

# 高效节能稀土永磁同步电动机 起动问题研究

西北工业大学 蒋宗荣 米春亭 袁满锦

**摘要** 稀土永磁同步电动机,用于纺织行业具有显著的节能效果。本文导出了起动力矩的数学表达式,在进行了数值计算之后,给出了计算和实测结果。

**关键词** 同步电动机 起动 复合场 下凹 牵入

## 一、起动过程的特性

稀土永磁同步电动机通常是靠转子上的笼型绕组与定子三相绕组的电磁作用产生异步转矩起动。但是由于转子永磁体的存在,其起动过程远比笼型异步电动机复杂。

由于定转子磁场的相互作用,电机定子绕组中将存在三种频率即  $f$ 、 $(1-S)f$ 、 $(1-2S)f$  的电流( $f$ —电源频率,  $S$ —转差率)。若认为不同频率的电流及不同转速的旋转磁场相互独立,则可用叠加法进行分析。

分析表明,永磁同步电动机在起动过程中,有三种转矩:异步、同步和凸极转矩,如图 1 所示。由图可见,同步转矩(发电制动转矩)和凸极转矩都使起动过程中的转矩减小,并产生下凹,对起动不利。考虑电机气隙中不同转速的定转子旋转磁场及齿槽效应等相互作用产生的脉振转矩时,稀土永磁同步电动机在牵入同步要发生振荡。

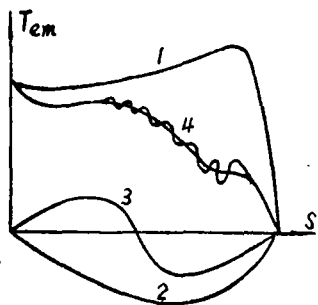


图 1 起动特性

1. 异步转矩
2. 同步转矩
3. 凸极转矩
4. 合成转矩

## 二、起动过程中转矩的数值分析

本文采用有限元法,分析整个起动过程中电机的涡流场,从而计算转矩-转速曲线。

二维非线性瞬变涡流场的基本方程及边界条件可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \beta \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -f(t) + \sigma \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$s_1 : u = u_0$$

$$s_2 : \beta \frac{\partial u}{\partial n} = q$$

$$t = 0 : u = 0$$

式中  $f$ ——场源,即定子电流及转子电流源场,是随时间变化为

变分问题可表示为:

$$w(u) = \iiint_{\Omega} \left[ \beta c d c \right] dx dy - \iint f(t) u dx dy + \iint_{\Omega} \sigma \frac{\partial u}{\partial t} u dx dy - \int_{s_2} q u ds = \min$$

$$s_1 : u = u_0$$

$$t = 0 : u = 0$$

$$\text{式中 } c = \sqrt{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (2)$$

对上述等价的变分问题进行离散时,取等时间步长  $\Delta t$ , 利用对时间的线性插值,即

$$u = u(t_n)$$

$$f(t) = f(t_n)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u(t_n) - u(t_{n-1})}{\Delta t} \quad (3)$$

对求解区域剖分后,离散化,得到非线性复数方程组

$$[K][u] = [P] \quad (4)$$

在处理第一类边界条件和周期性边界条件后,用修正的牛顿-拉斐森方法求解方程(4)即可得到各节点的复数矢量磁位,

在求解稀土永磁同步电动机的复合场时,转子电流是矢量磁位  $u$  的函数,因而不能直接代入式(1)。设转差  $S$ , 则转子感应电流的频率为  $Sf_1$ 。其值为

$$\delta_e = \frac{1}{\Delta_e} \iint_{\Delta_e} \delta dx dy$$

$$= u(t_{n-1}) - \frac{\sigma}{\Delta t} - \frac{\sigma}{3\Delta t} (u_i + u_j + u_m)$$

因而在求变分问题时，将 $\delta_e$ 单独考虑，并进行相应的离散即可。

在求出电机不同时刻的复合场分布以后，用下式求出电机的电磁转矩：

$$T_{em} = \sum_{e=1}^{l_2} B_e l_e i_e dc$$

式中  $l_1, l_2$ ——转子导条所在单元的起始和终止编号

$dc$ ——单元 $e$ 的重心到轴心的距离

### 三、计算实例

以作者研制的FOXT53-6型稀土永磁高效节能纺织电动机为例，给出计算和实测结果。

#### 1. 电机额定数据

功率：800W，电压：380V，电流：1.3A，转速：1000r/min，效率：90%，功率因数：0.93，堵转转矩倍数：2.3，最大转矩倍数：2.2。

#### 2. 电机基本参数

电枢电阻 $r_s = 3.93 \Omega$ ，电枢漏抗 $X_{s1} = 7.5 \Omega$ ，直轴电抗 $X_d = 47.3 \Omega$ ，交轴电抗 $X_q = 58.85 \Omega$

#### 3. 计算和实测结果对比

起动过程中不同转差率时的转矩计算与实测结果列于表1。电机的各项测试结果列于表2。图2给出了不同情况下转矩和转速的特性曲线。

表1 不同转差率时的电磁转矩  $T_{em}(N \cdot m)$

转差率	0	0.05	0.5	1.0
计算值	8.232	23.843	37.44	26.17
实测值	8.232	24.01	38.81	26.26

表2 电机性能测试结果

试验项目	U (V)	I (A)	P <sub>1</sub> (W)	P <sub>2</sub> (W)	$\eta$ (%)	$\cos \varphi$	n (r/min)
空载	380	0.32	59	—	—	0.280	1000
额定负载	380	1.3	870	800	91.95	1.0	1000

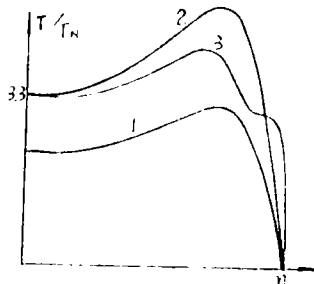


图2 不同状态起动转矩与转速的关系

1. FOXT53-6异步电动机 T-n 曲线
2. FOXT53-6未装磁钢时的 K-n 曲线
3. FOXT53-6 T-n 曲线

FOXT53-6与FOX53-6相比：效率提高11%。在同一台布机上织布，实测电耗，前者比后者平均节电11%，每千米布可节电10.4kWh。1990年2月底至3月初，我们与闽东电机公司一起，在上海第二十二棉纺织厂、南通第一棉纺厂、无锡第一棉纺厂进行织布实测电耗试验，FOXT-53-6比FOX53-6(或FO53-6)平均节电7%~17%，无功功率节约900Var左右。织布时起动、运转正常，机壳温升低6K左右。受到用户好评，被认为是纺织行业节电的好产品，具有很高的经济效益和社会效益。FOXT-53-6将由闽东电机公司批量生产，以满足纺织行业的节能需要。

(本刊有删节)

## 简 讯

中小型异步电动机计算机辅助设计研究专题协作单位会议，于1990年3月20日至3月21日在上海召开，参加会议的有上海交通大学、浙江大学、合肥工业大学、哈尔滨电工学院、广州电器科学研究所、上海电器科学研究所等22个分专题负责人和课题人员共28人。会议的主要目的是协调各分专题的进度，汇报交流已取得的初步成果，并为专题和分专题的鉴定作了安排。会议一致同意：(1)各分

专题负责单位在今年5月底以前就分专题的鉴定准备工作与上海电器科学研究所进一步作具体协调；(2)各分专题负责单位在6月底前完成自行鉴定工作，并按规定上报；(3)按统一格式印制鉴定文件。会议通过了“中小型异步电动机计算机辅助设计研究”专题及其分专题的成果鉴定验收和管理的意见和鉴定文件编写格式及要求。

(季 辅报导)