

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241168

基于纹波峰值检测的逆变器多自由度能量信息一体化方法

李国华, 湛智馨, 冯泉

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 电力电子变换器具有传输数据的潜能。为了满足逆变器的通信需求, 提出一种基于纹波峰值检测的逆变器多自由度能量信息一体化方法。首先, 针对现有信息解调方法不能直接应用于交流变换器的问题, 提出一种基于纹波峰值检测的信息解调方法。在此基础上, 将功率载波作为信息传输载体, 通过二进制频移键控(binary frequency shift keying, 2FSK)将信息嵌入单相电压型逆变器的原始脉冲信号中, 实现能量与信息的融合。并充分利用三相逆变器具有多个功率调制波的特性, 提出三相电压型逆变器多自由度能量信息一体化方法。以多个功率调制波作为信息传输载体, 将数据载波作为扰动信号分别加入不同功率调制波中, 实现能量与信息的同步调制和解调。最后, 搭建逆变器的仿真模型和实验平台。结果表明, 在单相电压型逆变器中可实现 20 kbit/s 的通信速率, 三相电压型逆变器中可实现 2.5 kbit/s 的通信速率, 验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 能量信息一体化; 纹波峰值检测; 逆变器; 二进制频移键控; 多自由度

Multi-degree-of-freedom energy-information integration method for inverters based on ripple peak detection

LI Guohua, CHEN Zhixin, FENG Quan

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Power electronic converters have the potential to transmit data. To meet the communication requirements of inverters, an integrated multi-degree-of-freedom energy-information method for inverters based on ripple peak detection is proposed. First, to address the issue that existing information demodulation methods cannot be directly applied to AC converters, a novel information demodulation method based on ripple peak detection is proposed. On this basis, power carriers are used as the medium for information transmission, and information is embedded into the original pulse signals of a single-phase voltage-type inverter through binary frequency shift keying (2FSK) to achieve the integration of energy and information. Furthermore, leveraging the characteristic of three-phase inverters having multiple power modulation waves, a multi-degree-of-freedom energy-information integration method is proposed. By using multiple power modulated waves as carriers and injecting data carriers as disturbance signals into different power modulated waves, synchronous modulation and demodulation of energy and information are achieved. Finally, simulation models and experimental platforms for inverters are built. The results show that a communication rate of 20 kbit/s can be achieved in single-phase voltage-type inverters and 2.5 kbit/s in three-phase voltage-type inverters, verifying the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51307076).

Key words: energy-information integration; ripple peak detection; inverter; binary frequency shift keying (2FSK); multi-degree-of-freedom

0 引言

电力电子变换器能量信息一体化方法具备同步

实现电能变换与信息传输的能力, 无需附加通信硬件即可达成电能与信息的深度融合, 可显著降低系统的制造和维护成本, 极大地促进电力电子装置的数字化和智能化。目前, 电力系统常用的通信方法涵盖无线通信技术、现场总线技术以及电力线载波通信技术^[1]。其中, 无线通信技术, 如 ZigBee、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51307076); 辽宁省科技厅博士科研启动计划项目资助(2021-BS-273)

Bluetooth 等,虽维护成本相对较低,但易受干扰^[2-3];现场总线技术需要独立布线,系统复杂且成本高^[4];电力线载波通信则需要单独的信号调制电路^[5-6]。

文献[7-8]阐述了电力电子变换器的内在特性,利用实验结果证明了电力电子变换器既能实现对电能的变换,又能完成数字信息的交互。针对功率/数据单载波调制的能量信息一体化方法,文献[9]采用频移键控(frequency shift keying, FSK)调制,在不对电能质量造成影响的前提下,使电力电子变换器在传输电能的同时完成数据传输。文献[10-11]提出了在 DC-DC 变换器中借助 PWM 与 FSK 结合来调节开关频率,实现功率信息同步传输。实验中,采用峰值检测电路捕获开关信号,再进行带通滤波和信号处理,以识别数字“0”和“1”。功率/数据单载波调制具有电能质量较高、稳态功率特性几乎不受影响的优点,但该方法传输信号的强度不易调节^[12]。相比之下,功率/数据双载波调制方法不共用同一载波,因此数据调制过程相对更加灵活。文献[13]使用相移键控(phase shift keying, PSK)调制,通过改变相位扰动量,既可在直流分布式电源系统中成功传输信息,还可以调节信号强度。文献[14]提出基于二进制频移键控(binary frequency shift keying, 2FSK)的功率/数据双载波调制方法,且利用滑动离散傅里叶变换解调,在 DC-DC 变换器中实现了能量信息一体化。能量信息一体化的数据信息传输精度和抗干扰性值得被关注。文献[15]提出四进制差分相移键控(quaternary differential phase shift keying, QDPSK)调制方法,解决了相位模糊问题,并设计出一种实用的码间干扰评估方法。文献[16]设计一种跳频-差分相移键控(frequency hopping-differential phase shift keying, FH-DPSK)调制方法,在分析驱动信号与纹波之间相位关系的基础上,通过增加频率切换的过渡过程来抑制相位切换时的电压扰动,提升了能量信息一体化的质量,但该方法过渡过程频率的选取较为严格。

针对能量信息一体化过程中通信速率问题,文献[17]采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术,实现了数据信息多路并行传输,提升了通信速率;但各通信子载波的频率需要两两相互正交,在较窄频带内传输较多路信息时,会出现码元周期变大等问题。文献[18]采用多进制正交幅度调制(multiple quadrature amplitude modulation, MQAM)方法,相比于传统幅移键控(amplitude shift keying, ASK)和 PSK 调制,增加了符号信息量。文献[19]在文献[18]的基础上进行了 OFDM 优化,将信息传输速率由 10 kbit/s 提高到

25 kbit/s。为了拓展能量信息一体化的应用领域,文献[20]在光伏系统中应用功率/数据双载波调制方法,可同步传输数据信息,通信速率达 2 kbit/s。文献[21]对传统电能路由器控制策略予以改进,实现了路由器上的能量信息一体化,规避了额外布线,使其更智能化。文献[22]在级联多电平逆变器上结合 PWM 调制与 FSK,将其应用于电动汽车领域,降低了系统布线的复杂性,完成了 600 bit/s 的通信传输。

现有文献多针对 DC-DC 变换器^[23-24],有关逆变器能量信息一体化方法的研究颇为匮乏。为此,本文针对逆变器能量与信息同步传输以及解调这一问题,提出了基于纹波峰值检测的逆变器多自由度能量信息一体化方法。首先介绍了一种可以实现逆变器解调的信息解调方法,并对逆变器的输出纹波展开分析。在此前提下,以单相和三相电压型逆变器为研究对象,以功率载波、单功率调制波和双功率调制波为数据信息传输载体,借助 2FSK 调制方式将数据信息嵌入至相应的载波或调制波内,实现了逆变器的能量与信息同步传输。相较于传统解调方法,本文所提的信息解调方法可以实现逆变器上的数据解调且实现简单,计算量小。此外,本文充分利用了三相逆变器多调制波的特点进行数据信息传输,拓展了信息传输自由度和灵活性。

1 基于纹波峰值检测的逆变器信息解调方法

逆变器的占空比通常需要按一定规律变化,这使得逆变器输出电压纹波幅值不固定,造成传统 DC-DC 变换器信息解调方法不能直接应用于逆变器中。但逆变器占空比的变化不会影响纹波的频率与相位特征,携带数据信息的频率或相位信号会在电能变换过程中以电压纹波的形式存在。本文提出一种基于纹波峰值检测的逆变器信息解调方法。该方法对逆变器输出电压纹波进行峰值检测,并通过滤波电路滤除待传输信息以外的频率信号,将含有待传输信息的电压纹波进行放大,计算两个纹波峰值之间的时间长度,得到两个峰值之间的对应频率,再通过设置频率阈值进行数据信息解调。

如图 1 所示,在解调中通过利用 3 个模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)采样点 x_1 、 x_2 、 x_3 进行最大值点判断:当 $x_2 > x_1$ 且 $x_2 > x_3$ 时,记此时的 x_2 点为最大值,即 N_1 ;继续采样,当再次出现 $x_2 > x_1$ 且 $x_2 > x_3$ 时,记此次的 x_2 为 N_2 。通过对两次最大值之间的时间差取倒数,计算得出频率值。可以根据两次最大值点之间的采样次数或中断次数

进行阈值判断, 进而完成数据解调。

在 2FSK 数据调制下, 需要对频率设置阈值判断, 得到 2FSK 数据信息解调表达式, 如式(1)所示。

$$u_{2\text{FSK}} = \begin{cases} 1 & f_{\text{th1}} < f_{\text{old}} < f_{\text{th2}}, f_{\text{new}} > f_{\text{th3}} \\ 0 & f_{\text{th4}} < f_{\text{old}} < f_{\text{th5}}, f_{\text{new}} < f_{\text{th6}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{2\text{FSK}}$ 为输出的解调数据; f_{old} 为上一次两峰值间的频率值; f_{new} 为当前的频率值; $f_{\text{th1}} - f_{\text{th6}}$ 为不同数值的阈值频率。

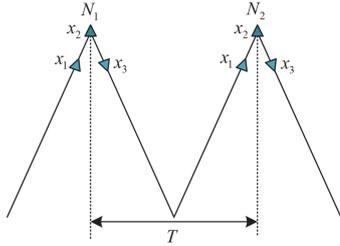


图 1 解调原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of demodulation principle

2 逆变器输出电压纹波分析

纹波分析是实现逆变器能量信息一体化的关键步骤。图 2 为单相逆变器离网状态下的等效模型。

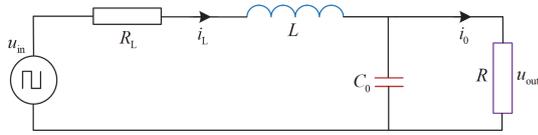


图 2 单相电压型逆变器离网状态等效模型

Fig. 2 Equivalent model of off-grid state of single-phase voltage-type inverter

由图 2 中的等效模型可得式(2)和式(3)。

$$Du_{\text{in}}(t) - u_{\text{out}}(t) = R_L i_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2)$$

$$i_L(t) = C_0 \frac{du_{\text{out}}(t)}{dt} + \frac{u_{\text{out}}(t)}{R} \quad (3)$$

式中: $u_{\text{in}}(t)$ 为单相电压型逆变器两桥臂中点间电压; $u_{\text{out}}(t)$ 为输出电压; R_L 为电感等效电阻; $i_L(t)$ 为电感电流; L 为滤波电感; C_0 为滤波电容; R 为负载电阻。

对式(2)和式(3)进行拉普拉斯变换, 可得其频域模型的公式分别为

$$DU_{\text{in}}(s) - U_{\text{out}}(s) = R_L I_L(s) + LsI_L(s) \quad (4)$$

$$I_L(s) = C_0 s U_{\text{out}}(s) + \frac{U_{\text{out}}(s)}{R} \quad (5)$$

式中: $U_{\text{in}}(s)$ 为频域输入电压; $U_{\text{out}}(s)$ 为频域输出电压; $I_L(s)$ 为频域电感电流。

将式(4)和式(5)联立, 可得单相电压型逆变器的开环传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{U_{\text{out}}(s)}{DU_{\text{in}}(s)} = \frac{1}{LC_0 s^2 + L/(Rs) + R_L(C_0 s + 1/R) + 1} \quad (6)$$

可见, 单相电压型逆变器的开环传递函数与 BUCK 变换器相同, 只有逆变器的占空比为变化值, 二者具有很相似的信息传输特性, 均可以利用输出电压纹波进行信息传输。在该过程中, 电感电流纹波是电压纹波产生的重要因素之一, 图 3 为单相电压型逆变器输出端电感电流纹波示意图。

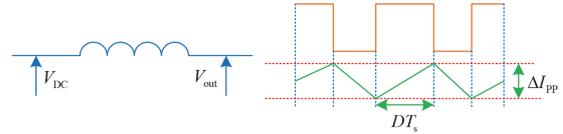


图 3 电感电压及电感电流纹波示意图

Fig. 3 Schematic diagram of inductive voltage and inductive current ripple

电感两端电压 V_L 的计算公式为

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (7)$$

由式(7)可推导出电感两端电压为

$$V_L = V_{\text{DC}} - V_{\text{out}} = L \frac{\Delta I_{\text{pp}}}{DT_s} \quad (8)$$

式中: V_{DC} 为电感前端的母线电压; V_{out} 为电感输出电压; ΔI_{pp} 为电感电流纹波; T_s 为开关周期时间。

由电感两端电压可得电感纹波电流大小为

$$\Delta I_{\text{pp}} = \frac{DT_s(V_{\text{DC}} - V_{\text{out}})}{L} \quad (9)$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{DC}} \times D \quad (10)$$

$$\Delta I_{\text{pp}} = \frac{DT_s(V_{\text{DC}} - V_{\text{DC}} \times D)}{L} \quad (11)$$

$$\Delta I_{\text{pp}} = \frac{DV_{\text{DC}}(1-D)}{F_{\text{sw}}L} \quad (12)$$

式中: F_{sw} 为开关频率。

由电感纹波电流公式可知, 纹波大小与开关频率成反比, 且电感对纹波起抑制作用。

同理可得三相电压型逆变器输出电压纹波分析方法, 这里不再赘述。

3 基于功率载波自由度的信息传输方式

首先, 利用式(13)一式(16)对图 4 中的 PWM 脉冲信号 $p(t)$ 进行傅里叶变换。其中: n 为谐波次数; τ 为 PWM 信号相位角; c_n 为 n 次谐波的幅值; T

为 PWM 信号周期。由傅里叶分析可知输出功率由占空比 D 与输入电压 V 决定。由于变换器开关频率这一自由度的改变不会影响能量传输性能。因此，可以通过切换逆变器开关频率来影响输出电压纹波，使其携带数据信息。图 5 为以功率载波为信息传输载体的能量信息一体化调制过程图。调制过程中通过切换功率载波 V_{in} 的工作频率再与功率调制波 V_c 比较可得驱动信号 δ 。图 4 中的 PWM 脉冲可以视为逆变器输出电压波形。

$$p(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (13)$$

$$a_0 = DV \quad (14)$$

$$a_n = \frac{2V}{n\pi} \sin(nD\pi) \cos(2n\tau\pi + nD\pi) \quad (15)$$

$$b_n = -\frac{2V}{n\pi} \sin(nD\pi) \sin(2n\tau\pi + nD\pi) \quad (16)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{2V}{n\pi} |\sin(nD\pi)| \quad (17)$$

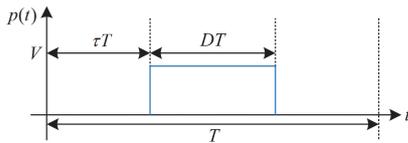


图 4 PWM 脉冲波形图

Fig. 4 PWM pulse waveform diagram

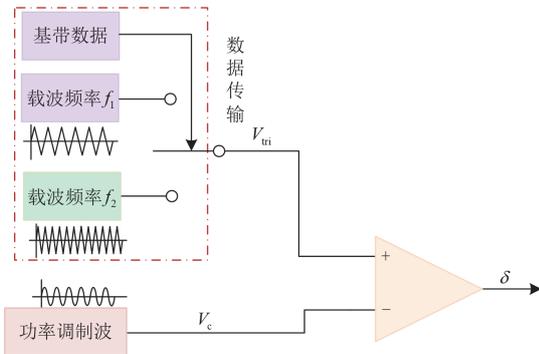


图 5 以功率载波为信息传输载体调制过程

Fig. 5 Modulation process using power carrier as information transmission carrier

基于功率/数据单载波调制的单相电压型逆变器能量信息一体化拓扑如图 6 所示。通过使用不同的载波频率对逆变器输出端电压纹波产生影响，使其携带数据信息，进而解调电压纹波中的频率信号，就可以实时获取该数据信息。解调过程首先通过滤波放大电路对纹波信号进行滤波和放大，再利用 ADC 模块采样，将转换后的信号输入数字信号处

理器(digital signal processor, DSP)中进行数据信息的解调，最终达到能量与信息同步传输的目的。

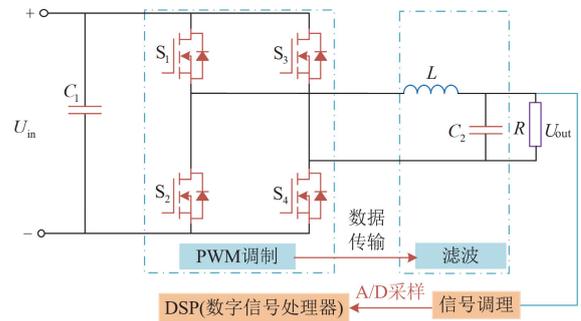


图 6 单相电压型逆变器能量信息一体化拓扑图

Fig. 6 Integrated topology of energy information of single-phase voltage inverter

4 基于功率调制波多自由度信息传输方式

基于功率/数据双载波调制的三相电压型逆变器能量信息一体化拓扑如图 7 所示。三相电压型逆变器利用 3 个互差 120° 的正弦功率调制波与功率载波进行脉宽调制，实现能量传输。通过在正弦功率调制波中加入不同频率的扰动信号，使其携带待传输的数据信息，扰动信号也会反映在与该相相关的逆变器输出线电压上。例如，在 A 相调制波中加入扰动信号，则线电压 u_{AB} 、 u_{AC} 的纹波中含有该数据信息，而线电压 u_{BC} 中没有该数据信息，只进行能量传输。将含有数据信息的线电压输入调理电路，滤除上述扰动信号以外的其他频率，并对含数据信息的纹波进行放大，调理至符合 ADC 模块输入要求的电压范围，再由 DSP 进行解调，最终获取该数据信息。

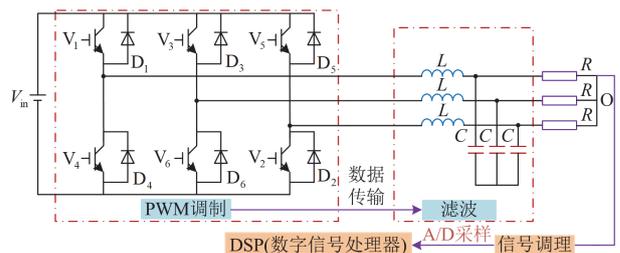


图 7 三相电压型逆变器能量信息一体化拓扑图

Fig. 7 Integrated topology of energy information of three-phase voltage inverter

图 8 为以单功率调制波为信息传输载体的能量信息一体化调制过程图。在功率/数据双载波调制基础上，将调制后的数据载波作为扰动信号叠加在逆变器任意一相功率调制波上，并与功率载波进行比较，得到驱动信号。此时，待传输信息会反映在逆变器输出电压纹波上。通信过程中数据载波频率的

选择非常重要, 为了降低相互干扰, 数据载波频率一般为逆变器开关频率的 $1/50 \sim 1/5$ 为宜。

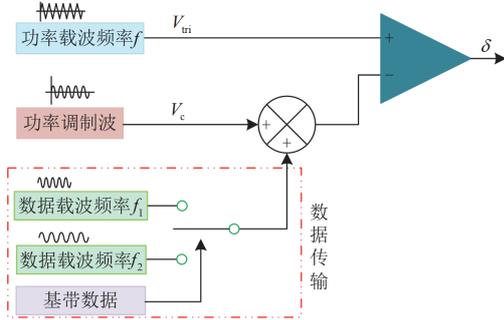


图 8 以单功率调制波为信息传输载体调制过程

Fig. 8 Modulation process using single power modulated wave as the carrier of information transmission

图 9 为以双功率调制波为信息传输载体的能量信息一体化调制过程图。首先将数据信息作为扰动信号叠加在逆变器任意一相调制波上, 实现一组数据信息的同步传输; 同时, 利用三相逆变器多调制波特点, 将另一组数据信息作为扰动叠加在逆变器另外一相调制波上, 从而实现另一组不同数据的同步传输。由于两组数据信息依靠不同功率调制波进行传输, 因此在不影响数据信息的情况下, 两组数据频率的选择没有限制。为减小电压畸变率, 提高电能质量, 在不传输信息时, 功率调制波不叠加任何频率。

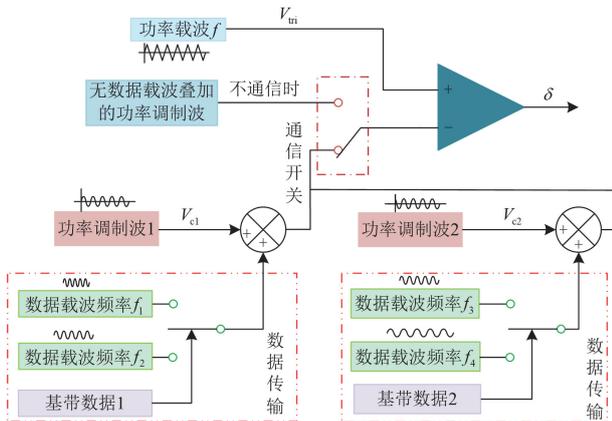


图 9 以双功率调制波为信息传输载体调制过程

Fig. 9 Modulation process using dual-power modulated waves as the information transmission carrier

综上所述, N 相逆变器利用调制波传输信息时, 可以提供 $N-1$ 个信息传输自由度。在多电平逆变器中, 充分利用多个功率载波还可以进一步扩展信息传输的自由度, 从而提高信息传输的灵活性, 例如, 利用不同信息传输自由度传输不同方向的信息等。

5 仿真与实验

5.1 功率载波信息传输方式验证与分析

利用 Matlab/Simulink 软件对单相电压型逆变器能量信息一体化方法进行验证与分析, 仿真参数如表 1 所示。

表 1 单相电压型逆变器能量信息一体化仿真参数

Table 1 Integrated simulation parameters of energy information for single-phase voltage source inverters

参数	数值
输入电压 E/V	12
输出滤波电感 L/mH	2
负载 R/Ω	5
开关频率 f_1/kHz	50
开关频率 f_2/kHz	100
通信速率/(kbit/s)	20

如图 10 所示, 设置了 9 组数据传输的数据位。其中包含起始位和 8 组数据位。发送数据信息时, 每 bit 持续时间为 $50 \mu s$, 即通信速率为 20 kbit/s 。

起始位	F0	1	1	1	1	0	0	0	0
数据位1	F3	1	1	1	1	0	0	1	1
数据位2	33	0	0	1	1	0	0	1	1
数据位3	66	0	1	1	0	0	1	1	0
数据位4	C5	1	1	0	0	0	1	0	1
数据位5	5C	0	1	0	1	1	1	0	0
数据位6	96	1	0	0	1	0	1	1	0
数据位7	CE	1	1	0	0	1	1	1	0
数据位8	3F	0	0	1	1	1	1	1	1

图 10 数据信息配置图

Fig. 10 Data information configuration diagram

图 11 为单相电压型逆变器功率数据调制波形图, 以 F3 即数据位 1(1111 0011)为例, 在逆变器负载两端测得携带信息的电压波形如图 12 所示。

由于数据纹波幅值相比逆变器输出电压幅值要小很多, 因此逆变器输出电压在叠加数据信息后仍满足纹波要求。对负载两端的电压纹波信号进行滤波、放大处理, 得到满足采样要求的纹波信号, 并对其进行采样, 计算得出每两个峰值间相应的频率, 对频率设置阈值进行解调, 得到的解调数据如图 13 所示。对原始数据和解调数据进行放大分析, 如图 14 所示, 得到解调延时时间约为 $22 \mu s$, 可见本文提出解调方法的数据延时较小, 实时性较好。

实验样机如图 15 所示, 系统参数与仿真参数相同。图 16 为携带数据信息的驱动脉冲, 其中: CH1 为不同频率的驱动脉冲, 50 kHz 频率代表数据“1”, 100 kHz 频率代表数据“0”; CH2 为原始数据。

单相电压型逆变器输出电压波形如图 17 所示。

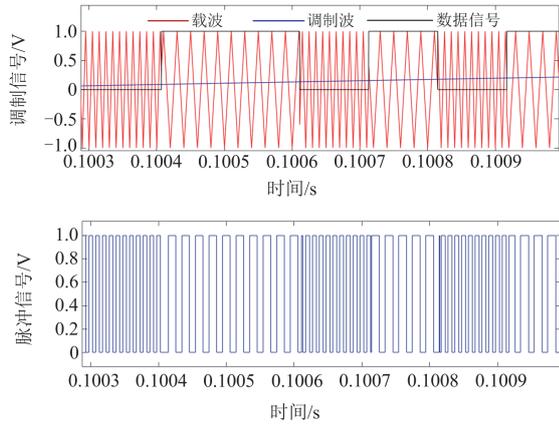


图 11 单相电压型逆变器功率数据调制波形图

Fig. 11 Power data modulation waveform of single-phase voltage inverter

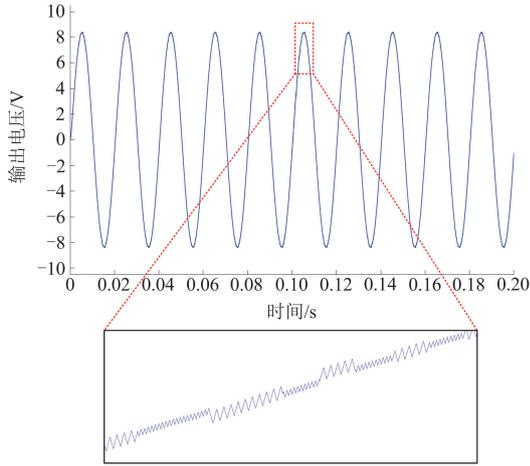


图 12 输出电压及携带的数据纹波

Fig. 12 Output voltage and carried data ripple

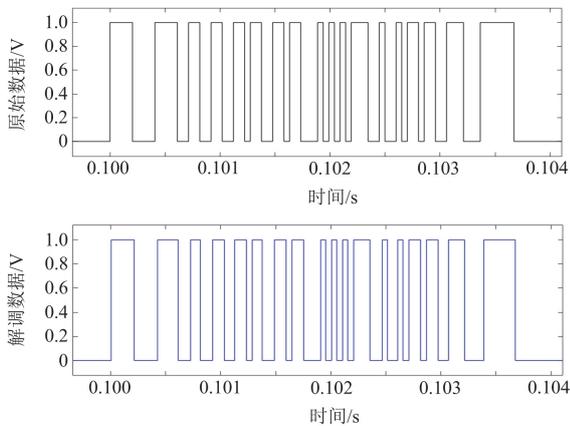


图 13 原始数据与解调数据对比图

Fig. 13 Comparison diagram of raw data and demodulation data

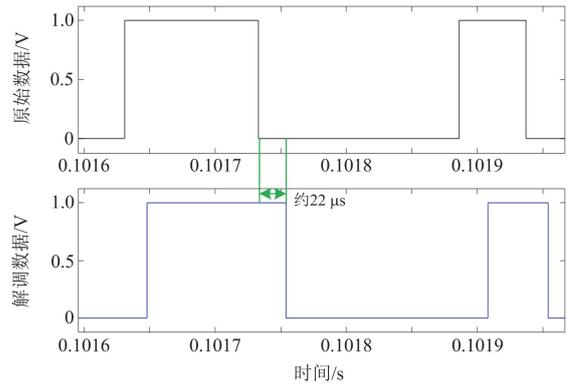


图 14 解调数据延时示意图

Fig. 14 Schematic diagram of demodulation data delay



图 15 单相电压型逆变器实验样机图

Fig. 15 Experimental prototype of single-phase voltage inverter

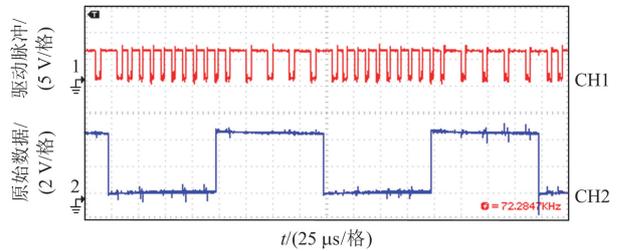


图 16 携带数据的驱动脉冲波形图

Fig. 16 Drive pulse waveform diagram of carrying data

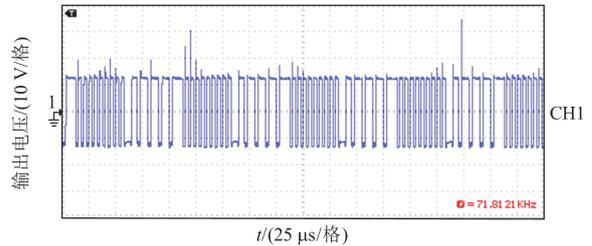


图 17 输出电压波形图

Fig. 17 Output voltage waveform diagram

为了提取电压纹波中携带的数据信息，利用调理电路对电压纹波进行滤波和放大，滤除其他频率后，得到只含 50 kHz、100 kHz 的数据纹波，并将

输出纹波电压大小控制在 0~3 V 之间, 再将该数据纹波输入至 ADC 模块进行模数转换, 并进行最大值点判断, 当出现最大值点时, 进行高、低电平的翻转。通用输入输出(general-purpose input/output, GPIO)最大值点翻转实验波形图如18(a)所示, 其中: CH1 为输入到 ADC 模块的电压纹波信号; CH2 为最大值点 GPIO 翻转情况。当 GPIO 翻转时, 定时器开始计数, 对中断计数次数设置阈值, 即可实现数据解调。当纹波间频率为 50 kHz 时, 解调数据为“1”;当纹波间频率为 100 kHz 时, 解调数据为“0”。解调示意图如图18(b)所示, 其中: CH1 为极值点翻转波形; CH2 为解调数据波形。原始数据与解调数据对比波形如图 18(c)所示, 其中: CH1 为原始数据波形; CH2 为解调数据波形。由图 18 可见, 两个波形之间存在延时, 延时时间在可接受范围内, 相较仿真延时时间增加, 这主要是由于实验过程中调制部分、信号调理部分、解调部分存在一定数字系统延时。

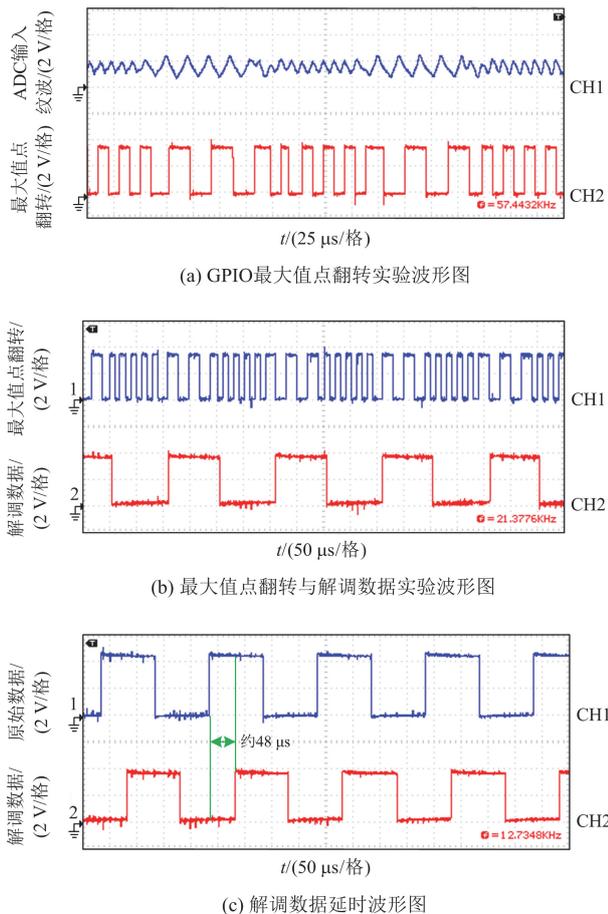


图 18 单相逆变器纹波峰值检测解调过程

Fig. 18 Process of detection and demodulation of ripple crest of single-phase inverter

5.2 功率调制波信息传输方式验证与分析

三相电压型逆变器能量信息一体化仿真参数如表 2 所示。

表 2 三相电压型逆变器能量信息一体化仿真参数

Table 2 Integrated simulation parameters of energy information

参数	数值
输入电压 E/V	24
输出滤波电感 L/mH	2
输出滤波电容 $C/\mu F$	20
负载 R/Ω	5
数据载波频率 f_1/kHz	10
数据载波频率 f_2/kHz	5
通信速率/(kbit/s)	2.5

设置每位数据持续时间为 400 μs , 即通信速率为 2.5 kbit/s。采用功率/数据双载波调制方式, 三相电压型逆变器的数据信息及功率调制波如图 19 所示。图 20 为逆变器输出线电压及其携带的待传输数据信息波形图。线电压波形经过调理电路, 滤除 5 kHz 和 10 kHz 频率以外的信号。图 21 为三相电压型逆变器原始数据与解调数据对比图, 通过对调理过的纹波进行采样, 同时计算每个极值点之间的对应频率, 设置频率阈值, 即可解调出原始数据。图 22 为三相电压型逆变器解调延时仿真图, 由图可见, 所提解调方法的延时约为 290 μs , 解调延时时间较短, 数据实时性较好。

为验证逆变器多自由度能量信息一体化方法, 将扰动信号经过数据调制后加入 A 相与 B 相的功率调制波中, 使其携带数据信息。调制波 1 中, 5 kHz 代表数据“0”, 10 kHz 代表数据“1”; 调制波 2 中,

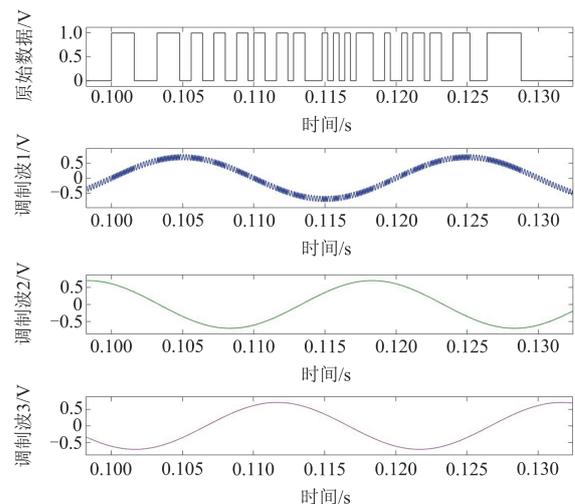


图 19 数据信息及功率调制波示意图

Fig. 19 Data information and power modulated wave diagram

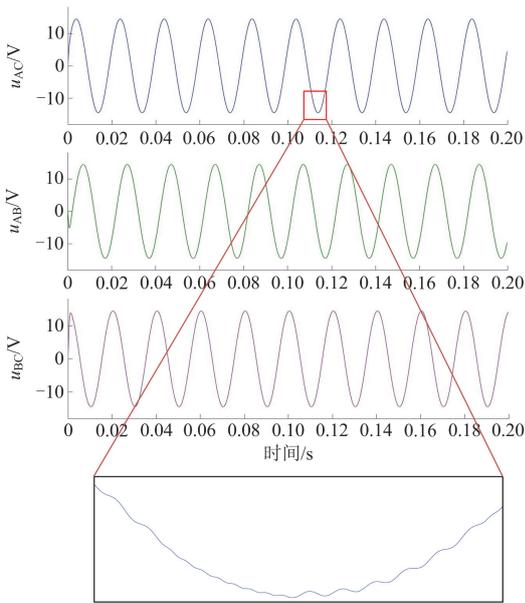


图 20 携带数据的线电压波形图

Fig. 20 Line voltage waveform diagram of carrying data

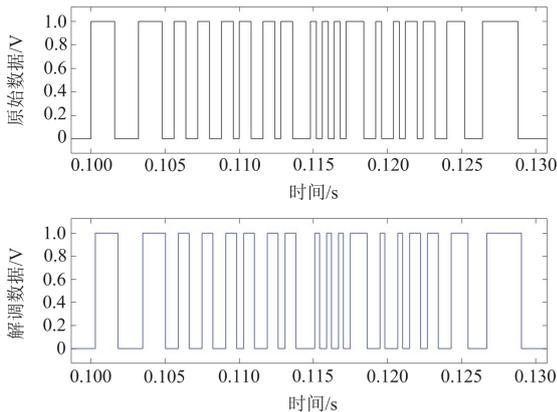


图 21 三相电压型逆变器原始数据与解调数据对比图

Fig. 21 Comparison chart of raw data and demodulation data of three-phase voltage-type inverters

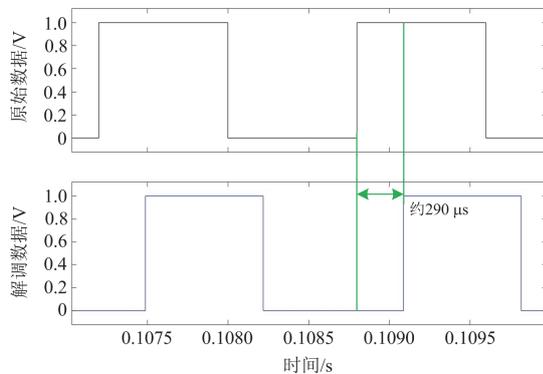


图 22 三相电压型逆变器解调延时仿真图

Fig. 22 Simulation diagram of demodulation delay for three-phase voltage inverter

10 kHz 代表数据“0”，20 kHz 代表数据“1”。设置两个调制波中携带数据信息不同，以此验证该方法同步传输不同数据的性能，设置两组数据信息传输时刻不同，以验证不同步传输不同数据性能。图 23 所示为两个功率调制波叠加数据信息示意图。

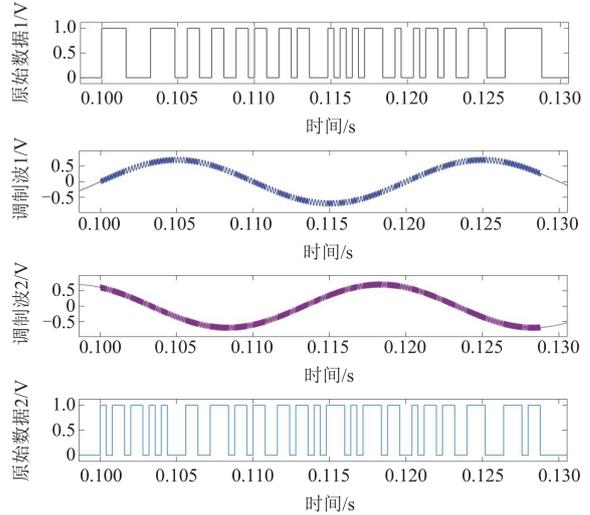
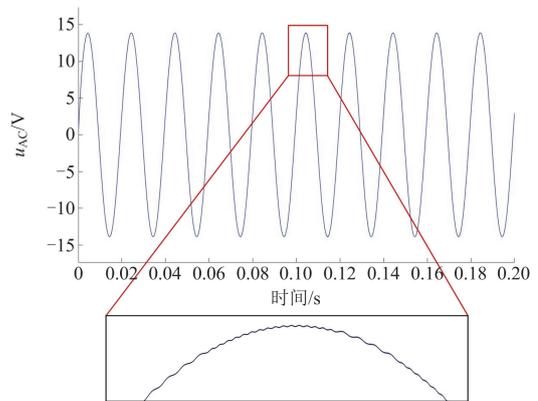


图 23 不同数据信息及功率调制波示意图

Fig. 23 Different data information and power modulation wave diagram

此时，线电压 u_{AB} 和 u_{AC} 同时携带加入至 A 相调制波的数据信息；线电压 u_{AB} 与 u_{BC} 同时携带加入至 B 相调制波的数据信息。由于线电压 u_{AB} 同时携带两组数据信息，容易产生相互干扰，不便于进行解调处理。所以，以线电压 u_{AC} 与 u_{BC} 的电压纹波作为解调对象。线电压 u_{AC} 与 u_{BC} 以及所含数据信息纹波如图 24 所示。

对上述两组携带数据信息的电压纹波进行滤波和放大处理，并分别对两组纹波进行采样，对采样后计算出的纹波峰值间频率分别设置阈值，实现两组数据的同步解调。图 25 为两组数据解调波形图，



(a) 线电压 u_{AC} 及纹波

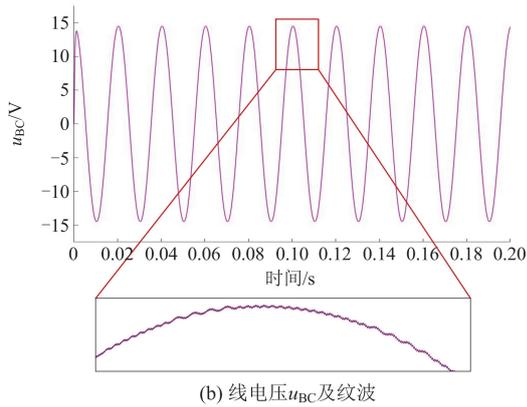
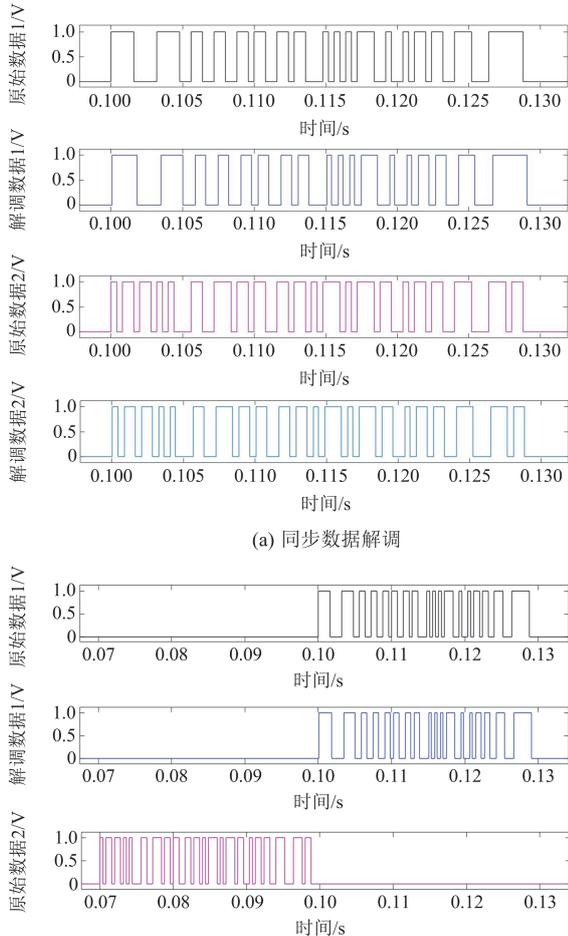


图 24 线电压及纹波示意图

Fig. 24 Schematic diagram of line voltage and ripple

本文所提方法可以在不同时刻加入两组原始数据信息, 因此可以实现两组数据新的同步传输和不同步传输。两组数据延时情况如图 26 所示, 以两组数据同步传输为例, 可得第一组数据延时约为 290 μs , 第二组数据延时约为 90 μs , 两组数据的解调延时时间不同是因为叠加的数据载波频率不同, 同理可得不同步传输情况。



(a) 同步数据解调

图 25 两组数据解调波形图

Fig. 25 Demodulation waveform of two sets of data

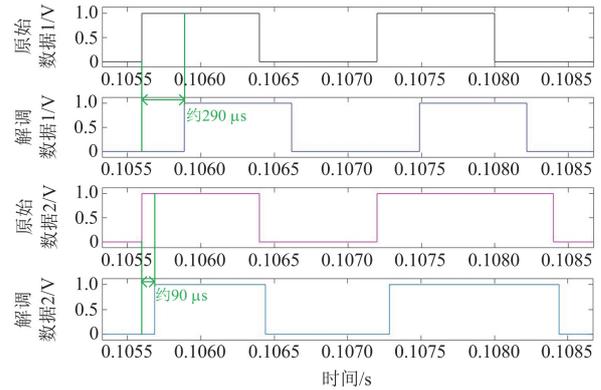


图 26 两组数据同步解调延时

Fig. 26 Two sets of data synchronization demodulation delay

图 27 为三相逆变器能量信息一体化实验样机, 实验系统参数与仿真参数相同。图 28(a)为三相电压型逆变器输出线电压波形, CH1 为线电压 u_{AC} ; CH2 为线电压 u_{AB} 。对线电压进行放大分析, 可见叠加在调制波上的数据信息, 如图 28(b)所示。

图 29(a)为 GPIO 最大值点翻转实验波形图, 其中: CH1 为 ADC 模块输入的数据纹波; CH2 为最大值点翻转电平。图 29(b)为最大值翻转与解调数据实验波形图, 通过对数据纹波每两个最大值点之间的中断次数设置阈值, 进行数据解调, CH1 为最大值点翻转电平; CH2 为通过峰值检测得到的解调数据。图 29(c)为解调数据延时波形图, 其中: CH1 为原始数据; CH2 为解调后的数据。解调延时约为 420 μs , 与仿真结果基本一致; 延迟时间增加主要是由数字系统延时引起的, 在可接受的范围内。

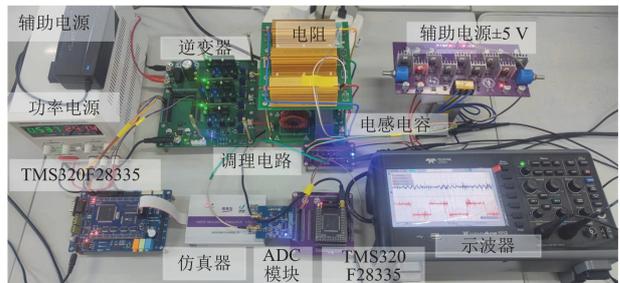


图 27 三相电压型逆变器实验样机图

Fig. 27 Three-phase voltage inverter experimental prototype

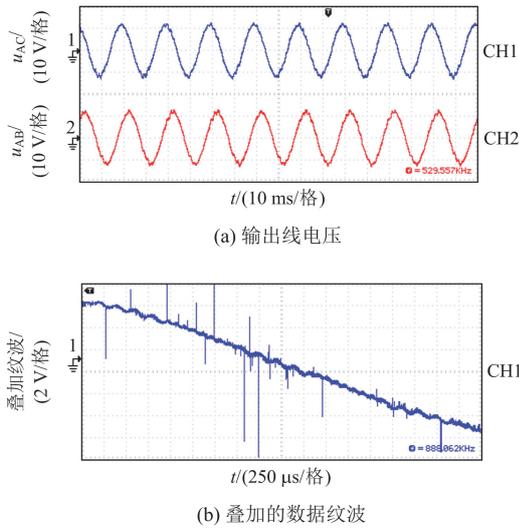


图 28 携带数据的线电压波形图

Fig. 28 Line voltage waveform diagram of carrying data

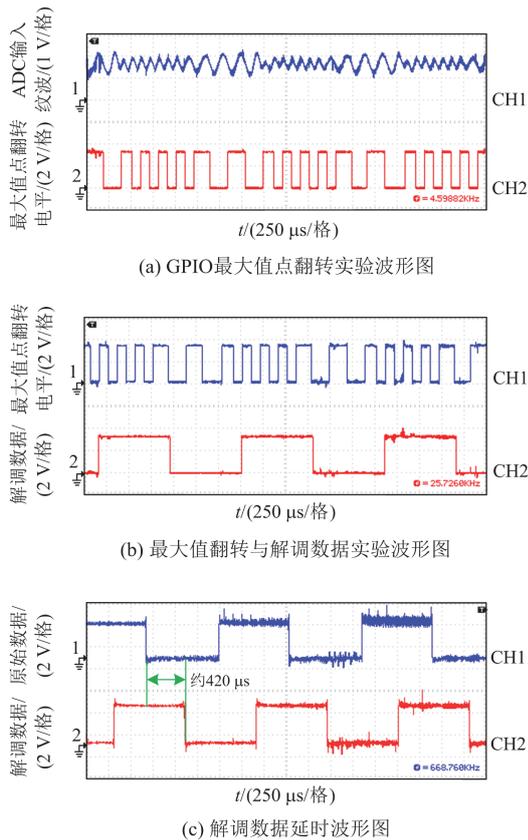


图 29 三相逆变器纹波峰值检测解调过程

Fig. 29 Process of detection and demodulation of ripple peak of three-phase inverter

6 结论

本文提出了一种基于纹波峰值检测的电压型逆

变器多自由度能量信息一体化方法，给出了应对逆变器纹波幅值不断变化难以实现精确解调的方案，即利用纹波峰值检测的解调方式实现对逆变器能量信息一体化的解调，再通过 2FSK 调制方式使数据信息嵌入功率载波或功率调制波，实现能量与信息的融合。最后，以单相和三相电压型逆变器为研究对象搭建仿真模型与实验平台，仿真与实验结果表明，该方法在单相电压型逆变器中可实现 20 kbit/s 的通信速率，三相电压型逆变器中可实现 2.5 kbit/s 的通信速率。本文所提的信息解调方法可以实现逆变器上的数据解调且实现简单、计算量小。

此外，基于功率调制波多自由度信息传输方式也可应用至其他 N 相逆变器的信息传输，并提供 $N-1$ 个传输信息的自由度，拓展了多相逆变器信息传输的自由度和灵活性，为逆变器能量信息一体化提供了一种新思路。

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.

[2] 陈鹏飞, 邓玮璋. 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.

[3] SOLLIE M L, BRYNE T H, GRYTE K, et al. Reducing ground reflection multipath errors for bluetooth angle-of-arrival estimation by combining independent antenna arrays[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(6): 529-539.

[4] WANG Xiangming, LIU Yang, JIAO Kexin, et al. Intrusion device detection in fieldbus networks based on channel-state group fingerprint[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2024, 19: 4012-4027.

[5] 谢志远, 曹通. 基于 PSA 的中压电力线载波通信自适应阻抗匹配[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 45-52.
XIE Zhiyuan, CAO Tong. Adaptive impedance matching of medium voltage power line carrier communication based on PSA[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 45-52.

[6] 曹旺斌, 高莹, 梁晓林, 等. 基于倒 L 型匹配衰减器的宽带 PLC 信号阻抗匹配[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(23): 159-166.
CAO Wangbin, GAO Ying, LIANG Xiaolin, et al. Broadband PLC signal impedance matching based on an

- inverted L-type matched attenuator[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(23): 159-166.
- [7] 何湘宁, 王睿驰, 吴建德, 等. 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[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1579-1587.
HE Xiangning, WANG Ruichi, WU Jiande, et al. Info character of power electronic conversion and control with power discretization to digitization then intelligentization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(5): 1579-1587.
- [8] HE Xiangning, WANG Ruichi, WU Jiande, et al. Nature of power electronics and integration of power conversion with communication for talkative power[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1).
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] STEFANUTTI W, MATTAVELLI P, SAGGINI S, et al. Communication on power lines using frequency and duty-cycle modulation in digitally controlled DC-DC converters[C]// *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, November 6-10, 2006, Paris, France: 2144-2149.
- [12] 王睿驰. 能量—信息一体化的电能路由器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WANG Ruichi. Research on key technologies of power/data integrated energy router[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [13] DU Jin, WU Jiande, WANG Ruichi, et al. DC power-line communication based on power/signal dual modulation in phase shift full-bridge converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(1): 693-702.
- [14] 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[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(7): 149-156.
ZHU He, XIE Zhiyuan, CAO Wangbin, et al. Power-information integration in DC-DC converters based on power control loop perturbation[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(7): 149-156.
- [15] ZHANG Ruoqi, HUI Yue, WU Jiande, et al. Embedding OFDM-based carrier communication into power control loop of converter in DC microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 69(7): 6914-6924.
- [16] 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[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3354-3363.
CHEN Jinghui, WU Jiande, WANG Ruichi, et al. Switching ripple communication method based on FH-DPSK modulation for DC-DC converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3354-3363.
- [17] 张若琦, 惠悦, 翁婉莹, 等. 基于控制环叠加重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.
- [18] 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*, 2019, 37(14): 3620-3631.
- [19] 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[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(16): 4353-4365.
GUO Hao, LI Yan, HOU Bingbing, et al. Power information integration technology of DC-DC converters based on orthogonal frequency division multiplexing-multiple quadrature amplitude modulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 38(16): 4353-4365.
- [20] 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.
- [21] WANG Ruichi, DING Shuye, CHEN Jinghui, et al. Design of a novel power/information integrated energy router for E-LAN[C]// *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference*, November 29-December 2, 2020, Nanjing, China: 1640-1644.
- [22] ZHANG Yixuan, CHEN Guipeng, HU Yihua, et al. Cascaded multilevel inverter based power and signal multiplex transmission for electric vehicles[J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2020, 4(2): 123-129.
- [23] YU Jiaqi, LI Yong, WAN Jianghu, et al. Tri-state modulation with operating losses minimization for a soft-switching bidirectional DC-DC converter[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(6): 58-70.
- [24] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 1-9.

收稿日期: 2024-08-31; 修回日期: 2025-01-10

作者简介:

李国华(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统电能质量分析与治理; E-mail: dklighuohua@163.com

湛智馨(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电气传动。E-mail: chenzhixin1324@163.com

(编辑 周金梅)