

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230885

基于功率控制环扰动的 DC-DC 变换器能量信息一体化研究

祝贺^{1,2}, 谢志远¹, 曹旺斌^{1,2}, 胡正伟¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 河北省电力物联网技术重点实验室
(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 针对实现 DC-DC 变换器之间的信息交互较为复杂的问题, 提出了一种基于功率控制环扰动实现其能量信息一体化的方法。通过在 DC-DC 变换器的传统功率控制环中叠加二进制频移键控(binary frequency shift keying, 2FSK)信号作为扰动, 将数据信息叠加到传统脉冲宽度调制(pulse-width modulation, PWM)信号中, 使得该 PWM 信号同时包含数据信息, 实现能量信息一体化。首先, 给出基于 2FSK 的功率/数据双载波调制以及实时的滑动离散傅里叶变换(sliding discrete Fourier transform, SDFT)解调方案。然后, 通过对 Buck 变换器的能量信息一体化模型进行小信号建模与分析可知, 降低输入阻抗可提升通信的信噪比。最后搭建一个由两个 Buck 变换器并联的实验装置进行验证。实验结果表明在稳态和负载突变的工况下均可实现 3 kb/s 的稳定通信, 验证了所提方法的可行性。该方法使得 DC-DC 变换器能同时进行功率变换和数据传输, 提升数字化和智能化水平。

关键词: 扰动信号; 二进制频移键控; 滑动傅里叶变换; 功率/数据双载波调制; 能量信息一体化

Power-information integration in DC-DC converters based on power control loop perturbation

ZHU He^{1,2}, XIE Zhiyuan¹, CAO Wangbin^{1,2}, HU Zhengwei¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: To address the complex issue of information exchange between DC-DC converters, this paper proposes a method that integrates power and information by introducing perturbations into the power control loop. By superimposing binary frequency shift keying (2FSK) signals as perturbations in the traditional power control loop of the DC-DC converters, data information is embedded into the conventional pulse-width modulation (PWM) signal, enabling the PWM signal to simultaneously carry data information, thus achieving the integration of power and information. First, this paper presents a power/data dual carrier modulation scheme based on 2FSK and a real-time sliding discrete Fourier transform (SDFT) demodulation scheme. Subsequently, it is evident from the small-signal modeling and analysis of the power-information integration model of the Buck converter that reducing the input impedance can enhance the signal-to-noise ratio of communication. Finally, an experimental set-up consisting of two parallel Buck converters is constructed for validation. Experimental results demonstrate stable communication at a rate of 3 kb/s in steady-state and load transient conditions, confirming the feasibility of the proposed method. This method enables DC-DC converters to simultaneously perform power conversion and data transmission, thereby enhancing digitization and intelligence levels.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177083 and No. 62001166).

Key words: perturbation signal; binary frequency shift keying (2FSK); sliding discrete Fourier transform; power/data dual carrier modulation; power-information integration

0 引言

电力电子变换器作为构建交直流混合电网的核

心装备, 对信息交互提出了更高的要求^[1-3]。电力电子变换器的研究主要侧重于功率变换, 通过可控开关器件实现对电压、电流和功率的控制^[4-5]。一般而言, 若要实现变换器之间的通信, 则需要加入独立的通信方式, 但是功率变换和通信在实现方式是独立的, 不存在关联, 硬件成本相对会增加。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177083, 62001166);
河北省省级科技计划项目资助(SZX2020034)

常用于电力电子变换器之间的通信方式主要包括控制局域网总线通信、无线通信和电力线通信等。控制局域网总线通信速率高，需要额外的通信线缆，性价比低^[6-7]；无线通信成本低，但是易受外界干扰，不适合远距离传输，且安全性较低^[8-10]；电力线通信依靠电力线进行数据传输，可靠性高、成本低，但是发送端和接收端需要耦合电路，且发送端需要额外的硬件电路生成基带信号^[11-13]。上述通信方案中，通信和功率变换在设计上完全独立，没有充分考虑功率变换和通信在工作过程中的统一性。因此，探索一种适用于电力电子变换器本身的通信方案成为了学者的研究热点^[14-18]。

文献[19]阐述了可以通过计算能力给物理层赋予能量信息的属性，并以电池网络管控技术为例进行探索和实践，提出了能量信息化的思想。文献[20]提出了电力电子信号化技术的概念，对其在电力线通信(power line communication, PLC)、故障检测和在线状态检测等场景的应用进行了分类。文献[21]针对直流微电网中变换器间通信的问题，通过在原有的功率控制环中叠加正交频分复用调制信号，将串行数据转化为多路并行数据进行传输，增加了频带利用率，但是对载波频偏和相位噪声非常敏感，容易引起码间串扰。文献[22]将能量信息一体化技术应用用于交错并联 DC-DC 变换器中，基于多进制正交幅度调制(multiple quadrature amplitude modulation, MQAM)提高了通信速率，但该方法也大幅增加了解调算法的复杂性，抗扰能力较差。文献[23]提出了一种基于功率/信号复合调制的 PLC，并应用于光伏优化器中，实现了 DC-DC 变换器之间的通信。文献[24]基于时分复用技术提出了一种改进的电池管理系统架构，实现了单体电池之间的信息交互，有利于优化电池的充放电时间。文献[25]采用功率/数据单载波调制方法，变换器发送码元“1”或“0”时切换不同的开关频率，该方法实现简单，但功率变换和通信采用同一载波，两者相互干扰明显且通信距离较短。

DC-DC 变换器能量信息一体化的示意图如图 1 所示，源变换器输出端并联，负载变换器输入端并联。功率在源变换器和负载变换器之间单向流动，数据在源变换器和负载变换器之间可以进行双向流动。变换器既能实现传统的功率变换，又能充当数据收发器进行信息交互。该能量信息一体化的方法，主要适用于包含多个 DC-DC 变换器串并联的场合，如直流微电网、光伏优化器、电池能量管理系统、可见光通信和车载电力线通信等应用场景。

相较于功率/数据单载波调制，功率/数据双载

波调制具有调制方式选择灵活、抗干扰能力强和适合远距离通信等优点。本文采用功率/数据双载波调制，通过在发送变换器的功率控制环上叠加二进制频移键控(binary frequency shift keying, 2FSK)信号作为扰动，再与功率载波量比较产生包含数据信息的脉冲宽度调制(pulse-width modulation, PWM)信号，该数据信息包含于直流总线电压纹波中。接收变换器再通过对电压纹波进行解调，实现通信功能，从而实现 DC-DC 变换器能量信息的一体化。

针对实现 DC-DC 变换器之间的通信所需硬件较为复杂的问题，本文提出了一种基于 2FSK 的功率控制环扰动实现其能量信息一体化的方法。首先给出基于 2FSK 的功率/数据双载波调制和滑动离散傅里叶变换(sliding discrete Fourier transform, SDFT)解调方案，并对 Buck 变换器的能量一体化进行小信号建模与分析，最后搭建一个由两个 Buck 变换器并联的实验装置进行验证。相较于电力电子变换器传统的通信方案，本文所采用的方法不需要耦合电路和专用通信芯片，可以显著地降低电力电子变换器之间的通信成本。

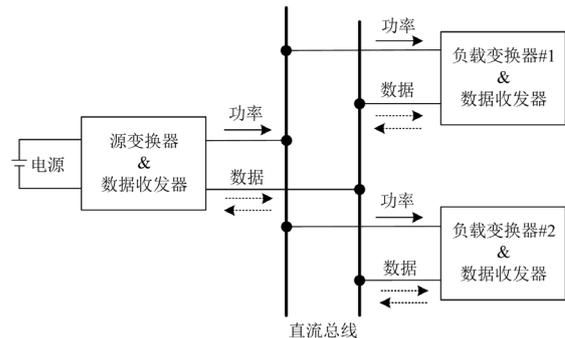


图 1 能量信息一体化示意图

Fig. 1 Diagram of power-information integration

1 调制与解调方案

数控的电力电子变换器在电能变换的过程中，输入为模拟量，由于开关管的导通与关断，该模拟量变为数字量，再通过电感和电容的滤波，输出模拟量。该过程中电能存在由模拟量到数字量的过渡态，将现代通信的数字调制技术与功率变换的控制技术相结合，使得基带数据嵌入到门极驱动信号产生的占空比中。输出电压纹波的频率或相位会表征该数据信息，再对电压纹波进行滤波和解调，还原出原始基带信号。

1.1 调制方案

现代通信的调制方法主要包括幅度键控(amplitude shift keying, ASK)、频移键控(frequency shift keying, FSK)、相移键控(phase shift keying, PSK)以

及其他改进方法。2FSK 具有频谱效率高、抗干扰性强和实现简单等优点, 本文选择 2FSK 调制作为数据载波的调制方法。

按照数据传输和功率变换是否共用同一载波, DC-DC 变换器能量信息一体化的调制方法可分为功率/数据单载波调制和功率/数据双载波调制。

本文基于控制环扰动的能量信息一体化属于双载波调制方案, 其优点是调制方法灵活, 功率变换和通信之间干扰小, 通信距离较远。基于功率控制环扰动的 2FSK 调制方案如图 2 所示。当不发送数据时, 通信开关断开, 功率调制量 $v_i(t)$ 直接和三角载波 $v_c(t)$ 比较生成 PWM 信号, 占空比为 $\delta(t)$, 驱动开关管导通与关断, 只进行功率变换。当发送数据时, 通信开关闭合, 发送变换器将基带信号 $v_b(t)$ 经过 2FSK 调制成高频信号 $v_f(t)$, 叠加到原有的功率调制量 $v_i(t)$ 上, 产生复合调制量 $v_c(t)$, 再与三角载波 $v_c(t)$ 比较产生包含数据信息的 PWM 信号, 直流总线电压纹波的频率或相位嵌入了该数据信息。

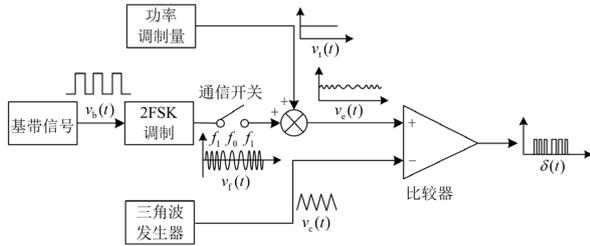


图 2 调制方案

Fig. 2 Modulation scheme

1.2 解调方案

常用的解调方法包括相干解调和非相干解调, 本文采用的解调方案如图 3 所示。电压纹波主要包括开关频率次分量和数据载波次分量。由于电压纹波的幅值相对于直流分量很小, 为了保留数据信息, 首先对电压纹波进行放大, 再经过中心频率为 f_1 的带通滤波器得到主要含有 f_1 次分量的电压信号。

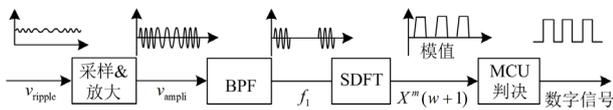


图 3 解调方案

Fig. 3 Demodulation scheme

为了减少通信延时, 降低 MCU 的运算量, 采用 SDFT 对带通滤波后的电压信号进行傅里叶变换。相较于传统的 FFT, SDFT 每采集一个点即可实时计算出频谱, 而 FFT 对当前采集的一个数据无法立即参与运算, 需要完整地采集窗口内的全部数据才能进行一次运算^[26]。SDFT 的表达式为

$$X^k(w+1) = e^{j2\pi k/N} [X^k(w) + x(w+N) - x(w)] \quad (1)$$

式中: N 为一个滑动窗口长度; k 为频域坐标, $k \in [0, N-1]$; $X^k(w)$ 为滑动 w 次对应 k 点的频域值; $x(w)$ 为时域 w 点的序列; $x(w+N)$ 为时域 $w+N$ 点的序列。

因为 f_1 为频率已知信号, 并且 MCU 采样频率 f_s 和滑动窗口长度 N 确定, 所以只需要对 f_1 对应的频域坐标 $m = Nf_1/f_s$ 进行求解, 得到其频域值为 $X^m(w+1)$, 其模值再和 MCU 内部设定的阈值进行比较, 从而判决出码元“1”和“0”。

2 小信号建模与分析

在功率环控制扰动的调制方案下, 开关频率和数据载波 f_1 、 f_0 频带间距较大, 功率变换和通信干扰小。为了不影响功率变换的稳定性, 数据载波 f_1 、 f_0 通常取不大于 $1/5$ 的开关频率, 且幅值相对于输出电压参考值也很小, 因此适合采用小信号建模方法对变换器的能量信息一体化模型进行分析。本文以 Buck 变换器为例进行建模, 采用的实验拓扑如图 4 所示, 两个同步源 Buck 变换器输出并联。

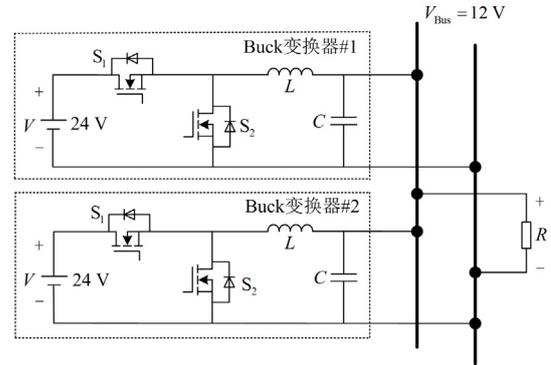


图 4 实验拓扑

Fig. 4 Experimental topology

Buck 变换器工作在连续导通模式 (continuous conduction mode, CCM) 下, 能量信息一体化的小信号模型如图 5 所示。与传统的小信号建模过程相同, 本文不再详述。该模型考虑到了线缆自身的阻抗, 包括两个同步源 Buck 变换器 #1 和 #2, R_{line_1} 、 R_{line_2} 分别为 Buck 变换器 #1 和 #2 到直流总线的线缆等效电阻, L_{line_1} 、 L_{line_2} 分别为 Buck 变换器 #1 和 #2 到直流总线的线缆等效电感。

依据小信号建模方法可知, Buck 变换器 #i 小信号模型的传递函数为

$$G_{vc}(s) = \frac{D}{s^2 LC + sL/Z_i + 1} \quad (2)$$

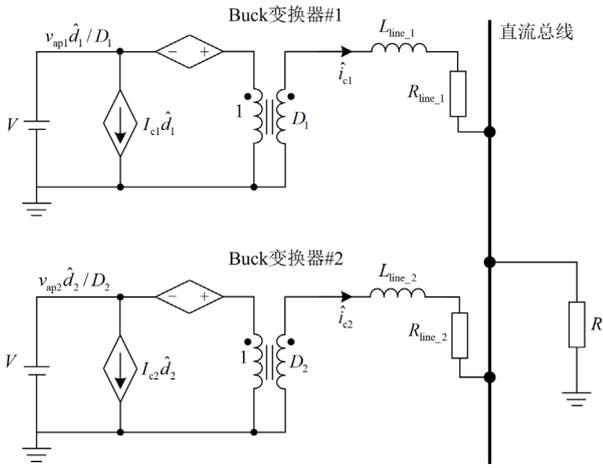


图5 能量信息一体化的小信号模型

Fig. 5 Small-signal model for power-information integration

式中： D 为占空比； L 、 C 和 Z_i 分别为 Buck 变换器 # i 的滤波电感、滤波电容和等效负载。

Buck 变换器 # i 的等效负载 Z_i 为

$$Z_i = R_{line_i} + sL_{line_i} + Z_{in_i} \quad (3)$$

式中： R_{line_i} 和 L_{line_i} 分别为 Buck 变换器 # i 到直流总线的等效电阻和等效电感；从直流总线上来看， Z_{in_i} 为另一个 Buck 变换器的等效输入阻抗。

本文 Buck 变换器采用基于 PI 的单闭环电压控制，该控制为一种线性控制，叠加在功率控制环的扰动信号 \hat{v}_{in} 到其输出信号 \hat{v}_{out} 的传递函数为

$$\frac{\hat{v}_{in}}{\hat{v}_{out}} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (4)$$

式中： $G(s)$ 为开环传递函数； $H(s)$ 为负反馈系数，一般取 1。

$G(s)$ 为 Buck 变换器小信号模型、PWM 环节和 PI 控制三部分传递函数的乘积，由此得到

$$G(s) = \frac{(sDk_p + Dk_i)k_M}{s^3LC + s^2L/Z_i + s} \quad (5)$$

式中： k_p 、 k_i 分别为 PI 控制的比例系数和积分系数； k_M 为 PWM 环节的传递函数，一般为常数。

将式(3)代入到式(5)，可得

$$G(s) = \frac{(sDk_p + Dk_i)k_M}{s^3LC + s^2L/(R_{line_i} + sL_{line_i} + Z_{in_i}) + s} \quad (6)$$

由式(6)可知，当变换器参数和线缆等效阻抗确定后，影响扰动信号输出增益即信噪比(signal to noise ratio, SNR)的主要因素是变换器输入阻抗，因此在满足输出电能质量要求的前提下，降低 Buck 变换器的滤波电容可以有效提升 SNR。

3 实验验证

为了验证所提方法的可行性，按照图 4 所示的拓扑搭建实验装置，实物如图 6 所示。微控制器选择 STM32F407，主频为 168 MHz，主要负责功率控制、2FSK 调制和 SDFT 解调算法等。实验参数如表 1 所示，开关频率选择 200 kHz，根据数据载波频率 f_1 、 f_0 不大于 1/5 开关频率的选取原则，本文取 $f_1 = 24$ kHz、 $f_0 = 15$ kHz，比特率设为 3 kb/s，则频差 $\Delta f = f_1 - f_0 = 9$ kHz，频差为波特率的整数倍，保证了在一个码元周期内 f_1 、 f_0 正交，有利于减少码间串扰。此外，为了防止频谱发生泄漏，采样频率为 f_1 、 f_0 的整数倍，且 SDFT 滑动窗口的长度设为一个码元周期。

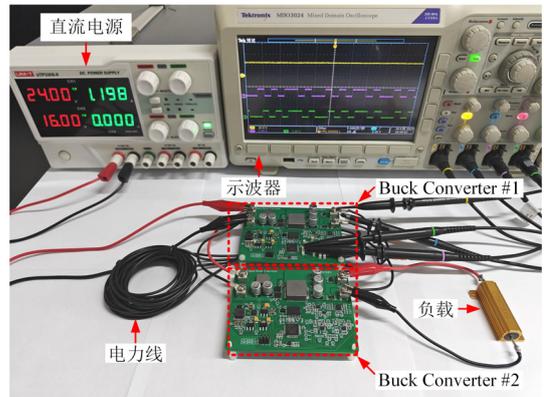


图6 实验装置

Fig. 6 Experimental setup

表 1 实验参数

Table 1 Experiment parameters

参数	数值	参数	数值
V_1/V	24	开关频率/kHz	200
V_0/V	12	调制方式	2FSK
$L/\mu H$	22	采样频率/kHz	120
$C/\mu F$	100	窗口长度	40
R/Ω	12	通信长度/m	2
f_1/kHz	24	比特率/(kb/s)	3
f_0/kHz	15	进制数	2

按照表 1 实验参数所设计的通信速率 R_b 为

$$R_b = R_B \log_2^M = 3 \text{ kb/s} \quad (7)$$

式中： R_B 为码元周期； M 为进制数。

当 Buck 变换器之间不进行通信只进行功率变换时，实验波形如图 7 所示。CH1 为直流总线电压，CH2 为直流总线的电压纹波。直流总线电压稳定在 12 V 左右，电压纹波峰-峰值为 136 mV，频率为 200 kHz。

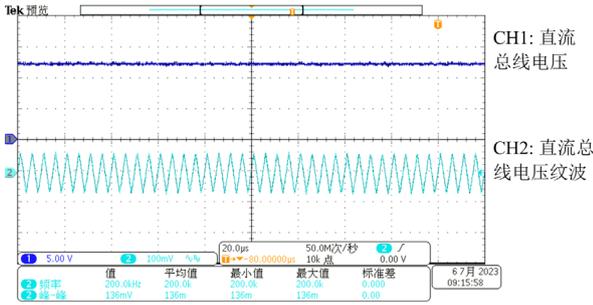


图 7 不加入通信的实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms without incorporating communication

不进行通信的直流总线电压频谱如图 8 所示, 此时频谱主要集中在开关频率次分量处, 不包含 f_1 、 f_0 次分量。

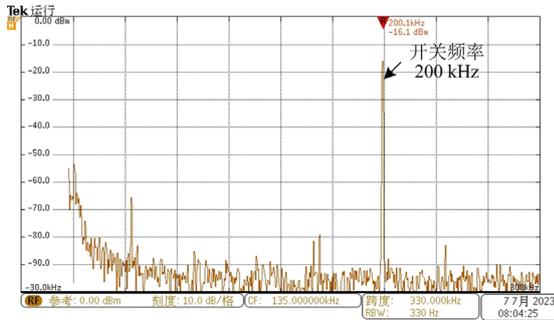


图 8 不加入通信的直流总线电压频谱

Fig. 8 Frequency spectrum of the DC bus voltage without communication

由表 1 可知, 采样频率为 120 kHz, SDFT 滑动窗口的长度为 40 个点, 则频域分辨率为 3 kHz, $f_1=24$ kHz 对应频域中第 8 个点, $f_0=15$ kHz 对应频域中第 5 个点。为了加快 SDFT 算法的执行速度, 本文只计算频域中第 8 个点的模值, 然后和 MCU 内部设定的阈值比较, 判决出码元的类别, 这有利于减少通信延时。将表 1 的参数代入到式(1)得

$$X^8(w+1) = e^{j2\pi/5} [X^8(w) + x(w+40) - x(w)] \quad (8)$$

由式(8)可知, 计算当前时刻 $X^8(w+1)$, 只需要前一时刻 $X^8(w)$ 加上当前时刻采样值 $x(w+40)$, 再减去之前的采样值 $x(w)$, 最后乘以一个系数即可。在硬件执行方面, MCU 采用迭代运算, 计算量小, 并且不需要计算出窗口内全部频点的值, 可以有选择地计算。

当 Buck 变换器#1 和 Buck 变换器#2 之间进行通信时, 同时进行功率变换和数据交互, 稳态工况下的通信实验波形如图 9 所示, 负载为 12Ω 。CH1 为直流总线电压, CH2 为直流总线的电压纹波。直

流总线电压同样稳定在 12 V 左右, 由于在输出电压参考值上叠加了 2FSK 信号作为扰动, 电压纹波峰-峰值变为 408 mV, 相对于不加入通信时的 136 mV, 增加 272 mV, 幅度增加明显, 但是仍然满足电能质量要求。CH3 和 CH4 分别为 Buck 变换器#1 发送的数据和 Buck 变换器#2 接收的数据经过 MCU 内部数模转换器(digital to analog converter, DAC)输出的波形。可以看出, Buck 变换器#2 正确地解调出 Buck 变换器#1 发送的数据, 无误码情况, 并且通信速率为 3 kb/s, 实验结果与设计相符。此外, 接收数据相对于发送数据存在一个 $200 \mu\text{s}$ 的延时, 这是由 SDFT 解调算法引起的, 相对于 $333.3 \mu\text{s}$ 的码元周期, 该延时满足通信要求。

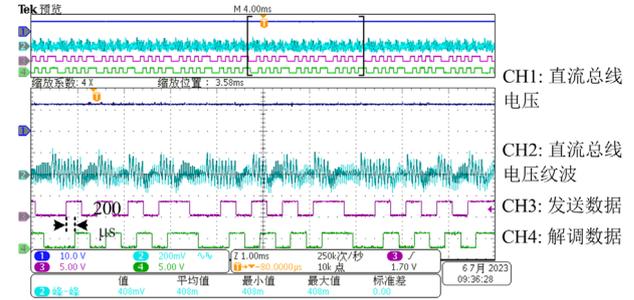


图 9 稳态工况下的通信实验波形

Fig. 9 Communication experimental waveforms under steady-state condition

加入通信的直流总线电压频谱如图 10 所示。相较于不进行数据交互的情况, 该频谱除了包含开关频率次分量, 还主要有两种数据载波频率 f_1 、 f_0 次分量。从功率变换的角度, 该数据载波次分量为扰动量, 不利于提高输出电压的波形质量。从通信的角度, 该数据载波作为通信信号的载体, 其幅值越大, 越有利于提升 SNR。所以, 叠加的扰动量幅值要在功率变换和通信之间找到一个平衡点, 既不能对原有的功率变换产生较大影响, 又能保证通信

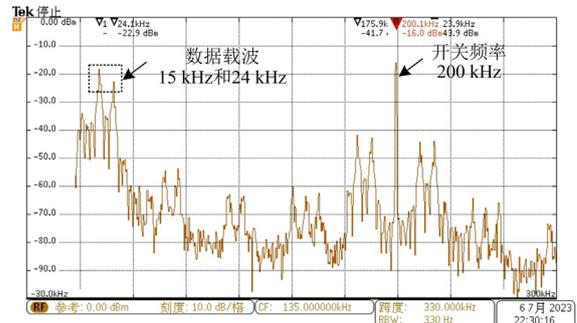


图 10 加入通信的直流总线电压频谱

Fig. 10 Frequency spectrum of the DC bus voltage with communication

的可靠性。此外，通信频带较窄，开关频率和数据载波频率间隔较远，功率变换对通信的干扰较小。

信噪比 η_{SNR} 的计算公式为

$$\eta_{SNR} = 20\lg(V_S / V_N) \quad (9)$$

式中， V_S 和 V_N 分别为电压纹波信号和噪声的有效值。经测得，电压纹波中频率为 24 kHz 和 15 kHz 的信号有效值为 197 mV，噪声的有效值为 5 mV，代入式(9)得到 $\eta_{SNR} = 31.9$ dB，因为噪声通常是随机的，该数字仅提供一个量化参考。

为了验证在极端工况下的通信性能，针对负载突变的工况进行验证，Buck 变换器#1 的负载从 12 Ω 突变为 24 Ω ，实验波形如图 11 所示。CH1 为 Buck 变换器#1 的输出电流，从 1 A 下降到 0.5 A。CH2 为直流总线电压纹波，可以明显看出，当负载突变时，直流总线电压纹波有一个较小幅度的上升，电压纹波峰-峰值为 416 mV，相较于稳态工况下的 408 mV，上升了 8 mV，电压纹波波动幅度很小。CH3 和 CH4 分别为 Buck 变换器#2 发送的数据和 Buck 变换器#1 接收的数据经过 DAC 输出的波形。同样，接收变换器正确无误地解调出发送变换器发送的数据，也存在一个在允许范围之内的通信延时。实验结果表明，在负载突变的工况下，该能量信息一体化方法对外来扰动具有一定的鲁棒性。该工况的输出功率由 12 W 突变为 6 W，相当于由重载变为轻载，电压纹波峰-峰值增大 2%左右，输出电压质量基本不受影响，并且接收端解调数据正确。由于在功率控制环注入的扰动幅值很小，Buck 变换器轻载时，功率变换和通信不受影响。重载时，输出电流增大，功率变换的动静态性能和传统只进行功率变换的场景基本保持一致。此外，增大的输出电流会加大信道中的噪声，可能会降低通信的可靠性。当然，输出功率要满足硬件电路电压和电流的承受范围，一些极端的工况(如负载极小)除外。

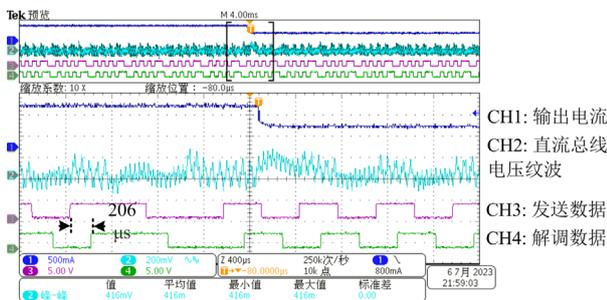


图 11 负载突变工况下的通信实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms of communication under load transient condition

上述实验是在负载为 12 Ω (功率为 12 W)的条件下进行的，为了研究该能量信息一体化方法下 Buck 变换器带不同负载的输出效率，分别再对 16 Ω 、18 Ω 、24 Ω 、36 Ω 、48 Ω 和 72 Ω 负载条件下的输出效率进行测试计算，得到 Buck 变换器的输出效率，如图 12 所示。可以看出：Buck 变换器输出功率较小时，效率相对较低；随着输出功率增加，效率也会增加。但是，当功率增加到 8 W 时，效率基本保持不变。

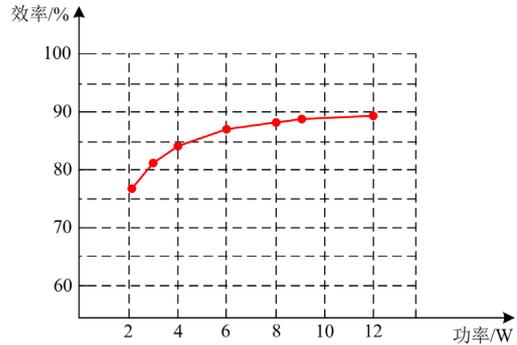


图 12 Buck 变换器的输出效率

Fig. 12 Output efficiency of the Buck converter

4 结论

本文介绍了一种基于功率控制环扰动实现 DC-DC 变换器能量信息一体化的方法，给出了基于 2FSK 的功率/数据双载波调制以及 SDFT 解调方案，并通过对 Buck 变换器的能量信息一体化进行小信号建模与分析可知，降低输入阻抗有利于提升 SNR。最后通过一个由两个 Buck 变换器输出并联的实验平台进行验证。实验结果表明，该方法在稳态工况下可实现 3 kb/s 的通信速率，并且在负载突变工况下，仍能实现稳定的通信，无误码情况发生，并对外来扰动具有一定的鲁棒性。相比于独立设计的通信方案，该方法不需要专用通信线缆、耦合器和通信芯片，显著地节省了硬件成本，为 DC-DC 变换器之间的通信提供一种新思路。

参考文献

[1] 何湘宁, 宗升, 吴建德, 等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5162-5170.
 HE Xiangning, ZONG Sheng, WU Jiande, et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5162-5170.

[2] 冯怪彬, 汪科, 葛晓慧, 等. 交直流混合微电网系统设

- 计与控制架构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 143-150.
- FENG Yibin, WANG Ke, GE Xiaohui, et al. System design and control framework analysis of hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 143-150.
- [3] 刘彦呈, 吕旭, 张勤进, 等. 基于多滑模变结构的双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 121-130.
- LIU Yancheng, LÜ Xu, ZHANG Qinjin, et al. Virtual inertia control strategy of bidirectional grid-connected converter applying multiple sliding mode variable structure control[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 121-130.
- [4] 岳舟, 刘小荻, 姚绍华, 等. 一种输入电流连续的新型高增益 DC-DC 升压变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 125-134.
- YUE Zhou, LIU Xiaodi, YAO Shaohua, et al. A novel high gain DC-DC boost converter with continuous input current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 125-134.
- [5] 王祺, 赵兴勇, 张庚午. 多功能并网变换器容量优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 85-92.
- WANG Qi, ZHAO Xingyong, ZHANG Gengwu. Capacity optimization control strategy of a multi-function grid-connected converter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 85-92.
- [6] 王晓寰, 张纯江, 顾和荣, 等. 现场总线控制的单相逆变电源并联系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 109-112.
- WANG Xiaohuan, ZHANG Chunjiang, GU Herong, et al. Control of paralleled single phase inverters based on CAN bus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 109-112.
- [7] 程锋. 基于 CAN 总线和 ZigBee 技术的小型风光互补型微电网通信构架研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016.
- CHENG Feng. Research on the communication architecture of the small wind solar hybrid power grid based on CAN bus and ZigBee[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [8] 张鸿, 宁跃飞. 基于 ZigBee 的微网控制策略研究与实现[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 725-726.
- ZHANG Hong, NING Yuefei. Research and implementation of microgrid control strategy based on ZigBee[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 725-726.
- [9] 陈鹏飞, 邓玮璿. 基于 Zigbee 通信网络的低压微电网分布式功率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 115-122.
- CHEN Pengfei, DENG Weihua. Distributed power control for low voltage microgrid based on Zigbee communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 115-122.
- [10] 柯程虎. 微电网逆变器无线网络控制系统关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- KE Chenghu. Research on key technologies of micro-grid inverters wireless networked control systems[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [11] 史建超, 谢志远, 胡正伟, 等. 多跳中继宽带电力线通信网络中的 OFDM 跨层资源分配[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 58-66.
- SHI Jianchao, XIE Zhiyuan, HU Zhengwei, et al. OFDM cross layer resource allocation in multi-relay broadband power line communication networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 58-66.
- [12] 谢文旺, 孙云莲, 易仕敏, 等. 一种基于改进 VPGA 优化 Elman 神经网络的电力线通信数据处理算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 58-65.
- XIE Wenwang, SUN Yunlian, YI Shimin, et al. A data processing algorithm for power line communication based on Elman neural network optimized by improved VPGA[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 58-65.
- [13] 张文远, 李天昊. 电力线传输特性和噪声干扰对通信性能的相对影响[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 145-152.
- ZHANG Wenyan, LI Tianhao. Relative impacts of channel characteristics and noise characteristics on the performance of a power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 145-152.
- [14] STEFANUTTI W, SAGGINI S, MATTAVELLI P, et al. Power line communication in digitally controlled DC-DC converters using switching frequency modulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1509-1518.
- [15] 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, 2015, 62(2): 1291-1300.
- [16] YU Dongsheng, HUA Yingchun, ZHANG Pinjia, et al. A new modulation-demodulation approach to DC power-line data transmission for SRG-integrated microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12370-12382.
- [17] MENDEZ J R, LAMAR D G, GARCIA ALLER D, et al.

Reproducing multicarrier modulation schemes for visible light communication with the ripple modulation technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1532-1543.

[18] HUA Yingchun, YU Dongsheng, LI Kecheng, et al. A novel power and signal composite modulation strategy for CCC-Based SRG in distributed microgrid[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2021, 11(1): 121-132.

[19] 慈松. 能量信息化和互联网化管控技术及其在分布式电池储能系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3643-3648.
CI Song. Energy informatization and internet-based management and its applications in distributed energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3643-3648.

[20] XU W, WANG Wencong. Power electronic signaling technology-a new class of power electronics applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 30(1): 332-339.

[21] 张若琦, 惠悦, 翁婉莹, 等. 基于控制环叠加正交频分复用信号实现直流微网载波通信的变换器设计方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5423-5434.
ZHANG Ruoqi, HUI Yue, WENG Wanying, et al. Design method of converters realizing carrier communications in DC microgrids by superimposing OFDM signal into control loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5423-5434.

[22] 郭昊, 李岩, 侯冰冰, 等. 基于多进制正交幅度调制的交错并联 DC-DC 变换器能量信息一体化技术[J]. 电工技术学报, 2022, 37(14): 3620-3631.
GUO Hao, LI Yan, HOU Bingbing, et al. Power information integration technology of interleaved parallel DC-DC converters based on MQAM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(14): 3620-3631.

[23] 赵科科, 李凌宇, 吴建德, 等. 功率/信号复合调制的光伏优化器设计[J]. 电力电子技术, 2021, 55(8): 75-78.
ZHAO Keke, LI Lingyu, WU Jiande, et al. A photovoltaic optimizer design using power/signal dual modulation[J]. Power Electronics, 2021, 55(8): 75-78.

[24] 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): 5979-5990.

[25] 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.

[26] 谢志远. 面向 10 kV 配电网运行监测的电力线通信关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
XIE Zhiyuan. Research on power line communication key technologies for 10 kV power distribution grid operation monitoring[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.

收稿日期: 2023-07-11; 修回日期: 2023-09-25

作者简介:

祝 贺(1990—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子控制及其网络化技术; E-mail: hezhu@ncepu.edu.cn

谢志远(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统通信、智能信息传感技术; E-mail: zhiyuanxie@ncepu.edu.cn

曹旺斌(1989—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统通信、智能配电网。E-mail: wbin.cao@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)