

笼型异步电动机调频调压运行 中的最佳节电状态分析

孙 彭 年

(电机系)

提 要

在[2]文的基础上,本文进一步对笼型异步电动机在调频调速运行时的节电问题进行了探讨。分析了各类损耗与电压频率和负载大小的关系,推出了为取得最佳节电效果,电源电压和频率随负载的调节规律,导出了最佳运行状态下的频率、电压和损耗的计算公式,最后以一则实例来说明其计算方法。

关键词: 笼型异步电动机, 调频调速

从电机的基本运行理论可知笼型异步电动机进行变频调速时,在改变频率 f 的同时,必须相应改变其电源电压 U_1 。在理想的情况下应使其保持比例关系。即:

$$f/f_N = U_1/U_{1N}$$

式中 f_N 、 U_{1N} 分别为额定频率和额定电压。

此时,异步电动机的机械特性将如图所示。随着频率和电压的成比例变化,曲线将在保持最大转矩 M_m 不变的情况下,沿转差率 s (或转速 n)的坐标方向平移^[1]。

但是,随着负载的变化,特别如带动风扇、水泵之类负载,从电动机节能运行来说,上述成比例的调频调压关系,未必能获得最佳的节能效果。

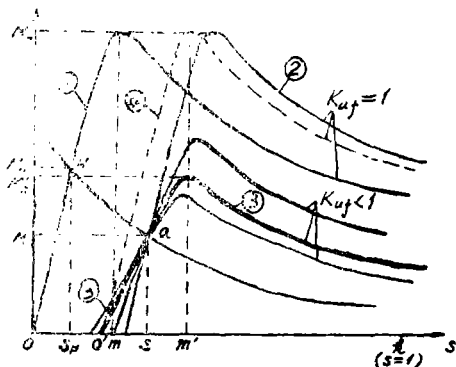


图 1

在[2]文中已分析了:为了节电运行,异步电动机在轻载运行时应相应降低其电源电压,并导出了在最佳节电情况下负载与电压调节的关系。

对于调频调压运行的笼型异步电动机,相对于某一负载运行点,在改变频率与电压的相对关系时,可以有很多条机械特性曲线穿过如图中的a点。在此众多的曲线中定有一条曲线(假设其为图中的曲线③),使电动机运行于最佳的节电状态。本文的目的就是要在这一系列穿过a点的曲线中,找出一条效率最高的曲线来,也就是求出在此负载下节电效果最好的频率和电压之值。

假设: $K = M/M_N$ 为负载的变化系数。

$K_u = U_1/U_{1N}$ 为电压的变化系数。

本文1987年9月2日收到。

$K_f = f/f_N$ 为频率的变化系数

文中仅对电动机的节能运行状态进行分析, 不涉及电源和负载, 并假定电源的电压和频率能作平滑调节。

电动机应先通过一系列试验, 测得其额定电压额定频率下的定子空载铜耗 P_{Cu0N} , 磁滞损耗 P_{hN} , 涡流损耗 P_{eN} ; 测得风摩损耗 P_{fw} 随转速 n 的变化曲线 $P_{fw} = f(n)$; 测得额定电压, 额定频率和额定负载下的定、转子基本铜耗 P_{CuN} 和附加损耗 P_{zN} 。其方法可参看文献^[3,4], 这里不作介绍。

下面将分析笼型异步电动机在不同负载、电压和频率下运行时, 其各种损耗随 K 、 K_u 、 K_f 的变化关系。

1. 铁耗 P_{Fe} : 从电机理论可知: 铁耗中所包括的磁滞损耗和涡流损耗都与磁通密度的平方成比例^[5], 也可近似地认为与电源电压的平方成比例。即:

$$P_{Fe} = K_u^2 P_{FeN} = K_u^2 P_{Fe0}$$

其中: P_{FeN} 为额定情况下的铁耗即相当于额定电压额定频率下空载运行时的铁耗 P_{Fe0} , 其值为 $P_{FeN} = P_{hN} + P_{eN}$ 。

但是铁芯中的磁滞损耗 P_h 与涡流损耗 P_e 随频率的变化关系则是不一致的, 在一般情况下前者与频率的一次方成比例, 后者与频率的平方成比例。注意到当电压不变仅频率变化时, 铁芯磁密也将随频率成反比例变化, 而铁耗又与磁密的平方有关, 故 P_h 、 P_e 与 K_f 的关系可分别写成:

$$P_h = P_{hN} K_f / K_f^2 = P_{hN} / K_f$$

$$P_e = P_{eN} K_f^2 / K_f^2 = P_{eN}$$

当同时进行变频变压时, 其与 K_f 、 K_u 的关系将分别为:

$$P_h = P_{hN} K_u^2 / K_f \quad (1)$$

$$P_e = P_{eN} K_u^2 \quad (2)$$

2. 空载电流的定子铜耗 $P_{Cu10} = 3r_1 I_0^2$: 由于磁路的非线性, 使 P_{Cu10} 与电压和频率的关系极为复杂。在此暂假定空载电流 I_0 与电压 U_1 成比例。由于 P_{Cu10} 在总损耗中所占的分量很小, 故假定并不会给计算结果带来较大误差。对于 I_0 与 K_f 的关系, 如前所述: 由于磁密与频率成反比例变化, 故也可视为 I_0 与 K_f 成反比。则有: $I_0 \propto K_u / K_f$ 。此外再假定定子电阻 r_1 与频率无关。于是得定子电流的空载(激磁)分量所引起定子铜耗为:

$$P_{Cu10} = P_{Cu0N} K_u^2 / K_f^2 \quad (3)$$

式中 P_{Cu0N} 为额定频率额定电压时的定子空载铜耗。

3. 风摩耗 P_{fw} : 它随转速的变化而变化, 或者说与电动机运行的转差率 S 有关。对于本文所涉及的风扇及泵类负载, 转速决定于负载的大小。故对于某一负载就有其一定的风摩耗。针对图中的某运行点 a 来说, P_{fw} 可视为常数, 其值可从试验测得的 $P_{fw} = f(n)$ 曲线中查取。

4. 定子电流负载分量在电机绕组中产生的基本铜耗 P_{Cu} 和附加损耗 P_z : 异步电动机的转矩表示式为:

$$M = C_M I_2' \phi_m \cos \varphi_2$$

式中: C_M 为转矩常数

$\cos\varphi_2$ 为转子电路的功率因数, 一般情况下, 可近似认为 $\cos\varphi_2 \approx 1$ 。

I_2' 为转子电流归算到定子方的值。

其磁通 ϕ_m 可视为与电压 U_1 成正比而与频率成反比, 即:

$$\phi_m = C_\phi U_1 / f$$

式中: C_ϕ 为某一常数。

于是转矩表示式可写成:

$$M = C_M C_\phi I_2' U_1 / f = C_M' I_2' U_1 / f$$

对于额定运行情况, 则有:

$$M_N = C_M' I_{2N}' U_{1N} / f_N$$

两者之比得: $K = M / M_N = I_2' / I_{2N}' \cdot K_u / K_f$ 则得:

$$I_2' = I_{2N}' K \cdot K_f / K_u \quad (4)$$

负载电流产生的基本铜耗可视为只与电流大小的平方成比例而与频率无关; 但负载电流所引起的附加损耗则与电流大小的平方有关, 也与频率有关。根据有关文献^[5], 可认为它与频率的平方成比例。由此可得电动机的负载基本铜耗 P_{Cu} 和附加损耗 P_Z 与 K 、 K_u 、 K_f 间的关系为:

$$P_{Cu} = P_{CuN} K^2 K_f^2 / K_u^2 \quad (5)$$

$$P_Z = P_{ZN} K^2 K_f^4 / K_u^2 \quad (6)$$

于是异步电动机在调频调压运行时的总损耗为:

$$\Sigma P = P_{Cu10} + P_h + P_{fW} + P_{Cu} + P_Z$$

$$= P_{CuN} \frac{K_u^2}{K_f^2} + P_{hN} \frac{K_u^2}{K_f^2} + P_{eN} K_u^2 + P_{fW} + P_{CuN} \frac{K^2 K_f^2}{K_u^2} + P_{ZN} \frac{K^2 K_f^4}{K_u^2} \quad (7)$$

如果令: $K_{uf} = K_u / K_f$, 此值表示电压的变化相对于频率变化的比率。为了不使电机磁路过于饱和, K_{uf} 之值不应大于1。但在某一负载下运行时 K_{uf} 却可以在小于1的各个值中选取, 以使得电动机在该负载情况下, 具有最低的损耗值。如图中的曲线③。

将 $K_u = K_{uf} \cdot K_f$ 代入式(7)中得:

$$\Sigma P = P_{CuN} K_{uf}^2 + P_{hN} K_{uf}^2 K_f + P_{eN} K_{uf}^2 K_f^2 + P_{fW} + P_{CuN} \frac{K}{K_{uf}^2} + P_{ZN} \frac{K^2 K_f^2}{K_{uf}^2} \quad (8)$$

在图中曲线④是与曲线③处于同一频率 K_f 之下的, 但曲线④所对应的电压为 $K_u U_{1N} = K_f U_{1N}$ (其 $K_{uf} = 1$); 而曲线③所对应的电压则为 $K_u U_{1N} = K_f \cdot K_{uf} U_{1N}$ (其 $K_{uf} < 1$) 故有:

$$\frac{M_{m'}}{M_m} = \frac{K_{uf}^2 K_f^2 U_{1N}^2}{K_f^2 U_{1N}^2} = K_{uf}^2 \quad (9)$$

式中: $M_{m'}$ 是曲线③中的最大转矩

又从图中曲线③可得:

$$M / M_{m'} = \overline{o's} / \overline{o'm'} \quad (10)$$

由于线段 $\overline{o's}$ 和 $\overline{o'm'}$ 是电动机在频率为 $f = K \cdot f_N$ 下运行的两个转差率, 如果用额定频

率时的转差率 s 和 s_m 来表示 $\overline{o's}$, $\overline{o'm'}$ 线段之值则有:

$$\overline{o's} = \overline{o'k} - \overline{sk} = K_f - (1-s)$$

$$\overline{o'm'} = \overline{om} = s_m$$

将它们代入(10)式并考虑到式(9)后得:

$$M = M_{m'} \frac{\overline{o's}}{\overline{o'm'}} = \frac{K_{uf}^2 M_{in}}{s_m} [K_f - (1-s)]$$

再由曲线①可得:

$s_N/s_m = M_N/M_{in}$ 即 $s_m = s_N M_{in}/M_N$ 代入上式中得:

$$M = \frac{K_{uf}^2 M_N}{s_N} [K_f - (1-s)] = K M_N \quad \text{由此得}$$

$$K_h = \frac{s_N K}{K_{uf}^2} + (1-s) \quad (11)$$

将(11)式代入(8)式中得:

$$\Sigma P = P_{CuON} K_{uf}^2 + P_{hN} K_{uf}^2 \left[\frac{s_N K}{K_{uf}^2} + (1-s) \right] + P_{eN} K_{uf}^2 \left[\frac{s_N K}{K_{uf}^2} + (1-s) \right]^2 + P_{fW} +$$

$$P_{CuN} \frac{K^2}{K_{uf}^2} + P_{ZN} \frac{K^2}{K_{uf}^2} \left[\frac{s_N K}{K_{uf}^2} + (1-s) \right]^2$$

$$= P_{CuON} K_{uf}^2 + P_{hN} s_N K + P_{hN} K_{uf}^2 (1-s) + P_{eN} \frac{s_N^2 K^2}{K_{uf}^2} + 2P_{eN} s_N K (1-s) +$$

$$P_{eN} K_{uf}^2 (1-s)^2 + P_{fW} + P_{CuN} \frac{K^2}{K_{uf}^2} + P_{ZN} \frac{K^4 s_N^2}{K_{uf}^6} + 2P_{ZN} \frac{K^2 s_N}{K_{uf}^4} (1-s) +$$

$$P_{ZN} \frac{K^2}{K_{uf}^2} (1-s)^2$$

$$\text{取: } \frac{d\Sigma P}{dK_{uf}} = 2P_{CuON} K_{uf} + 2P_{hN} K_{uf} (1-s) - 2P_{eN} \frac{s_N^2 K^2}{K_{uf}^3} + 2P_{eN} K_{uf} (1-s)^2 - 2P_{CuON}$$

$$\frac{K^2}{K_{uf}^3} - 6P_{ZN} \frac{K^4 s_N^2}{K_{uf}^7} - 8P_{ZN} \frac{K^3 s_N}{K_{uf}^6} (1-s) - 2P_{ZN} \frac{K^2}{K_{uf}^4} (1-s)^2 = 0$$

要解此方程是很困难的,但对一般笼型异步电动机来说,其 s_N 值很小, s_N^2 则更小。为此将上式中凡是带有 s_N 的项都略去不会有太大的误差。经整理后得:

$$P_{CuON} K_{uf}^4 + P_{hN} K_{uf}^4 (1-s) + P_{eN} K_{uf}^4 (1-s)^2 - P_{CuN} K^2 - P_{ZN} K^2 (1-s)^2 = 0$$

$$\text{则: } K_{uf} = \sqrt[4]{\frac{[P_{CuN} - P_{ZN} (1-s)^2] K^2}{P_{CuON} + P_{hN} (1-s) + P_{eN} (1-s)^2}} \quad (12)$$

最后, 将所得的 K_{af} 值代入(11)便可求得在此负载下最佳节电运行时的频率:

$$f_i = K_f \cdot f_N \quad (13)$$

又由 $K_u = K_{af} \cdot K_f$ 便可求得相应于频率 f_i 下应供给的电压值:

$$U_{fi} = K_u \cdot U_{fN} \quad (14)$$

再将所得的 K_{af} 、 K_f 和其它已知额定情况下的各损耗值以及电机的负载系数 K 一并代入式(8)中, 便可求得最佳节电状态下的总损耗 ΣP 之值。

如果按通常的变频调速法(图中的曲线②): 即令 $K_u = K_f$ 。此时 $K_{af} = 1$, 代入式(11)求得相应的 K_f 值, 连同已知的其它数值代入(8)中算出当 $K_{af} = 1$ 时该电动机的总损耗 ΣP 。

两者相减:

$$\Delta \Sigma P = \Sigma P - \Sigma P' \quad (15)$$

此即为: 以最佳节电状态运行所能节省的电功率。

例: 某台Y250M-2三相异步电动机, 已知其 $P_N = 55$ 千瓦, $U_N = 380$ 伏, $f_N = 50$ 赫芝, $s_N = 0.95\%$, 总损耗 $\Sigma P = 5489.4$ 瓦, 其中 $P_{CuN} = 66.7$ 瓦, $P_{hN} = 343.9$ 瓦, $P_{eN} = 800.8$ 瓦, $P_{fWN} = 1501.5$ 瓦, $P_{CnN} = 1468.2$ 瓦, $P_{ZN} = 1375$ 瓦。由负载的机械特性得: 当 $K = 0.25$ 时 $S = 0.33$ 。又由电动机的 $P_{fW} = f(n)$ 曲线得此时的 $P_{fW} = 730$ 瓦。求带此负载以最佳节电状态运行时供给电动机的电压和频率值; 此时的总损耗; 以及与 $K_{af} = 1$ 时相比较所能节省的功率。

由(12)式可求得: $K_{af} = 0.6675$, 由(11)式可得: $K_f = 0.6753$

则 $f_i = 33.77$ 赫芝

$K_u = 0.451$

则: $U_{fi} = 171.3$ 伏

代入(8)式后得: $\Sigma P_i = 1319.8$ 瓦

若取 $K_{af} = 1$ 则:

$$K_f = 0.6724$$

$$f = 33.62 \text{赫芝}$$

$$K_u = K_f = 0.6724$$

则 $U_i = 255.5$ 伏

代入(8)式后得: $\Sigma P = 1520.6$ 瓦

两者相比较能节电:

$$\Delta \Sigma P = 1520.6 - 1319.8 = 200.8 \text{瓦}$$

参 考 文 献

- [1] 颜绳谷主编 《电机与拖动基础》下册 机械工业出版社
- [2] 孙彭年 《笼型异步电动机调压节电运行的最佳状态分析部分》《中小型电机》1985年第3期
- [3] 《中小型电机标准汇编》 技术标准出版社
- [4] 何秀伟主编 《电机测试技术》 机械工业出版社
- [5] M. H. 柯斯泰珂著 《电机学, 特殊部分》 高等教育出版社

ANALYSIS OF OPTIMAL ENERGY—SAVING OF SQUIRREL—CAGE MOTOR OPERATING IN VARIABLE FREQUENCY AND VARIABLE IMPRESSED VOLTAGE

Sun-Pengnian

(Electrical engineering department)

Abstract

This article are continuation of "Analysis of optimal energy-saving of squirrel-cage motor operating in variable impressed voltage" The latter had been published on "medium small electrical Machine" No.3,1985.

On foundation of the formor, it farther investigated the problem of optimal energy-saving of Squirrel-cage motor operating in variable frequency and variable impressed voltage, analyzed their various losses as the function of the impressed voltage, frequency and load size, reasoned out the adjusting law that impressed voltage and frequency vs. load size, in order to take the effect of optimal energy-saving, derived the formulas of the frequency, impressed voltage and losses at the state of optimal energy-saving. In the later, the article will take a example to explain the method of calculation.

Key words: state of optimal energy-saving, effect of optimal energy-saving.