

<http://www.phei.com.cn>

自动控制技术应用丛书

中高压 变频器 应用技术

张选正 顾红兵 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

自动控制技术应用丛书

中高压变频器应用技术

张选正 顾红兵 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述中高压电动机选用变频器时应着重考虑的若干问题,包括设备的类型及变频器使用的目的;变频器的分类;主电路拓扑结构、控制方式、各种功率模块特性;谐波的产生及抑制、谐波的标准;系统的可靠性;变频器在水泵、风机中的应用及案例;内馈调速系统的各种电路原理、特性、应用场合;国内常见的各种软起动装置,如SCR软起动装置、液阻软起动装置、磁控软起动装置、无刷软起动装置、微功率智能减压起动装置、开关变压器式软起动装置等,以供读者在使用、选型时参考。

本书可供电气自动化领域的专业技术人员、研究人员及大专院校相关专业师生阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

中高压变频器应用技术/张选正,顾红兵编著. —北京:电子工业出版社,2007.6

(自动控制技术应用丛书)

ISBN 978-7-121-04518-9

I. 现… II. ①张… ②顾… III. 电动机—变频器 IV. TM344.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第077024号

责任编辑:刘海艳(lhy@phei.com.cn)

印 刷: 北京市铁成印刷厂
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 14 字数: 249千字

印 次: 2007年6月第1次印刷

印 数: 5000册 定价: 25.00元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

中高压电动机是指额定电压为 1~10kV,额定功率为 500~5000kW 或更大的电动机,它普遍应用在重要行业的设备上。例如,电力、冶金、石油、化工、钢铁、煤炭、造纸、建材、采矿、海上石油钻井,以及排灌站、市政供水、排污等行业的中大型风机、水泵、油泵、各种压缩机等,是国家重点节能项目。

按不同的使用要求,中高压电动机的选用方案大致有以下三种:

(1) 工艺要求调速,并要实现节能。这时选用中高压变频器比较合适。

(2) 对风机、水泵、压缩机要求调速,并要节能,但调速比小于或等于 2.5,精度要求不高。当然,这时可选用中高压变频器,但价格昂贵,且变频器功能未能充分利用,故应选用内馈调速装置,做到既经济又合理。

(3) 工艺不要求调速及节能,只要解决启动时大电流冲击造成的系统电网压降的问题,不影响其他设备的正常使用。这时显然(1)、(2)两种方案都不经济,可选用中高压智能软起动器、液阻软起动器、磁控软起动器、无刷自控电动机软起动器、开关变压器式软起动器,以及微功耗智能减压起动器的方案。

本书主要针对上述三种中高压电动机所带动的负载性质及使用要求的不同,以全面、系统、实用为出发点编著的。全书共分 5 章:第 1 章介绍中高压变频器应用综合情况;第 2 章介绍中高压电动机变频调速基础;第 3 章介绍中高压电动机变频调速的应用;第 4 章介绍中高压电动机的内馈调速系统;第 5 章介绍中高压电动机的软起动装置。

参加本书部分章节编写的人员还有马小亮、胡纲衡、屈维谦、唐瑞球、徐东法、崔力、翟佑华。本书由胡慎敏教授任主审。

为了给行业中的技术人员奉献一本内容全面、系统、实用的中高压变频器书籍,书中部分内容引用了其他作者的文章,但是因各种原因未能取得联系,在此表示感谢。

本书可供电气自动化领域的工程技术人员、研究人员及大专院校相关专业的师

生阅读,也可供需对中高压电动机采用变频调速和控制技术的单位使用。若要了解中高压电动机使用变频调速技术的全面知识并提高水平,本书则是一本较为实用的参考资料。

由于时间仓促,人手及资料有限,书中疏漏与错误在所难免,敬请读者批评、指正。

编 者

目 录

第 1 章 中高压变频器应用综合情况	1
1.1 中高压变频器介绍	1
1.1.1 常用中高压变频器的分类	2
1.1.2 中高压变频器的特点	3
1.1.3 中高压变频器的技术要求	6
1.1.4 中高压变频器的适用场合	8
1.2 国内市场行情分析	9
1.3 国内需求潜力分析	10
1.4 中高压绿色变频器	12
第 2 章 中高压电动机变频调速基础	14
2.1 中高压变频调速技术	14
2.1.1 概述	14
2.1.2 功率开关器件	15
2.1.3 中高压变频器的主电路拓扑结构	16
2.2 中高压变频器传动系统的构成	22
2.2.1 标准中高压变频的传动系统	23
2.2.2 带输出变压器的变频传动线路	24
2.2.3 中高压变频器的多重化结构	25
2.2.4 中高压变频器的切换	26
2.3 中高压变频器的谐波	28
2.3.1 谐波对供电电源的影响	28
2.3.2 IEEE 519 简介	29

2.3.3	我国关于限制电网波形畸变的规定	31
2.3.4	谐波对电动机及传动负载的影响	31
2.3.5	降低中高压变频器波形畸变的措施	32
2.3.6	中高压变频器的谐波有关问题	33
2.3.7	共模干扰及差模干扰	44
2.4	中高压变频器的典型电路	45
2.4.1	SCR 电流型变频器	45
2.4.2	GTO 电流型变频器	47
2.4.3	IGBT 电压型 PWM 变频器	48
2.4.4	三电平 PWM 电压型变频器	52
2.4.5	二电平 IGBT 直接串联高-高型变频器	55
2.5	中高压变频器的控制方式	57
2.5.1	U/f 控制方式	57
2.5.2	矢量控制方式(VC)	59
2.5.3	直接转矩控制(DTC)	61
2.5.4	直接速度控制(DSC)	64
2.5.5	小结	65
第 3 章	中高压电动机变频调速的应用	66
3.1	中高压变频调速系统的设计	66
3.1.1	确定传动系统的功率	66
3.1.2	变频调速系统线路的设计	70
3.2	中高压变频器的可靠性	75
3.2.1	主电路拓扑结构	76
3.2.2	功率器件性能	79
3.2.3	可靠性冗余	80
3.2.4	可维护性和环境条件	83
3.3	中高压变频调速传动合理选型问题	86
3.3.1	概述	86
3.3.2	选型的经济合理性	86
3.3.3	变频传动选型中的技术性能评价问题及依据标准	89

3.3.4	低压变频器用于中功率传动的可行性	90
3.3.5	2.3kV 中压变频器用于中功率电动机变频传动的方案比较	93
3.4	中高压变频器在风机中的应用	97
3.4.1	风机的工作特性	97
3.4.2	负载特性和工作点	99
3.4.3	变频调速为什么能够节能	100
3.4.4	经济效益分析	102
3.5	中高压变频器在泵类负载中的应用	106
3.5.1	泵的调速节能原理	106
3.5.2	泵站出口压头控制	109
3.5.3	多泵并联运行	111
3.5.4	建设高效节能型泵站	112
3.6	中高压变频器在同步电动机中的应用	115
3.6.1	电流型变频器用于大型风机的起动	116
3.6.2	电压型 PWM 变频装置在同步电动机调速中的应用	119
3.7	中高压变频器在工业中的应用	122
3.7.1	在冶金、钢铁行业的应用	122
3.7.2	在石油化工行业的应用	122
3.7.3	在电厂锅炉行业的应用	123
3.7.4	在给排水行业的应用	124
3.7.5	在采矿业的应用	125
3.7.6	在煤炭建材行业的应用	125
3.8	中高压变频器在自来水厂应用案例分析	126
3.8.1	概况介绍	126
3.8.2	系统介绍	126
3.8.3	中高压变频器选用	127
3.8.4	佳灵 GY 系列中高压变频器选型	132
3.8.5	各种高压变频器性能比较	132
第 4 章	中高压电动机的内馈调速系统	134
4.1	内馈调速系统的方式及性能	134

4.1.1	转变频内馈调速	134
4.1.2	串级和斩波内馈调速	139
4.2	中高压斩波内馈调速及其在电厂的应用	151
4.2.1	概述	151
4.2.2	斩波内馈调速在聊城电厂的应用	153
4.3	高压斩波调速器	160
4.3.1	高压斩波调速器介绍	160
4.3.2	高压斩波调速器的特点	161
第 5 章	中高压电动机的软起动装置	163
5.1	交流电动机起动的有关问题	163
5.1.1	概述	163
5.1.2	软起动器有关技术	167
5.2	高压液阻软起动器	174
5.2.1	高压液阻软起动器工作原理	174
5.2.2	SYSR1 型高压软起动器的主电路方案	175
5.2.3	高压三相绕线转子电动机的主电路方案	177
5.2.4	电极板控制方式	178
5.2.5	产品特点	180
5.2.6	目前国内已经成功使用的单位	180
5.3	高压磁控软起动器介绍	181
5.3.1	概述	181
5.3.2	RQD—D7 型磁控软起动装置	183
5.4	无刷自控电动机软起动器	186
5.4.1	概述	186
5.4.2	WZR 无刷自控电动机软起动器	191
5.4.3	WZQ 无刷自控电动机软起动器	192
5.4.4	WGH 微功耗智能电动机减压起动器	194
5.5	开关变压器式电动机软起动装置	197
5.6	各种软起动器的性能比较	198
附录 A	各种中高压软起动器的主要制造厂商	201

附录 B 国产中高压变频器主要制造商	201
附录 C 成都佳灵公司 JLRQ 系列软起动器技术参数	202
附录 D 成都佳灵公司 JCS 系列中高压变频器的基本规格和主要参数	205
附录 E 成都佳灵公司 JCS 系列中高压变频器一览表	207
附录 F 成都佳灵公司 JCS 系列中高压变频器产品技术规范	208
参考文献	211

第 1 章

中高压变频器应用综合情况

1.1 中高压变频器介绍

按照国际惯例和有关标准,当供电电压小于 1kV 时称为低压,等于或大于 10kV 时称为高压。自然,电压在 1~10kV 之间就称为中压。因此电源电压和输出电压在上述范围的都是中压变频器,它用来驱动中压范围的交流电动机。但是,过去由于我国没有对电压范围为“中压”的电气设备做出明确的界定,大家习惯上都把额定电压为 6kV 或 3kV 的电动机和 10kV 的电动机一样,通称为“高压电动机”。把与之对应的驱动用变频器称为“高压变频器”,这样称呼对 10kV 的变频器来说是对的,但对低于 10kV 的变频器来说就不确切了,因此,这里采取“中高压变频器”的称呼。

中高压交流电动机的应用极为广泛,它是工矿企业中的主要动力,在冶金、钢铁、石油、化工、水处理等各行业的大、中型厂矿中,用于拖动风机、泵类、压缩机及各种大型机械。其 70% 以上都有调速的要求,但目前许多厂矿中,中高压交流电动机的调速和起动方法仍很落后,浪费了大量的能源,而且造成机械寿命的降低,致使设备的维修率居高不下。因此,推广应用中高压变频调速及变频起动装置的效益和潜力是非常巨大的。

由于电压高、功率大、技术复杂和投资较高等因素的限制,中高压变频器的产业化在 20 世纪 80 年代中期才开始形成,但随着大功率电力电子器件制造技术的迅速发展和巨大的市场推动力,其发展非常迅速,使用器件已经从 SCR、GTO、GTR 发展到 IGBT 和 IGCT 等,功率范围从几百千瓦到几十兆瓦,技术上已经成熟并不断提

高,可靠性得到保障,使用面越来越广。

1.1.1 常用中高压变频器的分类

中高压变频器通常按其主电路进行分类。随着新型大功率电力电子器件的性能不断改进,大容量中高压变频器仍处于不断发展之中,因此,它不像小功率变频器那样具有基本相同的主电路结构,而是随着使用场合和功率大小可以有不同方案的选择。目前常用的中高压变频器有以下一些类型:

按照变频过程中有无中间直流环节,中高压变频器分为交-交变频器和交-直-交变频器。

交-交变频器是把固定频率的电网交流输入直接变换为频率可调的交流输出功率。交-交变频器通常由三组反并联晶闸管及可逆桥式变流器组成,具有过载能力强、效率高、输出波形较好等优点,但存在着输出频率低(最高频率小于电网频率的 $1/3 \sim 1/2$)、使用功率器件多、输入无功功率大、高次谐波对电网影响大等缺点。交-交变频器可用于驱动同步电动机或异步电动机,在大型轧机的主传动中使用较多。

交-直-交变频器是先通过整流将电网输入的交流电变为直流电,然后再在交流电路中将直流转变为频率可调的交流输出。交-直-交变频器具有结构简单、输出频率变化范围大、功率因数高、谐波易于消除、可使用各种新型大功率器件等优点,因此应用面很广而且使用范围越来越大。

本书主要介绍交-直-交变频器。

常用的中高压变频器中所使用的交流大功率电力电子器件,有晶闸管(SCR)、门极关断(GTO)晶闸管、大功率晶体管(GTR)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和集成门极换流晶闸管(IGCT)等。因此,也常根据所使用的变流器件来称呼该变频器。

也可以根据中高压变频器的变频调速原理来划分变频器。目前实用的中高压变频器工作原理通常有如下几种:

第一种,脉幅调制方式(PAM方式)。使用SCR器件,在前端(输入端)可控整流回路中改变电压幅值、在后端(输出端)逆变回路中调节频率,通过保持 V/F 为常数的办法实现调频调速。通常称为脉幅调制方式(PAM方式)。这是比较早期开发

的中高压变频器,但目前仍在大容量或超大容量变频器(如大功率同步电动机的调速和软起动)中得到应用。

第二种,脉宽调制方式(PWM方式)。这是目前中小容量变频器中普遍使用的方式。由于脉宽调制方式(PWM方式)技术先进、性能优异、电路结构简单,而且可使用IGBT、GTO等先进半导体开关器件。所以,随着器件电压等级和电流导通能力的不断提高和新型器件的开发,PWM形式变频器的功率应用范围将不断增大,逐渐占据中高压变频器的主导地位。

此外,基于电压空间矢量菱形调制原理开发的三电平变频器,近来也得到迅速的发展。它实际上是PWM技术的进一步改进。

在交-直-交变频器中,按中间储能环节中使用电容还是电感,又分为电压(源)型变频器和电流(源)型变频器。

1.1.2 中高压变频器的特点

中高压变频器的特点用一句话来说,可以归结为:电压高、功率大、可靠性要求高,技术上更复杂。

1. 中高压变频器的功率范围

中高压变频器的驱动对象是中高压电动机,其功率一般都在200kW以上。由于大功率电力电子器件的容量和它的额定电压是互相联系的,即额定电压高的器件其容量相对也大。因此,如6kV额定电压的中高压变频器,其最小规格的输出功率至少也要400~600kW,再小的功率相当于“大马拉小车”,经济上不合算,许多厂家都不生产。过去,我国中高压电动机的标准长期只有一挡6kV的规格,这是在交流变频技术还没有应用之前制定的,随着中高压变频技术发展,已经很不适应。特别是200~600kW的电动机,其额定电压是6kV的话,就必须配6kV的变频器,经济上很不合算。如果是2.4kV的电动机配2.4kV的变频器,由于电压等级下降,价格就要便宜很多。在国外,早已有多种不同的中高压电动机和变频器标准,针对不同功率范围,以获得最佳的经济效益。表1-1列出了美国某公司变频器在各种规格下电压与功率的关系,供参考。

表 1-1 美国某公司变频器在各种规格下电压与功率的关系

型 号	额定电压(V)	功率范围(VA)	类 型
SIL. TL 400	380/400	200~1400	IGBT PWM 电压源型
SIL. TL 660	660/690	200~2400	IGBT PWM 电压源型
SIL. HL 2400	2400	400~4000	IGBT PWM 电压源型
SIL. HL 3300	3300	400~5000	IGBT PWM 电压源型
SIL. HL 4160	4160	400~6000	IGBT PWM 电压源型
SIL. HL 6000	6000/6900	500~7000	IGBT PWM 电压源型
SIL. S	2400~6000	1~225MW	SCR 电流源型
SIL. G3	2400~6000	3~10MW	GTO PWM 电压源型

2. 中高压变频器的可靠性

中高压变频器几乎都是工矿企业的关键设备,对其可靠性的高要求是不言而喻的。因此,可靠性的保证是中高压变频器能得到用户承认和推广应用的^{关键}。

可靠性的含义包括两个互相联系的概念:

- ① 部件和整机的可靠性,用平均无故障时间(MTBF)表示。
- ② 设备出现故障后能迅速维修的能力,用平均维修时间(MTTF)表示。

虽然没有正式的测试数据(正式数据需要长期的测试积累),一般认为,目前中高压变频器的可靠性已经达到 $MTBF > 100000h$ (约连续工作 10 年)、 $MTTF < 30min$ 的水平,而且还在不断提高。

中高压变频器的可靠性源于每个部件可靠性的最优化,其中主要包括功率单元、控制单元和冷却系统三部分。下面简要介绍一下,这些部件的可靠性是如何从系统设计的角度来保证的。

(1) 功率单元

功率单元的可靠性取决于大功率半导体器件,而大功率器件的主要指标是工作电压和结温。为了获得高可靠性,通常采用增加冗余度的办法。例如,一个标准的 6kV 装置,按一般要求只需 3 个 SCR 串联就可以了,但设计时采用 4 个 SCR

串联,使器件可耐受的峰值电压和实际电压峰值之间具有2:1的冗余。这样,即使串联中的一个器件损坏,剩下的3个SCR仍能保证设备正常运行而不至于停机。在工作的同时故障状态被诊断和显示出来,操作者可以等到适当的时候停机更换失效的大功率管。此方法同样适用于多个GTR并联或以功率单元形式进行串联的情况。

除了半导体功率器件外,其他比较容易损坏的器件,如大容量电容和耗能电阻等,也应考虑降额使用和冗余技术。

(2) 控制单元

由大量电子元器件组成的控制单元是中高压变频器的中枢,应采取各种措施提高其可靠性。例如:

① 使用最高可靠性级别(等级)的器件并降额使用。例如,美国军工级别No.883,意味着该器件可在环境温度 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ 下工作,每个器件都在温度 $+125^{\circ}\text{C}$ 时作100%的通电考验。

② 控制单元尽量不使用移动接触部件,如电位器,因为电位器容易接触不良,而且使用寿命低(比固定电阻低3~4个数量级)。

③ 控制单元应在整机调试前作连续通电168h,在整机调试后再通电168h以上,以确保装置的稳定性。

(3) 冷却系统

中高压变频器的冷却系统也是其重要的一环。一般500kW以上的中高压变频器的热损耗大约是其输出功率的2%左右(不包括变压器)。这些热量必须从装置中排出才能保证其温升不至于过高而影响正常运行。因此,中高压变频器的通风系统都经过精心设计,一般有强迫风冷和水冷两种方式。强迫风冷结构简单、便于维修。缺点是噪声大,冷却效果低,必须在控制室中配置足够大的通风及空调设备,将热风排至控制室之外。

当功率在1500kW以上时,应考虑采用水冷系统。先进的水冷系统带有双循环热交换器,内循环的水将变频器功率器件的热传导给空气,经由空气把热量排到控制室之外。

水冷式系统的优点是:

① 控制室只要求很小的空调设备,不干扰变频器工作;

- ② 双循环热交换器本身的功耗比等效风冷设备的功耗小得多;
- ③ 控制室基本无噪声,更为安静、清洁;
- ④ 如有条件的话,损耗的热能可以回收。

但水冷系统比较复杂,其本身的可靠性将对整个系统造成影响。解决办法是定期维修,在变频器不停止工作的情况下可更换去离子装置,密封泵 100% 冗余等。

必须指出,可靠性的保证是一门综合性的系统工程,它除了取决于设计和技术水平外,还与众多因素如可靠性的管理、可靠的生产工艺、试验测试、故障诊断、维修和售后服务都有着密切关系。一个中高压变频器产品的可靠性是所有这些因素综合作用的结果。或者说,中高压变频器生产对所有这些方面都提出了更高的要求。

1.1.3 中高压变频器的技术要求

中高压变频器除了应具备通用变频器所具有的基于拖动系统所要求的各项技术性能之外,由于其大功率的缘故,在一些低压小功率变频器中并不重要的问题,在这里却显得很重要,而且作为评价变频器的重要内容。其主要包括:

1. 与电网电压的关系

由于变频器功率较大,其功率可能占到电网容量的相当大的一部分,因此其开停机和运行可能对电源电压造成影响。这一方面要求电网供电线路有合理的设计,另一方面也希望变频器对电网电压的波动范围的容忍度大一些。

2. 谐波对电网的影响

同样因为大功率的关系,中高压变频器输入谐波畸变必须控制在标准规定的范围内,不应使电网中其他负载的正常工作造成影响。

3. 输入功率因素和系统效率

大功率电动机常常是工厂中的用电大户,其变频器的输入功率因数和效率将直接决定使用变频器系统的经济效益,效率低的变频器还存在散热等一系列麻烦。

4. 输出谐波成分

中高压变频器如果输出谐波成分过高,会造成电动机的过热,产生过大的噪声,影响电动机的寿命,而且电动机必须降额使用。

5. 共模电压和 du/dt 的影响

变频器的共模电压和 du/dt 会使电动机绝缘受到“疲劳”损害,影响到使用寿命,如果处理不好,还会损坏变频器本身。

有鉴于此,世界各著名中高压变频器制造商都不断努力,在元器件、电路结构、控制模式等方面下工夫,使中高压变频器的性能不断改进提高。

为提供读者参考,表 1-2 列出了美国 ROBINCON 公司“完美无谐波”系列中高压变频器的主要技术指标。该变频器能够较好地满足各种风机、水泵的驱动和控制要求。

表 1-2 ROBINCON 公司“完美无谐波”系列中高压变频器的主要技术指标

功率范围	400~7500kW(2300~7200V)
形式	多重化脉冲宽度调制
输入电压变化范围	额定功率下 +10%, -5% -30%时输出功率略有降低
功率因数	20%~100%负载下均能达到 0.95
效率	98.5%(包括变压器为 97%)
失电能力	可承受 5 个周期的电力丧失
调速范围	0~100%连续可调
输出频率	0~50Hz/60Hz,用户可选 120Hz
谐波成分	无需滤波器,可满足 IEEE519—1992 标准的要求
防护等级	空冷为 NEMA—1 水冷为 NEMA—12
环境温度	1~40℃,更高温度也可按用户要求提供
海拔	1000m,更高海拔也可按用户要求提供