离散仿真模型。

在此基础上可以对本系统进行仿真,结果如图1和图2所示。其中图1和图2分别表示空载阶跃、亚同步速度突加负载时,交流励磁工频感应

电机传动控制系统的速度响应和实际力矩电流。由仿真结果可以看出,在动态过程中,2<sup>#</sup>电动机定子力矩电流在突加负载时仅有微小变化以提高系统的响应速度,速度响应的超调量也比较小,并且2<sup>#</sup>电机定子磁链比较平滑,未受动态过程的影响<sup>[2]</sup>,具有较强的鲁棒性。

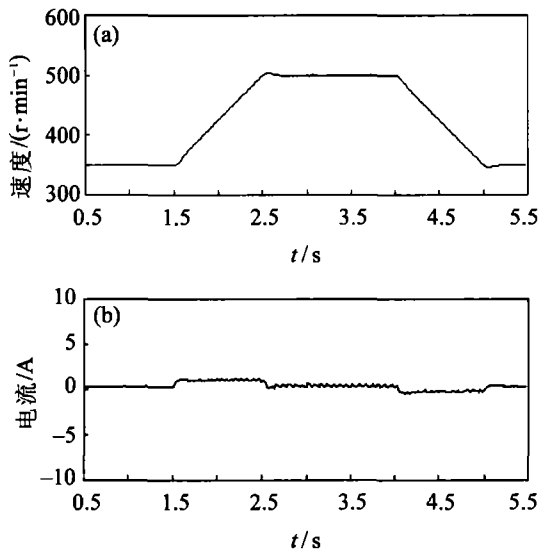


图1 空载阶跃时的速度和力矩电流响应  
Fig.1 Speed and torque current response during the period of step without load set-point

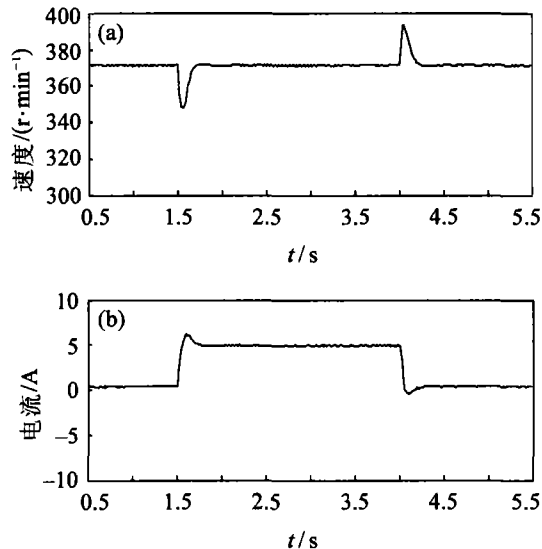


图2 亚同步速突加负载时的速度和力矩电流响应  
Fig.2 Speed and torque current response during the period of sub-synchronized speed with abrupt load set-point

## 2 控制系统结构

整个控制系统结构如图3所示,其中包括:速度给定,速度调节器,直流调节器,相电流调节器,给定积分器,隔离放大器,减法器,功率因数控制器,电压前馈控制器,触发控制器,矢量分析

器,矢量旋转器,相到三相变换器,正弦函数发生器,电压模型,光电编码器,测速发电机,接触式开关,裂解式变压器,输出电抗器,交流励磁工频同步化调速电动机。

电流调节器分为两个部分:比例部分位于三相电流给定之后,直接构成相电流闭环,起调节

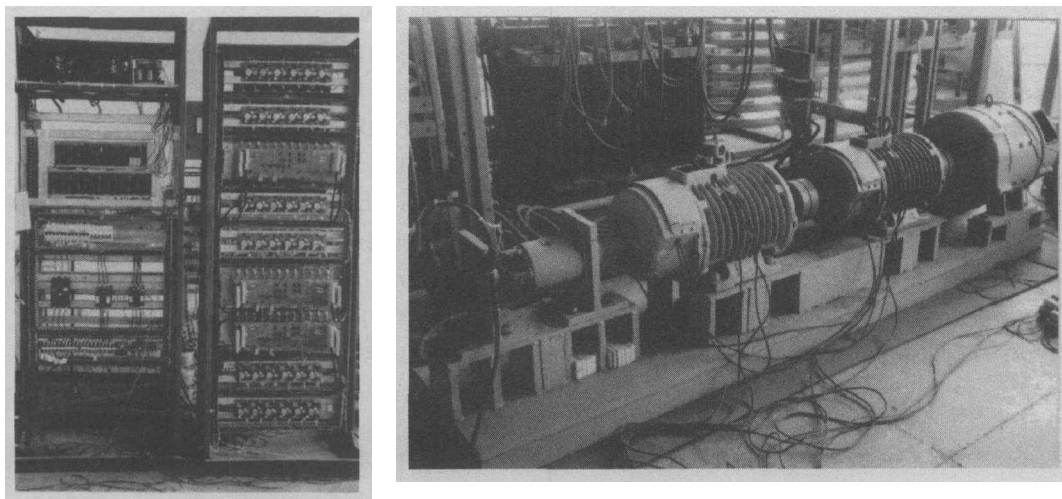


图3 交流励磁工频同步化调速电机及矢量控制系统实物  
Fig.3 AC excited grid frequency induction machine and its vector control system

动态误差作用;积分部分对变频侧电动机定子电流的转矩分量和激磁分量直接闭环,主要用于消除电流的稳态误差.这两部分控制方法是通过坐标变换器连接起来的.为了消除控制中的交叉耦合,在系统中按模型构造了变频侧电动机定子电压的前馈补偿环节.对于双馈李定子感应电机控制系统的交-交变频器,由于电网对注入谐波电流具有严格要求,所以实际应用的大型系统均采用72只SCR或GTO的12脉波交交变频器.本文所讨论的系统采用的是6脉波循环变流器,由36只半控SCR组成(交交变频器的触发脉冲间隙无论在稳态、动态暂态过程中都为不均匀的).循环变流器输出采用Y联接方式,即交变频器负载中点不与其本身中点相连,是相互隔离的.这样输出三相电压中含有同样的直流或三倍频波均不会出现不会出现在负载上——交流偏置<sup>[1]</sup>.为此,必须使触发脉冲宽度大于30°,至少两个桥四个SCR同时导通以及无环流死时小于2ms.

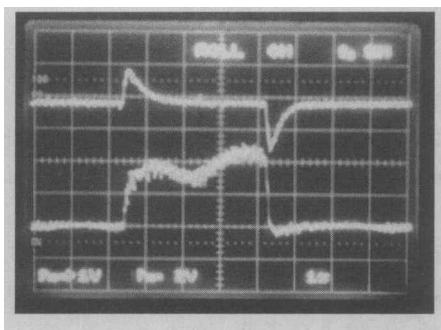


图4 突加负载时速度和力矩电流响应

Fig.4 Speed and torque current response during the period of sub-synchronized speed with abrupt load set-point

### 3 实验结果及分析

本文实验采用两台参数一样的绕线式电机:定子电压(380V),电流(9.2A);转子电压(220V),转子电流(10.2A).级联式无刷双馈感应电机额定转速 $n_n=500$  r/min,在亚同步速度(333 r/min)时突加负载,其励磁电流响应、力矩电流响应和速度响应如图4和图5所示.其中图4为交流励磁工频感应电机矢量控制系统2#电动机定子电流力矩分量实际值(下)、速度响应(上);图5为2#电动机定子电流力矩分量实际值(上)、气隙磁链幅值波形.

从波性曲线可以看出,在亚同步速度突加负载时,由1#电动机定子提供激磁,1#电动机定子磁链降低约5.6%,其动态过程比较平缓,证明了1#电动机定子磁链具有良好的抗干扰性,为了达到放出力矩电流以及减小激磁电流的目的,电压幅值减小,相位与电流矢量相反<sup>[2]</sup>.

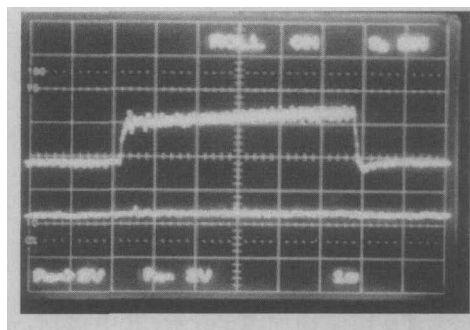


图5 突加负载时的力矩电流和磁链响应

Fig.5 Torque current and flux response during the period of sub-synchronized speed with abrupt load set-point

### 4 结束语

在交流励磁工频感应电机及其矢量控制系统、循环变流器仿真研究的基础上,进行了数十种印制电路板的设计、调试及系统联调,在国内首次研制成功该类电机矢量控制系统样机,分析了其典型工况下的实验结果,得出其性能可以达到与直流电机控制系统相当的结论,为交流励磁工频同步化调速电机传动控制系统进一步广泛应用于风机、水泵类负载奠定了一定的理论和实践基础.

#### 参考文献

1 马小亮. 中压变频调速方案 [A]. 中国电工技术学会

水工业电工专业委员会第一界会议论文集 [C]. 苏州, 1999

2 解仑. 自级联式感应电动机矢量控制系统的研制 [J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(6): 672  
 3 Li P. Dual stator winding induction machine drive [J]. IEEE Trans Ind Appl, 2000, 36(5): 1369  
 4 Bian S J. Modeling and operation analysis of the cascade brush-less doubly-fed machine [A]. Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Machines and Systems [C]. Shenyang, 2001  
 5 Kusko A. Speed control of a single-frame cascade induction motor with slip power pump back [J]. IEEE Trans Ind Appl, 1978, 14(2): 97  
 6 Xu L. Transient model of a doubly excited reluctance motor [J]. IEEE Trans Energy Convers, 1991, 6(1): 126

## Numerical Simulation and Manufacture of a Grid Frequency Synchronized Machine Drive Control System

XIE Lun<sup>1)</sup>, LU Yifang<sup>1)</sup>, WANG Zhiliang<sup>1)</sup>, XUE Weimin<sup>2)</sup>, SUN Yikang<sup>1)</sup>

1) Information Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Automation School, Beijing United University, Beijing 100083, China

**ABSTRACT** The key structure of an Ac excited grid frequency synchronized machine (AEGFSM) was presented. The simulation of AEGFSM, cyclo-converter, field-oriented vector control algorithm was done according to their discrete mathematical model. An AEGFSM sample driven was fabricated. Simulation results are in excellent agreement with the experimental under the typical working condition. It is concluded that AEGFSM drives have the high-quality dynamic performances as DC drives and provide an applicable solution of middle-voltage frequency-variable drives.

**KEY WORDS** AEGFSM; cyclo-converter; field-oriented vector control algorithm; middle-voltage frequency-variable drive

~~~~~  
(上接第 52 页)

## Large-Scale 3D Model and Quantitative Characterization of Grain Microstructure Based on Monte Carlo Potts Simulation

QIN Xiangge<sup>1,2)</sup>, LIU Guoquan<sup>1)</sup>

1) Materials Science and Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) College of Material Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China

**ABSTRACT** In order to improve the statistics of 3D grain microstructure models, a large-scale 3D digital model of microstructures of polycrystalline materials was implemented using Monte Carlo Potts simulation. The quantitative characterization and 3D visualizing of the model were carried out. The results show that the grain size distribution and the grain face number distribution in this model can be fitted approximately by the lognormal function, with an average grain face number of  $13.8 \pm 0.1$ , very similar to the polycrystalline microstructure in real material.

**KEY WORDS** polycrystalline microstructure model; monte carlo simulation; grain size distribution; grain topology