

## 矩阵变换器应用于电机系统的研究与进展

周波 秦显慧 雷家兴 梁莹 卞金梁 韩娜

(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室,南京航空航天大学,南京,210016)

**摘要:**矩阵变换器(Matrix converter, MC)是一种直接变换型的交流-交流电力变换装置,具有无电解电容、结构紧凑、功率密度高和恶劣环境条件下适应性强等优点,适用于电机驱动、移动电源和风力发电等场合,因此得到了国内外众多学者的关注。本文主要对 MC 在电机系统中应用的研究现状进行综述。首先对 MC 在异步电机、同步电机以及在航空作动器等电机驱动系统中的研究现状进行了评述,然后介绍了 MC 应用于基于燃气轮机的分布式发电系统和大功率风力发电中的发展现状,最后对 MC 在工业界的发展情况进行介绍。本文的内容对矩阵变换器的进一步研究及其推广应用具有参考价值。

**关键词:**矩阵变换器;电机驱动;航空作动器;风力发电

**中图分类号:**TM341;TM35 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)01-0001-0010

### Review of Matrix-Converter Application in Electric Machine Systems

Zhou Bo, Qin Xianhui, Lei Jiaying, Liang Ying, Bian Jinliang, Han Na

(Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Matrix converter (MC) is a direct AC-AC power converter without any electrolytic capacitors. The advantages of MC, such as compact structure, high power-density and high adaptability in severe environment, make it suitable for the application of motor drive, mobile power utility and wind power generation. Therefore, MC has been a hot topic of research for last decades. The state of the art in the MC's applications in electric machines is presented in this paper. Firstly, the research status of MC-based driver for induction motors, synchronous motors and aircraft actuators is reviewed; then, the application of MC in gas-turbine-based distributed generation systems and high-power wind generation systems is introduced; finally, the development of MC in industry is presented. This paper will be a valuable reference for further research and industrial application.

**Key words:** matrix converter; motor driver; aircraft actuation; wind power generation

矩阵变换器(Matrix converter, MC)的概念和经典拓扑结构是 1976 年由 Gyugyi 和 Pelly 首先提出的。MC 具有无电解电容、结构紧凑、功率密度高和恶劣环境条件下适应性强等优点,通常被视为传统 AC-DC-AC 变换器的替代方案,适用于电机驱动、移动电源和风力发电等诸多应用场合。自

MC 问世以来的近 40 年时间里,国内外众多学者为 MC 的理论发展和实践应用做了大量的研究工作。这些研究工作丰富了基于 MC 概念的电力电子变换器拓扑结构,包括双级矩阵变换器、矩阵整流器等;提出了多种可行的调制策略,如 Alsina-Venturini 方法、双空间矢量法、双线电压合成法和

**基金项目:**国家自然科学基金(51177069)资助项目;江苏省高校优秀科技创新团队资助项目。

**收稿日期:**2013-12-10; **修订日期:**2014-01-15

**作者简介:**周波,男,博士,教授,博士生导师,1961 年 3 月生;研究方向:航空电源系统、电机及其控制、新能源发电技术、矩阵变换器技术;研究成果:国家技术发明二等奖、日内瓦国际发明金奖、国防技术发明一等奖各 1 项。

**通信作者:**周波, E-mail:zhoubo@nuaa.edu.cn。

随机载波调制等;结合不同的应用场合研究了MC的相应控制方法,并分析了MC的稳定性、EMI特性等诸多方面的问题。

随着MC的控制和应用技术逐渐成熟,工业界对MC的兴趣愈发浓厚,国内外多家企业已经推出或即将推出基于MC的相关产品。迎合MC产品化发展的契机,本文总结了MC问世以来,在电机系统中的应用研究现状。

## 1 MC在电机驱动中的应用研究现状

### 1.1 异步电机

早期利用MC驱动异步电机采用的是基本的变压变频控制<sup>[1]</sup>。1996年,土耳其和英国学者首次在MC-异步电机(Induction motor, IM)系统中采用矢量控制进行实验研究,构建了2.5 kW的平台,提出了MC与IM控制相配合的闭环控制方法<sup>[2]</sup>。2001年,意大利学者将直接转矩控制方案的优点与MC的优势相结合,实现了单位输入功率因数和IM直接转矩控制<sup>[3]</sup>,控制框图如图1所示。

2002年,英国学者Wheeler等采用MOS控制晶闸管(MOS-controlled thyristor, MCT)研制了10 kW的MC-IM矢量控制系统,将矩阵变换器换相时间最小化,避免了不必要的波形畸变<sup>[4]</sup>。2005年,其与美国军方合作又研制出150 kVA的MC-IM的矢量控制系统样机,主要用于评估MC在野战坦克中应用的可能性,对推进MC的大功率实现有重要的意义<sup>[5]</sup>。2006至2007年,Kyo-Beum Lee等提出了一种新型无位置传感器控制系统,分别采用矢量控制<sup>[6]</sup>和直接转矩控制<sup>[7]</sup>,利用非线性

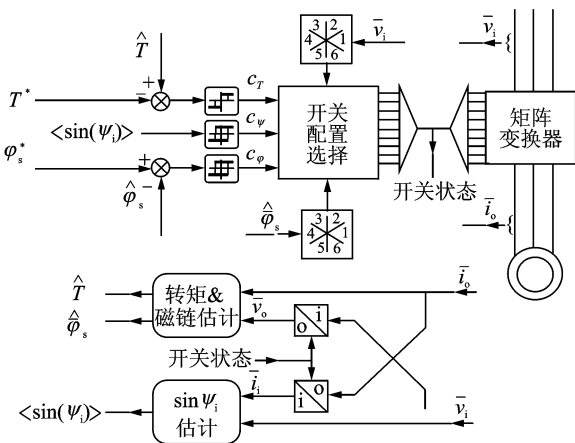


图1 基于MC的直接转矩控制框图

Fig. 1 Diagram of direct torque control based on matrix converter

补偿和扰动观测器实现高性能的MC-IM系统,该系统采用自适应观测器,在低速运行时较好的扰动响应;2008年,他们又提出一种基于功率流向的无位置传感器控制策略,其控制算法基于控制流入电机的瞬时有功功率和无功功率,不需要依赖电机参数,且具有良好的运行性能<sup>[8]</sup>。同年,Vargas等提出了一种预测控制策略来控制MC输出的共模电压<sup>[9]</sup>,在一定范围内减小共模电压的同时并不影响电机驱动的性能,但进一步减小共模电压可能会增大网侧电流的总谐波;2010年,他们又提出一种新的预测控制策略<sup>[10]</sup>,通过变换器、电机、滤波器的离散模型来预测转矩、磁链以及输入功率,从而对异步电机进行驱动控制,该方法具有快速的动态响应。2013年,Metidji等提出了一种基于Venturini算法的矩阵变换器的输出相电流重构策略,该策略只采用一个电流传感器,可以降低成本,并能提高驱动器的可靠性<sup>[11]</sup>。

在国内,清华大学的黄立培等于2004年提出了一种适用于MC驱动异步电动机调速系统的组合控制策略,控制框图如图2所示,同时实现了矩阵变换器的空间矢量调制和异步电动机的磁场定向矢量控制,系统具有良好的动态性能<sup>[12]</sup>。2007年,他们将非线性自抗扰控制器应用于MC-IM矢量控制调速系统中,取代了传统的PI调节器,非线性自抗扰控制器对内外部干扰进行估计和补偿,提高了调速系统在MC输入电压非正常工况下的抗干扰能力,并改善了异步电机的动态调速性能<sup>[13]</sup>。2009年,黄立培等又将过调制技术引入MC驱动交流电机调速系统中,从而改善了电机传动性能,当输入电压跌落或输入不平衡时,通过补偿输出电压维持转速的恒定,提高了系统的稳定性和适应性<sup>[14]</sup>。2010年,上海交通大学的王晶鑫等提出一种MC驱动感应电机的变结构直接转矩控制方

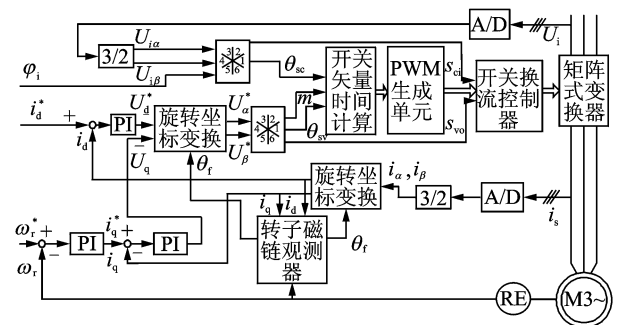


图2 MC-异步电动机调速系统的组合控制策略框图

Fig. 2 Combined control strategy diagram of matrix converter-induction motor system

法,将滑模变结构控制策略代替传统的转矩和磁链滞环比较方法,不仅响应快,而且保持开关频率恒定并减小转矩脉动,提高了系统的动静态性能<sup>[15]</sup>。

## 1.2 同步电机

永磁同步电机(Permanent magnetic synchronous motor, PMSM)具有结构简单、效率高、功率密度大的优点使其在中小功率变频调速领域的应用已经非常广泛。采用 MC 构建 MC-PMSM 驱动系统可以获得优良的运行性能。国内外对此已展开大量研究,主要集中在以下 5 个方面。

### (1) 高性能 MC-PMSM 调速系统

1998 年,阿尔及利亚的 Bouchiker 将 MC 应用于永磁同步电机的矢量控制系统中,在  $dq$  坐标系下,利用 MC 输入电压与期望输出电压直接合成变换器开关函数的方式实现了电机磁链与转矩的解耦控制<sup>[16]</sup>,这是有关 MC-PMSM 调速系统的最先报道。2001 至 2002 年,台湾国立科技大学的 Chen Derfa 等对 MC-PMSM 的直接转矩控制进行了研究,在 MC 所有开关状态中选择最佳的一种,以降低电机转矩脉动,并设计了控制器的位置环、转速环、电流环,获得了 1~1 500 r/min 的调速范围<sup>[17]</sup>,并采用神经网络控制技术减小电机电流谐波,同时提出了非线性自适应反推控制算法,以提高系统性能<sup>[18]</sup>。2010 年,西班牙的 Ortega 等针对 MC-PMSM 直接转矩控制系统,研究降低转矩脉动的方法,利用 MC 可以产生多种矢量的特点,根据不同的期望输出矢量,选择合适的开关矢量显著降低了电机转矩脉动<sup>[19]</sup>。自 2007 年起,南京航空航天大学葛红娟、张绍等也对 MC-PMSM 的矢量控制系统展开实验研究,给出了 MC 的调制算法和控制策略<sup>[20]</sup>,分析电流滞环控制导致输入侧存在 5 次和 7 次谐波的原因并提出解决办法<sup>[21]</sup>。

### (2) MC-PMSM 无位置传感器控制技术

无位置传感器控制技术是 PMSM 驱动系统的研究热点,在 MC-PMSM 系统中也获得了广泛关注。2003 年,台湾国立科技大学的 Liu Tianhua 等针对凸极式 PMSM,采用低速和中高速无位置传感器控制技术,实现宽转速范围运行,获得了较好的动态和稳态性能<sup>[22]</sup>。2005 年,英国谢菲尔德大学的 Snary 等研究了用于深海遥控车(Remotely-operated vehicle, ROV)的 MC-PMSM 无传感器控制技术。ROV 通常工作于压力特别大的 3 000 m 水下,对系统的可靠性要求极高,要求系统外部接线尽量少。在这种应用场合下,MC 具有较大的应用优势,实验结果表明该系统能够稳定可靠

地运行<sup>[23]</sup>。2009 年,英国诺丁汉大学的 Gao 等研究了 MC-PMSM 的无位置传感器技术。通过测量电机的  $di/dt$  重构位置信号,可以在零速到高速范围内均估计出电机的位置信息。为获得较好的噪声抑制性能,他们对矩阵变换器的空间矢量调制算法进行改进,采用较小的输入电压合成期望输出电压矢量<sup>[24]</sup>。结果表明矩阵变换器可以获得更小纹波的电机电流,同时可减小共模电压,并且逆变器对转速估计和位置估计更精确<sup>[25]</sup>。2012 年,日本大阪技术学院的 Kimura 等研究了应用于空调压缩机中的单相输入 MC-PMSM 的无位置传感器控制技术,并给出了抑制电机电流脉动和噪声的措施<sup>[26]</sup>。

### (3) 电源非理想特性对调速性能的影响

实际情况中电源电压可能存在不平衡和谐波畸变的问题,MC 无储能元件的特点使得电机性能易受到电源非理想特性的影响。2006 年,Chen Derfa 等针对电源电压不平衡,通过改进间接空间矢量调制策略,使得虚拟直流母线电压能够根据输入侧动态改变,仿真结果表明控制策略能够有效减小电机的谐波电流<sup>[27]</sup>。2010 年,天津大学夏长亮等分析了电源电压不平衡和谐波畸变对电机驱动性能的影响,基于内模控制和滑模变结构原理研究了系统控制器,并给出了参数设计方法,研制的 10 kW 实验平台能够验证控制器的有效性<sup>[28-29]</sup>。

### (4) 系统容错运行

在航空、舰船等应用场合,系统需具有容错运行能力。2010 至 2012 年,英国诺丁汉大学的 Khwan-on 等提出了应用于航空场合的三相四桥臂 MC-PMSM 容错控制系统,将变换器输出相的第四桥臂接到电机的中性线上,如图 3 所示,使得系统在开路故障下依然能够运行良好<sup>[30-31]</sup>。针对这种方法需要增加开关管形成第四桥臂的问题,Chen Derfa 等于 2012 年研究了一种新的容错控制策略,无需第四桥臂,通过 MC 的开关状态与相电流关系判断故障相,通过剩余两相支撑电机运行,实验表明在开关故障下转速误差只有额定转速的 4%,验证了系统控制策略的有效性<sup>[32]</sup>。

### (5) 共模电压的抑制

MC 输出端的共模电压对电机绝缘会造成不利影响,西班牙学者 Ortega 于 2010 年从 MC 的调制策略出发,用零矢量替换旋转矢量,减小了输出电压的共模分量<sup>[33]</sup>。南京航空航天大学的葛红娟也从零矢量的作用顺序和时间的角度减小电机共模电压<sup>[34]</sup>。

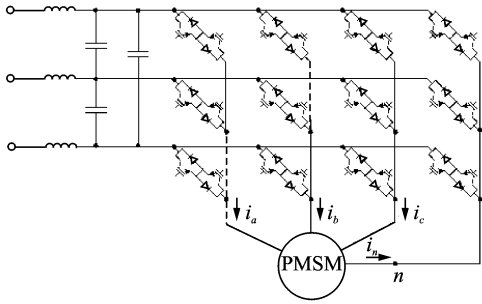


图3 三相四桥臂MC-PMSM故障容错系统

Fig. 3 Fault-tolerant control system for permanent magnet synchronous motor based on three-phase four-leg matrix converter

### 1.3 航空作动器

随着近年来电力电子技术和航空电源技术的迅速发展,多电飞机(More electric aircraft, MEA)和全电飞机(All electric aircraft, AEA)逐渐成为当代飞机的主流发展方向,如波音787和空客A380等<sup>[35]</sup>均采用了多电技术。传统的液压、机械作动机构已被不同型式、不同功率等级的电力作动器(Actuator)取代。与普通电机驱动系统的应用场合不同,航空作动器的输入电源为变频交流电源,并且需要面对高温、高压和剧烈震动等较为恶劣的环境条件,同时还要求低重量、高功率密度和高可靠性。而在这种条件下,MC以其无电解电容的拓扑结构,体现出独到的优势。因此,基于矩阵变换器的航空作动系统引起了相关学者的重视,并成为矩阵变换器研究领域的一个热点。

2003年英国诺丁汉大学的Wheeler等揭开了矩阵变换器在航空电子-液压作动器(Electro-hydrostatic actuator, EHA)中应用研究<sup>[36]</sup>的序幕。其研究工作主要是通过MC驱动电机,以控制飞机副翼作动,辅助飞机的飞行姿态控制(Flight control),如图4所示。2003年,Wheeler P首先采用MC和PMSM构成作动系统,进行了初步的论证与探索,并于2005年建成了一套20 kW实验平台<sup>[37]</sup>,验证了方案的可行性和MC的优良特性。其研究还表明,虽然MC的开关管数量大于不控整流-逆变器或18脉波整流-逆变器系统,但两者可靠性较为相近<sup>[38]</sup>,而MC的功率密度则显著高于传统整流-逆变结构。

2006年,诺丁汉大学的Huang Xiaoyan等同样围绕飞机副翼控制,提出了基于单向开关矩阵变换器(Single-sided matrix converter, SSMC)和无刷直流电机的EHA系统<sup>[39]</sup>,电机和SSMC都采

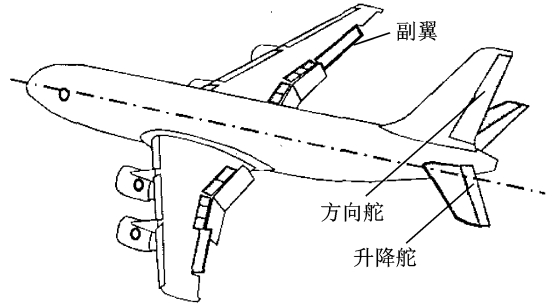


图4 飞机飞行姿态控制系统示意图

Fig. 4 Diagram of flight control system

用五相结构,以提高作动系统的容错能力。他们建立了12 kW原型机,做了初步的原理性验证,但由于开关频率不够高,尚未能实现满载实验<sup>[40]</sup>。2009年,Trentin等提出了基于双级矩阵变换器(Two stage matrix converter, TSMC)的飞机副翼作动系统,并重点讨论了作动系统能量回馈控制的问题<sup>[41]</sup>;按航空电源系统的现行标准,不允许电机向机载电网馈送能量,TSMC的直流母线上需并联制动电路,以耗散制动能量;若航空电源系统的标准改进后允许能量回馈,则TSMC的拓扑结构无需大的变动。因此,基于TSMC的作动系统方案更具灵活性。2011年前后,诺丁汉大学的Empringham等在前述工作的基础上,采用Si-IGBT和SiC-肖特基二极管建立了一套基于MC的航空作动系统,功率达到100 kW,发表了数篇论文分别介绍了该系统的功率密度和鲁棒换流控制<sup>[42]</sup>、损耗分析<sup>[43]</sup>和EMI特性分析及其滤波器设计<sup>[44]</sup>。

矩阵变换器在航空作动系统中的应用研究方面,诺丁汉大学做了很多值得借鉴的开创性工作,而国内尚未有相关的研究见诸报告,国内学者应迎头赶上,填补这一研究领域的空白。

## 2 MC在发电系统中的应用研究现状

近年来,随着人们对节能减排的日益重视,新能源和分布式发电等技术得到了很多学者的关注和深入研究。为了追求发电系统的最大功率输出,发电机通常需要变速运行,这与恒频电网之间存在矛盾,因此必须通过功率变换器实现恒频输出。矩阵变换器凭借其优异的输入/输出特性、较高的功率密度,被认为是变速恒频发电系统中功率变换器的一种具有较大潜力的替代方案。现有文献已经对基于矩阵变换器的小型柴油机发电系统和风力发电系统做了大量的研究工作。

## 2.1 分布式柴油发电系统

2004 年,美国军方研究部门与诺丁汉大学合作,将矩阵变换器和变速柴油发电机整合为一体,作为三相电源供给负载。在一定转速和负载功率范围内,矩阵变换器都能输出稳定的功率。他们采用 10 kW 的实验平台进行测试,获得了较好的动态响应和谐波抑制效果<sup>[45]</sup>。

2011 年,日本长冈科技大学的 Itoh 等将矩阵变换器作为电网和柴油发电机之间的接口,验证了 1.5 kW 实验平台的效率最高可达到 96.8%,总损耗约为背靠背变换器的一半<sup>[46]</sup>。

2012 年,智利大学的 Cardenas 和诺丁汉大学的 Clare 等合作,将三相四桥臂矩阵变换器和永磁同步发电机结合构成变速柴油发电系统。增加的第四桥臂可使系统能够适应不平衡负载和独立电网的要求。他们研究了两相旋转坐标系下正序和负序电流控制器,通过控制柴油机工作在功率-转速曲线最佳的转速点使燃油消耗最少,实验结果验证了设计要求<sup>[47]</sup>。

## 2.2 风力发电系统中的应用

在风力发电系统中应用方面,MC 首先被应用于双馈型风力发电系统。1997 年,英国 Bradford 大学 Zhang 等首次提出基于 MC 和双馈感应发电机(Doubly-fed induction generator,DFIG)的变速风力发电机组<sup>[48]</sup>,建立了功率为 7.5 kW 的仿真模型;对 DFIG 采用直接功率控制法,即根据风力机的功率-转速特性曲线确定当前转速下的最佳有功功率和无功功率期望值,通过基于  $dq$  坐标系的电流闭环控制调节转子电流的大小,使输出有功功率达到当前风速下的最大输出功率,MC 以电网电压为输入电源,采用基于定子磁链定向的空间矢量调制,来实现转子电流的控制。该发电系统在实现最大功率点跟踪的同时,能获得正弦的定、转子电流和较高的动、稳态性能。2003 年,浙江大学黄科元等提出了基于 MC 和无刷双馈电机(Brushless doubly-fed machine,BDFM)的风力发电机组方案<sup>[49]</sup>,对 MC 同样采用基于定子磁场定向的矢量控制方法。由于 BDFM 省去了电刷滑环等机械装置,故降低了成本,提高了可靠性。2006 年,哈尔滨工业大学的 Wang 等在此基础上详细分析了 MC-BDFM 的数学模型<sup>[50]</sup>,研究了发电机有功和无功功率解耦控制的实现方法,并进行了仿真验证。2010 年,李辉等把矩阵变换器等效为虚拟整流器和虚拟逆变器,将电网电压的幅值和相位作为给定,定子电压作为反馈,使双馈型风力发电机定

子电压跟随电网电压,实现了软并网,并在 11 kW 的实验样机上完成验证<sup>[51]</sup>。2013 年,王君瑞等发现  $dq$  坐标系下 PI 调节在交流控制中的不足,结合比例谐振(Proportional resonant,PR)控制器的特性,设计转子侧变换器 PR 控制策略,简化了控制算法,提高了系统的鲁棒性,改善了输出电流的质量,并在 4 kW 变速恒频发电系统中取得良好效果<sup>[52]</sup>。

随着风力发电系统向直驱式和无刷化趋势发展,MC 在直驱式风力发电系统中的应用研究也得到重视,在这方面国内学者作出了较大贡献。2008 年,中南大学孙尧等研究了超稀疏矩阵变换器(Super sparse MC,SSMC)-永磁同步发电机(Permanent magnet synchronous generator,PMSG)组合的直驱式风电系统<sup>[53]</sup>,对包括 PMSG,SSMC 和电网在内的整个系统建立了同步旋转坐标系下的数学模型,并对其进行简化、线性化分析,提出基于反馈线性化理论的鲁棒控制方法,提高了 SSMC 的控制稳定性。该系统采用 SSMC 虽然减少了开关管数量,但是由于整流级无双向功率流动能力,输入电网的无功功率可调节范围受到了限制,且由于其控制算法为追求简洁而放弃了输入功率因数调节的能力,因此风力机未能运行于最大功率点。2011 年,南京航空航天大学的史明明等将 MC 应用于混合励磁同步发电机(Hybrid excited synchronous generator,HESG),构成变速恒频发电系统<sup>[54]</sup>,提出矩阵变换器恒调制比控制策略,在 2 kW 混合励磁同步发电机系统上完成了实验验证。并在此基础上,提出一种将发电机端电压闭环控制与矩阵变换器输出电压的瞬时值闭环控制相结合的两级式电压闭环控制策略<sup>[55]</sup>,通过实验证明该控制方法具有良好的动态、稳态性能。2012 年,邓文浪等提出 TSMC 直驱型风力发电系统的集成控制策略<sup>[56]</sup>,将最大风能跟踪、输出功率调节、变速恒频控制通过网侧逆变级的集成控制实现,以降低控制复杂度。

利用 MC 的能量双向流动特性,也是风力发电系统的一种方案。如 2008 年,智利大学的 Cárdenas 等研究了基于 MC-感应发电机(Induction generator,IG)的并网发电系统<sup>[57]</sup>,IG 转轴通过齿轮箱与风机相连,定子绕组通过 MC 以及 LC 滤波器与电网相接。将电网视为 MC 的输入端,IG 工作于反向馈能状态,IG 输出电压低于网侧时,也能通过 MC 向电网输出有功功率。该发电系统通过模型参考自适应观察法估测电机转速和

转子位置,以实现矢量控制,并控制IG工作于风机的最大功率点,实验中利用一台矢量控制的笼型异步电动机模拟风力机的运行特性,作为原动机拖动MC-IG系统,其额定功率为2.5 kW,完成了并网发电和最大风能跟踪的实验验证。随后,Cárdenas又陆续发表了一系列论文研究了该发电系统的网侧无功功率调节范围<sup>[58]</sup>和MC控制器的稳定性问题<sup>[59]</sup>。

此外,2012年挪威科技大学的Garcés等研究了适用于海上风电场(Offshore wind farms)的高频链(High frequency link, HFL)简化矩阵变换器(Reduced MC, RMC)<sup>[60]</sup>,该发电系统采用高压直流输电方式,RMC由将PMSG输出的三相交流电转换为直流高压,大功率输电时,输电电流较小,因此可降低输电线路上的损耗。文中对2 MW规模的发电系统进行了损耗计算和仿真研究。

综上所述,在基于MC的风力发电系统研究领域,国内外已有的研究成果目前基本还都停留在仿真或小功率实验平台的原理验证阶段,且与相关企业的合作不甚紧密,离实际的工业应用还有一定距离。

### 3 MC在工业界的发展现状

经过学术界多年来的努力,基于MC的电路拓扑和控制方法获得了大力发展,在电机驱动和新能源发电等系统中的应用研究也获得了大量成果。虽然时至今日MC尚未真正进入市场,但随着MC控制和应用技术的日益成熟,适用于MC的功率模块产品逐渐丰富,积极投入MC研发的国内外公司也开始增多,越来越多的MC应用产品将会进入市场。

#### 3.1 适用于MC的功率模块产品发展现状

20世纪90年代末,相关文献中出现了高校、企业合作定制的三-双向开关模块或九-双向开关功率模块,用以搭建MC试验样机<sup>[61]</sup>,但这些功率模块并未批量生产。

近年来,随着工业界对MC产品的兴趣逐渐浓厚,多家半导体公司推出了适用于MC的IGBT双向开关功率模块。其中,美国POWEREX公司在2006年推出了型号为QIC0212003的双向开关;德国Semikron公司2007年推出型号为SK80GM063的共射极双向开关;2010年,英国DYNEX公司推出由AlSiC作为基板材料,AlN作为内部绝缘材料的双向开关DIM400PBM17-A;2012年,德国IXYS公司推出的MIXA6000系列

双向开关,有共射极和共集电极两种结构,模块内部含有热敏电阻,如图5所示。2013年,Infineon和Semikron公司又分别推出了FFxxxR12KT3-E和SKMxxxGM12T4系列双向开关管,耐压达1 200 V,额定电流数百安培。

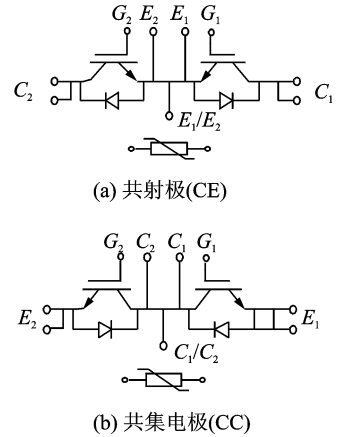


图5 MIXA6000系列双极管内部原理图

Fig. 5 Inner circuits of MIXA6000 series bi-directional switches; Common emitter and common collector

在此期间,美国Microsemi公司为双向开关集成功率模块的发展作出了更为积极的贡献。其推出的APTGF系列功率模块系列含二十多种型号的双向开关,耐压值分600,1 200和1 700 V三个等级,额定电流50~600 A,开关频率20~100 kHz,部分型号内部含有热敏电阻,能实现过温保护。在此基础上,该公司还推出了集成度更高的三-双向管功率模块(Triple-dual common source),每个模块含有3个独立双向开关,如图6所示。

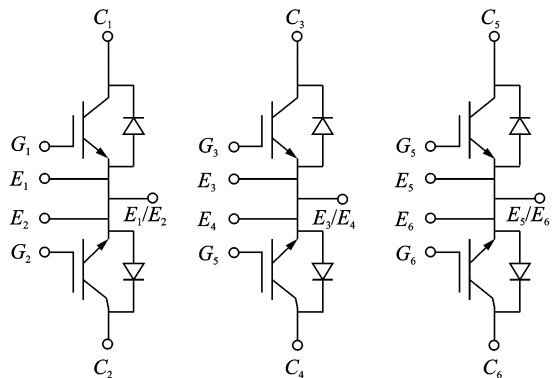


图6 Microsemi公司三-双向管功率模块内部原理图

Fig. 6 Inner circuits of triple-dual common-source modules manufactured by Microsemi

表 1 列出的适用于矩阵变换器的 IGBT 双向开关功率模块,是近年来推出且在市场上流通的型号,表中标注了相应的耐压和额定电流值(其中 Semikron 和 Microsemi 的部分功率模块系列,只给出其典型型号的参数,以节省版面)。这些功率模块的面市,降低了构造 MC 主功率电路的难度,有利于推进 MC 产品的发展。

表 1 市面流通的双向开关功率模块

Tab. 1 Available bi-directional switch power modules				
模块封装型式	生产厂家	型号	耐压/ V	额定电 流/A
单个双向 开关(共射 极)	IXYS	MIXA600AF650TSF	650	490
		FF400R12KT3-E	1 200	400
	Infineon	FF300R12KT3-E	1 200	300
		FF200R12KT3-E	1 200	200
		DYNEX	DIM400PBM17-A	1 700
	Powerex	QIC0212003	250	120
		SK80GM063	600	57
		Semikron	SKM300GM12T4	1 200
	SKM400GM12T4		1 200	474
	Microsemi	APTGF350DU60G	600	350
APTGF300DU120G		1 200	300	
APTGT300DU170G	1 700	300		
	单个双向 开关(共集 电极)	IXYS	MIXA600CF650TSF	650
APTGF		120TDU120TPG	1 200	120
		APTGF	50TDU170PG	1 700
三-双向开 关(共射 极)	Microsemi	APTGF	1 200	120
		APTGF	1 700	50

### 3.2 国内外工业界推出的 MC 产品

国内外工业界推动 MC 进入实用的努力从未间断。2001 年,德国西门子公司提出了一整套适用于工业传动控制领域的矩阵式变换器解决方案。丹麦 Aalborg 大学电力电子研究中心多年来一直致力于矩阵式变换器的研究与开发,在 2002 年研制了适用于工业生产的矩阵式变换器样机。日本富士电机公司在 2004 年利用逆阻式 IGBT 模块试制成功了 22 kW 矩阵式变换器样机;并于 2006 年推出了最新型电动机 AC-AC 驱动装置——FRENIC-MXC 矩阵式变换器。2005 年,日本安川电机推出了矩阵式变换器型高压马达用驱动装置,电源功率因数超过了 0.95,而效率则达到了 97% 左右。它主要面向钢铁加工生产线、造纸、薄膜生产线收卷机等存在大功率、长时间电力回馈的场合。安川电机 2009 年又推出了电压等级达到 3 kV 的 FSDrive-MX 系列高压矩阵变频器,单台

矩阵结构单元功率范围为 1.5~3 MW,多台矩阵结构组件可达 3~6 MW,适合直驱风电发电机组和海上大型风电<sup>[62]</sup>。

国内 MC 产品的研发起步较晚,但也正在有计划地推进。2011 年 3 月,孔目江区管委会、江西康诚实业发展有限公司及中南大学粟梅教授团队签署了三方合作协议,共同成立江西中能电气科技有限公司。该公司“中高压大功率矩阵变换器研究项目”获中央财政资金支持,已研制出具有自主知识产权的 50 kW 级矩阵变换器工业级装置,其测试平台已经通过电气性能试验、电磁兼容试验等相关测试,正在积极定型、试用和推广。广东易事特电源股份有限公司与中南大学信息学院共同合作开发 10,22 和 45 kW 绿色新型矩阵变频器,2012 年 1 月通过东莞市科技成果鉴定。北京友信宏科电子科技有限公司也推出了矩阵变频电源。

## 4 结束语

随着社会对节能减排技术的日益重视,人们越来越意识到高效、高质量电能变换的重要性。在学术界和工业界的共同推动下,MC 正逐步进入实用,将会在电机驱动和大型风力发电等应用场合发挥其特有的优势。

### 参考文献:

- [1] Huber L, Borojevic D. Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction[J]. IEEE Trans Industry Applications, 1995, 31(6):1234-1246.
- [2] Sünter S, Clare J. A true four quadrant matrix converter induction motor drive with servo performance [C]// Proceedings of Power Electronics Specialists Conference. Baveno, Italy; IEEE, 1996:146-151.
- [3] Casadei D, Serra G, Tani A. The use of matrix converters in direct torque control of induction machines [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2001, 48(6): 1057-1064.
- [4] Wheeler P, Clare J, Empringham L. A vector controlled MCT matrix converter induction motor drive with minimized commutation times and enhanced waveform quality[C]// Proceedings of Industry Applications Conference. Pittsburgh, USA; IEEE, 2002: 466-472.
- [5] Podlesak T F, Katsis D C, Wheeler P W, et al. A 150-kVA vector-controlled matrix converter induction motor drive[J]. IEEE Trans Industry Applications, 2005, 41(3):841-847.
- [6] Lee K B, Blaabjerg F. Improved sensorless vector

- control for induction motor drives fed by a matrix converter using nonlinear modeling and disturbance observer[J]. *IEEE Trans Energy Conversion*, 2006, 21(1): 52-59.
- [7] Lee K B, Blaabjerg F, Yoon T W. Speed-sensorless DTC-SVM for matrix converter drives with simple nonlinearity compensation[J]. *IEEE Trans Industry Applications*, 2007, 43(6): 1639-1649.
- [8] Lee K B, Blaabjerg F. Simple power control for sensorless induction motor drives fed by a matrix converter[J]. *IEEE Trans Energy Conversion*, 2008, 23(3): 781-788.
- [9] Vargas R, Ammann U, Rodriguez J, et al. Predictive strategy to control common-mode voltage in loads fed by matrix converters[J]. *IEEE Trans Industrial Electronics*, 2008, 55(12): 4372-4380.
- [10] Vargas R, Ammann U, Hudoffsky B, et al. Predictive torque control of an induction machine fed by a matrix converter with reactive input power control[J]. *IEEE Trans Power Electronics*, 2010, 25(6): 1426-1438.
- [11] Metidji B, Taib N, Baghli L, et al. Novel single current sensor topology for venturini controlled direct matrix converters[J]. *IEEE Trans Power Electronics*, 2013, 28(7): 3509-3516.
- [12] 孙凯, 黄立培, 松濂贡规. 基于矩阵式变换器的异步电动机矢量控制[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2004, 44(7): 909-912.  
Sun Kai, Huang Lipei, Matsuse Kouki. Vector control of induction motors fed by matrix converters[J]. *Journal Tsinghua University: Sci & Tech*, 2004, 44(7): 909-912.
- [13] 孙凯, 黄立培, 梅杨. 矩阵式变换器驱动异步电机调速系统的非线性自抗扰控制[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(12): 39-45.  
Sun Kai, Huang Lipei, Mei Yang. A nonlinear auto-disturbance rejection control for matrix converter fed induction motor drive system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(12): 39-45.
- [14] 梅杨, 黄立培, 李正熙. 矩阵式变换器驱动异步电机调速系统抑制输入电压扰动的研究[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(10): 47-52.  
Mei Yang, Huang Lipei, Li Zhengxi. Study of input voltage anti-disturbance control of matrix converter fed induction motor drive system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(10): 47-52.
- [15] 王晶鑫, 姜建国. 基于磁场定向的矩阵变换器驱动感应电机变结构直接转矩控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(6): 57-62.  
Wang Jingxin, Jiang Jianguo. Variable-structure direct torque control for induction motor driven by a matrix converter based on field oriented[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(6): 57-62.
- [16] Bouchiker S, Capolino G A, Poloujadoff M. Vector control of a permanent-magnet synchronous motor using AC-AC matrix converter [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1998, 13(6): 1089-1099.
- [17] Chen Derfa, Liu Tianhua. Implementation of a novel matrix converter PMSM drive [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(3): 863-875.
- [18] Chen Derfa, Liu Tianhua, Hung Chekai. Adaptive backstepping controller design for a matrix converter based PMSM drive system[C]// 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology. Bangkok, Thailand: IEEE, 2002(1): 258-263.
- [19] Ortega C, Arias A, Caruana C, et al. Improved waveform quality in the direct torque control of matrix-converter-fed PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(6): 2101-2110.
- [20] 张绍, 周波, 葛红娟. 基于双空间矢量调制的矩阵变换器-永磁同步电机矢量控制系统[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(4): 47-52.  
Zhang Shao, Zhou Bo, Ge Hongjuan. Vector control system of permanent magnet synchronous motor based on double space vector modulated matrix converter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(4): 47-52.
- [21] 葛红娟, 周波, 苏国庆, 等. 矩阵变换器-永磁同步电机矢量控制系统的新型电流控制方法[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(3): 21-26.  
Ge Hongjuan, Zhou Bo, Su Guoqing, et al. Novel current modulation approach for the vector control of MC-PMSM system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(3): 21-26.
- [22] Liu Tianhua, Chen Suzhan, Chen Derfa. Design and implementation of a matrix converter PMSM drive without a shaft sensor [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(1): 228-243.
- [23] Snary P, Bhangu B, Bingham C M, et al. Matrix converters for sensorless control of PMSMs and other auxiliaries on deep-sea ROVs [J]. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, 2005, 152(2): 382-392.
- [24] Gao Q, Asher G M, Sumner M, et al. Position estimation of a matrix-converter-fed AC PM machine from zero to high speed using PWM excitation [J].



- IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2030-2038.
- [25] Gao Q, Hua Yahan, Sumner M, et al. Comparison of two sensorless permanent magnet synchronous motor drives fed by a matrix converter and a voltage source inverter using fundamental PWM excitation signals [C]// 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain; IEEE, 2009:1-10.
- [26] Kimura N, Morizane T, Fukuei T, et al. Noble control strategy for single phase input indirect matrix converter used for sensorless PMSM drive of air-conditioner[C]// 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sapporo, Japan; IEEE, 2012:1-5.
- [27] Chen Derfa, Yao K C. A dynamical modulation strategy of the virtual DC-link voltage for matrix converters under input voltage unbalance[C]// Proceedings of 2006 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Singapore; IEEE, 2006:1-6.
- [28] 史婷娜,刘立志,王慧敏,等. 矩阵变换器-永磁同步电机驱动系统滑模变结构控制 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 54-60.
- Shi Tingna, Liu Lizhi, Wang Huimin, et al. Sliding mode variable structure control for matrix converter fed permanent magnet synchronous motor drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 54-60.
- [29] Xia Changliang, Yan Yan, Song Peng, et al. Voltage disturbance rejection for matrix converter-based PMSM drive system using internal model control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 361-372.
- [30] Khwan-on S, Lillo L, Empringham L, et al. A fault tolerant matrix converter motor drive under open phase faults[C]// 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010). Brighton, UK; IET, 2010:1-6.
- [31] Khwan-on S, Lillo L, Empringham L, et al. Fault-tolerant matrix converter motor drives with fault detection of open switch faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 257-268.
- [32] Chen Derfa, Khiem N D, Liu Tianhua, et al. A fault-tolerant modulation method to counteract the double open-switch fault in matrix converter drive systems without redundant power devices[C]// 2012 Conference on Power & Energy. Ho Chi Minh, Vietnam; IEEE, 2012:65-70.
- [33] Ortega C, Arias A, Caruana C, et al. Reducing the common mode voltage in a DTC-PMSM drive using matrix converters[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge, UK; IEEE, 2008:526-531.
- [34] 葛红娟. 基于矩阵变换器的永磁同步电机矢量控制系统[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
- [35] Chang J, Wang A. New VF-power system architecture and evaluation for future aircraft[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(2): 527-539.
- [36] Wheeler P, Clare J, Empringham L, et al. A matrix converter based permanent magnet motor drive for an aircraft actuation system[C]// Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Madison, USA; IEEE, 2003:1295-1300.
- [37] Lillo L, Empringham L, Wheeler P, et al. A 20 kW matrix converter drive system for an electro-mechanical aircraft actuator[C]// Proceedings of Euro Conf Power Electr and Appl. Dresden, German; IEEE, 2005:1-6.
- [38] Aten M, Towers G, Whitley C, et al. Reliability comparison of matrix and other converter topologies[J]. IEEE Trans Aerospace & Electronic Systems, 2006, 42(3): 867-875.
- [39] Huang Xiaoyan, Bradley K, Goodman A, et al. Fault-tolerant brushless DC motor drive for electro-hydrostatic actuation system in aerospace application[C]// Proceedings of IEEE Conf Industry Application. Tampa, USA; IEEE, 2006:473-480.
- [40] Huang Xiaoyan, Goodman A, Gerada C, et al. A single sided matrix converter drive for a brushless DC motor in aerospace applications[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3542-3552.
- [41] Trentin A, Zanchetta P, Wheeler P, et al. Performance evaluation of two stage matrix converters for EMA in aircraft applications [C] // Proceedings of Energy Conversion Congress & Exposition. San Jose, Canada; IEEE, 2009:1199-1204.
- [42] Empringham L, Wheeler P, Clare J. Power density improvement and robust commutation for a 100 kW Si-SiC matrix converter[C]// Proceedings of Euro Conf Power Electr & Appl. Barcelona, Spain; IEEE, 2009:1-8.
- [43] Empringham L, Wheeler P, Clare J. Calorimetric comparison of the use of silicon carbide diodes in a 100 kW matrix converter for aerospace applications [C]// Proceedings of Euro Conf Power Electr & Appl. Birmingham, UK; IEEE, 2011:1-7.
- [44] Ragusa A, Zanchetta P, Empringham L, et al. High frequency modelling method of EMI filters for hybrid Si-SiC matrix converters in aerospace applications [C]// Proceedings of IEEE Applied Power Electron-

- ics Conference & Exposition. Long Beach, Canada; IEEE, 2013:2610-2617.
- [45] Katsis D, Whele P, Clare J, et al. A three-phase utility power supply based on the matrix converter [C]// 39th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference. Seattle, USA; IEEE, 2004: 1447-1451.
- [46] Itoh J, Takahashi H, Haruna J. A high energy saving interface system using a matrix converter between a power grid and an engine generator for bio diesel fuel [C]// 2011 IEEE Trondheim Power Tech. Trondheim, Norway; IEEE, 2011:1-7.
- [47] Cárdenas R, Clare J, Patrick W. 4-leg matrix converter interface for a variable-speed diesel generation system [C]// 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, Canada; IEEE, 2012:6044-6049.
- [48] Zhang L, Watthanasarn C, Shepherd W. Application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly-fed induction generator [C]// Proceedings of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. New Orleans, USA; IEEE, 1997:906-911.
- [49] Huang K, He Y. Investigation of a matrix converter-excited brushless doubly-fed machine wind-power generation system [C]// Proceedings of International Conference on Power Electronics & Drive Systems. Singapore; IEEE, 2003:743-748.
- [50] Wang Q, Chen X, Ji Y. Control for maximal wind energy tracing in matrix converter AC excited brushless doubly-fed wind power generation system [C]// Proceedings of International Conference on Industrial Electronics. Paris, France; IEEE, 2006:718-723.
- [51] 李辉, 阳春华, 邓文浪, 等. 矩阵变换器励磁的双馈型发电机软并网控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15):75-79.
- Li Hui, Yang Chunhua, Deng Wenlang, et al. Soft cutting-in control of DFIG based on matrix-converter-excitation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15):75-79.
- [52] 王君瑞, 钟彦儒, 宋卫章, 等. 双级矩阵变换器励磁双馈风力发电系统比例谐振控制 [J]. 高电压技术, 2013, 39(5):1210-1217.
- Wang Junrui, Zhong Yanru, Song Weizhang. Proportional resonant control for two stage matrix converter excited doubly-fed wind power generation system [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1210-1217.
- [53] Sun Y, Su M, Gui W. One novel variable-speed wind energy system based on PMSG and super sparse matrix converter [C]// Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China; IEEE, 2008:2384-2389.
- [54] 史明明, 周波, 魏佳丹. HESG-MC 发电系统恒调制比电压闭环控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15):101-106.
- Shi Mingming, Zhou Bo, Wei Jiadan. HESG-MC generation system voltage close loop control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15):101-106.
- [55] 史明明, 周波, 魏佳丹, 等. 混合励磁同步发电机-矩阵变换器发电系统两级式电压闭环控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3):1-8.
- Shi Mingming, Zhou Bo, Wei Jiadan, et al. Two-stage voltage closed loop control scheme for hybrid excited synchronous generator-matrix converter generation system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 1-8.
- [56] 邓文浪, 倪泽平. 应用双级矩阵变换器的永磁直驱风力发电系统集成控制策略 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(4):577-585.
- Deng Wenlang, Ni Zeping. Integrated control strategy for permanent magnet direct-drive wind turbine with two-stage matrix converter [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(4):577-585.
- [57] Cárdenas R, Peña R, Ruiz J, et al. Control of a wind energy conversion system based on an induction generator fed by a matrix-converter [C]// Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Greece; IEEE, 2008:2711-2716.
- [58] Cárdenas R, Peña R, Wheeler P, et al. Control of the reactive power supplied by a WECS based on an induction generator fed by a matrix converter [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2009, 56(2):429-438.
- [59] Cárdenas R, Peña R, Tobar G, et al. Stability analysis of a wind energy conversion system based on a doubly fed induction generator fed by a matrix converter [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2009, 56(10):4194-4206.
- [60] Garcés A, Molinas M. A study of efficiency in a reduced matrix converter for offshore wind farms [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2012, 59(1): 184-193.
- [61] Empringham L, Kolar J W, Rodriguez J, et al. Technological issues and industrial application of matrix converters: A review [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2013, 60(10):4260-4271.
- [62] Yamamoto E, Hara H, Ucino T, et al. Development of MCs and its applications in industry [Industry Forum] [J]. Industrial Electronics Magazine, IEEE, 2011, 5(1):4-12.