

# 矩阵变换器技术及其应用研究

粟梅, 桂卫华, 孙尧, 王辉

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 阐述了多年来对矩阵变换器技术及其应用进行研究的认识和体会, 总结了在矩阵变换器调制技术、矩阵变换器系统优化设计、矩阵变换器系统建模和控制设计等方面的研究成果, 10 kW 双级矩阵变换器系统反复试验和测试的结果表明, 双级矩阵变换器的工业应用指日可待。

**关键词:** 矩阵变换器; 调制技术; 系统优化

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)01-0031-07

## Research on Technology of Matrix Converter and Its Application

SU Mei, GUI Wei-hua, SUN Yao, WANG Hui

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract:** It elaborates the cognition and experience of matrix converter technology and its application with years of study, and summarizes the research results based on matrix converter modulation techniques, system optimization design as well as system modeling and control design. Then after repeated experiments and tests on two-stage matrix converter system with 10 kW, the results show that its industrialization can be expected soon.

**Key words:** matrix converter; modulation technique; system optimization

### 0 引言

在世界能源危机的背景下, 政府主管部门已经把利用变频器的交流电机调速系统节能列为贯彻国家能源发展方针的重大措施。传统PWM变频器的输入端为三相不可控整流桥, 中间需要直流储能的电解电容, 输入端功率因数不可控, 对电网谐波污染严重, 能量不能双向流动。近几年来, 随着传统PWM变频器的普及, 它对周边设备所造成的负面影响也日益暴露, 因此, 人们开始寻求一种真正的环保型的变频器, 而矩阵变换器<sup>[1]</sup>就是这样一种“绿色”变频器。

矩阵变换器具有优良的性能和广阔的应用领域, 国外早已有多家传动设备供应商在研究矩阵变换器。国内对矩阵变换器的研究始于20世纪90年代中期, 主

要是高等院校。但到目前为止, 国内还没有一家变频器生产厂家研制出矩阵变换器的工业级产品。一旦国外矩阵变换器技术进入大规模实用化、市场化的阶段, 国内的市场很有可能被国外公司的成熟产品所垄断。因此, 研制具有我国自主知识产权的矩阵变换器系统非常必要, 且刻不容缓。中南大学信息科学与工程学院电力电子与可再生能源实验室, 在国家自然科学基金和国家高技术研究发展计划(863计划)课题等项目的支持下, 对矩阵变换器系统已经进行了多年的研究, 并在这些项目的研究过程中, 针对矩阵变换器调制技术以及矩阵变换器系统(带有电力电子开关器件的多维复杂非线性系统)在建模、系统分析和系统综合等方面形成了较为完备的理论体系, 取得了一系列的理论和实践成果。

### 1 矩阵变换器简介

传统的单级矩阵变换器拓扑结构如图1所示, 由9

收稿日期: 2009-12-01

作者简介: 粟梅(1967-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力电子及电力传动方面的研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674065, 60804014)

个双向开关搭接而成,正是由于采用了双向开关,能量可以双向流动,因此能够将能量直接回馈至电网,而不是消耗在制动电阻上,从而起到节能的作用。与传统PWM变频器相比,矩阵变换器取消了中间直流储能电容,一方面体积和质量减小,使得功率体积比和功率质量比大大提高;另一方面避免了电解电容对温度的敏感性,使系统可靠性大大增强,适用范围更广。不仅如此,通过对9个开关的合适控制,它还可以在控制输出电压的同时,控制输入电流,使功率因数可控,谐波畸变率大大降低。因此,称之为“绿色”变频器的矩阵变换器,尤其适用于能够发挥其长处和优点的几种场合,如:(1)需要连续电动又连续制动发电的场合(电梯、矿山提升机械、抽油机、起重机、离心机等),尤其是没有空间安装制动电阻或安装电阻会引起意外事故的地方(酒精厂、化工厂);(2)低谐波的应用场合(轮船上,允许安装更小的发电机组);(3)对功率体积比和功率质量比要求比较高的场合(电动装甲车、电动汽车等运输设备)。

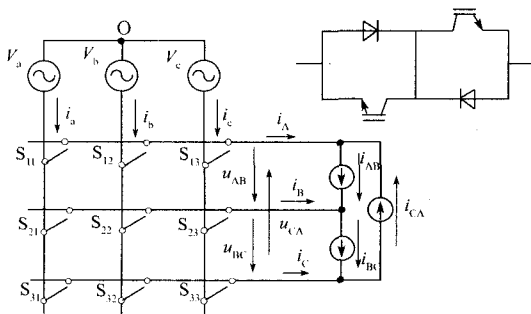
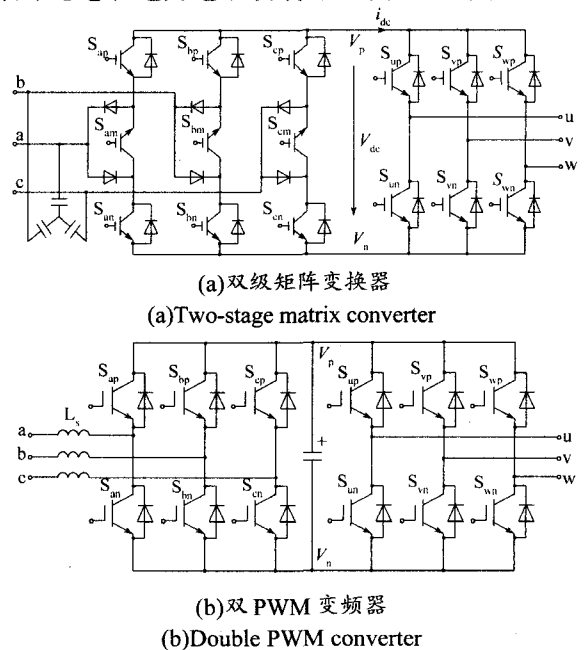


图1 单级矩阵变换器拓扑结构

Fig. 1 Topology of single-stage matrix converter

国外几家主要传动设备供应商,包括安川、富士、罗克韦尔、西门子等,都在积极地研究矩阵变换器。2005年9月,日本安川公司推出了世界上第一台采用单级矩阵变换器技术的交流电动机调速系统。2006年4月上旬,日本富士电机机器控制株式会社面向日本市场,上市了FRENIC-Mx系列矩阵变换器(30~45 kW),更新了既往可变速装置电源的概念。但到目前为止,单级矩阵变换器还没有在工业上得到大规模的应用,主要原因是,其存在功率开关器件数量多(一般需要18个IGBT和18个二极管)、箝位电路庞大、控制算法复杂、换流困难等不足。然而,双级矩阵变换器的提出<sup>[2-3]</sup>,在一定程度上解决了传统单级矩阵变换器所面临的问题。因为它在实现传统单级矩阵变换器所有功能的同时,还具有整流级可实现零电流换流、箝位电路简单、控制策略和换流算法简单等方面的优点。双级矩阵变换器的拓扑

结构(图2(a))同传统的双PWM变频器(图2(b))相似,功能和性能可以与传统的双PWM变频器相媲美。传统的双PWM变频器输入端为三相全控桥,采用PWM整流方式可以调节输入端功率因数,并能保证输入波形的质量。其缺点是成本较高,输入端需要笨重的滤波电感,中间环节需要大的储能电解电容。但是传统的双PWM变频器正是通过中间储能电容将整流级和逆变级物理上解耦,使得整流级和逆变级可以独立控制,从而简化了控制算法。双级矩阵变换器无需大体积的中间储能环节,直接由整流级和逆变级两级变换电路连接而成(整流级和逆变级采用双向开关,在利用调制策略保证直流电压极性为上正下负的前提下,逆变级可采用单向开关),能够取得与传统的双PWM变频器相媲美的功能和性能的原因是,其调制策略可以通过严格同步实现整流级和逆变级的稳态解耦。这也是“以时间换空间”这一哲学思想在电力电子领域的一个典型应用<sup>[4]</sup>。



(a)双级矩阵变换器

(a)Two-stage matrix converter

(b)双PWM变频器

(b)Double PWM converter

图2 变换器拓扑结构

Fig. 2 Topology of converter

## 2 主要研究成果

多年来,本项目组对矩阵变换器的研究主要集中在两大方面:首先是矩阵变换器自身的问题,如调制技术等;其次是矩阵变换器在应用时系统级的一系列问题。矩阵变换器调制技术首先是,研究能满足基于开关周期平均值等效的宏观要求的调制策略,在此基础上,再进一步研究提高输入输出电压传输比和波形质量(微观性能)的调制方法。针对矩阵变换器应用系统级的研究,从系统的观点出发,项目组首先研究了优化系

统各环节的设计及提高整个系统性价比的方法。其次，在建立整个系统基于空间矢量解析模型的基础上，研究矩阵变换器系统的闭环控制设计，在将矩阵变换器用于传动研究的基础上，尝试将其应用于风力发电领域。多年来的研究成果总结如下。

### 2.1 矩阵变换器调制技术

#### 2.1.1 基于数学构造的新颖调制策略

自1976年提出矩阵变换器的拓扑结构以来，多种调制策略被相继提出，其中，最有影响的有Venturini的“直接传递函数法”<sup>[5]</sup>、Huber的“间接空间矢量脉宽调制法”<sup>[6]</sup>、Casadei的“直接空间矢量调制策略法”<sup>[7]</sup>和A.ishiguro的双电压合成法（双电压合成技术）<sup>[8]</sup>。但是，这些调制策略分析方法比较复杂，算法的计算量比较大。文献[9]就基于开关周期平均值等效的宏观要求提出了一种基于数学构造的新颖调制策略。它实际上就是将变换器的调制策略确定问题转换成数学上方程的解的构造问题，即满足物理约束的解的构造问题。该调制策略省去了以往调制策略中对扇区的计算，算法简单，易于理解和实现。从方法论的角度看，该调制策略的数学构造方法具有普适性，对提出其他电力电子变换器调制策略具有较好的启发和指导意义以及实用价值。

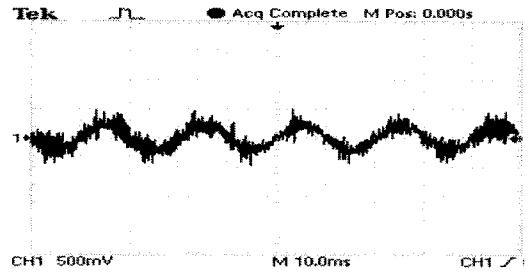
#### 2.1.2 空间矢量调制和双电压合成技术的一致性

Huber的“空间矢量调制法”<sup>[6]</sup>和A.ishiguro的双电压合成法（双电压合成技术）<sup>[8]</sup>是最有影响的两种调制策略，文献[10]从基本合成原理、开关序列和原点开关的基本概念、功率因数控制以及共模电压抑制等方面论证了空间矢量调制和双电压合成技术本质上的一致性。这一认识论层面的比较分析对矩阵变换器调制理论和应用技术的发展有着重要的指导意义，两种调制策略可以互相借鉴。空间矢量调制利用相反的有效矢量抑制共模电压，受此方法的启发，提出一种减少共模电压的双电压合成方法，仿真结果验证了该方法的正确性和可行性，进一步证实了空间矢量调制和双电压合成调制的内在一致性。

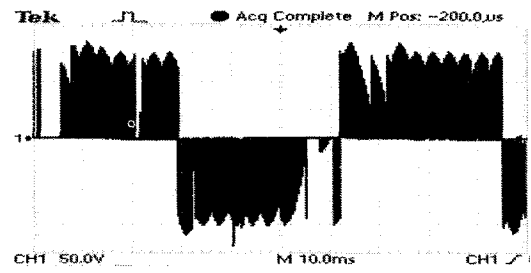
#### 2.1.3 双级矩阵变换器的过调制策略

针对双级矩阵变换器常规调制策略中电压传输比低( $\leq 0.866$ )的问题，文献[11]提出了一种提高电压传输比的新颖调制策略。该调制策略在不改变双级矩阵变换器拓扑结构的前提下，修改参考输入输出空间矢量轨迹，使电压传输比得到明显提高，并能同时保证矩阵变换器的输出电压谐波畸变率最小。图3为其实验结果，图4分别为线性调制区域和过调制区域II的双级矩阵变换器输出电压的FFT分析结果。由图4可以看出，过

调制算法可以将基波电压幅值明显提高（可在线性调制极限值的基础上提高10%左右），而其他谐波成分并没有明显提高，波形质量较好。该算法可实现电压传输比在0~0.955之间连续可调，克服了矩阵变换器电压传输比低的瓶颈，而且简单适用，有推广价值。

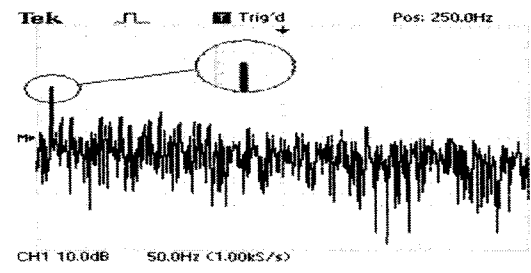


(a)输入电流波形  
(a) Waveforms of input current



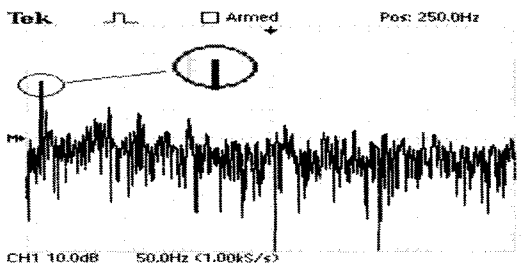
(b)输出电压波形  
(b) Waveforms of output voltage

图3 过调制区域II的输入电流和输出电压  
Fig.3 Input current and output voltage under over-modulation area II



(a)线性调制区域输出电压FFT分析

(a) FFT analysis on output voltage of linear modulation area



(b)过调制区域II输出电压FFT分析

(b) FFT analysis on output voltage of over-modulation area II

图4 输出电压FFT分析  
Fig.4 Output voltage FFT analysis

#### 2.1.4 双级矩阵变换器非线性补偿调制策略<sup>[12]</sup>

功率变换器优良的输入电流质量是“绿色”变频装

置的必要条件,而高质量的输出电压波形则是高性能驱动的基本前提。矩阵变换器在理论上具备上述条件,但由于其在工程实现中不可避免地会受到各种物理限制(如器件性能、处理器以及传感器性能的约束等),对输入输出性能会有所影响。文献[12]分析了双级矩阵变换器输出电压非线性根源及其特征,鉴于它和双PWM变频器、传统矩阵变换器在结构和功能方面的相似性,对它们的非线性特征进行了对比分析,发现双级矩阵变换器的非线性有其明显的独特性,如窄脉冲、器件电压降、滤波电容电压纹波等,这些问题与调制策略、工作机理、拓扑结构和运行状态等诸多因素有关。为了保证系统可靠运行和补偿非线性所带来的负面影响,提出了一种新的修正调制算法,并给出了基于变载波调制的非线性补偿策略,克服了已有算法在实现上的固有缺陷,大大地提高了系统波形质量,在高调制系数区域内,性能改善尤为明显,运行可靠性也相应提高。实验结果如图5和图6所示,从中可以看出,采用了新的修正调制算法和非线性补偿策略后的输入输出波形质量有了明显提高,输入电流的谐波畸变率由原来的14.45%降低到了8.35%,满足“绿色”变频器输入输出电能质量核心指标的要求。

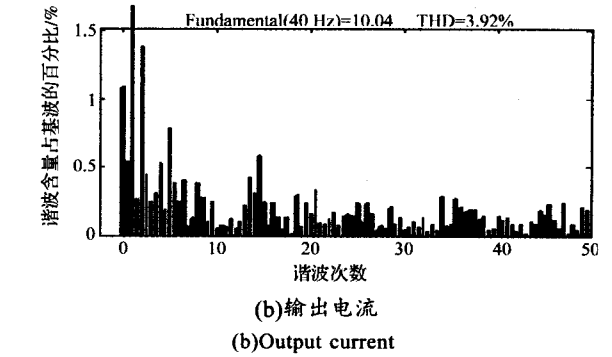
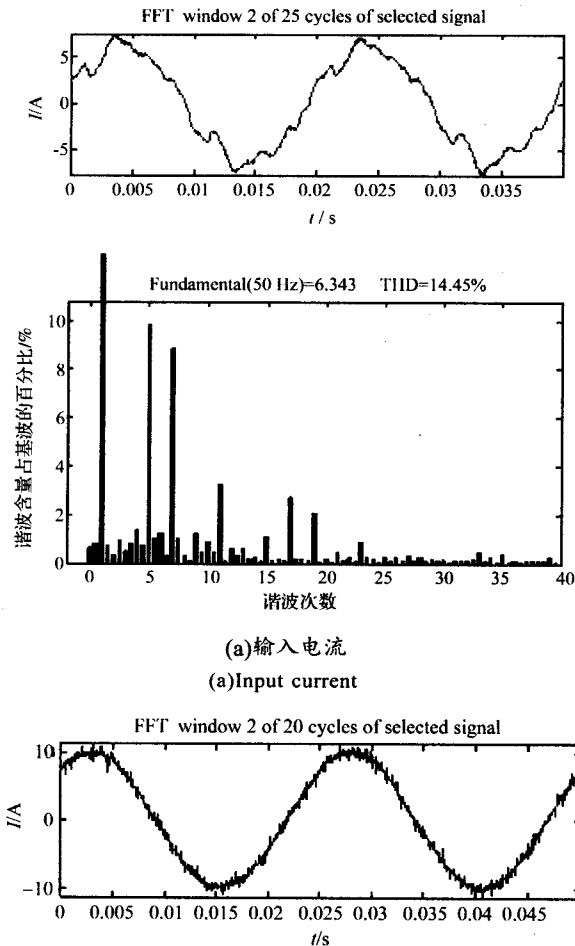


图5 旧方法不补偿时各电流波形及FFT分析  
Fig.5 Harmonics analysis of input current and output current with old method before compensation

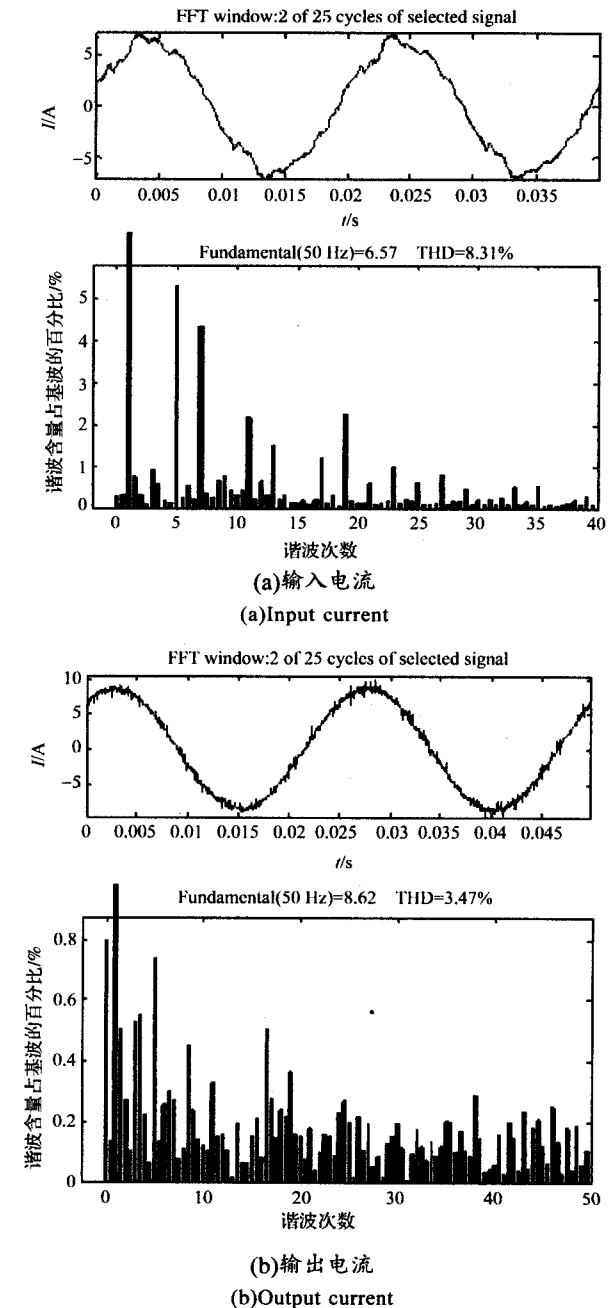


图6 新方法补偿时各电流波形及FFT分析  
Fig.6 Harmonics analysis of input current and output current with new method after compensation

## 2.2 矩阵变换器系统优化设计

### 2.2.1 输入滤波器的多目标优化设计

在矩阵变换器的实际应用中,电源与开关矩阵之间通常接有滤波器(图7)。输入滤波器有两个基本功能:一是为了满足电磁兼容性(EMC)的要求,防止矩阵变换器输入端由于开关器件开断所带来的高频毛刺倒灌进入电网;二是滤除电网中高频电压成分,以免其进入矩阵变换器输入端,影响矩阵变换器输出电能的质量。然而,输入滤波器的引入,改变了原系统的动力学特征,如果设计不当,输入滤波器反过来可能会降低矩阵变换器系统的动态性能,甚至使系统不稳定。因此,矩阵变换器的系统设计,需采用系统化的研究方法,考虑各个环节之间的相互作用。文献[13]提出了同时考虑滤波器的稳态滤波效果和抑制瞬态谐振峰值的设计原则,即以确保系统稳定、谐波总畸变率低、避免开关频率谐波电流造成滤波器谐振为约束,以工程费用、基频压降、基频相移、功率稳定裕量和阻尼电阻功耗为目标,提出了一种输入滤波器的多目标优化设计方法。

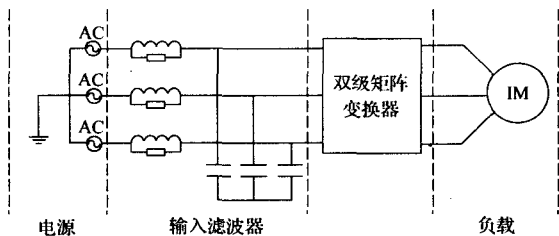


图7 矩阵变换器系统示意图

Fig.7 Schematic diagram of matrix converter system

### 2.2.2 改善矩阵变换器系统动态特性和稳定性的虚拟电阻方法

文献[13]分析了矩阵变换器系统中输入滤波器结构(图7)的合理性,即在输入滤波器电感的两端并接合适的电阻,可增加滤波器的阻尼,改善系统动态性能和稳定性,但增加了实际电阻的损耗,影响效率,尤其是在大功率的情况下。因此,文献[14]提出用虚拟电阻代替实际电阻的控制方法。根据优化设计出的输入滤波器结构和参数,可以对其进行进一步优化,在整个系统解析模型的基础上,深入分析滤波器电感两端并联电阻的作用(给出量化描述),用对输入电压进行数字低通滤波的软件算法来代替物理电阻的作用,提出了一种“硬件软件化”的虚拟电阻算法。它不仅克服了物理电阻不可避免的能量损耗的缺点,而且降低了系统的硬件成本,特别在大容量矩阵变换装置中很有意义。

## 2.3 双级矩阵变换器系统控制设计

当双级矩阵变换器用于实际工业现场时,就会面临非理想的电网电压以及不平衡负载的问题,这一问

题又因为双级矩阵变换器缺少直流储能环节而尤其突出。不论是Casadei针对单级矩阵变换器调制策略所做的处理<sup>[15]</sup>,还是Wei Lixiang在双级矩阵变换器调制策略上的改进<sup>[16]</sup>,本质上都是前馈补偿算法。前馈补偿算法虽然具有反应速度快的特点,但是只能对某种确定的扰动进行快速补偿。也就是说,以往对矩阵变换器的控制大多数都是基于稳态的调制,应该尝试双级矩阵变换器系统的基于动态的闭环控制,从而实现快速有效地抑制电网和负载波动的闭环控制。将矩阵变换器视为控制系统的一个环节,从控制系统的角度出发,基于开关周期平均法建立了矩阵变换器的输入输出复数空间矢量解析模型,从而建立整个矩阵变换器驱动交流电机系统的解析模型,研究各参数影响系统稳定性和动静态性能的规律,并在此基础上,以输出电流矢量和输入电流矢量的方向作为闭环控制系统的期望输出,提出适合于矩阵变换器系统的基于模型的控制方法。近年来,本项目组在将矩阵变换器用于传动的研究基础上,尝试拓展矩阵变换器应用于风力发电领域,取得了一些进展。

### 2.3.1 基于超级疏松双级矩阵变换器和永磁同步发电机的风电系统

为进一步减少风力发电系统投资和改善其性能,文献[17]提出了一种新颖的基于超级疏松双级矩阵变换器(SSMC)和永磁同步发电机(PMSG)的风力发电拓扑结构及其控制方案(图8)。建立了基于复数空间矢量和开关状态占空比空间矢量的双级矩阵变换器解析模型,将其与复数空间矢量描述的永磁同步发电机模型相结合;建立了双级矩阵变换器驱动永磁同步发电机系统的矢量模型,并在此模型的基础上,借助旋转坐标变换(进一步建立了 $d, q$ 旋转坐标系下的系统模型)、有功功率守恒原理和奇异扰动原理简化了系统控制策略;另外,使用反馈线性化和 $H_{\infty}$ 控制设计了全局稳定的鲁棒控制器,并深入分析了系统的零动态稳定性;最后在深入分析超级疏松双级矩阵变换器运行条件的基础上,给出了超级疏松双级矩阵变换器的无功功率提供能力,这有助于实现外环的无功功率优化控制和永磁同步发电机的最大功率跟踪控制。

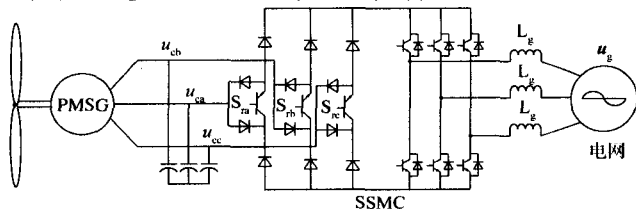


图8 基于超级疏松矩阵变换器的风力发电系统示意图  
Fig.8 Schematic diagram for wind energy conversion system based on super sparse matrix converter

### 2.3.2 双级四脚矩阵变换器系统

为了解决国家电网很难到达的远离大陆的地方(海岛边防哨所的军事重地等)的高质量独立供电问题,提出了适合中等功率变速恒频风力机独立供电的电力变换器新拓扑——双级四脚矩阵变换器(图9)。该拓扑是在传统的双级矩阵变换器逆变级上增添一个桥臂,并将新增桥臂中点N与负载中性点连在一起而生成,为抑制零序扰动提供了物理上的零序通道(新增桥臂)。

文献[18]提出了一种基于载波调制的双级四脚矩阵变换器闭环控制解决方案(如图10所示)。该方案能够处理负载零序扰动,拓宽了矩阵变换器的应用范围,且计算量少,自由度大,通过适当零序信号的选取,能得到各种最优性能的调制策略,在负载不平衡度较低的情形下,输入电流波形质量较好,还可方便推广到多相电机驱动应用当中。

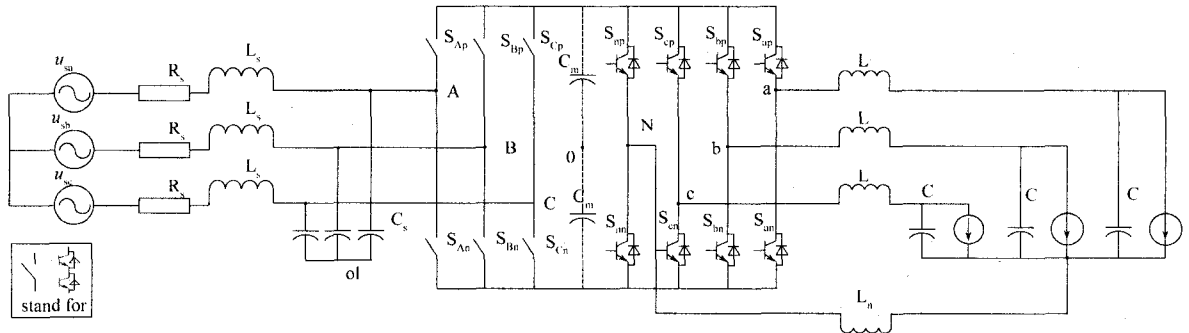


图9 双四脚矩阵变换器拓扑结构图

Fig. 9 Topology diagram of two-stage four-leg matrix converter

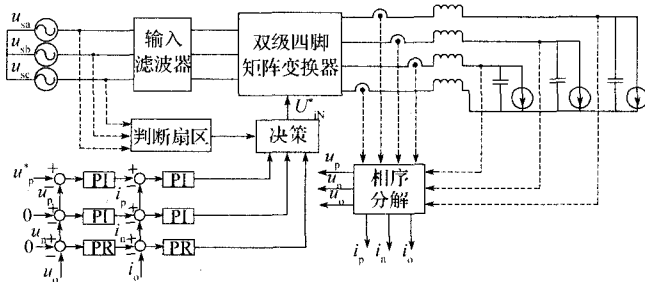


图10 闭环控制系统示意图

Fig.10 Schematic diagram of closed-loop control system

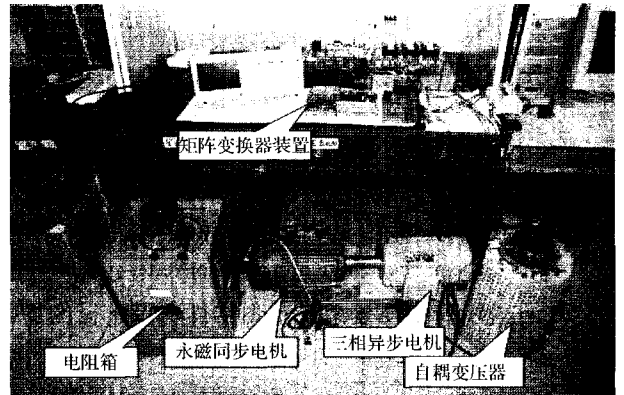


图11 双级矩阵变换器系统实验平台

Fig.11 Experimental platform for two-stage matrix converter system

### 3 矩阵变换器系统实验平台

在理论研究的基础上,研制了一套10 kW的双级矩阵变换器-交流电机高性能调速系统实验平台,实物照片如图11所示。系统由三相交流电源、输入滤波器、矩阵变换器装置、负载(异步电机和永磁同步电机)组成,异步电动机作为矩阵变换器的负载时,使用永磁同步电机和电阻负载作为异步电动机的负载,通过调节电阻模拟电动机负载的变化,构成双级矩阵变换器驱动异步电机调速系统的实验平台。矩阵变换器装置如图12所示,由整流级、逆变级主电路、辅助电源、驱动电路、采样电路、控制电路组成。系统参数为:开关频率10 kHz,死区设置为3 μs,LC输入滤波器电感为0.2 mH,电容为40 μF。部分的实验结果如图3~图6所示,实验结果表明双级矩阵变换器具有优良的输入输出特性,为双级矩阵变换器投入工业应用奠定了基础。

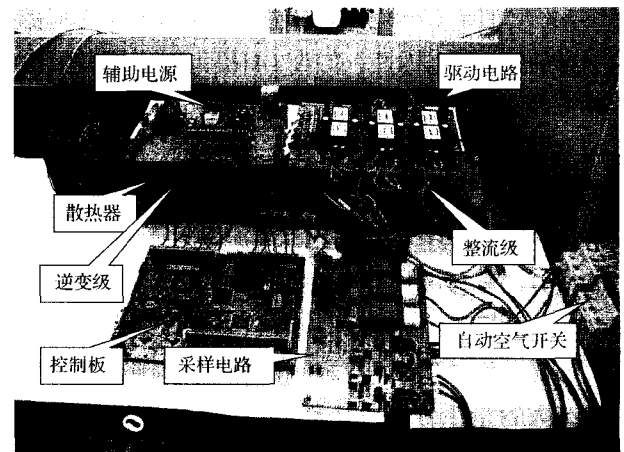


图12 双级矩阵变换器装置

Fig.12 Equipments of two-stage matrix converter system

### 4 结语

10 kW 双级矩阵变换器样机的测试结果表明,该样机能够实现矩阵变换器的基本功能,具体技术指标为:输入电压 $380(1 \pm 10\%)$  V,频率 $50(1 \pm 2\%)$  Hz,输入电流谐波畸变率 $\leq 10\%$ ,输入功率因数 $\geq 0.96$ 。输出电压 $0\sim 320$  V,频率 $1\sim 100$  Hz,装置整体效率 $\geq 90\%$ 。为使矩阵变换器样机满足工业级产品的要求,需要进一步提高装置的可靠性。本项目组拟研制45 kW 矩阵变换器样机,并按工业级产品进行功能和结构设计;然后研制45 kW 矩阵变换器产品,并进行电性能试验、电磁兼容性测试、例行试验;根据试验和测试结果,进一步完善工业级产品设计,为矩阵变换器在工业上推广应用奠定基础。

#### 参考文献:

[1] 丁荣军,黄济荣. 大功率变流技术与应用 (三)——矩阵变流器[J].变流技术与电力牵引,2008 (1): 2-10.  
 [2] Wei L, Lipo T A. Matrix converter with reduced number of switches[C]. Conf. Record of the 20th WEMPEC anniversary meeting.Madison, WI, USA: 2001.  
 [3] Wei L, Lipo T A. A novel matrix converter with simple commutation[C]. Proceedings of 36th IEEE Industry Applications society conference. (IAS' 2001). Chicago, IL,USA: 2001.  
 [4] 孙尧,粟梅,夏立勋,等. 基于最优马尔可夫链的双级四脚矩阵变换器随机载波调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (6): 8-14.  
 [5] Alesina A, Venturini M. Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters[J]. IEEE Transaction on Power Electronic, 1989,4(1): 101-112.  
 [6] Huber L, Borojevic D. Space vector modulator for forced

commutated cycloconverters[C]. Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting, 1989.  
 [7] Casadei D, Serra G, Tani A, et al. Matrix Converter Modulation Strategies: A New General Approach Based on Space-Vector Representation of the Switch State[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronic, 2002, 49(2): 370-381.  
 [8] Ishiguro A, Furuhashi T, Okuma S. A novel control method for forced commutated cycloconverters using instantaneous values of input line-to-line voltages[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1991, 38(3): 166-172.  
 [9] 粟梅,孙尧,余岳,等. 基于数学构造的矩阵变换器调制策略[J]. 电工技术学报,2008, 23(10): 64-68.  
 [10] 粟梅,孙尧,桂卫华. 双电压合成调制和空间矢量调制的一致性[J]. 中国电机工程学报,2009, 29 (21): 21-26.  
 [11] 粟梅,李丹云,孙尧,等. 双级矩阵变换器的过调制策略[J].中国电机工程学报,2008, 28(3): 47-52.  
 [12] 孙尧,粟梅,王辉,等. 双级矩阵变换器的非线性分析及其补偿策略[J]. 中国电机工程学报,2010(1).  
 [13] 粟梅,孙尧,覃恒思,等. 矩阵变换器输入滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报,2007, 27(1): 70-75.  
 [14] 粟梅,孙尧,覃恒思,等. 一种改善矩阵变换器系统动态性能和稳定性的控制方法[J]. 电工技术学报,2005(12): 18-23.  
 [15] Casadei D, Serra G, Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converter under input/output unbalance[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1998, 45(3): 401-411.  
 [16] Wei Lixiang, Matushita Y, Lipo T A. Compensation method for dual bridge matrix converters operating under distorted source voltages[C]. Virginia: Proc. of IEEE Industrial Electronics Applications conference, 2003.  
 [17] Sun Yao, Su Mei, Gui Weihua. One novel variable-speed wind energy system based on PMSG and super sparse matrix converter, Electrical Machines and Systems[C]. ICEMS 2008 International Conference, 2008.  
 [18] 孙尧,粟梅,夏立勋,等. 基于载波调制策略的双级四脚矩阵变换器设计与仿真研究[J].系统仿真学报,2009, 18(17): 5483-5488.



## 具有自主知识产权的6英寸晶闸管 抢占全球功率半导体器件技术制高点

近期,由株洲南车时代电气股份有限公司自主研发的6英寸4 500 A/7 200 V大功率晶闸管成功在灵宝背靠背扩建直流输电系统获得应用。这标志着世界上最大容量的6英寸晶闸管已经进入工程应用阶段,它将有力地推动我国变流装置技术的进步,进而为我国智能电网、轨道交通、新能源等领域的建设和发展提供坚实的器件技术保障。

2006年,株洲南车时代电气股份有限公司基于具有自主知识产权的全压接技术,成功开发了世界上首只6英寸8 500 V晶闸管,抢占了全球功率半导体器件技术的制高点。经过小批量试用后,目前,该型器件已经成功在高压直流输电等领域获得成功应用。另据悉,南车时代电气投资3.5亿建设的6英寸器件产业化基地已建成投产。

(贺楚梅)