

SANLING BIANPINQI

GONGCHENG YINGYONG YU GUZHANG JIANXIU SHILI



三菱变频器 工程应用与 故障检修实例

周志敏 纪爱华 等 编著



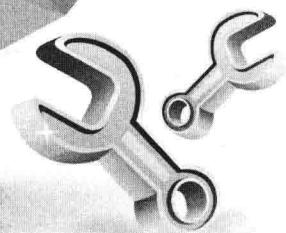
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

SANLING BIANPINQI

GONGCHENG YINGYONG YU GUZHANG JIANXIU SHILI

三菱变频器 工程应用与 故障检修实例

周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 简 介

本书结合三菱变频器在我国的应用现状,在简要介绍了变频器基础知识的基础上,系统地讲述了变频调速系统工程设计、变频调速系统电磁兼容工程设计、变频调速系统参数设置与调试、三菱变频器工程应用实例、三菱变频器使用保养及故障分析处理实例等内容。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、工业电气自动化及家电等领域从事变频调速技术研究、开发、设计、应用和维修的工程技术人员,以及高等学院、职业技术学院的电气传动、工业自动化等专业的师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

三菱变频器工程应用与故障检修实例/周志敏等编著. —北京:中国电力出版社, 2015. 3

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6894 - 1

I. ①三… II. ①周… III. ①变频器-基本知识 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 296591 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

*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 305 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

三菱变频器是三菱公司采用高性能的矢量控制技术,结合诸多先进的生产工艺制造的高性能变频器,具有全新一代模块化设计、强大的通信能力、精确的控制性能和高可靠性、宽的功率范围,可提供低速高转矩输出和良好的动态特性,同时具备超强的过载能力和友好的用户界面,使安装、操作和控制灵活方便,其产品能够满足绝大多数工业领域对交流调速的不同要求。

三菱变频器可以很好地与工艺流程控制系统结合,达到最优的速度控制并保持高精度,在保证生产线的最终产品的稳定品质的同时,降低了对电动机和驱动机械设备的磨损,因而降低了维护的成本。

三菱变频器在结构和性能上的不断创新,使其构成的交流变频调速系统在性能上不断地完善,因此在我国工业电气传动领域得以广泛的应用。为此,本书根据国内从事三菱变频器工程应用的一线工程技术人员的需求,将三菱变频器工程应用设计、参数设置、系统调试、工程应用、使用维护、故障分析处理、故障代码及故障处理实例有机的结合于一体。全书在写作上力求做到通俗易懂和结合实际,是从事三菱变频器工程应用和维修的工程技术人员必备的参考工具书。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪和平、纪达安、陈爱华等,本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息的交流上,都得到了国内专业学者、同行及三菱变频器经销商的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,水平有限,错误之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 变频器基础知识	1
1.1.1 变频器基本原理与一般分类	1
1.1.2 变频器结构	5
1.1.3 变频器控制方式及分类	8
1.1.4 PWM 调制方式	11
1.2 三菱变频器简介	13
1.2.1 三菱变频器分类及特性	13
1.2.2 三菱变频器特点及应用领域	17
第2章 变频调速系统工程设计	19
2.1 变频器的选择	19
2.1.1 变频器选型	19
2.1.2 变频器容量选择	27
2.2 变频器选用件的特点及选用	33
2.2.1 变频调速系统运行状态及共用直流母线方案	33
2.2.2 能耗制动单元及制动电阻选用	36
2.2.3 电抗器和滤波器特性及选用	38
第3章 变频调速系统电磁兼容工程设计	46
3.1 变频器电磁兼容性	46
3.1.1 变频器电磁兼容性分析	46
3.1.2 变频调速系统电磁兼容性设计规则	50
3.2 变频器谐波的产生及抑制对策	51
3.2.1 变频器谐波的产生和危害	51
3.2.2 谐波干扰抑制对策	55
3.3 变频系统的电磁干扰及抑制措施	60
3.3.1 变频系统的电磁干扰源及传播途径	60
3.3.2 变频调速系统中的抗电磁干扰措施	61
3.3.3 变频调速系统中的共模噪声及抑制	66
3.3.4 变频器周边控制回路的抗干扰措施	69

第4章 变频调速系统参数设置与调试	74
4.1 变频器参数设置	74
4.1.1 变频器参数	74
4.1.2 变频器的频率给定	79
4.1.3 变频器压频比的正确设置	82
4.1.4 变频器启停与加减速过程	84
4.1.5 变频器多功能端子的应用	91
4.1.6 变频器转矩提升功能	93
4.1.7 变频器的直流制动功能	94
4.2 变频调速系统的调试及试验	95
4.2.1 变频调速系统调试条件	95
4.2.2 变频器调试	97
4.2.3 变频器测量	99
4.2.4 变频器试验方法	101
第5章 三菱变频器工程应用实例	107
实例1 三菱FR-A540变频器在中央空调冷冻泵中应用	107
实例2 三菱FR-E740变频器在物料传送系统中应用	111
实例3 三菱FR-F540变频器在恒压供水系统中应用	117
实例4 三菱FR-A700变频器空压机供气系统中应用	119
实例5 三菱FR系列变频器与西门子PLC通信	123
实例6 三菱GOT与FR-E700变频器通信	134
第6章 三菱变频器使用保养及故障分析处理实例	139
6.1 变频器的正确使用及日常维护保养	139
6.1.1 变频器的正确使用	139
6.1.2 变频器日常维护保养	143
6.2 变频器的故障率与故障测试	148
6.2.1 变频器的故障率与引发故障的外部因素	148
6.2.2 变频器故障的自诊断与测试	153
6.2.3 故障变频器检查前必要确认的事项及检查方法	155
6.3 变频器故障分析	162
6.3.1 变频器主回路故障分析	162
6.3.2 变频器辅助控制电路故障分析	167
6.4 变频器典型故障分析及处理方法	170
6.4.1 变频器过电流故障分析及处理方法	170
6.4.2 变频器过载、过热故障分析及处理方法	173

6.4.3 变频器过压、欠压故障分析及处理方法	176
6.5 三菱变频器故障代码及故障处理实例	181
6.5.1 三菱变频器故障报警信息及处理方法	181
6.5.2 三菱变频器故障检修实例	183
参考文献	194



第 1 章

概 述



1.1 变频器基础知识

1.1.1 变频器基本原理与一般分类

一、变频器基本原理

异步电动机调速的基本原理基于以下公式

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

式中: n_1 为同步转速, r/min; f_1 为定子供电电源频率, Hz; p 为磁极对数。

一般异步电动机转速 n 与同步转速 n_1 存在一个滑差关系

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (1-2)$$

式中: n 为异步电动机转速, r/min; s 为异步电动机转差率。

由式 (1-2) 可知, 异步电动机的调速方法是, 可改变 f_1 、 p 、 s 参数中任意一个达到调节速度的目的, 对异步电动机调速最好的方法是改变频率 f_1 。基于电动机理论, 三相异步电动机每相电动势的有效值与下式有关

$$E_1 = 4.44f_1N_1\Phi_m \quad (1-3)$$

式中: E_1 为定子每相电动势有效值, V; f_1 为定子供电电源频率, Hz; N_1 为定子绕组有效匝数; Φ_m 为定子磁通, Wb。

针对式 (1-3), 异步电动机调速可分为以下两种情况分析:

(1) 恒转矩调速。在变频器输出频率低于电动机定子电源的额定频率时, 异步电动机调速属于恒转矩调速, 为了维持电动机输出转矩不变, 必须维持每极气隙磁通 Φ_m 不变, 从式 (1-3) 可知, 也就是要使 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 。如忽略定子漏阻抗压降, 可以认为电动机电源电压 U_1 与频率 f_1 按相同比例变化, 即 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 。

但是在频率较低时, 定子漏阻抗压降已不能忽略, 因此要人为地提高电动机定子电压, 以补偿定子漏抗压降, 维持 $E_1/f_1 \approx \text{常数}$, 此时变频器输出 U_1/f_1 关系如图 1-1 中的曲线 2, 而不再是曲线 1。

多数变频器在频率低于电动机额定频率时, 输出的电压 U_1 和频率 f_1 类似图 1-1 中的曲线 2, 并且随着设置不同, 可改变补偿曲线的形状, 在应用时要根据实际电动机运行情况进行调整。

(2) 恒功率调速。在变频器输出频率高于电动机定子电源的额

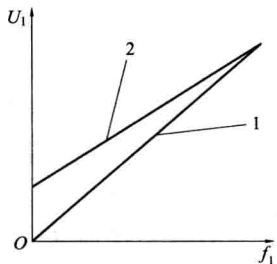


图 1-1 U/f 关系

1— $U_1/f_1 = \text{常数}$;

2— $E_1/f_1 = \text{常数}$

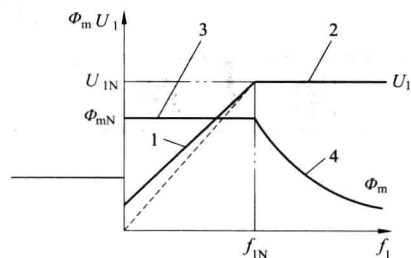


图 1-2 异步电机调速时的输出特性

- 1—恒转矩时的电压曲线；2—恒功率时的电压曲线；3—恒转矩时的转矩曲线；
4—恒功率时的转矩曲线

定频率时异步电动机调速属于恒功率调速，此时变频器的输出频率 f_1 提高，但变频器的电源电压由电网电压决定，不能继续提高。根据公式(1-3)， E_1 不能变， f_1 提高必然使 Φ_m 下降，由于 Φ_m 与电流或转矩成正比，因此也就使转矩下降，转矩虽然下降了，但因转速升高了，所以它们两者的乘积并未变，转矩与转速的乘积表征着功率。因此这时候电动机是在恒功率输出状态下运行。异步电动机变频调速时的输出特性如图 1-2 所示。 Φ_m 的大小表征电动机转矩大小，因此 Φ_m 曲线可以看作是转矩曲线。

由以上分析可知采用通用变频器对异步电动机进行调速时，输出频率和电压是按一定规律改变的，在

额定频率以下，变频器的输出电压随输出频率升高而升高，即所谓变压变频调速（VVVF）。而在电动机电源额定频率以上时，电压不变，只改变频率。

在实际工程应用中，多数变频调速场合是用于额定频率以下，低频时采用的补偿是为了解决电动机在低频时转矩下降问题，其采用的方式多种多样。有矢量控制技术、直接转矩控制技术以及拟超导技术等。其作用不外乎动态地改变变频器在低频运行时的输出电压、输出相位或输出频率，也就是利用计算机技术，实时地而不是固定地改变图 1-1 中曲线 1 的形状，以达到电动机在低速运行时力矩获得提升，并且稳定运行，又不至于电流太大而造成故障。

二、变频器分类

（一）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电直接变换成频率电压可调的交流电（转换前后的相数相同），又称直接式变频器；对于大容量、低转速的交流调速系统，常采用晶闸管交-交变频器直接驱动低速电动机，可以省去庞大的齿轮减速箱。其缺点是：最高输出频率不超过电网频率的 $1/3 \sim 1/2$ ，且输入功率因数较低，谐波电流含量大，谐波频谱复杂，因此必须配置大容量的滤波和无功补偿设备。

近年来，又出现了一种采用全控型开关器件的矩阵式交-交变压变频器，在三相输入与三相输出之间用 9 组双向开关组成矩阵阵列，采用 PWM 控制方式，可直接输出变频电压。这种调速方法的主要优点如下。

- 1) 输出电压和输入电流的低次谐波含量都较小。
- 2) 输入功率因数可调。
- 3) 输出频率不受限制。
- 4) 能量可双向流动，可获得四象限运行。
- 5) 可省去中间直流环节的电容元件。

交-交变频自从 20 世纪 70 年代末提出以来，一直受到从事电力电子学科研究的工作者高度重视。

（2）交-直-交变频器。交-直-交变频器是先把工频交流电通过整流器变成直流电，然后再把直流电变换成频率电压可调的交流电，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。

(二) 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,相当于电流源,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。

(三) 根据电压的调制方式分类

(1) 脉宽调制 (SPWM) 变频器。脉宽调制变频器输出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脉宽调制方式。

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

(四) 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。

此外,变频器还可以按输出电压调节方式分类,按主开关元器件分类,按输入电压高低分类。

三、变频器的额定数据

(1) 输入侧的额定数据。

1) 输入电压 U_{IN} 。即变频器电源侧的电压。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) 相数。如单相、三相。

3) 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 $\pm 5\%$ 。

(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是随频率而变的,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

$$S_N = U_N \times I_N \quad (1-4)$$

额定容量为在连续不变负载中,允许配用的最大负载容量。在生产机械中,负载的容量主要是根据发热状况来定的。在变动负载、断续负载及短时负载中,只要温升不超过允许值,在由变频器构成的调速系统中,因电动机是允许短时间 (几分钟或几十分钟) 过载的,而变频器则允许 150% 负载过载 1min。所以,在选用变频器时,应充分考虑负载的运行工况。

4) 过载能力是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。可见, 变频器的允许过载时间与电动机的允许过载时间相比, 变频器的过载能力是很低的。

四、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。由于变频器的负载一般都是感性的, 它和电源之间有无功功率传送, 因此在中间直流环节中, 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(电动机负载)	矩形波(或阶梯形波)
电流波形	矩形波	近似正弦波
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	适用于向多台电动机供电, 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

1.1.2 变频器结构

一、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，典型电压型变频器的主电路如图 1-3 所示。其主电路由三部分构成，将工频电源变换为直流的整流器，吸收整流器、逆变器产生的电压脉动的平波回路，以及将直流变换为交流的逆变器。另外，若负载为异步电动机，在变频调速系统需要制动时，还需要附加制动回路。

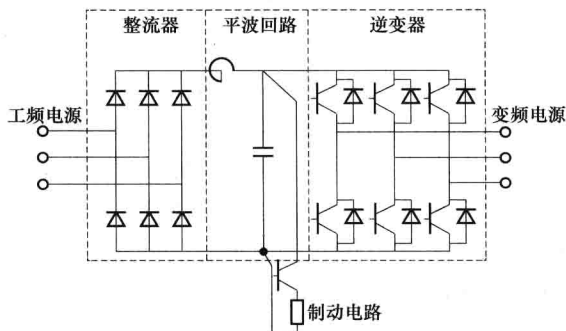


图 1-3 变频器主电路示意图

(1) 整流器。变频器一般使用的是二极管整流器，如图 1-3 所示，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。整流器与单相或三相交流电源相连接，产生脉动的直流电压。经中间直流环节平波后为逆变电路和控制电路提供所需的直流电源。三相交流电源一般需经过吸收电容和压敏电阻网络引入整流桥的输入端，阻容吸收网络的作用是吸收交流电网的高频谐波信号和浪涌过电压，从而避免由此而损坏变频器。当电源电压为三相 380V 时，整流器件的最大反向电压一般为 1200~1600V，最大整流电流为变频器额定电流的两倍。

(2) 平波回路。经整流器整流后的直流电压中含有电源 6 倍频率的脉动电压，逆变器产生的脉动电流也使直流电压（电流）波动。为了抑制脉动电压和电压波动，采用电感和电容吸收脉动电压及抑制电压（电流）波动。对于容量较小的变频器，如果电源和主电路构成器件有余量，可以省去电感而采用简单的平波回路。平波回路有以下三种作用。

- 1) 使脉动的直流电压变得稳定或平滑，以供逆变器使用。
- 2) 通过开关电源为各个控制线路供电。
- 3) 可以配置滤波或制动装置以提高变频器性能。

逆变器的负载通常属于感性负载（异步电动机），无论异步电动机处于电动或发电状态，在直流滤波电路和异步电动机之间，总会有无功功率的交换，这种无功能量要靠直流中间电路的储能元件来缓冲。同时，三相整流桥输出的电压和电流属直流脉冲电压和电流。为了减小直流电压和电流的波动，直流滤波电路起到对整流电路的输出进行滤波的作用。通用变频器的直流滤波电路采用大容量的铝电解电容，通常是由若干个电容器串联和并联构成电容器组，以得到所需的耐压值和容量。另外，因为电解电容器容量有较大的离散性，这将使它们的电压不相等。因此，电容器要各并联一个匀压电阻，消除离散性的影响，但电容的寿命则会严重制约变频器的寿命。

(3) 逆变器。利用晶闸管装置将直流电转变为交流电，这一功能就叫逆变。整流和逆变的关系密切，若同一套晶闸管装置，可以工作在整流状态，而在一定条件下，又可以工作在逆变状态，常称这一装置为变流器。逆变分为有源逆变和无源逆变（变频），变流器工作在逆变状态时，若把直流电转变为 50Hz 的交流电送到电网，称之为有源逆变；若把直流电转

变为某一频率或频率可调的交流电供给负载使用,则称之为无源逆变或变频。

逆变电路的作用是在控制电路的作用下,将直流电路输出的直流电源转换成频率和电压都可以任意调节的交流电源。逆变电路的输出就是变频器的输出,所以逆变电路是变频器的核心电路之一,起着非常重要的作用。最常见的逆变电路结构形式是利用六个功率开关器件(GTR、IGBT、GTO等)组成的三相桥式逆变电路,有规律地控制逆变器中的功率开关器件导通与关断,可以得到任意频率的三相交流输出。

通用中小容量变频器的主回路器件一般采用集成模块或智能模块,智能模块的内部高度集成了整流模块、逆变模块、各种传感器、保护电路及驱动电路。如西门子公司生产的BSM50GD120等,模块的典型开关频率为20kHz,在发生欠电压、过电压、过电流及过热故障时,保护电路动作并输出故障信号。

逆变电路中都设置有续流电路,续流电路的功能是当频率下降时,异步电动机的同步转速也随之下降,为异步电动机的再生电能反馈至直流电路提供通道。在逆变过程中,为寄生电感释放能量提供通道。另外,当位于同一桥臂上的两个开关,同时处于开通状态时将会出现短路现象,并损坏换流器件。所以在实际的通用变频器中还设有缓冲电路等各种相应的辅助电路,以保证电路的正常工作和在发生意外情况时,对换流器件进行保护。

(4) 制动回路。异步电动机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的电容器中,使直流环节电压升高。一般说来,由机械系统(含电动机)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。

二、变频器控制电路构成

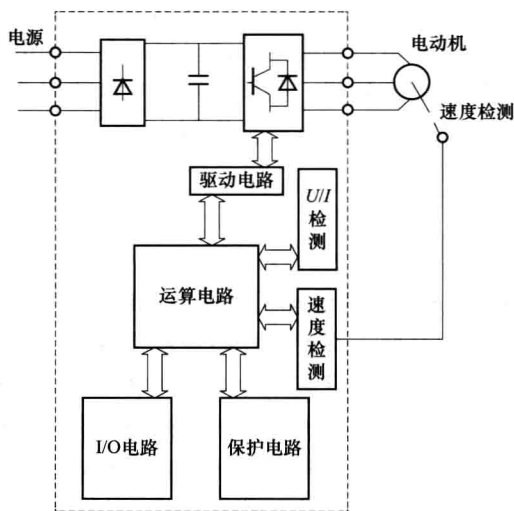


图 1-4 变频器控制电路

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 1-4 所示,它将信号传送给整流电路、平波电路和逆变电路,同时它也接收来自这些电路的信号。其主要由驱动电路、控制电路、保护电路等组成,其主要功能如下。

- 1) 利用驱动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。

(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,电动机的速度检测电路,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、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。驱动电路由隔离放大电路、驱动放大电路和驱动电源电路组成，三个上桥臂驱动电路由三个独立驱动电源供电，三个下桥臂驱动电路是一个公共的驱动电源供电。驱动电路是将主控电路中 CPU 产生的六个 PWM 信号，经光电隔离和放大后，为逆变电路的换流器件（逆变模块）提供驱动信号。对驱动电路的要求，因换流器件的不同而异。同时，一些开发商开发了许多适宜各种换流器件的专用驱动模块。有些型号的变频器直接采用专用驱动模块。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进行控制的。

4) 输入输出电路。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，其功能是为了使变频器更好地实现人机交互。

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，将检测到的电动机速度信号进行处理和转换，送入运算回路，可使电动机按指令给定的速度运转。

6) 主控板上的通信电路。当变频器由可编程（PLC）或上位计算机、人机界面等进行控制时，必须通过通信接口相互传递信号。变频器的通信接口通常采用两线制的 RS485 接口，两线分别用于传递和接收信号，这两种信号在传递或接收之前都要经过缓冲器（A1701、75176B 等集成电路），以保证良好的通信效果。所以，变频器主控板上的通信接口电路主要是指这部分电路，还有信号的抗干扰电路。

7) 外部控制电路。变频器外部控制电路主要是指频率设定电压（电流）输入、正转、反转、点动、停止运行控制、多挡转速控制等。频率设定电压（电流）输入信号通过变频器内的 A/D 转换电路输入至 CPU。其他一些控制信号通过变频器内输入电路的光耦隔离输入至 CPU 中。

(2) 开关电源电路。开关电源输入端的直流高压 P 端加到高频脉冲变压器一次侧，开关调整管串接在脉冲变压器另一个一次侧后，再接到直流高压 N 端。开关管周期性地导通、截止，使一次直流电压变换为矩形波。由脉冲变压器耦合到二次侧，再经整流滤波后，获得相应的直流输出电压。并对输出电压取样比较，去控制脉冲调宽电路，以改变脉冲宽度的方式，使输出电压稳定。开关电源的负载为操作面板、主控板、驱动电路及风机等电路。

(3) 保护电路。当变频器出现异常时，为了使变频器因异常造成的损失减少到最小，甚至减少到零，变频器都设有保护电路。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，当发生过载或过电压等异常时，为了防止变频器的逆变电路器件和负载损坏，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、负载（异步电动机）保护和其他保护，保护功能见表 1-2。

表 1-2 保护功能

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	异步电动机保护	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

变频器的保护功能如下。

1) 瞬时过电流保护。在变频器的逆变器负载侧发生短路时, 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运行。当整流器的输出电压达到异常值, 也同样停止逆变器运行。

2) 过载保护。在变频器的逆变器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运行。过载保护具有反时限特性, 通常采用热继电器或者电子热保护(由电子电路构成)。

3) 再生过电压保护。变频调速系统在电动机快速减速时, 由于再生功率使变频器的直流电路电压升高, 有时会超过容许值。对此, 可采取停止逆变器运行或停止快速减速的方法, 以防止变频器过电压。

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。但瞬时停电时间如果达数 10ms 以上时, 通常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, 在发生瞬时停电后使变频器逆变器停止运行。

5) 接地过电流保护。在变频器的负载接地时, 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。有冷却风机的变频器, 当风机异常时变频器内温度将上升, 因此采用风机热继电器或功率器件散热片温度传感器, 检出异常后停止变频器逆变器运行。

7) 防止失速过电流。变频调速系统在急加速时, 如果异步电动跟踪迟缓, 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。对于恒速运行中的过电流, 有时也进行同样的方法控制。

8) 防止失速再生过电压。变频调速系统在减速时, 产生的再生能量将使主电路的直流电压上升, 为了防止再生过电压, 则过电压电路保护动作, 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。

负载保护的功能如下。

1) 过载保护。负载过载检出单元与变频器的逆变器过载保护共用, 但考虑变频调速系统电动机在低速运转时过热, 在异步电动机内埋入温度传感器, 或者利用设置在逆变器内的电子热保护来检出电动机的过热。当电动机过载保护动作频繁时, 可以考虑减轻电动机负载、增加电动机及变频器容量等。

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动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。

1.1.3 变频器控制方式及分类

一、变频器控制方式

在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。低压通用变频器的输出电压在 380~650V, 输出功率在 0.75~400kW, 工作频率在 0~400Hz, 它的主电路都采用交-直-交电路。其控制方式如下。

(1) 以 $U/f=C$ 的正弦脉宽调制 (SPWM) 控制方式。 U/f 控制是为了得到理想的转矩-速度特性, 是基于在改变电源频率进行调速的同时, 又要保证电动机的磁通不变的思想提出的, 通用型变频器基本上都采用这种控制方式。但采用这种控制方式(开环控制方式)

的变频器不能达到较高的控制性能,而且,在低频时必须进行转矩补偿,以改变低频转矩特性。

以 $U/f=C$ 的正弦脉宽调制 (SPWM) 控制方式的特点是:控制电路结构简单、成本较低,机械特性硬度也较好,能够满足一般传动系统的平滑调速要求。这种控制方式在低频时,由于输出电压较低,受定子电阻压降的影响比较显著,故造成输出最大转矩减小。另外,其机械特性没有直流电动机硬,动态转矩性能和静态调速性能都不理想,以 $U/f=C$ 控制的系统性能不高、控制曲线会随负载的变化而变化,转矩响应慢、电动机转矩利用率不高,低速时因定子电阻和逆变器死区效应的存在而性能下降,使系统的稳定性变差。

(2) 矢量控制 (磁场定向法)。矢量控制 (又称 VC 控制) 变频调速的方法是:将异步电动机在三相坐标系下的定子交流电流 I_a 、 I_b 、 I_c 通过三相-两相变换,等效成两相静止坐标系下的交流电流 I_{a1} 、 I_{b1} ,再通过按转子磁场定向旋转变换,等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_{m1} 、 I_{t1} (I_{m1} 相当于直流电动机的励磁电流; I_{t1} 相当于直流电动机与转矩成正比的电枢电流),然后模仿直流电动机的控制方法,求得直流电动机的控制量,经过相应的坐标反变换,实现对异步电动机的控制。

矢量控制的实质是将交流电动机等效为直流电动机,分别对速度、磁场两个分量进行独立控制。通过控制转子磁链及转子磁通定向,然后分解定子电流而获得转矩和磁场两个分量,经坐标变换实现正交或解耦控制。矢量控制方法的提出具有划时代的意义,然而在实际应用中,由于转子磁链难以准确观测,系统特性受电动机参数的影响较大,且在等效直流电动机控制过程中,所用矢量旋转变换较复杂,使得实际的控制效果难以达到理想分析的结果。

矢量控制方式有基于转差频率控制的矢量控制方式、无速度传感器矢量控制方式和有速度传感器的矢量控制方式等。基于转差频率的矢量控制方式与转差频率控制方式两者的主要区别是:基于转差频率的矢量控制要经过坐标变换对电动机定子电流的相位进行控制,使之满足一定的条件,以消除转矩电流过渡过程中的波动。因此,基于转差频率的矢量控制方式比转差频率控制方式在输出特性方面能得到很大的改善。但是,这种控制方式属于闭环控制方式,需要在电动机上安装速度传感器,因此,应用范围受到限制。

无速度传感器矢量控制是通过坐标变换处理,分别对励磁电流和转矩电流进行控制,然后通过控制电动机定子绕组上的电压、电流辨识转速以达到控制励磁电流和转矩电流的目的。这种控制方式调速范围宽,启动转矩大,工作可靠,操作方便,但计算比较复杂,一般需要专门的处理器来进行计算,因此,实时性不是太理想,控制精度受到计算精度的影响。

采用矢量控制方式的通用变频器不仅可在调速范围上与直流电动机相匹配,而且可以控制异步电动机产生的转矩。由于矢量控制方式所依据的是准确的被控异步电动机的参数,有的通用变频器在使用时需要准确地输入异步电动机的参数,有的通用变频器需要使用速度传感器和编码器。目前新型矢量控制通用变频器中已经具备异步电动机参数自动检测、自动辨识、自适应功能,带有这种功能的通用变频器在驱动异步电动机进行正常运转之前,可以自动地对异步电动机的参数进行辨识,并根据辨识结果调整控制算法中的有关参数,从而对普通的异步电动机进行有效的矢量控制。

(3) 直接转矩控制 (DTC 控制)。直接转矩控制的思路是把电动机和逆变器看成一个整体,采用空间电压矢量分析方法在定子坐标系进行磁通、转矩计算,通过跟踪 PWM 逆变器

的开关状态直接控制转矩。因此,无需对定子电流进行解耦,免去矢量变换的复杂计算,控制结构简单。该技术在很大程度上解决了矢量控制的不足,并以新颖的控制思想、简洁明了的系统结构、优良的动静态性能得到了迅速发展。

直接转矩控制技术是利用空间矢量、定子磁场定向的分析方法,直接在定子坐标系下分析异步电动机的数学模型,计算与控制异步电动机的磁链和转矩,采用离散的两点式调节器(Band-Band 控制),把转矩检测值与转矩给定值作比较,使转矩波动限制在一定的误差范围内,误差的大小由频率调节器来控制,并产生 PWM 脉宽调制信号,直接对逆变器的开关状态进行控制,以获得高动态性能的转矩输出。它的控制效果不取决于异步电动机的数学模型是否能够简化,而是取决于转矩的实际状况,它不需要将交流电动机与直流电动机作比较、等效、转化,即不需要模仿直流电动机的控制,由于它省掉了矢量控制方式的坐标变换、计算和解耦,简化异步电动机数学模型,没有通用的 PWM 脉宽调制信号发生器,所以它的控制结构简单、控制信号处理的物理概念明确、系统的转矩响应迅速且无超调,是一种具有高静、动态性能的交流调速控制方式。即使在开环的状态下,也能输出 100% 的额定转矩,对于多拖动系统具有负荷平衡功能。

(4) 矩阵式交-交方式。VVVF 变频、矢量控制变频、直接转矩控制变频都是交-直-交变频控制方式中的一种,其共同缺点是输入功率因数低,谐波电流大,直流回路需要大的储能电容,再生能量又不能反馈回电网,即不能进行四象限运行。为此,矩阵式交-交变频方式应运而生。由于矩阵式交-交变频方式省去了中间直流环节,从而省去了体积大、价格贵的电解电容。它能实现功率因数为 1,输入电流为正弦且能四象限运行,系统的功率密度大。该技术目前虽尚未成熟,但仍吸引着众多的学者深入研究。其实质不是间接地控制电流、磁链等量,而是把转矩直接作为被控制量来实现的。其实现的具体方法如下。

1) 引入定子磁链观测器,实现无速度传感器方式。

2) 依靠精确的电动机数学模型,对电动机参数自动识别。

3) 依据定子阻抗、互感、磁饱和、惯量等参数计算出实际的转矩、定子磁链、转子速度进行实时控制。

4) 按磁链和转矩的 Band-Band 控制方式产生 PWM 信号,对逆变器开关状态进行控制。

矩阵式交-交方式具有快速的转矩响应 ($<2\text{ms}$), 很高的速度精度 ($\pm 2\%$, 无 PC 反馈), 高转矩精度 ($<+3\%$)。具有较高的启动转矩,尤其在低速时 (包括 0 速度时), 可输出 $150\% \sim 200\%$ 转矩。限制矩阵式变频器实际应用的问题如下。

1) 功率器件数量大,装置结构复杂。

2) 需要解决双向开关的安全换流问题。

3) 当输出电压必须接近正弦波时,理论上最大输出输入电压比只有 0.866。

20 世纪 90 年代开发出几种智能换流技术 (二步换流、四步换流等), 使第 2) 项问题得到了解决。现有的一些控制方案已能实现更高的电压比, 使第 3) 项问题也得到了解决。在应用上最大的进展是 2000 年以后出现的功率模块 (一相模块 “3in1”、4kW 的矩阵式功率模块), 它们克服了矩阵式变频器最大的缺点。

(5) 最优控制。最优控制是基于最优控制理论,对某一个控制要求进行个别参数的最优化。在实际的应用中,控制系统根据要求的不同而有所不同,例如在高压变频器中,就成功地采用了时间分段控制和相位平移控制两种策略,以实现一定条件下的电压最优波形。