

变频调速系统 设计与维护

周志敏 周纪海 纪爱华 编著



中国电力出版社
www.infopower.com.cn

自动化技术系统应用与维护丛书

TM921.51/12

2007

变频调速系统 设计与维护

周志敏 周纪海 纪爱华 编著



中国电力出版社

www.infopower.com.cn

内 容 简 介

本书是《自动化技术系统应用与维护丛书》之一。

变频技术是采用电力半导体器件,将电压和频率固定不变的交流电变换为电压或频率可变的交流电能的一种静止交流技术。在以工频交流电为主的用电场合,变频技术具有广泛的应用前景。

本书结合国内外变频调速技术的应用和发展,全面系统地阐述了变频调速的最新应用技术。全书共9章,系统地介绍了现代变频技术、变频调速系统工程设计、检测电器和电路、变频调速系统的电磁兼容性工程设计、变频调速系统的通信网络、变频调速系统参数设置与调试、变频调速系统的维护与试验以及变频器故障分析与处理等内容。全书深入浅出地阐述了变频调速系统的设计与维护工作中,经常涉及的变频调速理论知识和实际维护工作中的操作技能。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供电气传动、自动控制、航天及家电等领域从事变频调速技术研究开发、设计和应用的工程技术人员和高等学校电力电子、电气传动、工业自动化等专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变频调速系统设计与维护 / 周志敏, 周纪海, 纪爱华编著.
北京: 中国电力出版社, 2007
(自动化技术系统应用与维护丛书)
ISBN 978-7-5083-5653-2

I. 变… II. ①周…②周…③纪… III. ①变频调速—控制系统—系统设计②变频调速—控制系统—维护 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 083047 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>)
北京市同江印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 11 月第一版 2007 年 11 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 25 印张 616 千字
印数 0001—3000 册 定价 42.00 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

序

随着我国科学技术的不断进步和工业化进程的不断加速，整个社会的自动化水平和信息化水平不断提高。自动化技术是多种学科的交叉综合，特别是在计算机、电力电子、机械制造技术迅速发展的今天，自动化技术的应用越来越广泛。与此同时，企业对一线工程技术人员的需求越来越大，要求也越来越高。对于广大自动化技术人员和产品开发、制造、使用和维护人员而言，要想提高自己的业务技能，仅仅学习基本的理论知识和产品的使用说明、介绍是很不够的，掌握自动化系统或设备的设计与维护技术尤显重要，也是工作中的难点。基于此，相关从事相关领域工作的人员很需要一些成熟实用的经验和技巧来指导实践工作，《自动化系统设计与维护丛书》就是为满足读者这方面的需要和提高实际应用能力而编写的，本系列丛书包括变频调速系统、可编程控制器及其系统、集散控制系统和自动化仪表及系统等方面。

本丛书结合当前企业的生产实际和自动化技术的实际应用，力求内容反映技术的新发展和新动向，具有一定的广度和深度。本丛书编写目的明确、强化应用，注重提高读者的实践操作能力，内容安排上符合认知规律，由浅入深、由易到难，同时努力做到理论与实践紧密结合，侧重实践操作，理论知识以够用为度，实例讲解以培养掌握系统设计与维护技能，增强分析、判断、排除各种实际故障能力重点。

本丛书作者大多来自企业一线，具有很扎实的理论和丰富的生产实践经验，了解企业的实际情况和自动化技术人员的实际需要并贯穿于整套丛书的编写过程中。在写作方法上，作者力求做到理论够用、通俗易懂、深入浅出、图文并茂、实例典型、可读性和可操作性强，符合读者的阅读兴趣。

本丛书以从事自动化技术的工程技术人员为主要读者对象，也可供科研院所和高校师生作为学习和工作的参考读物。

系统编写出版这样一套技术丛书对我们来说是一种尝试，由于参加编写的人员较多，尽管我们进行了大量的协调和沟通，调研和探讨，书中不妥之处仍然在所难免，希望广大读者和同行给与支持 and 帮助，我们深表感谢，我们的联系方式是 wang_xingyun@cepp.com.cn。同时，希望广大自动化行业的专家、学者、工程技术人员积极参与自动化类图书编写出版工作，将您的丰富经验和良好创意总结出来，共同为提高我国工业自动化技术的理论 and 应用水平做出贡献。

《自动化系统设计与维护丛书》编委会

2007 年 10 月

前 言

变频调速系统是电气传动控制领域的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到整个系统的安全性和可靠性。自变频器问世以来引起了国内外电气传动界的普遍关注，现已成为具有发展前景和影响力的一项高新技术产品。现代变频调速系统以其低损耗、高效率、电路简洁等显著优点而受到人们的青睐。近年来随着工业自动化产业的高速发展，变频调速系统日益广泛地应用于电气传动领域。为此，掌握变频调速技术特性是将变频技术应用到工程实践中的理论基础，同时也是保证构成的变频调速系统具有高性能比、最简的外围电路、最佳的性能指标的技术基础。变频调速系统的维护技术，是变频调速系统安全稳定运行所必需掌握的实际操作技能。

本书结合国内外变频调速技术的发展动向，将变频调速的理论基础、工程设计和维护技术有机的结合，系统介绍了变频调速系统的工程设计与维护技术。本书尽量做到针对性和实用性，力求做到通俗易懂和结合实际，使得从事变频调速系统设计和维护的人员中获益，读者可以此为“桥梁”，全面了解和掌握变频器的应用和维修技术。

本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内的专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

限于时间短和作者水平，难免有错误之处，敬请读者批评指正。

作 者

2007 年 8 月

目 录

序

前 言

第 1 章	现代变频技术	1
1.1	变频器基础知识	1
1.2	变频器控制方式	10
1.3	变频调速系统	18
1.4	变频技术的创新与发展	27
第 2 章	变频调速系统工程设计	33
2.1	变频器的选择	33
2.2	变频器的外部电路	47
2.3	变频调速系统的制动方式	55
2.4	变频器输入输出滤波器	66
2.5	变频器的外部控制电路设计	74
2.6	变频调速系统的布线设计	83
第 3 章	检测电器和电路	86
3.1	接近开关	86
3.2	光电开关概述及功能	95
3.3	霍尔开关	101
3.4	主令电器	103
第 4 章	变频调速系统的电磁兼容性工程设计	106
4.1	变频器的电磁兼容性	106
4.2	变频器谐波的产生及抑制对策	112
4.3	变频系统的电磁干扰及抑制措施	122
第 5 章	变频调速系统的通信网络	141
5.1	RS-485 总线	141
5.2	变频器通信协议	147
5.3	变频器与 PLC 间通信	156
5.4	变频器的分布串行通信系统	165
5.5	基于 Modbus 总线控制的变频调速系统	172
5.6	变频器的远程监控及通信	179
第 6 章	变频调速系统参数设置与调试	186
6.1	变频器安装	186

6.2	变频器的参数设定	193
6.3	变频调速系统的调试	229
第 7 章	变频器的工程应用	250
7.1	变频调速的切换控制技术	250
7.2	变频器的工程应用	265
7.3	变频器在起重设备上的应用	273
7.4	变频器恒压供水系统	282
第 8 章	变频调速系统的维护与试验	292
8.1	变频器的使用与维护	292
8.2	变频器的测量与实验	302
第 9 章	变频器故障分析与处理	311
9.1	变频器的常见故障分析	311
9.2	变频器故障诊断及处理	315
9.3	典型变频器常见故障分析及处理	342
9.4	变频器故障报警信息及处理方法	381
参考文献		393

第 1 章 >>>

现代变频技术

1.1 变频器基础知识

变频技术是应交流电机无级调速的需要而诞生的,20 世纪 60 年代电力电子器件从 SCR (晶闸管)、GTO (门极可关断晶闸管)、BJT (双极型功率晶体管)、MOSFET (金属氧化物场效应管)、SIT (静电感应晶体管)、SITH (静电感应晶闸管)、MGT (MOS 控制晶体管)、MCT (MOS 控制晶闸管) 发展到 IGBT (绝缘栅双极型晶体管)、HVIGBT (耐高压绝缘栅双极型晶闸管), 器件的发展促使电力变换技术的不断发展。20 世纪 70 年代开始, 脉宽调制变压变频 (PWM-VVVF) 调速研究引起了人们的高度重视。20 世纪 80 年代, 科研人员对作为变频技术核心的 PWM 模式优化问题做进一步的研究, 并得出诸多优化模式, 其中以鞍形波 PWM 模式效果最佳。20 世纪 80 年代美、日、德、英等发达国家的 VVVF 变频器已投入市场并得以广泛应用。

1.1.1 变频器的基本原理及分类

1. 变频器的基本原理

交-直-交变频器的工作原理是把工频交流电通过整流器变成平滑直流, 然后利用半导体器件 (GTO、GTR 或 IGBT) 组成的三相逆变器, 将直流电变成可变电压和可变频率的交流电, 由于采用微处理器编程的正弦脉宽调制 (SPWM) 方法, 使输出波形近似正弦波, 用于驱动异步电机, 实现无级调速。利用变频器可以根据电机负载的变化实现自动、平滑的增速或减速, 基本保持异步电机固有特性转差率小的特点, 具有效率高、范围宽、精度高且能无级变速的优点。

2. 通用变频器的主要功能

(1) 基本功能。

1) 基本频率。通常指输入工频交流的频率。

2) 自动加、减速控制。按照机械惯量 GD^2 、负载特性自动确定加/减速时间。这一功能通常用于大惯性负载。

3) 加、减速时间。由加、减速时间的选择决定调速系统的快速性, 如果选择较短的加、减速时间, 就会提高生产效率。但是, 若加速时间选择得太短, 则会引起过电流; 若减速时间选择得太短, 则会使频率下降得太快, 电机容易进入制动状态 (电机转速大于定子频率对应的同步转速, 转差率变为负值), 可能会引起过电压。

4) 加、减速方式。可选择线性加、减速方式和 S 形加、减速方式。

(2) 特殊功能。

1) 低频定子电压补偿功能，通常称为电机的转矩提升。

2) 跳频功能，由变频器为交流电机供电时，系统可能发生振荡。发生振荡的原因是：电气频率与机械频率发生共振或是由纯电气引起的。通常振荡是发生在某些频率范围内的，为了避免发生振荡，可采用跳频功能。

3) 瞬时停电再启动功能，由于电机有很大的惯性，在停电的数秒钟时间内，电机的转速可能还在期望值的范围内。这样，变频器可以在恢复供电后继续给电机按正常运行供电，而不需要将电机停止后再重新启动。

3. 变频器的分类

(1) 按变换的环节分类。

1) 交-交变频器。交-交变频器是将工频交流直接变换成频率电压可调的交流（转换前后的相数相同），又称直接式变频器。

2) 交-直-交变频器。交-直-交变频器是先把工频交流通过整流器变成直流，然后再把直流变换成频率电压可调的交流，又称间接式变频器，交-直-交变频器是目前广泛应用的通用型变频器。

(2) 按直流电源性质分类。

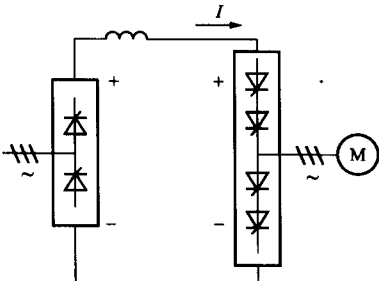
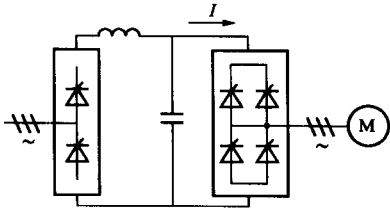
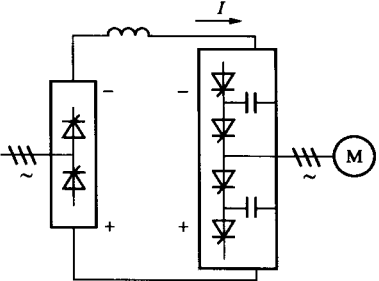
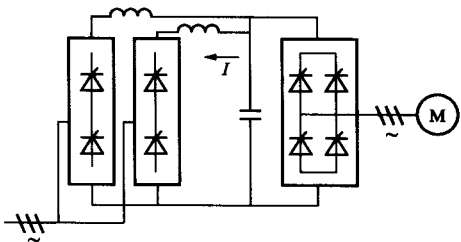
1) 电流源型变频器。电流源型变频器的特点是中间直流环节采用大电感器作为储能环节来缓冲无功功率，即扼制电流的变化，使电压波形接近正弦波，由于该直流环节内阻较大，故称电流源型变频器。电流源型变频器的特点是能扼制负载电流的频繁而急剧的变化，常应用于负载电流变化较大的场合。

2) 电压源型变频器。电压源型变频器的特点是中间直流环节的储能元件采用大电容器作为储能环节来缓冲无功功率，直流环节电压比较平稳，直流环节内阻较小，相当于电压源，故称电压源型变频器，常应用于负载电压变化较大的场合。

3) 电压源型变频器和电流源型变频器的特点。电压源型和电流源型变频器都属于交-直-交变频器，其主电路由整流器、平波电路和逆变器三部分组成。由于负载一般都是感性的，它和电源之间必有无功功率传送，因此在中间的直流环节中，需要有缓冲无功功率的元件。如果采用大电容器来缓冲无功功率，则构成电压源型变频器；如采用大电抗器来缓冲无功功率，则构成电流源型变频器。电压源型变频器和电流源型变频器的特点见表 1-1。

表 1-1 电压源型变频器和电流源型变频器的特点

项目	电流源型变频器	电压源型变频器
电流滤波方式	电感滤波	电容滤波
电压波形	近似正弦波（电机负载）	矩形波（或阶梯形波）
电流波形	矩形波	近似正弦波

续表		
项目	电流源型变频器	电压源型变频器
电动运行		
再生发电运行		
电源阻抗	大	小
适用范围	适用于单机拖动，频繁加、减速情况下运行，并需经常反向的场合	适用于向多台电机供电，不可逆拖动，稳速工作，快速性要求不高的场合
其他	(1) 对于电流源型变频器不需要换流电感器； (2) 可使用关断时间较长的普通晶闸管； (3) 过电流保护容易； (4) 不需要滤波电容	(1) 对于电压源型变频器需要换流电感器； (2) 晶闸管承受电压低，要求晶闸管关断时间短； (3) 过电流保护困难； (4) 需要滤波电容

(3) 根据电压的调制方式分类。

1) 脉宽调制 (SPWM) 变频器。脉宽调制变频器电压的大小是通过调节脉冲占空比来实现的，中、小容量的通用变频器几乎全都采用此类变频器。

2) 脉幅调制 (PAM) 变频器。脉幅调制变频器电压的大小是通过调节直流电压幅值来实现的。

(4) 根据输入电源的相数分类。

1) 三进三出变频器。三进三出变频器的输入侧和输出侧都是三相交流电。绝大多数变频器都属此类。

2) 单进三出变频器。单进三出变频器的输入侧为单相交流电，输出侧是三相交流电。家用电器里的变频器均属此类，通常容量较小。

4. 变频器的额定数据

(1) 输入侧的额定数据。

1) 输入电压 U_{IN} 即电源侧的电压。在我国低压变频器的输入电压通常为 380V (三相) 和 220V (单相)。中高压变频器的输入电压通常为 0.66、3、6kV (三相)。此外，变频器

还对输入电压的允许波动范围作出规定，如 $\pm 10\%$ 、 $-15\% \sim +10\%$ 等。

2) 输入侧电源的相数，如单相、三相。

3) 输入侧电源的频率 f_{IN} ，即电源频率（常称工频），我国为 50Hz ，频率的允许波动范围通常规定为 $\pm 5\%$ 。

(2) 输出侧的额定数据。

1) 额定电压 U_N 。因为变频器的输出电压要随频率而变，所以 U_N 定义为输出的最高电压。通常，它总是和输入电压 U_{IN} 相等的。

2) 额定电流 I_N 。变频器允许长时间输出的最大电流。

3) 额定容量 S_N 。由额定线电压 U_N 和额定线电流 I_N 的乘积决定：

$$S_N = U_N \times I_N \quad (1-1)$$

4) 过载能力。指变频器的输出电流允许超过额定值的倍数和时间，大多数变频器的过载能力规定为： 150% ， 1min 。变频器的允许过载能力与电机的允许过载能力相比，变频器的过载能力是很低的。

1.1.2 变频器主电路的结构

1. 主电路

变频器给负载提供调压调频电源的电力变换部分称为变频器的主电路。典型的电压型变频器的主电路如图 1-1 所示。其主电路由三部分构成，将工频电源变换为直流功率的整流器，吸收整流器、逆变器产生的电压脉动的平波电路，以及将直流功率变换为交流功率的逆变器。若系统的负载为异步电机，在变频调速系统需要制动时，还需要附加制动回路。

(1) 整流器。变频器一般使用的是二极管整流器，如图 1-1 所示，它与单相或三相交流电源相连接，它把工频电源变换为直流电源。也可用两组晶体管整流器构成可逆变整流器，由于可逆变整流器功率方向可逆，可以进行再生运行。

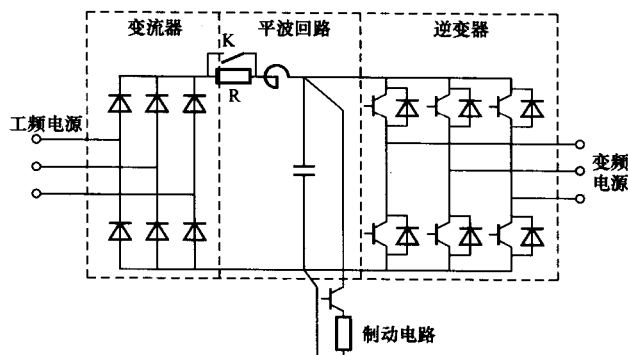


图 1-1 变频器主电路示意图

(2) 平波电路。整流后的直流电压中含有电源 6 倍频率脉动电压，而逆变器产生的脉动电流也使直流电压变动，为了抑制电压波动采用电感和电容吸收脉动电压（电流），一般

通用变频器采用简单电容滤波平波电路。

(3) 逆变器。同整流器相反,逆变器是将直流变换为所要求的可变压变频的交流,控制电路以所确定的时间控制6个开关器件导通、关断就可以得到三相变压变频交流输出。

(4) 制动回路。异步电机负载在再生制动区域使用时(转差率为负),再生能量储存在平波回路电容器中,使直流环节电压升高。一般说来,由机械系统(含电机)惯量积累的能量比电容能储存的能量大,为抑制直流电路电压上升,需采用制动回路消耗直流电路中的再生能量,制动回路也可采用可逆整流器把再生能量向工频电网反馈。

(5) 限流电路。限流电路由图1-1中限流电阻 R 及开关 K 构成,由于上电瞬间滤波电容端电压为零,上电瞬间电容充电电流较大,过大的电流可能损坏整流电路,为保护整流电路,在变频器上电瞬间限流电阻串联到直流回路中,当电容充电到一定时间后通过开关 K 将电阻短路。

2. 单相逆变主电路

(1) 半桥逆变电路。由于只需要输出两相电压,使得单相半桥逆变电路结构简单,仅需要4只功率变换器件组成两个桥臂即可。半桥逆变电路具有结构简单,功率开关器件数目最少,成本低廉,稳定性高等优点。但是,对于单相电机,采用半桥逆变电路面临这样一个问题:由于电机的两相电流 I_1 和 I_2 在相位上相差 90° ,因而流向中性点 N 的两相电流之和 I 是两相电流的矢量和。

$$I = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad (1-2)$$

对于用两只电容串联构成中点的电源,回馈电流 I 会使得前级变频器输出电压波动加大,而使电源的输出电容增大;同时,由于负载不对称带来的直流偏量还会使得中点电位向正(或负)方向持续漂移,给供电带来极大影响。所以,如何获得高质量的双极性直流电源是采用半桥逆变电路的关键所在。可采用Cuk和Sepic电路并联的方式,来获取双极性直流电源。但受到功率开关容量的限制,功率和输出电压的大小都有待提高,整个电路的实用性还有待验证。

(2) 全桥逆变电路。普通全桥逆变电路每相由4只功率开关器件组成,两相绕组共需8只功率开关器件,如图1-2(a)所示。同半桥逆变电路相比,功率开关器件数量比为2:1,结构上变得复杂,在稳定性和经济适用性方面都不如半桥逆变电路。但是,全桥逆变电路不再需要对称正负输出电源,而只需要单路稳压电源即可。两相绕组的电流也不再对电源形成大的干扰。同时全桥电路的直流电压利用率也比半桥电路要高。

由于开关器件的数目较多,在实际应用中将图1-2(a)中的中间两只桥臂合二为一,成为两套绕组的公共桥臂,就得到了如图1-2(b)所示的两相三桥臂全桥逆变电路。其中的公共桥臂分别同左、右桥臂组合,构成两相全桥逆变。

两相三桥臂全桥逆变电路继承了全桥逆变电路的优点,同时有效地减少了开关器件的数目。在直流电压 U_d 相同的情况下,其输出电压值可达到全桥电路的70%以上。在逆变桥结构上,两相三桥臂电路同三相半桥逆变电路完全一致,因此,容易从已有的六单元功率模块移植过来使用,其输出也可在三相同两相之间灵活转换。而目前三相逆变电路用的六单元功率模块的发展已经颇为成熟,尤其是在小功率应用场合。

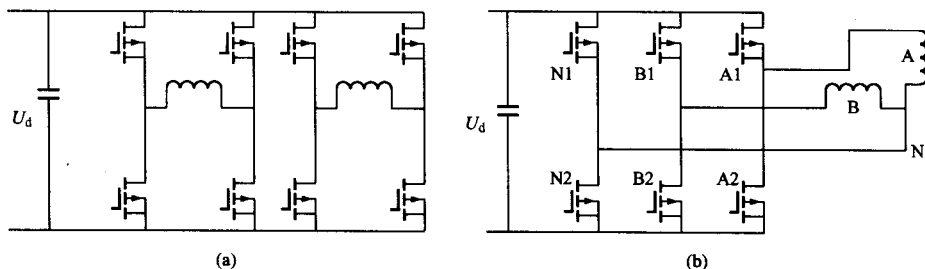


图 1-2 全桥逆变电路
(a) 双桥逆变电路; (b) 三桥臂逆变电路

3. 变频器的功率开关器件

门极可关断 (GTO) 晶闸管是目前能承受电压最高和流过电流最大的全控型 (亦称自关断) 开关器件。它能由门极控制导通和关断, 具有电流密度大、管压降低、导通损耗小、 du/dt 耐量高等突出优点, 目前 GTO 额定电压和额定电流已达 6kV/6kA 的生产水平, 适合大功率应用。但是 GTO 也有不足之处, 那就是门极为电流控制, 驱动电路复杂, 驱动功率大 (关断增益 $\beta=3\sim5$); 关断过程中内部成百甚至上千个 GTO 元胞不均匀性引起阴极电流收缩 (挤流) 效应, 在应用中必须采取相应的措施限制 du/dt 。为此需要缓冲电路 (亦称吸收电路), 采用缓冲电路既增大变频器的体积、重量、成本, 又增加损耗。另外, GTO “拖尾” 电流使关断损耗大, 因而开关频率低。

在 GTO 的基础上, 近年开发出了一种门极换流晶闸管 (GCT), 它采用了一些新技术, 如穿透型阳极, 使电荷存储时间和拖尾电流减小, 制约了二次击穿, 可无缓冲器运行; GCT 的 N 缓冲层, 使硅片厚度以及通态损耗和开关损耗减少; GCT 特殊的环状门极, 使 GCT 开通时间缩短且串、并联容易。因此, GCT 除有 GTO 高电压、大电流、低导通压降的优点外, 又改善了其开通和关断性能, 使工作频率有所提高。

为了尽快将开关器件关断 (例如 $1\mu s$ 内), 要求在门极 PN 不致击穿的电压下 ($-20V$) 能获得快于 $4000A/\mu s$ 的变化率, 以使阳极电流全部经门极极块泄流 (即关断增益为 1), 必须采用低电感触发电路。为此, 将这种门极电路配以 MOSFET 器件与 GCT 功率组件集成在一起, 构成集成门极换流晶闸管 (IGCT)。IGCT 还可将续流二极管做在同一芯片上集成逆导型, 可使装置中器件数量减少。

绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 是一种复合型全控器件, 具有 MOSFET (输入阻抗高、开关速度快) 和 GTR (耐压高、电流密度大) 二者的优点。栅极为电压控制, 驱动功率小; 开关损耗小, 工作频率高; 没有二次击穿, 不需缓冲电路, 是目前中等功率电力电子装置中的主流器件。除低压 IGBT (1700V/1200A) 外, 已开发出高压 IGBT, 可达 3.3kV/1.2kA 或 4.5kV/0.9kA 的水平。IGBT 的不足之处是: 高压 IGBT 内阻大, 因而导通损耗大; 低压 IGBT 应用于高压电路需多个串联。如表 1-2 所示为 GTO、IGCT、IGBT 的一些技术参数的比较。由表 1-2 可以得出, 在 1kHz 以下, IGCT 有一定优点; 在较高工作频率下, 高压 IGBT 更具优势。

表 1-2 GTO、IGCT、IGBT 参数比较

器件	GTO	IGCT	IGBT
通态压降/V	3.2	1.9	3.4
门极驱动功率/W	80	15	1.5
存储时间/ μ s	20	1~3.4	0.9
尾部电流时间/ μ s	150	0.7	0.15
工作频率/kHz	0.5	1	20

除上述几种器件外，现在还在开发一些新器件，例如，新型大功率“注入增强栅极晶体管（IEGT）”，它兼有 IGBT 和 GTO 二者的优点，即开关特性相当于 IGBT，工作频率高，栅极驱动功率小（比 GTO 小二个数量级）；同时，由于电子发射区注入增强，使器件的饱和压降进一步减小；再者，功率相同时，缓冲电路的容量为 GTO 的 1/10，安全工作区宽。现已有 4.5kV/1kA 的器件，可应用于高频电路。

1.1.3 变频器控制电路构成

变频器的控制电路是给变频器主电路提供控制信号的回路，变频器控制电路如图 1-3 所示，它将信号传送给整流器、中间电路和逆变器，同时它也接收来自这些部分的信号。其主要组成部分是输出驱动电路和操作控制电路。它的主要功能有以下 3 个方面：

- （1）利用信号来开关逆变器的半导体器件。
- （2）提供操作变频器的各种控制信号。
- （3）监视变频器的工作状态，提供保护功能。

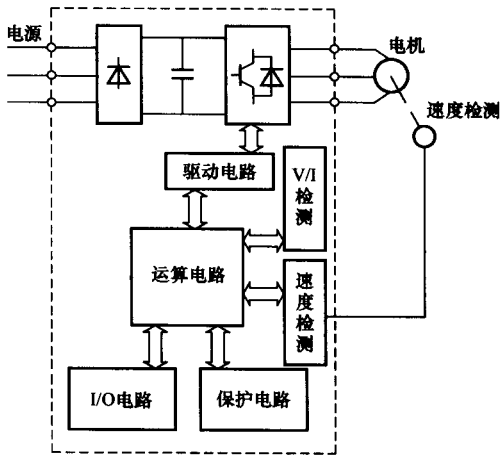


图 1-3 变频器控制电路图

1. 控制电路

控制电路包括：频率、电压的运算电路，主电路的电压、电流检测电路，用于变频调

速系统的电机的速度检测电路，将运算电路的控制信号进行放大的驱动电路，以及逆变器和负载的保护电路。

(1) 运算电路。运算电路的功能是将变频器的电压、电流检测电路的信号及变频器外部负载的非电量（速度、转矩等经检测电路转换为电信号）信号与给定的电流、电压信号进行比较运算，决定逆变器的输出电压和频率。

(2) 电压、电流检测电路。变频器的电压、电流检测电路是采用电隔离检测技术来检测主回路的电压、电流，检测电路对检测到的电压、电流信号进行处理和转换，以满足变频器控制电路的需要。

(3) 驱动电路。变频器驱动电路的功能是在控制电路的控制下，产生足够功率的驱动信号使主电路开关器件导通或关断，控制电路是采用电隔离技术实现对驱动电路的控制的。

(4) I/O 输入输出电路。变频器的 I/O 输入输出电路的功能是为了使变频器更好地实现人机交互，变频器具有多种输入信号（如运行、多段速度运行等），还有各种内部参数的输出（如电流、频率、保护动作驱动等）信号。

(5) 速度检测电路。速度检测电路以装在异步电动轴上的速度检测器（TG、PLG 等）为核心，将检测到的电机速度信号进行处理和转换，送入运算回路，根据指令和运算可使电机按指令速度运转。

2. 保护电路

变频器的保护电路是通过检测主电路的电压、电流等参数来判断变频器的运行状况的。当发生过载或过电压等异常时，为了防止变频器的逆变器和负载损坏，使变频器中的逆变电路停止工作或抑制输出电压、电流值。变频器中的保护电路，可分为变频器保护和负载（异步电机）保护两种，如表 1-3 所示为保护功能。

表 1-3 保护功能一览表

保护对象	保护功能	保护对象	保护功能
变频器保护	瞬时过电流保护 过载保护 再生过电压保护 瞬时停电保护 接地过电流保护 冷却风机保护	异步电机保护	过载保护 超频（超速）保护
		其他保护	防止失速过电流 防止失速再生过电压

(1) 变频器保护功能主要有以下几个方面。

1) 瞬时过电流保护。在变频器逆变器的负载侧发生短路时，流过逆变器开关器件的电流达到异常值（超过容许值）时，瞬时过电流保护动作停止逆变器的运行。当整流器的输出电流达到异常值时，也同样停止逆变器的运行。

2) 过载保护。当变频器逆变器的输出电流超过额定值，且电流持续时间达到规定值以上时，为了防止逆变器的开关器件损坏，过载保护动作停止逆变器的运行。过载保护需要具有反时限特性，常采用热继电器或者电子热保护（由电子电路构成）方式。

3) 再生过电压保护。变频调速系统在电机快速减速时，由于再生功率使变频器的直

流电路电压升高,有时 would 超过容许值,这时可以采取停止逆变器运行或停止快速减速的方法,防止变频器过电压。

4) 瞬时停电保护。对于数毫秒以内的瞬时停电,变频器控制电路是可以正常工作的。但瞬时停电如果达 10ms 以上时,通常情况下不仅控制电路误动作,主电路也不能供电,所以变频器应设置瞬时停电保护,以保证在发生瞬时停电后变频器逆变器能够停止运行。

5) 接地过电流保护。变频器逆变器负载接地时,为了保护逆变器需要设置接地过电流保护功能。但为了确保人身安全,还需要装设漏电断路器。

6) 冷却风机异常保护。有冷却风机的变频器,当风机异常时变频器内温度将上升,因此常采用风机热继电器或器件散热片温度传感器,在检出异常后停止变频器逆变器运行。

(2) 负载的保护。

1) 过载保护。负载过载检出单元与变频器逆变器过载保护共用,但考虑变频调速系统电机在低速运转时温度过高,常在异步电机内埋入温度传感器,或者利用装在逆变器内的电子热保护来检测电机是否过热。当电机过载保护动作频繁时,可以考虑减轻电机负载、增加电机及变频器容量等。

2) 超额(超速)保护。变频器的输出频率或者变频调速系统的异步电机的速度超过规定值时,超额(超速)保护动作,停止变频器运行。

(3) 其他保护。

1) 防止失速过电流。变频调速系统在加速时,如果异步电机跟踪迟缓,则过电流保护电路动作,运转就不能继续进行(失速)。所以,在负载电流减小之前要进行控制,抑制频率上升或使频率下降。对于恒速运转中的过电流,有时也进行同样的控制。

2) 防止失速再生过电压。变频调速系统在减速时产生的再生能量使主电路直流电压上升,为了防止再生过电压电路的保护动作,在直流电压上升之前要进行控制,抑制频率下降,防止调速系统失速。

3. 半桥、全桥逆变器控制

单相电机采用半桥逆变电路时,由于主电路结构类似,诸如 SPWM 和 SVPWM 等调速技术可以很方便地移植到单相电机调速中来。在讨论和分析单相控制电路时,假设单相电机的两相绕组对称,即两相绕组相同,空间上相互垂直,同时假定正负电源对称,幅值恒定,中性点 N 不因电流 I 的注入而浮动。

(1) 半桥 SPWM 控制。单相电机采用 SPWM 控制技术时,由于要保证两相绕组中的电流相位差为 90° ,所以两路调制信号的相位相应地也要设定为相差 90° 。SPWM 控制的优点是谐波含量低,滤波器设计简单,容易实现调压、调频功能。但是,SPWM 的缺点也很明显,即直流电压利用率低,适合模拟电路,不便于数字化方案的实现。

(2) 半桥 SVPWM 控制。依据电机学的知识可知,电压空间矢量同气隙磁场之间存在如下关系:

$$U = d\phi/dt \quad (1-3)$$

SVPWM 控制是通过控制电压空间矢量来控制电机气隙磁场的旋转,所以又称为磁链轨迹控制。两相半桥逆变电路中开关器件 S1 和 S2、S3 和 S4 的开关逻辑互补,则 4 只开

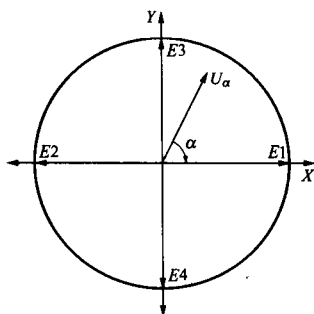


图 1-4 电压矢量图

关器件只能产生 4 个电压矢量，如图 1-4 所示。

从矢量图来看，在两相半桥逆变电路中，不会产生零电压矢量。为了合成一个幅值为 U_α ，相角为 α 的电压矢量，在矢量分解时，其 X 轴的分量要由 $E1$ 和 $E2$ 共同完成，而 Y 轴分量要由 $E3$ 和 $E4$ 共同完成。

在一个开关周期 T 内，如果 $E1$ 作用的时间为 t_1 ，则 $E2$ 作用的时间为 $T-t_1$ ，如果 $E3$ 作用的时间为 t_2 ，则 $E4$ 作用的时间为 $T-t_2$ 。根据矢量分解可以得到式 (1-4) 和式 (1-5) (矢量 $E1$ 、 $E2$ 、 $E3$ 、 $E4$ 的大小均为 $U_d/2$)：

$$t_1 = \frac{U_\alpha \cos \alpha + U_d/2}{U_d} T \quad (1-4)$$

$$t_2 = \frac{U_\alpha \sin \alpha + U_d/2}{U_d} T \quad (1-5)$$

半桥逆变电路在采用 SVPWM 控制时，输出相电压的最大值为 $U_d/2$ 。

(3) 两相三桥臂全桥逆变 SPWM 控制。三桥臂全桥逆变器采用 SPWM 控制时，在图 1-2 (b) 中由 N1 及 N2 构成的公共桥臂要同时接入电机的两相绕组中，所以在调制时，公共桥臂的调制波就不同于 A 及 B 桥臂的调制波。整个逆变电路具体调制方法为：在载波相同的情况下，A 及 B 相调制波为正弦波，相位上 A 相超前 B 相 90° (电机正转，反之，B 相超前 A 相 90° ，则电机反转)；公共桥臂则采用恒定占空比的方法调制，上下桥臂占空比均为 50%。为此在 A 及 B 绕组上得到幅值相等，相位相差 90° 的正弦电压。电压幅值与调制度 m 成正比。当 $m=1$ 时，输出电压峰值达到最大，为 $U_d/2$ 。依据电机的 U/f 曲线和输出电压与 m 的关系，即可实现两相电机的变压变频调速控制。

1.2 变频器控制方式

1.2.1 变频器控制方式的分类

变频器对电机进行控制是根据电机的特性参数及电机运转要求，对电机提供的电压、电流、频率进行控制以达到负载的要求。因此即使是变频器的主电路一样，逆变器件也相同，单片机位数也一样，只是控制方式不一样，其控制效果也是不一样的。目前变频器中常用的控制方式可分为非智能控制方式和智能控制方式。

1. 非智能控制方式

在交流变频器中使用的非智能控制方式有 U/f 协调控制、转差频率控制、矢量控制、直接转矩控制等。低压通用变频输出电压在 $380 \sim 650V$ ，输出功率在 $0.75 \sim 400kW$ ，工作频率在 $0 \sim 400Hz$ ，它的主电路都采用交-直-交电路。其控制方式经历以下四代。

(1) 以 $U/f=C$ 、正弦脉宽调制 (SPWM) 控制方式。 U/f 控制是为了得到理想的转矩