

陈国呈 编著

新型电力电子

变换技术

XINXING DIANLIDIANZI
BIANHUANJISHU



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

新型电力电子 变换技术

陈国呈 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书以 PWM 变频调速技术为核心, 展开讨论了 PWM 变频原理、PWM 模式及其优化、无刷直流电动机调速控制、IGBT 功率器件及其应用、变频器的控制功能、变频器输入输出电流波形特征、能量再生与制动问题、高压大容量逆变器、电压型 PWM 整流器、有源电力滤波器、单相 PFC 电力变换、三相软开关电力变换。理论联系实际, 内容新颖。

本书非常适合于从事电气自动化、电力电子与电力传动专业的工程技术人员、研究人员、大专院校教师、研究生及高年级本科生作为教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型电力电子变换技术/陈国呈编著. —北京: 中国电力出版社, 2004

ISBN 7-5083-2402-1

I. 新 ... II. 陈 ... III. 电能—变换器—技术
IV. TN712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 055295 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http://www cepp com cn](http://www.cepp.com.cn))

北京机工印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 9 月第一版 2004 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 22.5 印张 553 千字

印数 0 001—3 000 册 定价 36.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

电力电子变换技术已渗透到生产、生活、建设、科研、国防、交通、医疗卫生、环保、航空管理、办公自动化等各个领域。虽然这些领域有相当一部分是直接利用市电,但更多领域却是间接使用市电,换句话说,都少不了使用电力电子变换技术。随着电力电子变换装置的普及应用,由其造成的电磁干扰、谐波污染及电网功率因数下降等问题日趋严重,这些电“公害”所造成的损害越来越引起国际社会的重视。另外,从节约能源,走可持续发展道路考虑,太阳能、风能、潮汐、地热、燃料电池等的开发应用也已成为人们关注的热点。由于环保的需要,电动车辆重新取代现有的汽油引擎车辆也是必然趋势。

电力电子变换技术涵盖的内容浩瀚如海,其拓扑结构变化万千,发展速度更是惊人,作者无力也无心对其作全面描述。只是由于近年来,随着新型功率器件 IGBT 及混合驱动电路的不断涌现,变频技术不断获得新的发展。另外,由于变频器的普及应用也引发出许多新的问题,作者深感有必要对 PWM 变频技术及其相关的电力电子变换技术进行系统的介绍,以其帮助读者及时跟踪电力电子技术发展的新动向,推进我国电力电子事业的发展。

本书以 PWM 变频技术为核心,展开讨论了与之相关的电力电子变换中的各种问题。从变频技术的基本原理出发,指出 PWM 调制的最优模式,介绍了 IGBT 功率器件及其驱动电路、变频器的控制功能及使用方法,分析了变频器输入输出电流的特征、制动过程中应注意的问题、EMI 问题、功率因数校正与软开关变频技术,并根据当前国内外普及应用变频空调的实际情况及变频技术发展的新动向。拓展介绍了无刷直流电动机变频调速、高压大容量变频技术、PWM 整流技术、有源电力滤波等。涉及的专业基础理论有电工学、电机学、电力电子学、数学、微机原理、控制理论与控制系统。本书有一定的理论深度,也有很直观的仿真和实验结果;透过现象,分析本质,根据存在问题,提出解决问题方法;有基本原理的阐述和推导,也有专门问题的分析和讨论;理论联系实际,内容新颖,反映了当前电气传动领域的新成果和新需求。有许多内容是作者和作者课题组长期从事教学与科研工作的成果与经验积累。

本书可以作为电气自动化、特别是电力电子与电力传动专业的工程技术人员、研究人员的参考书,也可以作为大专院校本专业教师、研究生及高年级本科学生的教材或参考书。如果作为本科生教材,可注重于一些基本原理,并据需要分析其中的某一、二个专题。通过理论学习和实际训练,可有效提高学

生的独立科研工作能力。

本书的工作得到了国家自然科学基金 (No. 50337030)、台达科教发展基金 (2004~2005 年度) 和上海新源变频器股份有限公司的大力支持, 在撰写过程中, 得到了上海交通大学张琛教授的大力协助, 日本英达株式会社上海代表处曹彬先生、上海新源变频器股份有限公司孙承波总工程师、上海神源变频器公司周勤利工程师等也给了作者很大的帮助。书中还参考和引用了许多前辈和同行专家的有关内容, 限于篇幅, 除了在书中相应处作标注外, 此不一一列举。本书在文字录入时得到了吴春华、黄跃杰、许春雨、屈克庆、徐健等同志的大力协助。作者谨借此机会向以上各位同志表示衷心的感谢。

限于作者的学识水平、时间和精力, 书中可能存在疏忽和谬误之处, 恳请广大读者及时指出, 帮助改正, 作者不胜感谢。来信请寄上海市延长路 149 号上海大学自动化系 14 信箱, 邮编 200072。

陈国星 于上海大学

目 录

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 12
- 1.4 矢量控制变频调速 15
- 1.5 直接转矩控制变频 16
- 1.6 矩阵式变频 18
- 1.7 风机水泵的节能原理 21

第2章 PWM 模式及其优化 24

- 2.1 PWM 的调制方式 24
- 2.2 脉宽调制 (PWM) 25
 - 2.2.1 正弦波 PWM (SPWM) 26
 - 2.2.2 正弦波 PWM 的谐波特性 27
 - 2.2.3 准最优 PWM 33
 - 2.2.4 开关损耗最小 PWM 34
 - 2.2.5 开关损耗最小 PWM 的谐波特性 35
 - 2.2.6 SAPWM 模式 38
 - 2.2.7 SPWM 与 SAPWM 的频谱比较 42
 - 2.2.8 采用选择谐波消去法 SHE 的 PWM 42
 - 2.2.9 谐波损耗最小 PWM 46
 - 2.2.10 全电压准最优 (HVSO) PWM 48
 - 2.2.11 两相调制 PWM 模式 50
 - 2.2.12 跟踪型 PWM 变频 51

第3章 无刷直流电动机调速控制 54

- 3.1 无刷直流电动机的基本结构 54
- 3.2 无刷直流电动机的工作原理 55
 - 3.2.1 三相半控电路 55
 - 3.2.2 三相丫联结全控电路 59
 - 3.2.3 三相△联结全控电路 62

3.3 多相电动机控制举例 63

- 3.3.1 二三通电方式 64
- 3.3.2 五五通电方式 65
- 3.3.3 五四通电方式 66

3.4 无刷直流电动机在变频空调中的应用 67

- 3.4.1 空调器的调温控制原理 67
- 3.4.2 反电动势三次谐波积分检测法 70
- 3.4.3 几种 PWM 调制模式 76
- 3.4.4 直流电压可调型 PWM 控制 78
- 3.4.5 漏电流的补偿电路原理 81

第4章 IGBT 功率器件及其应用 83

- 4.1 IGBT 模块的结构特点 83
- 4.2 主回路元件的选择 90
- 4.3 栅极驱动 91
 - 4.3.1 dU/dt 造成的误触发 91
 - 4.3.2 EXB841 栅极驱动电路 92
 - 4.3.3 HR065 栅极驱动电路 94
 - 4.3.4 HR065 与 EXB841 的性能比较 96
 - 4.3.5 栅极串联电阻 R_g 的选择 98
 - 4.3.6 TLP250 栅极驱动电路 98
 - 4.3.7 M57962L 栅极驱动电路 99
 - 4.3.8 PC923 栅极驱动电路 100
 - 4.3.9 HCPL 系列栅极驱动电路 101
 - 4.3.10 IR2110 驱动电路 105
 - 4.3.11 IR2130 驱动电路 110
 - 4.3.12 强驱动能力的栅极驱动电路 112
- 4.4 短路 (过电流) 的检测方法 114
- 4.5 驱动电流 115
- 4.6 死区时间设计 116
- 4.7 过电压与保护 117
- 4.8 对地短路保护实例 120
- 4.9 IGBT 的并联 121

4.10 智能功率模块 IPM	124	8.4 高频化造成的故障问题	186
4.10.1 PS1203 × 的控制功能	124	8.4.1 电机的杂散耦合	187
4.10.2 PS12018-A 的控制功能	135	8.4.2 轴电压和轴承电流产生的原因	188
第 5 章 主回路的换相过程	138	8.4.3 抑制漏电流和轴承电流的方法	189
5.1 PWM 模式与换相关系	138	8.4.4 双模电压滤波器	191
5.1.1 PWM 控制模式	138	8.4.5 地线高频漏电流抑制	195
5.1.2 换相过程	139	8.4.6 变频器谐波引发的串联谐振故障	201
5.1.3 推论	143	第 9 章 交流变频调速中的制动状态 ...	203
5.2 发电状态下电动机能量的传送	144	9.1 发电机状态下的能量转换问题	203
5.2.1 异步电动机的等效电路	144	9.1.1 相量轨迹与圆图	203
5.2.2 异步发电机的相量图	145	9.1.2 减速过程中的能量转换	206
5.2.3 变频调速下的异步电动机运行	145	9.2 异步电动机的能量再生与制动	209
第 6 章 变频器的控制功能	150	9.2.1 异步电动机的能量再生	209
6.1 基本回路的构成	150	9.2.2 泵升电路的制动	210
6.2 变频器输出侧的接线	156	9.2.3 可逆式整流器的制动	215
6.3 输出端接触器时的瞬时停电再起动力	158	9.2.4 采用共用直流母线的多电动机传动	217
第 7 章 电压型 PWM 变频器电流波形的失真	164	9.2.5 直流能耗制动	217
7.1 交越失真	164	9.2.6 变频器直流能耗制动中应注意的问题	222
7.2 对 T_d 影响的补偿	168	第 10 章 高压大容量逆变器	224
7.3 PWM 模式不当引起的失真	169	10.1 IGBT 直接串联技术	224
7.3.1 异步电动机的运行状态	169	10.2 多重化逆变技术	228
7.3.2 J 变频器的控制电路	170	10.2.1 电压型多重逆变器	228
7.3.3 电流波形失真的原因	171	10.2.2 电流型多重逆变器	238
7.4 相位角预测与死区时间补偿	173	10.3 多电平逆变技术	242
7.4.1 PWM 脉宽调制与死区时间 (T_d) 的影响	174	10.3.1 多电平逆变器原理	242
7.4.2 死区时间补偿	174	10.3.2 三电平逆变器的 PWM 控制	245
7.4.3 波形分析	176	第 11 章 电压型 PWM 整流器	252
第 8 章 变频器引发的谐波污染及其抑制对策	177	11.1 整流器的 PWM 调制	252
8.1 分布参数为纯电阻时的相电流数值分析	177	11.2 主电路的工作模式	254
8.2 分布参数含电感时的相电流数值分析	179	11.3 PWM 整流器的调相原理	257
8.3 高次谐波干扰及其抑制方法	182	11.4 主电路结构及其工作原理	258
		11.5 相幅调节方式	259

11.6	基本特性的数学分析	264	器	311
11.7	整流器的传输功率及稳定性	270	14.1.3	辅助准谐振变流器
11.8	整流器的实现	272	14.1.4	准谐振 ZVS 环节逆变器
第 12 章	有源电力滤波器	276	14.2	一个典型的三相软开关 PWM
12.1	有源电力滤波器的基本原理	276	变频器	319
12.2	有源电力滤波器电路	278	14.2.1	电路结构与动作分析
12.2.1	补偿电流指令值的检测方法	278	14.2.2	PWM 调制原理与输出波
12.2.2	补偿电流的产生方法	284	形解析	321
12.2.3	有源电力滤波器的损耗补偿	288	14.2.3	输出特性分析
第 13 章	单相 PFC 电力变换	290	14.3	软开关变频器主电路的数学
13.1	单相硬开关 PFC 电路	290	解析	326
13.1.1	无源 PFC 电路	290	14.4	三相软开关高功率因数 PWM
13.1.2	有源 PFC 电路	291	变频器	334
13.1.3	单脉冲方式变流器	294	14.4.1	双 PWM 变频器电路结构
13.2	单相软开关 PFC 电路	297	与动作分析	334
13.2.1	软开关单相升压型 PFC 电路与		14.4.2	软开关动作分析
分析	297	14.4.3	双 PWM 变频器的控制方法	
13.2.2	软开关单相升降压型 PFC 电		及实验结果	337
路	302	附录		339
第 14 章	三相软开关电力变换	310	附录 A	日本电子机械工业会标准
14.1	几种软开关电路	310	(EIAJ ED-4562)	339
14.1.1	高效准谐振 DC 环节逆变		附录 B	中国和日本常用电气图用
器	310	图形符号对照		348
14.1.2	并联谐振 DC 环节逆变		参考文献	349

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^[1]，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。

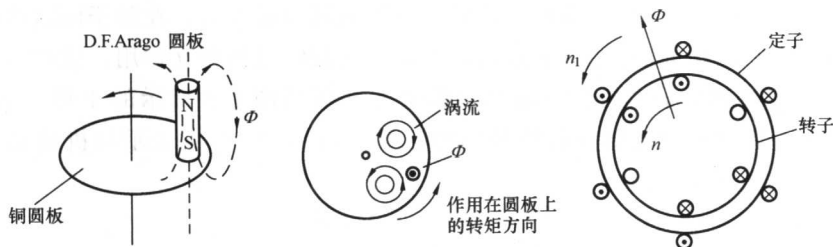


图 1-1 圆板与电动机的电磁转矩

令

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

则

$$n = n_1(1 - s) \quad (1-2)$$

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

$$E_1 = 4.44f_1 N \Phi_g \quad (1-4)$$

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。

$$\Phi_g = E_1 / 4.44 f_1 N \propto E_1 f_1 \quad (1-5)$$

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 与定子阻抗压降之和，即

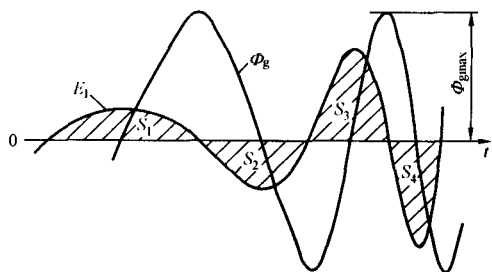


图 1-2 感应电动势 E_1 与气隙磁通 Φ_g

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

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。

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。异步电动机的稳态特性（忽略铁损耗等）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耗相对应的电阻， $(1-s)r'_2/s$ 表示与机械输出功率相对应的电阻。

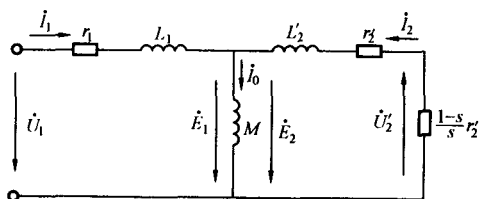


图 1-3 异步电动机的 T 形等效电路

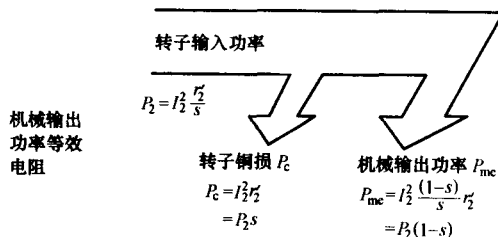


图 1-4 转子输入功率的流向

由图 1-4 可知， $P_2 : P_c : P_{mc} = 1 : s : (1-s)$ ，其中 P_2 称为同步瓦特。 m 相异步电动机的转矩 T 可表示为

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

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

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

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)； $P_2 / \omega_1 = r'_2 I_2^2 / s \omega_1$ 称为同步瓦特转矩。

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

$$I_2 = \frac{E_1}{\sqrt{(\omega_1 L'_2)^2 + \left(\frac{1}{s} r'_2\right)^2}} = \frac{E_1}{\sqrt{(2\pi f_1 L'_2)^2 + \left(\frac{f_1}{f_s} r'_2\right)^2}}$$

$$= \left(\frac{E_1}{f_1}\right) \frac{1}{\sqrt{(2\pi L'_2)^2 + (r'_2/f_s)^2}} \quad (1-9)$$

$$T = \frac{P_2}{\omega_1} mp = I_2^2 \frac{r'_2}{s} mp \frac{1}{\omega_1} = \frac{mp r'_2}{2\pi f_1 s} I_2^2 = \frac{mp r'_2}{2\pi f_s} I_2^2$$

$$= \frac{mp}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \left[\frac{f_s r'_2}{(2\pi f_s L'_2)^2 + r'^2_2} \right] \quad (1-10)$$

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

$$\dot{U}_1 = (r_1 + j2\pi f_1 L_1) \dot{I}_1 - \left(\frac{r'_2}{s} + j2\pi f_1 L'_2\right) \dot{I}_2 \quad (1-11)$$

$$(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) j2\pi f_1 M = -\dot{I}_2 \left(\frac{r'_2}{s} + j2\pi f_1 L'_2\right) \quad (1-12)$$

$$T = \frac{mp}{2\pi f_1} \frac{I_2^2 r'_2}{s} \quad (1-13)$$

由式 (1-11) ~ 式 (1-13) 求出转矩

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

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 $\dot{I}_2$ 只由转差率决定。随着转差率增大, 转子电流 $\dot{I}_2$ 将增加, $j2\pi f_1 L'_2 \dot{I}_2$ 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 的长度成比例。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

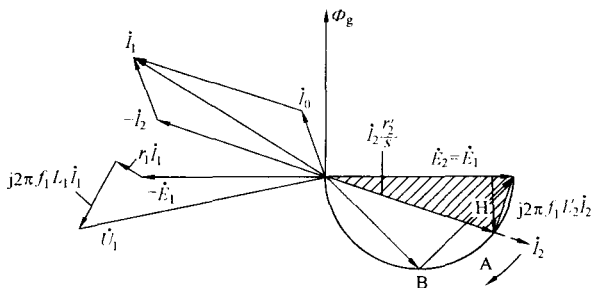


图 1-5 异步电动机的相量图 ($E_1 = \text{定值}$)

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。

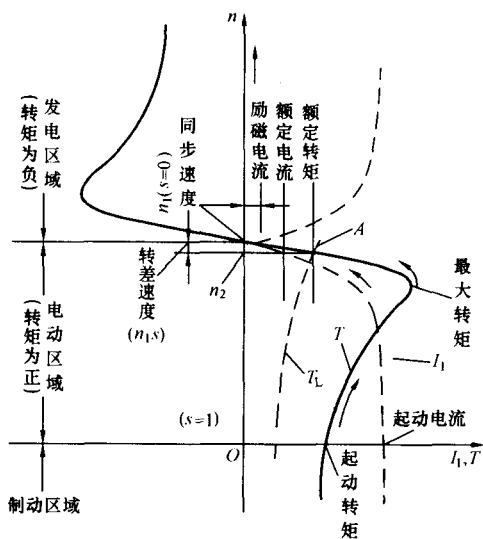


图 1-6 异步电动机的机械特性（工频电源驱动）

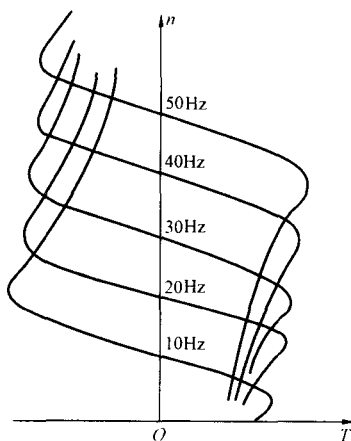


图 1-7 转速-转矩特性 (U/f 一定)

b. 用变频器驱动时电动机的特性

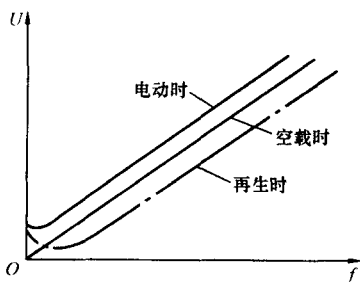


图 1-8 端电压的补偿

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 1-10 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_B 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，然后将它们叠加起来。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。

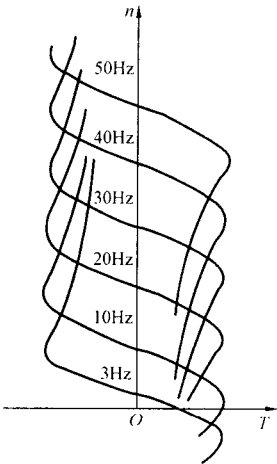


图 1-9 转-转矩特性
(有电压补偿时)

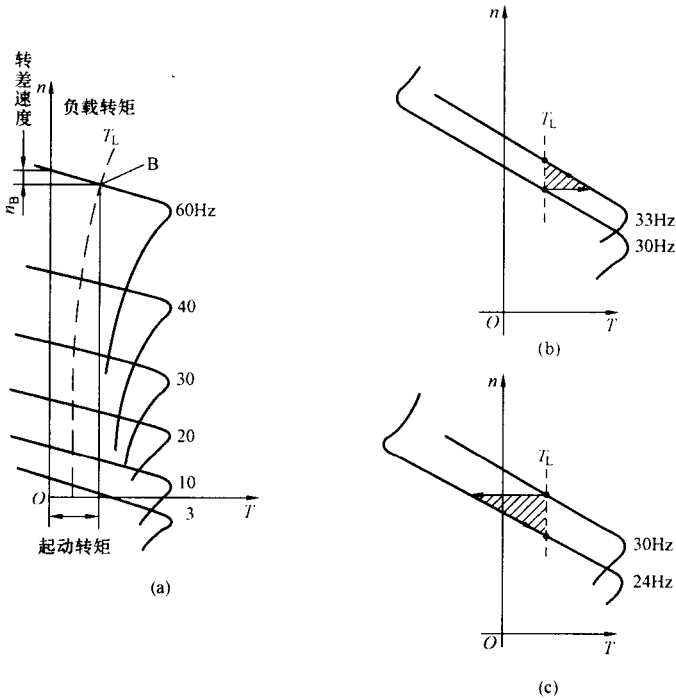


图 1-10 异步电动机的加减速情况
(a) 起动；(b) 加速；(c) 减速

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。

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

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

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。

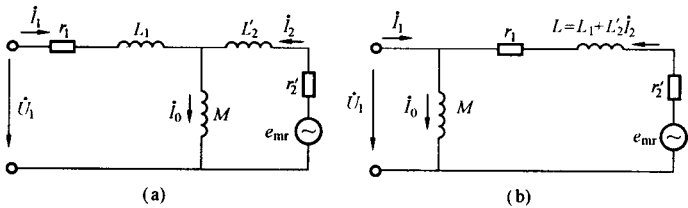


图 1-11 考虑了高次谐波的异步电动机等效电路

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。

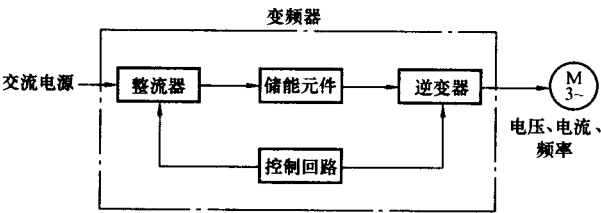


图 1-12 变频器的基本构成

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

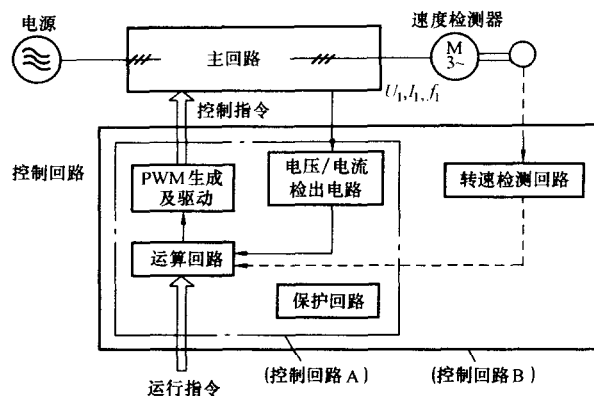


图 1-13 变频器的指令与控制

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。

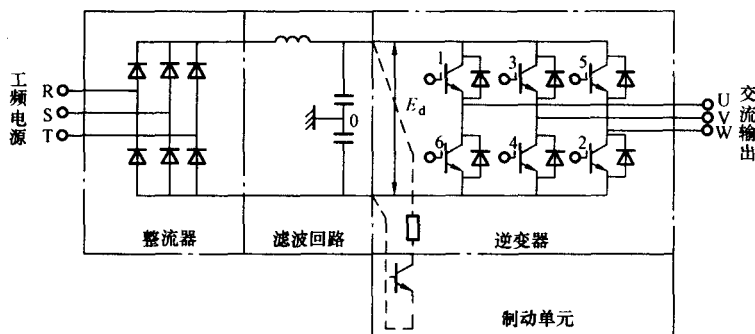


图 1-14 典型的电压型变频器一例

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、14 章）。

(2) 滤波回路 在整流器整流后的直流电压中，含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时，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 变频器的工作波形。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，三相的输出线电压如图 (g)、(h)、(i) 所示。而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。

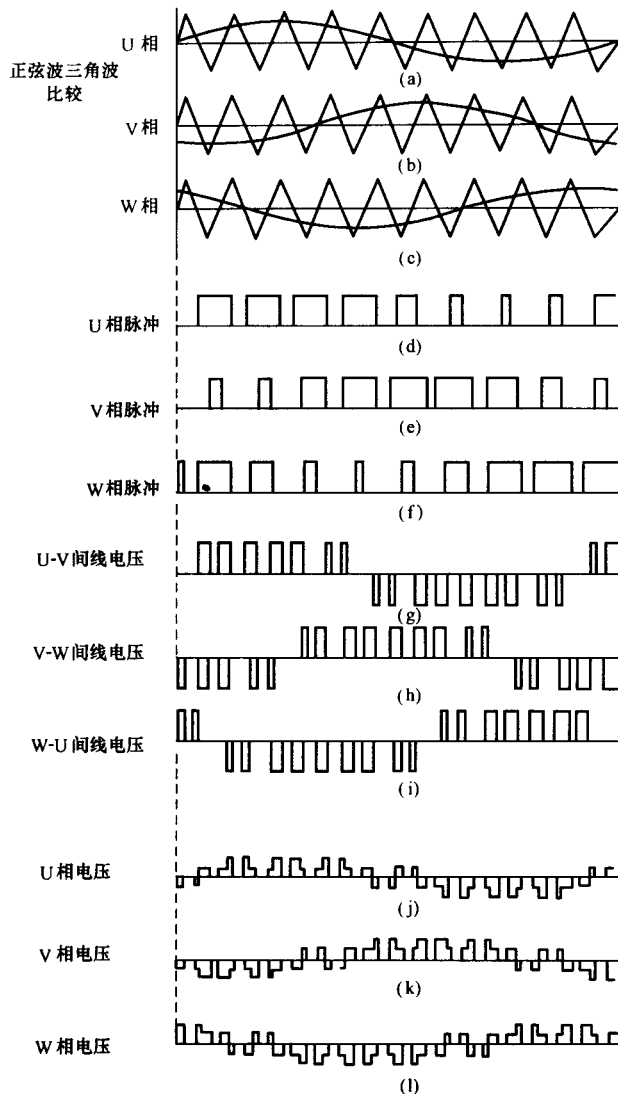


图 1-15 电压型变频器的输出电压

(4) 制动单元 异步电动机在再生制动区域（第二象限）运行时，再生能量首先存储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存储的能量大，中、大功率系统需要快速制动时，必须用可逆变流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极限值。

(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驱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。对于减速时需要加制动动力矩的负载，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：Tachogenerator，测速发电

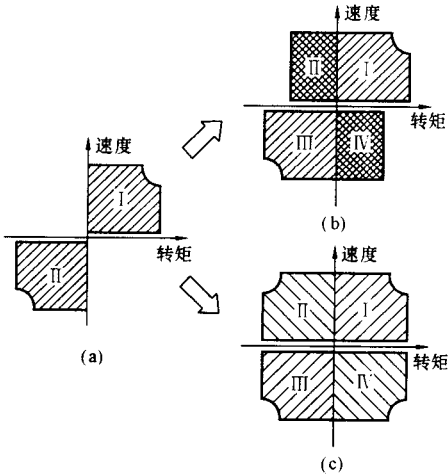


图 1-16 采用电压型逆变器的四象限运行
（a）为不可逆变频器时；（b）带制动回路时；
（c）为可逆变频器时