

# 感应电动机变频运行的方式及特性

李 伟 韩 力

重庆大学电气工程学院, 重庆(400044)

**摘 要** 在感应电动机等效电路的基础上,分析了当电源频率发生改变时,等值电路中主要参数的变化规律。给出了变频调速状态下感应电动机恒电压频率比、恒磁通、恒电流和恒功率调速情况下的运行特性。

**关键词** 变频 感应电动机 运行特性

## Operation property of induction motor by changing frequency

LiWei and HanLi

**Abstract** The principle of main parameter of the with the change of source frequency were given on the base of analyzing the equivalent circuit of induction motor. The stable performance in the state of variable speed and the operating property was given under the condition of constant voltage-frequency ratio, constant flux, constant current and constant power.

**Key words** Changing frequency, induction motor, operating property.

## 1 引言

近年来交流变频调速系统发展很快,已成为调速系统的主要研究和发展对象,广泛应用于交流变频调速系统的脉宽调制(PWM)技术,使输入电压更接近正弦波形。因此分析感应电动机在电源频率改变的情况下,电动机的运行方式及特性成为一项重要的研究工作<sup>[3]</sup>。

我们知道,工频电网上直接运行的交流电动机,额定工况下具有不变的特性。在交流变频调速系统下运行的电动机,根据不同的调速方式,电动机表现出各种不同的性能。由于采用不同的控制方式,电动机也将具有许多不同的运行特性<sup>[2]</sup>。

## 2 变频调速感应电机的等效电路及基本参数

当电源频率发生变化时,感应电动机等效电路中的某些参数也将发生变化(见图1)。下面分

析6个基本参数的变化规律。

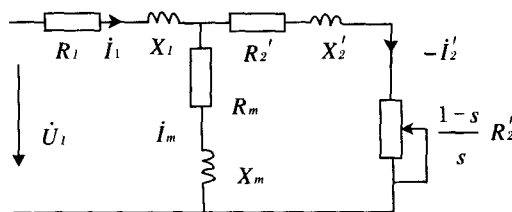


图1 T型等效电路

### 2.1 励磁电抗 $X_m$ 和励磁电阻 $R_m$

等值电路中励磁支路的电抗  $X_m$  可表示为  $X_m = 2\pi f_1 M$ ,  $M$  为互感系数,考虑磁路不饱和时  $M$  为常数,这使  $X_m$  仅与电源频率  $f_1$  成正比,即

$$X_m = X_{mN} \frac{f_1}{f_{1N}} = \alpha_f X_{mN} \quad (1)$$

式中,  $X_{mN}$ —额定频率  $f_{1N}$  时的互感电抗;

$\alpha_f = \frac{f}{f_{1N}}$ —频率调节系数(下同)。励磁电流  $I_{Fe} =$

收稿日期:2003-05-11.

李 伟 男 1978年生,硕士研究生;毕业于重庆大学电气工程学院电机专业,现从事电机控制研究.

$P_{Fe}/mE_1$ , 得到励磁电阻  $R_m$ 。

$$R_m = P_{Fe}/mI_{Fe}^2 = mE_1^2/P_{Fe} \quad (2)$$

对于一定频率  $f_1$  时的电机铁耗可以近似表示为

$$P_{Fe} = C_{Fe} \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1N}}\right)^{1.5} \quad (3)$$

$C_{Fe} = \frac{P_{FeN}}{(E_{1N}/f_{1N})^2}$ —铁耗常数。下标  $N$  的数值均表示额定频率  $f_{1N}$  时的量值。把式(3)代入式(2)得到:

$$R_m = R_{mN} \left(\frac{f_1}{f_{1N}}\right)^{1.5} = a_f^{1.5} R_{mN} \quad (4)$$

$R_{mN}$ —频率为  $f_{1N}$  时励磁支路的有效电阻。

## 2.2 定子每相漏电抗 $X_1$ 和有效电阻 $R_1$

等效电路中定子每相电抗(漏电抗),有效电阻可以表示为

$$X_1 = 2\pi f_1 L_1 = 2\pi f_{1N} L_1 \frac{f_1}{f_{1N}} = X_{1N} \alpha_f$$

$$R_1 = R_{1N} \quad (5)$$

$X_{1N}$ —额定频率  $f_{1N}$  时的互感电抗;

$R_{1N}$ —额定频率  $f_{1N}$  时的每相有效电阻。

定子每相有效电阻  $R_1$  和转子绕组归算到定子边的每相有效电阻  $R_2'$ , 在频率变化时由于集肤效应电阻值会有所变化。总趋势是随着  $f_1$  的上升,电阻值有所增加,随着  $f_1$  的减少,电阻值有所减少。但在正弦电源下,由于不存在谐波电流,集肤效应的影响可以忽略。

## 2.3 转子每相漏电抗 $X_2'$ 和有效电阻 $R_2'$

$$X_2 = 2\pi f_1 L_2 = 2\pi f_{1N} L_2 \frac{f_1}{f_{1N}} = X_{2N}' \alpha_f$$

$$R_2' = R_{2N}' \quad (6)$$

式中,  $X_{2N}'$ —额定频率  $f_{1N}$  时的互感电抗;  $R_{2N}'$ —额定频率  $f_{1N}$  时的转子每相有效电阻,其阻值随频率的变化与  $R_1$  相同。

## 3 异步电机变频运行的方式及特点

### 3.1 恒电压频率比的稳态特性

按照额定频率异步电动机的基波等值电路图,可以分析出电动机的稳态特性。在忽略电源电压中谐波对电动机特性影响情况下,分析采用正弦电压。如果忽略集肤效应,则电阻与频率无关,电抗与频率成正比。气隙中的旋转磁通在定子绕组中感应的反电势为  $E_1$ 。相电势的有效值可以表示为:

$$E_1 = 4.44 K_w f_1 N_1 \Phi_m \quad (7)$$

式中,  $K_w$ —定子绕组系数;

$f_1$ —定子电源频率;

$N_1$ —每相串联匝数;

$\Phi_m$ —每极磁通。

从式(7)中可以看出,每极磁通  $\Phi_m$  与  $\frac{E_1}{f_1}$  之比成正比。如果磁通减小,将引起电动机输出转矩的下降,影响过载能力。如果维持  $E_1$  不变而减小  $f_1$  则磁通将增加,会引起磁路饱和,励磁电流增加,电动机将发热严重,这也是不允许的。因此,变频调速电动机就必须在调频的同时,等比例地改变定子电源电压,以维持气隙磁通不变,这就是电压频率比恒定的运行方式,即  $\frac{U_1}{f_1}$  为常量。忽略定子压降后可近似认为  $U_1 = 4.44 K_w f_1 N_1 \Phi_m$ , 从上式可见,按照恒电压频率比进行调节,可以得到恒定的气隙磁通。在这种运行方式下,任何频率的  $\frac{U_1}{f_1}$  之值为常数,可以将电机的转矩公式简化为

$$M = A \frac{f_2 X_m^2 / R_2'}{(R_1 + f_2(X_m^2 - X_{11} X_{22}) / f_1 R_2')^2 + (X_{11} + f_2 R_1 X_{22}) / f_1 R_2'} \quad (8)$$

式中,

$$A = \frac{Pm}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \text{—常数。}$$

对于恒电压频率比的运行方式,当电动机的参数已知时,可以画出转矩特性;图2为几种频率下电动机转矩与转子频率  $f_2$  的关系曲线。

从图2的曲线族可以看出,当定子频率较低时,异步电动机的转矩迅速减小。这是因为在额定频率时,定子电阻压降可以忽略;在低频时,端电压也相应较低,电抗压降也随频率的降低等比下降,而电阻压降不变,因此,定子的电阻压降占的比例较大,漏抗压降比例增大,气隙磁通下降比较多,转矩随之降低。

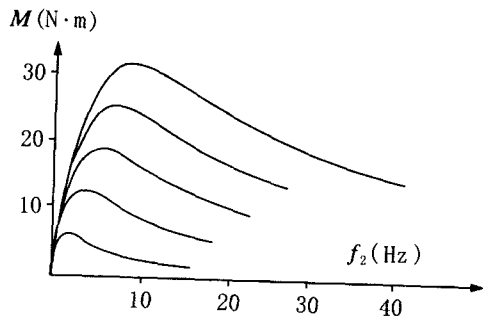


图2 恒电压频率比下异步电动机的转矩特性

图3画出了一台异步电动机的最大转矩和起动转矩与电源频率的关系。纵坐标表示的为转矩的标么值。其中的最大转矩是由式(8)最大值求出,而起动转矩则由式(8)中的当 $f_1 = f_2$ 时求出。由图3可见,这两种转矩在频率低于10Hz时都严重下降。为了改变低频特性,在低频时必须增加电压。

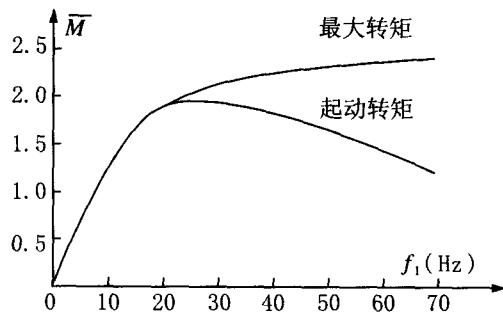


图3 恒电压频率比下电动机的最大转矩、起动转矩与定子频率关系

### 3.2 恒磁通运行方式

恒电压频率比的运行方式,在低频时由于 $R_1$ 上的压降所占的比例增加,电机转矩下降很快。而在全部速度范围内不能保持电动机的气隙磁通不变,低频性能较差。对于调速范围大的恒转矩负载和起动转矩要求大的负载是不利的。对变频调速电动机,为了在整个速度范围内获得较高的转

矩,气隙磁通必须保持常数,不允许在低频时,电机的磁通减小。为了达到这一目的,在调节过程中,必须使电势与频率之间成线性变化。因此要求在调速范围内维持 $\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}$ ,即 $M$ 不变。根据等值电路可以求得转子电流 $I_2'$ ,可进一步求得转矩公式为

$$M = \frac{pm}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \left(\frac{f_2 R_2'}{R_2' + (2\pi f_2 L_2')^2}\right)^2$$

又因 $\left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 = (C_E \Phi_m)^2$  故上式可写成

$$M = \frac{pm}{2\pi} C_E^2 \Phi_m^2 \left(\frac{f_2 R_2'}{R_2' + (2\pi f_2 L_2')^2}\right)^2 \quad (9)$$

可见电磁转矩正比于气隙磁通的平方。保持 $\frac{E_1}{f_1}$ 不变,电磁转矩完全由转子的转差频率 $f_2$ 决定,而与定子频率 $f_1$ 无关。求式(9)的最大值,可得气隙磁通为常数时的最大转矩表达式。对转子频率 $f_2$ 求导并使其等于零,则得到允许的转子最大频率为 $f_{2m} = \frac{R_2'}{2\pi f_2 L_2'}$ ,代入可得到电动机的最大转矩

$$M_m = \frac{pm}{2\pi} (C_E \Phi_m)^2 \frac{1}{4\pi L_2'} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,最大转矩正比于气隙磁通的平方,而反比于转子漏电感。转子电阻不影响最大转矩,但影响出现最大转矩时的转子频率。综合式(9)和式(10)得出恒磁通运行时的实用转矩方程。

$$\frac{M}{M_m} = \frac{2}{(f_2/f_{2m}) + (f_{2m}/f_2 L_2')} = \frac{1}{K_m} \quad (11)$$

式中, $K_m = M_m/M_N$ —电机的过载能力。

### 3.3 恒电流运行方式

保持异步电动机定子电流 $I_1$ 为恒定值的方式,叫恒流控制方式。由于电机转矩实际上是取决于气隙磁通和定子电流,因此,直接控制电流比控制电压更有优越性。电机变频器被控制在一定电流数值下运行,没有瞬时的电流冲击,可以不存在大的过流容量,能充分利用晶闸管装置的容量,使

得逆变器可经济设计、经济运行。根据等值电路,使电动机的转矩用定子电流和转子频率表示,从而得出:

$$M = \frac{pm}{2\pi} I_1^2 \frac{(2\pi L_m)^2}{(R_2'/f_2) + (f_2/R_2')(2\pi L_{22})^2} \quad (12)$$

式中,  $L_{22} = L_2 + L_m$  — 转子的总漏电感。

从上式中可以看出,在任何定子频率下,只要有一个大的定子电流,就能产生一个大的转矩。因此,控制定子电流也可以获得较好的转矩性能。令  $I_1$  为常数,将式(12)对  $f_2$  求导使之等于0,得到临界转差频率为  $f_{2m} = \frac{R_2'}{2\pi L_{22}} = \frac{R_2'}{2\pi(L_2' + L_m)}$  将该式代入,得到最大转矩

$$M_m = \frac{pm}{2} I_1^2 \frac{L_m}{L_2' + L_m} \quad (13)$$

若不考虑电动机磁路饱和时,临界转差频率  $f_{2m}$  对所有的定子电流有相同的数值。值得注意的是,实际上,电流  $I_1$  超过一定数值后,必然导致磁路饱和而使激磁电感  $L_m$  降低,  $f_{2m}$  偏大;由于磁路饱和,电机转矩与  $I_1^2$  成正比的关系不再成立。

### 3.4 恒功率运行方式

从上面的分析中可以知道,电动机在基本频率以下变频调速时,要求加到电动机上的电势必须随定子频率成正比改变,以保证气隙磁通为常数,即恒磁通运行。在任何转速下,电动机都能发挥很大的转矩。由式(9)可见,只要限定转差频率  $f_2$  为固定的数值,即可以得到恒定转矩。但是,定子电压增加是有一定限度的,到了额定电压以后,电压只能保持恒定,再提高转速只能使频率增加。也就是说,在基本转速以上,随着频率的增加,气隙磁通将下降,转矩也随之下降,电动机的转矩特性将变成如图4所示。

从图中可以看出,在电动机的基本转速以下,包络线所显示的转矩范围是不变的,称为恒转矩运行。超过基本转速以后,电动机转矩下降,电动机在恒功率方式下运行。由等效电路可以得到,异

步电动机的转矩方式为:

$M = \frac{pm}{2\pi R_2'} E_1 I_2 \cos \Psi_2$ , 当转差率较小时,可以忽略  $X_2'^2$ , 因而  $\cos \Psi_2 = 1$ , 当电压提高到一定数值后,可以认为  $U_1 = E_1$ 。异步电动机的转矩可以近似写成:

$$M = \frac{pm}{2\pi R_2'} \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 f_2 \quad (14)$$

由转矩公式(14)可知对于不变的电压和转子频率,转矩随着定子频率  $f_1$  的平方增减。

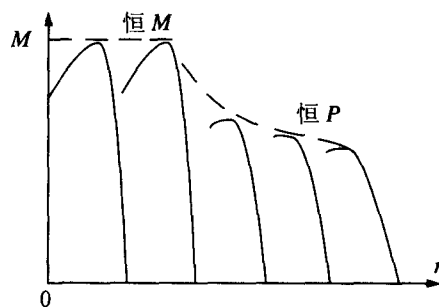


图4 恒转矩和恒功率时的转矩特性

## 4 结论

通过对感应电动机变频调速不同调节方式的具体分析,给出了电动机在不同控制状态下的稳态特性,对传动系统的分析和设计有许多实际意义。

### 参考文献

- [1] 陈世坤. 电机设计(第二版). 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 陈伯时等. 交流调速系统. 北京:机械工业出版社,2002.4.
- [3] 江清波. 变频调速异步电机的特性分析. 中小型电机. 1998.25.
- [4] 李再赫等. 变频调速电动机的运行特性. 大电机技术. 1999.6.
- [5] 许大中. 交流电机调速理论. 杭州:浙江大学出版社,1991.

更正:2003年第3期第1页作者简介中程小华的毕业学校更正为“华中理工大学”。