



自动化实践技术丛书

变频器

应用技术实践

严俊 邓缵 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

自动化实践技术丛书

变频器 应用技术实践

严俊 邓缵 主编
罗伟 参编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是《自动化实践技术丛书》之一。

本书主要介绍了异步电动机变频调速的原理、变频器的组成及其特点、变频器基本运行方式、变频器配套设备以及变频器在各行业中的应用及效果等内容；对变频器的选择和容量计算、高次谐波干扰及其对策进行了分析；对丹佛斯变频器、西门子变频器、ABB 变频器、三菱变频器的选型进行了介绍。

本书可供厂矿、企事业单位、设计院的电气技术人员及大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器应用技术实践 / 严俊, 邓缙主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 4

(自动化实践技术丛书)

ISBN 978-7-5123-1596-9

I. ①变… II. ①严…②邓… III. ①变频器 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 065424 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 15 印张 365 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元



敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

Preface

交流传动与控制技术是目前发展最为迅速的技术之一。这是与电力电子器件制造技术、变流技术、控制技术、微型计算机和大规模集成电路的飞速发展密切相关的。变频器是传动控制系统中的功率变换器,可提供可控的高性能变压变频的交流电源。变频器的价格总体上呈逐渐下降的趋势,特别是我国很多厂家都可以生产中小型的变频器,使变频器大量的使用变成可能。

由于驱动的交流化、小型化,控制的智能化、模块化,操作的简易化;变频器在使用上非常方便,就像一辆自行车,稍加学习就可以上路,但要得到非常好的控制效果就要看操作者的水平了。

全书共分为十章,第一章介绍了异步电动机变频调速原理;第二章介绍了变频的基本电路、工作原理及控制方式;第三章介绍了变频器使用的电力电子器件、功率模块 IGBT、IPM、PIM 的性能及使用时的有关问题;第四章介绍了变频器的组成、种类及常用变频器的基本工作原理;第五章重点介绍了变频器的常用运行方式,使用者根据变频器常用的运行方式可以更灵活地使用变频器;第六章介绍了变频器的电气制动种类及相关的原理;第七章介绍了变频器在不同场合的选择和容量计算;第八章介绍了变频器高次谐波的产生及对策;第九章介绍了变频器在风机、空调、水泵中的应用,对流体类的调速节能原理进行了详细地分析,同时对生产线、机床、轴承、油田、车辆、装卸、搬运等行业的应用进行了介绍;第十章介绍了丹佛斯变频器、西门子变频器、ABB 变频器、三菱变频器的型号、特点及应用。

本书由湖南铁道职业技术学院严俊、邓缙主编,其中第一~第三章由邓缙编写,第四章由湖南铁道职业技术学院罗伟编写,第五~第十章及附录由严俊编写。

由于编者水平有限,疏漏和不妥之处在所难免,殷切希望读者批评指正。

编者

2011年4月

目 录

Contents

前 言

第一章 异步电动机变频调速原理	1
第一节 异步电动机概述	1
第二节 交流调速种类	3
第三节 异步电动机在变频调速时的机械特性	11
第二章 变频技术原理	17
第一节 变频基本主电路	17
第二节 变频工作基本原理	22
第三节 变频控制方式	29
第三章 电力电子器件	36
第一节 电力电子器件的种类和发展	36
第二节 电力电子器件的驱动与保护电路	40
第三节 IGBT、IPM、PIM 模块的性能及使用时的有关问题	57
第四章 变频器的基本工作原理	67
第一节 变频器的组成	68
第二节 变频器的分类	76
第三节 变频器的工作原理	81
第五章 变频器运行方式	89
第一节 正反转运行	89
第二节 远距离操作运行	93
第三节 寸动运行	96
第四节 自动运行	99
第五节 并联运行	101
第六节 同步运行	103
第七节 比例运行	106
第八节 同速运行	108
第九节 变极电动机的运行	109
第十节 变频器与工频电源的自动切换运行	112
第十一节 瞬停再起运行	115
第十二节 带制动器电动机的运行	117

第六章 变频器的电气制动	120
第一节 能耗制动	121
第二节 直流制动	125
第三节 回馈（再生）制动	127
第七章 调速系统变频器的选择和容量计算	132
第一节 不同控制对象时变频器的选择	132
第二节 要求响应快、精度高时变频器的选择	135
第三节 负负载及冲击负载时变频器的选择	136
第四节 变频器容量计算	141
第八章 变频器高次谐波及对策	146
第一节 变频器输入侧产生高次谐波的机理	146
第二节 变频器输入侧高次谐波对其他设备的干扰	148
第三节 防止变频器输入侧高次谐波干扰的对策	149
第四节 变频器输出侧 PWM 控制产生高次谐波的机理	152
第五节 变频器输出侧高次谐波干扰的途径及危害	155
第六节 防止变频器输出侧高次谐波干扰的对策	157
第九章 变频器在各行业中的应用及效果	162
第一节 风机、空调、水泵	162
第二节 生产线	169
第三节 机床	176
第四节 轴承	179
第五节 油田	181
第六节 车辆、装卸、搬运	186
第七节 其他	195
第十章 常用变频器介绍	198
第一节 丹佛斯变频器及其应用	198
第二节 西门子变频器及其应用	204
第三节 ABB 变频器及其应用	211
第四节 三菱变频器及其应用	219
附录 变频器常用附件的选用	226
参考文献	233

第一章

异步电动机变频调速原理

第一节 异步电动机概述

一、异步电动机的分类

异步电动机从定子电源的相数可以分为单相、三相两类。从转子结构上，三相电动机又分为笼式和绕线式两类。笼式转子又分为普通笼式、深槽笼式和双笼式三种。

异步电动机按照机壳的防护方式不同可分为开启式、防滴式、封闭式和防爆式等。开启式电动机的铁心是露在外面的，这种电动机我国已经不再生产。防滴式电动机的机座两侧、下部和两个端盖上都有若干个通风孔，通风孔上有突缘，在与垂直线成 45° 以内的任何方向上能防止水滴及其他杂物进入机座内。封闭式电动机的内部与外部空气是隔开的。它的冷却是靠轴上风扇吹风，借机座上的散热片将电动机内部散发出来的热量带走。这种电动机主要用在尘埃较多和污秽的场所。防爆式电动机为全封闭式，电动机内部与外界的易燃易爆性气体隔离。这种电动机多用于有易燃易爆性气体的场所，如矿井和某些工厂。

异步电动机按照电动机容量（功率）可分为：小型电动机，1~9 号机座，0.6~100kW；中型电动机，11~15 号机座，100~1000kW；大型电动机，15 号机座以上，由于采用扇形铁心，故不再分具体的机座号。

二、异步电动机的基本结构

异步电动机由两个基本部分组成：固定的部分，称为定子；旋转的部分，称为转子。转子装在定子腔内，为了保证转子能在定子内自由转动，定、转子之间必须有一间隙，称为空气隙。异步电动机的空气隙很小，一般为 $0.2\sim 2\text{mm}$ 。此外，在定子两端还有端盖、风扇等附属装置。异步电动机的基本结构如图 1-1 所示。

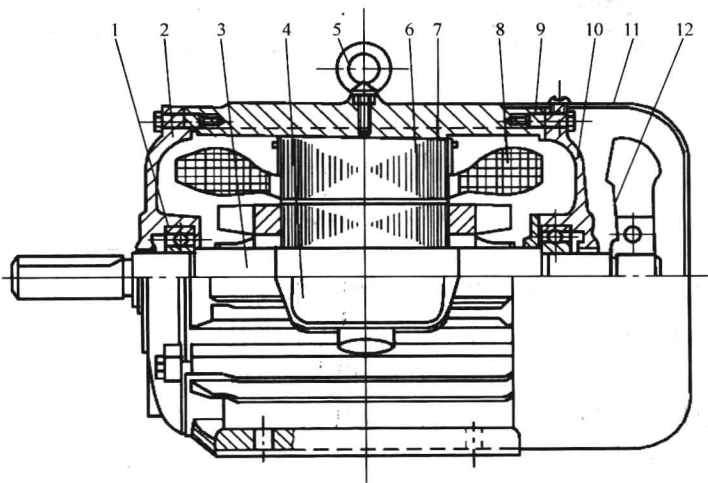


图 1-1 异步电动机的基本结构

1—轴；2—前端盖；3—转轴；4—接线盒；5—吊环；6—定子铁心；7—转子；
8—定子绕组；9—机座；10—后端盖；11—风罩；12—风扇

1. 定子

定子由机座、定子铁心和定子绕组三部分组成。机座主要是用来支撑定子铁心和固定端盖。中、小型异步电动机一般都采用铸铁铸成，小机座也有铝合金铸成的。大型异步电动机大多采用钢板焊接而成。为了搬运方便，在机座上面还装有吊环。

定子铁心是异步电动机磁路的一部分，它是用 0.5mm 厚的硅钢片叠装后成为一个整体。钢片表面有一层氧化膜，对大容量电动机，在硅钢片两面要涂以绝缘漆，作为片间绝缘，以减少涡流损耗。中、小型电动机一般采用整圆硅钢冲片。部分中型和大型电动机由扇形冲片拼成。在定子铁心内圆均匀地冲有许多槽，用以嵌放定子绕组。

定子绕组是电动机的电路部分，由带绝缘的铝导线或铜导线绕成的许多线圈连接而成。目前生产的小型电动机一般采用高强度漆包圆铝（铜）绕线制的散下线圈，称为软绕组。大、中型电动机常用扁线成型线圈，称为硬绕组。

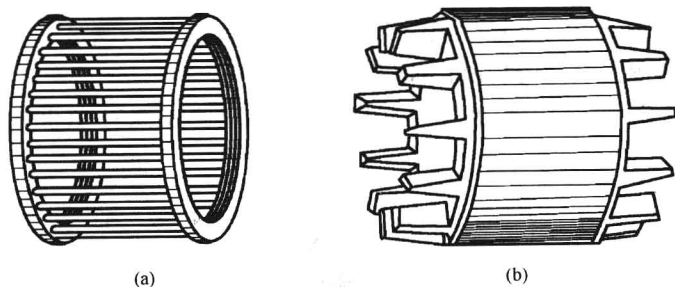
2. 转子

转子由转轴、转子铁心和转子绕组三部分组成。整个转子靠轴承和端盖支撑着。转轴一般用中碳钢制成，其作用是固定转子铁心和传递功率。

转子铁心也是电动机磁路的一部分，一般用 0.5mm 厚的硅钢片叠成。转子铁心固定在转轴或转子支架上。整个转子铁心成圆柱形。

转子绕组分为笼式转子和绕线式转子两种。

(1) 笼式转子。该绕组是由插入每个转子铁心槽中的裸导条和两端的端环连接组成。如



(a)

(b)

图 1-2 笼式转子

(a) 铜排转子；(b) 铸铝转子

果去掉铁心，整个绕组的外形就像一个笼子，故称为笼式转子。小型笼式电动机一般采用铸铝转子，这种转子的导条、端环都是溶化的铝液一次浇铸出来的。对于容量大于 100kW 的电动机，由于铸铝质量不易保证，常用铜条插入转子槽中，再在两端焊上端环。笼式转子如图 1-2 所示。

(2) 绕线式转子。它是在绕线式转子

铁心的槽内嵌有绝缘导线组成的三相绕组，一般采用 Y 形连接，三根引出线分别接到转轴上的三个集电环，转子绕组可以通过集电环和电刷在转子绕组回路中接入变阻器，用以改善电动机起动性能或调节电动机的转速，如图 1-3 所示。有的电动机还装有提刷短路装置，当电动机起动完毕而又不需要调速时，移动手柄，可将电刷提起，使三个集电环彼此短接起来。这样可以减少电刷磨损和

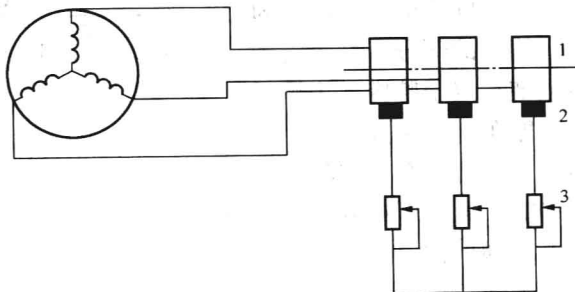


图 1-3 绕线式转子与外加变阻器的连接

1—集电环；2—电刷；3—变阻器

摩擦损耗。

与笼式转子相比较,绕线式转子的优点是:可以通过集电环和电刷串入外加电阻,以改善电动机的起动性能和实现小范围内的调速。其缺点是:结构较复杂,价格较贵,运行的可靠性也较差。

三、异步电动机的工作原理

当定子三相绕组接通三相交流电源时,绕组中就有三相对称电流流通,在电动机的气隙内将产生一个转速为 $n_0 = 60f_1 / p$ (f_1 为定子电源频率, p 为电动机极对数)的旋转磁场。由于转子绕组与旋转磁场之间有相对运动,根据电磁感应原理,转子导体中将产生感应电动势。由于转子绕组是闭合的,而且认为是纯阻性电路,则转子导体中将有电流流过,其相位与电动势均相同。根据右手定则可知,在上半部是由里向外,用 $\odot$ 表示;而下半部则是由外向里,用 $\otimes$ 表示,如图1-4所示。因为载流导体在磁场中要受到电磁力的作用,力 F 的方向可用左手定则确定,作用于转子导体上,电磁转矩的方向与旋转磁场的方向是一致的。若此转矩足够大到可以克服机轴上的阻力矩时,转子就将沿着旋转磁场的方向旋转起来,此时电动机从电源吸收电能,通过电磁作用转变为输出的机械能。

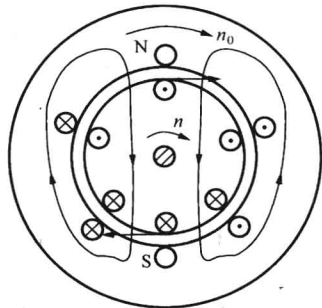


图1-4 异步电动机的工作原理

由旋转磁场原理可知,旋转磁场的转向取决于电源的相序,所以,任意对调两根电源线,可使电动机反转。

异步电动机的转速 n 小于旋转磁场的转速 n_0 。只有这样,转子绕组导体中才能产生感应电动势和电流,而产生转动,使转子沿 n_0 的方向旋转。而当 $n = n_0$ 时,旋转磁场与转子导体相对静止,它们之间的电磁感应作用就不会发生,即不能产生感应电动势和电流,转子机轴上也不会有转矩作用。从而使转子总是以低于同步转速 n_0 的转速旋转,正是由于这个关系,这种电动机被称为异步电动机(也称为感应电动机)。

旋转磁场的同步转速 n_0 与转子转速 n 之差称为转差,它是异步电动机工作时的必要条件。转差与同步转速 n_0 的比值用 s 表示,即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1-1) \quad 3$$

s 称为转差率(或滑差),它是分析异步电动机的一个极为重要的参数。

式(1-1)可改写为

$$n = n_0(1 - s) \quad (1-2)$$

在电动机工作时,转速的范围为 $n = 0$ 到 $n \approx n_0$,与此相应的转差率为 $s = 1$ 到 $s \approx 0$,在额定负载下转差率的范围一般为 $0.02 \sim 0.06$ 。

第二节 交流调速种类

异步电动机的调速方法有变极调速、改变转差率调速、串级调速、变频调速等类型。变

频调速在后面的章节有详细讲解, 本节只讲述变极调速、改变转差率调速和串级调速。

一、变极调速

改变定子的极对数, 可使异步电动机的同步转速 $n_0 = 60f_1 / p$ 改变, 从而得到转速的调节。

改变定子的极对数, 通常采用改变定子绕组接法的方法。这种电动机一般采用笼型转子, 其转子的极对数能自动地与定子极对数相对应。现用图 1-5 来说明改变定子极对数时定子绕组的改接原理。

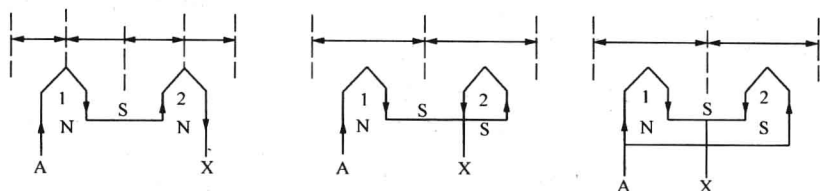


图 1-5 定子绕组改接以改变定子极对数

图 1-5 中每相绕组由两个半绕组 1 和 2 组成, 用顺接串联的方法可得到四极的磁场分布。如将半绕组 2 的始、末端改接, 使其中每一瞬间电流的方向与顺接串联时相反。用反接串联或并联接法即可得二极的磁场分布。由此可知, 改变接法, 得到的极对数成倍地变化, 同步转速也成倍地变化。所以这种调速属于有级调速方法。

三相绕组接法是相同的, 因此只要了解其中一相的接法即可知道其他两相。图 1-6 表示最常用的两种三相绕组的改接方法。

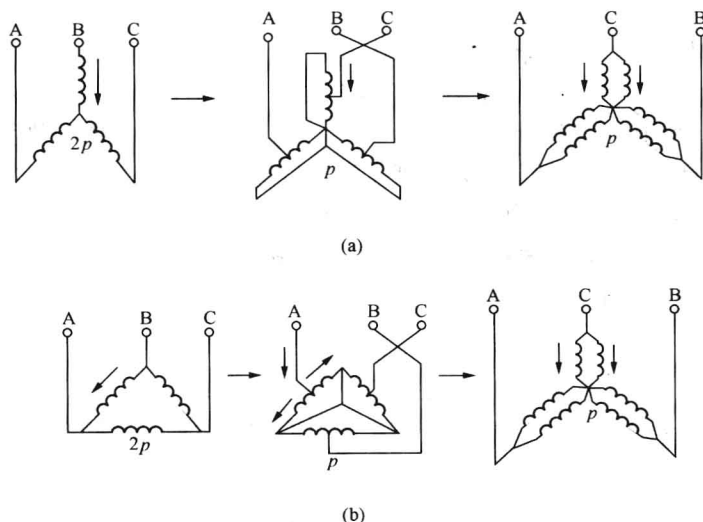


图 1-6 三相绕组的改接方法

(a) 星形改接成两个星形的并联; (b) 三角形改接成两个星形的并联

必须注意, 绕组改接后, 应将 B、C 两相的出线端交换, 以保持高速与低速时电动机的转向相同。因为在极对数为 p 时, 如果 B、C 两出线端与 A 端的相位关系为 0° 、 120° 、 240° ; 则在极对数为 $2p$ 时, 三者的相位关系将变为 $2 \times 0^\circ = 0^\circ$, $2 \times 120^\circ = 240^\circ$, $2 \times 240^\circ = 480^\circ$ (相当于 120°)。显然, 在极对数为 p 及 $2p$ 下的相序将相反, B、C 两端必须对调, 以保持变速

前后电动机的转向相同。

现分析变极调速时,电动机的容许输出功率或转矩在变速前后的关系。输出功率为

$$P_2 = \eta P_1 = 3U_x I_1 \cos \varphi_1 \eta \quad (1-3)$$

式中 η —— 电动机效率;

U_x —— 电动机定子相电压;

I_1 —— 电动机定子相电流;

P_1 —— 定子输入功率;

$\cos \varphi_1$ —— 定子功率因素。

假定在不同极对数下, η 与 $\cos \varphi_1$ 均保持不变, 则式 (1-3) 变为

$$P_2 \propto U_x I_1 \quad (1-4)$$

如果忽略定子损耗, 则电磁功率 P_M 与输入功率 P_1 相等, 转矩 M 为

$$M = 9550 \frac{P_M}{n_0} \propto U_x I_1 p \quad (1-5)$$

式中 p —— 极对数。

当定子绕组从一个星形改接成两个星形的并联时, 极对数减小一倍, n_0 增加一倍。为使调速时电动机得到充分利用, 在高、低速运行时, 电动机每个定子绕组内均流过额定电流 (I_e), 这样在两种接法下的转矩之比为

$$\frac{M_Y}{M_{YY}} = \frac{U_x I_e (2p)}{U_x (2I_e) p} = 1 \quad (1-6)$$

可见该变极调速方法是恒转矩调速。

当定子绕组从一个三角形改接成两个星形的并联时, 极对数也减小一倍, n_0 也增加一倍, 电动机每个定子绕组内均流过额定电流 (I_e)。两种接法功率之比为

$$\frac{P_{2\Delta}}{P_{2YY}} = \frac{\sqrt{3} U_x I_e}{U_x (2I_e)} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866 \quad (1-7)$$

可见该变极调速方法是近似恒转矩调速 (约相差 0.134)。

变极调速的电动机一般称为多速异步电动机。改变定子极对数, 除上面介绍的方法外, 还可以在定子上装上两组独立的绕组, 各接成不同的极对数。如将两种方法配合, 则可得更多的调速级数, 但以采用一组独立绕组的变极调速比较经济。显然, 当电动机在高速下运转时, 改接绕组使极对数增高, 从而电动机降为低速, 在降速过程中, 电动机工作在回馈制动状态。

可以按生产机械的要求, 使用不同接法的多速异步电动机。例如, 拖动中、小型机床的电动机一般都采用 Δ — YY 接法, 具有一组独立绕组的双速电动机, 此时近似恒功率的调速方法用于恒功率性质的负载 (如机床负载), 配合较好。

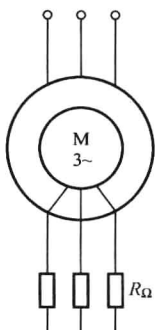
设计多速电动机时, 要充分注意不同极对数时定子磁势的波形, 尽可能使其接近正弦波。以 2/4 极的双速异步电动机为例, 在二极接法时, 定子绕组的节距为短距 (半极距); 当换接成四极时, 定子绕组的节距就变为安全节距了。

二、改变转差率调速

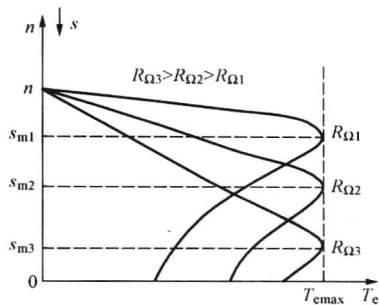
1. 转子电路串接电阻调速

转子电路串接电阻 R_Ω 后, 使转子电流 I_2' 减小, 转矩 M ($M = C_M \Phi I_2' \cos \varphi_2$) 也相应减

小, $M < M_z$ (M_z 为负载转矩), 电动机减速, 转差率 $s_e \left(s_e = \frac{n_0 - n_e}{n_0} \right)$ 将增加到 s_1 , $s_e E_2$ 将



(a)



(b)

图 1-7 电动机转子电路串接电阻

(a) 电路图; (b) 人为机械特性

由于调节的电阻体积较大, 抽头困难, 不易做到无级调整, 平滑性较差。

由于 $M = C_M \Phi I_2' \cos \varphi_2$, 在额定电压时, 磁通 $\Phi = \Phi_e = \text{定值}$, 调速时 $I_2 = I_{2e}$ (I_2 为转子电流, I_2' 为 I_2 折算到定子侧电流), 则

$$I_2 = I_{2e} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s_e}\right)^2 + x_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2 + R_\Omega}{s_1}\right)^2 + x_2^2}} = \text{定值} \quad (1-8)$$

式中 r_2 —— 转子电阻;

x_2 —— 转子电抗。

由式 (1-8) 可见

$$\frac{r_2}{s_e} = \frac{r_2 + R_\Omega}{s_1} \quad (1-9)$$

串接电阻 R_Ω 后, 转差率由 s_e 增加到 s_1 , 转子电路的功率因数为

$$\cos \varphi_2 = \frac{\frac{r_2 + R_\Omega}{s_1}}{\sqrt{\left(\frac{r_2 + R_\Omega}{s_1}\right)^2 + x_2^2}} \quad (1-10)$$

将式 (1-9) 代入式 (1-10), 得

$$\cos \varphi_2 = \frac{(r_2 + R_\Omega) / s_1}{\sqrt{\left(\frac{r_2 + R_\Omega}{s_1}\right)^2 + x_2^2}} = \frac{r_2 / s_e}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s_e}\right)^2 + x_2^2}} = \cos \varphi_{2e} = \text{定值} \quad (1-11)$$

这样, 转矩 M 为

$$M = C_M \Phi_e I_{2e}' \cos \varphi_{2e} = M_e = \text{定值} \quad (1-12)$$

可见, 转子串接电阻为恒转矩调速方法。

增加到 $s_1 E_2$, I_2 及 M 一直增加到 $M = M_z$ 时, 电动机达到新的平衡状态, 电动机以对应于 s_1 的转速带负载稳定运行。

在图 1-7 中绘出的电动机转子电路串接电阻 $R_{\Omega 1}$ 、 $R_{\Omega 2}$ 、 $R_{\Omega 3}$ ($R_{\Omega 3} > R_{\Omega 2} > R_{\Omega 1}$) 时的人为机械特性。转子电路串接电阻的数值越大, 人为机械特性越软。

这种调速方法调速的上限是 n_e (额定负载下的转速), 其下限受允许转差率的限制, 所以调速的范围仅能达到 2~3。甚至当允许转差率为 50% 时, 调速范围低于 2。

转子损耗功率为

$$\Delta P_2 = sP_1 = 3I_2^2(r_2 + R_\Omega) \quad (1-13)$$

如忽略机械损耗, 则输出功率为

$$P_2 = P_1(1-s) \quad (1-14)$$

调速时转子电路的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_2} = \frac{P_1(1-s)}{P_1(1-s) + sP_1} = 1-s \quad (1-15)$$

可见, 当转速降低 (s 增高) 时, η 下降, 转子损耗功率增高, 故经济性不高。

这种方法的优点是方法简单, 初期投资不高, 一般适用于恒转矩负载, 如起重机, 对于通风机负载也可应用。

2. 改变定子电压调速

改变定子电压后, 如果转速不变, 电动机转子的感应电动势将下降, 转子电流下降, 转子转矩小于负载转矩, 电动机转速下降。当转速下降后, 转差率上升, 转子感应电动势上升, 转子电流上升, 转子转矩等于负载转矩, 电动机稳定运行。

定子降压调速的机械特性软, 对恒转矩负载不能稳定运行, 因此不能用以恒转矩调速, 调速范围很小。

对于恒转矩调速, 如能增加异步电动机的转子电阻 (如绕线转子异步电动机或高转差率笼型转子异步电动机), 则改变定子电压可得较宽的调速范围。但此时特性太软, 其转差率常不能满足生产机械的要求, 而且低压时的过载能力较低, 负载的波动稍大, 电动机就有可能停转。

如采用图 1-8 所示的闭环系统, 则既能提高低速时的机械特性硬度, 又能保证一定的过载能力。

图 1-8 中的调压装置过去用饱和电抗器, 目前都采用可控硅交流调压装置。它可根据控制信号 e 的大小将电源电压 U_1 改变为不同的可变电电压 U'_x 。控制信号为给定信号 e_0 与来自测速发电机的测速反馈信号 e_n 之差。由图 1-8 可见, 当输出电压 $U'_x = U_1$ 时 (对于某一控制信号 e), 对应于额定负载 M_e 时的转速为 n_2 ; 当负载增至 M'_e 后, 如无反馈则转速将沿着对应于 U_1 的人为特性下降到 n'_2 , 速度下降极为严重。但在图 1-8 所示的闭环系统中, 负载稍有增加将引起转速的下降, 正比于转速的 e_n 也将减小。 $e = e_0 - e_n$ 的数值自动变大, 使输出电压 U'_x 增高, 电动机将产生较大转矩以与负载转矩平衡。如负载增至 M'_e , U'_x 增加到 U_1 , 则此时转速仅下降到 n'_1 ($n'_1 > n'_e$), 显然闭环系统中机械特性的硬度大大提高。为了调节转速, 可改变给定信号 e_0 , 此时可得到一些基本平行的特性族, 如图 1-9 所示。

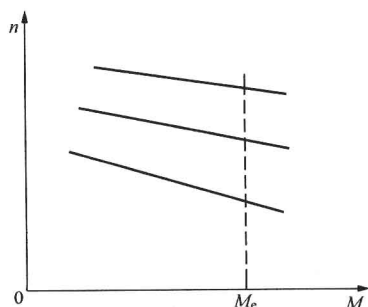


图 1-9 异步电动机改变定子电压的闭环系统特性

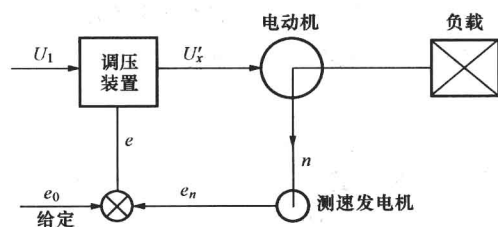


图 1-8 异步电动机改变定子电压调速的闭环系统

但在图 1-8 所示的闭环系统中, 负载稍有增加将引起转速的下降, 正比于转速的 e_n 也将减小。 $e = e_0 - e_n$ 的数值自动变大, 使输出电压 U'_x 增高, 电动机将产生较大转矩以与负载转矩平衡。如负载增至 M'_e , U'_x 增加到 U_1 , 则此时转速仅下降到 n'_1 ($n'_1 > n'_e$), 显然闭环系统中机械特性的硬度大大提高。为了调节转速, 可改变给定信号 e_0 , 此时可得到一些基本平行的特性族, 如图 1-9 所示。

在闭环系统中, 如能平滑地改变定子电

压, 即能平滑调节异步电动机的转速; 低速的特性较硬, 调速范围可较宽。

现分析一下这种调速方法电动机的允许输出。由于 $M \propto 3I_2'^2 \frac{r_2'}{s}$, 为使调速时电动机能充分利用, 则 $I_2' = I_{2e}' = \text{恒值}$; r_2' 也为恒值, 则 $M \propto \frac{1}{s}$, 可见这种调速方法既非恒转矩又非恒功率, 显然最适用于 M_z 随 n 降低 (s 增加) 而降低的负载 (如通风机负载)。对于恒功率负载最不适应。能勉强用于恒转矩负载, 如纺织、印染及造纸等机械。

改变定子电压调速方法的缺点是: 调速时的效率较低, 功率因数比转子串接电阻时更低 (因调速时 r_2 为定值)。

由于低速时, 消耗于转子电路的功率很大, 电动机发热严重。因此, 改变定子电压的调速方法一般适用于高转差笼型转子异步电动机 (或称为“力矩电动机”), 也可用于绕线转子异步电动机, 在其转子电路中可串接一段电阻。如果用于普通的笼型转子异步电动机, 则必须在低速时欠载运行, 或短时工作。在低速时, 电动机的自冷风扇冷却效果差, 可用外加风扇冷却方式, 以改善电动机的发热情况。

为了改善改变定子电压低速运行时的性能, 进一步扩大调速范围, 在改变定子电压调速方法的基础上发展了一种变极变压相结合的调速方法。这一调速方法应用于单绕组多速 (一般为两速或三速) 笼型转子异步电动机, 为了使降压降速时电流不致太大, 转子采用高电阻的导条。

根据不同的速度范围, 控制系统中有一个自动换极的装置, 使电动机能在相应极数下运行。当转速由四极情况下的最高额定转速通过改变给定转速降到六极最高额定转速时, 控制系统保证自动换极装置动作, 改变定子绕组的接法, 使电动机转换到六极时, 电动机又自动换接成十极, 然后转速又可在十极的情况下继续降下去, 实现电动机的平滑调速。

变极变压调速除了改变转差率外, 还改变了异步电动机的同步转速, 显然提高了电动机低速运行时的效率, 使单纯改变定子电压调速方法的缺点有所改善。其缺点是控制装置及定子绕组接线比较复杂。

三、串级调速

异步电动机的串级调速, 就是在转子电路内引入感应电动势 E_f , 以调节异步电动机的转速。引入电动势的方向, 可与转子电动势 E_2s 方向相同或相反, 其频率则与转子频率相同。

1. E_f 与 E_2s 同相 (相位差 $\theta = 0^\circ$)

当 E_f 未引入时, 转子电流 I_2 为

$$I_2 = \frac{E_2s}{\sqrt{r_2^2 + s^2x_2^2}} \quad (1-16)$$

E_f 引入后, I_2 变为

$$I_2 = \frac{E_2s + E_f}{\sqrt{r_2^2 + s^2x_2^2}} \quad (1-17)$$

可见, 转子电流增加, M 也增加, 这样 $M > M_s$, 使转速增加, 转差率下降, ($E_2s + E_f$) 的数值下降, I_2 及 M 下降, 电动机的加速度下降但仍在加速, 一直加速到新的稳定转速时, M 又与 M_s 相等, 调速过程结束。

2. E_f 与 E_2s 反相 ($\theta=180^\circ$)

此时 E_f 的引入, I_2 变为

$$I_2 = \frac{E_2s - E_f}{\sqrt{r_2^2 + s^2 x_2^2}} \quad (1-18)$$

故 I_2 及 M 将下降, $M < M_s$, 使转速下降, 用上面同样的方法分析, 电动机将减速到新的稳定转速。

若能用某一装置使 E_f 的数值平滑改变, 则异步电动机的转速也就能平滑调节。

为了提高异步电动机的功率因数, 设法使 E_f 超前于 E_2s 某一角度 θ , 此时既能使异步电动机调速, 又能提高 $\cos\varphi_1$ 。对于 E_f 超前 E_2s 的某一角度 θ 的情况, 可将 E_f 分解为两个分量: 与 E_2s 同相的分量 $E_f \cos\theta$ 和超前 E_2s 90° 的分量, 两个分量与 共同作用改变 的大小和相位, 将使电动机调速, 并提高定子的功率因数 $\cos\varphi_1$ 。

四、可控硅串级调速的基本原理

1. 串级调速的原理

绕线式转子异步电动机可采用改变串接于转子回路附加电阻的方法进行调速, 这种方法简单、投资少, 但其调速不平滑、附加电阻耗能大。串级调速是在转子回路中引入附加电动势来实现调速的。这种方法不仅可对异步电动机进行无级调速, 而且具有节能、机械特性较硬等特点。晶闸管串级调速主电路如图 1-10 所示。

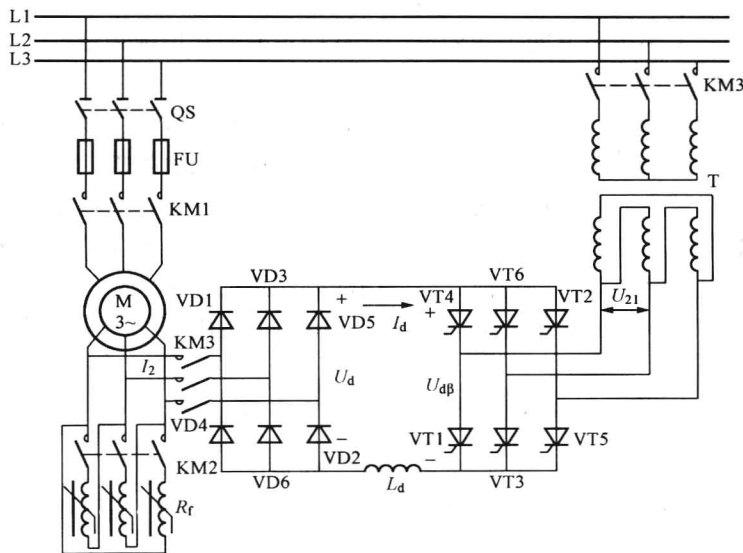


图 1-10 晶闸管串级调速主电路

下面分析串级调速的原理。假定异步电动机在自然机械特性上(即转子电路无附加电动势)稳定运行, 电源电压和负载转矩均不变。转子电动势为 sE_{20} , 转子电流为

$$I_2 = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sx_{20})^2}} \quad (1-19)$$

式中 E_{20} —— $s=1$ 时转子开路相电动势;

x_{20} —— $s=1$ 时每相转子绕组的漏抗;

R_2 —— 转子绕组电阻。

当在转子中串入与转子感应电动势 sE_{20} 同频率、反相的附加电动势 E_f 时, 转子合成电动势减小为 $sE_{20} - E_f$, 转子电流减小为

$$I_2 = \frac{sE_{20} - E_f}{\sqrt{R_2^2 + (sx_{20})^2}} \quad (1-20)$$

由于电动机定子电压、气隙磁通恒定, 故电动机的电磁转矩 T 将随转子电流 I_2 的减小而减小, 使电动机的输出转矩小于负载转矩, 迫使电动机降低转速, 转差率 s 增加, 从而又使转子电流 I_2 增加, 转矩也随之回升, 直至电磁转矩与负载转矩重新达到平衡, 电动机便稳定运行在低于原值的某一转速上。调整 E_f 值就可调节电动机的转速。这就是低于同步转速的串级调速。

当在转子中串入与 sE_{20} 同频率、同相的 E_f 时, 转子合成电动势增大为 $sE_{20} + E_f$, 转子电流增大为

$$I_2 = \frac{sE_{20} + E_f}{\sqrt{R_2^2 + (sx_{20})^2}} \quad (1-21)$$

电磁转矩也随之增加, 电动机升速, s 减小, 直至电磁转矩与负载转矩重新达到平衡, 电动机稳定运行在高于原值的某一转速上。若串入的 E_f 足够大, 会使电动机稳定运行在高于同步转速的某一转速上。这就是高于同步转速的串级调速。

本节主要介绍低于同步转速的串级调速——低同步晶闸管串级调速。

2. 低同步晶闸管串级调速

由上述分析可知, 绕线式转子异步电动机的转子电动势的大小与频率都随电动机转速在变, 在转子回路中串入与转子电动势频率一致、相位相反的交流附加电动势, 就可改变电动机转速。附加电动势越大, 电动机转速越低。可见, 实现串级调速的核心环节是要有一套产生附加电动势的装置, 其所产生的附加电动势既要大小可调, 又要使其频率保持与转子频率一致。这在技术上是非常复杂的。目前广泛采用的办法是把转子电动势整流为直流, 再通过晶闸管有源逆变电路引入直流附加反电动势。图 1-10 即为运用这种办法的晶闸管串级调速主电路。

图 1-10 中, 转子回路经三相桥式整流后输出直流电压 U_d 为

$$U_d = 1.35sE_{21} \quad (1-22)$$

式中 E_{21} —— 转子开路线电动势的有效值 (转速 $n=0$);

s —— 电动机转差率。

串级调速系统运行时, 由晶闸管组成的有源逆变器一直处于逆变工作状态, 将转子能量反馈给电网, 逆变电压 $U_{\text{dб}}$ 即为引入转子电路的反电动势。当电动机稳定运行且忽略直流回路电阻时, 整流电压 U_d 与逆变电压 $U_{\text{dб}}$ 大小相等、方向相反, 即 $U_d = U_{\text{dб}}$ 。设逆变变压器 T 的二次侧线电压为 U_{21} , 则有

$$U_{\text{dб}} = 1.35U_{21} \cos \beta = U_d = 1.35sE_{21} \quad (1-23)$$

故有 $s = \frac{U_{21}}{E_{21}} \cos \beta$ 。

由式(1-23)可以看出,改变逆变角 β 的数值即可改变电动机的转差率,从而达到调速的目的。逆变角的变化范围一般为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。

上述调速方法的核心是将逆变电压 $U_{\text{d}\beta}$ 引入转子电路,作为转子的反电动势。而逆变电压又受逆变角 β 的控制,改变 β 的大小便可改变反电动势的大小,从而改变反送交流电网的功率,同时改变了转子的转速。其具体调节过程为:首先起动电动机,对于水泵、风机类负载,接通KM1、KM2接触器,利用频敏变阻器起动,以限制起动电流;对于传输带、矿井提升等设备,则可直接起动。然后断开KM2,接通KM3,电动机转入串级调速。当电动机稳定运行在某一转速时,有 $U_{\text{d}}=U_{\text{d}\beta}$ 。欲提高转速,可增大 β 角,则 $U_{\text{d}\beta}$ 减小,转子电流 I_2 增大,使电磁转矩增大,转速提高,转差率 s 减小, sE_{21} 减小, U_{d} 减小,到 $U_{\text{d}}=U_{\text{d}\beta}$ 时电动机稳定运行在较原来高的转速上。反之,欲降低转速则减小 β 角。若要停车,可先断开KM1,再延时断开KM3,电动机即停车。

可控硅串级调速具有调速范围宽、效率高(转差功率可反馈电网)、便于向大容量发展等优点,是很有发展前途的绕线式转子异步电动机的调速方法。它的应用范围很广,可用于通风机负载,也可用于恒转负载。其缺点是功率因数较差,现采用电容补偿等措施,功率因数可有所提高。

第三节 异步电动机在变频调速时的机械特性

异步电动机是将电能转化为机械能的一种动力机械。反映异步电动机运行性能的主要指标是力能指标和运行指标。力能指标包括额定效率 η_N 和额定功率因素 $\cos\varphi_N$;运行指标包括最大转矩倍数 M_{max}/M_N 、起动转矩倍数 M_{st}/M_N 、起动电流倍数 I_{st}/I_N 及额定温升等。

本节主要讨论对称运行时三相异步电动机的电磁转矩、机械特性、工作特性以及变频后异步电动机特性。

一、异步电动机的电磁转矩和机械特性

根据电磁功率与电磁转矩的关系,可得出异步电动机常用的两个转矩公式。

1. 电磁转矩与磁通、转子电流的关系

异步电动机是由于转子电流与旋转磁场的相互作用而产生电磁力和电磁转矩,从而使电动机运转。从转子导体在磁场中受的电磁力也可以推导出电磁转矩公式。可得

$$M = C_M \Phi_m I_2' \cos\varphi_2 \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-24)$$

式中 C_M ——转矩常数。

式(1-24)表明电磁功率是由电流和磁通相互作用而产生的。在外施电压 U_1 及频率 f_1 不变的条件下,电动机在正常工作范围内,磁通可以认为是不变的,因此异步电动机的电磁转矩和转子电流的有功分量成正比。

式(1-24)比较直观地显示出电磁转矩形成的物理概念,但式中没有明显地把电磁转矩与转差率 s 的关系表示出来,而实际计算中往往需要知道 M 与 s 及电动机参数之间的关系。

2. 转矩与转差率的关系

异步电动机输出机械功率主要表现在输出转矩和转速上,因此转速(或转差率)是异步电动机的基本变量之一。转差率变化时电磁转矩的变化规律 $M = f(s)$ 称为转矩—转差率曲线