



能量与信息同步调制变换器的理论、方法及应用

何湘宁*, 刘科明, 吴建德, 罗皓泽, 李武华

浙江大学电气工程学院, 杭州 310027

* E-mail: hxn@zju.edu.cn

收稿日期: 2024-07-22; 接受日期: 2024-11-18; 网络版发表日期: 2025-04-11

国家自然科学基金(批准号: 52350003)资助项目

摘要 为应对日趋严峻的能源危机、环境污染和气候变化问题, 国家提出了碳达峰、碳中和(“双碳”)战略目标, 推动能源系统转型. 电能系统与信息系统的深度融合是推动综合能源智能化转型和支撑国家“双碳”战略目标实施的前沿科技. 长期以来, 传统电能系统与信息系统在各自不同的理论体系指导下, 沿着相对独立的学科范式发展, 学理基础和发展路径基本处于割裂状态. 随着基于电力电子变换技术的能源转换装备在新型能源系统中的大规模渗透, 以电力电子装备为媒介实现能量和信息的同步调控, 为电能系统与信息系统的深度融合带来了新的历史机遇与挑战, 形成了电力电子变换信息调控技术新方向. 能量与信息同步调制(能信同调)变换器(talkative power converters/conversion, TPC)是其中代表性的研究成果, 它改变了电力电子变换装备仅调控电能而不参与信息编码的历史. 本文阐述能信同调变换器的基本概念和原理. 在此基础上, 分析并论证变换器的频带特性, 结合信号注入机制和信号形态给出了能量与信息同步调制的实现方法, 总结各类能量与信息同步调制技术的特征和分类框架. 针对全类别电力电子变换器的能信同调方法设计、信息调制与数据编码效率、信息传输模型与可靠性和电能自主溯源机理及安全传输机制分别进行了探讨, 为能信同调变换器理论和方法的进一步研究阐明了方向. 最后, 介绍了能信同调变换器的代表性应用, 包括光伏发电、电池储能管理系统、智能电网、智慧照明和无线电能传输系统.

关键词 “双碳”目标, 电力电子变换, 能量与信息同步调制变换器

1 引言

人类文明的发展和进步消耗了大量的能源, 由此带来的能源危机、环境污染和气候变化问题已成为人类社会亟待解决的全球性问题. 为了应对能源问题并

维护人类社会的可持续发展, 世界各国相继将碳达峰和碳中和(“双碳”)列为重要国策. 全球197个国家中已有151个国家提出碳中和目标, 覆盖了92%的GDP、89%的人口和88%的排放量^[1].

近年来, 我国碳排放量增长趋势放缓, 但总排放量

引用格式: 何湘宁, 刘科明, 吴建德, 等. 能量与信息同步调制变换器的理论、方法及应用. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 1297–1311
He X N, Liu K M, Wu J D, et al. Theory, methods, and applications of talkative power converters (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 1297–1311, doi: 10.1360/SST-2024-0179

仍然较高, 约分别为美国和欧盟的2.2倍和3.9倍^[2]。当前我国二氧化碳的主要排放源为能源行业, 其中电力行业排放高居各行业首位, 约占能源行业排放的41%^[3]。国家工业的发展离不开电能的消耗, 当前我国电力消耗仍处于快速增长阶段, 尤其是以LED照明、电动汽车、5G通讯、人工智能等为代表的新兴产业和技术需要大量的电能支撑。仅以数据中心为例, 2022年全国数据中心耗电量达到2700亿千瓦时, 占全社会用电量约3%。另一方面, 我国大力发展太阳能和风能等可再生能源发电技术, 取得了初步成效。2023年, 我国太阳能发电、风电及核电全国发电装机容量超过11亿千瓦, 占全国发电装机容量近40%, 同比增长36%^[4]。

为了实现“双碳”战略目标, 构建低碳高效的绿色电力能源体系是重中之重。电力电子装备通过改变电能的形态和参数实现电能的交直流可控变换, 可大幅提升消费端电能利用效率, 支撑可再生能源发电设备的海量接入, 促进多种能源间的优势互补与深度融合, 是构建绿色电力能源体系的核心。以电力电子装备为接口的电能系统如图1所示, 为实现状态感知、故障监测和能量管理等功能, 使电能系统高效稳定运行, 电力电子装备之间以及装备与系统之间需要进行信息

交互^[5]。现有研究通常将独立通信技术, 如现场总线技术、以太网技术和射频通信技术直接应用于电能系统以满足信息交互需求^[6]。

随着电能系统朝着绿色低碳、安全可靠和智慧高效的方向进一步发展, 电力电子装备运行特征识别、通信可靠安全和电能溯源成为了推动新型电能系统发展的三大核心挑战。然而, 现有电力电子装备与通信设备分立的模式难以应对上述挑战。首先, 随着高比例可再生能源以及海量电力电子装备接入, 需要海量的传感器和通信设备与之适配, 导致监测和管理难度急剧增加。其次, 系统高度依赖外部通信网络, 面临容错性弱和信息安全性低的问题, 导致网络故障时电力系统难以维持正常运行, 增大电网失控的风险。另外, 源、荷、储各类设备并网后, 面临电能可追溯性差和数据透明性低的问题, 在物理层面难以实现有效追踪监控, 导致电能交易存在漏洞。新型电能系统亟需一种能量流和信息流高度融合的安全可靠的技术路径, 进而提升系统集成度、安全性和智能化程度。

对电力电子学科的深入探究表明, 电力电子装备可作为媒介实现能量和信息的同步调控, 为电能系统与信息系统的深度融合带来了新的历史机遇与挑战,

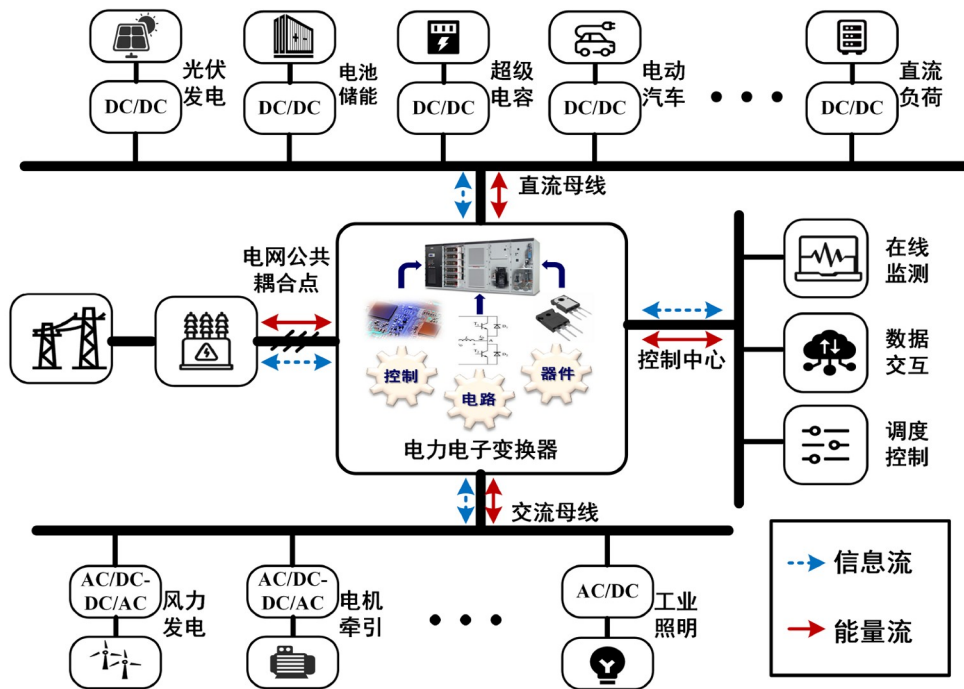


图 1 以电力电子装备为接口的电能系统框图
Figure 1 Power system structure with power converter as the interface.

形成了电力电子变换信息调控技术新方向^[7-9]. 能量与信息同步调制(能信同调)变换器(talkative power converters/conversion, TPC)是其中的代表性研究成果, 它改变了电力电子变换装备仅调控电能而不参与信息编码的历史, 其工作示意图如图2所示. 能信同调变换器在电能离散化过程中融合数字信息调制, 进而将能量流与信息流深度融合, 输出携带信息的能量. 因此, 能信同调变换器无需外部独立通信设备即可满足系统对电力电子装备信息感知的需求. 此外, 能信同调变换器可以通过将输出能量流与信息流深度耦合, 使信息无法独立于能量被更改, 从而实现电能的自主溯源, 并保证信息生成和传输的可靠性与安全性. 因此, 对能信同调变换器的研究有望推动电能变换从离散化到数字化进而到智能化的变革, 提升多种能源高效融合的作用和效益.

本文介绍了国内外在能量与信息同步调制变换器理论、方法和应用方面的最新进展, 主要包括能信同调变换器的原理、机制及技术. 根据变换器特征频带划分, 结合信号注入机制和信号形态, 建立了统一的调制分类模型. 本文还探讨了全类别电力电子装备的能信同调变换方法、信息调制与数据编码效率、信息传输模型与可靠性和电能自主溯源机理及安全传输机制, 为能信同调变换器理论和方法的进一步研究提供了研究思路.

2 能信同调变换器的理论和方法

2.1 电力电子变换信息本质特征

电力电子变换器可划分为开关网络和无源网络两部分. 其中, 开关网络包含功率开关器件(含二极管); 无源网络包含电感、电容、电阻等功率无源器件. 开关网络输出高频离散化电能脉冲, 其波形由控制该模块的开关器件门极驱动信号 $g(t)$ 决定. 在传统的数字PWM控制方式下, 如图3所示, 离散形式的门极驱动信号由时间分辨率为 Δt 的离散阶梯型锯齿能量调控载波 $v_{in}(t)$ 和能量调控参考波 $v_m(t)$ 比较得到. 在无约束条件下, PWM调制存在频率 f 、相位 φ 和占空比 d 三个独立参数, 对应三个独立信源. 设 f 、 φ 、 d 分别可以在集合 $\{f_1, f_2, \dots, f_{N_f}\}$ 、 $\{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N_\varphi}\}$ 、 $\{d_1, d_2, \dots, d_{N_d}\}$ 中自由选择, 则输出的电能中必然包含了信息. 将变换器工作状态所携带的信息量定义为功率变换熵 H_{pc} , 可表

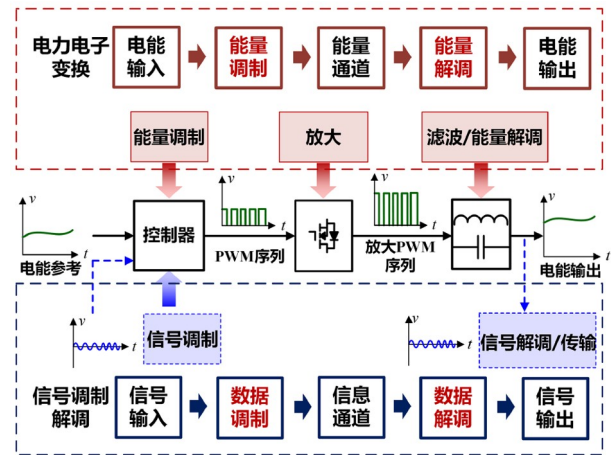


图2 能信同调变换器工作过程

Figure 2 Operating process of talkative power converters/conversion.

示为

$$H_{pc} = H(f) + H(\varphi) + H(d), \quad (1)$$

其中

$$H(f) = -\sum_{i=1}^{N_f} P(f=f_i) \log P(f=f_i), \quad (2)$$

$$H(\varphi) = -\sum_{i=1}^{N_\varphi} P(\varphi=\varphi_i) \log P(\varphi=\varphi_i), \quad (3)$$

$$H(d) = -\sum_{i=1}^{N_d} P(d=d_i) \log P(d=d_i). \quad (4)$$

如变换器的占空比 d 仅用于控制功率, 此时功率变换熵 H_{pc} 可表示为

$$H_{pc} = H(f) + H(\varphi). \quad (5)$$

综上所述, 电力电子变换器在功率变换过程中具有多个可控自由度, 这一特性为实现同步信息调制提供了可能. 文献[7]发现并首次理论上证明了电力电子变换器的内蕴信息本征属性, 揭示了电能变换和信息通信在物理层面的相似性和兼容性. 具有信息调制功能的电力电子变换器称为能量与信息同步调制变换器, 简称为能信同调变换器或TPC^[7-9].

2.2 能信同调变换器的多频带调制特性

能信同调变换器在不同频带存在不同的信息调制特性. 在低于闭环控制截止频率 f_{ctrl} 的频带, 控制环通过调节端口阻抗输出信息; 在高于闭环控制截止频率

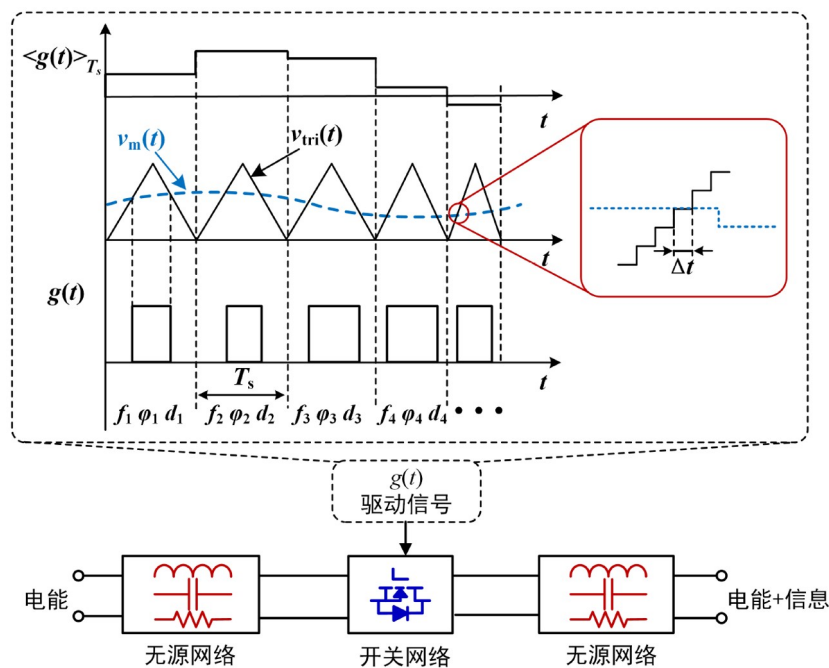


图 3 离散形式的门极驱动信号波形图
Figure 3 Waveforms of discrete gate driving signal.

且低于1/2开关频率的频带, PWM波以数模转换的方式输出调制信号; 在开关频率及以上频带, 输出的信息主要由开关载波决定. 据此, 能信同调变换器的信息调制特性可划分为三个频带: 阻抗调控频带、数模转换频带和开关调制频带, 如图4所示.

在阻抗调控频带, 能信同调变换器的端口阻抗特性灵活可控, 可以通过调节阻抗传输信息. 文献[10]在特定频率点将源变换器输出阻抗构造为有功源或纯无功源, 将负载变换器输入阻抗构造为恒功率负载特性, 将功率流与注入的信息流融合, 实现了点对点功率流的测量与校验. 文献[11]通过在电压控制环注入低频

交流信号, 改善了源变换器的下垂阻抗特性, 提升了直流微网中变换器的功率分配能力. 在阻抗调控频带, 能信同调变换器可以同时实现信息交互和功率调配, 该特性可以用于能量追踪.

在数模转换频带, 能信同调变换器可以输出调制的数字信号. 根据奈奎斯特采样定理, 当信号频率低于采样频率的一半时, 可从离散的采样值中完全恢复出原始信号, 因此能信同调变换器数模转换频带的上频率边界为半开关频率. 由于数模转换频带的下频率边界为变换器的闭环控制截止频率, 其转换增益与功率控制环参数解耦. 文献[12]提出了在变换器闭环控制截止频率与变换器滤波网络截止频率之间存在数模转换优选频带, 该频带内的信号既不受控制环参数变动影响, 也不会受到变换器中滤波器组件的抑制. 文献[13~15]提出了差分相移键控(differential phase shift keying, DPSK)调制方法, 将基带数据调制到数模转换频带从而实现了变换器间的能量和信息同步交互. 更进一步, 文献[16]在数模转换频带内结合正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制方法利用多个正交载波提升了频带利用效率, 并通过适当的转换增益设计实现了长距离能量信息同步

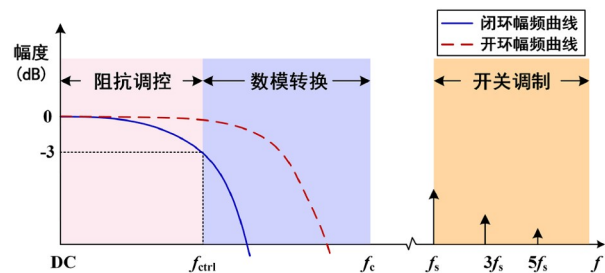


图 4 变换器能信同调频率特性示意图
Figure 4 Characteristics of talkative power converters across different frequency bands.

传输。

在开关调制频带, 能信同调变换器利用开关过程产生的纹波传输信息。文献[17,18]采用跳频差分相移键控(frequency-hopping DPSK, FH-DPSK)调制策略, 利用连续频率过渡过程有效抑制了相位调制带来的输出电压扰动。文献[19]在开关调制频带采用直序扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS)调制方法对开关驱动信号进行扩频编码, 从而提升了通信的抗噪声性能, 保证了通信的可靠性。

3 能信同调变换器的实现和技术分类

由于能信同调变换器拓扑结构不同、工作模式与控制方法各异、信息调制策略多样, 为阐明各类调制方法的共性原理、特征和关联, 根据信号注入机制和信号形态将不同能信同调方法分为四类。如图5所示, 按照信号的注入机制, 分为控制环纹波型和开关纹波型(也称为双载波型和单载波型); 按照信号是否数字调制, 分为编码型和非编码型。在此基础上, 可派生出一系列不同的能量信息同步调制方法。

在控制环纹波型调制方法中, 信号以微小扰动的形式与功率控制自由度融合并注入控制环, 此时变换器的频带特性对应阻抗调控频带和数模转换频带。受限于数模转换频带的频率上限, 其通信速率一般不高。由于信息载波独立生成, 因此可以调整信号幅度以满足不同应用场景需求。在非编码型调制方法中, 信号通过其特征参数如频率^[11]、幅度^[20]等携带信息。为提

升抗干扰能力与频带利用率, 编码型调制方法结合各种数字调制技术对基带信息进行数字调制, 典型方法有时分复用(time division multiplexing, TDM)^[21], DPSK^[13,14,15], OFDM^[16,22]等。

开关纹波型调制方法通过非功率控制自由度对生成PWM驱动信号的能量参考载波进行信息调制, 利用开关纹波作为携带信息的载波, 此时变换器频带特性对应开关调制频带。相较于阻抗调控频带和数模转换频带, 信息载波具有更高的载波频率, 通常能够实现更高的通信速率。但由于利用开关纹波作为信息载波, 信号幅值会受到负载变化影响, 不具备动态调节能力。与非编码-控制环型调制方法相似, 非编码-开关纹波型调制方法同样通过连续变化的特征参数携带信息^[23]。编码-开关纹波型调制方法对能量参考载波进行信息调制, 因此在与数字调制技术结合时需要实现对功率控制的解耦, 典型方法有频移键控(frequency shift keying, FSK)^[24,25], FH-DPSK^[17,26], DSSS^[19], 正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM)^[27,28]等。若采用扩频调制, 则可以扩展开关噪声频谱, 降低EMI干扰。

基于信号注入机制和信号形态的能信同调方法分类准则阐明了各类调制方法的共性原理、特征和关联。该分类准则不仅涵盖现有能信同调方法, 还为新型调制方法的推导提供了参考, 具有良好的普适性。

4 能信同调变换器的前沿研究

能信同调变换器(或能信同调变换技术)是电力电

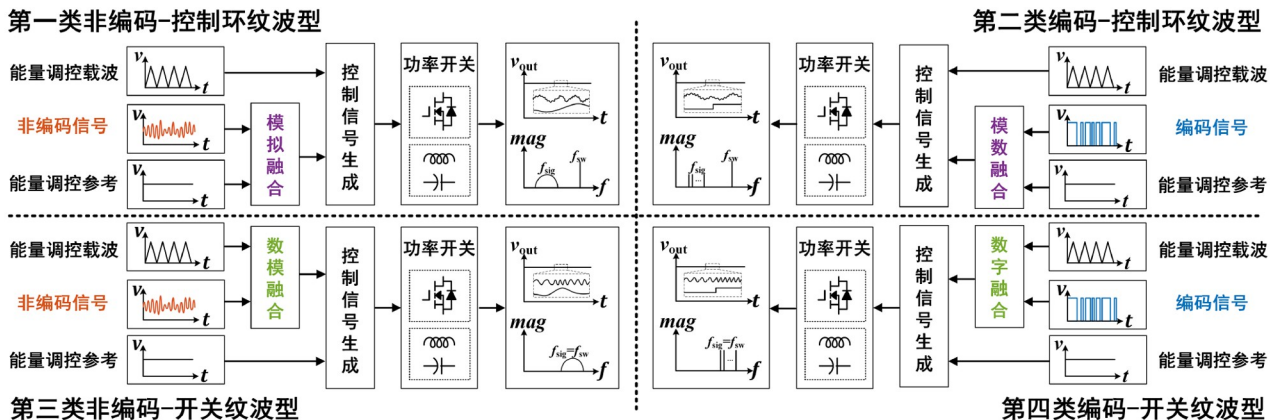


图5 能信同调方法分类及部分数字调制方法示意图

Figure 5 Features and classification framework of various talkative power converter technologies.

子变换信息调控技术的主要内容之一。其通过对电能进行数字化信息编码, 将信息流与能量流深度融合, 以保障信息产生和传输的一致性、安全性和可靠性。现阶段, 能信同调变换器的前沿研究方向包括: (1) 研究全类别变换器的能量信息同步调制方法; (2) 提升信息调制与数据编码效率; (3) 研究能信同调变换器系统的传输模型与可靠性; (4) 探讨电能自主溯源机理和安全传输机制。

4.1 全类别变换器的能量与信息同步调制

目前能信同调变换器的研究主要集中在DC-DC变换器, 而对AC-DC和DC-AC形式的研究较少^[8]。需要拓展能信同调变换器在不同电能变换类型中的典型拓扑结构与控制方法。为研究不同电能变换类型变换器拓扑的能信同调方法, 将变换器解构为多开关网络和无源网络的组合, 并分为三种基本结构, 即串联^[29-31]、并联^[27,28,32]、和级联^[33-38]结构, 如图6所示。在这三种变换器基本解构模型的基础上, 结合功率控制约束, 可设计出不同的能信同调方案。串联型结构的典型拓扑之一为H桥型多电平拓扑。文献^[29,30]针对H桥型多电平拓扑, 提出了交直流输出适应的同步调制方案。更进一步, 文献^[31]将级联型H桥多电平拓

扑拓展到三相永磁同步电机驱动应用, 并提出了一种同步调制方法。对于并联型结构, 可通过驱动信号的重组编码导出一系列同步调制方法。并联型结构的一类典型拓扑为交错并联拓扑。文献^[27]针对两相buck变换器应用了QAM调制方式, 提升了信息调制效率。更进一步, 文献^[28]实现了开关纹波上的多载波调制。LLC变换器是级联型拓扑的代表之一。文献^[33,34]分析了LLC变换器中各个自由度用于能信同调的控制原理, 讨论了LLC变换器结构上对占空比自由度的限制, 拓展了级联型结构能信同调变换器的适用场景。三相DC-AC变换器拓扑属于级联型结构, 作为应用最广泛的交直流转换拓扑之一, 也具备能信同调的潜力, 基于该拓扑和典型控制方法的能信同调方案引起了国内外学者的关注^[35-38]。基于变换器解构模型的能信同调方案设计规则具有良好的普适性, 将相互独立、结构众多的变换器拓扑简化为开关网络与无源网络的组合, 结合变换器信息调制属性与自身功率控制约束, 为全类别变换器的能信同调方法提供了研究思路。

4.2 信息调制与数据编码的效率

随着半导体技术的发展, 以GaN和SiC为代表的新一代宽禁带半导体器件相较于传统的硅器件实现了更

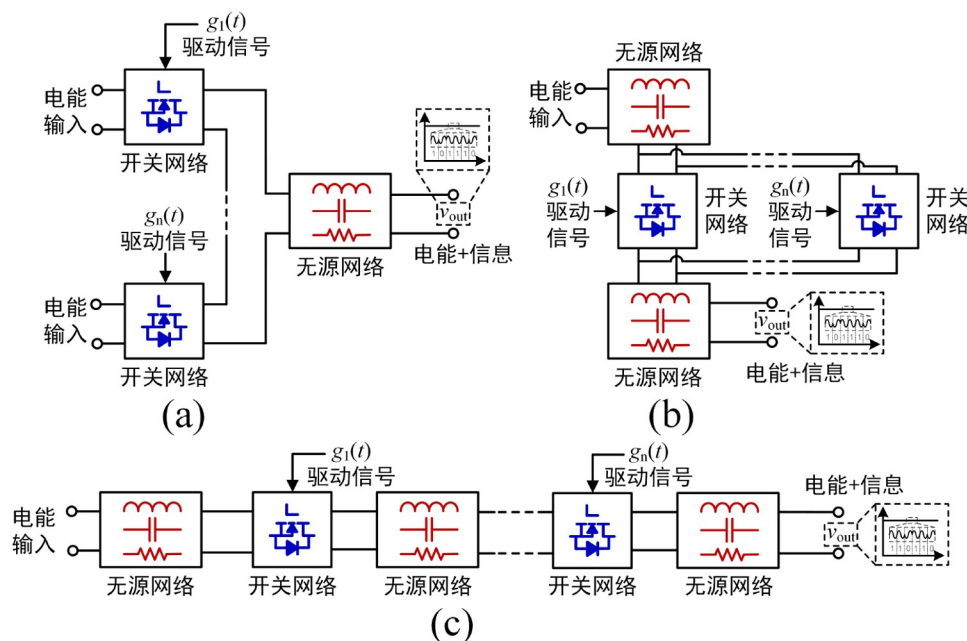


图6 变换器典型结构示意图。(a)串联型; (b)并联型; (c)级联型

Figure 6 Classic structure of talkative power converters. (a) Series connection; (b) parallel connection; (c) cascaded connection.

高的开关频率, 将变换器的可用频带范围扩展至MHz级别。然而, 电能系统内大量变换器的信息交互需求对信息调制与数据编码效率提出了新挑战。如何在有限带宽内充分挖掘变换器的通信潜力, 提升信息调制效率, 最大化功率变换熵, 仍是能信同调变换器的研究重点之一。

为衡量不同变换器、不同调制方法的信息调制效率, 文献[9,27]提出将通信速率与变换器开关频率的比值作为信息调制效率指标, 定义为开关频率利用率。在单个控制自由度上, 采用更高级的数字调制方式, 可以提升开关频率利用率。文献[13]采用DPSK调制策略, 在buck变换器上实现了2 kbps的通信速率和0.04的开关频率利用率。相比之下, 文献[16]采用OFDM的先进数字调制策略, 将buck变换器的通信速率和开关频率利用率分别提升至9.6 kbps和0.192。通过分析变换器不同自由度的兼容性, 同时在多个自由度上进行信息调制, 可以进一步提升开关频率利用率。文献[36]通过融合多自由度, 将buck变换器的通信速率和开关频率利用率分别提升至41.7 kbps和0.417。更进一步, 如图7所示, 文献[39]突破了传统自由度以周期作为最小编码单元的方式, 提出了一种离散数字编码方案。该方案重构了“开”和“关”两种状态自由度, 并将其作为基本编码单元, 在buck变换器上实现1250 kbps的通信速率和2.5的开关频率利用率。因此, 研究更高效的信息调制与数据编码方式, 可以有效提升能信同调变换器的通信速率和频带利用效率, 充分发掘其通信潜力, 进一步增强其信息交互能力, 扩展其应用场景。

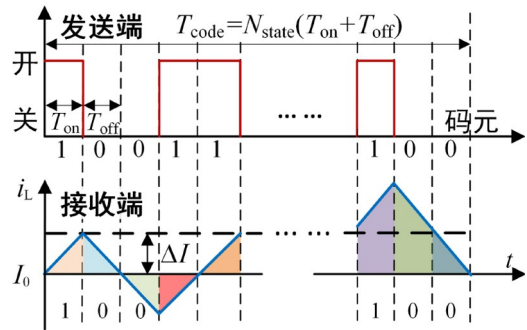


图7 基于开关状态自由度的编码示意图
Figure 7 On-off switching condition-based coding.

4.3 能信同调变换器系统的传输模型与可靠性

研究变换器内部噪声的形成机理和电路传输信道模型, 分析变换器的内部信道容量, 研究抗干扰方法以提升通信可靠性, 是能信同调变换技术的核心问题之一。通信视角下的能信同调系统如图8所示。由于控制方式和电路的非理想特性, 会引入噪声影响信息传输。此类噪声由功率变换过程产生, 称为内部噪声, 包括控制环稳态抖动、控制环/电源/负载突变引起的暂态过程和开关暂态过程等^[40]。此外, 信号在传输过程中会从环境中引入外部噪声, 主要包括电网基波和谐波、高斯白噪声及电磁干扰等。采用能量脉冲序列扩频等技术可抑制噪声的影响, 提升系统的抗干扰能力^[19,41]。采用接收端阈值动态调整等先进解调策略可有效应对暂态噪声影响, 进一步提升系统可靠性^[40]。文献[42]设计了一种基于图论分布式通信协议, 有效提升了系统的鲁棒性。

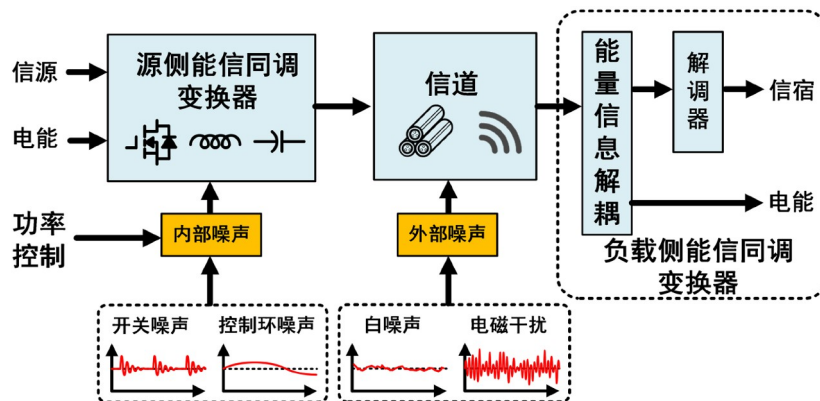


图8 通信视角下的能信同调系统框图
Figure 8 Talkative power converter system diagram from the perspective of communication.

在能信同调系统中, 变换器之间存在串联型、并联型和级联型三种基本传输模型, 其中串联型和并联型基本结构的数学模型及交互特性已得到了较为充分的研究^[6,40,43,44]. 在变换器级联系统中, 信号的传输机制、信号的跨级传输能力以及信号的传输稳定性构成了分析级联系统传输模型时面临的主要挑战. 文献^[45]建立了电力电子器件作为混频器的物理等效模型, 分析了系统的通信信道特性. 通过混频调制将信息加载到能量的边频带, 使信息具备跨变换器传输的能力. 能信同调变换器系统的传输模型分析, 为研究变换器的内部信道容量提供了依据, 为提升能信同调技术的可靠性和鲁棒性明确了研究方向.

4.4 电能自主溯源和安全传输机制

建立能量流与信息流的耦合模型, 研究电能自主溯源机理和安全传输机制, 可以实现电能系统中能量流追踪^[10,46]、调度^[23]和交易^[10,47]等关键功能, 是能信同调技术发展的重要方向. 电力电子变换器通过能量与信息同步调制实现能量流与信息流的同步融合, 由

于电能与信息来源于同一变换器设备, 电路上存在物理关联性, 这一特性可用于形成电能溯源机制; 同时, 将电能溯源与变换器间的能量交互协议功能结合, 可设计出一种新型的能量安全传输机制. 文献^[10]通过设计能量流功率大小与数据信号强弱的函数关系, 建立了直流微电网中电源和负载作为通信终端的精确阻抗模型, 通过外加阻抗匹配网络并集成适当通信协议, 在能量流和信息流之间建立了可控关联, 实现对能量流的传输路径监测, 最终实现了电能网络中点对点的电能自主溯源和安全传输, 并将其应用于如图9所示的点对点电能交易模型. 电能自主溯源和安全机制的研究, 揭示了能量流与信息流的耦合机理, 为电能系统能量流追踪、调度和交易等关键功能的实现奠定了理论基础.

5 能信同调变换器的应用

5.1 光伏发电系统

光伏发电系统受光伏电池特性、制造工艺和外界

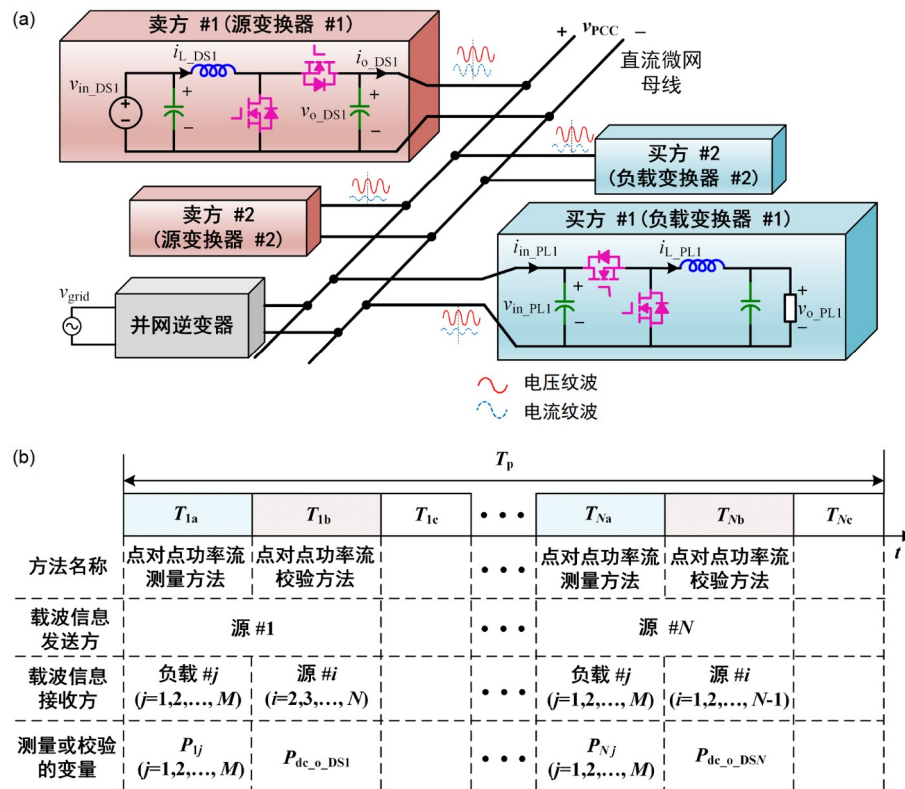


图 9 直流微电网点对点电能交易模型示意图. (a)直流微电网结构示意图; (b)点对点电能交易协议时序
Figure 9 Peer-to-peer trading model in DC microgrids. (a) System structure of DC microgrids; (b) peer-to-peer trading protocol.

环境影响,具有间歇性、随机性和波动性.系统工作时存在最大功率点(maximum power point, MPP),使系统具备最佳输出性能.为了在不同条件下工作于MPP状态,通常采用变换器实现最大功率点追踪(MPP tracking, MPPT).应用能信同调技术,可使变换器在完成MPPT的同时完成信息交互,实现光伏发电系统的状态监测、智能控制与能量管理,进一步提升系统性能^[13,48,49].光伏优化器系统如图10所示,所有优化器串联后连接并网逆变器.当在优化器的功率控制环节加入数据信号时,其开关器件驱动信号上会产生相应的扰动,此时优化器的端口产生携带信息的电压电流扰动.通信控制系统通过检测母线扰动即可实现信息接收.同样,通信控制系统也可通过对并网逆变器进行能信同调实现双向通信.文献[13]提出了一种在光伏优化器中实现MPPT的能信同调方法,并分析了同步调制系统的模型以及加性高斯白噪声对系统性能的影响.文献[49]针对四输入组合拓扑的光伏优化器系统,建立了系统模型,详细分析了信号传输特性及能信同调对光伏优化器损耗的影响,验证了能信同调技术在组合式拓扑中的可行性和适用性.

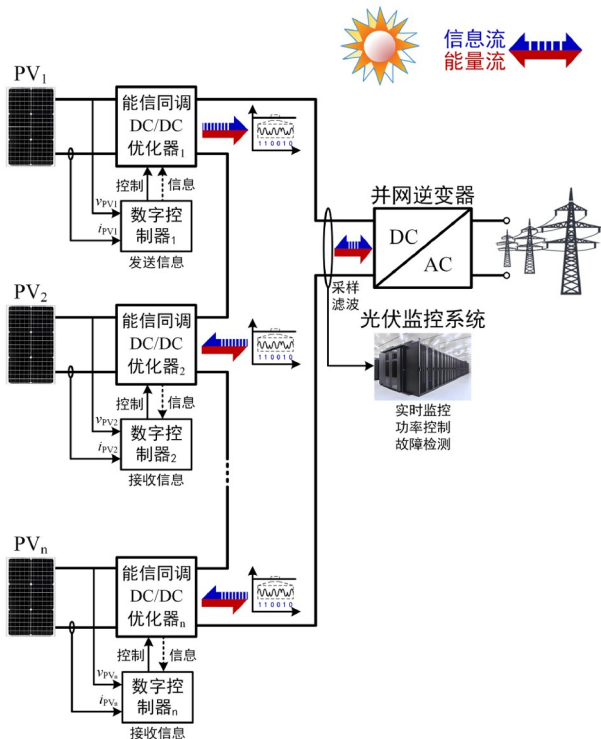


图 10 光伏优化器串联系统示意图

Figure 10 Structure of photovoltaic system with talkative power converter-based optimizer connected in series.

5.2 电池储能管理系统

电池储能系统广泛应用于储能电站、电动汽车和消费电子产品等工业场景.锂离子电池因其高能量密度和大充放电电流等优点,逐渐成为研究热点.然而,锂离子电池的容量因制造工艺和使用环境等因素随时间变化,导致储能系统性能下降.此外,锂离子电池在使用过程中需要状态监测、安全保护、能量控制和信息管理,因此,电池管理系统(battery management system, BMS)是储能系统中必不可少的组成部分.应用能信同调变换技术,可提升系统集成度,监测电池荷电状态等关键信息,使系统更加智能化^[50-52].如图11所示,储能系统应用能信同调技术后,锂离子电池单体的充放电管理、通信以及电池组间的能量均衡和通信全部由电力电子变换器实现,简化了系统架构,有效降低了成本.文献[50]提出了一种基于能信同调的新型BMS架构,采用公共母线同时传输能量和信息,简化了系统结构.文献[51]将能信同调应用于分布式主动均衡电路,提升了电池组串的扩展能力.文献[52]则在能信同调变换器的基础上集成了电池交流阻抗在线测量功能,进一步简化系统结构,提升系统性能.

5.3 智能电网

以电力电子装备为核心的电力电子变压器和高压直流输电等设备已渗透至电能的“发、输、变、配、用”多个环节^[53].能信同调变换器赋予这些装备信息交互能力,使其成为能量与信息的综合处理设备.如图12所示,在电能局域网中,能信同调智能电能路由器可实现即插即用、状态感知、实时控制和灵活自主的变压和配电功能^[44,54-56].高压直流输电因其简单的线路结构和长距离输电中的低损耗特性,已成为解决远距离和大容量电能输送问题的有效方案.更少的节点和滤波器以及更低的线路阻抗使其对传输信号的干扰大大降低,是能信同调变换器的潜在应用场景.综上,能信同调变换器为电能系统的“源、网、荷、储”互联、电能质量监测、电能调度、电能交易、故障维护与管理等多项功能提供有效支撑,具有巨大的应用潜力和研究价值.

5.4 智慧照明系统

智慧照明系统通过发光二极管(light emitting diode, LED)等光源发出肉眼难以分辨的光信号传输

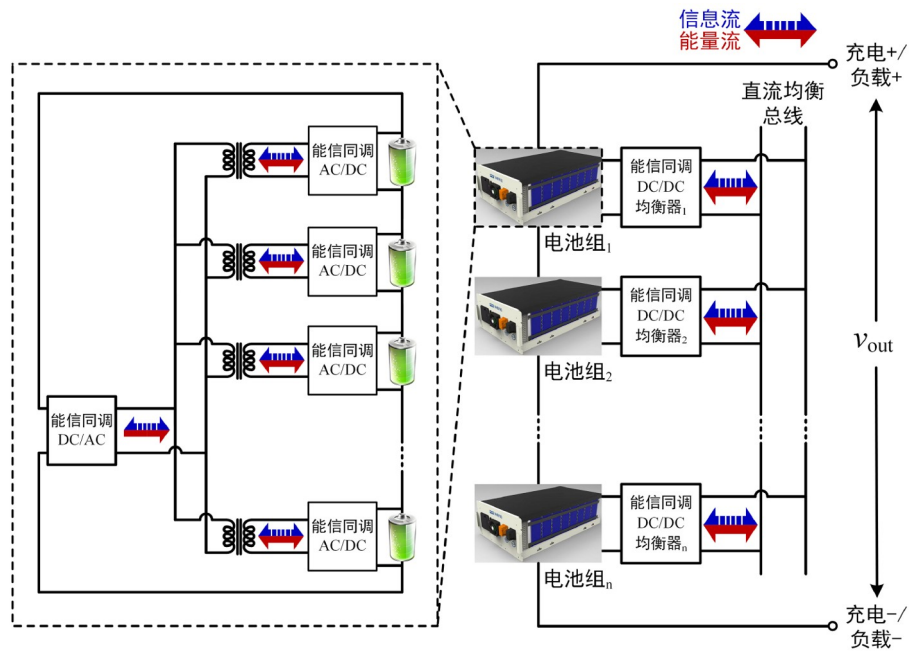


图 11 电池管理系统示意图
Figure 11 Structure of talkative power converter-based battery management system.

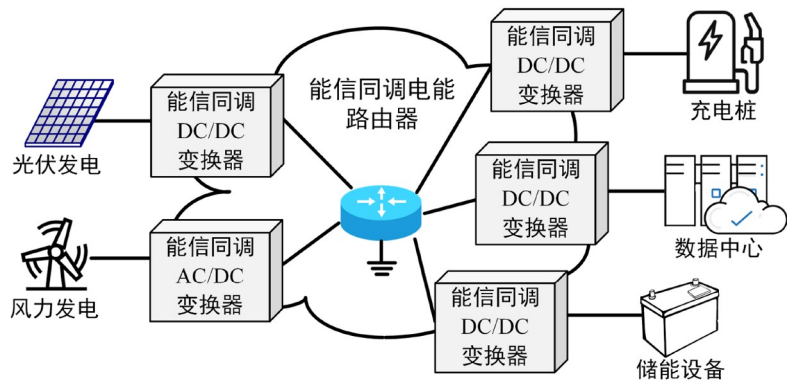


图 12 能信同调智能电能路由器结构示意图
Figure 12 Structure of talkative power converter-based smart energy router.

信息, 是一种节能的新型无线通信方式^[57]. 在无线电频带已被大量使用的情况下, 智慧照明系统不仅能提供免费、共享的带宽资源, 还与现有的无线电通信互不干扰. 此外, 照明光线具有不可穿透性, 天然具有物理安全特性. 因此, 智慧照明具有巨大的开发潜力. 如图13所示, 智慧照明系统利用LED驱动电路控制照明所需的电流, 从而控制光照强度. 将能信同调用于LED驱动电路, 即可将信息同步调制到LED发出的可

见光上. 文献[58]通过在电流控制环路中引入微小信号扰动实现通信. 为提升比特率, 文献[27]和[28]利用开关纹波传输信息, 有效提升了通信系统的信息调制效率.

5.5 无线电能传输系统

无线电能传输系统应用于消费电子、电动汽车和 水下装备等领域. 能信同调变换器用于无线电能传输系统, 可实现对无线电能传输过程中电能传输工况的

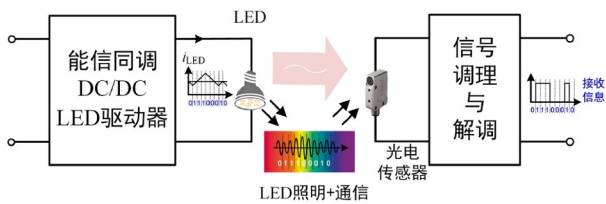


图 13 智慧照明系统示意图

Figure 13 Structure of talkative power converter-based smart lighting system.

优化, 同时提供反馈控制、线圈对准、异物检测、负载检测等方面的监测功能^[59,60]. 国际著名期刊Nature旗下子刊Communication Engineering和Nature Reviews Electrical Engineering分别报道了能信同调变换器在无线电能传输系统中的应用^[45,61]. 文献[45]提出了基于磁耦合谐振式的能信同调变换器信息混频跨级传输概念, 实现了高效中距离无线能量信息传输, 拓展了无线电能传输的应用范围. 文献[61]介绍了一种模块化的水下机器人, 通过能信同调模块的灵活组装和配置实现不同的功能, 能信同调变换器作为供电和通信的核心组件发挥了重要作用, 如图14所示.

6 结论与讨论

随着电力电子技术的迅猛发展, 电能变换装备和系统的电压/容量等级不断延展, 应用领域不断拓展, 运行环境日趋复杂, 电能变换装备和系统的状态感知、稳定控制、故障保护、多机组网和能量管理等功能亟需高可靠、高安全和高鲁棒的信息交互. 电能系统与信息系统的深度融合是推动综合能源智能化转型和支撑国家“双碳”战略目标实施的前沿科技.

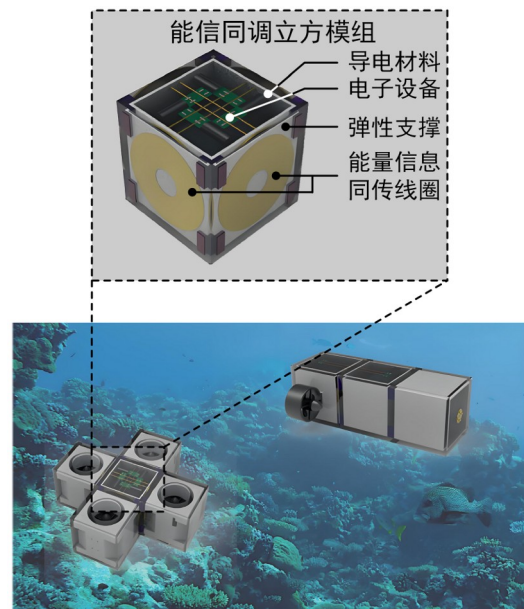


图 14 立方模组水下机器人示意图

Figure 14 Cubic marine robotics.

本文介绍了电力电子变换器内蕴的信息本征属性, 讨论了能量与信息同步调制变换器的理论、方法与技术. 分析了能信同调变换器的时、频带特征, 给出了各类能信同调变换器实现方法的分类框架. 针对全类别变换器能信同调方法、信息调制与编码效率、信息传输模型与可靠性和电能自主溯源机理和安全传输机制进行了剖析与综述, 为能信同调变换器的进一步研究提供了参考建议. 最后, 结合光伏发电、电池储能管理系统、智能电网、智慧照明和无线电能传输等典型场景, 介绍了能信同调变换器的应用, 揭示了其在分布式电源系统中广阔的应用前景.

参考文献

- 1 Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University. 2023 Global Carbon Neutrality Annual Report Progress (in Chinese). Technical Report, Beijing, 2023 [清华大学碳中和研究院. 2023全球碳中和年度报告进展. 技术报告, 北京, 2023]
- 2 Energy Institute. Statistical Review of World Energy. Technical Report, London, 2023
- 3 State Grid Corporation of China. State Grid Corporation's action plan on peaking carbon dioxide emissions and carbon neutrality (in Chinese). Beijing, 2021 [国家电网有限公司. 国家电网公司“碳达峰、碳中和”行动方案. 北京, 2021]
- 4 National Energy Administration of China. 2023 National Electric Power Industry Statistics (in Chinese). Beijing, 2024 [国家能源局. 2023年全国电力工业统计数据. 北京, 2024]
- 5 Zhao Z M, Feng G H, Yuan L Q, et al. The development and key technologies of electric energy router (in Chinese). Proc Chin Soc Electrical Eng, 2017, 37: 3823–3834 [赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关键技术. 中国电机工程学报, 2017, 37: 3823–3834]

- 6 Wu J, Du J, Lin Z, et al. Power conversion and signal transmission integration method based on dual modulation of DC–DC converters. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, 62: 1291–1300
- 7 He X, Wang R, Wu J, et al. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power. *Nat Commun*, 2020, 11: 2479
- 8 Liserre M, Beiranvand H, Leng Y, et al. overview of talkative power conversion technologies. *IEEE Open J Power Electron*, 2023, 4: 67–80
- 9 Wang R, He X, Wu J, et al. Power and signal dual modulation with info nature of power converters. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2023, 11: 588–601
- 10 Zhang R, Hui Y, Wu J, et al. A power flow tracing method based on power electronic signaling for P2P electricity trading in DC microgrids. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 3570–3582
- 11 Peyghami S, Mokhtari H, Blaabjerg F. Decentralized load sharing in a low-voltage direct current microgrid with an adaptive droop approach based on a superimposed frequency. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2017, 5: 1205–1215
- 12 Han R, Rogers D J. Zero-additional-hardware power line communication for DC–DC converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 13107–13118
- 13 Zhu Y, Wu J, Wang R, et al. Embedding power line communication in photovoltaic optimizer by modulating data in power control loop. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, 66: 3948–3958
- 14 Loose F, Teixeira L, Duarte R R, et al. On the use of the intrinsic ripple of a buck converter for visible light communication in LED drivers. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2024, 6: 1235–1245
- 15 Wang R, Chen G, Chen J, et al. An embedded communication method for in-home energy routers with power/signal dual modulation. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2022, 10: 5553–5563
- 16 Zhang R, Hui Y, Wu J, et al. Embedding OFDM-based carrier communication into power control loop of converter in DC microgrids. *IEEE Trans Ind Electron*, 2022, 69: 6914–6924
- 17 Chen J, Wu J, Liu K, et al. Improved switching ripple modulation strategy for simultaneous power conversion and data communication in DC–DC converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 9275–9284
- 18 Chen J H, Wu J D, Wang R C, et al. Switching ripple communication method based on FH-DPSK modulation for DC-DC converters (in Chinese). *Proc Chin Soc Electrical Eng*, 2022, 42: 3354–3363 [陈竞辉, 吴建德, 王睿驰, 等. DC-DC变换器基于FH-DPSK调制的纹波通信方法. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 3354–3363]
- 19 Wang R, Lin Z, Du J, et al. Direct sequence spread spectrum-based PWM strategy for harmonic reduction and communication. *IEEE Trans Power Electron*, 2016, 32: 4455–4465
- 20 Kirakosyan A, El-Saadany E F, Moursi M S E, et al. Communication-free current sharing control strategy for DC microgrids and its application for AC/DC hybrid microgrids. *IEEE Trans Power Syst*, 2020, 35: 140–151
- 21 Wu J, Wang R, Chen J, et al. Improved powered bus communication technique based on PD-TDMT for distributed power system (DPS). *IET Power Electron*, 2019, 12: 3782–3791
- 22 Leng Y, Yu D, Han K, et al. OFDM-based intrinsically safe power and signal synchronous transmission for CC-PT-controlled buck converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 10319–10331
- 23 Choi H J, Jung J H. Enhanced power line communication strategy for DC microgrids using switching frequency modulation of power converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2017, 32: 4140–4144
- 24 Lin Z, Du J, Wu J, et al. Novel communication method between power converters for DC micro-grid applications. In: *Proceedings of IEEE International Conference on DC Microgrids ICDCM*. Atlanta, 2015. 92–96
- 25 Stefanutti W, Saggini S, Mattavelli P, et al. Power line communication in digitally controlled DC–DC converters using switching frequency modulation. *IEEE Trans Ind Electron*, 2008, 55: 1509–1518
- 26 Chen J H, Wu J D, Wang R C, et al. Switching ripple communication method based on FH-DPSK modulation for DC-DC converters (in Chinese). *Proc Chin Soc Electrical Eng*, 2022, 42: 3354–3363 [陈竞辉, 吴建德, 王睿驰, 等. DC-DC变换器基于FH-DPSK调制的纹波通信方法. *中国电机工程学报*, 2022, 42: 3354–3363]
- 27 Rodriguez J, Lamar D G, Miaja P F, et al. Reproducing single-carrier digital modulation schemes for VLC by controlling the first switching harmonic of the DC–DC power converter output voltage ripple. *IEEE Trans Power Electron*, 2018, 33: 7994–8010
- 28 Rodriguez Mendez J, Lamar D G, Aller D G, et al. Reproducing multicarrier modulation schemes for visible light communication with the ripple

- modulation technique. *IEEE Trans Ind Electron*, 2020, 67: 1532–1543
- 29 Mandourarakis I, Koutroulis E, Karystinos G N. Power line communication method for the simultaneous transmission of power and digital data by cascaded H-bridge converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 12793–12804
 - 30 Mandourarakis I, Koutroulis E, Karystinos G N. Transmission of digital data to cascaded H-bridge converters through the power line. *IEEE J Emerg Sel Top Ind Electron*, 2023, 4: 502–513
 - 31 Zhang Y, Chen G, Hu Y, et al. Cascaded multilevel inverter based power and signal multiplex transmission for electric vehicles. *Trans Electr Mach Syst*, 2020, 4: 123–129
 - 32 Guo H, Li Y, Hou B B, et al. Power information integration technology of DC-DC converters based on orthogonal frequency division multiplexing-multiple quadrature amplitude modulation (in Chinese). *Trans China Electrotech Soc*, 2023, 38: 4353–4365 [郭昊, 李岩, 侯冰冰, 等. 基于正交频分复用-多进制正交幅度调制的DC-DC变换器能量信息一体化技术. *电工技术学报*, 2023, 38: 4353–4365]
 - 33 Liu K, Hui Y, Chen J, et al. Simultaneous power and data modulation scheme for LLC resonant converter. *IEEE Trans Power Electron*, 2024, 39: 270–279
 - 34 Liu K, Yang H, Chen Y, et al. Active rectified LLC resonant converter using combined frequency and phase modulation for talkative power conversion. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2024, 12: 3315–3324
 - 35 Shan S, Umanand L. A novel fractional harmonic d-q domain based power line signaling technique for power converters in a microgrid. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 34: 11264–11277
 - 36 Chen J, Liu K, Wu J, et al. Simultaneous power and data transmission using combined three degrees of freedom modulation strategy in DC-DC converters. *IEEE Trans Power Electron*, 2023, 38: 3191–3200
 - 37 Leng Y, Zhu R, Liserre M, et al. Variable zero-vector-width-based three-phase DC/AC talkative power conversion. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2024, 12: 3402–3414
 - 38 Wang Z, Zhou D, Liu X, et al. Sideband harmonic-based talkative power conversion. *IEEE Trans Power Electron*, 2024, 39: 13708–13719
 - 39 Chen J, Wu J, Wang R, et al. Coded PWM based switching ripple communication applied in visible light communication. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, 36: 9659–9667
 - 40 Zhu H, Xie Z Y, Cao W B, et al. Power-information integration in DC-DC converters based on power control loop perturbation (in Chinese). *Power Syst Prot Control*, 2024, 52: 149–156 [祝贺, 谢志远, 曹旺斌, 等. 基于功率控制环扰动的DC-DC变换器能量信息一体化研究. *电力系统保护与控制*, 2024, 52: 149–156]
 - 41 Park H P, Kim M, Jung J H. Bidirectional CLLC resonant converter employing PLC capability and EM noise reduction technique for small-sized ESS application. *IEEE J Emerg Sel Top Ind Electron*, 2021, 2: 277–286
 - 42 Wang R, Wu J, Qian Z, et al. A graph theory based energy routing algorithm in energy local area network. *IEEE Trans Ind Inf*, 2017, 13: 3275–3285
 - 43 Li M, Yu D, Yu S S, et al. Frequency division multiplexing-based power/signal synchronous transmission strategy for IPOS-DAB DC/DC converters. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2024, 12: 3290–3301
 - 44 Peng L, Jiang W, Zhang L, et al. Research on time-division-based multi-user energy-information integrated AC transmission technology (in Chinese). *Proc Chin Soc Electrical Eng*, 2024, Early Access [彭乐, 蒋玮, 张立, 等. 基于时间分集的交流系统多用户能量-信息一体化传输技术研究. *中国电机工程学报*, 2024, 网络首发]
 - 45 He X, Liu S, Wu J, et al. Wireless power and information dual transfer system via magnetically coupled resonators. *Commun Eng*, 2024, 3: 8
 - 46 Abhyankar A R, Soman S A, Khaparde S A. Optimization approach to real power tracing: An application to transmission fixed cost allocation. *IEEE Trans Power Syst*, 2006, 21: 1350–1361
 - 47 Chaturanga D W, Mudiyansele W, Hasan K N. Peer-to-peer energy trading: Existing algorithms, applications, platforms, challenges and opportunities. In: *Proceedings of IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference APPEEC*. Melbourne, 2022. 1–6
 - 48 Wu J, Xing Y, Song M, et al. An autonomous voltage control strategy for IPOS DC power system with power-ripple-based low bandwidth communication. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2023, 11: 2672–2682
 - 49 Guan Y, Wu J, Liu K, et al. Multiinput PV optimizer system with built-in communication using talkative power conversion. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2024, 12: 3392–3401
 - 50 Zhang R, Wu J, Wang R, et al. A novel battery management system architecture based on an isolated power/data multiplexing transmission bus. *IEEE Trans Ind Electron*, 2019, 66: 5979–5991

- 51 Liu K, Chen K, Chen J, et al. Smart distributed equalizer for series-connected battery strings based on power and signal dual modulation. In: Proceedings of IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition PEAC. Guangzhou, 2022. 139–143
- 52 Park H P, Choi H J, Kim M, et al. Multisinusoidal perturbation strategy for BPSK power line communication and online battery impedance measurement. *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 2024, 12: 3360–3371
- 53 Wang R C. Research on key technology of power/data integrated energy router (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hangzhou: Zhejiang University, 2019 [王睿驰. 能量-信息一体化的电能路由器关键技术研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2019]
- 54 Zhou L, Liu Q, Chen Y, et al. Digital-power-communication concept for energy coordination in PV-battery-charging DC microgrid. *IEEE Trans Smart Grid*, 2023, 14: 4219–4229
- 55 Yu D, Li K, Yu S, et al. A novel power and signal composite modulation approach to powerline data communication for SRM in distributed power grids. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, 36: 10436–10446
- 56 Yu D, Hua Y, Yu S, et al. A new modulation–demodulation approach to DC power-line data transmission for SRG-integrated microgrid. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 12370–12382
- 57 Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *IEEE Trans Consumer Electron*, 2004, 50: 100–107
- 58 Deng X, Arulandu K, Wu Y, et al. Performance analysis for joint illumination and visible light communication using buck driver. *IEEE Trans Commun*, 2018, 66: 2065–2078
- 59 Qian Z, Yan R, Wu J, et al. Full-duplex high-speed simultaneous communication technology for wireless EV charging. *IEEE Trans Power Electron*, 2019, 34: 9369–9373
- 60 Lei K L, Liu F X. Multi-port full-duplex simultaneous wireless information/power transfer method based on frequency division multiplexing (in Chinese). *Proc Chin Soc Electrical Eng*, 2022, 42: 6803–6812 [雷珂林, 刘福鑫. 基于频分复用的多端全双工无线能量信息同步传输方法. 中国电机工程学报, 2022, 42: 6803–6812]
- 61 Zhou J, Hu S, Li T, et al. Cubic marine robotics. *Nat Rev Electr Eng*, 2024, 1: 143–144

Theory, methods, and applications of talkative power converters

HE XiangNing, LIU KeMing, WU JianDe, LUO HaoZe & LI WuHua

College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

To confront the escalating challenges of the energy crisis, environmental pollution, and climate change, China has committed to the goals of carbon peaking and carbon neutrality (“dual carbon”), driving the transformation of its energy system. A key technological advancement in this effort is the deep integration of power and communication systems, which represents the frontier to achieve the “dual carbon” goals. Traditionally, power systems and communication systems have developed independently, guided by distinct theoretical frameworks and disciplinary paradigms. There has been minimal overlap in their foundation theories and development paths. However, the large-scale use of power electronic equipment in renewable energy systems has created new opportunities and challenges for the dual modulation of power and information through power electronic converters. This development is paving the way for a deeper integration of power conversion and communication systems, shaping a new direction in smart power electronic conversion technology. Talkative power converters/conversion (TPC) represent a significant advancement in this field. It transforms the traditional role of power electronic equipment, which was primarily focused on regulating electrical power, to one that actively participates in information encoding. This paper explores the fundamental concepts and principles of TPC technology. Building on this foundation, it analyzes the characteristics of the converters across different frequency bands and presents methods for implementing TPC, with a focus on signal injection mechanisms and signal formats. The features and classification framework of various TPC technologies are summarized. Additionally, the design of TPC methods for all categories of power electronic converters, as well as the efficiency of information modulation and data encoding, information transmission models and reliability, and mechanisms for autonomous energy tracing and secure transmission are explored. Finally, the paper introduces typical applications of TPC technology, including photovoltaic power generation, battery energy storage management systems, smart grids, intelligent lighting, and wireless power transfer systems.

carbon peaking and carbon neutrality goals, power electronic conversion, talkative power converters/conversion

doi: [10.1360/SST-2024-0179](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0179)