

# 感应电动机调压节能的理论分析

吕广强, 纪延超

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 详细分析了感应电动机在调压情况下的工作原理, 得到了功率因数与转差率以及转差率与电机定子电压的关系, 进而得到功率因数与定子电压的函数关系, 在此基础上建立了调压时感应电动机节能的数学模型。通过算例在理论上证明了调压节能的可行性, 为电机节能控制奠定了理论基础。

**关键词:** 调压; 节能; 感应电动机

**中图分类号:** TM346      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2003)04-0018-03

## 1 引言

当今人们对环境保护和节约能源问题日益关注。电动机是工农业生产及日常生活中耗电量最多的一种电气设备。据资料统计, 仅三相异步电动机的用电量就占全国总用电量的 60% 以上。因此研究异步电动机的节能问题, 提高其运行效率对节约能源有重要的现实意义。自 1977 年美国宇航局工程师 NOLA 提出了电机功率因数控制器 PFC<sup>[1]</sup> (Power Factor Controller) 以来, 国内外的学者对电机的节能问题进行了大量的研究, 并取得了一定的成果。

本文就是基于调节异步电动机定子电压可以提高电机的功率因数、改善电机的轻载运行特性的前提下, 详细分析了电机通过调压节能的机理, 并建立了数学模型。为电机节能控制器的研究提供了理论基础。

## 2 调压节能的原理

在实际应用中, 由于选择电动机的容量偏大和负载的变动使得大部分异步电动机的运行点常偏离额定点, 这时电机的效率和功率因数都很低。调压节能的基本原理是利用电机轻载时效率低下这一点, 通过降低输入电机定子的电压来提高电机效率。电压降低后, 气隙主磁通基本上成正比下降, 即  $\phi \propto E_1 \propto U_1$ , 电机定子电流中的励磁分量  $I_0$  也随之下降, 使  $I_0$  的值随  $E_1$  下降的幂次大于 1。但  $\phi$  下降而电机负载转矩不变时, 则转子电流  $I_2$  将上升,  $I_2$

$\propto 1/\phi \propto 1/E_1$ 。这些变化对电机损耗的影响如下: 转子铝耗  $P_{Al} \propto I_2^2 \propto 1/E_1^2$ , 定子铁耗  $P_{Fe} \propto \phi^2 \propto E_1^2$ 。定子电流  $I_1$  由  $I_2$  及  $I_0$  的向量之和构成, 电压下降时, 电流  $I_1$  可以减小, 铜耗也相应的减少。但在某

种程度下降时, 也会使定子电流增大。机械损耗一般变化不大, 杂散损耗随定、转子电流大小而变, 因而总损耗是否能减少, 取决于铁耗、定子铜耗及转子铝耗三者之间的关系, 最重要的是定子电流能否减少。由于在轻载时, 励磁电流占主导地位, 因此在电压下降一定程度上, 可以达到节能的目的。

## 3 电机节能的数学模型

根据电机学知识, 简化电机各参数的关系, 并得出功率因数与定子电压的数学关系。

### 3.1 转差率 $s$ 与定子电压 $U_1$ 的关系

当异步电动机带载并处于稳定运行时, 其电磁转矩  $M$  的大小等于负载转矩  $M_L$ , 且两者的方向相反。当  $M_L > M$ , 电动机的转速  $n$  就要下降。如果电动机的电磁转矩  $M$  随着转速  $n$  的下降能自动增大, 使得增大的  $M$  又等于增大的  $M_L$ , 则认为电机是能够稳定运行的。反之, 如果电动机的负载转矩增大, 电动机转速下降, 电磁转矩反而减小, 使  $M_L > M$ , 则电动机的转速就继续下降, 直至停止转动, 则认为电机是不稳定运行。用电机的电磁转矩与转差率的变化率表示为: 当  $dM/ds > 0$ , 电机稳定运行; 当  $dM/ds < 0$ , 电机不稳定运行。

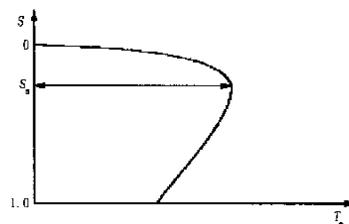


图1 电机的转差率与电磁转矩的关系曲线

Fig. 1 Curve between slip ratio and torque

从图1可以看出, 在  $0 < s < s_m$  的范围内,  $dM/ds > 0$

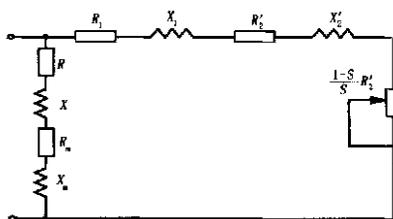


图2 电机的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of induction motor

$ds > 0$ , 所以电机稳定运行。在  $s_m < s < 1$  的范围内, 电机运行则是不稳定的; 即在这个转差率范围内, 从理论分析来看, 电机是可以运行的, 但一旦出现了小的扰动, 电动机的转速  $n$  要么升速到  $0 < s < s_m$  的范围内, 要么停转。

电磁转矩可表示为:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (1)$$

$$\text{式中: } M_{\max} = \frac{1}{2c_1} \cdot \frac{m_1 p U_1^2}{2 f_1 [(r_1 + c_1 r_2)^2 + (x_1 + c_1 x_2)^2]}$$

$$s_m = \frac{c_1 r_2}{x_1 + c_1 x_2}$$

在上式中,  $m$ 、 $c_1$  是常数, 所以当忽略电机参数变化时, 可近似地认为:  $M_{\max} = c_2 U_1^2$ ;  $s_m = c$  为常数。将  $M_{\max}$  代入式(1)可得:

$$\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} = \frac{2}{M} c_2 U_1^2 = c U_1^2 \quad (2)$$

由式(2)可得:

$$s = c (U - \sqrt{U^2 - 4}) / 2 \quad (3)$$

其中:  $U = c U_1^2$

对式(3)求导可以得到:

$$\frac{ds}{dU} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sqrt{U^2 - 4} - U}{\sqrt{U^2 - 4}} < 0 \quad (4)$$

由式(4)可以知道, 调节电机定子的端电压会引起转差率的变化: 当升高  $U_1$  时, 转差率  $s$  减小; 反之, 转差率  $s$  增大。

### 3.2 功率因数 $\cos \phi$ 与转差率 $s$ 的关系

根据电机的等效电路<sup>[2]</sup>图2, 可得到电机的总阻抗  $Z$  为:

$$Z = \frac{x_{11} y_1 + x_{22} y_2 + j(x_{11} y_2 - x_{22} y_1)}{x_{11}^2 + x_{22}^2} \quad (5)$$

$$x_{11} = 2R_1 + R_m + R_2/s; \quad x_{22} = 2X_1 + X_m + X_2;$$

其中:

$$y_1 = (R_1 + R_m)(R_1 + R_2/s) - (X_1 + X_m)(X_1 + X_2);$$

$$y_2 = (X_1 + X_m)(R_1 + R_2/s) + (R_1 + R_m)(X_1 + X_2); \quad (6)$$

因而, 可以得到电机的功率因数:

$$\cos \phi = \cos \left[ \operatorname{tg}^{-1} \frac{x_{11} y_2 - x_{22} y_1}{x_{11} y_1 + x_{22} y_2} \right] \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, 当电机的内部参数不变时, 功率因数  $\cos \phi$  仅与转差率  $s$  有关。

设电机的最大功率因数所对应的转差率为  $s_a$ , 则对式(7)求导得到:

$$s_{a(1,2)} = \frac{2ZR_2 \pm \sqrt{(2ZR_2)^2 + 4[2ZY(R_1^2 + X_1^2 + X_2) + R_1 + R_2]ZR_2}}{-2[2ZY + Z(R_1^2 + X_1^2 + X_2) + R_1 + R_2]} \quad (8)$$

式中:

$$Z = (R_1 + R_m) / [(R_1 + R_m) + (X_1 + X_m)]^2,$$

$$Y = R_1 R_2 + X_1 R_2 + R_2 X_2 + R_1 X_1 + R_1 X_2 + X_1 X_2$$

因此, 当转差率  $s$  等于特征转差率  $s_{a(+)}$  时, 功率因数达  $\cos \phi$  最大值。

通过以上分析, 由式(3)和式(8)为功率因数和定子端电压建立了单值关系。

## 4 算例

现以一 17kW 异步电动机为例来分析其功率因数  $\cos \phi$  与转差率  $s$  之间的关系。异步电动机内部的参数为:  $R_1 = 0.228$ ;  $X_1 = 0.40$ ;  $R_2 = 0.073$ ;  $X_2 = 0.77$ ;  $R_m = 2.4$ ;  $X_m = 20$ 。将以上参数代入式(7), 得到相应的  $\cos \phi - s$  曲线, 见图3。

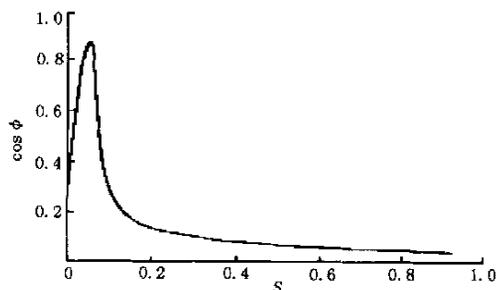


图3 电机的功率因数与转差率的关系曲线

Fig. 3 Curve between power factor and slip ratio

从图3可以看出, 在  $0 < s < s_a$  的范围内, 功率因数随着转差率的增加而上升; 在  $s_a < s < 1$  的范围内, 功率因数随着转差率的增加而下降。这与前面所论述的转差率与定子端电压的关系分析可知: 对应最大转矩时的转差率  $s_m$  与最大功率因数时的转差率  $s_a$  相等, 即  $s_m = s_a$ 。根据以上分析: 在  $0 < s < s_a$  内, 降低定子端电压可以提高电机的功率因数, 从而实现节能。

## 5 结论

通过对电机在轻载时运行机理的分析,建立了电机节能的数学模型,得出了电机功率因数与转差率以及与定子端电压的单值函数关系,并通过算例验证了其正确性。这将为电机节能控制器的研制提供理论基础。

## 参考文献:

[1] Frank. Nola. Power factor control system for AC induction

motors[P]. U. S. A Patent. 4052648 act. 4,1977.

[2] 汤蕴,史乃,等.电机学[M].西安:西安交通大学出版社,1993.

收稿日期: 2002-08-09; 修回日期: 2002-11-05

作者简介:

吕广强(1974-),男,博士研究生,研究方向为电力传动和电力电子在电力系统中的应用;

纪延超(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为FACTS及电力电子在电力系统中的应用。

### Theoretical study on energy saving by varying the stator voltage for induction motors

L ü Guang-qiang, JI Yan-chao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The operation principle is analyzed when varying the stator voltage of induction motors in this paper. By analyzing the relationship of power factor, slip ratio and the stator voltage, the function between power factor and the stator voltage is derived. The mathematical model on energy saving of induction motors is proposed. The result of an example shows the applicability of energy saving, which provides the theoretical basis for control schemes.

**Key words:** varying voltage; energy saving; induction motors

(上接第9页)

- [5] 王建勋,冉启文,纪延超,等.谐波检测中小波变换频域特性分析[J].电力系统自动化,1998,22(7):40-43.
- [6] 王群,吴宁,谢品芳.一种基于神经元的自适应谐波电流检测法[J].电力系统自动化,1997,21(10):13-16.
- [7] 秦梅,周林,叶一麟.三相平衡和不平衡系统中有害电流的检测技术[J].电工技术杂志,2000,(6):4-6.
- [8] 杨君,王兆安.三相电路谐波电流两种检测方法的对比研究[J].电工技术学报,1995,(5):43-48.

收稿日期: 2002-08-05; 修回日期: 2002-10-09

作者简介:

杨杰(1974-),男,博士研究生,研究方向为通讯与数字信号处理、电力电子技术;

赖声礼(1939-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为生物电磁学,电能质量监控;

李心广(1963-),男,副教授,在职博士研究生,研究方向为电力电子与计算机应用;

秦华标(1967-),男,博士,高工,主要研究方向为智能控制与计算机应用。

### Research on precision detection method of harmonics, fundamental active current and reactive current in the case of unsymmetrical three-phase voltage

YANGJie<sup>1</sup>, LAI Sheng-li<sup>1</sup>, LI Xin-guang<sup>2</sup>, QIN Hua-biao<sup>1</sup>

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou University, Guangzhou 510405, China.)

**Abstract:** The  $i_p$ - $i_q$  detecting method will cause errors when three-phase voltage is imbalance. The errors are analyzed in this paper. A improved  $i_p$ - $i_q$  detecting method is put forward. In order to select phase A fundamental positive sequence voltage, a voltage selected unit based on low pass filter is used to replace the phase lock loop of  $i_p$ - $i_q$  detecting method. Simulation and experiment show that the improved  $i_p$ - $i_q$  detecting method can accurately detect harmonics, active current and reactive current of fundamental when three-phase voltage is imbalance and is distorted.

**Key words:** active power filter; harmonics; reactive current