

# PWM 逆变技术及应用

陈国呈 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# PWM

# 逆变技术及应用

陈国呈 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

本书以 PWM 模式优化为切入点, 展开讨论了 PWM 无源逆变器和有源逆变器。前者包括 PWM 变频原理、无刷直流电动机变频调速、矢量控制、直接转矩控制、主回路的换相过程、输出电流波形失真与补偿、变频器输入输出电流波形特征、能量再生与制动问题、三相软开关变频技术、高压大容量逆变技术; 后者包括 PWM 整流技术、有源电力滤波技术、太阳能发电、风力发电等相关理论问题。理论联系实际、内容新颖是本书的突出特点。

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本专业教材或教学参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

PWM 逆变技术及应用/陈国呈编著. —北京: 中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-5488-0

I. P… II. 陈… III. 变频调速 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 055196 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>

策 划: 周 娟 责任编辑: 齐 伟

责任印制: 陈焊彬 责任校对: 崔 燕

北京同江印刷厂印刷·各地新华书店经售

2007 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·26.25 印张·652 千字

定价: 48.00 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

本社购书热线电话 (010-88386685)

# 前 言

电力电子变换技术已渗透到生产、生活、建筑、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，各个领域都少不了使用电力电子变换技术。随着电力电子变换技术的普及应用，由电力电子变换装置带来的电磁干扰、谐波污染及电网功率因数下降等“公害”越来越引起社会各界普遍关注。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、燃料电池等新型能源的开发应用，也已成为高科技研究的热点。出于环保的需要，电动车辆取代现有的燃油引擎车辆也成为工业发展的必然趋势。

作者分别于1998年、2001年、2004年出版过《PWM变频调速技术》、《PWM变频调速及软开关电力变换技术》、《新型电力电子变换技术》，受到了广大读者的欢迎和肯定。随着人们对电力电子变换技术的进一步深入研究，新拓扑结构、新控制方法不断涌现，特别是近年来，新能源的开发应用得到了人们的高度重视，作者感到有责任对上述已出版的读物再作删改和更新，以期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。这些改动主要包括补充了PWM模式的新发展、无刷直流电动机控制中出现的新问题、永磁同步电动机的矢量控制变频、异步电动机的直接转矩控制变频、三电平逆变器控制中出现的问题、高效率零电压转换变频技术及太阳能发电、风力发电等新内容，删除了“IGBT功率器件及其应用”、“变频器的控制功能和使用方法”、“单相PFC电力变换”等人们已熟悉的内容。

本书以PWM模式优化为切入点，展开讨论了PWM无源逆变器和有源逆变器。从变频技术的基本原理出发，介绍了PWM模式优化、异步电动机变频调速、无刷直流电动机变频调速、永磁同步电动机矢量控制、异步电动机直接转矩控制；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问题及软开关变频技术；根据当前国内外电力电子变换技术发展的新动向，拓展介绍了高压大容量变频技术、PWM整流技术、有源电力滤波、太阳能发电、风力发电等。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、自动控制原理等。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，反映了当前电力电子与电力传动学科的新成果和新需求。许多内容是作者和作者课题成员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，可侧重于一些基本原理的学习研究，并根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，可有效帮助初学者入门，并提高其独立科研工作能力。

本书编写工作得到了教育部博士学科点专项科研基金（No. 20060280018）、上海市教委重点科研项目基金（06ZZ03）、台达电力电子科教发展基金（DREO2006017）、上海市科委

登山计划项目基金(06DZ12211)的支持。还得到了上海交通大学张琛教授、中科院电工研究所倪受元教授的大力协助,中国电力出版社周娟总编、日本英达株式会社上海代表处曹彬先生对本书的出版也给予了大力支持。书中3.4.4节、4.1.1~4.1.3节由吴春华博士执笔,8.3.3~8.3.5节由宋文祥博士执笔,其余由陈国呈执笔并负责全书统稿和校对。书中还参考和引用了许多前辈及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,此处不一一列举。本书前几版的文字录入得到了张斌、蔡立清、汤泳洋、张凌岚、堵杰、梁朝祖、吴卫民、吴春华、黄跃杰、许春雨、屈克庆、徐健等同志的帮助,本次的部分修改录入得到了宋丹同志的帮助,作者谨借此机会向以上各位同志表示衷心感谢。

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。

**陈国呈**  
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 风机水泵的节能原理 ..... 15

## 第 2 章 PWM 模式及其优化 ..... 18

- 2.1 PWM 的调制方式 ..... 18
- 2.2 脉宽调制 (PWM) ..... 20
  - 2.2.1 正弦波 PWM (SPWM) ..... 20
  - 2.2.2 正弦波 PWM 的谐波特性 ..... 22
  - 2.2.3 准最优 PWM ..... 28
  - 2.2.4 开关损耗最小 PWM ..... 28
  - 2.2.5 开关损耗最小 PWM 的谐波特性 ..... 29
  - 2.2.6 SAPWM 模式 ..... 33
  - 2.2.7 SPWM 与 SAPWM 的频谱比较 ..... 37
  - 2.2.8 采用选择谐波消去法的 SHE PWM ..... 38
  - 2.2.9 两相调制 PWM 模式 ..... 42
  - 2.2.10 跟踪型 PWM 变频 ..... 44
- 2.3 几种 PWM 模式的统一 ..... 46
  - 2.3.1  $\mu=0$  或  $\mu=1$  ..... 46
  - 2.3.2  $\mu=0.5$  ..... 49
  - 2.3.3  $\mu$  为动态分布 ..... 50

## 第 3 章 无刷直流电动机调速控制 ..... 53

- 3.1 无刷直流电动机的基本结构 ..... 53
- 3.2 无刷直流电动机的工作原理 ..... 54
  - 3.2.1 三相半控电路 ..... 54
  - 3.2.2 三相 Y 联结全控电路 ..... 58
  - 3.2.3 三相  $\Delta$  联结全控电路 ..... 61
- 3.3 多相电动机控制举例 ..... 63
  - 3.3.1 二三通电方式 ..... 63
  - 3.3.2 五五通电方式 ..... 64
  - 3.3.3 五四通电方式 ..... 65
- 3.4 无刷直流电动机在变频空调中的应用 ..... 66

3.4.1 空调器的调温控制原理 ..... 66

3.4.2 反电动势三次谐波积分检测法 ..... 69

3.4.3 几种 PWM 调制模式 ..... 74

3.4.4 不同 PWM 调制模式对电磁转矩影响 ..... 75

3.4.5 直流电压可调型 PWM 控制 ..... 80

3.4.6 漏电流的补偿电路原理 ..... 83

## 第 4 章 矢量控制、直接转矩控制与矩阵

### 式交-交变频调速 ..... 85

4.1 矢量控制变频调速 ..... 85

4.1.1 坐标变换 ..... 86

4.1.2 永磁同步电动机在两相旋转坐标系上的数学模型 ..... 88

4.1.3 基于转子磁场定向的永磁同步电动机矢量控制系统 ..... 89

4.2 直接转矩控制变频 ..... 92

4.2.1 直接转矩控制的数学模型 ..... 92

4.2.2 电压矢量对转矩的控制 ..... 95

4.2.3 直接转矩控制系统的基本结构 ..... 95

4.3 矩阵式变频 ..... 98

## 第 5 章 主回路的换相过程与输出电流

### 波形失真 ..... 102

5.1 PWM 模式与换相关系 ..... 102

5.1.1 PWM 控制模式 ..... 102

5.1.2 换相过程 ..... 103

5.1.3 推论 ..... 107

5.2 发电状态下电动机能量的传送 ..... 108

5.2.1 异步电动机的等效电路 ..... 108

5.2.2 异步发电机的相量图 ..... 109

5.2.3 变频调速下的异步电动机运行 ..... 109

5.3 变频器输出电流波形的失真及其

补偿 ..... 113

5.3.1 交越失真 ..... 113

5.3.2 对  $T_d$  影响的补偿 ..... 116

5.3.3 PWM 模式不当引起的失真 ..... 118

5.3.4 相位角预测与死区时间补偿 ..... 122

## 第 6 章 变频器引发的谐波污染及其

抑制对策 .....	126	9.1 整流器的 PWM 调制 .....	222
6.1 分布参数为纯电阻时的相电流数值 分析 .....	126	9.2 主电路的工作模式 .....	224
6.2 分布参数含电感时的相电流数值 分析 .....	128	9.3 PWM 整流器的调相原理 .....	226
6.3 高次谐波干扰及其抑制方法 .....	131	9.4 主电路结构及其工作原理 .....	227
6.4 高频化造成的故障问题 .....	135	9.5 相幅调节方式 .....	229
6.4.1 电动机的杂散耦合 .....	136	9.6 基本特性的数学分析 .....	234
6.4.2 轴电压和轴承电流产生的原因 .....	137	9.7 整流器的传输功率及稳定性 .....	240
6.4.3 抑制漏电流和轴承电流的方法 .....	138	9.8 整流器的实现 .....	244
6.4.4 双模电压滤波器 .....	140	<b>第 10 章 有源电力滤波器</b> .....	249
6.4.5 地线高频漏电流抑制 .....	144	10.1 有源电力滤波器的基本原理 .....	249
6.4.6 变频器谐波引发的串联谐振 故障 .....	150	10.2 有源电力滤波器电路 .....	251
<b>第 7 章 交流变频调速中的制动     状态</b> .....	152	10.2.1 补偿电流指令值的检测方法 .....	251
7.1 发电机状态下的能量转换问题 .....	152	10.2.2 补偿电流的产生方法 .....	257
7.1.1 相量轨迹与圆图 .....	152	10.2.3 有源电力滤波器的损耗补偿 .....	260
7.1.2 减速过程中的能量转换 .....	155	<b>第 11 章 三相软开关电力变换</b> .....	263
7.2 异步电动机的能量再生与制动 .....	158	11.1 几种软开关电路 .....	263
7.2.1 异步电动机的能量再生 .....	158	11.1.1 高效准谐振 DC 环节逆变器 .....	263
7.2.2 泵升电路的制动 .....	159	11.1.2 并联谐振 DC 环节逆变器 .....	264
7.2.3 可逆式整流器的制动 .....	164	11.1.3 辅助准谐振变流器 .....	267
7.2.4 采用共用直流母线的多电动机 传动 .....	166	11.1.4 准谐振 ZVS 环节逆变器 .....	269
7.2.5 直流能耗制动 .....	166	11.2 一个典型的三相软开关 PWM 变频器 .....	272
7.2.6 变频器直流能耗制动中应注意的 问题 .....	171	11.2.1 电路结构与动作分析 .....	272
<b>第 8 章 高压大容量逆变器</b> .....	173	11.2.2 PWM 调制原理与输出波形 解析 .....	274
8.1 IGBT 直接串联技术 .....	173	11.2.3 输出特性分析 .....	278
8.2 多重化逆变技术 .....	177	11.3 软开关变频器主电路的数学解析 .....	280
8.2.1 电压型多重逆变器 .....	178	11.4 三相软开关高功率因数 PWM 变 频器 .....	287
8.2.2 电流型多重逆变器 .....	195	11.4.1 双 PWM 变频器电路结构与动作 分析 .....	287
8.3 多电平逆变技术 .....	198	11.4.2 软开关动作分析 .....	288
8.3.1 多电平逆变器原理 .....	198	11.4.3 双 PWM 变频器的控制方法及 实验结果 .....	289
8.3.2 三电平逆变器的三角载波 PWM 控制 .....	199	11.5 一种高效率 ZVT 三相 PWM 逆 变器 .....	291
8.3.3 三电平逆变器的空间电压矢量 控制 .....	203	11.5.1 一种高效率 ZVT 三相 PWM 逆变器 .....	291
8.3.4 中点电压波动机理的分析 .....	209	11.5.2 控制方式 .....	291
8.3.5 电容中点电压平衡控制 .....	214	11.5.3 动作模式分析 .....	292
<b>第 9 章 电压型 PWM 整流器</b> .....	222	11.5.4 实验结果与分析 .....	295
		<b>第 12 章 太阳能光伏发电</b> .....	297
		12.1 光伏电池的基本原理 .....	297

12.1.1	半导体材料的原子结构与晶格结构	297	13.2.2	反转时作倒拉制动运行	353
12.1.2	载流子	299	13.2.3	超同步转速下作回馈制动运行	353
12.1.3	半导体的 PN 结	300	13.2.4	超同步转速下作电动运行	353
12.2	光伏电池的特性和参数	302	13.2.5	次同步转速下回馈制动运行	354
12.2.1	光伏电池的特性	302	13.2.6	转子励磁超同步转速下发电运行	355
12.2.2	光伏电池的主要参数	305	13.2.7	转子励磁次同步转速下发电运行	356
12.2.3	典型的光伏电池输出特性	308	13.3	恒速恒频与变速恒频风力发电技术	356
12.3	蓄电池的充电过程	309	13.3.1	恒速恒频风力发电	356
12.3.1	铅酸蓄电池	309	13.3.2	变速恒频发电机系统	366
12.3.2	镉镍蓄电池	312	13.4	级联式无刷双馈电机的原形	373
12.3.3	安全性	312	13.5	无刷双馈电机的结构与工作原理	375
12.3.4	储能蓄电池的几个重要参数	313	13.5.1	无刷双馈电机的定子结构	376
12.3.5	蓄电池充电的控制策略	314	13.5.2	功率绕组和控制绕组磁场对转子的作用	376
12.4	光伏发电逆变器	318	13.5.3	无刷双馈电机的转子结构	380
12.4.1	导抗变换器的理论基础	319	13.5.4	无刷双馈电机的转子类型	383
12.4.2	单相并网逆变器	320	13.5.5	无刷双馈电机调速原理	385
12.4.3	三相并网逆变器	327	13.5.6	转差率、极对数、电源频率间的关系	389
12.5	光伏发电系统形式	333	13.5.7	功率绕组与控制绕组的功率关系	391
12.5.1	独立型光伏发电	333	13.5.8	无刷双馈电机的运行方式	392
12.5.2	并网型光伏发电	333	13.5.9	无刷双馈变速恒频风力发电系统的控制	396
12.5.3	可调度型光伏发电	334	<b>附录</b>		398
12.6	孤岛效应问题	334	<b>附录 A</b>	一些相关公式的推导	398
12.6.1	孤岛效应的发生	334	<b>附录 B</b>	开关函数及逆变器输出电压	404
12.6.2	传统孤岛效应检测法	335	<b>参考文献</b>		406
<b>第 13 章</b>	<b>风力发电</b>	<b>342</b>			
13.1	风力发电技术概述	342			
13.1.1	风力机的类型	342			
13.1.2	风力机的基本特性	343			
13.1.3	风力机的功率调节	348			
13.1.4	风力发电的发展趋势	349			
13.2	绕线转子异步电动机双馈 (串级) 调速原理	350			
13.2.1	次同步转速下作电动运行	352			



# 第 1 章

## 变频调速原理

变频调速包括异步电动机、无刷直流电动机和永磁同步电动机的变频驱动。本章先简单介绍异步电动机变频调速中的  $U/F$  特性与控制原理、变频器的构成与功能、风机水泵的节能原理。至于无刷直流电动机及永磁同步电动机的变频驱动将放在后面的有关章节中介绍。

### 1.1 异步电动机变频调速运行原理<sup>●</sup>

图 1-1 为圆板与电动机的电磁转矩示意图<sup>[1]</sup>，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  $\Phi$  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。

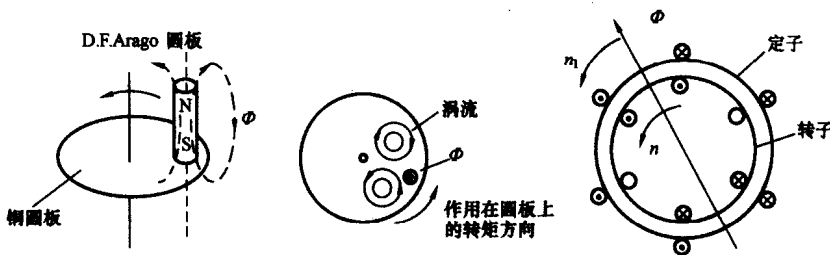


图 1-1 圆板与电动机的电磁转矩示意图

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

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

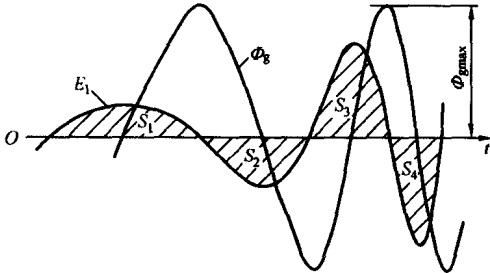
改变  $f_1$  即可改变电动机转速  $n_1$ 。

● 本书中的异步电动机均指感应电动机。

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

设异步电动机定子绕组的有效匝数为  $N$ , 如果施加在绕组上的电压为  $U_1$ , 每极定子绕组产生的气隙旋转磁通为  $\Phi_g$ , 该磁通将产生感应电动势  $E_1$ , 则  $E_1$ 、 $N$ 、 $\Phi_g$  之间的关系为



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

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  $\Phi_{gmax}$  总是不变的。

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

图 1-2 感应电动势  $E_1$  与气隙磁通  $\Phi_g$

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

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

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  $U_1/f_1 = K$  不能保持气隙磁通幅值不变 (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。

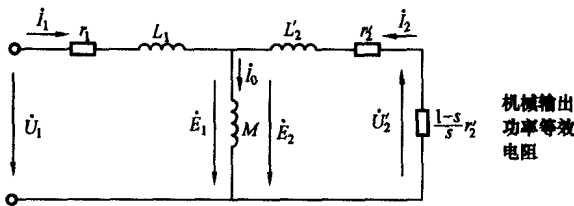


图 1-3 异步电动机的 T 形等效电路

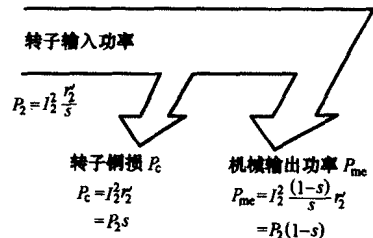


图 1-4 转子输入功率的流向

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

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

式中,  $\omega_2$  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

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

式中,  $P_2$  为转子输入功率 (kW);  $\omega_1$  为定子角频率 ( $2\pi f_1$ ) (rad/s);  $T$  为异步电动机转矩 ( $N \cdot m$ );  $P_2/\omega_1 = r_2' I_2^2 / s\omega_1$  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

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

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_2}{\omega_1} mp = I_2^2 \frac{r_2'}{s} mp \frac{1}{\omega_1} = \frac{mp r_2'}{2\pi f_1 s} I_2^2 = \frac{mp r_2'}{2\pi f_s} I_2^2 \\ &= \frac{mp}{2\pi} \left(\frac{E_1}{f_1}\right)^2 \left[ \frac{f_s r_2'}{(2\pi f_s L_2')^2 + r_2'^2} \right] \end{aligned} \quad (1-10)$$

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

$$U_1 = (r_1 + j2\pi f_1 L_1) \dot{I}_1 - \left(\frac{r_2'}{s} + j2\pi f_1 L_2'\right) \dot{I}_2 \quad (1-11)$$

$$(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) j2\pi f_1 M = -\dot{I}_2 \left(\frac{r_2'}{s} + j2\pi f_1 L_2'\right) \quad (1-12)$$

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

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

$$\begin{aligned} A &= \frac{r_2'}{f_s} \frac{(2\pi f_s M)^2}{r_2'^2 + [2\pi f_s (L_2' + M)]^2} \\ B &= 2\pi L_1 + \frac{r_2'^2 + (2\pi f_s)^2 L_2' (L_2' + M)}{r_2'^2 + [2\pi f_s (L_2' + M)]^2} 2\pi M \end{aligned}$$

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。

(1) 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。

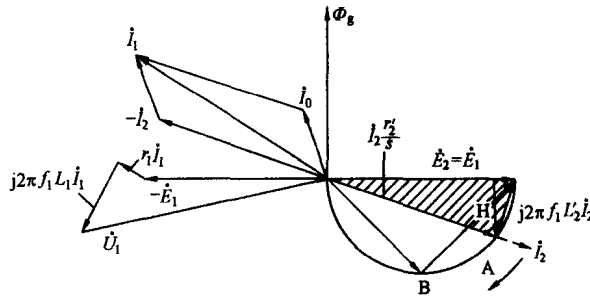


图 1-5 异步电动机的相量图 ( $E_1 = \text{定值}$ )

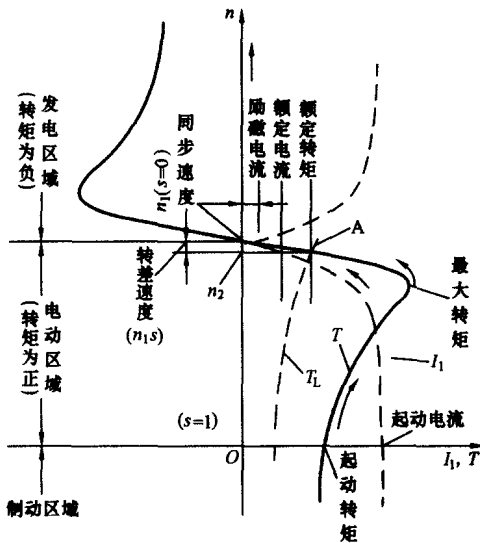


图 1-6 异步电动机的机械特性 (工频电源驱动)

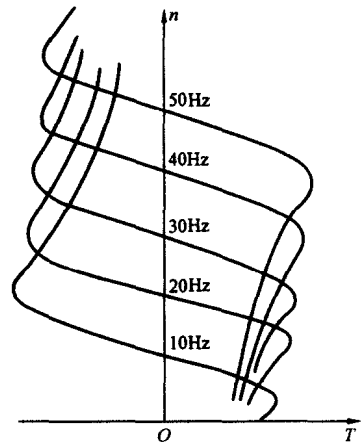


图 1-7 转速-转矩特性 ( $U-F$  一定)

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。

(2) 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。

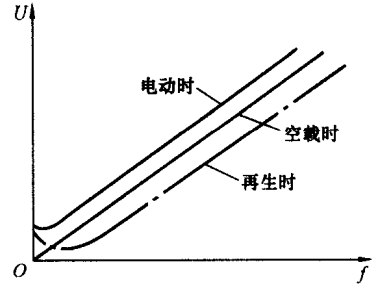


图 1-8 端电压的补偿

图 1-10 为异步电动机的加减速情况。图 1-10 (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 1-10 (b) 为从稳定状态稍许使频率升高、增速时的情况；图 1-10 (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。

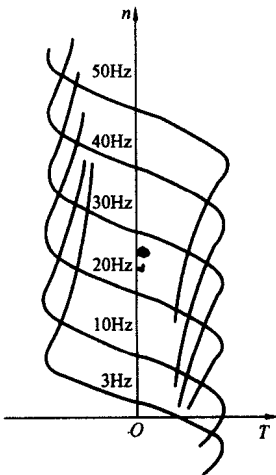


图 1-9 转速-转矩特性  
(有电压补偿时)

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，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。

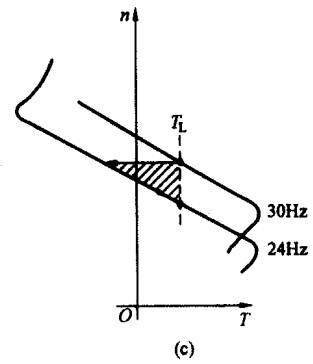
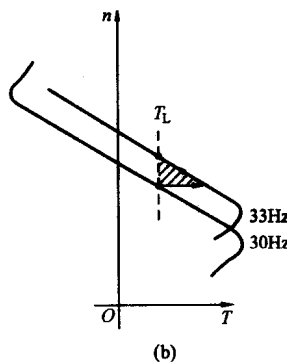
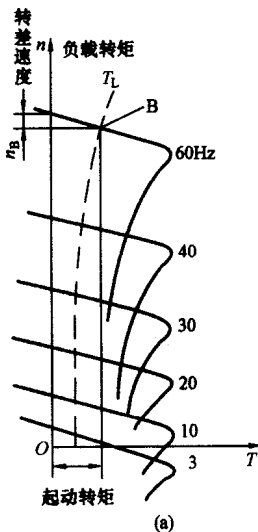


图 1-10 异步电动机的加减速情况  
(a) 起动；(b) 加速；(c) 减速

按上述想法，考虑了高次谐波的异步电动机等效电路如图 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 1-11 (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。

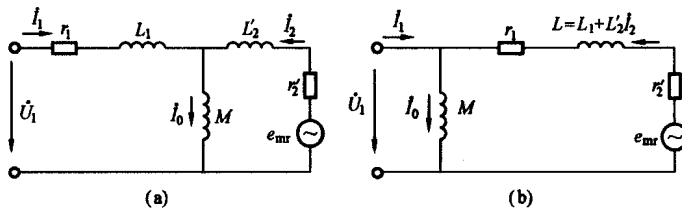


图 1-11 考虑了高次谐波的异步电动机等效电路

## 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，驱动异步电动机运行，整个系统是开环的。

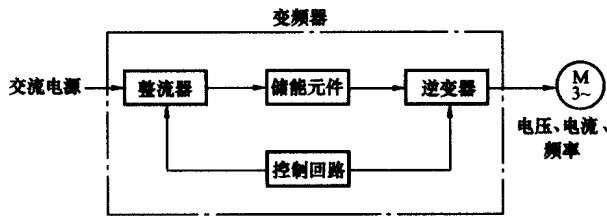


图 1-12 变频器的基本构成

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动机侧检测反馈信号，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。下面说明主回路、控制回路和保护回路。

### 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

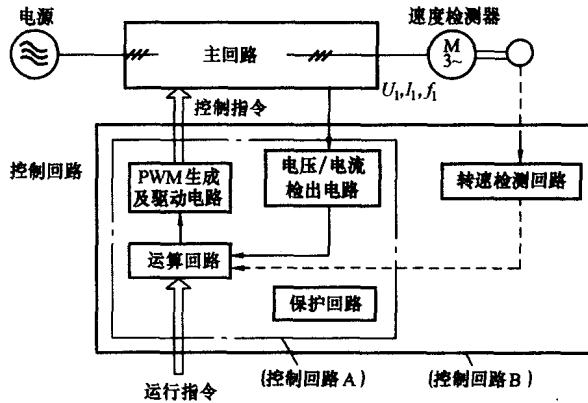


图 1-13 变频器的指令与控制

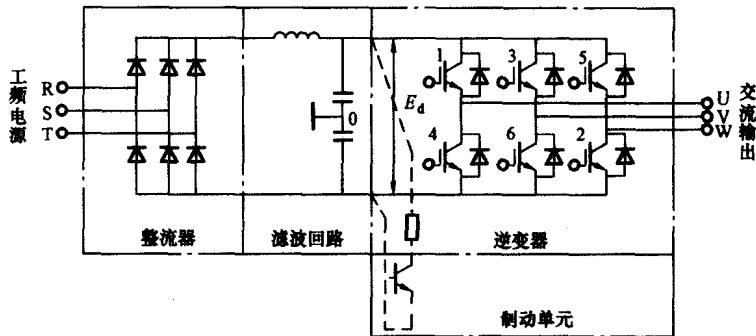


图 1-14 典型的电压型变频器一例

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，电功率的传输是不可逆的。

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 7、11 章）。

(2) 滤波回路 在整流器整流后的直流电压中，含有 6 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 6 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 是电压型变频器的工作波形。图 1-15 (a)、(b)、(c) 所示为 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 1-15 (d)、(e)、(f)。上述脉冲序列控制着逆变器上 6 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 1-15 (g)、(h)、(i) 所示。而相对于异步电动机三相绕组中点，U、V、W 三相的相电压如图 1-15 (j)、(k)、(l) 所示。

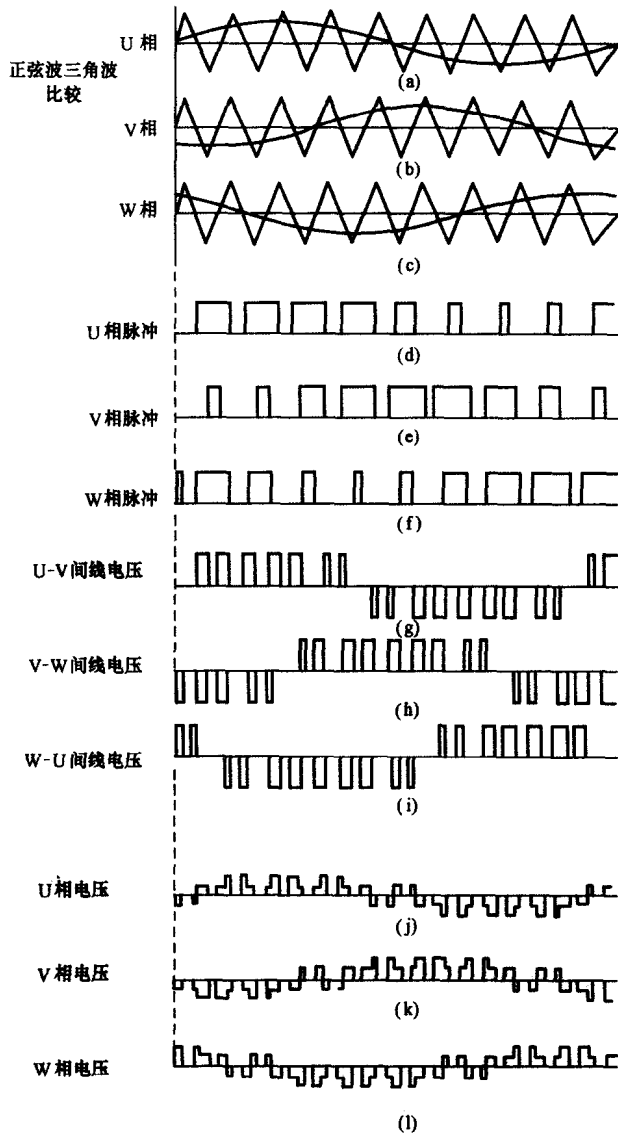


图 1-15 电压型变频器的输出电压波形

(4) 制动单元 异步电动机在再生制动区域（Ⅱ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象限为正转的再生制动运行，Ⅳ象限为反转的再生制动运行。在只需要图 1-16 (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 1-16 (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，可使用可逆变频器，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，所以使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 点画线内，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) 转速检测回路。在异步电动机轴上装上转速检测器检测转速信号并送入运算回路，

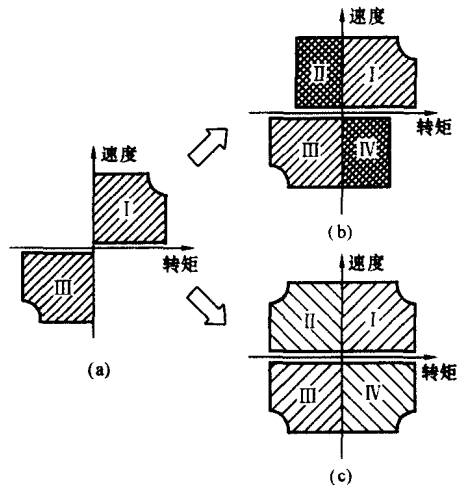


图 1-16 采用电压型逆变器的四象限运行

(a) 为不可逆变频器时；(b) 带制动回路时；

(c) 为可逆变频器时