

# 21 世纪电力电子技术的机遇与挑战

徐德鸿 浙江大学(杭州 310027)

摘要:以环保、可持续发展、提高社会发展的竞争力为基石,展望了 21 世纪社会发展对电力电子技术的需求及电力电子技术在此, 11  
叙词:电力电子、节能、环保 应用方面的应用。

## 1 引言

20 世纪人类最伟大的 20 项科技成果:电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用,几乎不同程度地应用了电力电子技术,取得了辉煌的成就。功率器件经历从结型控制器件,如晶闸管、功率 GTR、GTO,到场控器件,如功率 MOSFET、IGBT、IGCT 的发展历程。90 年代出现了 SMART 功率器件、智能功率模块 IPM、TOPSWITCH 等,努力将一个或多个功率器件与其驱动、保护、电隔离等电路集成在一个硅片或一个模块上,形成了电力电子集成化的概念。大功率、高频化、低功耗、驱动场控化为功率器件发展重要特征。电力电子电路功率变换技术与电力电子器件同步发展,除发明了众多功率变换的电路拓扑外,还创造如吸收、多重化、谐振开关、多电平等概念;在控制技术方面出现了相控、PWM 控制、以状态空间平均法为代表的动态建模理论;在仿真手段方面出现多种商用软件,如 PSPICE、SABER、SIMPLIS 等。电力电子技术已广泛地应用于工业、交通、IT、通讯、国防以及家电等,已形成了全球 600 亿美元电力电子产品市场,支撑着 5700 亿美元的电器电子硬件产品。据美国国家电力科学研究院预测至 2010 年 80% 的电能将通过电力电子技术的处理。

## 2 功率器件的发展

功率器件的发展是电力电子技术发展的基础。功率 MOSFET 至今仍是最快速的功率器件,减少其通态电阻仍是今后功率 MOSFET 主要研究方向。长期以来没有太大的突破,直到 1998 年法国 INFINEON 公司提出了 Super-junction 的概念,通过引入等效漂移区,在保持阻断电压能力的前提下,有效地减少了 MOSFET 的导通电阻,这种 MOSFET 被称为 CoolMOS,如图 1。比如 600V 耐压的 CoolMOS 的通态电阻仅为普通 MOSFET 的 1/5。与其他器件相比,MOSFET 没有二次击穿,可谓最易使用的功率开关器件,它在低电压中、小功率电源、固体开关等得到广泛地应用。

IGBT 综合了场控器件快速性优点和双极型器件低通态压降的优点。IGBT 的高压、大容量也是长期以来的研究目标。1985 年人们认为 IGBT 的极限耐压为 2kV,而目前已达到 6.5kV。IGBT 器件的阻断电压上限不断刷新。日本采用 IGBT 改造输入 3.3kV 的 8MVA GTO 变频装置,采用 IGBT 后装置的体积减少了一半,效

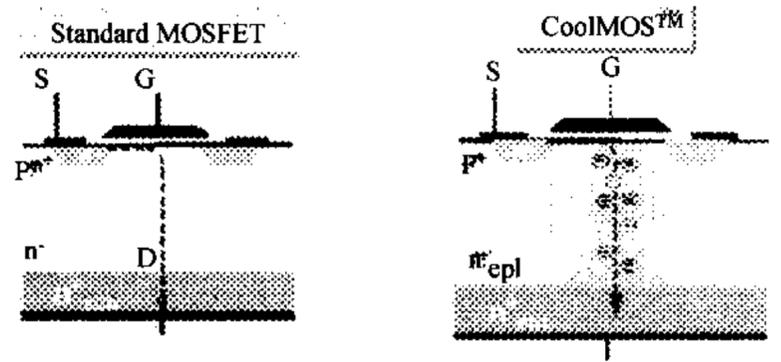


图 1 CoolMOS 与普通 MOSFET 结构的比较

率从 96.5% 提高到 98.5%,节省电能 160kW。IGBT 的阻断电压的提高,使其能覆盖更大的功率应用领域。日本正在用 IGBT 替代 GTO 改造原有电气化机车。IGBT 正不断的蚕食晶闸管、GTO 的传统领地,在大功率应用场合极具渗透力。对于应用于市电的电力电子装置的低压 IGBT 器件,其主要性能提高目标是降低通态压降和提高开关速度。下一代耐压 600V IGBT 通态压降的目标是 1V,耐压 1200V IGBT 通态压降的目标是 1.5V。如何提高 IGBT 器件的可靠性如采用压接工艺等也是今后的重要课题。

面临 IGBT 的追赶,ABB 与三菱公司合作开发了 GTO 的更新换代产品:IGCT(GCT),如图 2。IGCT 通过分布集成门极驱动、浅层发射极等技术,器件的开关速度有一定的提高,同时减少了门极驱动功率,方便了应用。可以预计 GTO、IGCT 将面临 IGBT 的严峻竞争,IGCT 的出路是高压、大容量化,可能在未来的 FACTS 应用里寻找出路。

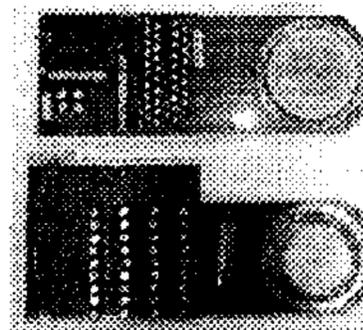


图 2 三菱与 ABB 开发的 4.5kV/4kA IGCT

SiC 器件是 21 世纪最有发展潜力的电力电子器件。SiC 材料的耐压是硅材料的 10 倍,导热率是硅材料的 3 倍,结温达 200 度。SiC 功率开关器件的开关频率将显著提高,通态损耗和开关损耗减至 1/10。由于导热率和结温提高,因此散热器设计变的容易,构成的装置的体积变得更小。由于 SiC 器件的禁带宽,结

电压高,较适合于制造场控型器件。Cree 公司已开发了 600V/1A、4A、6A、10A 的 SiC Schottky 二极管产品,具有几乎零反向恢复过程。该公司已研制出 40A SiC Schottky 二极管。它将广泛地应用于开关电源,PFC 电路和电动汽车。SiC 器件将成为 21 世纪电力电子技术的新驱动力。

### 3 环境保护要求

现代社会对环境造成了严重的污染,温室气体的排放引起了国际社会的关注。1 个人一天身体排出二氧化碳约为 1Kg。而实际上现代社会人均对环境排放二氧化碳是人身体排放二氧化碳的 10 倍。大量的能源消耗是温室气体的排放的主要原因。美国人均排放二氧化碳是人身体排放二氧化碳的 56 倍。日本人均排放二氧化碳是人身体排放二氧化碳的 25 倍。发达国家的长期工业化过程是造成温室气体问题的主要原因。然而,改革开放以来,我国的能源消费量急剧上升,二氧化碳排放量也有较大增加。1995 年我国由能源活动引起的二氧化碳排放量约为 28 亿 t,在全球温室气体排放总量中位居第二,约占 12%。按照我国目前以煤为主的能源方案,预计 2020 年,我国的二氧化碳排放量就可能超过美国,成为世界上第一排放国。

1997 年在日本京都召开的《联合国气候变化框架公约》会议上,通过了著名京都议定书 COP3,即温室气体排放限制议定书。然而,美国布什政府退出了议定书的最后签订。目前,国际上正在努力争取及早实现议定书的签订。京都议定书将对世界经济产生深远的影响。扩大再生能源应用比例和大力采用节能技术是实现京都议定书的目标十分关键和有效措施。日本、欧洲、澳大利亚积极推广再生能源和节能技术,减少温室气体排放。日本资源能源机构 2001 年制定十年能源发展规划。大力采用新能源发电技术,光伏发电装机容量将从 1999 年的 209MW,到 2010 年将增加到 4820MW,增加 23 倍;风力发电装机容量将从 1999 年的 83MW,到 2010 年将增加到 3000MW,增加 38 倍;垃圾发电增加 5 倍;生物发电增加 5 倍;太阳能热利用也将增加 4 倍。到 2010 年再生能源和新能源应用占总能源消耗的比例将从 1999 年 1.2% 增加到 2010 年 3%。日本将大力发展低排放汽车,包括纯电动汽车、混合型汽车、燃料电池汽车、天然气或液化气汽车等。低排放汽车数量将从 1999 年的 65000 辆增至 2010 年的 3480000 辆,即增加 53.5 倍。应用的燃料电池将从 1999 年 12MW 增加到 2010 年的 2200MW,增至 183 倍。光伏、风力、燃料电池等新能源发电技术和电动汽车推广需要电力电子技术,将形成电力电子技术的巨大市场。

### 4 低排放汽车

根据美国国家电力科学研究院的报告纯电动汽车与汽油汽车的一次能源利用率之比为 1:0.6。因此,发展电动汽车可以提高能源的利用率,同时减少温室气体和有害气体的排放。电动汽

车的关键技术是电池技术和电力电子技术。铅酸电池价格低,但能量密度低,体积大,一次充电的持续里程低,可充电次数少。目前国际上正在开展新型电池,如锂电池、镍氢电池等的研发工作。将汽油驱动和电动驱动相结合的混合动力汽车已在日本问世,如丰田 Prius 和本田 Insight。据称可减少油耗 50%,将排放量减至十分之一。日本政府采取补贴的方式支持混合动力汽车的销售。混合动力汽车的产业化前景已引起美国汽车行业的注意,美国正在探讨混合动力汽车的开发,以免失去混合动力汽车的市场。近年来,燃料电池汽车作用远景的理想环保的交通工具,燃料电池的开发也成为国内外的热点。高能量密度燃料电池的低成本化、高可靠性是主要的突破目标。我国设立了“十五”国家 863 计划电动汽车重大专项。该专项的任务是建立燃料电池汽车产品技术平台,实现混合动力电动汽车的批量生产,推动纯电动汽车在特定区域的商业化运作,支持北京绿色奥运车辆的研发和应用示范,为我国在 5-10 年内实现电动汽车的产业化奠定技术基础。电动汽车产业将带动如电机驱动逆变器,能量管理双向 DC/DC 变换器,辅助电源,充电器等电力电子产品的需求。电动汽车应用的电力电子产品在技术层面需突破功率密度、电磁兼容、可靠性等的关键技术。

图 3 混合型电动汽车的结构

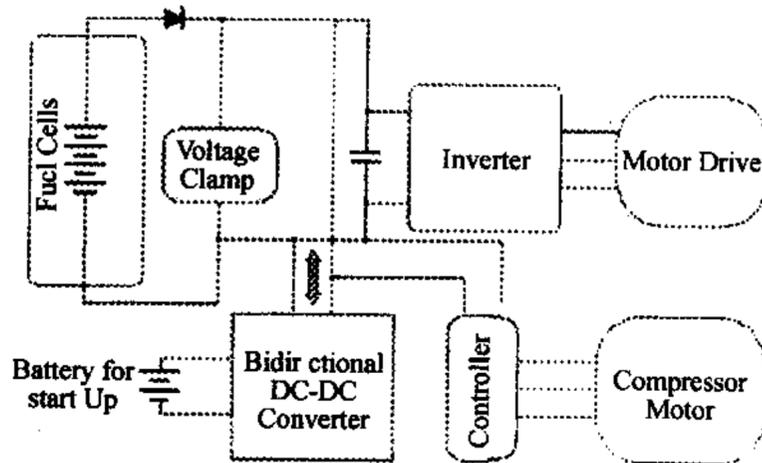


图 4 燃料电池电动汽车的结构

### 5 42V 汽车供电技术

目前汽车采用 14V 供电系统,但由于汽车中的电子设备逐年增加,电能消耗平均以 100W/年增加,如图 4 所示。根据汽车配置

的不同,电能消耗已达 2kW-4kW。为适应日益增加电功率的需求,美国麻省理工学院牵头成立了 MIT 论证委员会,提出了 42V 汽车供电的方案。美国,日本,欧洲等各大汽车公司已达成开发 42V 汽车供电系统。由于车载电子设备如照明将继续采用 12V 电压,因此,42V 汽车供电系统将采 42V/12V 混合供电方案。42V/12V 混合供电方案可分为两种:集中 42V/12V 变换方案和分散 42V/12V 变换方案。集中 42V/12V 变换方案相应需要开发千瓦级的 42V/12VDC/DC 变换器模块;分散 42V/12V 变换方案需开发多种小功率 42V/12V DC/DC 变换器模块。42V 供电的方案需解决电压从 14V 提高到 42V 所引起的漏电和电弧问题、解决 DC/DC 变换器高频开关工作而引起的 EMI/EMC 问题以及 DC/DC 变换器的低成本化问题。

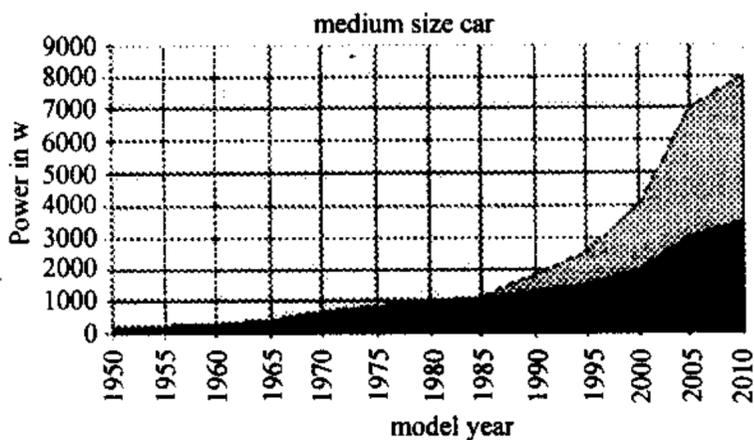


图 4 汽车电功率逐年增加的预测

## 6 电力市场

目前在国际上正在进行一场解放电力系统的革命,即电力市场(Deregulation)。英国已成功地实现了电力市场,我国与美国、日本、欧洲等国正在推进这一改革。电力市场的概念是将发电方与供电方相分离,发电方与供电方从垄断走向社会化。通过引入竞争,促进供电质量和水平提高,降低电价。电力市场将促进分散供电系统的发展,可大幅度的减少电力输送的能耗,同时提高了电力系统的安全性。有利于能源的多样化的实施,对国家安全有利;有利于采用再生能源、环保发电技术。从技术层面来讲,电力市场的引入将出现按质论价的电能供应方式的出现,产生对电力品质改善装置,如 UPS、SVC、SVG、DVR、APF、限流器、电力储能装置、MICRO GAS TURBO 等新需求;再生能源、环保发电技术等分散发电将需要大量的交直流变流装置。电力市场将是 FACTS 技术全面应用成为现实,带动 HVDC、BTB、UPFC 等电力电子技术的应用。

## 7 IT 产业要求

根据日本资料预测,到 2010 年,由于 IT 技术的应用,办公设备的电力消耗剧增,汽车、家电的电能消耗也将显著增加,而工业用电变化不大,如图 6。因此,开发为 IT 设备供电的高效率电源前途良好。

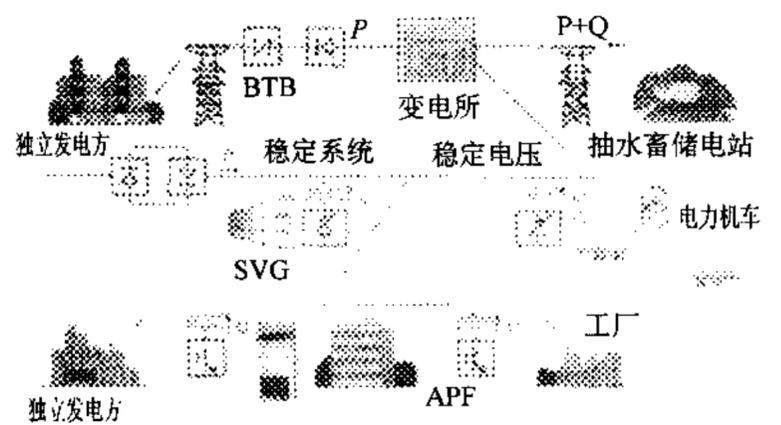


图 5 应用 FACTS 技术的电力系统

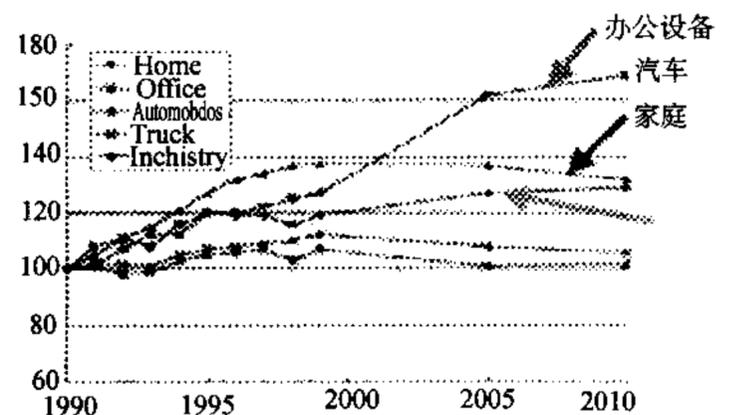


图 6 能源消耗逐年增加的预测

INTEL、Compaq 先后提出了下一代 PC 机分布式供电的方案(DPS),如图 7。INTEL、Compaq 的方案基本结构相同,均由 PFC、DC/DC、分散式安排的 DC/DC 模块组成。这种结构提高了供电的质量和效率,克服了目前 PC 电源对电网的谐波和电磁兼容问题。同时也适应 VLSI 芯片的低压大电流的需要。根据集成电路制造技术发展趋势,2005 年将采用 0.03u CMOS 工艺,处理速度达到 10GHz,芯片集成的晶体管数目达 3 亿,而供电直流电压将降到 0.5V~0.8V,功耗约 80~140W,电流峰值达 150A, di/dt = 1000A/us。这将对供电电源提出严峻的挑战。

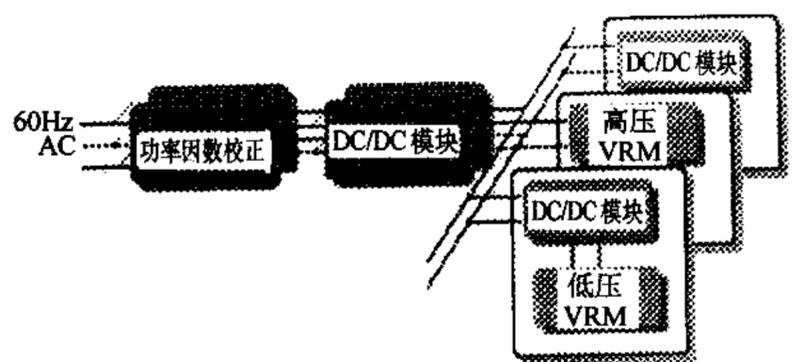


图 7 分布式供电的方案

随着 3G 的采用,手机的功能大量增加如:MP3 player, PDA, 照相等,电能消耗也增加,手机电能的管理控制芯片的研究开发也有很好的前景。

NNT 为提高智能大楼的供电效率,发展了直流供电系统方案。该方案计算机采用直流供电,减少了 IT 装置的中间变换环节,提高供电效率。

(下转第 26 页)

2197 – 2202.

[16] X.D. Xue, K.W.E. Cheng and S.L. Ho, "An Algorithm for Solving Initial Value Problems of Multiphase Switched Reluctance Motors Taking into Account of Mutual Coupling", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 30, No. 7, July 2002, pp. 637 – 651.

[17] X.D. Xue, K.W.E. Cheng and S.L. Ho, "Simulation of Switched Reluctance Motor Drives Using Two – dimensional Bicubic Spline", *IEEE Tran. Ene Con.* Dec 2002.

K.W.E. Cheng graduated from the University of Bath, UK, and obtained his PhD in 1990. He has been the project leaders and principal engineer of Lucas Aerospace Ltd., UK. He joined the Hong Kong Polytechnic University in 1997 and he is now an Associate Professor. His research interest is all aspect of Power Electronics and Drives. He has received the IEE Sebastian Z De Ferranti Premium Award in 1995 and Outstanding Consultancy Awards of the Hong Kong Polytechnic University in 2000. He has published more than 100 papers in international Journals and Conferences. He is now the director of the Power Electronics Research Centre of the Hong Kong Polytechnic University.

[18] W.N.Fu, S.L.Ho, H.L.Li, H.C.Wong, "A multislice coupled finite – element method with slice length division for the simulation study of electric machines", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 39, Issue 3, May 2003, pp. 1566 – 1569.

[19] T.F.Chan, L.L.Lai, "Single – phase operation of a 3 – phase induction generator with the Smith connection", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 17, Issue 1, March 2002, pp. 47 – 54.

N.C.Cheung obtained his BSc, MSc, and PhD from the University of London, University of Hong Kong and University of New South Wales in 1981, 1987 and 1996 respectively. Before he rejoined the Polytechnic University, he worked for 2 years as a Technical Manager at ASM Assembly Automation, in the areas of intelligent motion control and robotics systems for semiconductor manufacturing. Dr Cheung is a Chartered Engineer, and a member of IEE and IEEE. He is the holder of 2 industrial patents and has published numerous papers in his research areas. He is the recipient of the 1995 IEEE award for the second best paper in the Industry Applications Society.

(上接第 35 页)

## 8 结语

电力电子技术在推进 20 世纪人类科技发展中发挥了辉煌的成就。21 世纪电力电子技术将在建设一个更环保、更美丽、适合人类生活的地球中将发挥不可替代的作用,同时,对电力电子科技工作者和实业家提供机遇和挑战!

### 参考文献

[1] E.Masada, "power electronics in industrial strategy for modern society", PCC' 2002, Osaka, April, 2002

[2] F C Lee, "Power Electronics: Trends and opportunities", proceedings of the 5<sup>th</sup> Hong Kong IEEE workshop on switch mode power supplies,

June, 2002, Hong Kong.

[3] C. C. Chan, "The challenges and opportunity in the new century: clean, efficient and intelligent electric vehicles", delta power electronics seminar, June, 2002, shanghai, China.

[4] Tatsuo Teratani, "Status and future view of automative power supply", *The Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol. 122, no. 6, June, 2002.

[5] Dennis Monticelli, "System Approaches to Power Management", APEC' 2002, Mar, Texas, USA

[6] 郑丹星等, 环境保护与绿色技术, 化学工业出版社, 北京, 2002 年 5 月。