

# 电机节能降耗技术和方法探讨

舒服华 王 艳

武汉理工大学 (430074)

武汉仪表电子学校 (430074)

## Technology and Method of Energy Conservation and Consumption Reduction for Electric Motors

Shu Fuhua Wang Yan

Wuhan University of Technology

Wuhan Municipal Meter-Electronics Polytechnic School

**摘 要:** 针对企业电机运行效率低, 电能浪费严重的问题, 分析了电机节能的原理, 介绍了电机常用的节能技术与方法。主要包括电机的选型、提高功率因数、调速节能、结构改造等, 并着重介绍了目前比较先进的电机节能技术—变频调速节能的原理、方法及应用。

**关键词:** 异步电机 节能 变频

**Abstract:** Against the phenomenon of low operational efficiency of electric motors and serious loss of electric power in the enterprises, the commonly used energy-saving technology including correct selection of motors, increasing power factor, speed-regulation and construction rebuilding was introduced. Among them, the principle, method and application of the advanced energy-saving method, frequency-conversion, was focused.

**Keywords:** Asynchronous motors Energy-saving Frequency conversion

我国是能源比较短缺的国家, 节能降耗将成为各工矿企业面临的一个重要课题。由于技术力量薄弱、测试手段落后、管理不到位、节能意识缺乏等原因, 造成电机电力消耗大、运行效率较低。因此, 挖掘电机的节能潜力, 寻找有效的降耗办法是一项重要任务。

## 1 电机节能因素分析

### 1.1 电流-效率特性曲线

电机的电流-效率特性曲线反映了电机效率随电流变化的特征。通过对Y系列电机的分析可知: 不同型号的电机额定状态下效率 $\eta$ 值不同,  $\eta$ 的最大值也不同。用 $\eta/\eta_{\text{额定}}$ 作为电机特性曲线的一个变量, 得到如图1所示特性曲线, 它能够较好地反映和适用于不同型号Y系列运行效率状态。

电动机的效率关系式:

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \Sigma P/P_1$$

式中:  $\eta$ —效率;

$P_2$ —输出功率;

$P_1$ —输入功率;

$\Sigma P$ —电机总损耗;

$$\Sigma P = p_{\text{cu1}} + p_{\text{cu2}} + p_{\text{Fe}} + p_{\text{mec}} + p_{\text{ad}}$$

式中:  $p_{\text{cu1}}$ —定子铜耗;

$p_{\text{cu2}}$ —转子铜耗;

$p_{\text{Fe}}$ —铁耗;

$p_{\text{mec}}$ —机械损耗;

$p_{\text{ad}}$ —附加损耗。

空载时输出功率 $P_2 = 0$ , 故 $\eta = 0$ 。当负载从零增加时, 电机总损耗 $\Sigma P$ 增加较慢, 效率曲线上升很快, 直到随负载变化的可变损耗( $p_{\text{cu1}} + p_{\text{cu2}} + p_{\text{ad}}$ )等于不变损耗( $p_{\text{Fe}} + p_{\text{mec}}$ )时, 效率达到最大值。如图1所示, 电流标幺值 $I^*$ 处于0.8~0.9附近, 效率 $\eta$ 达到最大值;  $I^* > 0.6$ 时,  $\eta$ 较

高; 电流标么值  $I^* < 0.6$  时, 效率  $\eta$  开始迅速下降, 直至到空载状态降到 0。

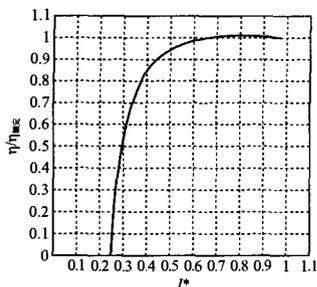


图1 Y系列电机电流-效率特性曲线

### 1.2 效率特性曲线与功率因数

如图2所示, 功率因数  $\cos\Phi$  与效率  $\eta$  随负荷率  $\beta$  的增加有相似的变化规律。异步电动机在电网吸取很大的无功电流来建立磁场, 它在正常工作范围内几乎不变。在空载时  $I_1 \approx I_m$ , 即定子电流近似等于励磁电流, 功率因数很低, 通常小于 0.2。当负载增加时, 定子电流  $I_1$  中的有功分量增加, 使功率因数很快上升, 当接近额定负载时, 功率因数达到最大值, 一般约为 0.75~0.9。

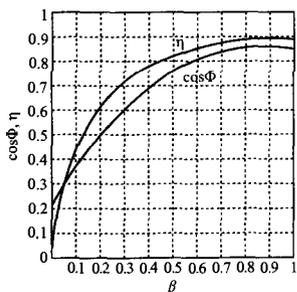


图2 Y系列电机  $\beta$ - $\cos\Phi$ 、 $\beta$ - $\eta$  特性曲线

## 2 电机节能技术

### 2.1 正确选型

按节能的需要, 宜优先选用高效电机, 且必须减小所选电机的浮装容量, 杜绝“大马拉小车”的不良现象, 使电机负载率始终保持在 80% 以上。如我国自行设计的 Y、YX 系列异步电机效率比老 JO 系列电机效率高。通常情况下, 普通电机的损耗为输入功率的 6%~25%, 平均损耗折算后为 13%, Y 系列异步电机比 JO 系列电机的效率高出 1%, 而 YX 电机的平均效率比 Y 电机又高出

3%。为了降低铜、铁损耗, 必须采用损耗低、导磁性较好的磁性材料, 同时还要改进设计结构及制造工艺来降低杂散损耗。虽然这使得高效电机的制造成本相应增加 20%~30%。但对于长期连续运行且负载率较高的工况采用高效电机是合算的。电机选型时除了上述原则外, 还需考虑以下几点因素: 因转子效率的差异, 鼠笼型电机较绕线型电机宜优先选择; 因功率因数的差异, 高速电机较低速电机宜优先选择; 因电压等级差异, 当负载较大时, 高压电机较低压电机宜优先选择。

### 2.2 提高功率因数

由以上分析可知, 异步电动机的功率因数随负载而变化, 额定负载时功率因数较高, 轻载时功率因数较低, 一般在 0.2~0.85 之间。异步电机在运行过程中会在电网中吸取大量的感性无功功率, 使电网中的功率因数被恶化, 系统运行效率下降。可以采取无功补偿的方法予以调整。异步电动机的无功补偿, 是指在保证电动机正常工作的前提下, 通过补偿提高用电线路的功率因数, 同时减少供电线路和变压器的损耗。无功补偿方法有: (1) 并联电容器。通常是在电动机的出线端并联电容器。接线方式如图 3, 无功补偿原理如图 4 所示。在未进行电容补偿前, 线电流  $I_1$  滞后电压的电角度为  $\Phi_1$ , 进行补偿后 (即接入电容器后), 电容器支路电流为  $I_{c\phi}$ , 线电流滞后电压的电角度为  $\Phi_2$ 。可见, 在异步电动机的出线端并上适量的电容可以提高线路的功率因数。因为电机的端电压未变, 不影响电动机的正常工作, 而且电容器本身消耗的功率很小, 可忽略不计。

(2) 对大容量的绕线式异步电机可使其按同步方式运行。(3) 安装功率因数静补装置, 该装置主要由交流滤波装置及容量可无级连续调节的

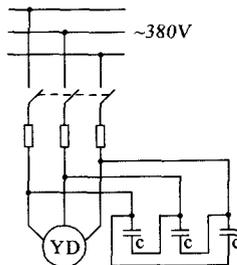


图3 并联电容无功补偿原理

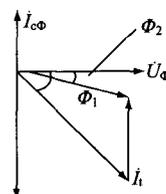


图4 电动机无功补偿矢量图

感性无功设备组成,可进行滞相运行。电网的功率因数提高后,在保证有功功率恒定的前提下,使系统的视在电流有所减小,降低了供电系统的损耗,从而有效的实现了节能。

### 2.3 调速节能

#### 2.3.1 串级调速节能

如图5所示,串级调速是将异步电机运行时转子线圈中的感应电势 $sE_0$ 通过滑环装置引出,经三相整流桥变为直流,再由三相全控桥将其逆变为50Hz或60Hz的交流电流,通过变压器将转差功率返回电源。这样就可以通过调节逆变桥的晶闸管触发角来调节电机的转速,同时,还可以确保转差功率 $sP_{em}$ 被电网再利用,对大容量的异步电机,有利于其在低速状态下节约大量的电能。



图5 串级调速原理图

#### 2.3.2 变压调速节能

当异步电机轻载时,降低其外在的电源电压,可以实现节能。若异步电机正常运行,且不计空载转矩,则电磁转矩 $T_e$ 必定等于负载转矩 $T_L$ 。电源电压下调后,主磁通 $\Phi_m$ 减小,此时电机力矩变小,转速下降,虽然使转子电流 $I_2$ 有所增加,但在电机轻载时,转子电流 $I_2$ 的增幅减小。由电磁理论可知:定子电流 $I_1=I_m+I_2$ ,其中, $I_m$ 是电机磁化电流, $I_m$ 随着 $\Phi_m$ 的减小而减小。在一定的负载下,只要满足 $I_m$ 的减幅起主导作用,此时 $I_2$ 和 $I_m$ 的矢量和减小,即定子电流 $I_1$ 减小,定子铜损 $P_{cuL}=3I_1^2r_1$ 随之减少,电机效率上升。

在实际应用中,对 $\Delta$ 接法的异步电机,当负载率低于50%以下时可以改为Y形接法,如图6所

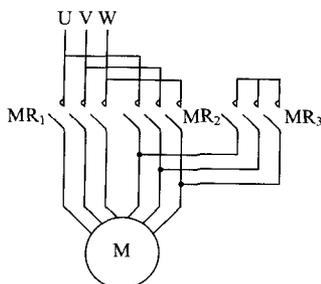


图6  $\Delta$ -Y切换原理图

示,此时,电机的相电压为原来的 $1/\sqrt{3}$ ,具有较好的节能效果。

随着现代电力电子技术的发展,异步电机高效节能器(或称软起动器)应用日益广泛,它是移相控制原理同自动控制理论相结合的产物。如图7所示,由串接于电源与被控电机间的三相反并晶闸管VT及其控制回路组成,通过改变晶闸管导通角的大小,来控制主回路的电流值。经验表明:负载率在35%以下时,软起动器节能性能显著。

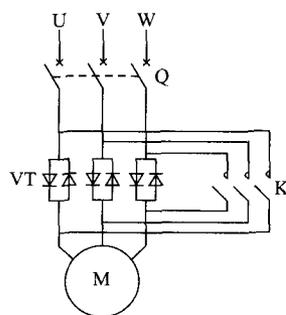


图7 软起动器结构示意图

### 2.4 变频调速节能

许多生产企业离不开风机、水泵这类设备,这些风机、水泵多是根据满负荷工作量来选型,而实际上大部分时间并非处于满负荷工作状态。由于季节、气候、工作负载等诸多因素的影响,它们经常处于较低负载运行,大部分只能达到额定功率的40%~50%。当生产工艺要求流量或压力变化时,常采用调节风门、闸门开度的节流控制方式,而风机、水泵却一直处于全速运行状态,造成了大量的电能浪费。采用改变风机、水泵电机的转速,可以调节其风量及压力,从而改变所需轴功率,可达到很好的节能措施。

变频调速节能是一种先进的节能技术,电机变频调速节能原理如图8。根据交流异步电动机转速公式:

$$n=60f(1-s)/p$$

式中:  $n$ ——电机转速;

$f$ ——电源频率;

$s$ ——转差率;

$p$ ——电机极对数。



图8 电动机变频调速原理

只要改变电源频率 $f$ 就可调节电动机的转速 $n$ 。大型变频装置可在效率基本不变的情况下,通过改变驱动电源的电压和频率,平滑地调节电机转速,根据输出量的要求改变输出功率。对于风机、水泵类负载,根据流体力学原理,风量(流量) $Q$ 与转速 $n$ 的一次方成正比,风压(流体压力) $H$ 与转速 $n$ 的二次方成正比,轴功率 $P$ 与转速 $n$ 的三次方成正比。即 $Q=K_1n$ ,  $H=K_2n^2$ ,  $P=K_3n^3$ 。对风机来说,当所需风量减少,风机转速降低时,其功率按转速的三次方下降。如所需风量下降为80%,则转速也下降为额定转速的80%,而轴功率降为51%。

如图9所示,当风量需从 $Q_1$ 减少到 $Q_2$ 时,如采用调节风门方法,管网阻力增加,系统工况点由A变到新的工况点B运行,轴功率 $P_2$ 与面积 $BH_2 \times BQ_2$ 成正比;如果采用调速控制方式,风机转速由 $n_1$ 降到 $n_2$ ,风压大幅度降低到 $H_3$ ,功率 $P_3$ 相当于面积 $CH_3 \times CQ_2$ 显著减少,节省的功率损耗 $\Delta P = \Delta H \times OQ_2$ 与面积成正比,泵类负载也类似。通过实践统计,风机水泵类调速控制可节能30%左右。所以,当异步电动机应用于风机、水泵、牵引及拖动等负载变化时,若采用变频调速来调节电动机功率,则可以节约很多电能。而传统的调节方法是改变电动机的通电时间所占比例(占空比),那样电动机就会频繁地制动和起动的,从而消耗和浪费的很大能量。

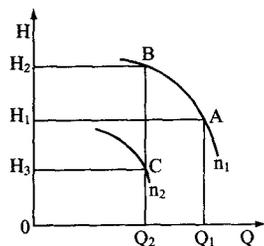


图9 风机(泵)变频调速节能效果分析

## 2.5 结构改进

### 2.5.1 更换磁性槽楔

磁性槽楔是能够导磁的槽楔,即在制造普通

槽楔的材料中加入导磁材料,经过热压、固化后形成的。试验证明,开口槽采用磁性槽楔比半开口槽节电效果好,而半开口槽又比半闭口槽节电效果好。如果能将普通绝缘槽楔更换成磁性槽楔,对改善电动机的特性和节电有一定效果。改用磁性槽楔后,能使气隙磁密分布趋于均匀,降低齿谐波的影响,降低脉振损耗和表面损耗,并使有效气隙长度缩短,所以能够改善电机气隙磁势波形,减少空载电流,改善功率因数,降低电机铁耗,降低温升,提高电机效率,并减少电磁噪声和振动,延长电机使用寿命等。目前,常用的磁性槽楔有代号#349的铁粉层压板磁性楔和模压磁性楔。模压磁性楔由还原铁粉按一定比例与环氧树脂混合,加入少量酚醛玻璃纤维作补强材料,经热压制成。因此,具有较高的机械强度、电解性能、耐热性能和磁性能。采用模压成型的磁楔与#349磁性铁粉层压板相比,它的精度较高,打入槽内有一定的紧度,加工方便。

### 2.5.2 采用新的绝缘材料增大导线截面积

对于沥青云母带浸胶绝缘的高压电动机,在定子线圈大修时可采用环氧玻璃粉云母带(B级胶带)绝缘达到节能目的。由于沥青云母带绝缘是经浸胶处理的,槽绝缘单面厚度较厚,而B级胶带对地绝缘经过热模压固化成型,槽绝缘单面厚度减薄。这样,由于槽绝缘厚度的减薄,铜线截面便可以增加。将沥青云母带绝缘电动机改为B级胶带绝缘后,一般平均铜线截面积可增大15%~20%,电机温升也有所下降,功率损耗减小。对于以前生产的低压电动机,在定子线圈大修重烧时,也使槽内绝缘变薄,在保持槽满率不变的前提下,可适当加粗导线,电机效率可提高1.5%~4%,因此,连续运转的电机年节电费相当可观。

## 参 考 文 献

- 1 顾秋心,杨以涵. 电力网及电力系统[M]. 中国工业出版社, 1961.
- 2 许实章. 电机学(修订本)[M]. 机械工业出版社, 1990.
- 3 同济大学电气工程系. 工厂供电[M]. 中国建筑工业出版社, 1984.

(收稿日期: 2008-01-07)

作者简介: 舒服华,男,1964年生,湖北武汉人,博士学位,讲师,主要从事研究工作。