

异步电动机节电运行

节电技术丛书



43

江西科学技术出版社

节电技术丛书

异步电动机节电运行

杨应群 陈晓华 主编

江西科学技术出版社出版

(南昌市新魏路)

江西省新华书店发行 江西印刷公司印刷

开本787×1092 1/32 印张5.375 字数12万

1986年6月第1版 1986年6月第1次印刷

印数1—3.370

统一书号: 15425·13

定价: 0.90元

内 容 提 要

本书从异步电动机的基本概念出发，简述了它的基本节电途径与方法，着重分析了电动机降压节电运行和电动机调速节电与风机的节能问题，最后对电动机节电运行中的实用测量也作了介绍。本书叙述深入浅出，内容简明实用，是电动机节电方面较好的参考资料，可供厂矿企业从事节电工作的技术人员和具有高中以上文化程度的工人使用。

前 言

电力是重要的能源，节电是节能的一项重要内容。随着工农业生产的飞跃发展，人们生活水平的迅速提高，电力负荷将与日俱增，电力供需矛盾将会异常突出。这就迫使广大厂矿企业的节电技术改造势在必行。为适应这种形势，推动节电工作，我们编写了这套节电技术丛书，以满足广大电力工作者的需要。

这套丛书现有《功率因数补偿节电技术》、《异步电动机节电运行》、《交流接触器无声节电运行》、《电焊机节电技术》四册。有关其他方面的节电技术，以后将根据需要陆续出版。

本丛书的作者，多数是工作在节电第一线的工程技术人员，在长期的实践中，对于节电技术的理论、计算和应用，节电装置的设计、运行和维修，进行了摸索和探讨，并试图总结出一套既有理论又有实践，适合我国厂矿企业应用的节电技术资料。但是，由于条件和水平的限制，本丛书要达到这个目的，仍有很大距离，至于错误之处，更是难以避免。为此，恳请广大读者批评指正，以期不断提高和完善。

本丛书由杨应群、陈晓华主编。参与编写工作的有刘立于、艾起贵、龚秋声、曾军文、王令老、尚宣文、胡刚、吴永福、肖昌极、张秉政、赵凌云、李建。负责审校的是雷良钦、王雨苍、钱梓弘、胡师铨、季国瑜、周世和、曾宪炳等同志。

在丛书编写过程中，承蒙江西省科学技术委员会、江西省科学技术情报研究所、江西省经委三电办公室和南昌市三电办

公室等单位，以及袁居仁、宗瑞云、邓仁和、何青邦、潘刚、王宪章等同志大力支持和热情帮助，在此一并致以谢意。

编者

1984年12月

目 录

第一章 异步电动机的基本概念	(1)
§ 1—1 异步电动机的工作原理	(1)
§ 1—2 交流异步电动机的等效电路及其能量图	(4)
§ 1—3 异步电动机的电磁转矩	(12)
§ 1—4 异步电动机的调速	(15)
第二章 电动机的能耗及节电途径	(21)
§ 2—1 电动机的能耗	(21)
§ 2—2 电动机的力能指标分析	(25)
§ 2—3 电动机的力能指标与容量、极数和电压的关系	(29)
§ 2—4 电动机的节电途径	(29)
第三章 电动机降压节电运行	(53)
§ 3—1 电压变化对电动机性能和损耗的影响	(53)
§ 3—2 电机 Δ —Y 降压变换运行的分析	(59)
§ 3—3 降压节电运行的条件	(72)
§ 3—4 降压节电运行的方式	(72)
§ 3—5 降压节电的大小及经济效益核算	(75)
§ 3—6 电动机降压节电的应用	(77)
第四章 电动机调速节电及风机的节能改造	(104)
§ 4—1 电动机的节电调速	(104)
§ 4—2 风机的节能改造	(113)
§ 4—3 电机的调速节电与风机节能的应用实例	(121)
第五章 电动机节电运行中的实用测量	(128)
§ 5—1 电动机转差率的测量	(128)

§ 5—2	电动机输入有功功率的测量	(133)
§ 5—3	电动机负载的测量	(136)
§ 5—4	电动机输入无功功率的测量	(138)
§ 5—5	功率因数的测量	(141)
附录	(143)
附录 1	各国异步电动机耗电情况	(143)
附录 2	Y系列电动机与国外样机性能实测数据对比表	(144)
附录 3	Y系列电动机外形及安装尺寸	(146)
附录 4	部分国产厂家研制的高效异步电动机简介	(156)
附录 5	各种型号电动机空载电流	(157)

第一章 异步电动机的基本概念

电动机是一种将电能转变成机械能的动力机械，其中尤以交流异步电动机因具有许多优点，而被广泛地应用于各行各业的机械设备中，其所生产的数量也是很大的。我国自解放以来，已生产中小型交流异步电动机达3至4亿千瓦，各类电动机安装的总容量达1.3至1.8亿千瓦，其数量之大，消耗的电能也必然是最大的。据统计，我国电网的总负荷中动力负荷占60%，而其中异步电动机就占动力负荷的85%，世界各国也同样是异步电动机耗电的比例最大，主要国家异步电动机耗电的比例见附录1。

电动机虽然应用广泛，但在实际使用中浪费电的现象却普遍存在，而且非常严重。为改变这种局面，以适应“四化”建设电力需要量增长的需要，对耗电量最大的电动机运行节电问题的研究是十分必要的。为便于讨论异步电动机运行中的节电问题，有必要对其有关的基本概念作一简单的介绍，在此基础上再寻求节电的途径和方法。异步电动机是一种交流电机，一般又称为感应电机。它有单相和三相之分，绝大多数异步电动机都为三相电机，下面主要就三相异步电动机的工作原理、旋转磁场的产生、电动机转子转动的基本原理、等效电路、电磁转矩、电机调速等有关问题作简要的阐述。

§1—1 异步电动机的基本工作原理

从电工学中知道，当一个通电的导体在磁场中运动，必然

会受到电磁力的作用。异步电动机就是根据这一电流力的效应原理而制成的。图 1—1 所示表明，一对可以转动的磁极，在磁极的内壁有一匝可以转动的短路线圈（被称为转子）。当磁极被人为地以转速 n_1 顺时针在空间旋转时，由 N—S 极所组成的磁极与线圈间（即转子间）就有相对运动，转子线圈的导体就要切割磁力线，按照电磁感应定律，在转子线圈中就会产生感应电势 e_2 （其方向由右手定则决定）和与感应电势 e_2 同方向的感应电流 i_2 。图 1—1 中所示 \odot 表示面向读者方向， \otimes 表示背离读者方向。根据电流的力效应，转子线圈在磁场中就会受到电磁力 F 的作用，并产生顺时针方向的电磁转矩 T_M ，使转子沿着与磁极磁场相同转向并以一定速度 n 转动起来，这就是异步电动机的基本工作原理。

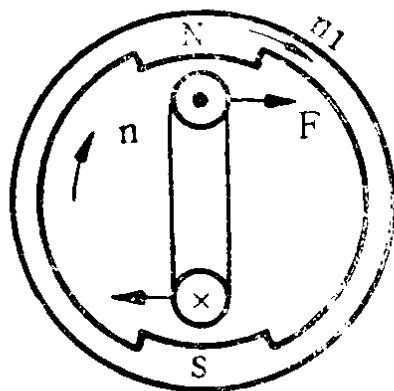


图1—1 异步电动机转动原理示意图

实际的异步电动机在定子上装有在空间上彼此相差 120° 的三相绕组，当给此三相绕组通以在时间上相差 120° 的对应三相交流电时，异步电动机的定子就产生了一个在空间以速度 n_1 旋转的旋转磁场（ n_1 被称为同步转速），这个以 n_1 同步速度旋转的旋转磁场就切割转子导体，于是在转子绕组中同样产生一个以同步转速 n_1 旋转的转子旋转磁场，定、转子间的旋转磁场相互作用，就产生了促使转子以实际转速 n 旋转的电磁转矩，于是转子就转动起来。

交流异步电动机的旋转磁场的转速 n_1 可由下式表示

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

式中： f —— 加于定子三相绕组的交流电源频率；
 p —— 电动机的极对数。

转子旋转的实际转速 n 与定子和转子之间的旋转磁场的相互作用有着密切的关系，在不同的转速范围内，所起的作用和性质也不一样，为了说明这个问题，可用同步转速 n_1 与实际转速 n 的差值 $(n_1 - n)$ （称为转差）与同步转速 n_1 的比值来表示，这个量被称为转差率 S ，即

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \% \quad (1-2)$$

转差率 S 对电动机的性能有着重要的影响，它是决定电动机运行状态的一个重要参数，一般有三种情况：

1. 转子正转（假定逆时针方向为正转）且实际转速 n 小于同步速度 n_1 的情况，即

$$0 < n < n_1$$

或 $1 > S > 0$ 时为电动机运行状态。

2. 转子正转且转速 n 高于同步速 n_1 的情况，即

$$n > n_1$$

或 $-\infty < S < 1$ 时为发电机运行状态。

3. 转子反转，即

$$n < 0$$

或 $+\infty > S > 1$ 时为电磁制动运行状态。

对应这三种运行状态的电动机运行情况如图1—2所示。

对应图1—2(a)，由于转子的实际转速 n 小于同步转速 n_1 ，在转子绕组中感应的电流方向如图中所示。这一电流产生力矩，克服负载的制动力矩而拖动转子转动，这时电机从电网吸取有功功率转变成轴上的机械输出功率，即处于电动机运行状态。对应图1—2(b)，若用另一原动机拖动转子使其实际转速

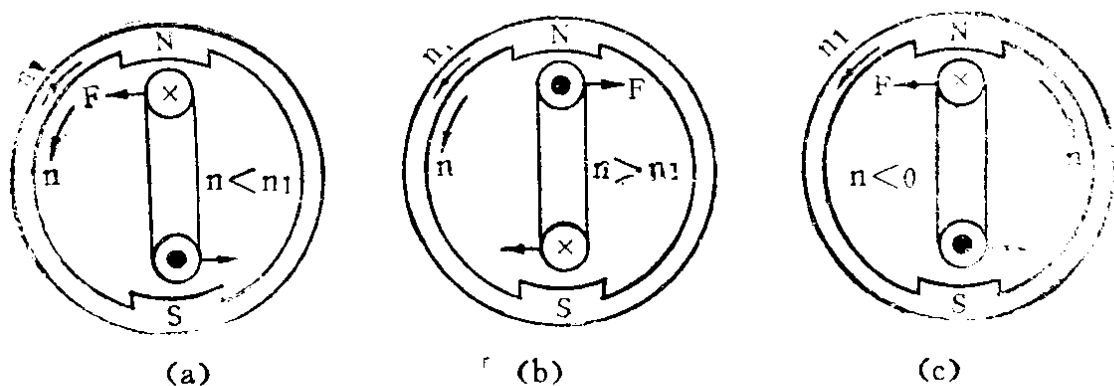


图1—2 异步电动机的三种运行状态

n 大于 n_1 ，这时转子导体切割磁场方向反了，产生的感应电流方向正好与图 1—2(a) 中相反，产生的力矩将是反着旋转磁场的方向，即与转子转向相反，它是一制动力矩，从而电机将原动机的机械功率输入转变成向电网输送电能，而成为发电机运行状态。对于图 1—2(c)，若用其他机械拖动电动机使转子向着旋转磁场相反的方向旋转，这时转子绕组中的感应电势和感应电流的方向将和电动机运行状态一样，其产生的力矩也与旋转磁场的方向一样，而与转子转向相反，因此将对转子和拖动机械起一制动作用，电机的定子仍有有功功率输入，这时电机处于电磁制动运行状态。

交流异步电动机即是按照图 1—2(a) 所示的情况运行的，由于转子的旋转方向总是与定子产生的旋转磁场方向相同，在实际应用当中，当需要改变电动机的转动方向时，只要将定子三相绕组中任意二相换接一下，即能实现这一要求。

§1—2 交流异步电动机的等效电路及其能量图

前面我们只讨论了异步电动机旋转磁场切割转子导体而产生感应电势和电流，并使转子转动起来的工作原理，实际上

电动机是从电网吸取电能转变成轴上的机械能的一种电力机械，这期间有电和磁之间的联系，也有能量间的传递关系，为了寻求电动机的节能途径，我们有必要深入了解这些联系和关系。

一、异步电动机的定子电路和转子电路

就异步电动机结构而言，它由定子和转子所构成，定子和转子又各由铁芯和绕组所组成。旋转磁场的磁通则是通过电动机的定、转子铁芯而闭合回路的，也即是通过磁的耦合而联系起来的。旋转磁场的磁通不仅切割转子绕组的导体，也同时切割定子绕组导体。切割转子绕组时，在每相绕组中感应出电势 e_2 和电流 i_2 ，切割定子绕组时，在每相绕组中感应出电势 e_1 和电流 i_1 。今假定定子绕组每相匝数为 w_1 ，电阻为 r_1 ，感抗为 x_1 ；转子绕组每相匝数为 w_2 ，电阻为 r_2 ，感抗为 x_2 ，这样就可以从磁的联系上分别看出电动机的定子电路和转子电路的情况。

(一) 定子电路：

旋转磁场在定子每相绕组中所感应的电势大小为

$$E_1 = 4.44f_1 w_1 \phi_m$$

式中： f_1 ——每相绕组感应的频率，它等于电源频率；

ϕ_m ——旋转磁场的主磁通；

w_1 ——定子绕组每相匝数。

由于定子绕组电阻很小，感抗也比较小，阻抗压降占定子绕组外加电压 U_1 的比例也很小，可以忽略不计，因此有近似关系

$$\begin{aligned} U_1 &\approx E_1 \\ &= 4.44f_1 w_1 \phi_m \end{aligned} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可以看出，当电源频率 f_1 不变时，三相异步电动

机旋转磁场的磁通 ϕ_m 与外加电源电压 U_1 有关：即当电源电压变化时，磁通也跟着起变化；当电源电压为恒定时，不论电动机负载如何变化，磁通 ϕ_m 都近似保持不变。

(二) 转子电路：

当转子尚未转动时，也即 $n=0(S=1)$ 时，旋转磁场磁通 ϕ_m 在转子绕组中的感应电势为

$$E_2 = 4.44f_2w_2\phi_m$$

式中： f_2 ——转子绕组感应电势的频率。

由于异步电动机转子是旋转的，转子绕组感应电势的频率 f_2 与变压器次级绕组感应电势的频率是不相同的（转子未转时例外），也即与定子绕组感应电势的频率 f_1 是不相同的。

当转子转动以后，并以速度 n 旋转时，则旋转磁场以 $(n_1 - n)$ 的相对转速切割转子导体，此时转子绕组感应电势的频率 f_2 为

$$f_2 = \frac{(n_1 - n)p}{60}$$

经化简，得

$$f_2 = Sf_1 \quad (1-4)$$

式(1-4)说明，当电源频率 f_1 恒定时，转子绕组感应电势的频率 f_2 与转差率 S 成正比。这样转子绕组感应电势 E_2 为

$$E_2 = 4.44Sf_1w_2\phi_m \quad (1-5)$$

在电动机起动初瞬，即 $n=0(S=1)$ 时，转子绕组的感应电势频率与定子绕组感应电势的频率相等，这个时候的频率为

$$f_{20} = Sf_1 = f_1$$

称为转子开路时的转子感应频率。而此时的绕组感应电势则称为转子开路电势 E_{20} 。

$$E_{20} = 4.44f_{20}w_2\phi_m$$

$$=4.44f_1w_2\phi_m \quad (1-6)$$

式(1-5)又可以改写成

$$E_2 = SE_{20} \quad (1-7)$$

即转子绕组感应电势为转子开路电势与转差率的乘积。也即说明转子绕组感应电势 E_2 的大小将随着电动机转速 n 的增高而减少, 随着转速 n 的减少而增加。

转子绕组既有电阻 r_2 , 也有感抗 x_2 。电阻 r_2 一般是不变化的, 但感抗 x_2 却随着频率 f_2 和转差率 S 的变化而变化, 因而有下列关系

$$\text{当 } n=0 \text{ 时, } x_{20} = 2\pi f_{20}L_2 = 2\pi f_1L_2$$

式中: x_{20} ——转子不转时的转子绕组感抗;

L_2 ——转子绕组电抗。

$$\text{当 } n \neq 0 \text{ 时, } x_2 = 2\pi f_2L_2 = 2\pi Sf_1L_2$$

$$=Sx_{20} \quad (1-8)$$

从而说明转子转速越高, 其感抗越小, 转速降低, 感抗增加。

转子电路的阻抗 Z_2 为

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + (Sx_{20})^2}$$

转子电流为

$$I_2 = E_2 / Z_2$$

$$= \frac{SE_{20}}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_{20})^2}} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明: 转子电流将随着转差率 S 的增加而增加, 即随着转子转速的降低而增加。

转子电路的功率因数为

$$\cos \varphi_2 = r_2 / Z_2$$

$$= \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (Sx_{20})^2}} \quad (1-10)$$

所以转子电路的功率因数将随着转差率 S 的增加而下降，即随着电动机转速的下降而下降。

从上面的分析可以知道转子电路内各物理量，诸如感应电势、感应电流、频率、感抗及功率因数等都与电动机的转差率 S ，也即与电动机的转速 n 有着重要的关系。

二、异步电动机的等效电路

前面从磁的联系上讨论了电动机的定子和转子电路，现在我们将进一步从电气联系上看看电动机的定、转子电路，以便得到统一的被称为电动机等效电路。为此，首先应将旋转的转子电路变为静止的转子电路，然后再将转子电路的参数折算到定子侧，这样即可达到目的。

(一) 将转子旋转的异步电动机折算为转子静止的异步电动机：

式 (1—9) 的转子电流 I_2 的分子和分母分别除以 S ，可得到

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + (x_{20})^2}} \quad (1-11)$$

将式 (1—10) 的功率因数相应写作

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2/S}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + (x_{20})^2}} \quad (1-12)$$

式(1—9)和式(1—11)所表示的转子电流的大小和相位都是一样的，但它们所表示的意义却不一样，式 (1—9) 是对应于转子转动的情况，而式 (1—11) 则表示转子静止不动时的数值，这时的转子频率 $f_2 = f_1$ ，这样就可把一台以转差率为 S 的旋转着的异步电动机，用一台等效的静止不动的电动机代替

之。这时只是在等效的静止绕组中串以电阻 $r_2(1-S)/S$ ，使转子绕组每相电阻变为

$$r_2 + \frac{r_2(1-S)}{S} = \frac{r_2}{S}$$

而等效的静止电动机转子电流的大小和相位便与旋转时的电机实际转子电流大小和相位相同，从而可以画出电动机的等效电路，如图 1—3 所示。

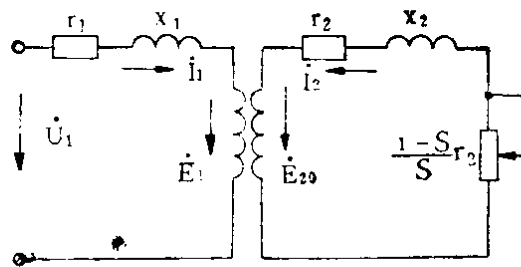


图1—3 旋转化为静止的异步电动机等效电路

(二) 把转子电路参数折算到定子侧：

图 1—3 已将旋转的异步电动机等效成一静止的电动机，这时定转子电路的频率是一样的，但它们的感应电势还是不等，因而还不能将转子电路与定子电路直接连接起来。为要使它们能连接起来，还必须把感应电势为 E_{20} 的实际转子绕组用一个感应电势为 E_1 的等效转子绕组来代替。其原则必须是使电机内部电磁关系和功率关系在折算的前后保持不变，也即“等值”。

经过折算后的等效电路如图 1—4 所示，折算后的各物理量统一用加“'”来表示。

对应图 1—4 中有

$$I_2' = I_2/k_i$$

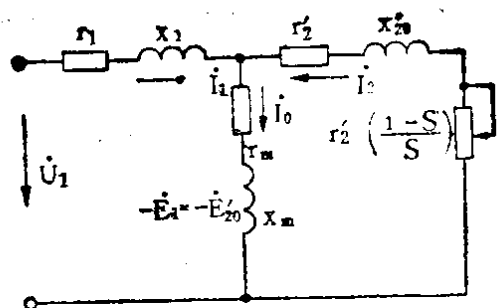


图1—4 异步电动机的等效电路

$$\begin{aligned}
 E'_{20} &= k_e E_{20} \\
 r'_2 &= k_i k_e r_2 \\
 x'_{20} &= k_e k_i x_{20} \\
 k_i &= m_1 w_1 / m_2 w_2 \\
 k_e &= w_1 / w_2
 \end{aligned}
 \tag{1-13}$$

式中： m_1 、 m_2 ——分别为定转子绕组的相数；
 r_m 、 x_m ——分别为激磁电阻和激磁电抗；
 I_0 ——激磁电流；
 k_i 、 k_e ——分别为电流与电势的变比。

对应图 1—4 其电势和磁势平衡式为

$$\left.
 \begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) \\
 \dot{E}_1 &= \dot{E}'_{20} \\
 E'_{20} &= \dot{I}'_2 \left(\frac{r'_2}{S} + jx'_{20} \right) \\
 \dot{E}_1 &= -\dot{I}_0(r_m + jx_m) \\
 \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2
 \end{aligned}
 \right\}
 \tag{1-14}$$

三、异步电动机的能量图

异步电动机既是从电网吸取电能转变成轴上的机械功率的一种电力机械，而其能量的转换和传递的关系又怎样呢？图 1