

PWM变频调速技术

PWM
PWM

变频调速技术

陈国呈 编著

PWM
PWM
PWM
PWM
PWM

机

TW921.5
C41

机械工业出版社

71.11951.5

C41

PWM 变频调速技术

陈国呈 编著



机械工业出版社

交流电动机变频调速技术发展迅速,用途也越来越广。为了帮助广大工程技术人员和研究人员灵活正确地使用变频器和深刻理解变频器的工作机理,作者根据多年来从事这方面教学、科研的经验体会和收集的技术资料写成本书。本书详细阐述了变频调速的基本原理与电压/频率控制方法,介绍了PWM模式及其最优化,分析和推导出不同模式的频谱特性和数学表达式,介绍了PWM脉冲的生成方法、IGBT功率模块的应用、变频器的控制功能,详细分析了变频器输入和输出电流波形的特征、主回路的换相过程及电动机的能量转换问题。

本书可作为高等院校电气传动自动化专业师生的教材或参考书,亦可供从事电气传动的广大工程技术人员及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

PWM变频调速技术/陈国呈编著. —北京:机械工业出版社,1998.7
ISBN 7-111-06096-2

I. P… II. 陈… III. 变频调查-技术 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第01027号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:周娟 版式设计:霍永明 责任校对:肖新民

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年7月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·10.75印张·254千字

0 001—3 000册

定价:19.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

序 言

工业电气传动自动化的主要扮演者是电动机，三相异步电动机具有转子结构简单、牢固、转动惯量小、维修方便、价格便宜，以及功率、转速适应面宽的优点，且由三相工频电源就能直接驱动，长期以来在工业应用中独占鳌头。但是异步电动机的转速本质上说是由磁场的旋转速度决定的，换句话说，其转速被电网的固有频率所决定，是不可改变的。

作为高性能的调速传动，直流发电机-电动机 (G-M) 调速控制方法长期以来一直得到应用。以后又发展到了使用汞弧整流器的静止可控整流器，1960 年出现了晶闸管整流器，于是晶闸管-直流电动机 (SCR[⊖]-M) 组调速控制方式又得到长期广泛的应用。但是直流电动机有换向器和电刷，维护保养很麻烦，价格也昂贵。

使异步电动机实现性能好的调速一直是人们的理想，过去的许多方法，如变极调速、绕线转子异步电动机转子回路串电阻调速为有级调速，后者耗能大，适用面有限；调压调速，转差电动机调速，虽能平滑调速，但调速范围不大，耗能多，不能在大功率中应用；串级调速功率稍大，但需绕线转子异步电动机，调速范围也不大，且功率因数较低，应用并不广泛。随着新技术和新理论的发展，能与 SCR-M 系统相媲美的调速控制方式就数变频调速了。

70 年代以后，由于微电子技术、电力电子技术和微处理机技术的发展，促使了晶体管变频器的诞生。晶体管变频器不但克服了以往交流调速的许多缺点，而且矢量控制变频器的调速性能甚至可以和直流电动机的调速性能相媲美。加上交流电动机本身固有的优点，其输出转速范围和功率范围又比直流电动机大，在小型化、低成本、高可靠性方面占有明显的优势。

电气传动技术的发展是生产厂家、研究单位和用户三结合的结果。高校和研究所开发出新产品，生产厂家积极进行产业化，用户努力配合推广应用，各方总结出实践中探求的真知，通过学会和宣传媒体广泛交流，三者之间相辅相成，互相促进，共同推进传动技术的迅速发展。

本书作者陈国呈教授在国内外专攻变频技术及其应用，10 多年来曾获得国内外变频技术发明专利多项，尤其在电压型 PWM 变频技术与应用方面有较深造诣，作者将这些经验和有关资料编成书，必将为我国变频调速事业的发展产生积极影响。

本书有如下特点：

(1) 内容新颖，不仅有基本原理的阐述，又有专题论著，反映了电压型 PWM 变频技术的最新成就。

(2) 理论分析深入浅出，既有深入的数学推导，又有通俗易懂的理论分析，条理清楚，不但有助于工程技术人员的阅读理解，对于高校师生及科研单位的工程技术人员也有着很好的指导作用。

⊖ SCR 是硅可控整流器 (即可控硅) 的英文缩写字，为美国早期的产品名，后 IEC 正式定名为晶闸管 (Thyristor)，但为方便起见，普通晶闸管往往仍沿用 SCR 来表示。

(3) 理论联系实际, 从原理到实践, 从现象提出到分析结论, 从设计到应用, 全书结构合理, 内容安排紧凑。

本书可作为工程技术人员、科研人员及高等院校有关师生的参考书或教材。

胡慎敏
1997. 12

前 言

随着微电子技术、电力电子技术、微处理机技术的不断发展和普及应用，电动机的调速从直流发电机-电动机组调速、静止晶闸管整流器直流调压调速逐步过渡到笼型异步电动机变频调速，而且随着控制技术和控制手段的不断提高，变频调速又由 U/F（电压/频率）恒定控制 PWM 变频调速发展到了矢量控制变频调速，通过控制交流电动机里相当于并励直流电动机励磁绕组的磁通变化，提高变频器的恒转矩输出范围和动静态特性，使得交流电动机变频调速性能超过了直流电动机调压调速性能。另一方面，为了简化控制系统、减少设备故障率和维修费用，人们又在矢量控制变频调速的基础上发展了无速度传感器的矢量控制变频调速和直接转矩控制的变频调速，在一些对动静态特性要求不太高的应用中，无速度传感器变频调速已完全可以和有速度传感器的矢量控制变频调速相媲美。

由于变频技术发展异常迅速，而我国有关这方面的专业书籍还很欠缺，虽然前些年作为自动化丛书曾出版过一些有关变频技术的书籍，但由于时代和技术的发展变化及作者编著时侧重点的不同，很难出版一本能系统、全面、完整地描述变频技术发展的全过程或有关方方面面的全书，而现实工作又不容我们等待着这个希望的实现，我们只能边探索边总结。为此，作者根据自己近 10 多年来工作中积累的经验体会以及平时收集的有关资料，并向研究生、工矿企业工程师试讲过这些内容，得到很好的反响，许多同志希望尽快出版成书，以方便阅读。为了帮助本专业领域里广大工程技术人员、高等院校及研究单位的有关师生和研究人员及时了解和交流变频技术及应用的有关知识和发展动向，作者遂将上述资料整理成书，奉献给广大读者，如果能对大家有所参考，起到抛砖引玉的作用，作者将感到万分荣幸。

本书以电压型 PWM 变频技术为核心，展开讨论各有关内容，全书共分 9 章，各章内容安排如下：

第 1 章简述变频调速的基本原理和 U/F 恒定控制的特点；

第 2 章详细阐述各种脉宽调制模式（PWM Pattern）的优缺点及其频谱特性，介绍了 PWM 模式优化的不同方法；

第 3 章介绍使用不同专用集成芯片生成 PWM 脉冲的方法；

第 4 章介绍 IGBT 半导体功率器件的结构特点及使用方法；

第 5 章详细分析变频器主回路的换相过程及缓冲电路的作用；

第 6 章分析变频器的应用功能及控制方法；

第 7 章分析电压型 PWM 变频器输出电流波形的失真原因及补偿方法；

第 8 章分析变频器输出电流的谐波特性及谐波抑制方法；

第 9 章分析减速过程中异步电动机能量的转换问题及泵升电路的设计方法。

本书在编写过程中参考了三菱电机株式会社、日本富士电机株式会社及同行的许多有关图书和论文资料，并在征得四川联合大学许振茂教授、上海铁道大学吴守箴、臧英杰教授、中国矿业大学北京研究生部王聪教授、东北大学韩安荣教授等的同意，本书的第 1 章及 3.2.1、3.2.2、3.2.3、9.2 节分别引用了上述作者有关文章的内容。张斌、蔡立清、汤泳洋三位同志

为作者撰写书稿在文字输入、编辑、作图诸多方面作了大量工作，同济大学周国兴教授作为本书的主审，提出了许多宝贵的修改意见，上海大学胡慎敏教授为作者撰写本书给予了大力的支持和帮助，并为本书作序，周国兴、胡慎敏教授和上海交通大学陈敏逊教授还分别为本书的出版给予了热情的推荐，作者谨此向以上各位致以由衷的感谢。

限于作者自身的学识水平、时间和精力，书中不足和错误之处在所难免，恳请广大读者及时提出批评，帮助改正，作者将不胜感激。来信请寄上海市延长路 149 号上海大学自动化学院自动化系工业电气自动化教研室（邮编 200072）。

作者 1997.12

目 录

序言	
前言	
第 1 章 变频调速原理	1
1.1 异步电动机变频调速运行原理	1
1.2 变频器的构成与功能	6
1.3 变频器的控制方式	11
1.4 矢量控制变频调速	14
第 2 章 PWM 模式及其优化	15
2.1 PWM 的调制方式	15
2.2 脉宽调制 (PWM)	16
2.2.1 正弦波 PWM (SPWM)	16
2.2.2 正弦波 PWM 的谐波特性	18
2.2.3 准最优 PWM	24
2.2.4 开关损耗最小 PWM	24
2.2.5 开关损耗最小 PWM 的谐波特性	25
2.2.6 SAPWM 模式	28
2.2.7 SPWM 与 SAPWM 的频谱比较	31
2.2.8 采用选择谐波消去法 SHE 的 PWM	32
2.2.9 谐波损耗最小 PWM	36
2.2.10 全电压准最优 (HVSO) PWM	38
2.2.11 跟踪型 PWM 变频	39
第 3 章 PWM 脉冲的生成方法	42
3.1 完全由模拟电路生成	42
3.2 由专用集成芯片生成	42
3.2.1 HEF4752 及其应用	42
3.2.2 SLE4520 及其应用	48
3.2.3 MA818 及其应用	53
第 4 章 IGBT 功率器件及其应用	59
4.1 IGBT 模块的结构特点	59
4.2 主回路元件的选择	65
4.3 栅极驱动	67
4.4 IGBT 的并联	75
4.5 智能功率模块 IPM	77
4.5.1 IPM 的特点	77
4.5.2 接线端子符号与含义	78
4.5.3 功能说明	81
4.5.4 应用电路举例	92
4.5.5 散热设计方法	94
4.5.6 使用注意事项	94
第 5 章 主回路的换相过程	98
5.1 PWM 控制模式	98
5.2 换相过程	99
5.3 推论	103
第 6 章 变频器的控制功能	105
6.1 基本回路的构成	105
6.2 变频器输出侧的接线	112
6.3 输出端接接触器时的瞬时停电再起 动	113
第 7 章 电压型 PWM 变频器电流波 形的失真	119
7.1 交越失真	119
7.2 对 T_d 影响的补偿	123
7.3 PWM 模式不当引起的失真	124
7.3.1 异步电动机的运行状态	125
7.3.2 J 变频器的控制电路	125
7.3.3 电流波形失真的原因	126
第 8 章 变频器的输入电流与谐波干 扰	129
8.1 分布参数为纯电阻时的相电流数值 分析	129
8.2 分布参数含电感时的相电流数值分 析	131
8.3 高次谐波干扰及其抑制方法	134
第 9 章 交流变频调速中的制动状态	139
9.1 发电机状态下的能量转换问题	139
9.2 异步电动机的再生制动	141
9.2.1 泵升电路的制动	141
9.2.2 可逆式整流器的制动	147
9.2.3 采用共用直流母线的多电动机 传动	148

9.2.4 直流制动	149	附录 B 中国和日本常用电气图用图形符	
附录	152	号对照	162
附录 A 日本电子机械工业会标准		参考文献	163
(EIAJ ED-4562)	152		

第 1 章 变频调速原理

1.1 异步电动机变频调速运行原理

图 1-1 为圆板与电动机的电磁转矩示意图，假定磁力线如图中 N-S 所示方向，当磁铁沿圆板平面反时针运动时，圆板上的感应电动势引起的涡流如图所示。该涡流电流与磁通 Φ 相互作用，使圆板产生一个如图中箭头方向所示的电磁转矩。同样道理可以分析右图电动机的电磁转矩。图中 n_1 为同步转速， n 为转子转速。

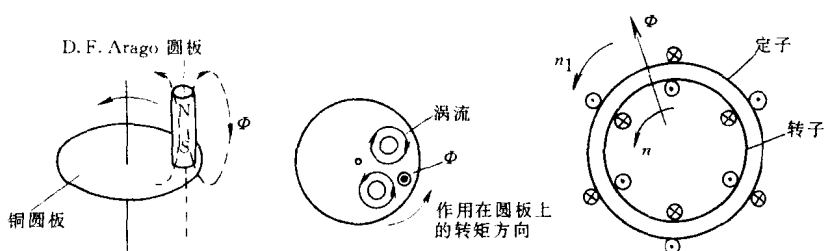


图 1-1 圆板与电动机的电磁转矩

$$\text{令} \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-1)$$

$$\text{则} \quad n = n_1 (1 - s) \quad (1-2)$$

式中， s 为转差率。通常三相异步电动机在工频（50/60Hz）下运行时，额定转差率为 1%~5%。

采用变频器进行调速控制时，根据

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-3)$$

改变 f_1 即可改变电动机转速 n_1 。

式中， p 为极对数； f_1 为电源频率，比如 50Hz 时 4 极电动机的同步转速为 1500r/min。

1. 定子电压与气隙磁通

设异步电动机定子线圈的有效匝数为 N ，如果施加在定子上的电压为 U_1 ，每极定子绕组产生的气隙旋转磁通为 Φ_g ，该磁通将产生感应电动势 E_1 ， E_1 、 N 、 Φ_g 之间的关系为

$$\Phi_g = \frac{1}{N} \int E_1 dt \quad (1-4)$$

上式关系示于图 1-2。如图所示，如果感应电动势 E_1 与其频率 f_1 的比值一定，显然磁通幅值 Φ_{gmax} 总是不变的。

⊙ 本书中的异步电动机均指感应电动机。

$$\Phi_{gmax} \propto E_1 / f_1 \quad (1-5)$$

即,如果电动势/频率=常数,则气隙旋转磁通不变,与频率无关,这样可以有效地利用铁心。另外,定子所施加的电压 U_1 为感应电动势 E_1 与定子阻抗压降的和,即

$$U_1 = \left(r_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} \right) + E_1 \quad (1-6)$$

式中, r_1 为定子电阻; L_1 为定子漏感(见图 1-3)。通常,定子阻抗压降与定子电压 U_1 相比很小,所以 $U_1 \approx E_1$ 。为了保持磁通幅值不变,只要 $U_1 / f_1 = K$ 成立即可, K 为常量。

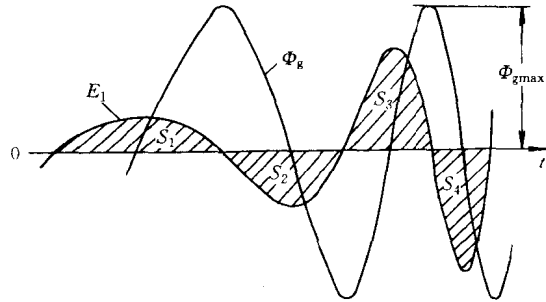


图 1-2 感应电动势 E_1 与气隙磁通 Φ_g

但是,当 f_1 很低时,即 U_1 也很低,定子阻抗压降不可忽略。此时 $U_1 / f_1 = K$ 不能保持气隙磁通不变(见图 1-7~图 1-9)。

2. 异步电动机的特性

异步电动机转子相对于以同步转速旋转的气隙磁通有转差时,在转子回路将产生速度电动势,它与转差成正比。此电动势引起的转子电流与旋转磁场相互作用,就产生转矩,如图 1-1 所示。异步电动机

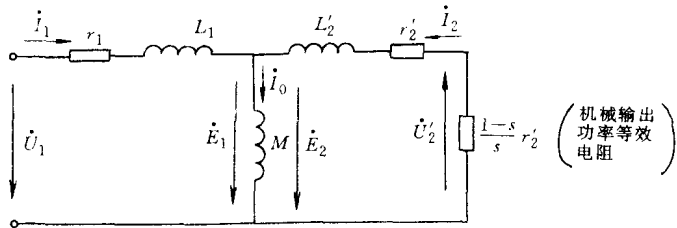


图 1-3 异步电动机的 T 形等效电路

机的定常特性(忽略铁损等)可用图 1-3 所示的 T 形等效电路表示。图中, r_2' 表示与转子回路的铜损相对应的电阻, $(1-s)r_2'/s$ 表示与机械输出功率相对应的电阻。

由图 1-4 可知, $P_2 : P_c : P_{me} = 1 : s : (1-s)$ 。 m 相异步电动机的转矩 T 可表示为

$$T = \frac{P_{me}}{\omega_2} m \quad (1-7)$$

式中, ω_2 为转子的角频率。由于 $n_2 = n_1(1-s) = 60f_1(1-s)/p$, $\omega_2 = 2\pi n_2/60 = 2\pi f_1(1-s)/p$, 则有

$$T = \frac{P_2(1-s)}{2\pi f_1(1-s)/p} m = \frac{P_2}{\omega_1} pm \quad (1-8)$$

式中, P_2 为转子输入功率(kW); ω_1 为定子角频率 ($2\pi f_1$) (rad/s); T 为异步电动机转矩(N·m)。

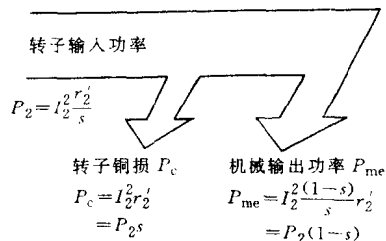


图 1-4 转子输入功率的流向

由图 1-3 的等效电路及式(1-8)可求出转子电流 I_2 、转矩 T 与感应电动势 E_1 的关系

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{(\omega_1 L_2')^2 + \left(\frac{1}{s} r_2'\right)^2}} = \frac{E_1}{\sqrt{(2\pi f_1 L_2')^2 + \left(\frac{f_1 r_2'}{f_s}\right)^2}} = \left(\frac{E_1}{f_1}\right) \frac{1}{\sqrt{(2\pi L_2')^2 + (r_2'/f_s)^2}} \quad (1-9)$$

$$T = \frac{P_2}{\omega_1} mp = I_2^2 \frac{r_2'}{s} mp \frac{1}{\omega_1} = \frac{m p r_2'}{2\pi f_1 s} I_2^2 = \frac{m p r_2'}{2\pi f_s} I_2^2$$

$$= \frac{m p}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1} \right)^2 \left[\frac{f_s r_2'}{(2\pi f_s L_2')^2 + r_2'^2} \right] \quad (1-10)$$

式中, f_s 为转差频率(Hz), $f_s = f_1 s$ 。

当定子施加大小为 U_1 、频率为 f_1 的交流相电压后, 由图 1-3 有

$$\dot{U}_1 = (r_1 + j2\pi f_1 L_1) I_1 - \left(\frac{r_2'}{s} + j2\pi f_1 L_2' \right) I_2 \quad (1-11)$$

$$(I_1 + I_2) j2\pi f_1 M = I_2 \left(\frac{r_2'}{s} + j2\pi f_1 L_2' \right) \quad (1-12)$$

$$T = \frac{m p}{2\pi f_1} \frac{I_2^2 r_2'}{s} \quad (1-13)$$

由式(1-11)~式(1-13)求出转矩

$$T = \frac{m p}{2\pi} \left(\frac{U_1}{f_1} \right)^2 \frac{A}{\left(\frac{r_1}{f_1} + A \right)^2 + B^2} \quad (1-14)$$

式中

$$A = \frac{r_2'}{f_s} \frac{(2\pi f_s M)^2}{r_2'^2 + [2\pi f_s (L_2' - M)]^2}$$

$$B = 2\pi L_1 - \frac{r_2'^2 + (2\pi f_s)^2 L_2' (L_2' - M)}{r_2'^2 + [2\pi f_s (L_2' - M)]^2} 2\pi M$$

由式(1-9)、式(1-14)可看出:

(1) 如果 E_1/f_1 一定, 转子电流仅取决于转差频率 f_s 和电动机的参数, 与定子频率 f_1 无关。

(2) 如果 U_1/f_1 一定, 确定转矩时与定子频率 f_1 有关的项数为 r_1/f_1 , 剩下的只与转差频率 f_s 及电动机的参数有关。

a. 用工频电源驱动时电动机的特性

用工频电源驱动时, 对于定子电压 U_1 来说, 定子阻抗压降小, 可以认为定子感应电动势 E_1 为一给定电压, 由式(1-9)、式(1-10)可求出特性。

图 1-5 为异步电动机的相量图。

由式(1-9)知道, 如果 E_1/f_1 一定, 则 I_2 只由转差率决定。随着转差率

增大, 转子电流 I_2 将增加, $j2\pi f_1 L_2' I_2$ 项增大, A 点沿圆周按箭头方向移动。由式(1-10)还知道, 转矩 T 与斜线部分的面积成比例, 所以与线段 H 的大小成比例。随着转差率的增大, 转矩也增大, 达到 B 点时转矩为最大。转差率再增大时, 转子电流虽然增加, 但有功分量减小, 转矩反而减小。

工频电源驱动时的机械特性如图 1-6 所示。机械特性大体上以同步转速 n_1 点为中心对称, 超过同步转速时电动机处于发电运行状态, 将电能反馈回电源。另外, 起动时从 $s=1$ 点

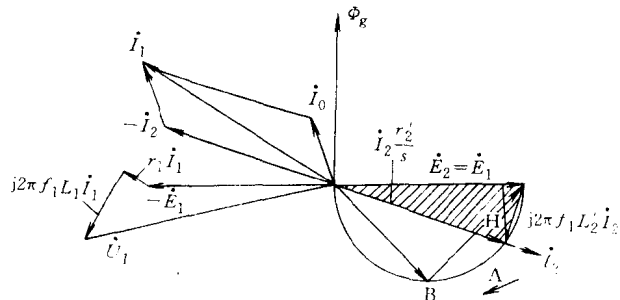


图 1-5 异步电动机的相量图 (E_1 = 定值)

沿着箭头方向加速，在与负载转矩 T_L 的交点 A（图中为额定转矩）达到平衡，变为稳定状态。

b. 用变频器驱动时电动机的特性

用变频器驱动时，如上所述，改变频率 f_1 的同时必须改变定子电压 U_1 。与工频电源驱动时不同之处是定子频率 f_1 降低时的低速区机械特性，此时定子阻抗压降相对于定子电压 U_1 不能忽略。 U_1/f_1 一定控制时，式 (1-14) 中的 r_1/f_1 项在低频区变大，特性向转矩减小的方向移动。此时的转速-转矩特性示于图 1-7。如图所示，在低速区转矩减小。对此，可以采用补偿端电压的方法（见图 1-8），使转速-转矩特性一致，如图 1-9 所示。

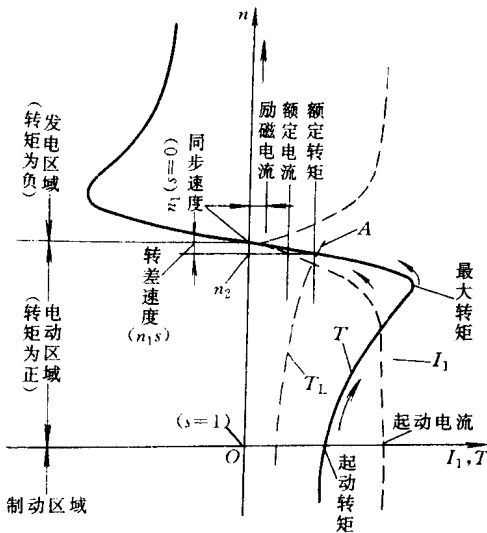


图 1-6 异步电动机的机械特性（工频电源驱动）

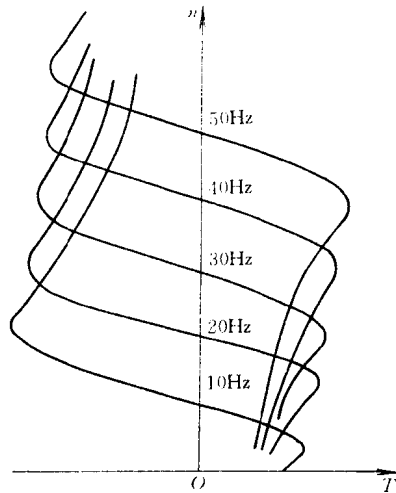


图 1-7 转速-转矩特性（U/F 一定）

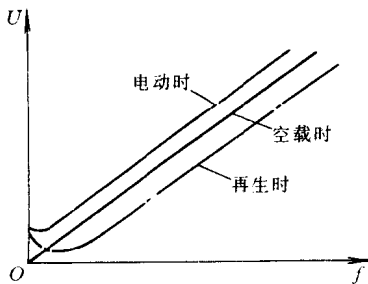


图 1-8 端电压的补偿

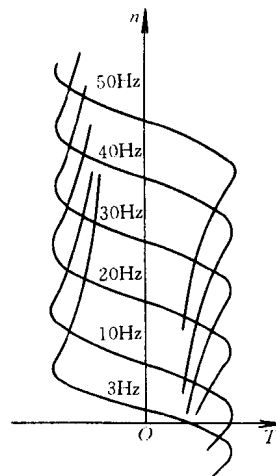


图 1-9 转速-转矩特性（有电压补偿时）

图 1-10 为异步电动机的加减速情况。图 a 为起动特性，频率从 3Hz 开始，如果使频率逐步上升，就可使转差频率大体为一定值向着目标转速 n_R 加速，如图中箭头所示；图 b 为从稳

定状态稍许使频率升高、增速时的情况；图 c 为使频率稍许下降、减速时的情况。两种情况下转矩的变化用箭头示出，其中斜线部分为各自的加速转矩和减速转矩。

以上的叙述都是假定变频器的输出波形为正弦波。但是，考察由变频器供电的异步电动机电流-转矩特性时，必须考虑到变频器输出波形中除基波外，还有若干高次谐波这一事实。

在这种情况下，可以分别考察基波分量和高次谐波分量之后，将它们叠加合成。另外，我们知道，高次谐波分量产生的旋转磁场的转速远高于基波分量产生的旋转磁场的转速。对于基波旋转磁场来说，异步电动机是以很小的转差率旋转的；而对于高次谐波旋转磁场，电动机的转速就显得十分低了。因此，高次谐波旋转磁场的转差率 s_n 近乎为 1。

在图 1-3 的等效电路中， $r_2'(1-s)/s$ 为相当于机械输出功率的电阻。将其中的转差率 s 代之以高次谐波转差率 $s_n = 1$ ，该阻值为零。即，此电阻仅对基波分量有效，所以可用正弦波形时的电动机反电动势 e_{mr} 表示。

按上述想法，考虑了高次谐波的等效电路如图 1-11 所示。励磁电流小于电动机的定子额定电流，按其 30%~50% 设计。另外，除极低速区外， r_1 、 L_1 产生的压降影响小，所以将励磁互感 M 移向电源侧而得到图 b 的简化等效电路。经这样简化后，不会带来大的计算误差，但为计算电流带来很大方便。

$$U_1 = U_{11} + U_{1h}, \quad I_1 = I_{11} + I_{1h}, \quad e_{mr} = \frac{1-s_1}{s_1} r_2 I_2$$

$$I_2 = I_{21} + I_{2h}, \quad s_1 = \frac{n_{11} - n_2}{n_{11}}$$

式中， U_{11} 、 I_{11} 、 I_{21} 为基波电压、电流； s_1 为基波转差率； U_{1h} 、 I_{1h} 、 I_{2h} 为高次谐波电压、电流； n_{11} 为基波同步转速。

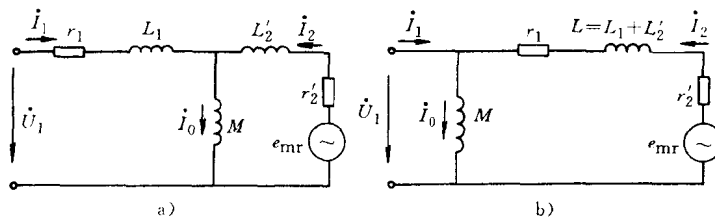


图 1-11 考虑了高次谐波的异步电动机等效电路

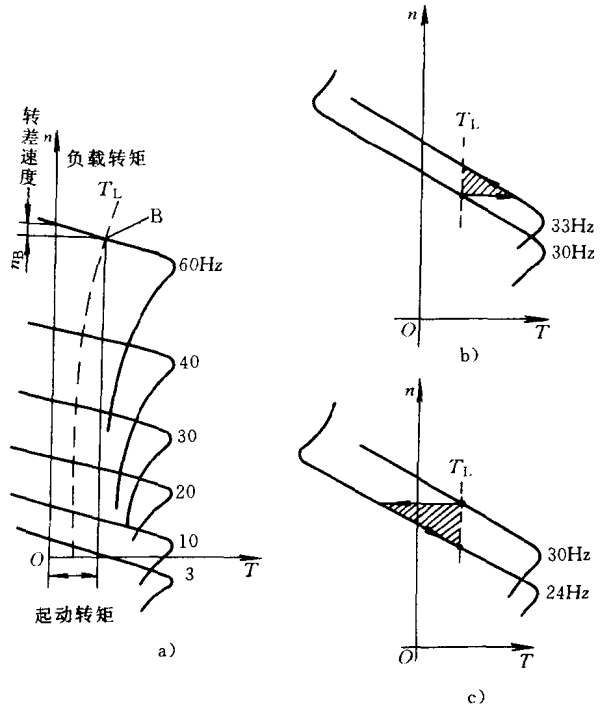


图 1-10 异步电动机的加速减速情况

a) 起动 b) 加速 c) 减速

1.2 变频器的构成与功能

变频器的基本构成如图 1-12 所示，它由整流、滤波、逆变及控制回路等部分组成。交流电源经整流、滤波后变成直流电源，控制回路有规则地控制逆变器的导通与截止，使之向异步电动机输出电压和频率可变的电源，驱动电动机运行，整个系统是开环的。

对于速度精度和响应快速性要求较高的系统，采用图 1-12 的开环系统还不够，还需要由变频器主回路及电机侧检测反馈信号，经运算回路综合后以控制触发回路，此时的系统是闭环的。整体框图如图 1-13 所示。控制指令来自外部的运行指令（详细参阅第 6 章）。下面说明主回路、控制回路和保护功能。

1. 主回路

给异步电动机提供调频调压电源的电力变换部分，称为主回路。图 1-14 示出典型的电压型变频器的一个例子。如图所示，主回路由三部分构成：将工频电源变换为直流电源的“整流器”；吸收由整流器和逆变器回路产生的电压脉动的“滤波回路”，也是储能回路；将直流功率变换为交流功率的“逆变器”。另外，异步电动机需要制动时，有时要附加“制动单元”。

(1) 整流器 近来大量使用的是图 1-14 所示的二极管整流器，它把工频电源变换为直流电源，电功率的传送是不可逆的。

如果利用两组晶闸管整流器构成可逆整流器，由于其功率方向可逆，可以进行再生制动运行，此时称此整流器为变流器（参见第 9 章）。

(2) 滤波回路 在整流器整流后的直流电压中，含

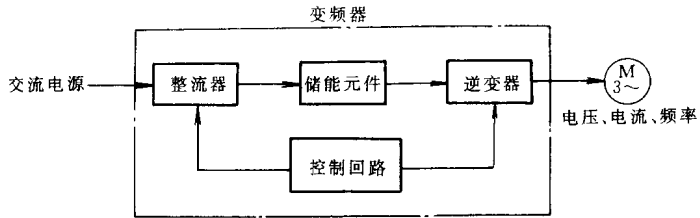


图 1-12 变频器的基本构成

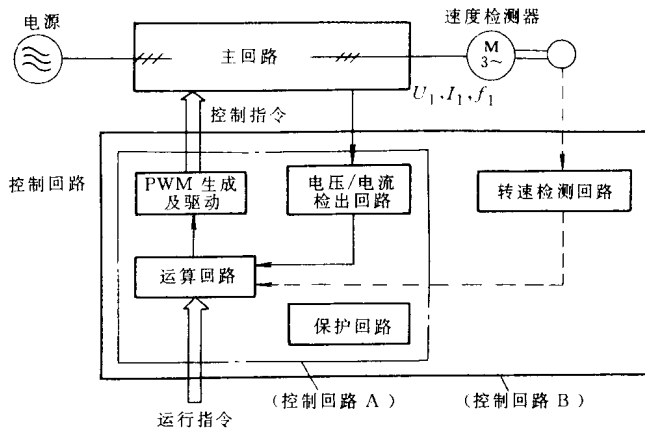


图 1-13 变频器的指令与控制

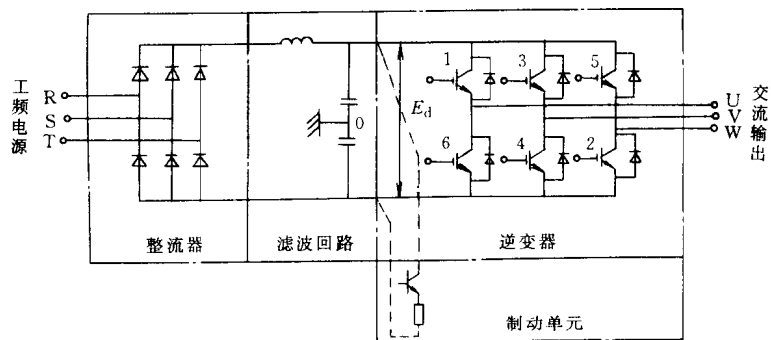


图 1-14 典型的电压型变频器一例

有六倍电源频率的脉动电压，此外，逆变器回路产生的脉动电流也使直流电压波动。为了抑制这些电压波动，采用直流电抗器和电容器吸收脉动电压（电流）。装置容量较小时，如果电源输出阻抗和整流器容量足够，可以省去直流电抗器而采用简单的阻容滤波回路。

(3) 逆变器 同整流器相反，逆变器的作用是在所确定的时间里规则地使六个功率开关器件导通、关断，从而将直流功率变换为所需电压和频率的交流输出功率。图 1-15 是电压型 PWM 变频器的波形。图 a、b、c 为 U、V、W 三相的调制波与三角波比较，即正弦波对三角波调制；由上述调制生成的 PWM 脉冲序列对应于图 d、e、f。上述脉冲序列控制着逆变器上六个功率开关器件的导通和关断，使得输出端 U、V、W 的电位发生变化，相对于电机三相绕组中点，U、V、W 三相的相电压如图 j、k、l 所示。而 U、V、W 三相的输出线电压如图 g、h、i 所示。

(4) 制动单元 异步电动机在再生制动区域（第二象限）运行时，再生能量首先储存于储能电力电容器中，使直流电压升高。一般来说，由机械系统（含电动机）惯量所积蓄的能量比电容器能储存的能量大，中、大功率系统需要快速制动时，必须用可逆变频器把再生能量反馈到电网侧，这样节能效果更好，或设置制动单元（开关管和电阻），把多余的再生功率消耗掉，以免直流回路电压的上升超过限值。

(5) 异步电动机的四象限运行 异步电动机根据负载种类的不同，其旋转方向和转矩方向是不同的，必须根据负载种类构成适当的主回路。

图 1-16 所示为采用电压型变频器传动的异步电动机四象限运行与主回路构成的关系。在 I、Ⅲ象限，异步电动机的转矩方向与旋转方向一致，为电动运行状态。I 象限为正转的电

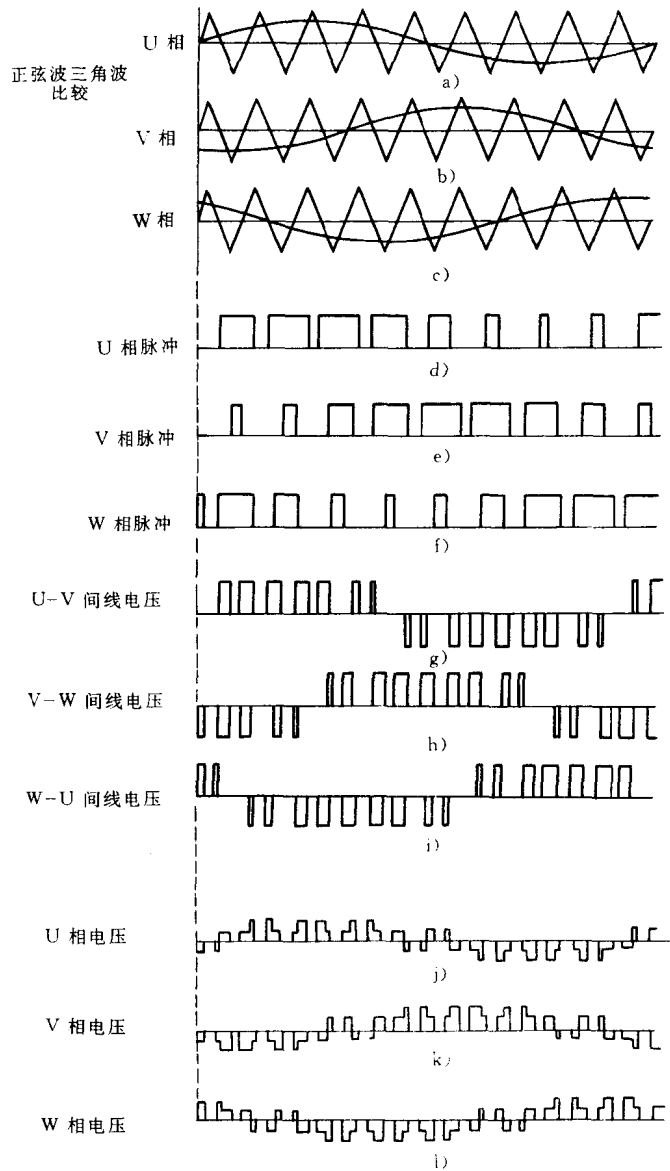


图 1-15 电压型变频器的输出电压

动运行，Ⅲ象限是反转的电动运行。在Ⅱ、Ⅳ象限，其转矩方向与旋转方向相反，为再生制动运行状态。Ⅱ象限为正转的再生运行，Ⅳ象限为反转的再生运行。在只需要图 a 的电动运行时，则只需由电源向电动机供给功率，可使用不可逆变频器。对于减速时需要制动力矩的负载，功率就必须从异步电动机向变频器传送，并附加制动单元以便能在Ⅱ、Ⅳ象限使用，如图 b 所示。另外，对于需要快速、频繁加减速的场合（例如电梯），或者对于以制动为主要目的的场合，可采用可逆变频器，实现Ⅰ~Ⅳ的四象限运行。此时，由于机械功率向电源侧反馈而节能。

以上，以电压型变频器为例说明了主回路的构成。对于电流型变频器，由于输入侧的交直变换采用相控整流，所以用不可逆变频器也能实现四象限运行，对此不再赘述。

2. 控制回路

(1) 控制回路的构成 控制回路向变频器主回路提供各种控制信号，如图 1-13 所示。控制回路由以下部分组成：决定 U/F 特性的频率电压“运算回路”，主回路的“电压/电流检测回路”，电动机的“转速检测回路”，根据运算回路的结果生成相应的 PWM 脉冲并进行隔离和放大的“PWM 生成及驱动回路”，以及变频器和电动机的“保护回路”。

在图 1-13 点划线内，仅以控制回路 A 部分构成控制回路时，无转速检测回路，为开环控制。在控制回路 B 部分，增加了转速检测回路，因此，对于转速指令可以进行闭环控制，使异步电动机的转速控制更加精确。

1) 运算回路 将外部的转速、转矩等指令同检测回路的电流、电压信号进行比较运算，决定变频器的输出电压、频率。

2) 电压/电流检测回路 检测主回路电压、电流等，检测方法示于表 1-1。

表 1-1 检测方式

项 目	方 式	特 点
电 流 检 测	电 流 互 感 器	只能检测交流
	分 流 器	交直流两用，需要隔离放大器
	霍 尔 传 感 器	交直流两用，有温度漂移
电 压 检 测	电 压 互 感 器	只能检测交流
	电 阻 分 压	交直流两用，需要隔离放大器

3) 驱动回路 为驱动主回路功率开关器件的回路。它与控制回路隔离，使主回路功率器件导通、关断。驱动回路的方式示于表 1-2。

4) 速度检测回路 在异步电动机轴上装上转速检测器（TG、PG 等）检测转速信号并送入运算回路，根据指令和运算可使电动机按指令转速运转。

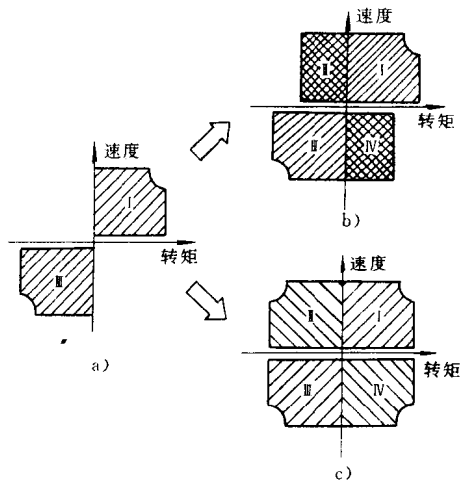


图 1-16 采用电压型逆变器的四象限运行
a) 为不可逆变频器时 b) 带制动回路时 c) 为可逆变频器时