

电力电子变换的信息特性与电能离散数字化到 智能化的信息调控技术

何湘宁¹, 王睿驰², 吴建德¹, 李武华¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;
2. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏省 南京市 210046)

Info Character of Power Electronic Conversion and Control With Power Discretization to Digitization Then Intelligentization

HE Xiangning¹, WANG Ruichi², WU Jiande¹, LI Wuhua¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Power electronics technology adopts high power semiconductor devices and passive components to achieve power conversion and control, and has been one of the most widely adopted technologies in the 21st century. This paper researched the connotation of power electronics technology from the perspective of power discretization and discusses the digital representation method of electric power, then proposed the concept of the info control technology of power electronics and explains its physical meaning. On the basis of the above, this paper introduced the existing info control methods of power electronics and communication methods in power electronics systems. Both theories and applications indicate that power electronic converter has the ability of communication during power conversion and control without extra hardware. It will be an important research direction to mine and apply this character of power electronics technology. The info control technology of power electronics can not only realize the discretization, digitization and intelligentization of electric power, but also stimulate the intersection of power electronics and information, promoting the development of related disciplines.

KEY WORDS: power electronic info control; power discretization; digital electronics; power/data dual modulation; power line communication (PLC)

摘要: 电力电子技术是采用大功率半导体器件和功率无源元

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0112400); 国家自然科学基金(51577170)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2017YFE0112400); National Natural Science Foundation of China (51577170).

件对电能进行变换和控制的技术, 是 21 世纪应用最广泛的技术之一。该文从电能的离散化角度来研究电力电子技术的内涵, 进一步讨论了电能的数字化表征方法, 提出了电力电子信息调控技术的概念并阐释其物理意义。在此基础上, 介绍了现有的电力电子信息调控技术的实现方法以及在电力电子变换系统中的信息交流方式。理论和实际都很好地表明, 电力电子变换器自身在对电能实现变换和控制的同时, 无需外加硬件, 就已具备了信息交流的能力。充分挖掘和应用电力电子技术的这一特性将成为一个重要的研究方向。电力电子信息调控技术不但使电能的离散化、数字化到智能化成为可能, 而且将极大促进电力电子学科和信息学科的交叉, 推动相关学科的发展。

关键词: 电力电子信息调控; 电能离散化; 数字信息技术; 功率/数据复合调制; 电力线载波通信

0 引言

电力电子装备是联通源、网、荷、储的电力变换枢纽, 它改变电能形态以实现电能交直流形式的多样化, 支撑常规交流电网向交直流混合电网转变, 且极大提升电能使用效率。电力电子技术已成为 21 世纪应用最广泛的技术之一, 渗透到工业生产和生活中的各个方面。

在电力系统领域, 电力电子技术作为新能源发电设备与电网的接口, 实现电能形式的灵活变换和功率流的智能控制, 在新能源发电技术的推广和应用上起到了关键性作用, 促使传统的电力网络向智能电网方向转型^[1-2]。在交通出行领域, 全国范围内的高铁网络已基本布局完成。电力电子作为高铁电力牵引系统中的核心技术, 确保列车牵引的高效

性、智能性和可靠性^[3]。在航空航天领域,多电飞机正在引发一场深刻的变革。多电飞机大量采用电力电子技术,将发电、配电和用电集中在一个系统中,以电能代替传统的混合能源,从而优化了飞机的总体结构,提高了飞机的能源利用效率^[4-6]。电力电子技术还广泛应用于工业、交通、医疗、国防等多个领域,提供了各类特种电源,实现感应加热、静电除尘、激光红外、雷达导航等功能^[7-10]。

电力电子技术可以看作是电子学的一个分支,起源于 20 世纪 50 到 60 年代,依据电子学原理,利用大功率半导体元器件和功率无源元件对电能进行高效变换和控制。由于电力电子技术面向大功率的电能处理,因此也隶属于电气工程学科。

在电子学 100 多年的发展历程中,信息电子技术作为其核心内涵,利用半导体元器件,对携带有信息的电磁信号进行处理,包括产生、放大、滤波和转换等,其发展经历了从模拟到数字的过程^[11]。在模拟电子技术中,晶体管工作在线性放大区,其输入输出呈线性的模拟关系。而在数字电子技术中,晶体管的工作状态等效为理想开关,电信号被离散化并编码,从而实现数字化的信息处理。由于数字电子技术具有易于调控、方便存储、不易失真、不易受杂散噪声干扰等明显优势,目前在一些领域已基本取代了模拟电子技术。对于声音、图像等模拟信号,通常也是先将其离散化和数字化后再进行存储或传输。

在传统的电气工程领域,发电、变电、输电、配电和用电等环节均采用模拟的方式,电能在变换、传输的过程中始终以模拟量的形式存在。发电机在外力(水位落差、煤燃烧产生的热量等)作用下通过转动转子产生工频交流电,经变压器升压后,向各电力负荷中心进行远距离输送。在电力负荷中心,电能经变压器降压后,供各类负载使用。在整个过程中,电能始终以模拟的形式存在。在升降压过程中,工频变压器作为不可控的线性无源设备,无法实现反馈控制等智能化功能。

电力电子技术对电能进行可控的变换,变换前后的电能均为模拟形式。然而,由于采用了开关的工作方式,在电能变换的过程中存在离散的中间过程,这与传统的电能处理方式有着质的区别。目前,人们对于电力电子技术的理解和研究仅停留在电能变换的层面,以变换器的输入、输出电能为主要控制目标和研究对象,而电能的离散化仅仅是对输入电能进行调控后的一个过渡状态,并没有就这一

状态本身进行更为深入地挖掘和探讨。实际上,电能变换过程中的离散态,是电能从纯模拟的处理方式向数字化过渡的一个重要标志,也为数字信息的集成提供了天然条件,为电力电子信息调控技术提供了研究方向,同时也从本质上揭示了电能变换与信息交流的相似性。

电力电子信息调控技术作为电力电子技术与信息电子技术的交叉领域,可以实现对电能的数据编码与调制,对推动电能变换从离散化到数字化、智能化的发展将产生重要意义,且将促进相关学科的发展,具有广阔的研究前景和应用价值。

1 电力电子变换的信息本征特性

为了满足不同应用场合对电能形式和电压等级的需求,通常需要对已有电能进行变换。早期方案是利用晶体管和工频变压器对电能进行线性变换。在该方法中,晶体管工作在线性放大区,等效为一个可变电阻,因此损耗大,发热严重,无法实现高效率和大功率的电能变换。此外,控制精度低,易受外部噪声干扰;工频变压器体积大,大大降低了变换器的功率密度。随着半导体器件以及微处理器的发展,开关电源逐渐取代了传统的线性电源。在开关电源中,晶体管在微处理器的控制下交替工作在饱和区和截止区,等效为 1 个理想开关,即采用了电力电子技术。由此,电能变换也可以进入数字化时代。相比于线性电源,开关电源具有极大的优势:一方面,晶体管工作在开关模式,极大降低了晶体管的功耗,从而可以实现高效的、大功率的电能变换;另一方面,开关电源可以采用数字化的控制方式,其控制精度和灵活度都大大提高。

如图 1 所示的 Buck 开关电源原理图中,电路以斩波方式工作,采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)生成一串占空比可调的矩形波序列作为变换器的门极控制信号^[12]。

电路的开关频率较高,通常工作在几十到几百 kHz。输入直流电经晶体管斩波后,得到 1 个离散的矩形波序列 v_s ,该序列只有 2 个电平,高电平电

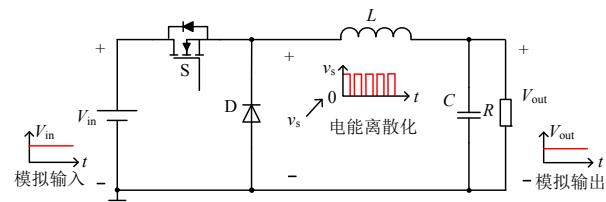


图 1 Buck 变换器原理图

Fig. 1 Diagram of Buck converter

压为输入电压 V_{in} , 低电平电压为零, 即为 1 个离散的数字化的电能脉冲。因此, 电力电子变换器在进行电能变换和控制的过程中, 首先将模拟的输入电能转化成了离散的电能脉冲, 再经过低通滤波器得到模拟的输出电能。在电能离散化的过程中, 离散的电能脉冲序列具备编码能力, 即加载数字信息的能力, 因而具备信息交流的潜质。

对于其他类型的电力电子变换器, 也都遵循类似的从模拟输入到离散化再到模拟输出的功率调制解调过程, 在电能离散化的过程中, 可将数字信息调制到离散的电信号上, 从而使得变换器本身兼具信息交流的能力^[13]。

2 电力电子信息调控技术实现方法

电力电子信息调控技术是电力电子技术与信息电子技术的深度融合和统一, 通过在功率调控环节加入数字信号调制, 实现电能变换和信息交流的一体化。该技术旨在通过深度挖掘变换器的本质内涵, 在不额外增加硬件的条件下, 使得电力电子变换器本身具备数据信号产生和发送功能, 推动电气装备的信息化和智能化^[14-16]; 同时, 作为电力电子技术和信息电子技术的交叉方向, 电力电子信息调控技术还将为 2 个学科的未来发展提供一个全新的视角^[17]。电力电子信息调控技术利用电能变换过程中的离散态, 进行数字编码调制, 实现电能变换的数字化。进一步地, 通过变换器之间或变换器与总控制器、上位机之间的数据通信与信息交互, 推进电力电子变换器的智能化水平。

目前, 电力电子信息调控技术还没有明确的定义, 根据其研究的内容和目标, 该技术应当具有的特征包括: 1) 功率变换与数据调制由同一变换器完成; 2) 功率控制与通信调制独立; 3) 功率与数据经由同一通道传输。

目前, 电力电子信息调控技术主要有 2 种实现方式: 功率/数据单载波调制技术; 功率/数据双载波调制技术。

2.1 功率/数据单载波调制技术

电力电子变换器对电能的幅值、极性和阻抗进行变换, 最常见的功率控制方法为采用 PWM 的载波调制技术, 如图 2 所示。变换器的门极控制信号为一串幅值恒定的矩形波序列, 通过控制其占空比实现对功率的调控。除了占空比, 该矩形波序列还有频率和相位 2 个独立的控制自由度^[18]。由此, 将通信信号通过角度调制(频率调制或相位调制)的方

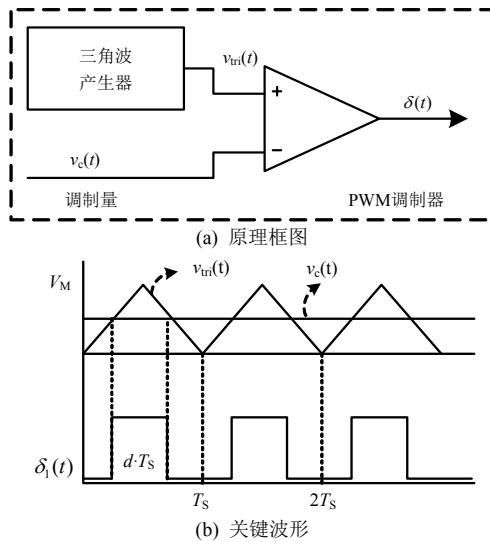


图 2 PWM 载波调制技术原理

Fig. 2 Principle of PWM

法加载到变换器的门极控制信号上, 可以实现功率与数据的复合调制, 即在电力电子变换器中集成通信功能, 实现电能变换和数据通信的深度融合和统一。

图 3 为功率/数据单载波调制技术的原理框图, 以功率 PWM 和数据二进制频移键控 (binary frequency shift keying, 2FSK) 调制为例, 二者分别针对矩形波序列的占空比和频率进行调节, 完全独立, 互不干扰。

功率/数据单载波调制技术着眼于功率变换器的开关工作模式, 利用电能变换过程中离散的过渡

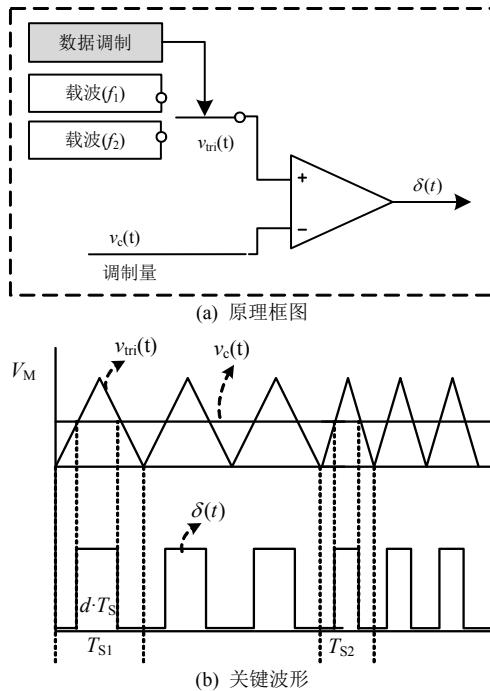


图 3 功率 PWM/数据 2FSK 单载波调制原理

Fig. 3 Principle of power PWM/data 2FSK single-carrier modulation

态, 将数据信号加载到离散的电能脉冲上, 进而反映在功率输入/输出的开关纹波上。功率与数据共享同一条电力线路进行传输, 从而实现电力电子技术与信息技术的深度融合。功率与数据调制共用同一路载波, 因此数据载波频率较高, 但数据调制必须采用与功率调制不同的自由度, 因此对数据调制方法的选择具有一定的制约。此外, 对于硬件电路已经给定的变换器, 数据信号强度无法改变, 因此该方法不适用于长距离传输的情况。

2.2 功率/数据双载波调制技术

功率/数据双载波调制技术主要针对单载波调制技术的不足而提出, 其调制原理如图 4 所示。数据首先被调制到低频数据载波上, 再进一步通过 PWM 调制到功率载波上。由于功率调制与数据调制分别采用不同的载波, 且数据已调信号不直接用作门极控制信号, 因此数据调制方法的选择更加灵活。为了能够将数据载波叠加到功率载波上, 数据载波的频率要远小于功率载波, 通常控制在功率载波的 1/5 以内。在对通信速率要求较高的应用场合, 可以引入正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 调制技术, 采用多路数据子载波并行传输, 从而大大提高通信速率。

已调数据信号作为扰动, 叠加在功率调制波上, 进行二次调制 (PWM 调制), 因此在输出电能上存在微小的扰动。由于已调数据信号在每个数据载波周期内的平均值为零, 且其幅值较小, 因此对输

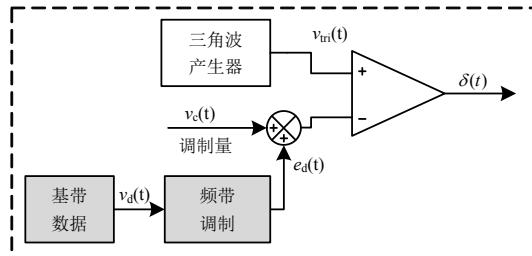


图 4 功率/数据双载波调制原理

Fig. 4 Principle of power/data double-carriers modulation

出电能质量的影响可以忽略不计。由于数据调制采用了独立的数据载波, 频率较低, 信号强度可控, 因此适合于长距离传输。此外, 数据通信频段远小于开关频率, 因此对开关噪声敏感度较低, 通信的抗干扰性能更好。

2.3 电力线载波通信技术

2 种调制技术将数据调制集成到功率控制的过程中, 可以看成是真正意义上的能量与信息集成, 物理概念也很清晰, 但二者具有一定的耦合关系, 变换器的硬件设计与控制算法设计需综合考虑功率与通信的指标。而电力线载波通信 (power line communication, PLC) 技术需采用额外的硬件电路来产生通信信号, 并通过阻抗匹配电路将信号耦合到功率传输线上进行传输^[19-20]。数据信号与功率信号在电力线上进行线性叠加, 二者可分别设计。在 PLC 技术中, 由于在传输的过程中功率与数据仍然复用同一条线路, 在一定程度上实现了功率和数据的集成, 本文将其作为电力电子信息调控技术的推广作简要讨论。

在电气化全面覆盖的早期, 电力线路就开始被复用为通信信道进行数据传输。PLC 系统被划分为 3 个等级: 高压级 (110~380kV)、中压级 (10~30kV) 和低压级 (0.4kV)。近年来, 高压电力线载波技术突破了仅单片机应用的限制, 已经进入了数字化时代^[21]。随着 PLC 技术的不断发展, 其在中低压场合的应用也越来越广泛, 目前已研发出成熟的专用高集成度 PLC 芯片, 可应用于大规模光伏电站等场合。

从带宽和传输速率的角度来说, 目前 PLC 技术可分为低速窄带 PLC 和高速宽带 PLC 技术两大阵营, 主流协议以及各自的优缺点^[22]如表 1 所示。

电力电子信息调控技术以电力线作为通信信道, 因此具有较强的突发噪声, 包括有色背景噪声、窄带干扰、同步脉冲噪声、异步脉冲噪声和随机脉冲噪声^[23-25]。这些噪声具有随机性和突发性, 无法

表 1 主流 PLC 协议对比

Tab. 1 Comparison among common PLC protocols

对比项	低速窄带 PLC	高速宽带 PLC
载波频率/kHz	9~500(欧洲 9~150)	2×10^3 ~ 30×10^3 (欧洲 2×10^3 ~ 50×10^3)
物理层速率/kbps	2.4~300	200 ~ 10^3 ~ 500×10^3
主流标准	IEC-61334(S-FSK)、PRIME、G3、ITU G.hnem、IEEE P1901.2	OPERA(DS2)、HomePlug、ITU G.hn、IEEE P1901
主要技术	传统的 ASK、FSK、PSK 调制技术	扩频(SS)技术、OFDM 技术
主要应用	电力通信/AMR/AMI	家庭区域网高速组网、互联网接入
主要优点	专用频率、技术简单、通信距离长	速率高、实时性好、性能相对稳定
主要缺点	通信时变性强、性能不稳定	通信距离短、技术复杂、价格较高

直接对其进行预测或分析, 只能用统计的方法来进行表述。针对这些噪声问题, 杨挺等人提出了相应的解决方案^[26], 例如采用扩频通信技术、多载波正交频分复用技术以及噪声消去算法等处理方案。

3 实验验证

目前, 已有研究针对以上方法的具体实现进行了分析和实验验证。PLC 技术较为成熟, 因此本文仅给出功率/数据单载波调制技术和功率/数据双载波调制技术的实验验证。

3.1 功率/数据单载波调制技术实验验证

图 5 为采用功率/数据单载波调制技术的 Buck/Boost 变换器实验样机原理图, 电路工作在 Buck 模式, 实验参数如表 2 所示, 输入直流电压为 48V, 输出直流电压为 24V。变换器采用功率 PWM 和数据 2FSK 调制相结合, 开关频率根据所发送的数字信号在 100kHz 和 83.3kHz 之间切换。接收端电路主要由信号调理电路和微处理器组成。调理电路对

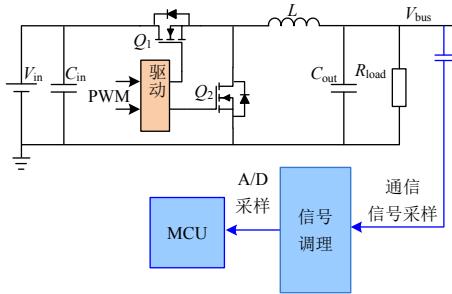


图 5 功率/数据单载波调制实验原理图

Fig. 5 Block diagram of the prototype for power/data single-carrier modulation

表 2 功率/数据单载波调制实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of power/data single-carrier modulation

参数	取值
V_{in}/V	48
V_{bus}/V	24
C_{in}/mF	1
$L/\mu H$	650
C_{out}/mF	1
R_{load}/Ω	50
MCU 型号	Texas Instruments TMS320F28035
MOSFETs Q ₁ 、Q ₂ 型号	Infineon IPB320N20N3 G
K_p	2
K_i	1×10^4
$T_a/\mu s$	20
开关频率 f_s/kHz	100
开关频率 f_0/kHz	83.3
通信速率/kbps	2.78

直流母线电压的交流成分进行滤波、放大等调理后, 提取出开关频率分量, 经由 A/D 采样送入微处理器。微处理器对采样值进行离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT), 得到 100kHz 或 83.3kHz 频率成分的幅值信息, 进而解调出发送的数字信号^[27]。

图 6 所示的实验波形中, CH1 和 CH2 分别为发送和接收到的数字信号, 二者之间有一较小的通信延时, CH3 为输出电压纹波成分, 而 CH4 为信号调理电路的输出。在接收端的微处理器中, 基于 DFT 运算结果, 设置合适的阈值(如图 7 所示), 可以解调出发送的数字信号。

该实验验证了功率/数据单载波调制技术的可

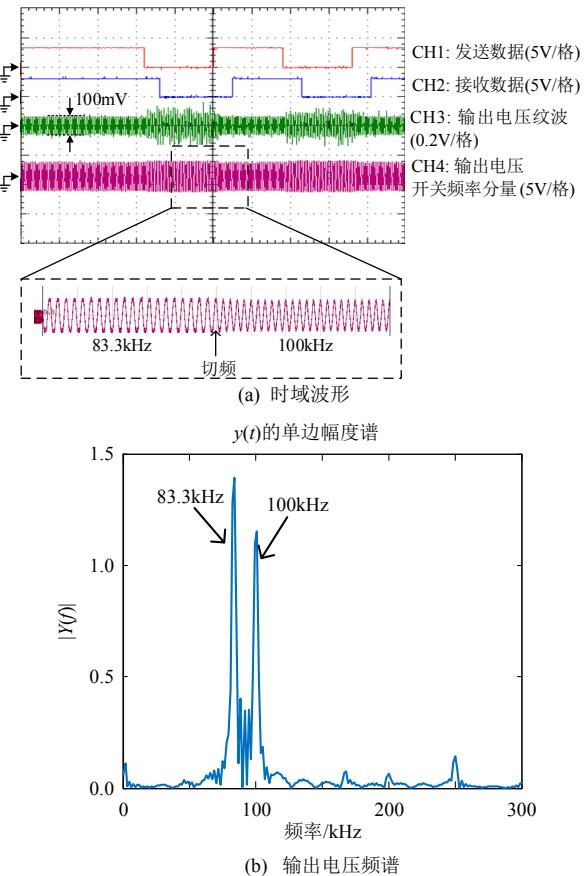


图 6 功率/数据单载波调制实验结果

Fig. 6 Experimental result of power/data single-carrier modulation

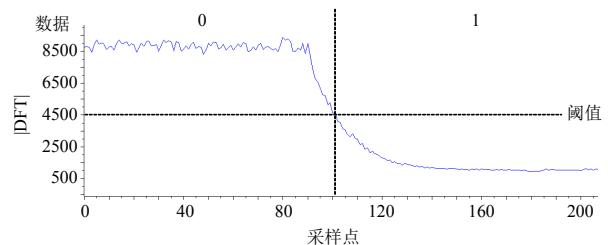


图 7 接收端 DFT 运算结果

Fig. 7 DFT calculation result in the receiver

行性, 在该变换器中, 数字信号被调制到离散的电能脉冲上, 并在变换器的输出直流总线上传输。该电力电子变换器不仅完成了 48V 到 24V 的直流电压变换, 还实现了数字信息的交互。

3.2 功率/数据双载波调制技术实验验证

本节基于 Buck/Boost 变换器对功率/数据双载波调制技术进行的仿真和实验验证。实验原理如图 8 所示, 实验参数如表 3 所示。

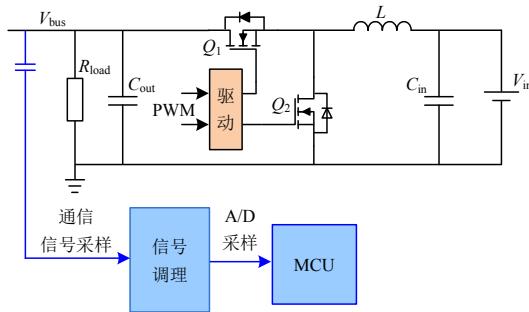


图 8 功率/数据双载波调制实验原理图

Fig. 8 Block diagram of the prototype for power/data double-carriers modulation

表 3 功率/数据单载波调制实验参数

Tab. 3 Experimental parameters of power/data single-carrier modulation

参数	取值
V_{in}/V	300
V_{bus}/V	450
$C_{in}/\mu F$	200
$L/\mu H$	300
$C_{out}/\mu F$	200
R_{load}/Ω	50
MCU 型号	Texas Instruments TMS320F28035
MOSFETs Q_1 、 Q_2 型号	Infineon IPW65f080
开关频率 f_s/kHz	100
数据载波频率 f_d/kHz	10
通信速率/kbps	3.33

图 9 为仿真结果, 数据信号 CH1 首先被调制到低频载波上 CH3, 再进一步以扰动形式叠加到功率输出电压上 CH4。在图 10 所示的实验结果中, 通信双方进行控制信号的发送与响应, 开关管工作频率为 100kHz, 数据载波频率为 10kHz, 其频谱如图 10(a)所示。变换器工作在 Boost 模式, 输出电压为 450V, 而叠加在其上的数据载波幅值约为 5V, 占直流输出的 1%, 对直流电能质量的影响可忽略不计。变换器接收控制信号并作出应答和响应, 如图 10(b)所示。文献[28-29]分别给出了该调制技术在光伏系统和电池能量管理系统 (battery management system, BMS) 中的应用实例。

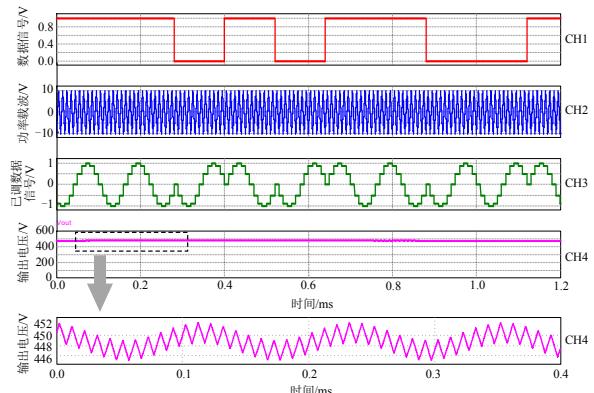
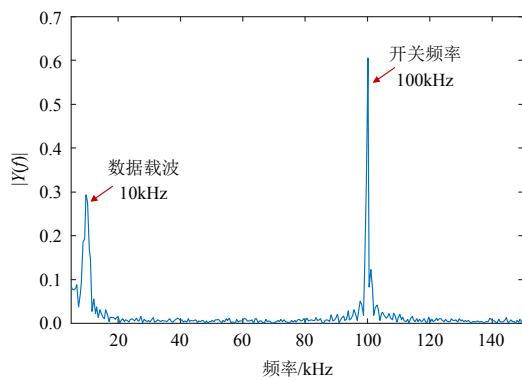


图 9 功率/数据双载波调制技术仿真结果

Fig. 9 Simulation result of power/data double-carriers modulation



(a) 输出电压纹波 $y(t)$ 单边幅度谱

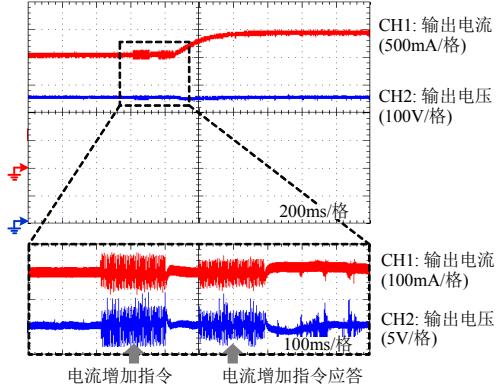


图 10 功率/数据双载波调制实验结果

Fig. 10 Experimental result of power/data double carriers modulation

图 9—10 实验结果揭示了在电力电子变换器中, 利用电能变换的离散过程, 实现电能的数字化编码和变换器之间的数据传递与信息交互的可行性。文献[28-29]已分别给出了该技术在推进光伏系统和 BMS 智能化过程中的应用实例, 而在其他领域的智能化进程中, 如微网与电能路由器等, 该技术同样适用。

4 结论

本文从全新的角度分析和阐述了电力电子变

换器的原理和内涵,在此基础上提出了电力电子信息调控技术的概念,并综述了现有的实现方法。可以预期,电能处理和变换将会和信息电子技术一样,经历从模拟到数字的变迁,以实现性能上的突破。电力电子变换器采用开关的工作方式,正是这一变迁的开端,其变换效率和控制精度远远高于传统的线性电源,而离散的过渡态,也为数字通信的集成提供了必要条件。

电力电子信息调控技术是电力电子技术与信息技术的交叉方向,它基于电力电子变换器本身所具有的离散化的电能变换方式,充分挖掘电力电子变换器的本质特征,将数字信息技术与之相结合,使得电力电子变换器不仅可以实现对电能的变换和控制,还可以实现数字信息的交互。电力电子信息调控技术对推动电能变换从离散化到数字化、智能化的发展将产生重要意义,同时将极大促进电力电子科学与信息科学的交叉、融合与发展。

参考文献

- [1] 宗升,何湘宁,吴建德,等.基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J].中国电机工程学报,2015,35(18): 4559-4570.
Zong Sheng, He Xiangning, Wu Jiande, et al. Overview of power electronics based electrical energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4559-4570(in Chinese).
- [2] 赵争鸣,冯高辉,袁立强,等.电能路由器的发展及其关键技术[J].中国电机工程学报,2017,37(13): 3823-3834.
Zhao Zhengming, Feng Gaohui, Yuan Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834(in Chinese).
- [3] 宋平岗,戈旺,朱维昌.基于电力电子变压器的牵引系统关键技术研究[J].大功率变流技术,2017(4): 58-63.
Song Pinggang, Ge Wang, Zhu Weichang. Research on key technologies of traction system based on power electronic transformer[J]. High Power Converter Technology, 2017(4): 58-63(in Chinese).
- [4] 严仰光,秦海鸿,龚春英,等.多电飞机与电力电子[J].南京航空航天大学学报,2014,46(1): 11-18.
Yan Yangguang, Qin Haihong, Gong Chunying, et al. More electric aircraft and power electronics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 11-18(in Chinese).
- [5] 李永东,章玄,许烈.多电飞机高压直流供电系统稳定性研究综述[J].电源学报,2017,15(2): 2-11.
Li Yongdong, Zhang Xuan, Xu Lie. A survey on stability analysis for HVDC power system in MEA[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 2-11(in Chinese).
- [6] 车延博,徐健梅,刘校坤.电力电子化机载电力系统稳定性分析[J].电力自动化设备,2018,38(6): 152-156.
Che Yanbo, Xu Jianmei, Liu Xiaokun. Stability analysis of power electronic aircraft electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 152-156(in Chinese).
- [7] 王晓娜,方旭,唐波,等.脉冲式感应加热电源频率跟踪技术的研究与实现[J].电工技术学报,2018,33(18): 4357-4364.
Wang Xiaona, Fang Xu, Tang Bo, et al. Research and implementation of a frequency tracking technology for the pulsed induction heating power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4357-4364(in Chinese).
- [8] 刘军,郭塘塘,常磊,等.高压变压器寄生电容对串联谐振变换器特性的影响[J].中国电机工程学报,2012,32(15): 16-23.
Liu Jun, Guo Tangtang, Chang Lei, et al. Effects of the parasitic capacitance on characteristics of series resonant converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 16-23(in Chinese).
- [9] Chang Lei, Guo Tangtang, Liu Jun, et al. Analysis and design of a current-source CLCC resonant converter for DBD applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1610-1621.
- [10] Sarnago H, Lucía O, Burdio J M. A versatile resonant tank identification methodology for induction heating systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 1897-1901.
- [11] 谢文楷,王彬,高昕艳.百年电子学——纪念真空电子管发明一百周年[J].真空电子技术,2004(6): 1-7.
Xie Wenkai, Wang Bin, Gao Xinyan. Electronics in the last century[J]. Vacuum Electronics, 2004(6): 1-7(in Chinese).
- [12] 李永东.脉宽调制(PWM)技术——回顾、现状及展望[J].电气传动,1996(3): 1-12.
Li Yongdong. PWM control technique—state of arts and trends[J]. Electric Drive, 1996(3): 1-12(in Chinese).
- [13] Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Information Theory . Toronto, ON, Canada: IEEE, 2008: 1612-1616.
- [14] Xu W, Wang Wencong. Power electronic signaling technology — a new class of power electronics applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 332-339.
- [15] Xu W, Zhang Guibiin, Li Chun, et al. A power line signaling based technique for anti-islanding protection of

- distributed generators-Part I: scheme and analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1758-1766.
- [16] Wang Wencong, Kliber J, Zhang Guibin, et al. A power line signaling based scheme for anti-islanding protection of distributed generators-Part II: field test results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1767-1772.
- [17] Wiener N. Cybernetics[M]. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 1961.
- [18] 吴建德, 杜进, 王睿驰, 等. 基于开关纹波调制的电源线通信技术[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 166-172. Wu Jiande, Du Jin, Wang Ruichi, et al. Power line communication technique based on switching ripple modulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 166-172(in Chinese).
- [19] 丁冠军, 兰海滨, 樊邦奎, 等. 智能电网应用中的 PLC 技术[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 378-382. Ding Guanjun, Lan Haibin, Fan Bangkui, et al. The power line communication technologies for smart grid application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 378-382(in Chinese).
- [20] 苏岭东, 翟明岳. 宽带电力线通信信号多重分形特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4430-4436. Su Lingdong, Zhai Mingyue. Research on multi-fractal characteristics of broadband power line communication signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4430-4436(in Chinese).
- [21] 汤效军. 电力线载波通信技术的发展及特点[J]. 电力系统通信, 2003, 24(1): 47-51. Tang Xiaojun. The development and characteristics of power line carrier techniques[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2003, 24(1): 47-51(in Chinese).
- [22] 李建岐, 陆阳, 赵涛, 等. 新一代电力线载波通信关键技术探讨[J]. 电力信息与通信技术, 2013, 11(12): 1-5. Li Jianqi, Lu Yang, Zhao Tao, et al. Discussions on key technologies of new generation power line carrier communication[J]. Electric Power ICT, 2013, 11(12): 1-5(in Chinese).
- [23] Zimmermann M, Dostert K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1): 249-258.
- [24] 戚佳金, 陈雪萍, 刘晓胜. 低压电力线载波通信技术研究进展[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 161-172. Qi Jiajin, Chen Xueping, Liu Xiaosheng. Advances of research on low-Voltage power line carrier communication technology[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 161-172(in Chinese).
- [25] Meng H, Guan Yongliang, Chen S. Modeling and analysis of noise effects on broadband power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 630-637.
- [26] 杨挺, 刘佳林, 张亚健, 等. 电力线载波通信时频混合降噪方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3153-3160. Yang Ting, Liu Jialin, Zhang Yajian, et al. Noise reduction method for LV power line carrier communication[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3153-3160(in Chinese).
- [27] Wu Jiande, Du Jin, Lin Zhengyu, et al. Power conversion and signal transmission integration method based on dual modulation of DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(2): 1291-1300.
- [28] Zhu Yue, Wu Jiande, Wang Ruichi, et al. Embedding power line communication in photovoltaic optimizer by modulating data in power control loop[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3948-3958.
- [29] Zhang Ruoqi, Wu Jiande, Wang Ruichi, et al. A novel battery management system architecture based on an isolated power/data multiplexing transmission bus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 5979-5991.

收稿日期: 2019-07-16。

作者简介:

何湘宁(1961), 男, 教授, 研究方向为电力电子技术及其工业应用, hxn@zju.edu.cn;

王睿驰(1990), 女, 讲师, 研究方向为电力电子控制与网络化技术, richwang@njnu.edu.cn;

吴建德(1973), 男, 副研究员, 研究方向为电力电子控制与网络通信技术, w94780101@126.com;

李武华(1979), 男, 教授, 研究方向为电力电子技术、可再生能源发电, woohualee@zju.edu.cn。

(实习编辑 刘雪莹)



何湘宁