三相异步电动机变参数特性曲线的研究*

薛丰进,张继勇,于海东
(扬州大学 信息工程学院,江苏 扬州　225009)

摘　要:考虑三相异步电动机起动过程挤流效应对参数的影响,建立了变参数的等效电路。用函数 polyfit 对 $r_n/r_0=f(\zeta)$、$X_n/X_0=f(\zeta)$ 关系曲线进行了多项式拟合,推导出计算三相异步电动机变参数特性曲线的数学模型,并用 MATLAB6.5 对其进行了仿真。

关键词:异步电动机;变参数;特性曲线
中图分类号: TM301.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2005)01-0023-04

三相异步电动机的转矩—转速特性曲线、定子电流—转速特性曲线是表征三相异步电动机的两条重要曲线。本文在异步电动机 T 型线性化等效电路的基础上,考虑三相异步电动机起动过程中挤流效应的影响,用函数 polyfit 对 $r_n/r_0=f(\zeta)$、$X_n/X_0=f(\zeta)$ 关系曲线进行了多项式拟合,建立了异步电动机的变参数等效电路,以提高计算的精度。

1　转矩—转速特性和定子电流—转速特性模型的建立

三相异步电动机中任一相的 T 型等效电路如图 1(a)所示,再应用戴维南定理可以等效为图 1(b),据此列写方程。根据戴维南定理,等效源电压 V_{leq} 为:

$$V_{leq}=V_1\left(\frac{Z_m}{Z_1+Z_m}\right) \tag{1}$$

等效定子阻抗 Z_{leq} 为:

$$Z_{leq}=\frac{Z_mZ_1}{Z_m+Z_1}=r_{leq}+jX_{leq} \tag{2}$$

转子电流 I_2 为:

$$I_2=\frac{V_{leq}}{Z_{leq}+jX'_2+r'_2/s} \tag{3}$$

三相异步电动机电磁功率 P_{gap} 为:

$$P_{gap}=3\,|I_2|^2\frac{r'_2}{s} \tag{4}$$

三相异步电动机电磁转矩 T_{mech} 为:

$$T_{mech}=\frac{P_{gap}}{\omega} \tag{5}$$

式中 ω 为同步角速度。根据等效电路图 1(a),可以写出定子电流方程如下:

$$I_1\frac{V_1}{Z_1+\dfrac{Z_m(r'_2/s+jX'_2)}{Z_m+(r'_2/s+jX'_2)}} \tag{6}$$

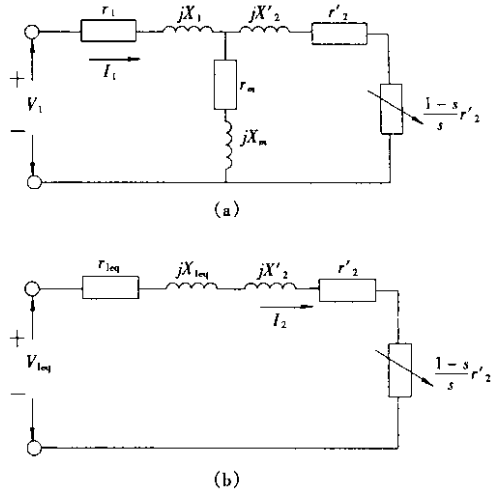

图 1　三相异步电动机等效电路

fig.1　three dissimilitudes tread the electric motor etc. effect electric circuit

* 收稿日期:2004-12-06
作者简介:薛丰进(1962-),男,江苏阜宁人,扬州大学硕士研究生,主要研究方向为电气工程及自动化的教学与科研。
万方数据

2 三相异步电动机变参数模型

三相异步电动机起动时,由于转子电流频率较高,使得转子底层漏电感比顶层漏电感大,引起槽内电流被挤到槽口处的集肤效应,也称挤流效应。挤流效应的作用引起转子电阻的增大,漏电抗减小。

2.1 转子电阻的修正

转子电阻包含两部分:不受挤流效应影响的端环及通风道部分和受挤流效应影响的埋在转子铁心中的部分。由于挤流效应引起电阻变化,集中反映在起动电阻与运行电阻的差异上,引入转子挤流效应系数 r_n/r_0,其中 r_n 为某一转子频率下的电阻值,r_0 为直流工作状态时的电阻值,可近似为额定运行时的电阻值。r_n/r_0 与转子导条相对高度 ζ 有关,图 2 给出了某一槽形的关系曲线(文献[3]提供)。由于 ζ 与$\sqrt{s}$成正比,以 ζ_0 代表 $s=0$ 时的 ζ 值,ζ_1 代表 $s=1$ 时的 ζ 值,A、B 两点分别对应上述两点的挤流效应系数。

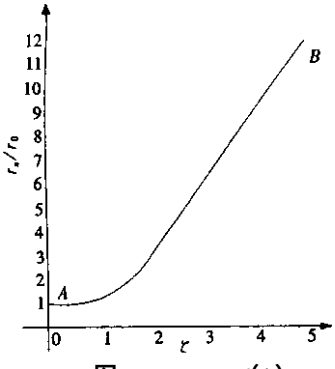

图 2 $r_n/r_0=f(\zeta)$

fig.2 $r_n/r_0=f(\zeta)$

应用 MATLAB 多项式拟合函数 polyfit 对图 2 关系曲线(文献 3 提供)进行多项式拟合。将图 2 曲线进行离散,数据如表 1:

表 1 $r_n/r_0=f(\zeta)$曲线离散数据

Table1 $r_n/r_0=f(\zeta)$ Long – lost data of curve

ζ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
r_n/r_0	1	1.07	1.2	2	3	4.7	6	7.6	9	10.7	12.2

为了比较拟合后的曲线与原始 AB 曲线拟合的精度,将图 2 中 AB 曲线移至图 3 中,图 3 中"虚线"是原始 AB 曲线,"实线"是多项式的 3 次拟合曲线,两线已基本重合,有很高的精度。如果拟合的精度不够,可提高 polyfit 函数的阶数 n。

考虑 ζ 与$\sqrt{s}$成正比,记作 $\zeta=K_1\sqrt{s}$,K_1 为比例系数,代入 3 次拟合曲线的多项式得 $r_n=f(s)$:

$$r_n=(-0.1234K_1^3\sqrt{s}^3+1.2395K_1^2s-0.9370K_1\sqrt{s}+1.0710)r_0 \tag{7}$$

系数 K_1 由方程(8)求得。

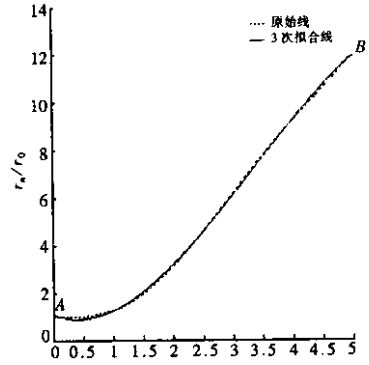

图 3 多项式 3 次拟合曲线

fig.3 polynomials draw up to match the curve 3 times

将 $s=1$,$r_n=r''_{2st}$;$s=0$,$r_n=r''_{2e}$,且 $K_2=r''_{2st}/r''_{2e}$代入方程(7)得方程(8),上标"″"表示转子电阻中的变化部分。

$$K_2=(-0.1234K_1^3+1.2395K_1^2-0.9370K_1+1.0710)/1.0710 \tag{8}$$

应用 MATLAB 求解,结果如图 4。

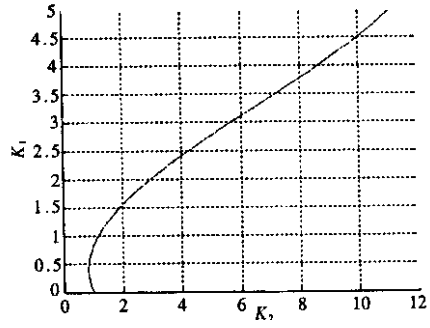

图 4 $K_1=f(K_2)$

fig.4 $K_1=f(K_2)$

对于已制作好了的电机,K_2 为常数。根据 K_2 查图 4 曲线得对应点 K_1 值,再由 K_1 值代入式 7 得 r_n。转子总电阻:$r'_2=r_n+r_0$,r_0 为转子电阻不受挤流效应影响部分电阻。

2.2 转子漏电抗的修正

转子漏电抗包括槽漏抗,端部漏抗、谐波漏抗

万方数据

和斜槽漏抗。其中槽漏抗受饱和影响,又受挤流影响,其余漏抗与饱和有关。为便于计算,假定起动电抗与运行时电抗的差异因挤流造成,而挤流效应系数 X_n/X_0 与 ζ 的关系如图 5 所示(文献 3 提供),A、B 两点分别对应与 ζ_0 与 ζ_1,且 A 点 $X_n/X_0=1$ 有。

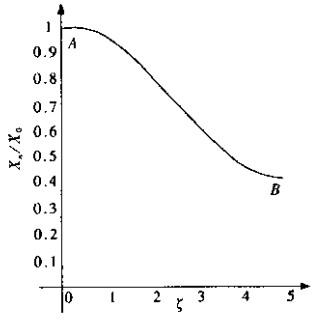

图 5　$X_n/X_0=f(\zeta)$

fig.5　$X_n/X_0=f(\zeta)$

类似电阻的推导过程,得 $X_n=f(s)$ 多项式:

$$X_n=(0.0114K_3^3\sqrt{s}^3-0.0896K_3^2s+0.0484K_3\sqrt{s}+0.9936)X_0 \tag{9}$$

式中系数 K_3 类似于式(7) K_1 求法。$s=0$ 时,$X_n=X''_{2e}\approx X'_{2e}$;$s=1$ 时,$X_n=X''_{st}$,且 $K_4=X''_{st}/X''_{2e}$,K_3 结果如图 6。由 K_4 查图 6 中曲线得 K_3,将 K_3 代入式 9 得 X_n。

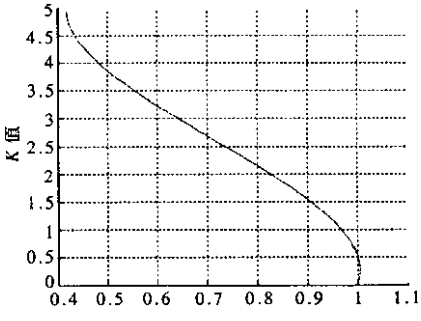

图 6　$K_3=f(K_4)$

fig.6　$K_3=f(K_4)$

3　仿真算例和仿真结果

以一台三相 8p、380V、50Hz、三角形接法的三相异步电动机为例,对其转矩—转速特性曲线、定子电流—转速特性曲线进行仿真。电动机参数为:$r_1=0.396\Omega$,$r'_{2e}=0.377\Omega$,$r'_{2st}=0.907\Omega$,$r^0=0.1885\Omega$,$X_1=1.534\Omega$,$X_m=33.535\Omega$,$X'_{2e}=2.096\Omega$,$X'_{2st}=1.319\Omega$。

万方数据

仿真的程序如下:

```
clc
clear
V1 = 380;poles = 8;fe = 50;r1 = 0.3962;x1 = 1.5341;
xm = 33.53;k1 = 2.6;r0 = 0.1885;k3 = 2.9;x0 = 2.096;
omegas = 4* pi* fe/poles;
ns = 120* fe/poles;
z1eq = j* xm* (r1 + j* x1)/(r1 + j* (x1 + xm));
r1eq = real(z1eq);
x1eq = imag(z1eq);
V1eq = abs(V1* j* xm/(r1 + j* (x1 + xm)));
n = 1:200;
s(n) = n/200;
rpm(n) = ns* (1 - s(n));
r2n = (-0.1234* 2.6^3* sqrt(s(n)).^3 + 1.2395* 2.6^2* s(n) - 0.9370* 2.6* sqrt(s(n)) + 0.1885)* 0.1885 + 0.1885;
x2n = (0.0114* 2.9^3* sqrt(s(n)).^3 - 0.0896* 0.9^2* s(n) + 0.04844* 2.9* sqrt(s(n)) + 0.9936)* 0.9936;
I2a = abs(V1eq./(z1eq + j* x2n + r2n./s(n)));
I2b = abs(V1eq./(z1eq + j* 2.096 + (0.1885 + 0.377)./s(n)));
Tmech1(n) = 3* I2a.^2.* r2n./(s(n)* omegas);
Tmech2(n) = 3* I2b.^2.* (0.1885 + 0.377)./(s(n)* omegas)
plot(rpm,Tmech1,rpm,Tmech2)
xlabel('rpm')
ylabel('Tmech')
```

仿真结果如图 7:

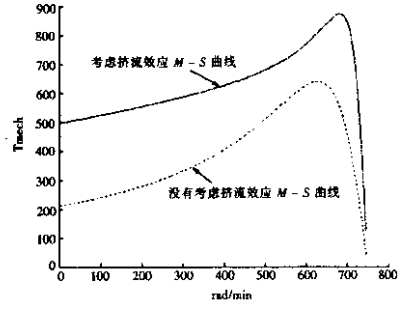

图 7　$M-S$ 特性曲线

Fig.7　$M-S$ characteristic curve

电流—转速特性曲线仿真程序

```
I1 = abs(V1./((r1 + j* x1) + (r2n./s(n) + j* x2n).* j* xm./(r2n./s(n) + j* (x2n + xm))));
I1a = abs(V1./((r1 + j* x1) + (r2n./s(n) + j* x2n).* j* xm./(r2n./s(n) + j* (x2n + xm))));
I1b = abs(V1./((r1 + j* x1) + ((0.188 5 + 0.377)./s(n) + j* 2.096).* j* xm./((0.188 5 + 0.377)./s(n) + j* (2.096 + xm))));
plot(rpm,I1a,rpm,I1b)
xlabel('rpm')
ylabel('I1')
```

仿真结果如图 8：

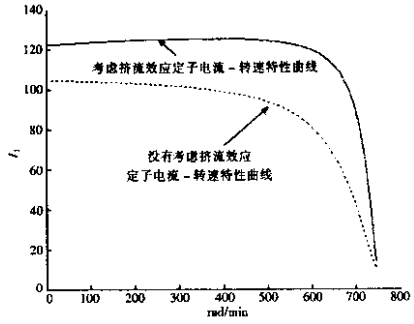

图 8 电流—转速特性曲线

Fig.8 Electric current – turn soon characteristic curve

图 7、图 8 中虚线没有考虑挤流效应的影响，实线考虑了挤流效应的影响，差异非常明显。

4 结论

三相异步电动机等效电路采用了变参数的数学模型，得到的特性曲线是比较准确和全面的，这样就克服了线性化等效电路没有考虑电机运行过程中参数变化的缺点，大大提高了计算精度，使计算结果更加接近于电机的实际运行。

参考文献：

[1] 刘新正译. 电机学(Electric Machinery, Sixth Edition)[M]. 北京：电子工业出版社，2004.
[2] 张森. MATLAB 仿真技术[M]. 北京：机械工业出版社，2004.
[3] 幺莉. 三相异步电动机变参数仿真模型[J]. 天津大学学报. 1997, 30(2)：157 – 162.

Research on Variable Parameter's Characteristic Curve of Three – phase Asynchronous Motor

XUE Feng – jin, ZHANG Ji – yong, YU Hai – dong
(College of Electronics and Telecommunication, Information Engineering College, Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225009, China)

Abstract: Considering the effect of the skin – effect during the starting of three – phase asynchronous motor on the parameter, the author sets up an equivalent circuit of variable parameter. He carries out the multinomial fitting by the function relational curve of polyfit to $r_n/r_0 = f(\zeta)$, $X_n/X_0 = f(\zeta)$, derires the mathematic model for calculating three – phase asynchronous motor's characteristic curve and imitates the emulation to the characteristic curve of three – phase asynchronous motor with MATLAB6.5.

Keywords: asynchronous motor; variable parameter; characteristic curve

万方数据