编者按—

电力电子技术是一门非常活跃，不断变化和发展的新学科，几乎每隔5年学术界就会有一次关于电力电子发展趋势或前景展望的大讨论，国内外都不例外。近来围绕‘十一五规划’，国内已有不少学者提出电力电子基础研究或应用研究的发展方向问题。2004年春，欧美电力电子专家在意大利举行的第五届FEPPCON研讨会，讨论电力电子及其应用的中长期发展前景，会议总结先后在2005年IEEE两个专业会刊(Industry Application，Power Electronics)上发表，引起人们的兴趣和重视。北京电力电子学会将于2006年内举办论坛，专门讨论电力电子及其应用发展的问题。为配合该论坛的召开，本刊编辑部特别邀请清华大学蔡宣三教授在专家点评专栏发表对FEPPCON-5会议总结的评述，并简要介绍FEPPCON国际研讨会的情况，供广大读者和电力电子界同行参考。

FEPPCON研讨会与电力电子的未来展望

The FEPPCON Workshop and the Future Development of Power Electronics

清华大学 蔡宣三

摘　要：2004年5月在意大利举行的第五届FEPPCON国际研讨会上，近40位欧美电力电子专家、学者和工程师讨论了电力电子及其应用的中长期发展前景，包括以下主要问题：电力电子和系统、系统集成、储能技术、分布式电力系统和电动(或混合电动)汽车中电力电子的应用、计算机及其它用途的标准电源模块、电力电子装置性能的改进(智能控制、能量管理、热问题、无源元件集成等)。本文摘要介绍FEPPCON国际研讨会并评述FEPPCON-5的讨论和总结。

关键词：电力电子　功率处理　功率变换　发展前景

Abstract: At the fifth FEPPCON Workshop held in Italy during May 2004 about 40 academics and engineers of power electronics from Europe and USA discussed the medium and long-term future of power electronics and its applications, including the following main issues: power electronics and systems system integration, energy storage , applications of power electronics in distributed power systems and electric cars and hybrid electrical vehicles, improving performance of power electronics (intelligent control, energy management, thermal issue, passive components integration, etc). This paper presents a short introduction of the FEPPCON and review of the discussion summary of the 5th FEPPCON Workshop.

Key words: Power electronics Power processing Power conversion Future development

1　引言

1.1 背景

“电子功率处理和变换的未来”研讨会(Future of Electronic Power Processing and Conversion Workshop，以下简称FEPPCON)是一个小规模欧美电力电子专家的专题研讨会。在IEEE工业应用(IA)汇刊2005年第1期专题(Special Feature)一栏，发表了第五届FEPPCON研讨会(以下简称FEPPCON-5)的学术讨论总结--‘电子功率处理与变换的未来展望’[1]。这篇重要文章，由四位IEEE Fellow署名。汇刊编辑部还专门写了编者按语指出：这是一篇有特色的专题论文(Feature article)，是国际著名专家们讨论电力电子未来发展的重要技术结论。IEEE工业应用学会是FEPPCON-5的技术支持合作(Co-sponsor)单位之一。

接着，IEEE电力电子(PEL)汇刊2005年第3期以专题转载论文(Special Reprint Feature)的形式全文刊登

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

了这篇文章，编者按语中说明：IEEE电力电子学会也是FEPPCON-5的技术合作支持单位，为满足IEEE电力电子学会会员和电力电子汇刊广大读者的需求，再次发表。

该文的四位作者是：丹麦Alarbog大学教授Dr.Frede Blaabjerg，意大利Catania大学教授Dr.Alfio Consoli，荷兰Delft大学教授Dr.J.A.Ferreila和美国Virginia州立大学教授Dr.Daan Van Wyk.他们都是国际知名的电力电子学者，IEEE Fellow，也都是FEPPCON-5指导委员会成员，前两位还是FEPPCON-5程序委员会主席。

国内曾全文发表过该文的译文[2]。

1.2 功率处理(Power Processing)的含义

FEPPCON的汉译全名是："电子功率处理和变换的未来"。这里用了"功率处理"一词，有其历史原因：在60年代初电力电子技术发展的早期阶段，人们认为：微电子技术的功能是信号处理(Signal Processing)，与之不同的是，电力电子技术的主要功能是"功率处理"(Power Conditioning或Power Processing)。R.D.Middlebrook教授(美国加州理工学院)1981年曾给出功率处理的定义[3]：将电能从某个电压，电流或频率变换为另一个电压，电流或频率。John G. Kassakian教授(美国麻省理工学院)在1991年主编的电力电子教科书中也对电力电子的功能作如下定义[4]：电力电子电路的原理是处理能量，将电能从源端提供的一种形式变换为另一种满足负载需求的形式。可见"功率处理"和"功率变换"有相同或相近意义。

1973年以后，国际电力电子学科逐步形成，功率处理一词人们用得比较少了，得到广泛应用的是电力电子变换技术或电力电子技术。但国际上仍有一些年长资深学者喜欢用电子功率处理一词代替功率电子变换一词。

需要说明的是，Power Electronics可以译作电力电子学或电力电子技术。主要看用在什么地方。本文主要译作电力电子技术，简称电力电子。

综上所述，FEPPCON似应译作"电力电子技术的未来展望"，较符合当前人们的习惯用语。

1.3 关于FEPPCON

第一届FEPPCON举办以来，迄今已有15年历史。这个研讨会每隔3-4年举办一次，已形成系列研讨会。1991、1994、1998年分别在南非的Karos Lodge、Berg-En-Dal，和Skukuza举行。2001、2004年均在意大利西西里北部的Salina小岛上举行。FEPPCON-5为期约4天，到会的有近40位欧美电力电子专家、学者和工程师

2 FEPPCON-5的主题讲演(Keynote presentations)

来自美、加、德、意、瑞士、西班牙的八位专家学者，就电力电子在电力系统和交通运输业应用的长期发展远景和中期发展前景、电力电子在汽车和消费电子中的大量应用等课题发表了主题讲演，其中包括：

(1) 新能源中电力电子的未来发展和应用展望。

(2) 氢社会中电力电子在分布式电力系统中的作用。

(3) 工业和交通运输业的高压电力电子器件和中压变频器的现状和发展趋势。

(4) 可持续发展的储能技术。

(5) 应用于牵引的下一代电力传动和储能技术。

(6) 电力系统中的电力电子应用，存在什么问题？何时形成市场？

(7) 电力电子将在汽车中大量应用。

(8) 电力电子大量应用于CPU和便携式电子设备。

FEPPCON-5还讨论了全球电力电子研究的使命和经验，介绍了国际三个电力电子中心：美国电力电子系统中心(CPES)、欧洲电力电子中心(ECPE)、美国电力电子研究中心(PERC)。FEPPCON-5也回顾了过去四届论坛的讨论和预见是否正确的问题。

3 FEPPCON-5讨论的问题

在各分组主题讲演以后，与会专家主要讨论以下5个热点问题：电力电子与系统、储能系统、电力系统和汽车中电力电子应用、应用技术等的未来发展和面临的挑战。还讨论了大学教育和工程师培训问题。原文涉及的范围很广，要求知识面也很宽，本文仅摘要介绍其中一些主要论点，以飨读者。

3.1 电力电子和系统

3.1.1 电力电子和系统的相关问题

会议分析了电力电子技术三个层次(元件、电路和系统)的发展现状，值得注意：

(1) 元件—半导体器件是电力电子技术发展的主要推动力。

(2) 电路拓扑—拓扑已受到很大关注，电路技术已经成熟。除大功率外，电路的发展几乎已停滞。但随着半导体器件的发展，电路还可能有需要研究。

(3) 系统—现在需要人们给予更多注意，如系统性能、控制、系统集成、成本和可靠性等都是重要问题。

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

会议认为：过去30年，变换器的基本原理和技术没有很大变化，工业部门正在设法降低变换器成本，通过电路优化提高其功率密度。许多制造商已将工厂转移到劳动成本低廉而有生产能力的地区。面对降低生产成本的压力，建立了许多技术标准，已很难用增加成本为代价以改进技术。

会议指出，电力电子应用于系统，首先要更好理解电力电子在系统中的作用。电力电子是一种使能实现的技术，起支持作用。不能靠电力电子技术本身指定其新发展，未来电力电子的发展主要靠市场推动。目前更需要功率处理（功率变换）的系统集成。

会议强调：电力电子界专家的思考范围太窄，似乎难于将知识集成在一起。一个明显例子是可靠性问题，人们还不知道如何处理该问题，如果可靠性能够量化，并可控制，则电力电子可以很快在电力系统中推广应用。

3.1.2 电力电子系统的未来发展和面临的挑战

为使电力电子能起更大作用，应在各种场合实现智能、巧妙和有效的功率处理。电力电子可以在电力系统和机械电子系统中得到应用。

关于教育的看法，也引起人们的广泛兴趣，例如：

（1） 特别需要振兴大学电力电子教育，因为老工程师退休后，接班人却还没有培训好。如果不抓紧抓好这件事，就不能适应电力系统应用的挑战。电力电子是一门非常活跃的学科，很吸引学生的兴趣，电力电子教育计划应当对电力工程的需求有所贡献。而现在电力电子教育并没有很好调整到与电力电子发展相适应的状态。

（2） 电力电子工程师的教育需要更宽的基础，包括机械、电化学，以及常被忽略的热传送、热疲劳等问题。例如，若能改进热管理，而不是简单地提高变换器效率，就可能提高其功率密度。

（3） 未来电力电子工程师的教育应当是多学科训练，培养学生成为有多种才能的人(Generalist)。

3.2 储能技术

3.2.1 与储能相关的问题

大量应用新能源需要新技术支持，如可靠的电力电子接口、新的控制方法、储能技术等。现在大容量储能系统尚未实际解决，有人提到：正在试验一种高效、长寿命、无污染的油-充气式(Oil & pneumatics)大容量储能系统。

储能容量为几个kW·h时，可用超容电容。它很适合应用于小型摩托车和柴油发电机组，从而可减少柴油机的尺寸。超容电容的可靠性已有提高，成本也下降了。可以应用于城市有轨电车的供电站。

3.2.2 储能技术的未来发展和面临的挑战

（1） 氢经济为电力电子长期发展提供良好机遇，也提供了许多储能设施。

（2） 电力系统中抽水蓄能装置与储氢相比，效率高，技术成熟，而且经济。但受到地理地域的限制。储能系统可以在电力系统瞬态过程中使子系统解耦。

（3） 超容电容在汽车中应用，是吸收制动能的理想设备。过去5年，其能量（功率）密度已提高了5倍。

3.3电力电子在电力系统中的应用

3.3.1 与电力系统中应用相关的问题

近年来由于全球几次大停电，电力系统引起人们更多关注。电力电子可提高发电、输电及配电系统的效率，但现在电力电子还没有进入市电(Utility)市场。电网建设的关键是降低成本，现有电网的控制能力、通讯能力和自动化水平还太低。对未来电网的要求是：快速响应、容错、动态和静态可控、能效高。

提高电能质量是电力电子应用的一个重要机遇，它有助于提高工业生产率。

3.3.2 在电力系统中应用的未来发展和面临的挑战

（1） 未来的电力系统包括分布式子系统和分布式储能系统，电力系统对每个子系统应能有效控制，各子系统间的信息交换要快。

（2） 电力电子进入电能质量市场要解决由谁投资的问题，可先在小型电网（轮船、飞机、汽车）中推广应用。

（3） 在电力系统中用电力电子限制输电及配电系统发生重大事故是很重要的。

3.4汽车中电力电子的应用

3.4.1 与汽车中应用相关的问题

电动汽车和混合电动汽车降低燃料消耗，但目前用户需求并不迫切，因而还不能大规模推广。新一代丰田Prius汽车的成功开发，是一个重大事件。用户喜欢有许多电力电子的电动汽车，因而Prius汽车的产量可观，这一成功经验激励竞争者进一步研发。Prius汽车的碰撞试验结果说明其可靠性高。但由于电池电压高，发生故障时的安全问题仍不应该忽视。近年来电池的可靠性和寿命仍存在问题。

3.4.2 汽车电力电子未来发展和面临的挑战

（1） 汽车中推广42V电网，可以用更多电力电子，但42V电网的前途并不明朗。

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

(2) 迫切需要降低汽油消耗，长远看应当使用其它能源。

(3) 并不期望燃料电池车在2020年前系列生产。应开发更好的电池系统，时机成熟时，可以取代电动汽车中的燃料电池。

3.5 应用技术

会议认为，在汽车、电力系统和电子电源中的应用是电力电子发展的动力，预计电力电子的应用市场会有很大增长。分析了电力电子在可再生能源和电子电源中的应用的相关问题。

3.5.1 与可再生能源相关的问题

(1) MW级功率的风力发电系统有明显的经济优势。电力电子变换器和风力发电机的功率/重量密度是制造MW级风力发电系统的制约因素。

(2) 分布式发电系统联网是一个主要的技术问题。

(3) 太阳能光伏板与建筑物屋顶结构的集成问题。

(4) 有机光伏晶片(Organic cell)虽不如现有晶片可靠，但成本可下降10%，并且比较美观。

这一技术在十年内还是很经济的。

(5) 建立燃料电池发电站是可行的，但不适合开发住宅(家庭)燃料电池发电系统。

3.5.2 与电子电源相关的问题

应用电力电子技术可使负载节能，提高效率，但有下述问题值得注意：

(1) 分布式电源与电网的相互影响问题，如高频谐波注入电网问题是没有预计到的。

(2) 计算机、通讯设备和各类带电池设备的充电器等的电力消耗可观。

(3) 设计满载和轻载时高能效(Energy efficiency)的电源。

(4) 消费电子和各种家用电器的能效问题。

(5) 考虑输入能源、DC/DC变换器和负载间相互影响的能量管理问题

有些问题在技术上已有很大进步，如：低压大电流DC/DC变换器、多相变换器控制的集成、混合封装或单片形式的功率器件与驱动电路的集成、标准化模块等。

3.5.3 电子电源未来发展和面临的挑战

(1) CPU电源管理(Power management)系统的开发已近尾声，包括用小的燃料电池、标准模块、先进封装、系统集成等。同步buck变换器已成为多相CPU电源的标准解决方案，这一方案应用于其它大功率场合的可能性也是人们感兴趣的。除非系统概念有根本变化，否则CPU技术的发展不能持续。问题是未来微处理机电源管理有没有一个长期技术路线？

(2) 低压电容器技术和无源元件的集成等是重要问题。集成磁元件嵌入到印刷电路板已得到验证，但封装过程中电容器的集成还是问题。

(3) 用现有技术提高功率密度受到热的限制，需要更好的热管理技术，无论是无源元件的集成还是系统的集成，热问题都是非常重要的。

4 对前四届FEPPCON的回顾和总结[5]

在FEPPCON-5研讨会最后，美国Virginia州立大学教授Dr.Daan Van Wyk回顾总结前四届FEPPCON(1991、1994、1998、2001)讨论的问题和结论，他的主题讲演题目是："回顾前四次研讨会，我们的预测正确吗"？Dr.Van Wyk的结论是：

(1) 虽然对电力电子新技术未来发展趋势的分析，大多数情况是正确的，但实际应用的速度却比原来期望的要慢得多。

(2) FEPPCON研讨会的形式可以鼓励人们自由地有创新性的讨论和思考，提出新观点。

(3) 这种会议形式应当继续进行下去。

下面摘录Dr.Van Wyk对1991、2001两次会议的回顾和总结。

4.1 FEPPCON-1(1991)

FEPPCON-1在1991年夏举行，是欧美第一次讨论这一重大课题的研讨会，有其时代特征，需要对20世纪90年代世界电力电子发展战略做一个展望。因此是一次意义比较大的研讨会。

4.1.1 FEPPCON-1讨论内容

有15位专家分别就下列课题做了讲演。

(1)电力电子的未来发展：能源、工业/制造、商用/住宅、交通、宇航、汽车、大功率应用等。

(2)电力电子的未来技术：电力器件、无源元件、拓朴、控制/仿真、封装/制造、电力传动等。

(3)教育：未来的电力电子专家。

4.1.2 FEPPCON-1讨论的结论

(1)电力变换器的成本高，限制了它们适用于各种功率等级。

(2) 未来的电力电子需要在集成、封装、可靠性、

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

降低成本等方面有新的成就。

(3) 未来10年内电力电子在汽车中将广泛应用,特别是内燃机的控制和辅助设施。

(4) 未来10年在集中式电力系统中将有新的应用。

(5) 商用与住宅中的应用:热风空调、感应式电锅、医用、照明、计算机电源等。

(6) 大电流高电压器件的进展影响牵引应用。

(7) 大功率变换器的未来应用:在不能兼容的电力系统之间进行连接和联系、直流电弧炉、动态电网(无功)补偿装置、大功率短距离输电、可移动设备。

(8) 未来环境的要求:电力电子废品的回收处理、电磁兼容。

(9) 电力传动将以交流为主。

(10) 未来工业需要大量生产集成电力电子模块。

4.2 FEPPCON-4 (2001)

FEPPCON-4是21世纪开始时举行的一次研讨会,肩负着对21世纪第一个十年内电力电子技术发展的战略瞻望。

4.2.1 FEPPCON-4讨论的内容

讨论的课题有:器件与封装技术、系统级技术和高水平集成、汽车电力电子、可调速传动、消费电子技术(包括计算机)等。

4.2.2 FEPPCON-4的结论

(1) 小功率系统中应用:由于要求电力电子小型化、可靠性和高性能,要继续发展电力电子集成,使成本最低。

(2) 很大功率系统中应用:考虑大功率系统的费用、效率、灵活性和电磁兼容,要发展电力电子标准模块。

(3) 中等功率系统中应用:全系统集成在下述各方面仍然有发展余地:成本、功率模块、控制与传感、可靠性、无源元件、提高性能等。

(4) 在许多应用场合需要快速储能,目前超容电容是5kW·h以下最好储能方式。未来10年内将继续考虑其它储能方案的选择。

(5) 智能化电力传动技术的发展。

(6) 分布式发电系统(又称Power-net)是中大功率电力电子应用的推动力。人们关心电力安全和电能质量问题。

(7) 电子电源设计制造的重点转移到功率管理系统上, 功率管理和能效仍有许多改进余地。

4.3 回顾前四次FEPPCON,提出的问题

(1) 从FEPPCON-1起,下列问题已列入各次研讨会的讨论议程:费用(成本-效益)、改进性能、增加新的应用领域(增大市场份额和规模)、封装/集成/模块化等问题,作为未来电力电子发展的设想。

但是这些问题真的很受欢迎吗?

妨碍它们进展的原因是不是缺少对集成电力电子系统的足够充分的预见性呢?

(3) 其它领域,如人工智能、传感、通信等,是不是未来电力电子发展的重要动力?

我们是否过高地估计了这些领域的影响?

哪些应用真正需要电力电子作为一种使能实现的技术或推动技术?

(4) 总之,从多学科角度理解系统问题,在各种系统(储能、电力系统、汽车系统)中实际应用电力电子的可能解决方法,并产生效果,可以推动电力电子技术发展的下一个高潮。

[附注]1994和1998两次会议,还有两个讨论热点值得注意:

(1) FEPPCON-2(1994)曾提出SiC器件在10年内仍是重要的研发课题,但在以后的FEPPCON会议就基本不再提及。

(2) FEPPCON-4(1998)曾讨论人工智能在电力电子中应用问题,包括:专家系统、神经网络、模糊逻辑、自适应控制等。

致谢:在本文写作过程中,承清华大学杨耕教授协助收集资料,并提出宝贵意见,谨表谢意。

参考文献

[1] The Future of Electronic Power Processing and Conversion.IEEE Transactions on Industry Application,Vol.41,No.1,Jan./Feb., 2004,3-8

[2] 电力电子处理和变换的未来(付青译.杨耕校),电力电子论坛论文集,2005.第2集,25-29

[3] R.D.Middlebrook.Power Electronics: An Emerging Displine,1981,Advances in Switched-mode Power Conversion,11-15

[4] John G. Kassakian et.Al., Principles of Power Electronics,1991,Addison-Wesley Publishing Company,Inc.

[5] http://www.does.unict.it

作者简介

蔡宣三 男 清华大学教授,IEEE Fellow。

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