面向21世纪的电力电子和变频调速技术

清华大学电机工程系、应用电子技术系　黄立培　蔡宣三

1. 回顾与展望

电力电子学是使用电力半导体器件及电子技术对电气设备的电功率进行变换和控制的技术。它诞生于60年代后期，早期以晶闸管电路和系统为代表。经过40多年的发展，电力电子学已经形成较为完整的学科体系和理论，成为相对独立的学科门类。它所包含的技术领域有：电子技术、电力技术和控制技术等。

电力电子学广泛应用于电力系统、电气传动系统及各种电源系统等工业生产和民用部门。其关键在于利用功率半导体器件的开关作用，使电能的产生、传输、变换、控制和使用效率大大提高，并实现了用电装置的小型化、轻量化及原材料的大量节省。现代电力电子学不但是一项高新技术，而且还是多项高新技术的发展基础。据国外预计，大到发电设备，小到家用电器，将有80%的用电设备经过电力电子装置变换的电源供电。在电力、轧钢、造纸、水泥、煤炭、铁路、船舶、汽车、机床等传统工业的改造中，和计算机、自动化生产线、航天航空等高新技术的发展中无不看到现代电力电子技术的踪影。据称，电力电子学和计算机技术将成为21世纪两项重要的基础技术，成为解决人类进入21世纪时面对的能源匮乏、原材料资源紧缺两大危机的重要技术手段之一。

在我国，电力电子学经过30多年的发展，已有一些成熟的技术，例如使用晶闸管的变流装置；有一些技术正在推广应用，如国外80年代中期发展起来的交流电机变频调速节能技术和中小容量的电源系统。但是还有一些应用前沿技术需要投入足够的人力和财力进行研究才能取得突破，如用于电力系统的柔性输电技术、大容量交流电机调速技术和高性能交流电机调整速等。

发展和推广应用电力电子学对于我国传统工业实现从粗放型到集约型的转变，并在高新技术领域的国际技术竞争中占有一席之地具有重要意义。

电力电子学的基础是电力半导体器件，它的进步有力地带动电力电子学的发展。从80年代开始，以大功率晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅晶体管(IGBT)为代表的可关断器件的发展推动了电力电子控制技术的发展，使得电力半导体变流装置的体积减少、重量减轻。可以预见，当具有耐高压、耐高温(300℃)新型半导体材料碳化硅(SiC)在21世纪进入实用化后，电力电子学将发生一次革命。

2. 电力半导体器件的发展现状

根据1997年最新的统计数据，高电压电力半导体器件的发展水平如表1所示，可以看出，IGBT不仅可以完全替代GTR，而且正在进一步占领GTO原先占有的份额，并开始出现平板式构造，在未来的高电压大容量半导体变流装置中，IGBT和GTO谁将独领风骚尚无定论，亦可能出现二分天下的局面。由表1还可以看出，新型大容量电力半导体器件GCT(Gate Commutated Turn－off)正在崛起。GCT是针对GTO的缺点如从关断信号发出到实际关断的时间长(约数十微秒)，从而造成开关频率低，以及需要吸收电路而开发出来的。ABB Industrie AG公司1996

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

年9月开始应用GCT制造出100MW，由112kV，50Hz变到121kV，50/3Hz的频率变换装置。

表1

种类	容量	构造
IGBT	3300V，1200A	模块
	2500V，1800A	平板
GTO	6000V，6000A	平板
GCT	4500V，4000A	平板
GTR	1400V，300A 1200V，600A	模块 模块
光触SCR	8000V，4000A	
二极管	5000V，4000A	
MOSFET	500V，240A	平板

虽然GCT和GTO均为平板式构造，但是门极电路的构造差异很大，GTO的门极电路为线状，而GCT的门极电路为环状。二者关断时在门极电路均要流过很大的电流，GTO关断时门极电流易形成电流集中，产生局部过热，GCT的关断电流分布较均匀，容许瞬态损耗增大，可以省去吸收电路。和GTO比较，GCT还具有如下优点：

· 通断延时时间可以减少到1/10，开关频率可以提高；

· 总损耗仅为GTO的一半左右；

· 延迟时间的分散性减小，串并联容易；

· 关断时门极电流增大，关断所需门极电荷减少到1/2；

· 仅为平板式构造，可很容易替换GTO。

当前要开展的研究课题包括开发更大容量无吸收电路的GCT，以及低阻抗驱动电路等。

在我国，电力半导体器件经过较长时期的发展，总体水平仍然很低。突出表现是，几乎不具备新产品的独立开发能力，IGBT、GTO、GTR器件的生产虽引进了国外技术，由于种种原因一直未形成规模和经济效益。

用电力半导体器件作为开关构成的变换装置的主电路拓扑结构，虽有人仍在不断摸索，除用于小容量电源装置的软开关电路方式有一些更新外，硬开关电路的结构这些年来变化不大，尤其是用于交流电机控制和电力系统的大功率变流装置电路几乎没有变化。

3、变频调速技术的发展

变频调速系统由电力半导体变流器、电动机、控制、检测四部分组成。这四部分相互依存，共同作用，实现变频调速的高精度、使用方便、低转矩脉动、低噪音、无传感器、小型化等性能指标。电力变流器的硬件主要采用SCR、GTO、GTR、IGBT等电力半导体器件，利用PWM技术、元件串并联技术、多重化技术、多相化技术实现DC→AC、AC→AC、DC→DC、AC→DC的能量变换。电动机是实现电能→机械能变换的执行部件，电动机的设计如何适应变频器的需要，如何选用新材料、新工艺提高电机的能量转换密度是采用电力半导体变流技术后的重要技术课题。在变频调速系统中，为了进行转矩、电流、磁通、电压、转速、位置等的控制，需要对这些被控制量进行检测。利用现代控制理论、不采用传感器，尤其是不采用机械传感器进行状态观测或估算，可以为系统提供所需信息。超大规模集成电路技术的发展为变频调速提供所需微电脑和各种专用集成电路，从而有可能利用现代控制理论实现全数字控制、智能化控制。

为了提高变频调速系统的响应速度、精度、稳定性等要求，所遇到的实际困难是：电力半导体器件的开关频率有限；传感器的分辨率、微电脑的处理速度尚不尽人意；系统参数的变化、非线性、存在各种各样的扰动等。现代控制理论可以在一定程度上解决上述难题，但其理论、设计方法和应用还远没有达到成熟的地步，新的概念和方法仍在不断涌现。下面以异步电机为例说明变频调速控制方式的发展。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1) 通用变频器

当电力半导体器件由不可关断半控型向可关断全控型变化、控制信号由电流控制向电压控制变化时，通过变频器产品动向的突出特点就是体积更小、重量更轻，以 0.75kW 的通用变频器为例，从 1981 年到 1995 年的 15年时间，它的体积减小到原来的 1/10。随着电力半导体器件开关频率不断提高，噪音逐步减小。通过将 V/F 比恒定控制改变为恒定子磁链控制以及定子电阻的辨识等措施，提高了控制性能。

通用变频器将来的发展将主要围绕以下几个方面展开：无速度传感器矢量控制的普及；定子电阻和转子电阻的实时辨识；降低噪音的同时，减少电磁干扰；新的电力半导体器件的应用。

(2) 无速度传感器矢量控制

随着近年来电力电子和计算机技术的发展，高性能异步电机调速系统正在得到广泛的应用，但由于速度传感器的安装、维护以及低速性能及安装和维护等方面的问题，影响了异步电机调速系统的简便性、廉价性和系统的可靠性。无速度传感器异步电机传动系统的控制成为越来越受到人们关注的研究课题。

无速度传感器矢量控制变频器既具有矢量控制高性能的优点，又具有通用变频器没有速度传感器的长处，但是，在进行矢量控制时如何获得速度信号成为无速度传感器矢量控制的技术关键。

无速度传感器控制系统获得速度信号的办法是用直接计算、参数辨识、状态估计、间接测量等手段，从电机定子边较易测量的定子电压、定子电流中计算出与速度有关的量，从而得到转子速度，并将其运用到速度反馈控制系统之中。

常用的方法有：利用电机的基本方程式(稳态和动态)导出速度的方程式进行计算；根据模型参考自适应控制的理论，选择合适的参考模型和可调整模型，利用自适应算法辨识出速度；利用电机的齿谐波电势计算速度等。

作为矢量控制的重要对象是电机的磁通，磁通控制的效果如何直接影响系统的控制性能。因此，磁通的观测往往是无速度传感器矢量控制系统的另一技术关键。

无论是速度辨识还是磁通的观测，均离不开电机的数学模型，模型参数的准确性影响速度辨识和磁通观测精度，因此在无速度传感器矢量控制系统中参数辨识是不可缺少的。

从 1983 年提出无速度传感器矢量控制的控制策略以来，一直受到学术界和产业界的高度重视，日立、安川电机等公司于 1987 年即发表了各自的研究成果，并相继推出各自的产品。其中，日立的 J300 系列和 J100 系列变频器均具有 V/F 一定控制和无速度传感器矢量控制的选择，用户可根据需要进行选择。当选择无速度传感器矢量控制时，调速范围，低速时的转矩均比 V/F 比一定控制时有明显的改进。SANKEN 公司在 1994 年的第一届电力电子与传动展览会上展示了他们的无速度传感器矢量控制变频器。目前，无速度传感器矢量控制变频器的产品的调速范围为 1:50 左右，个别厂商有 1:75 甚至更高的产品。ABB 公司新近推出采用直接转矩控制策略的无速度传感器变频器，据称，该产品的性能已达到了可实用的水平。

(3) 大容量逆变器

多电平逆变器是大容量变流装置的主要电路方式。传统的大容量变流装置的主电路通常采用多重化改善电压或电流波形，使用变压器进行电压等级的适配，成本较高。

所谓多电平逆变器的桥臂上有 4 个或 2n 个电力半导体器件。通过直流电压的分压和开关动作的不同组合，实现多电平输出电压，可以使波形更接近正弦。它的缺点是中性点电位的变化将影响输出电压的电平。

随着电流半导体器件的发展，高耐压、大电流半导体器件的问世，可以不经过变压器，

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

直接采用串并联技术进行整流或逆变，采用合适的PWM控制技术，降低谐波。

大容量逆变器的另一种电路方式是在整流侧采用变压器移相进行多重化整流，多个逆变器功率单元串接给交流电机供电，其代表产品是美国ROBICON公司的产品。它采用IGBT作为主电路开关器件，逆变器功率单元采用模块化的设计，整流侧输入电流谐波含量小。

(4) 自整定技术

在变频调速系统中自整定技术的应用日益广泛，它可以根据速度和负载的变化自动调整控制系统的参数，使得系统具有快速的动态响应。

自整定技术分为离线式和在线式两种。离线式的研究成果已经在相当多的产品中应用，它是在运行系统程序之前通过运行一段自整定程序，辨识相关数据，并修改系统程序的相关参数，以期获得良好的系统控制性能。离线式自整定的缺点是当系统运行后，不能实时修改系统参数，因而系统不能获得最佳控制性能。在线式自整定可以实时修改控制器的参数，因而可以获得最佳控制性能。

无论是离线式自整定还是在线式自整式，均需要依据一定的数学模型，确定合适的算法，同时还受制于系统的软件和硬件环境。当考虑负载的机械特性进行在线式自整定，如用于位置控制的伺服系统控制器的增益调整，由于系统构成复杂，在线式自整定还有许多理论和实际问题。

自整定技术的研究的课题包括：扩大应用范围、提高精度、在线自整定等。同时，改进控制技术，提高系统鲁棒性和自整定技术紧密相联系。

(5) 利用最新控制理论的交流传动

现代控制理论在交流传动领域应用十分活跃，在控制量（如磁链、速度、转矩、磁极位置）的检测、估计中已有相当成熟的研究成果，部分成果在商品中得到应用。尤其是应用观测器的理论构造系统状态观测器，估算系统中难以用传感器检测到的物理量，改善系统控制性能，取得了良好的效果。

如在电机带负载运行时，干扰转矩很难用传感器检测到，采用估算干扰转矩的观测器，可以减小动态速降。现代控制理论的其它领域，如模糊逻辑、神经元网络、自适应技术、变结构控制等，均可在电机控制系统中看到应用前景。同时，部分控制理论尚未在电机控制系统中找到合适的位置。如混沌理论、H∞控制等。

(6) 矢量控制技术

矢量控制依然是高性能交流电机系统的主流控制策略。它所包涵的关键技术有：控制理论和方法，如PWM技术，磁通的观测，速度辨识，无速度传感器控制；电机铁损补偿，参数辨识，参数变化的补偿；主电路使用新型电力半导体器件，提高开关频率，改善电压或电流波形，同时使用微电子技术所提供的DSP、CPU、ASIC等。

矢量控制的最新发展是：数字电流控制，一台变频器进行多台电机控制，非线性补偿等。

和矢量控制技术发展的同时，直接转矩控制变频器的商品化进程取得重大进展。

4. 变频调速和电机

变频调速的应用领域十分广泛。在日本，1986年开始出现变频速冻冰箱，90年代出现变频洗衣机，变频技术在家电中得到广泛应用。随着变频空调的广告在中央电视台的播放，“变频”——正成为千家万户熟悉的词汇，变频调速正进入寻常百姓家。

毫无疑问，变频调速的主要应用领域依然是工业中的电力拖动控制。根据日本电机工业协会的统计，1996年日本销售的通用变频器有146万台，销售额为800亿日元。据美国有关部门报道：美国市场对交流变频调速系统的需求量以每年21%的速度猛增，导致这一增长趋势的原因是电力电子技术的飞速发展以及自动化设备的激增。目前，各种变频调速装置被广泛用于数控机床、工业机

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

器人、各种自动机械设备、纺织、印刷、轻工系统的各种柔性生产线，轧钢、矿山、机车牵引、航空航天等。

根据专家预测，应用变频调速系统最多的数控机车、汽车工业今后投资将继续扩大，对变频调速系统的需求量不断上升，其年增长率估计为10%左右。在变频调速装置的国际市场上，各国的制造商开展了激烈的竞争。

在我国，变频调速系统的国内市场需求量将日益扩大。这里有政策方面的宏观调控作用，国家"八五"和"九五"计划中，节能设备一直当作重大项目支持。另一方面，技术进步和技术改造的效益吸引应用，技术进步要求企业必须提高设备的效率。机电产品谋求出口的竞争，出口的机电产品要提高竞争能力，就必须具有高性能、低成本的高新控制和电机产品。

随着变频调速技术的迅猛发展，国外的中小型电机企业发生了极大的变化和更新，主要特点为：

(1) 电力电子、电机及控制技术的一体化。国外的电机生产公司早已迅速摆脱了单一电机生产制造模式，而大大扩展了电机的外延和内涵，以成套机电产品形式走向市场。

(2) 集成化和智能化。电机的高新技术附加含量愈来愈高，电机机体内不仅仅包含原来电机定、转子，而且内含电力电子元器件及各种控制线路，使得电力电子—电机—控制不仅在运行上形成一体，在外观上亦融为一体，具有相当高的智能，称之为"smart motor"(智能电机)。

(3) 高性能和高可靠性。由于电机及控制系统制造成本远远低于其运行成本，所以，高性能及高可靠性成为衡量电机及其控制系统优劣的第一标准。高效、高功率因数、宽调速范围及高故障容错能力成为电机系统的重要标志。

(4) 新材料、新结构层出不穷。电机中的导电、导磁及绝缘材料已发生了很大的变化，高性能材料的成本价格不断下降。同时，电力电子元器件材料亦不断更新，为电机与控制提供了新的物质条件。另外，由于电机的供电方式发生了改变，电机的运行方式及其相应的结构也随之改变，产生出一大批新颖电机。

国外(尤其是欧美等发达国家)的中小型电机行业正以强劲势头向前发展。有人预言，未来10年将是电机工程领域发展的黄金10年。

改革开放以来，我国中小型电机行业生产发展迅速，成为继美、日、俄、德之后的生产大国。但由于我国小型电机技术投入严重不足，产品技术发展滞后，虽然数量高速增长，但质量、品种、规格变化缓慢。企业还是比较习惯制造相同的产品，搞统一的发展，彼此重复，这就出现了通用产品到处都是的局面，产品质量差，经营规模小，开发能力弱。面对当今市场的迅速发展，各种用途的机械产品日新月异，各种不同特色的技术要求也相继而来，这就要求企业能及时适应这些变化开发更多的特殊化、专用化的电机以及性能优良的机电一体化产品，填补市场空白，使电机行业从目前市场萎缩的困境中走出来。

当利用变频器对电机变频变压供电，不仅可以挖掘电机本身潜力，提高电机性能，而且可以降低其制造和运行费用。它与传统异步电机设计有很大的不同，主要表现在以下三个方面：

(1)由于电源频率不同，则电机机械特性可以随着平移，这样可直接利用其最大转矩作为起动转矩，不必利用集肤效应来提高起动转矩，从而转子可以优化设计以提高电机稳定运行性能；

(2) 由于变频器能够平滑变频变压，从而可以将异步电动机调节在最佳运行点上即得到最小滑差、最大效率和高功率因数，这样在保证出力不变情况下，减小电机尺寸，减轻其重量和降低成本；

(3) 由于变频器供电下的异步电动机大

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变频调速在空调系统节能中的应用研究

上海交通大学　孙志高

摘　要：分析了空调系统流体输送的特点和流量调节方式，指出变频调速装置用于空调的变流量（水量、风量）调节可显著节能，并以实例说明变频调速系统在经济上的可行性。

关键词：变频调速　空调系统　节能

随着空调应用的日益普及，其能耗在社会总能耗中所占比例越来越高。据不完全统计，上海市夏季空调的高峰期用电量占全市总用电量的1/3左右。减少空调系统的耗能对全社会的节能，促进国民经济的持续发展具有重大意义。常规空调输送系统（水系统和风系统）的流量一般不变，即根据空调的最大负荷设计水系统和风系统，但空调系统的大部分时间处于部分负荷状态。为适应部分负荷运行的需要，常规空调一般采用（水系统）节流、（风系统）再加热等措施满足要求，这种调节方式浪费了大量的能量。本文主要就变频调速装置在空调水系统和风系统中的应用进行一些探讨。

1　理论分析

泵（风机）的运行工况点由管网特性曲线和泵或风机的性能曲线的交点确定。图1中的A点为泵（风机）的运行工况点。

空调系统的水泵和风机的工作点随空调负荷的变化而变化，根据相似理论，其风量、扬程（压头）、轴功率与转速的关系为：

$$\frac{G}{G'} = \frac{n}{n'} \tag{1}$$

$$\frac{H}{H'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \tag{2}$$

$$\frac{N}{N'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3 \tag{3}$$

式中　G——设计工况风（水）量，m^3/h；

G'——实际工况风（水）量，m^3/h；

H——设计工况扬程（压头），Pa；

H'——实际工况扬程（压头），Pa；

多不是工作在一定额定状况下，而是处于不断变化之中，因此，温升极限得以提高，从而可以增加电流设计密度，进一步减小电机的尺寸和重量。

正是由于上面所述的区别，使得新电机设计在出力不变条件下，其体积可以减小25%～30%，或者说电机功效密度增加25%～30%，从而使得异步电动机的应用范围大大扩展。

值得注意的是，电机和电力电子技术及控制技术有机地结合起来，才真正使传统电机产品得以改造和更新，形成新一代高新技术产品，使之获得高性能、高质量、高可靠性和高附加值，同时节约能源和原材料，降低消耗和污染，从而适应现代市场的需要，增强产品的市场竞争能力。另一方面，通过这种新型电机产品的开发，培养一批高技术人才，提高企业内部素质和开发能力，促使企业进步。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net