

高压变频器 对比分析

中国工控网 (www.gongkong.com)



高压变频器是国内外目前公认的最理想、最有前途的高压电机调速解决方案。它融合了电力电子、自动控制、微电子学、计算机技术、电机学等技术。随着现代电力电子、电气传动技术，尤其是变频调速技术的发展，作为大容量传动的高压变频调速技术近些年得到了飞速的发展。同低压变频器一样，高压变频器的应用目的主要有两种，一是提高工艺水平，二是节约能源。利用高压变频器可以实现高压电机无级调速，满足生产工艺过程对电机调速控制的要求，以提高产品的产量和质量；另外可大幅度节约能源，降低生产成本。电动机

是公认的耗电大户，其耗电量占整个国民经济用电量的60%以上，对它进行节能改造，潜力巨大。

目前我国国内所指的高压变频器，在国外通常称为中压变频器(Medium Voltage Drive)，实际上指的是同一产品，即对应负载电机的电压等级在1.14kV-13.8kV(1.1/2.3/3/4.2/6/10)的变频器。由于习惯的不同，导致了称谓的差异。高压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、大型厂矿中都有较多应用。高压变频器主要用于高压大功率电动机，一般功率为400kW-4000kW，以达

到所驱动机械设备的平滑无级调速，实现改善工艺过程，大幅度节约电能的目的。常见的驱动对象是风机、水泵，如钢铁工业中的高炉鼓风机、除尘风机；市政自来水供水泵和各种其他大型机械，见表1所示。目前很多电动机采用的传统调速和起动方法很落后，浪费了大量的能源且造成设备寿命降低。例如在很多领域，早期均采用电动机恒速运行，在需要进行调速的场合则通过调节机械阀门来满足需要。随着高压变频器技术的发展以及改造成本下降，高压变频器将会得到更加广泛的应用。

晶闸管的发明为交流调速技术的发展提供了手段，但一直到20世纪70年代高压交流变频调速技术才取得了一定的进展，1981年，Siemens公司研制成功4000kW初轧机交-交变频同步电动机系统，使大功率交流调速系统的高性能调速得以实现，1982年，Fuji公司开发出2500kW初轧机交-交变频同步电动机传动系统，虽然这些变频器还具有功率因数低、输出功率低、谐波高等不足之处，但促使各国纷纷投入人力、物力进行高压变频器的研发，加快了大规模应用的步伐。高压变频器

表1

应用领域	应用对象
电力工业	电厂锅炉辅机，如凝结水泵、送风机、一次风机、磨煤机、电动给水泵、引风机、射水机、高压交流油泵、凝升泵、排粉机、灰浆泵；风力发电、太阳能发电设备
钢铁工业	轧机主传动装置、卷绕机、剪切机传动装置、除尘风机
有色金属工业	传送带系统、摇筛机、挖掘机、研磨机
建筑材料工业	鼓风机、研磨机
化学工业	各类压缩机
煤炭工业	传送机械、矿井主扇风机、排水泵、提升机
石油天然气工业	输油泵、注水泵、潜油电泵
石油化学工业	循环水泵、加氢泵、压缩机
机电工业	泵、风扇、恒转矩传动装置
轻工业	离心传动装置、泵
交通运输	螺旋桨传动装置、船首推力器传动装置、横向推进器传动装置、电力牵引机车、动力车组交流传动、磁悬浮牵引列车

的大规模应用是90年代基于IGBT的大功率单元串联式多电平高压变频技术的研发开始的，经过10多年的发展，功率单元串联式多电平高压变频器产品已成功应用于大部分高压交流电动机传动领域，而且其市场销量成倍增长。

我国对高压交流变频调速的应用和研究相对来说要晚，80年代初开始宣传和推广。通过一些科研院所的努力，1993年，我国第一台高压交-交同步电动机调速产品问世，并应用到轧机传动中。到目前为止，国内产品已经在轧机和提升机交流调速领域占主要市场份额，而且我国基于IGBT的大功率单元串联式多电平高压变频技术的研发和世界同步进行，具有自主知识产权的第一台功率单元串联式多电平交-直-交电压源型高压变频器在1997年即进行了试运行，株洲机车车辆研究所研制的用于磁悬浮牵引的7500kW的高压变频器样机已经完成。在政府相关部门的支持下，我国变频器的生产厂商已经有10多家，年产值达数亿元。

虽然高压变频器得到了快速的发展，但是高压变频器的制造远远落后于社会的需求，从世界范围来看，也是这样。目前国际上只有为数不多的厂家有批量生产能力，发展的瓶颈在于功率器件耐压不够，这是制约高压变频器发展的主要因素。

高压电机调速方式的发展

上世纪80年代到90年代初，高压电机要实现调速，主要采用三种方式：

1. 液力耦合器方式：即在电机和负载之间串入一个液力耦合装置，通过液面的高低调节电机和负载之间耦合力的大小，实现负载的

速度调节，虽然该调速方式成本很低，但运行很不经济。液力耦合器调速属耗能型调速方式，有如下缺点：

1) 在调速过程中有滑差损耗，该损耗最大可达电机额定功率的15%；

2) 传动效率随转速下降而降低；

3) 故障时不能转换到全速运行。

2. 串级调速：串级调速必须采用绕线式异步电动机，将转子绕组的一部分能量通过整流、逆变再送回电网，这样相等于调节转子的内阻，从而改变了电动机的滑差。由于转子的电压和电网的电压一般不相等，所以向电网逆变需要一台变压器。为了节省这台变压器，现在国内市场应用中普遍采用内馈电机的形式，即在定子上再做一个三相的辅助绕组，专门接受转子的反馈能量，辅助绕组也参与做功，这样主绕组从电网吸收的能量就会减少，达到调速节能的目的。缺点是其谐波污染大、功率因数低、体积大，成本高。

3. 高一低方式或高一低一高方式：由于受过去高压变频技术发展的限制，一般采用一台变压器，先把电网电压降低，然后通过一台低压的变频器实现变频。对于电机，则有两种办法，一种是采用低压电机；另一种是采用高一低一高方式，继续采用原来的高压电机，需要在变频器和电机之间增加一台升压变压器，高低方式的主要优势在于成本较低，但维护不方便、功率因数低、体积大。

上述三种方式，发展到目前都是比较成熟的技术。液力耦合器和串级调速的调速精度都比较差、调速范

围较小、维护工作量大，液力耦合器的效率相比变频调速有一定的差距，所以这两种产品的市场竞争力逐步下降。在高压变频器未成熟并规模应用之前，液力耦合器在风机、水泵等调速节能方面曾有过较多的应用。随着高压变频调速技术的日益成熟和应用推广，液力耦合器将逐步退出风机、泵类调速节能的市场。对高低变频方式来说，虽能够达到比较好的调速效果，但是相比真正的高压变频器，还有效率低、谐波大、对电机的要求比较严格、功率较大时(500kW以上)可靠性较低等缺点。

20世纪90年代开始，交流变频调速技术在我国有了突飞猛进的发展，由于变频调速在频率范围、动态响应、低频转矩、转差补偿、功率因数、工作效率等方面是以往的交流调速方式无法比拟的，被国内外公认为最有发展前途的调速方式，因此在众多行业有广泛的应用，并且在节约能源、改善工艺、提高生产效率等方面发挥了巨大作用，取得了巨大经济效益。

当前，阻碍变频调速技术在高压大容量传动中推广应用的主要难题有两个：一是大功率电动机供电电压高(1.14kV-13.8kV)，而变频器开关器件的耐压水平较低，造成电压匹配上的难题；二是高压大容量变频调速技术含量高、难度大、成本也高，而一般风机、水泵等调速装置都要求低投入、高回报，从而造成经济效益上的难题。这两个难题阻碍了高压大容量变频调速技术的推广应用，因此如何解决高耐压和降低变频器的生产成本是当前世界各国的竞争热点。目前AB、ABB、Siemens Robicon等公司的高压变频器产品采用不同措施较成功地解决了高耐压、大容量这一难题。虽然采用的技术不尽相同，但归

纳起来主要有两种：一是采用多重化技术，二是采用新开发的高耐压功率器件。

1. 国产高压变频器的发展现状

在国内有大量的变频器厂商，大部分生产中小功率变频产品，从20世纪90年代中期发展至今，我国高压变频器生产企业已跃升至30多家，但仅有少数具备科研能力或资金实力的企业在市场上有所作为。利德华福、东方日立、合康亿盛、成都佳灵等企业脱颖而出，不过国内高压变频器市场仍需大量进口，这些状况主要表现在如下几个方面：

1) 具有研发能力和产业化规模的企业少。

2) 国产高压变频器的功率等级较低，多数不超过3500KW。

3) 国内高压变频器的技术标准还有待规范。

4) 与高压变频器相配套的产业还不发达。

5) 部分生产厂商生产工艺落后，勉强满足变频器产品的技术要求。

6) 变频器中使用的功率半导体、驱动电路、电解电容等关键器件基本完全依赖进口。

7) 国外各大品牌的产品正在加紧占领国内市场，并加快了本地化的步伐。

8) 与发达国家的技术差距在缩小，具有自主知识产权的产品正应用在国民经济中。

2. 国外高压变频器的发展现状

国外各大品牌的变频器生产商，基本形成了系列化的产品，其控制系统也已实现全数字化。几乎所有的产品都具有矢量控制功能，完善的工艺水平也是国外品牌的一大特点。其现阶段发展情况主要表现在如下几个方面：

1) 技术开发起步早，并具有相当大的产业化规模。

2) 能够提供特大功率的变频器，目前已超过10000KW。

3) 变频调速产品的技术标准比较完备。

4) 与变频器相关的配套产业及行业初具规模。

5) 能够生产变频器中的功率器件，如IGBT、IGCT、SGCT等。

6) 高压变频器在各个行业中被广泛应用，并取得了显著的经济效益。

7) 产品国际化，成立跨国公司，并逐步本地化生产。

8) 新技术，新工艺层出不穷，并被大量的、快速的应用于产品中。

3. 高压变频调速技术的应用场合

1) 工艺调速，提高过程控制水平
交流变频调速技术在最近几年有了很大的发展，特别是矢量控制技术的应用，使得交流电力拖动逐步具备了宽的调速范围、高的调速精度、快的动态响应以及四象限运行等良好的技术性能，在调速性能方面已可与直流拖动相媲美。在轧机、机床、造纸机、提升机、牵引机等传统上用直流电动机驱动的机械传动场合，化工、炼油工艺流程中传统上用机械阀门控制物料流量的场合，电厂许多需要精确控制流量、压力及液位的场合都需要采用变频器。例如，石家庄热电厂13号锅炉给粉机由滑差调速改为变频调速后，煤粉的供给更加均匀，锅炉的燃烧更加稳定。

2) 节能，降低生产成本

变频器用于节能目的主要是应用于风机、泵、压缩机等负载，例如火力发电厂中的各种动力设备中，风机、水泵类负载占绝大部分。由于各电厂调峰力度的加大，这些设备的负

荷变化范围很大，所以必须实时调节风机、水泵的流量。目前调节流量的方法多为节流阀调节，由于这种调节方法仅仅是改变了通道的通流阻抗，而驱动源的输出功率并没有改变，因此浪费了大量能源。三门峡电厂等许多发电企业在2000年之前就使用了高压变频器，大庆华能新华发电厂1997、1998年分别在4、5号灰浆泵400 kW电动机和5号炉2台1250 kW电动机上采用变频器，至今运行良好，每台变频器年节约资金在35万元以上。不过并非所有情况下安装变频器都能节约能源，要达到节能的目的，需要具备一定的条件。比如以前的旧机组选型时留有太大的余量，有“大马拉小车”现象。另一种情况是生产中需要可变的转速，如果不安装变频器，其工作功率只能保持一定。在这些情况下用高压变频器就能使电机只需达到必要的功率而不会多耗无用的功率，从而达到节能的目的。另外机械设备维护费用的降低、机械设备寿命的增长也为企业节约了成本

3) 软启动，保护高压电动机

采用高压变频器进行电机的软启动可以消除电压跌落、减轻冲击电流、延长设备使用寿命。直接起动的交流电机起动电流大(通常为5~7倍的额定电流)，采用高压变频器启动时，高压电动机的起动电流可限制在1.5倍电动机额定电流以下，同时为了提高高压变频器的利用率，常将一台变频器用于控制多台电动机的启动，使用切换线路来完成切换。例如在火力发电厂中，高压大容量交流异步电动机应用非常广泛，由于直接启动所造成的电动机烧毁和转子断条事故，屡屡发生，给主机设备的安全经济运行带来很大的威胁，因此大容量异步电动机采用高压变频软启动方

式，对于延长电动机使用寿命，减少对电网的冲击，保证正常生产是非常必要的。

高压变频技术在世界范围内的应用历史还不长，发展前景可以说是方兴未艾。作为科研领域的热门课题，不断有新的技术进步和应用成果出现，是少数在国内可以实现跨越式发展的领域。但高压变频器作为重要的工业装备，可靠性是压倒一切的，在低压变频调速完全成熟、并获得广泛应用之后，现在不少厂家正在跃跃欲试对中、高压电机采用变频调速，犹如过去推广应用低压变频调速的形势一样。

高压变频器对比分析

高压变频器是随着现代电力电子器件、电气传动技术的发展而逐步发展起来的一种高压电机调速产品，近年来，各种高压变频器不断出现，目前从世界范围来看，高压变频器不像低压变频器那样具有成熟、一致性的主电路拓扑结构，而是限于功率器件的电压耐量和高压使用条件的矛盾，国内外各变频器生产厂商，采用不同的功率器件和不同的主电路结构，以适应各种拖动设备的要求，因而在各项性能指标和适用范围上也各有差异。按照不同的分类方法，高压变频器大致分为：

1. 根据功率元件分：晶闸管SCR、大功率晶体管GTR、可关断晶闸管GTO、绝缘门双极晶体管IGBT、集成门控变流晶闸管IGCT、门极换流晶闸管SGCT；目前常用的高压变频器的使用器件已经从SCR、GTO、GTR逐步发展到IGBT、IGCT、IGET和SGCT。

2. 根据有无中间直流环节分：交-交变频器、交-直-交变频器。在交-直-交变频器中，按中间直流滤波

环节的不同，可分为电压源型和电流源型；交-直-交电压源型变频器根据拓扑结构分为：高一低一高式、器件串联两电平式、三电平式、功率单元串联多电平式等。

3. 根据控制方式分：晶闸管电容强制换相、晶闸管电感强制换相、GTO自关断、IGBT电压控制自关断、IGCT电流控制自关断等。

4. 根据驱动的电动机类型分：同步电动机高压变频调速、异步电动机高压变频调速。同步电动机高压变频调速系统常见的有负载换相式高压变频器和多电平式高压变频器；异步电动机变频调速系统根据异步电动机的类型及能量的处理方式，分为鼠笼型异步电动机高压变频调速、绕线转子异步电动机串级调速、绕线转子异步电动机双馈调速、内反馈式串级调速系统（后三种也有人称为转子变频技术）。

5. 根据控制策略分：标量控制型（压频比 U/f 控制）、矢量控制型。矢量控制型分为基于解耦控制的无速度传感器矢量控制和基于Bang-Bang控制的直接转矩控制

6. 根据控制系统分：模拟控制，数字工控机控制，数字FPGA控制，数字DSP控制。

7. 根据输出波形分：方波输出、PWM输出。

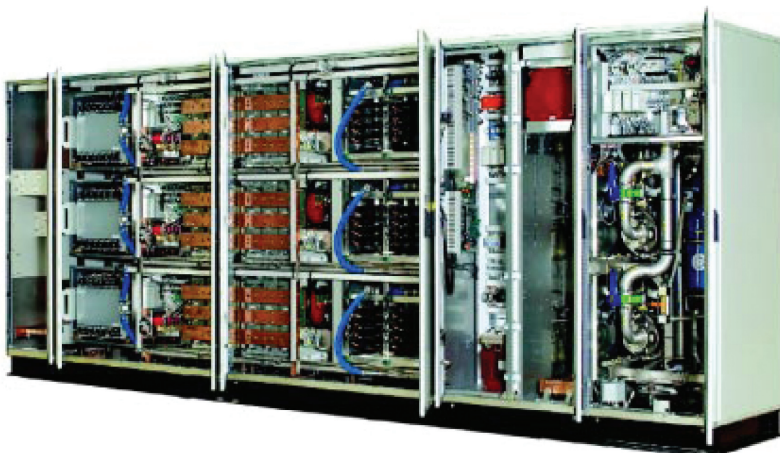
评价高压变频器的指标主要有：成本、可靠性、对电网的谐波污染、输入功率因数、输出谐波、共模电压、系统效率、能否四象限运行等。下面将对目前使用较为广泛的几种高压变频器进行分析，性能对比见附表1、附表2。

1. 交-交变频器

交-交变频器一般采用晶闸管实现，无直流环节，也叫周波换流器。当电压在3kV以下时，每相要用12只晶闸管，3相共36只；当电压超过3kV时，晶闸管必须串联使用，所用的晶闸管要成倍增加。其优点是可用于驱动同步和异步电机，堵转转矩和保持转矩大，动态过载能力强，可四象限运行，电机功率因数高，较好的低速性能，弱磁工作范围广，效率高。缺点是功率因数与速度有关，低速时功率因数低，最大输出频率为电源频率的 $1/n$ （ $n=2, 3, \dots$ ），最大转速 $<500r/m$ ，网侧谐波大。这种类型的变频器适用于轧钢机，船舶主传动和矿石粉碎机等低速转动设备。

2. 高一低一高型变频器

高-低-高型变频器采用变压器



实现输入降压，输出升压的方式，其实质上还是低压变频器，只不过从电网和电机两端来看是高压的，是受到功率器件电压等级的限制而采取的变通办法，缺点是需要输入输出变压器、存在中间低压环节、效率低、可靠性不高、占地面积大等，只用于一些小容量高压电机的简单调速。Siemens公司早期生产这种结构的变频器，目前已停止生产，仅提供备件。

3. 电流源型高压变频器

电流源型变频器(CSI)采用大电感作为中间直流滤波环节。整流电路一般采用晶闸管作为功率器件，少数采用GTO，采取电流PWM控制，以改善输入电流波形。逆变部分一般采用晶闸管或GTO、SGCT作为功率器件。

电流源型变频器种类较多，主要有串联二极管式，输出滤波器换相式，负载换相式和GTO-PWM式等。其中，前三种电流源型变频器的逆变功率器件都采用晶闸管，输出采用 120° 导通方式。GTO-PWM式电流源型变频器采用GTO作为功率器件，逆变器一般采取电流PWM控制方式。在系统控制方面一般应用时采取压频控制。与电压源型变频器可以直接控制输出电压不同，电流源型变频器的输出电压是由输出电流及负载决定的，所以为了实现压频控制，必须设置电压环以实现输出电压的闭环控制。高性能变频器会采取磁场定向矢量控制，采用常见的转速电流双闭环，通过速度和磁通闭环调节器分别得到定子电流的转矩分量和励磁分量，经过极坐标变换，得到定子电流幅值和负载角，定子电流的幅值作为电流环的给定值，来控制晶闸管整流电路实现定子电流的闭环控制。负载角和同步旋转坐标系的位置角迭加在

一起，用于逆变侧晶闸管的触发脉冲分配。

电流源型变频器对电网电压的波动较为敏感。由于输出侧只有两个电平，电机承受的 dv/dt 较大，必须采用输出滤波器，电网侧的多脉冲整流器一般为可选件。这种变频器的主要优点是不需要外加电路就可以将负载的惯性能量回馈到电网；缺点是电网侧功率因数低，谐波大，而且随着工况的变化而变化，不好补偿。电流型变频器是在电压型变频器之前发展起来的，比较适用于水泵（锅炉给水泵）、风机、压缩机等，代表厂商是AB公司的Bulletin 1557M和PowerFlex 7000，主电路拓扑结构见图1。

4. 电压源型三电平变频器

在PWM电压源型变频器中，当输出电压较高时，为了避免器件串联引起的动态均压问题，同时降低输出谐波和 dv/dt ，逆变器部分采用三电平方式，也称NPC(Neutral Point Clamped 中心点钳位)方式。

变频器采用二极管整流（一般采用12脉冲整流方式），

电容储能，逆变部分采用三电平形式，功率器件常用GTO、IGBT或IGCT，多采用二极管钳位（由日本学者Ajura Nabae教授于1981年提出）或电容钳位、混合钳位的方式，解决了两个器件串联的难题，同时，增加了一个输出电平，使输出波形比两电平好。缺点是由于采用高压器件，输出侧的 dv/dt 比较严重，需要采用输出滤波器，而且受器件耐压水平的限制。代表厂商ABB公司的ACS1000系列、Siemens公司的SIMOVERT MV系列等。

5. 功率单元串联多电平变频器

采用若干个低压PWM变频功率单元串联的方式实现高压输出，属于电压源型变频器。它的输入侧采用移相降压型变压器，实现18脉冲以上的整流方式，满足国际上对电网谐波的最严格的要求。在带负载时，电网

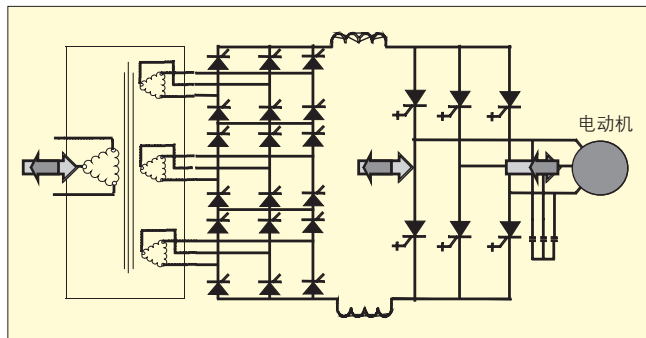


图1 PowerFlex 7000高压变频器拓扑结构图

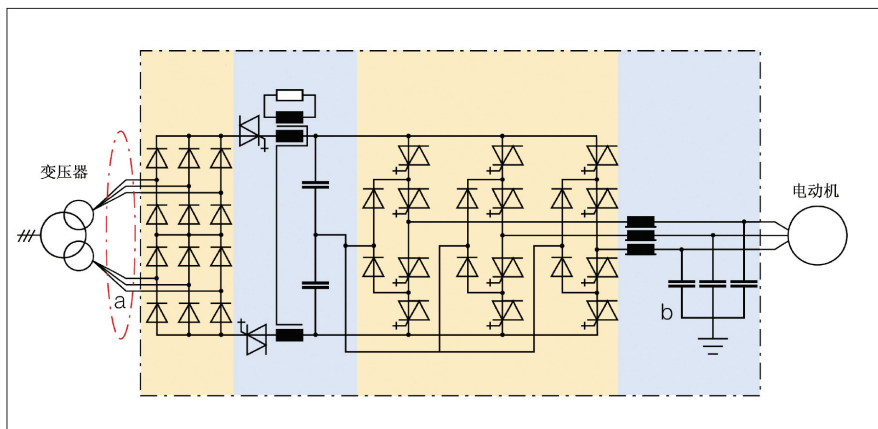


图2 ACS 1000电压源型三电平变频器拓扑结构图

侧功率因数可达到95%以上。在输出侧采用多级PWM技术, dv/dt小, 谐波少, 满足普通异步电机的需要。可根据负载的需要设计变频器的输出电压, 是解决6kV、10kV电机调速的较好办法。该变频器具有对电网谐波污染小、输入功率因数高、不必采用输入谐波滤波器和功率因数补偿装置、输出波形好、不存在谐波引起的电机发热和转矩脉动等问题。目前单元串联多电平变频器占高压变频器总数的半数以上, 我国在1996年底就研制成功国内第一台功率单元串联多电平6000V高压变频器, 并于1997年7月在北京燕山石化公司投入运行。目前国内以利德华福、东方日立为代表, 国外以Siemens Robicon、TMEIC (Toshiba、Mitsubishi)、Fuji为代表的厂商基本都采用这种电路结构。

美国Western House电气公司于1986年5月申请了专利号为4674024的美国专利, 该发明提出了由独立的标准低压功率单元串联形成的高压逆变系统, 提出了单元串联多电平变频器的基本框架。西屋公司的发明解决了变频器要求高压输出而器件耐压不够的矛盾, 避免了常规器件直接串联时存在的均压问题, 奠定了单元串联多电平变频器的基础。

美国Robicon公司于1994年3月申请了专利号为5625545的美国专利。该发明提出了输入采用多重化移相变压器和输出采用多电平移相式PWM的单元串联多电平方案。1998年5月, Robicon公司又提出了中心点偏移式功率单元旁路的方法, 在故障功率单元被旁路后, 通过调节三相输出电压之间的

相位, 保证输出线电压仍保持三相相对称, 电机能正常运行, 同时最大程度提高了电压利用率, 使单元串联多电平变频器的可靠性得到很大提高, 基本解决了一般6脉冲和12脉冲变频器产生的谐波问题。在厂商的宣传中, 称该系列的变频器可实现完美无谐波变频, 取名为完美无谐波变频器, 在世界各国都得到了大量的应用。由于Robicon公司的专利申请仅在美国, 在我国该技术属于公知技术。

总体上来说, 高压变频技术正处于发展阶段, 还没有达到像低压变频器那样成熟。目前, 虽然有人提出了其他不同的高压变频器解决方案, 但大都不具有明显的可行性, 或者说不具有将上述主流变频器结构取而代之的潜力。以上所谈的限于功率器件的特性和具体拖动系统的要求, 而开发出了各种类型的变频器, 它们各有其优缺点, 不能一概而论哪一种变频器好与不好。选型时应根据供电电网及拖动对象的特点来定, 不必一味追求某个指标。如起重设备、机车牵引、船舶主传动要选用可四象限运行的变频器; 对于轧钢机则要选动态响应能力好和过载能力强的变频器; 对于低速运行的设备可选用交-交变频器; 而对于高速运行的设备则可选用负载换流加同步电机的方式, 或者选用电流源型变频器; 单元串联多电平变频器多用在风机、水泵调速节能的场合。

表2

分类			逆变部分功率器件	直流回路的滤波元件
电流源型变频器	晶闸管电流源型变频器	串联二极管式电流源型变频器	晶闸管	电感
		输出滤波器换相式电流源型变频器	晶闸管	
		负载换相式电流源型变频器(LCI)	晶闸管	
	PWM式电流源型变频器	GTO、SGCT		
电压源型变频器	三电平PWM电压源型变频器		GTO、HV-IGBT或IGCT	电容
	单元串联多电平PWM电压源型变频器		LV-IGBT	

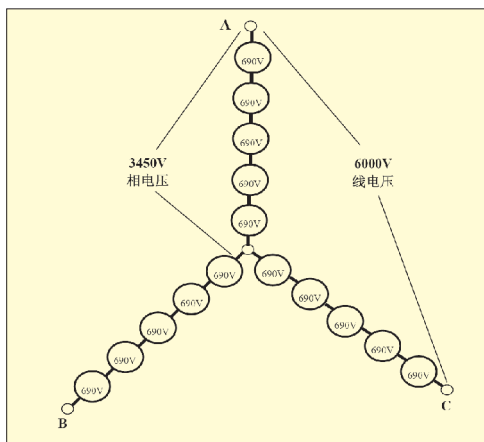


图3 单元串联多重化高压变频器拓扑结构图

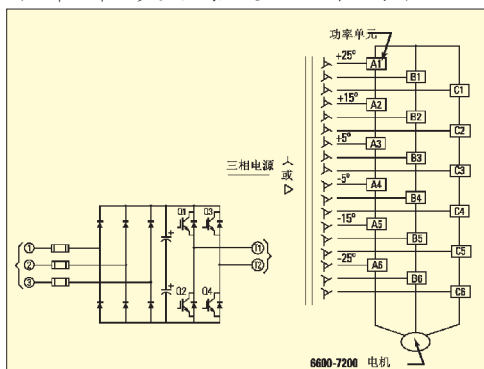


图4 ASIRobicon高压变频器拓扑结构图

从表2可以看出, 中、高压变频器首先依赖于高电压、大电流的电力电子器件, 变频器中常用的开关器件多为IGBT、GTR、GTO、IGCT、SGCT等, 由于制造水平及原材料的原因, 使这些器件的耐压很难达到直接应用于6~10kV的电压, 因此许多国家的企业开始研制开发新材料及新的高耐压器件。最近几年来ABB公司与三菱公司合作开发的IGCT(ETO), 已经应用到ACS1000型变频器中, Siemens研

制的高压IGBT等耐压可达4.5kV。Siemens、ABB、GE和Cegelec公司等分别采用专门研制的高耐压开关器件并以传统的交流变频器结构研制开发了自己的高压变频器。如Siemens公司的SIMOVERT MV系列产品，采用传统的交—直—交变频器结构，整流部分采用12脉冲或24脉冲二极管整流器，逆变部分采用三电平PWM逆变器。该系列变频器采用传统的电压型变频器结构，通过采用耐压较高的HV—IGBT模块，使得串联器件数减少为12个，随着元件数量的减少，成本降低，方案变得简洁，从而使柜体尺寸更小，可靠性提高。我国成都佳灵电气制造有限公司根据十多年变频器生产开发的经验，于1999年研究出直接串联IGBT高压变频器，并申请了专利，在我国市场上有许多应用。

比较变频器中常用的IGBT、GTR、GTO、IGCT、SGCT等开关器件，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。另外现在还在开发一些新器件，例如新型大功率IGBT模块——“注入增强栅极晶体管”（IEGT），它兼有IGBT和GTO二者优点，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）；而由于电子发射区注入增强，使器件的饱和压降进一步减小；功率相同时，缓冲电路的容量为GTO的1/10，安全工作区宽。目前日本Toshiba公司应用IECT制作的20MVA电压型多电平逆变器已经得到了实际应用。

高压变频器发展趋势

交流变频调速技术是强弱电混

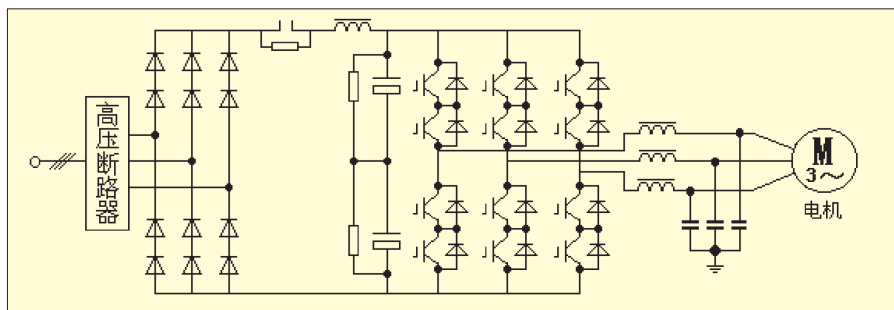


图5 成都佳灵IGBT直接串联高压变频器拓扑结构图

合，机电一体的综合技术，既要处理巨大电能的转换（整流、逆变），又要处理信息的收集、变换和传输，因此它必定会分成功率和控制两大部分。前者要解决与高压大电流有关的技术问题，后者要解决软硬件控制问题。高压变频器正向着高可靠性、低成本、高输入功率因数、高效率、低输入输出谐波、低共模电压、低dv/dt等方向发展。未来高压变频调速的发展主要表现为：

1. 采用最新的导通压降低和开关损耗小的功率器件，提高系统效率，更高电压、更大电流的新型电力半导体器件将应用在高压变频器中。例如ABB公司的6500V等级IGCT器件导通压降在4V以下、其开关损耗也较低。最新的TRENCH工艺或SPT工艺IGBT的1700V器件的导通压降在2.4V以下，其开关损耗比以前更低。现阶段，IGBT、IGCT、SGCT仍将扮演着主要的角色，SCR、GTO将会退出变频器市场。随着电力电子器件的发展，在技术和市场成熟情况下，将逐步采用高压器件，使高压变频装置结构和电路趋于简单，提高可靠性。近年来“电力电子积木”PEBB（Power Electronics Building Block）技术的兴起，使多个功率器件的集成化和低成本化逐步成为可能，这也为多电平变换电路拓扑的发展提供了有力的技术支持，必将促进中高压功率变换技术的进一步

发展。

2. 全数字控制系统，应用32位MCU、DSP及ASIC等数字芯片，由微处理器控制功率器件，完成各种控制任务。如Siemens高压变频器的控制采用SIMADYN-D系统，双64位CPU分工合作，一个主要用于矢量控制的检测，计算逻辑量的处理；另一个用于处理通信，实现转矩、速度闭环控制。SIMADYN-D采用STEP7硬件组态，CFC和SFC软件编程。另外无速度传感器的矢量控制、磁通控制和直接转矩控制等技术的应用都要求系统采用全数字、高速芯片来实现。

3. 良好的人机界面，自诊断和故障定位技术，有利于维护和故障快速处理，例如AB PowerFlex 7000 C采用PV550操作员终端，中英文界面显示各种运行信息，可以在人机界面上进行维护和诊断。

4. 提高动态响应性能，引入无速度传感器矢量控制、直接转矩控制等现代控制方法。从附表中可以看出，基本上所有厂商生产的高压变频器均实现了矢量控制。在高压变频器的未来发展中，将会进一步提高矢量控制的精度，尤其是采用无速度传感器矢量控制时的精度。以单元串联式多电平高压变频器为例，由于输出电压、电流波形比较理想，有利于无速度传感器矢量控制的实现。电机参数不准和时

变是影响无速度传感器矢量控制性能的重要因素，因此要求在控制算法中应尽量避开敏感的参数或增加电机参数在线辨识和控制系统参数自动修正功能，以提高系统的鲁棒性。

5. 采用冗余技术提高可靠性和易维护性，采用单元冗余实现单元切除后继续运行以及带电更换故障单元，以进行系统维护。高压变频器使用场合的重要性决定了其对可靠性有很高的要求，针对高压电子器件在长期运行时不稳定的现象，若不采取冗余设计，只要有一个功率器件发生故障，整个系统就会停机。冗余设计可以弥补变频器元件数量较多所产生的可靠性问题，大大提高其MTBF。

一般冗余设计包括主回路的冗余设计和控制系统的冗余设计。主回路的冗余设计主要采用功率单元旁路技术和采用多台变频器给多相电机供电的方式。考虑到大部分电机为三

相电机，在大容量应用领域，采用多台变频器并联的技术方案会有一定优势，在扩大容量的同时还能实现冗余设计。

6. 减小装置尺寸，高压变频器将朝着大功率、小型化、轻型化的方向发展。随着应用领域的扩展和相关技术及工艺的进步，高压变频器容量逐步增大。冷却问题随着容量的增大变得十分重要，在大容量领域，水冷技术是比较合适的选择，国外水冷技术的变频器输出电流可达到1400A。水冷技术对结构设计和热设计提出了很高的要求，同时对基础制造业也提出了挑战，国内目前制造水冷变频器的主要瓶颈在于水冷变压器和水冷散热器，连接件等配套工业。

7. 应用于高速电动机

高压变频器用于高速电动机时，可以不需要增速器，具有效率高、维护简单、可靠性好等优点。由于可以代替传统的电机增速器方式，

越来越受到重视，特别在天然气管道输送行业有很好的应用前景。应用于高速电动机时要求变频器能输出较高的频率，譬如300Hz，这对高压变频器的诸多方面，如PWM调制技术、高输出频率下的波形失真、逆变电路的损耗等提出了一些新课题。

8. 完善电力电子器件保护技术，在任何外部工况下，包括短路、过压、过流、过载等，变频装置不会被损坏。

9. 改善输入和输出谐波，部分高压变频系统采用有源谐波补偿技术来改善谐波干扰。尤其是应用于苛刻环境时，要求高压变频器的谐波干扰要远远低于一般产品标准。

10. 采用光纤通讯和数字信号传输技术，既可以解决高电压隔离问题，又可以提高通讯速度、增强抗干扰能力。另外要具有丰富的运行控制接口，既有就地控制，又有远端控制；既有通讯接口，又有模拟量数字量接口。■

附表1

品牌	Siemens Robicon	利德华福	TMEIC	成都佳灵	ABB	Rockwell	合康亿盛	东方日立
变频器型号	Perfect Harmony	HARSVERT-A	Tmdrive-MV	JCS	ACS5000	PowerFlex 7000	HIVERT-T06	DHVECTOL-HI
变频器电压等级 (kV)	2.3~13.8	3、6、10	3.3、6.6、10	1~13.8	6.0~6.9	2.3-6.6	3、6、10	3 / 3 . 3 、 6/6.6、10/11
功率范围(kW)	300~75000	200~5000	315~5000	450~20000	2000~24000	200~18000	500~8000	190~8500
输出电压 (kV)	2.3~13.8	0~10	3.3、6.6、10	10	6.0~6.9，可选4.16	2.3~6	3、6、10	6~10
输出频率 (Hz)	0~330	0.5~120	0~50 (120)	0.5~120	0~75(250)	0~75	0~120	0~60
主电路拓扑	单元串联多电平电压源型	单元串联多电平电压源型	单元串联多电平电压源型	IGBT直接串联	中性点钳位式电压源型	18脉冲或双PWM(电流源型)	功率单元串联电压源型	直接高压串联多电平
整流方式	二极管桥式全控	二极管桥式全控	二极管桥式全控	二极管或IGBT	二极管，36脉冲整流器	6脉冲，18脉冲不可控整流器或PWM整流器	10kV为54脉冲不可控整流输入	二极管桥式全控，移相多重化整流
功率器件	IGBT	IGBT	IGBT	IGBT，功率单元额定电压为1700V	IGCT，6脉冲3级VSI	6.5kV，1500A对称门极换流晶闸管SGCT	IGBT，每相由9个功率单元组成，共27个功率模块，功率单元额定电压为640V	IGBT
是否需要输入变压器	需要	需要	需要	不需要	需要	双PWM变频器不需要，多脉冲型式需要	需要	需要

附表2

品牌	Siemens Robicon	利德华福	TMEIC	成都佳灵	ABB	Rockwell	合康亿盛	东方日立
控制方式	无速度反馈矢量控制、U/f	无速度反馈矢量控制(可选异步机普通控制型、异步机矢量控制型、同步机矢量控制型)	无速度反馈矢量控制、U/f	矢量、DSC直接速度控制	DTC直接转矩	无速度传感器直接矢量控制	空间矢量控制	鲁棒型(Robust)无速度传感器矢量控制
变频器效率(额定负载下)	0.961~0.973	额定负载下>0.96	>0.97	≥0.98	>98.5%	>0.96	额定负载下≥0.96	约97%(含输入变压器)
驱动器工作象限	2(4象限可选)	2	2	2	2	4	2(4象限可选)	2(4象限可选)
功率因数	0.95	0.95(>20%负载)	0.95	0.9	0.95	>0.96	额定负载下≥0.96	>0.96
单元最大欠压范围(%额定电压)	-30%	-35%	±10%	-20%~10%	-25%~10%	-35%	-20%~15%	±10%
单元旁路功能	支持(中心点偏移方案)	支持	需要添加旁路柜	手动切换或自动旁路柜完成切换	可选	不支持	可选旁路柜与切换柜	可选单元旁路
过载能力	110%, 1min; 150%, 立即保护	120%, 1min; 200%, 立即保护	125%, 1min	120%, 1min(JCS); 150%, 1min(JCP); 200%, 1min(JCC)	110%, 1min	110%, 1min或150%, 1min	120%, 1分钟; 150%立即保护	125%, 1min
冷却方式	风冷、水冷	风冷	风冷	强制风冷	风冷、水冷	风冷、水冷带液体-气体或液体-液体交换器	强迫风冷	风冷、热管(根据负载容量选择)
通讯方式	Modibus、Profibus、DeviceNet	Modibus、Profibus、ProfiNet	Modibus-Plus、Profibus、DeviceNet	RS232或RS422、RS485, 自定义协议、Modbus	Profibus-DP、Modbus、Interbus、DeviceNet、ABB AF100	DPI或SCANPort, 支持RS232/485、DeviceNet、ControlNet、RemoteI/O	RS485、Modbus	DeviceNet
适用场合	风机、水泵、机械传动、同步电机	风机、水泵、机械传动同步电机	风机、水泵、机械传动(Tm-10等系列)、同步电机	风机、水泵、机械传动(JCC系列)、提升机(JCP系列)、同步电机	感应、同步、永磁电机	风机、水泵、皮带输送机、同步电机	风机、水泵、机械传动、提升机、同步电机	风机、水泵、机械传动、提升机、同步电机
认证	IEEE, ANSI, NEMA, UL, CSA, CE	中国电力科学研究院检验, 国家电控设备质量监督检验中心认证, 国家经济贸易委员会新产品、新技术鉴定验收	JEC, IEC	四川省科学技术厅科学技术成果鉴定, 天津配电及电控设备检测所、国家电控设备质量监督检验中心鉴定, 中国测试技术研究院检测	IEC60146, IEC60721	IEEE-519-1992 GB/T14549-1993	中国电力科学研究院检验, 天津配电及电控设备检测所、国家电控设备质量监督检验中心鉴定	JIS, JEC, JEM
防护等级	IP31(风冷), IP52(水冷), NEMA 1(风冷), NEMA 12(水冷), IP42(风冷)	IP20、IP31	IP20、IP31	IP20	IP32, IP54可选	IP21	IP30	IP20, IP31可选
其他特点	无谐波污染, 高功率因数(正常变速范围内, 功率因数超过0.95), 效率高(部分效率达到98%以上), 自动电机识别, 远程人机界面诊断, 自动跟踪电动机启动	触摸屏操作, 方便故障诊断, 积木式结构, 方便维护, 自动识别电机参数, 来电自启动, 电网允许波动范围宽	采用专用东芝芯片CPU PP7开发, 按键式液晶显示, 过电流保护, 允许电压波动+25%时间300ms, 来电自启动, PID, 独立的单元预充电电路	含变/工频切换装置和电子式真空断路器, PID, 转矩提升, 带过流, 过压, 欠压, 短路, 缺相, 过载, 过热, 接地, 电动机过载, 外部报警, 电涌保护, 主器件自保护	整个转速范围内恒定的电网功率因数, 优化的脉冲波形, 最大限度地降低谐波(通过IGCT), DTC(直接转矩控制), 无熔断器	无需电解电容器, 无需熔断器保护, 变压器可以与变频器分开摆放, 主变频器持续不停机时间达10s, 固有4象限运行和能量回馈功能, 采用PV550操作终端, 中英文界面, DSP+FPGA全数字化控制	友好的用户界面, 5种频率给定方式, AVR电压自动调整, PID, 限流, 自诊断, 瞬时停电跟踪功能	触摸屏显示速度, 电流及故障原因, 瞬时停电再启动, 工频/变频自动互切, 引进日立先进技术, 采用日立公司新一代32位变频器专用主控芯片