

基于仿生学的电力电子系统分散自治控制

胡磊, 何湘宁

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

DECENTRALIZED AUTONOMOUS CONTROL OF POWER ELECTRONICS SYSTEM BASED ON BIONICS

HU Lei, HE Xiang-ning

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: It is a new way to improve the reliability of power electronics system by decentralized autonomous control, which inspired from the human body system. The paper introduces recent research on power electronics system integration, which is strongly related to the power electronics cell. A laboratory prototype of power electronics cell was constructed by discrete components and the experiments verified the method of decentralized autonomous control.

KEY WORDS: Power electronics; Decentralized autonomous control; Bionics; Power electronics integration; Module; Power electronics cell

摘要: 从仿生学的角度出发, 模仿人体系统分布自治控制的特点, 复杂电力电子系统的可靠性有望得到提高。电力电子细胞是对应于人体细胞的电力电子系统的最小单位, 与电力电子系统集成模块具有很强的联系, 该文介绍了电力电子系统集成国内外发展现状, 进一步重点研究用分立器件构建的分散自治模块, 构建的实验室原型可以方便的组成若干功率变换器, 实验结果表明以这种模块为基础的分散自治控制是可以实现的。

关键词: 电力电子; 分散自治控制; 仿生学; 电力电子系统集成; 模块; 电力电子细胞

1 引言

电力电子是一门比较成熟的学科, 但是在电力电子产品的实际设计和制造中仍然存在着很多难题, 如电磁干扰、散热等, 这造成了设计调试困难, 开发周期长等问题^[1-2]。为了解决这些问题, 人们从多个角度进行了探索, 比如电力电子系统集成研究。如果从仿生学原理出发, 可以通过借鉴生物系

统的特点构造电力电子系统, 达到提高其可靠性的目的, 本文是从这个角度出发讨论相关的问题。

2 分散自治控制的思想

2.1 传统控制及发展趋势

传统的电力电子变换器采用集中控制的结构, 一般可以将电路分为主功率部分和控制部分。主功率部分由有源开关、无源开关和无源滤波器件等组成, 是电能转换的执行部分。而控制部分则执行信号检测和反馈补偿等功能, 产生对主功率电路的控制信号, 控制部分对有源开关的控制通过一定的驱动电路实现。单单考虑变换器本身, 对大多数变换器来说, 集中控制结构是一种简洁高效、易于实现的结构。但是, 电力电子技术发展到今天, 变换器控制技术具有了一些新的发展趋势。

近年来数字控制技术在电力电子变换器中的应用得到了迅速发展, 这主要是得益于微处理器的性能提升和成本降低; 随着这种趋势的加速, 数字控制将会越来越多地取代模拟控制方式。另一方面, 数字控制的大量应用, 必然会刺激微处理器的发展, 伴随而来的是成本更低、功能更强的产品出现。

电力电子产品的控制结构可能向两个方向发展。一个方向是由一对一的控制结构向一对多的控制结构发展, 如果一个系统中有多个变换器, 采用传统控制方式时需包含相应数量的控制芯片(组), 但是如果采用一个功能强大的微处理器, 多个变换器可以由同一个微处理器进行控制。另一个发展方向是控制功能向功率器件(或模块)转移。第一种发展方向比较符合现存的条件, 因为只需要将原来模拟控制的功能用微处理器代替即可。而向第二种

基金项目: 国家自然科学基金项目(50277035)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50277035).

方向发展则比较困难,因为这需要功率器件的重新设计,存在很多技术上的难点,但是这种趋势也是已经有所体现,比如 Topswitch 和智能功率模块(IPM)等具有了初步的雏形。

2.2 分散自治控制的概念和特点

不管是传统的控制方式还是一对多的控制方式,都是集中控制结构。集中控制结构存在一些问题,尤其是在比较复杂的系统中更加突出。其中最大的问题是容错性差,集中控制器出现故障将导致整个系统崩溃。其次,系统设计困难,因为从控制电路经驱动电路到功率电路存在一条较长的信息传递通路,而在功率变换器中,控制信号受功率电路干扰是非常严重的。所以整个从控制到功率电路的设计和调试都很困难,需要有经验的专业人员才能完成,并且整个开发的周期也很长。

对于一个比较复杂的系统,如果把控制的功能分散,将基本控制、采样、驱动、保护与功率器件进行集成,在模块内部解决 EMI 和寄生参数等问题,则现阶段电力电子变换器设计中碰到的大量问题将不复存在,设计人员的主要精力可以集中于拓扑选择、系统参数设计、结构设计和控制方法的实现等。系统中的各个功率器件(组)分别具有各自的控制部件,从而可以实现功率器件(组)的分散自治控制。

从仿生学的角度来看,具有分散自治控制功能的电力电子系统与人体系统具有一定的相似性。众所周知,人体系统是一个非常复杂的系统,但是也是非常精确且可靠的系统,这与其分层递阶的结构以及分散自治控制的特性是分不开的^[3-5]。可以预期:具有相似的分层结构及分散自治功能的电力电子系统,即使非常复杂,也能是精确和可靠的。

2.3 分层递阶控制结构

对于人体系统来说,由处于最小单位的细胞构成组织,再由组织构成器官,由器官构成系统,进而组成人体。对于每层的子系统来说,一方面受到上层系统的控制,另一方面又具有相对的独立性和自治性。与此对应,分层自治的电力电子系统也具有相应的结构和特点。集成了控制等功能的功率器件(或模块)是组成电力电子系统的最小单位,与人体细胞对应,因此也被称为电力电子细胞^[5]。在分层结构中,整个系统的控制器对功率器件(或模块)的控制是间接的,就像人脑不直接控制细胞的行为一样。系统级别的控制专注于系统功能的实现,

比如实现整体功能协调和人机界面等。而电力电子系统里的最关键部分,即变换器是由相似的一组功率器件(或模块)有机组成。

在人体系统中,有一个很重要而有趣的现象,那就是由低层子系统组成高一级的子系统,有时候并不存在一个专门的控制部分,比如由大量细胞组成的表皮组织。这种结构下系统具有最大限度的容错能力,任何一个低层子系统的损坏对系统本身几乎没有任何影响。如果存在类似的电力电子系统,那对低层子系统的要求是很高的。首先子系统的自身功能必须由自己的控制器完成,而不是依赖于一个集中控制器;其次,虽然各个子系统是根据自己所能得到的信息对自己的局部行为进行调整,但产生的效果却是整个系统特定功能的实现;再次,各个子系统之间必须是弱耦合的,即使出现了个别的故障,也不会影响其他的子系统。

3 电力电子细胞及其组成的系统

3.1 电力电子系统集成

从上一节的分析可以看出,要实现具有与人体系统类似的特性的电力电子系统,具有智能控制特性的功率器件(或模块),也就是对应于人体系统中的细胞的电力电子系统最小单位是最基本的。虽然智能功率模块(IPM)具有一定的自控能力(比如发生故障时的自我保护等),但其智能与要求的程度还有很大差距。而近若干年来研究比较多的电力电子积木(PEBB)或者是集成电力电子模块(IPEM)则比较接近要求的智能功率器件(或模块)。

由于现存的功率变换拓扑种类十分繁多,电力电子集成的研究者希望能够找到少数的若干种结构进行标准化,由这少数几种类型的标准模块组成尽量多样的电路^[6-8]。图1中所示电路为一些具有代表性的拓扑。

PEBB 器件集成技术的研究与器件制造技术和制造工艺方面的联系紧密,而这是研究中最为关键性的技术,文献[9]等对这个方面进行了研究。研究的另外一个方面是针对 PEBB 组成的系统的研究。最初研究的一个系统是用于海军舰艇上的分布式电源系统(DPS)^[10]。PEBB 模块还被用于其他方面,比如文献[11]等提出的在电力系统中的应用。

为了实现其标准化和易拓展性的性能,现在所提出的 PEBB 模块中一般都包括了微处理器,而 PEBB 与外界的信息交换也是通过数字通信接口进

行的。在此基础上，文献[6, 12-14]等提出了一些适用于 PEBB 构成的系统的控制结构。

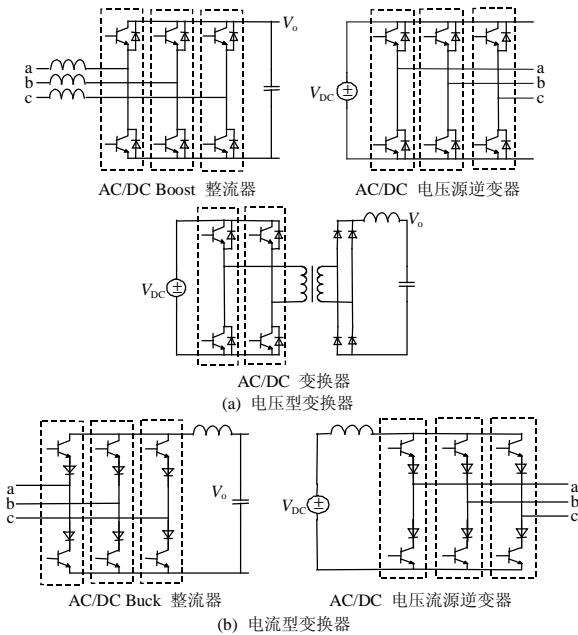


图 1 具有代表性的一些拓扑结构
Fig. 1 Several typical topologies

3.2 电力电子细胞的特点

电力电子细胞与 PEBB 的研究的对象都是通过功率集成来实现的，因而具有很多的相同之处，但是它们也存在一些不同。

在控制方面，电力电子细胞本身的自治控制是实现高可靠性电力电子系统的基础，与 PEBB 不同，电力电子细胞更侧重于模块的智能化程度，在 PEBB 中集成的控制器作用相对较小，如果不是需要提供一个标准化的数字接口，实现 PEBB 的概念，很多情况下数字控制器并不是必须的。而电力电子细胞中的控制器要求功能比较强大，这种功能是实现智能化和分层自治控制的要求。超大规模集成电路的迅速发展使得在功率模块中集成一个功能强大的微处理器或者数字信号处理器的可能性大大增加。

在实现的目标方面，虽然两者都导致功率电路设计难度降低。但 PEBB 的目标是形成一个系列的标准化产品，使得设计和生产功率变换器变得非常容易实现。虽然标准化结构可以简化系统构成，但电力电子细胞并不将标准化方面作为研究重点。

3.3 电力电子细胞基本结构

虽然可以作为电力电子细胞的功率器件（或模块）结构是多种多样的，但本文仍然以桥臂结构进

行讨论。模块的结构如图 2 所示，其功率部分以两个有源开关和两个无源开关（二极管）构成了一个适用于多种拓扑的桥臂结构，也就是图 1 中的电压型变换器拓扑的一个桥臂。这里，我们也从其功能特点的角度出发将这种模块称为分散自治模块，或简称为自治模块，它的其他部分介绍如下。

(1) 局部控制单元

局部控制器的功能在前面所指的微处理器或者 DSP 中实现，它是电力电子细胞的指挥中心，其结构如图 3 所示。从传感器采集的信号通过 ADCs 转换为数字信号，传送给 PWM 控制器。PWM 控制器实行一定的算法产生开关管的门极控制信号。

为了应用的灵活性，开关管也可以通过两种方式由上一层的控制器控制。一种是直接由上层控制

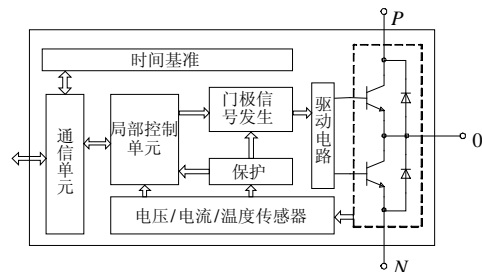


图 2 分散自治模块结构框图

Fig. 2 Block diagram of FDAM

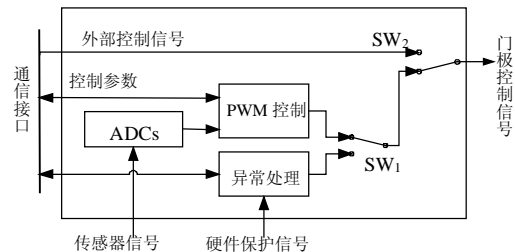


图 3 局部控制单元结构

Fig. 3 Structure of local control unit

器产生门极信号，经由开关 SW2 直接送到驱动电路；另一方式是将控制中间变量传送到局部处理器，PWM 控制器通过一定的算法后再产生控制信号。

局部控制单元的另外一个重要的部分是异常处理机制。当检测到异常状况发生时，局部控制单元判断异常的严重等级，执行相应的操作，由此有效防止严重故障情况下故障的扩散和蔓延。

(2) 时间基准

各个模块的时间基准主要由微处理器的晶振来决定，由于各个晶振的细微差别，同一系统中的不同基本单元需要同步机制保证功能的实现。但是，不是所有的应用场合都需要满足不同基本单元之间同步的要求，对于这种情况，系统的控制方式具有更大的选择余地。

(3) 其他部分

其他部分的功能可以部分参考 IPM, 比如本身的硬件保护等。在很多拓扑下, 桥臂结构的上下两个开关管需要一个死区时间, 在基本单元中, 这个死区可以由程序方便地设定。而硬件的保护信息同时可以被局部的控制器得到, 从而迅速的采取相应的处理措施。

3.4 系统的控制结构

从电力电子细胞的结构可以看出, 虽然局部控制器具有很强的功能, 但它的作用范围仅限于所处的模块本身, 对其他的功率器件则没有直接的控制能力。对于由电力电子细胞构成的系统而言, 其功能的实现并不能完全依靠现有的控制手段达到。基于自治模块本身局部控制器的特点, 将各个桥臂控制的控制进行解耦是最为合适的方式。在此, 对由自治模块组成的逆变器的控制结构进行初步探讨。

(1) 调制函数开环控制

在对逆变器控制方式研究的过程中产生了多种脉宽调制方式。正弦波调制是最为常用的方式, 谐波注入调制方式也在一些场合被使用, 这些方式都可以看成是调制函数的控制方式, 文献[15]对不同的调制方式进行了总结。根据调制函数与调制系数关系可以将它们分为线性调制和非线性调制。线性调制函数可以写成:

$$F(m, \alpha) = mF_1(\alpha) \quad (1)$$

式中 m 为调制度; α 为角度。常用的正弦波调制可以写成

$$F(m, \alpha) = m\sin(\alpha) \quad (2)$$

非线性的调制函数虽然不能写成式(1)的形式, 但具有一些独特的优点, 比如电压利用率提高、THD 降低或者开关频率降低等。

如果由自治模块组成的三相逆变器使用开环控制, 则可以使用多种可能的调制函数方式。另外, 这种方式不需要闭环控制中的检测电路, 各个模块之间所需要传递的信息量非常少(主要是同步信号和故障信号等), 因此具有结构和控制简单的特点。

(2) 分层结构控制

分层控制的结构同样可以用于自治模块组成的系统。对于一个双环反馈的控制方式, 可以将电压外环(或速度外环)用一个额外的控制器实现, 而电流内环则可以用本身的局部控制器实现, 如图 4 所示。双环控制是一种应用广泛的控制方式, 通过分层结构, 自治模块组成的系统可以达到优良的

输出性能。

(3) 分散自治控制

这里所说的分散自治控制指的是各个自治模块之间不存在信息交换的控制方式。在这种方式下, 各个模块虽然仅仅根据自己所得到的信息来调节自己的功率器件的动作, 但是通过控制的方法可以使得输出达到一定的要求。

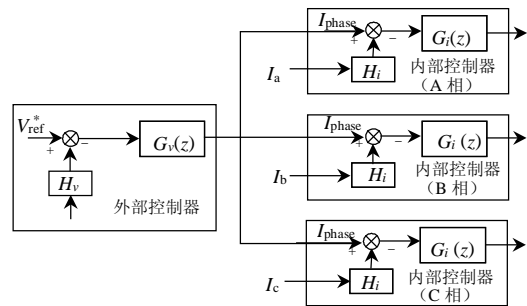


图 4 变换器的分层控制结构

Fig. 4 The hierarchical control structure

分散自治控制使得系统结构简化, 不但不需要增加额外的控制器, 而且相互之间没有信息的交换, 可以避免因此而带来的故障。作为一个完整的具有良好人机界面的电力电子系统, 一般会需要外部的微处理器来实现系统级的控制, 但就功率变换部分本身而言, 硬件上可以仅仅是由自治模块和无源滤波元件组成。

4 具有自调整功能的分散控制的实验室逆变器原型

自治模块的实验室原型由分立元件组成, 包括两个带反并二极管的 IGBT, 驱动芯片, 电压传感器和电流传感器以及 DSP 等。

实验中电压信号主要是输出电压, 为了对信号进行隔离, 使用的传感元件是电压型霍尔传感器。电流信号则通过电流传感器进行隔离。传感器采集的信号经过放大电路进行放大和阻抗变换后送给 ADC。模块中的局部控制单元用某公司的 TMS320F2407 型 DSP 实现, 其本身包括了 10 位的 ADC 和 PWM 发生电路, 因此模块的结构得以简化。DSP 发出两路带死区的互补的 PWM 信号, 经过专用的驱动芯片 M57959 后控制 IGBT 的开关, M57959 不但提供驱动能力, 而且实现了 PWM 信号的隔离并具有保护功能。用两个或者三个这样的自治模块, 可以很方便的构成单相或者三相逆变器。

(1) 由不同类型自治模块构成的三相逆变器

这个实验中使用了两种 CPU 频率和开关频率以代表不同类型的自治模块, 见表 1。在将来的自

治模块中，不同类型的模块可以方便地组合使用，但是前提是它们必须遵从一定的规范，这些规范中最重要的是软硬件接口必须一致。实验中 3 个自治模块均使用开环的正弦脉宽调制方式进行，其中各个模块之间的参考正弦波信号互差 $2/3\pi$ ，这通过同步信号来保证。除此之外，每个在控制上不受其他模块的影响，每个模块独立工作，实现了分散控制。

从图 5 的实验结果可以看出，虽然其中一相使用了 20kHz 的开关频率，但是输出的波形中存在的主要高频纹波是 5kHz 的，系统的性能主要是由性能较差的模块决定。

表 1 实验一中的部分参数

Tab.1 The experimental conditions

| 参 数 | 数 值 |
|--------------------------|---------|
| 输入电压/V | 60 |
| 负载：电阻/ Ω ；串联电感/mH | 40； 8.6 |
| A相DSP工作频率/ MHz | 5 |
| B相和C相DSP工作频率/ MHz | 40 |
| A相开关频率/kHz | 5 |
| B相和C相开关频率/kHz | 20 |

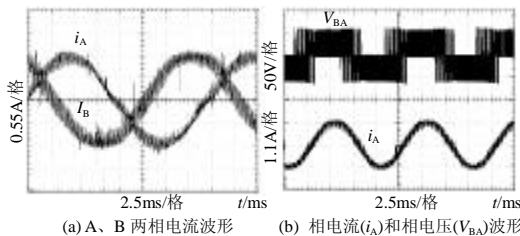


图 5 两种不同类型自治模块构成的逆变器输出波形

Fig. 5 The output waveforms of the inverter with different type of FDAMs

(2) 两种控制方式的比较

这个实验对两种控制方式的输出性能进行了对比，其中一种是开环的 SPWM 控制，另一种是各相分别进行电流反馈控制的闭环控制。这个实验所用的负载是直流无刷电机，各相电流由模块本身的电流传感器和 ADC 收集，反馈电流与参考电流进行比较，通过 PI 调节使其与参考电流一致。

从实验结果（图 6 和图 7）可以看出，仅仅就电流波形而言后者含有的低次谐波成分明显要少。但是很少有仅仅需要控制电流波形的应用场所，所以这个实验也主要是用来验证控制方式的可行性。

(3) 开环分散自治控制的实现

在这个实验中组成单相全桥逆变器的两个自治模块之间没有信息交换，所采取的控制方式是开环正弦波脉宽调制方式（SPWM）。由于没有信息交换，输出的电压将随着参考正弦波的相位差不同而不同。设 A、B 相参考波形分别为

$$V_{refA} = m \sin(\omega t) \tag{3}$$

$$V_{refB} = m \sin(\omega t - \alpha) \tag{4}$$

则输出电压波形为

$$V = 2 k_m \cos(\omega t - \alpha/2) \sin(\alpha/2) \tag{5}$$

其中 k_m 为比例系数，显然当 $\alpha = \pi$ 时输出电压峰值将达到最大，这时两个参考电压波形反相。

根据这个关系，可以通过检测电流峰值（或者电压峰值）并调整相位以达到同步的目的。在实验中，A 相设定为固定的输出，而 B 相的正弦波相位根据输出则进行调整。

实验结果见图 8，周期信号和电流峰值信息都

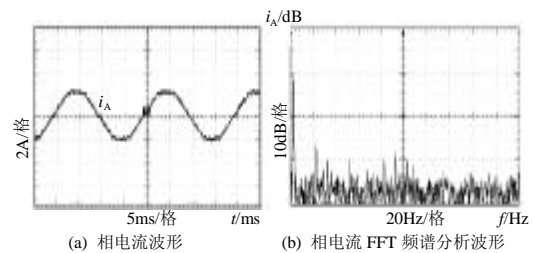


图 6 开环控制实验波形

Fig. 6 Experiment results with open loop control

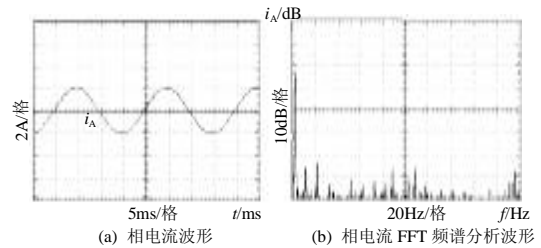


图 7 电流闭环实验波形

Fig. 7 Experiment results with current feedback control

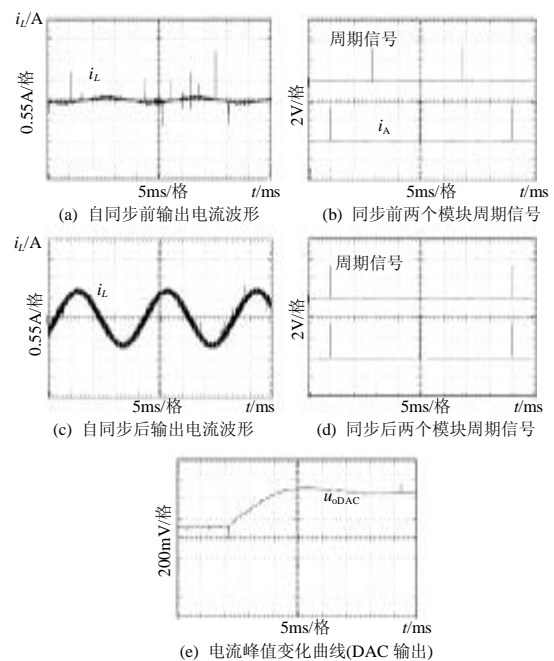


图 8 相位自调整实验波形

Fig. 8 Experiment results of the phase self-adjustable control

由 DSP 发出, 其中电流峰值经过 DAC 得到, 两者均仅仅用来显示实验效果。可以看出, 没有任何信息交换的两个具有完全分散自治特性的模块通过控制自身行为确实可以达到实现特定输出的要求。

5 未来分散自治控制的发展

功率集成技术的发展是实现分散自治控制的基础。利用现有的功率器件和各种控制芯片以及驱动芯片等也可以构成功能完善的自治模块, 但是由其构成的变换器与现存的变换器相比可能并无很大优势。但是, 如果通过功率集成实现了文中所说的分散自治模块, 那么会带来结构简单, 设计工作简化, 成本降低, 可靠性增加等显著好处。

如果解决了功率集成中存在的关键技术问题, 实现了功率器件和微处理器以及传感器等的集成, 那么功率变换器的设计工作将大大简化, 应用工程师的设计重心也将由功率相关设计向控制相关设计转变。它的重要意义在复杂的电力电子系统将会得到充分的体现。

6 结论

从仿生学的角度出发研究电力电子变换器的性能的提高是一个新的思路, 本文通过与人体系统的分层自治结构的类比探讨了分散自治控制应用在功率变换器中的可能性。为了实现这种控制思想, 作为最小的基本单位的自治模块的研究是关键。文中所要求的自治模块的特点与电力电子积木 (PEBB) 有所不同, 两者的研究可以相互促进。用分立元件构造的实验室原型从几个角度探讨了分散自治实现的方式, 并验证了实现完全分散自治控制的可能性。

参考文献

- [1] 钱照明, 何湘宁. 电力电子技术及其应用的最新发展 (一) [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 361-366.
Qian Zhaoming, He Xiangning. The recent developments of power electronics and its applications (1)[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 361-366.
- [2] 钱照明, 董伯藩, 何湘宁. 电力电子技术及其应用的最新发展 (二) [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 153-162.
Qian Zhaoming, Dong Bofan, He Xiangning. The recent developments of power electronics and its applications (2)[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 153-162.
- [3] 李冬黎, 何湘宁. 仿生学在电力电子系统设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, (8): 17-21.
Li dongli, He Xiangning. Applications of bionics in design of power electronics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, (8): 17-21.
- [4] 李冬黎, 何湘宁. 仿生学在电力电子学中的应用研究[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 64-67, 80.
Li dongli, He Xiangning. Applications of bionics in power electronics [J]. Transactions of china electrotechnical society, 2002, 17 (1): 64-67, 80.
- [5] Dongli Li, Xiangning He, Yan Deng. High reliable power electronic system design based on bionics[C]. Proceedings of the IEEE APEC, Miami, USA, 2003, (1): 471-475.
- [6] Lee F C, Peng D M. Power electronics building block and system integration[C]. IPEMC'2000, Beijing, China, 2000.
- [7] Celanovic I, Milosavljevic I, Boroyevich D *et al.* A new distributed digital controller for the next generation of power electronics building blocks[C]. APEC, New Orleans, USA, 2000, (2): 889-894.
- [8] 陈文洁, 杨旭, 杨拴科, 等. 分立元件构成的电力电子集成功率模块的设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 104-110.
Chen Wenjie, Yang Xu, Yang Shuanke *et al.* A design of discrete components based integrated power modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 104-110.
- [9] Haque S, Xing K, Lu G Q *et al.* Packaging for thermal management of power electronics building blocks using metal posts interconnected parallel plate structure[C]. '98. Seattle, USA, ITherm, 1998. 392-398.
- [10] Thandi G S, Zhang R, Xing K *et al.* Control and stability analysis of a pebb based DC DPS[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 497-505.
- [11] Wang F, Rosado S, Boroyevich D. Open modular power electronics building blocks for utility power system controller applications [C]. PESC, '03. Acapulco, Mexico, 2003, (4): 1792-1797.
- [12] Celanovic I, Celanovic N, Milosavljevic *et al.* A new control architecture for future distributed power electronics systems [C]. PESC, Galway Ireland, 2000, (11): 113 - 118.
- [13] du Toit J A, le Roux A D, Enslin J H R. An integrated controller module for distributed control of power electronics[C]. APEC, Anaheim, USA, 1998, (2): 874-880.
- [14] Jinghong Guo, Edwards S H, Borojevic D. Elementary control objects toward a dataflow architecture for power electronics control software [C]. PESC, Cairns, Australia, 2002, (4): 1705-1710.
- [15] Trzynadlowski A M. An overview of modern PWM techniques for three-phase, voltage-controlled, voltage-source inverters[C]. ISIE, 1996.

收稿日期: 2005-03-08。

作者简介:

胡磊(1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术;

何湘宁(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEE Fellow, IEEE Senior Member, 研究方向为电力电子技术及其工业应用。