

高压

GAOYA
DA GONGLÜ BIANPINQI JISHU
YUANLI YU YINGYONG

大功率变频器技术

原理与应用

北京利德华福电气技术有限公司 组编
倚 鹏 主编




 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高压

大功率变频器技术 原理与应用

GAOYA
DA GONGLV BIANPINQI JISHU
YUANLI YU YINGYONG



封面设计  张群胆设计工作室

ISBN 978-7-115-17020-0



9 787115 170200 >

ISBN 978-7-115-17020-0/TN

定价：32.00 元

人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn

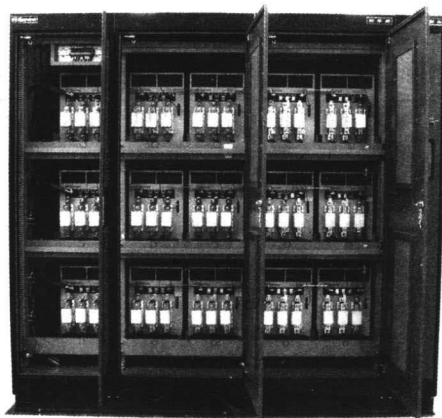
高压

大功率变频器技术

原理与应用

北京利德华福电气技术有限公司 组编

倚鹏 主编



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

高压大功率变频器技术原理与应用 / 倚鹏主编; 北京利德化福电气技术有限公司组编. —北京: 人民邮电出版社, 2008.2

ISBN 978-7-115-17020-0

I. 高… II. ①倚…②北… III. 大功率—变频器—基本知识 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 160785 号

内 容 提 要

本书从广大用户的需求出发, 介绍了高压变频器的工作原理、结构、控制方式、运行方式和高压变频器在不同应用场合的变频方案、应用效果, 以及高压变频器的常见故障处理、日常维护保养等内容, 重点介绍了用户最为关心的一些高压变频器的应用问题。

本书通俗易懂、图文并茂, 既可供大型工矿企业的设备选型、运行维护人员, 专业设计院的设备选型人员, 节能投资的服务人员等使用; 亦可作为大专院校、培训机构的参考资料。

高压大功率变频器技术原理与应用

- ◆ 组 编 北京利德华福电气技术有限公司
- 主 编 倚 鹏
- 责任编辑 张 伟
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
- ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 16
字数: 262 千字 2008 年 2 月第 1 版
印数: 1—5 000 册 2008 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-17020-0/TN

高压大功率变频器技术原理与应用

编写组

主 编：倚 鹏

编 委：（按姓氏笔画排名）

马永健 王晓夫 刘 军 刘军祥 朱燕华

宋海涛 吴新锋 辛绪武 赵 镇 郭建梅

覃正清

前 言

据《世界经济统计年鉴》和《中国统计年鉴》公布的数据测算，2005年发达国家每万美元国内生产总值（GDP）的耗能如下：瑞士为1.6t标煤，意大利为2.0t标煤，日本为2.3t标煤，德国、法国为2.7t标煤，英国为3.0t标煤，美国为4.8t标煤，而我国为18.5t标煤。造成这种结果的原因有两个：一是我国的能源消费结构不合理，其中产业的能源消费占78.3%，而发达国家仅占30%~40%；二是我国主要工业产品的能源单耗比世界先进水平高出30%~90%。大量的能源消耗既造成了经济上的极大浪费，同时也因严重的环境污染而造成了极大的社会问题。节能减排已成为摆在我国面前亟待解决的实际问题，同时也成为了政府当前的重要工作之一。

根据国家有关部门的调查统计，我国发电量的50%以上用于推动电动机做功，其中90%的电动机是交流电动机，大部分能源消耗于400~40000kW、3~10kV的大功率高压交流电动机。这类高压电动机被广泛用于电力、冶金、钢铁、石化、煤矿等大、中型企业，拖动风机、泵类、压缩机等各种负载设备，而且大多数采用直接恒速拖动，每年都会造成大量的能源浪费。此类负载工况变化较大，如采用交流调速技术实现变速运行，节能效果明显。高压变频器作为高压电动机调速的主要手段，已被广大用户所认可，同时也被政府作为实施节能减排的手段之一而进行了积极的推广。

通用型的高压变频器从20世纪90年代中期逐步开始在我国应用，几乎与世界同步，当时的产品主要依赖于进口；从20世纪90年代后期开始，已有国产的高压变频器产品投入使用。北京利德华福电气技术有限公司自1998年成立之日起，就瞄准了高压变频器这一新兴的高科技产品，公司依托清华大学国家重点实验室的一流技术基础，经过多年的科研投入，从第一台1000kW/6kV高压大功率变频调速系统（HARSVERT-A06/130）问世至2007年5600kW/10kV高压变频器以及矢量控制变频器投入运行，公司开发出了一系列高压变频器，至此，利德华福公司的产品不但能够适应一般风机、水泵类负载设备的调速要求，而且可以解决风机、水泵以外的负载高性能调速的需要，并且在解决大功率产品的技术难题上已经游刃有余。截至2007年6月底，利德华福公司高压变频器的销售业绩已经突破了1000台，市场占有率达到了30%，

且连续四年取得国内市场高压变频器销量第一，得到了变频器业内人士的广泛认可。

长期以来，利德华福公司的专业技术人员在与用户沟通的过程中，了解到了用户亟待解决的一些高压变频器问题，我们认为非常有必要将这些问题进行集中的讲解，以便于广大用户能够了解、认识高压变频器，在生产实际中更好地使用高压变频器产品，充分发挥它的独特功用，为国家的节能减排工作做出较大的贡献。目前关于高压变频器的理论文章虽然很多，但是比较零散，不利于用户全面了解高压变频器这种产品的特点。为此，我们根据自己多年从事高压变频器研究的理论成果、生产实践以及产品在用户现场的实际应用经验，用深入浅出的方法，从用户的角度出发，对高压变频器的一些基本原理、应用领域、使用和维护的方法、故障处理的措施等进行了讲解。我们衷心希望这本书能为广大的高压变频器用户、业内专业技术人员提供有效的帮助，同时也为高压变频器的进一步推广应用做出有益的工作。

全书共分为 11 章。第 1 章从高压变频器的发展开始讲起，介绍了高压变频器的工作原理、电路构成和分类方式，重点向广大读者介绍了市场上应用较为广泛的三种高压变频器产品以及高压变频器在生产实际中的功用。第 2 章主要介绍了高压变频器中常用的几种电力电子器件的特性，以便于读者更好地了解高压变频器的产品性能。第 3 章介绍的是高压变频器的控制方式，不同的控制方式适应于不同的负载设备，便于用户根据自己的负载设备和工艺要求，更好地进行产品的选型。第 4 章介绍的是高压变频器的运行方式，有助于用户了解高压变频器的性能，选择适合于自己现场工艺的变频器运行方式。第 5 章介绍的是高压变频器的运行象限和能量回馈控制的问题，向用户展示了高压变频器发展的新技术。第 6 章为全书的重点，用户关心的高压变频器的一些问题，以及该产品在实际应用中需要注意的问题，都在此章进行了一一的阐述。第 7 章通过高压变频器在用户现场的应用实例，向用户展示了高压变频器的应用效果，并且针对电力、冶金、石化、市政等不同行业负载设备的特点，提供了不同的变频参考方案。第 8 章介绍了高压变频器上常见故障发生的原因和处理方法，为用户的现场检修提供了一定的理论依据。第 9 章介绍了高压变频器的维护保养方法，便于用户对这种产品进行科学的保养。第 10 章介绍了高压变频器的相关标准。第 11 章介绍了各类高压电动机调速方式的种类及其特点，以便于广大的用户能真正优选到适合自己设备的高压电动机调速装置。总之，读者无论是遇到产品的选型问题、运行方式的选择问题，还是故障维修问题、维护保养问题，

以及想了解、认识高压变频器这种产品的诸多问题，都能从本书中找到答案。

本书凝聚了利德华福公司技术研发人员的心血。第1章由覃正清、刘军编写，第2章由宋海涛编写，第3章由刘军祥编写，第4章由马永健编写，第5章由马永健、王晓夫编写，第6章由倚鹏、辛绪武编写，第7章由刘军祥、郭建梅编写，第8章由朱燕华编写，第9章由赵镇编写，第10章由吴新锋编写，第11章由覃正清编写。倚鹏制订了本书的编写大纲，并负责了全书的统一修改、审定工作。在此，向他们表示衷心的感谢。同时，借本书出版之际，衷心感谢多年来对利德华福产品提供支持的业内人士和利德华福产品的广大用户。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中内容难免有不当和错误之处，敬请有关专家和各位读者给予批评、指正。

主 编

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 高压变频器的发展	1
1.2 高压变频器的工作原理、电路构成及分类	4
1.2.1 工作原理	4
1.2.2 电路构成	5
1.2.3 分类	6
1.3 常见的高压变频器产品	14
1.3.1 两电平电流源型高压变频器	14
1.3.2 三电平电压源型高压变频器	19
1.3.3 单元串联多电平高压变频器	22
1.4 高压变频器的功用	28
第 2 章 应用于高压变频器的电力电子器件	35
2.1 功率二极管	35
2.1.1 功率二极管的结构和原理	35
2.1.2 动态特性	37
2.1.3 静态特性	37
2.1.4 参数指标	38
2.2 晶闸管 (SCR)	39
2.2.1 晶闸管的结构和原理	39
2.2.2 静态特性	41
2.2.3 动态特性	42
2.2.4 参数指标	43
2.3 门极关断 (GTO) 晶闸管	44

2.3.1	门极关断晶闸管的结构和原理	44
2.3.2	静态特性	46
2.3.3	动态特性	46
2.3.4	参数指标	48
2.4	集成门极换流晶闸管 (IGCT)	48
2.4.1	集成门极换流晶闸管结构和原理	49
2.4.2	静态特性	51
2.4.3	动态特性	52
2.4.4	参数指标	53
2.5	绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	53
2.5.1	绝缘栅双极型晶体管的结构和原理	53
2.5.2	静态特性	54
2.5.3	动态特性	55
2.5.4	参数指标	57
2.6	电子注入增强栅晶体管 (IEGT)	59
2.6.1	电子注入增强栅晶体管的结构和原理	59
2.6.2	静态特性	61
2.6.3	参数指标	61
第3章	变频器对交流电动机的控制方式	63
3.1	概述	63
3.2	异步电动机的 V/F 恒定控制 (恒压频比控制)	64
3.2.1	异步电动机稳态模型	64
3.2.2	转速开环的异步电动机 V/F 控制调速	66
3.2.3	电压-频率协调控制时的机械特性	68
3.3	异步电动机转差频率控制	69
3.3.1	转差频率控制的基本概念	69
3.3.2	转差频率控制的变压变频调速系统	70
3.4	异步电动机矢量控制基本原理	72
3.4.1	异步电动机数学模型与坐标变换	72

3.4.2	按转子磁链定向的动态数学模型	73
3.5	异步电动机直接转矩控制基本原理	74
3.5.1	空间电压矢量	74
3.5.2	按定子磁链定向的动态数学模型	75
3.5.3	按定子磁链定向的直接转矩控制	76
3.5.4	直接转矩控制与矢量控制的比较	78
3.6	无速度传感器控制	79
3.6.1	转子磁场定向矢量控制异步电动机磁链观测方法	79
3.6.2	滑差算法计算转子转速	80
3.7	同步电动机的控制	81
3.7.1	同步电动机的变频启动、停机与故障保护	81
3.7.2	同步电动机的VVVF控制	82
3.7.3	同步电动机的转子位置自动控制	82
3.7.4	同步电动机的负载换相控制	82
3.7.5	同步电动机的励磁电流自动调节	83
第4章	高压变频器的运行方式	84
4.1	频率给定开环运行	84
4.2	转速给定闭环运行	85
4.2.1	转速闭环VVVF控制	85
4.2.2	矢量控制与直接转矩控制	86
4.3	同轴多机转矩协调运行	86
4.4	物理量闭环运行	88
4.5	变频软启动运行	88
第5章	高压变频器的运行象限和能量回馈控制	90
5.1	高压变频器的运行象限	90
5.2	能量回馈产生的原理	91
5.2.1	能量回馈的基本原理	91
5.2.2	能量回馈变频器的圆图	92

5.3	两电平变频器的能量回馈方式	93
5.3.1	拓扑结构	93
5.3.2	控制算法	93
5.4	三电平变频器的能量回馈方式	95
5.4.1	拓扑结构	95
5.4.2	控制算法	95
5.5	单元串联多电平变频器的能量回馈方式	96
5.5.1	拓扑结构	96
5.5.2	控制算法	97
5.6	电流源型变频器的能量回馈方式	98
5.6.1	多脉冲整流控制算法	98
5.6.2	PWM 整流控制算法	99
第 6 章	高压变频器应用中的常见问题	100
6.1	PWM 技术	100
6.2	电网侧的谐波污染及其处理方式	101
6.3	高压变频器对电动机的要求	103
6.4	输出滤波器的设计	104
6.5	旁路设计	104
6.6	一拖二设计	105
6.7	共模电压的产生和防治	107
6.8	轴电流的产生和防治	107
6.9	应用于高压变频器的特殊变频电动机	108
6.10	高压变频器容量的选择方法	109
6.11	整流变压器的保护	110
6.12	高压变频器的元器件数目与可靠性的关系	112
6.13	旋转再启动功能的介绍	113
6.14	高压变频器与现场控制系统的连接方式	114
6.15	实现快速启动和减速制动的方法	115
6.16	功率单元故障时的处理方法	116

6.16.1 同级旁路技术	116
6.16.2 中性点漂移技术	117
6.17 高压变频器损耗的构成及散热方式	119
6.17.1 高压变频器损耗的构成	119
6.17.2 高压变频器的散热方式	120
第7章 高压变频器的典型应用领域	124
7.1 发电厂锅炉辅机的控制	124
7.1.1 送风机变频应用分析	124
7.1.2 引风机变频应用分析	127
7.1.3 一次风机变频应用分析	130
7.1.4 排粉风机变频应用分析	131
7.1.5 灰浆泵变频应用分析	132
7.2 冶金行业的典型应用	133
7.2.1 焦化厂煤气鼓风机的变频应用	134
7.2.2 高炉出铁口除尘风机变频应用	136
7.2.3 转炉除尘风机变频应用	138
7.2.4 电弧炉除尘风机变频应用	141
7.2.5 轧钢厂轧机变频应用	143
7.3 市政行业的水泵控制	146
7.3.1 水系的变频调速	147
7.3.2 取水泵的变频控制	149
7.3.3 供水泵的变频控制	151
7.4 石油石化行业的典型应用	155
7.4.1 在油田采矿行业中的应用	155
7.4.2 在石油化工行业中的应用	165
7.5 水泥行业的典型应用	168
7.6 煤矿行业的典型应用	171
7.6.1 在带式输送机上的应用	171
7.6.2 在矿井提升机上的应用	173

7.6.3	在高压排风机上的应用	174
7.6.4	在矿用排水泵上的应用	176
7.7	其他行业的典型应用	178
7.7.1	化工行业的典型应用	178
7.7.2	选煤行业的典型应用	181
7.8	高压大功率变频器应用领域的拓展——无功补偿、机车、船舶等的应用	182
第 8 章	高压变频器常见故障发生的原因和处理方法	183
8.1	光纤故障	183
8.2	过电压故障	184
8.2.1	过电压故障的危害	184
8.2.2	引起过电压故障的原因	185
8.2.3	避免过电压故障的方法	187
8.3	欠电压故障	188
8.3.1	欠电压故障的危害	189
8.3.2	引起欠电压故障的原因	189
8.3.3	欠电压故障的处理方法	189
8.4	缺相故障	191
8.5	过热故障	191
8.6	IGBT 驱动故障——功率器件的保护和故障分析	193
8.7	变压器故障	194
8.8	控制器故障	195
8.9	风机故障	196
8.10	其他故障	197
8.10.1	过电流故障	197
8.10.2	过载故障	199
8.10.3	参数设置不正确的故障	200
第 9 章	高压变频器的日常检查及维护	202

9.1 高压变频器稳定运行对环境方面的要求	202
9.1.1 电气环境要求	202
9.1.2 温度要求	204
9.1.3 湿度要求	204
9.1.4 防尘要求	205
9.1.5 防止鼠害及异物进入变频器	205
9.2 维护与检查需要注意的事项	205
9.3 日常检查的项目	206
9.4 定期检验的项目	207
9.5 高压变频器预防性维护与更换	209
第 10 章 高压变频器相关标准的介绍	212
10.1 谐波控制标准介绍	212
10.2 IEC 标准介绍	214
10.3 国家标准简介	215
第 11 章 高压电动机调速方式的种类及其特点	217
11.1 变极调速方式	218
11.2 交-交变频方式	219
11.3 串级调速方式	221
11.4 内反馈调速方式	224
11.5 斩波内馈调速方式	225
11.6 双馈调速方式	226
11.7 低压交-直-交变频方式	228
11.8 高-低方式	228
11.9 高-低-高方式	230
11.10 高-高电流源方式	230
11.11 IGBT 直接串联方式	232
11.12 三电平方式	233
11.13 三电平应用中的高-中-高方式和高-中方式	234

11.14 单元串联多电平方式	236
11.15 高压变频技术的变种	237
11.16 液力耦合器调速	238
参考文献	240

第 1 章 概 述

按国际标准 (IEC 60038: 1983) 和中国国家标准 (GB 156—2003) 的规定, 电压被分为 $<1\text{kV}$ 、 $1\sim 35\text{kV}$ 、 $35\sim 220\text{kV}$ 、 $>245\text{kV}$ 四个等级。在 $1\sim 35\text{kV}$ 电压段, 我国使用 3kV 、 6kV 、 10kV 和 35kV 四个标准电压。习惯上将 3kV 、 6kV 、 10kV 电动机称为高压电动机, 相应地, 将用于驱动该电压等级电动机的变频器通称为高压变频器。在欧美国家, 在此电压区段常见的标准电压有 3.3kV 、 6.6kV 、 11kV 、 4.16kV (该电压仅适用于北美洲) 等多种, 归属中压范畴, 相应电压等级的变频器一般称中压变频器, 这只是习惯上的差别。

高压变频器是应高压交流电动机无级调速的需要而诞生的, 它利用电力电子器件的通断作用将工频电源变换成为了另一种频率的电能控制装置, 直接供给高压电动机使用。高压变频器是迄今为止最理想的高压电动机的调速装置。

1.1 高压变频器的发展

高压变频器是随着大功率电力电子器件的迅速发展而发展起来的, 只要电力电子器件有了新的发展, 高压变频器就一定有个新飞跃。从主回路结构上来看, 高压变频器的发展可分为两个阶段。第一阶段是以晶闸管 (SCR) 作为主要电力电子器件的交-交型高压变频器产品; 第二阶段是广泛采用了双极性晶体管 (GTR)、绝缘栅双极性晶体管 (IGBT)、集成门极换流晶闸管 (IGCT) 等电力电子器件的交-直-交型高压变频器产品。

国外第一台高压变频器——交-交变频调速的异步电动机矢量控制系统, 由日本的东芝电器公司在 1980 年研制成功, 电动机容量为 1800kW 。将其投入到日本大同特钢公司星崎钢厂可逆轧机生产线上运行, 其良好的使用效果得到了高压变频行业的广泛关注。从此之后, 各类高压变频技术得到了积极的研究、应用和发展。在国外, 西门子、罗宾康、ABB 等国际知名的电气公司都加入了高压变频技术的研制、开发行列。