

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

张若琦, 惠悦, 翁婉莹, 吴建德*, 李武华, 何湘宁

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Design Method of Converters Realizing Carrier Communications in DC Microgrids by Superimposing OFDM Signal Into Control Loop

ZHANG Ruoqi, HUI Yue, WENG Wanying, WU Jiande*, LI Wuhua, HE Xiangning

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Power electronic converters have the potential of sending message during power conversion process. By superimposing the signal carrier on the power output reference, the power/data dual-carrier modulation technology can realize the functions of power conversion and information transmission simultaneously. The proposed method adopted an independent communication carrier and did not require an additional communication controller or coupling circuits. It had the advantages of adjustable signal strength and low implementation costs. To increase the communication rate, orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) technology was employed for signal modulation. First, the basic principles of OFDM based power/data dual-carrier modulation technology were introduced. Then, the DC microgrid system was modeled, and the transfer function of the signal channel was analyzed. Furthermore, the practical issues including the communication frame format and the suppression of peak-to-average power ratio(PAPR) were discussed in detail, based on which a low PAPR design method suitable for power/data dual-carrier modulation was adapted. Finally, a 2kW DC microgrid platform was built. The communication between two converters at the rate of 9.6kb/s was realized, which verified the correctness of the method.

KEY WORDS: power/data dual modulation; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); DC microgrid; peak-to-average power ratio (PAPR)

摘要: 电力电子设备在功率变换过程中, 同时具备发送信息

的能力。功率/数据双载波调制技术通过在功率控制环输出的基准上叠加信号载波, 同时实现功率变换与信息发送功能。该方法采用独立的通信载波, 不需要额外的通信控制器和耦合电路, 具有信号强度可调、传输距离远和实施成本低等优点。为提高通信速率, 采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术进行信号调制。首先介绍了基于 OFDM 的功率/数据双载波调制的基本原理; 然后对直流微网系统进行建模, 分析了信道的传递函数, 讨论了数据接收方案、通信帧的设计方法和峰均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)抑制问题, 并选用了一种适用于功率/数据双载波调制的低峰均功率比设计方法; 最后搭建了 1 个 2kW 的直流微网平台, 应用所提技术在 2 台变换器间实现了 9.6kb/s 速率的通信, 验证了该技术的可行性。

关键词: 功率/数据双载波; 正交频分复用(OFDM); 直流微网; 峰均功率比(PAPR)

0 引言

电力电子技术作为 21 世纪应用最广泛的技术之一, 已经渗透到工业生产和生活中的各个方面。传统电力电子技术侧重于电能变换的研究, 而较少关注信息的传输和处理。随着能源互联网和能量信息一体化等信息/能源交叉研究领域的快速发展^[1-4], 电力电子设备对于信息交互的需求日益增长, 信息/能源深度融合的电力电子装备将成为未来的发展趋势^[5]。

目前, 电力电子设备间常用的通信技术包括现场总线、无线通信和电力线载波通信等。现场总线技术如 CAN、Profibus 和 FFbus 等, 需要独立布线并配备额外的通信芯片, 成本较高^[6]; 相比于现场

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977189); 国际科技创新合作重点专项(2017YFE0112400)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977189); National Key Research and Development Program of China (2017YFE0112400).

总线技术,无线通信技术如 WIFI、Zigbee、Bluetooth 的维护成本更低,但是易受特定频段的干扰,且实时性较差^[7];电力线载波技术不需独立布线,技术方案成熟,但需要额外的信号耦合电路^[8-12]。

文献[13]对电力电子变换器在功率变换过程中进行信息调制的潜质进行了探索,提出电力电子设备除了实现功率变换基本功能,也具备发送信息的能力。电力电子变换器发送信息主要有 2 种实现方式:功率/数据单载波调制技术和功率/数据双载波调制技术。单载波调制技术中,功率与通信共用一个载波,功率开关频率即为信号载波频率,开关纹波的相位或频率,表征了数据信息。该技术具有数据通信速率较高的优点,但是可以采用的数据调制方法受到较大限制。此外,该方法无法调整发送信号的强度,传输距离较近^[14-17];双载波调制技术通过在功率输出基准上叠加信号载波,实现信号的发送。数据首先被调制至低频信号载波,然后通过 PWM 调制到功率载波上。由于功率调制与数据调制采用不同的载波,因此数据调制可以选择多种不同的方法。文献[18]应用双载波调制技术,在光伏优化器控制环中加入扰动,实现了光伏系统中组串与逆变器间 2kb/s 的通信速率。相比于其他常用的通信技术,以上 2 种技术都具有不需额外布线或配备通信电路,技术方案简单,制造和维护成本低,易于集成等优点;相比于单载波调制,双载波调制技术具有更大的灵活性和更远的传输距离。针对其本身通信速率较低的缺点,可以通过采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制技术,将串行数据转换为多路通信子载波并行传输,从而大大提高通信速率。

OFDM 技术具有频带利用率高,抗多径衰弱能力强等优点,但由于 OFDM 技术的时域信号为多个正弦子载波信号的叠加,当所有子载波的信号相位相近或相同时会出现较大的幅度峰值,即较高的峰均功率比(peak-to-average power ratio, PAPR)。目前通信领域解决 PAPR 问题主要包括信号预畸变方法、编码类方法、概率类方法等^[19-20]。信号预畸变方法通过对峰值功率较大的信号进行加窗或幅值变换,避免了过大的 PAPR 出现,该类方法一般为非线性变换过程,计算过程简单,且子载波数目不影响计算的复杂度;编码类方法的基本原理是通过计算由不同编码方法生成的所有码组的 PAPR,选择具有较低 PAPR 的码组进行传输,其处理过程为

线性,但随着子载波数目增加,计算复杂度显著增高,不适合处理器计算性能较弱或子载波数目较多的场合;概率类方法目标是降低高 PAPR 出现的概率,高 PAPR 出现的概率越低,则计算复杂度越高。另一方面,OFDM 系统的同步偏差,包括符号定时偏差,和载波频率偏差,将会对通信性能产生较大影响^[21-23]。符号定时偏差,将会引入码元间干扰(inter-symbol interference, ISI),而载波频率偏差,将会引入载波间干扰(inter-carrier interference, ICI)。这 2 种干扰的引入都会降低通信系统的信噪比^[24]。

直流微网作为智能配电网的重要组成部分,代表了未来分布式新能源供电系统的发展趋势^[25]。典型的直流微网系统通常为总线型结构,直流微网母线接纳光伏、风机、储能电池等可再生能源单元,并供电给其他直流用电负荷。各类发电和负荷单元与母线分别通过源变换器和负载变换器相连接,进行电能变换。直流微网的控制一般可分为 3 层:变换器控制层、电压协同层与通信调度层^[26-27]。源变换器控制器间需要通过电压协同层交换端口电压和电流信息,执行分布式协同控制算法,调整源变换器自身工作状态,以获得最佳的系统功率分配与能量调度效果^[28-29]。所需的物理层通信速率一般在 10~10kb/s,通信延时一般不大于 100ms^[30-32]。因此,电压协同层的通信方式可以采用本文介绍的功率/数据双载波调制技术。

本文针对直流微网中电压协同层控制的通信需求,提出并阐述一种基于 OFDM 的功率/数据双载波调制技术的原理与实现方式,并在直流微网系统中进行理论分析与实验验证。与传统的通信方案相比,本文提出的方法只需在原有的功率控制器中加入相应的通信算法便可实现变换器间的通信,不需额外的通信芯片或信号耦合电路,能够显著减小直流微网系统的制造和维护成本,并提高通信安全性。

1 功率/数据双载波调制技术的基本原理

功率/数据双载波调制基本原理如图 1 所示。在直流系统中,电力电子变换器的输入/输出端口呈低通滤波器特性,其截止频率一般在几百至几千 Hz,对于信息发送变换器来说,需首先将基带数据流经频带调制至通信载波 $s(t)$ (通常为正弦波)上。频带调制的方法包括幅移键控(amplitude shift keying, ASK),频移键控(frequency shift keying, FSK)和相移键控(phase shift keying, PSK),或基于以上 3 种

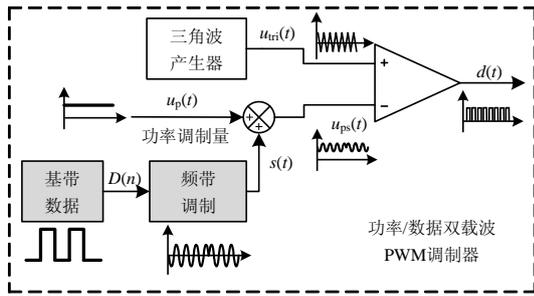


图 1 功率/数据双载波调制的基本原理

Fig. 1 Basic principle of power/signal dual-carrier modulation

基本方法的多载波调制方法，如多进制正交幅度调制 (multi-ary quadrature amplitude modulation, M-QAM)或 OFDM 技术等。而后，通信载波 $s(t)$ 作为扰动信号，叠加至原有的功率调制量 $u_p(t)$ 上，得到的功率/数据双调制量 $u_{ps}(t)$ 与三角波 $u_{tri}(t)$ 进行比较，生成信息发送变换器的门极驱动信号 $d(t)$ 。在此过程中，串行的基带数据通过调制，加载到了门极驱动信号 $d(t)$ 的占空比信息中。如图 2 所示， $d(t)$ 经过输入端和输出端的无源网络滤波，以输入/输出端电压/电流扰动形式传递至信息接收变换器，信息接收变换器通过滤波、解调等环节得到信息发送变换器发送的数据。

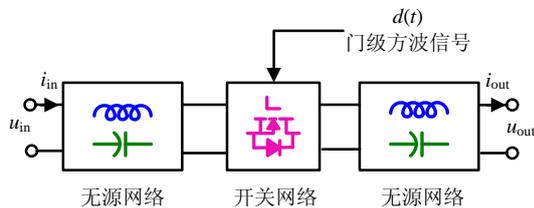


图 2 电力电子变换器简化结构

Fig. 2 Simplified structure of power electronic converter

在功率/数据双载波调制系统中，通信载波频率的选择十分关键。为了减少功率控制环对通信性能的影响，通信载波的载波频率 f_c 一般选在功率控制环截止频率 f_p 之上；同时，由于功率低通滤波器的存在，从提高信号增益的角度出发，载波频率应越低越好。在保证通信速率满足应用要求的前提下综合考虑，一般取载波频率 f_c 为开关频率 f_s 的 $1/50 \sim 1/5$ ，应用 OFDM 技术作为双载波调制技术后，忽略边频带，则变换器输出电压的功率密度谱如图 3 所示，各 OFDM 子载波频带相互正交，且与功率传输频率、电网基波频率 f_g 和开关频率 f_s 均相隔较远，具有较强的抗干扰能力。

本文采用基于四进制差分相位调制(quaternary differential phase shift keying, QDPSK)的 OFDM 技术作为频带调制方法，以下详细说明数据调制与解

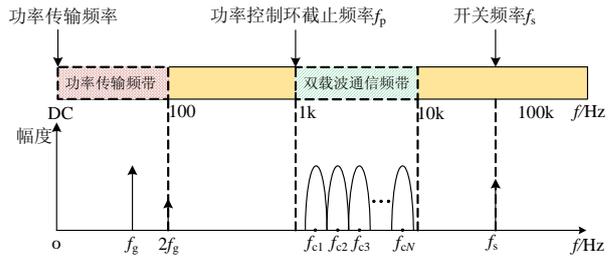


图 3 应用 OFDM 技术后变换器输出电压的功率密度谱

Fig. 3 Power density spectrum of converter output voltage after applying OFDM technology

调的基本原理。

1.1 数据调制原理

一个由 N 路子载波信号组成的 OFDM 系统，其通信载波 $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = \sum_{k=1}^N x_k(t) \quad (1)$$

其中每路子载波：

$$x_k(t) = B_k \cos(2\pi f_{ck}t + \varphi_k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

为实现正交频分复用，需满足各通信子载波 $x_k(t)$ 的载波频率 f_{ck} 两两相互正交，即有：

$$\int_i^{t+T_b} \cos(2\pi f_{ci}t + \varphi_i) \cos(2\pi f_{cj}t + \varphi_j) dt = 0 \quad (3)$$

式中： $i, j=1, 2, \dots, N$ ，且 $i \neq j$ ； T_b 为码元周期。进而可得各子载波频率 f_{ck} 满足：

$$f_{ck} = M/T_b, \quad M \text{ 为正整数} \quad (4)$$

式(4)表明，各路子载波在每个码元周期内均有整数个周期。基于 QDPSK 的 OFDM 调制过程如图 4 所示，包括 2 个步骤：串/并转换和 QDPSK 频带调制。串/并转换过程将串行基带数据流按顺序转换为 N 组并行基带数据流，并分配至 N 路子载波。然后对每路子载波进行 QDPSK 调制，即在第 n 个码元周期 T_b 内，每 2bit(四进制)数被转化为一组连续的 M 个正弦波，而正弦波的相位 φ_k 和基带数据 $D(n)$ 的关系满足式(5)，即当前码元周期与上一码元周期载波的相位差由数据决定。

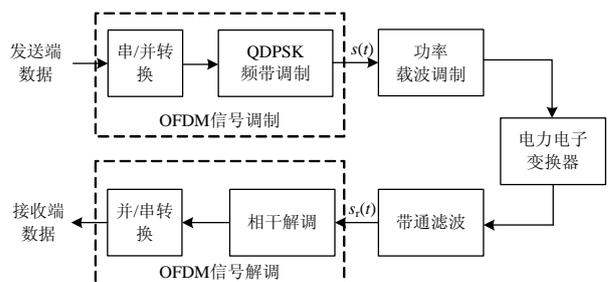


图 4 基于 OFDM 的双载波调制通信过程

Fig. 4 Communication process of OFDM-based dual-carrier modulation

$$\varphi_k(n) - \varphi_k(n-1) = \frac{\pi}{2} D(n), D(n) \in \{0, 1, 2, 3\} \quad (5)$$

假设某 OFDM 系统包括 4 路子载波, $f_{c1}=f_b$, $f_{c2}=2f_b$, $f_{c3}=3f_b$, $f_{c4}=4f_b$ 。当发送一段包括 16 个四进制码的串行数据“0312 1302 3120 1213”时, 各路子载波的调制波形如图 5 所示。以第四路子载波 $x_4(t)$ 为例, 其发送的基带数据为“1213”。在每个码元周期内, 每个四进制数被转化为一组连续 4 个正弦波, 每组正弦波与前一组的相位差分别为 $\pi/2, \pi, \pi/2, 3\pi/2$ 。

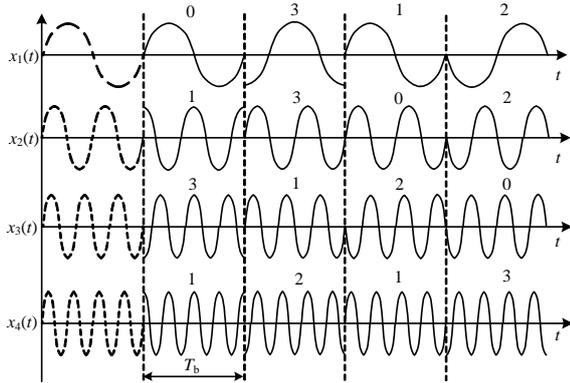


图 5 经过调制后的 OFDM 各路子载波波形

Fig. 5 Modulated sub-carrier waveforms of OFDM

1.2 数据解调原理

如图 4 所示, 信息接收变换器的数据解调过程包含相干解调和并/串转换 2 个步骤。信息接收变换器检测微网母线端口的电压纹波, 通过带通滤波器后保留通信频带内的信号。不考虑噪声影响, 得到的信号 $s_r(t)$ 可表示为 N 路 OFDM 子载波之和:

$$s_r(t) = \sum_{k=1}^N x_{kr}(t) \quad (6)$$

其中每路子载波:

$$x_{kr}(t) = B_{kr} \cos(2\pi f_{ck}t + \theta_{kr}), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

以第 k 路子载波数据的解调为例, 某一码元周期内, $s_r(t)$ 分别与 $\cos(2\pi f_{ck}t)$ 和 $\sin(2\pi f_{ck}t)$ 相乘并在一个码元周期内积分, 由三角函数的正交性, 得到该码元周期信号 $s_r(t)$ 中第 k 路子载波的同向分量 x_{10_k} 和正交分量 x_{q0_k} :

$$\begin{cases} x_{10_k} = \int_0^{T_b} B_{kr} \cos(2\pi f_{ck}t + \theta_{kr}) \cos(2\pi f_{ck}t) dt = \\ \quad (B_{kr} T_b \cos \theta_{kr}) / 2 \\ x_{q0_k} = \int_0^{T_b} B_{kr} \cos(2\pi f_{ck}t + \theta_{kr}) \sin(2\pi f_{ck}t) dt = \\ \quad -(B_{kr} T_b \sin \theta_{kr}) / 2 \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8), 可解调出该码元周期内第 k 路子载波相位:

$$\theta_{kr} = \arctan\left(-\frac{x_{q0_k}}{x_{10_k}}\right) \quad (9)$$

同理, 在下一码元周期, 可计算出第 k 路子载波信号的相位为 $\theta_{kr} + \Delta\theta_{kr}$, 根据 $\Delta\theta_{kr}$ 和式(5), 可解调出该码元周期内的数据。然后对接收到的所有子载波数据进行逆向并/串转换, 即可解码得到所需数据。

2 系统建模分析

对于通信系统, 信道传输特性决定了数据通信性能。在直流微网系统中, 信道传输特性主要由电力电子变换器的阻抗特性所决定。因此, 需要对直流微网系统进行精确建模, 分析电力电子变换器对信号增益的影响, 从而为接收端的滤波电路和软件解调算法设计提供理论参考。

考虑线缆阻抗的微网等效模型如图 6 所示。该系统共包括 n_1 个源变换器与 n_2 个负载变换器; PCC 为微网的公共连接点; R_{1_DG*i*} 和 R_{1_L*j*} 分别为 i 号源变换器和 j 号负载变换器至 PCC 点的等效线缆电阻; L_{1_DG*i*} 和 L_{1_L*j*} 分别为 i 号源变换器和 j 号负载变换器至 PCC 点的等效线缆电感; u_{o_DG*i*} 为 i 号源变换器戴维南等效电路的电压源电压; Z_{oc_DG*i*} 为 i 号源变换器戴维南等效电路的电阻, 即闭环输出阻抗; Z_{ic_L*j*} 为 j 号负载变换器的闭环输入阻抗。由于分布电容容量较小, 可将其纳入变换器的输入输出阻抗中统一考虑。系统运行于孤岛模式, 不考虑并网逆变器。

假设某一时刻, 1 号源变换器向 1 号负载变换器发送数据。1 号源变换器为 Boost 变换器, 采用下垂控制方法。相对功率调制波而言, 通信载波是小信号扰动, 由于载波频率低于开关频率的 1/5, 因此可采用传统的小信号分析方法。以下分析 1 号

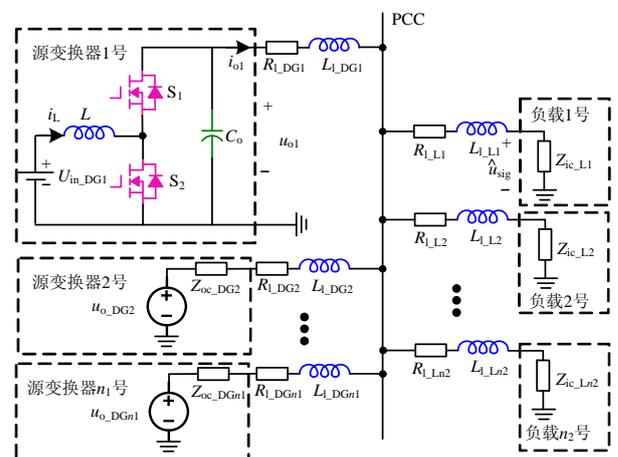


图 6 直流微网小信号等效模型

Fig. 6 Small signal equivalent model of the DC microgrid

源变换器在控制环输出端加入扰动量 \hat{d}_k 时，1 号负载接收到的信号扰动值 \hat{u}_{sig} 。

采用下垂功率外环、电压环和电流内环三环控制的 Boost 变换器控制框图如图 7(a)所示： G_v 和 G_i 分别为电压环和电流环补偿函数； G_{delay} 为数字控制延时环节传递函数； r_d 为下垂系数； U_{ref} 为空载参考输出电压； G_{id} 、 G_{iio} 、 G_{vi} 、 G_{vio} 的表达式如式(10)所示^[33]。

$$\begin{cases} G_{id}(s) = \frac{sC_o U_{o1} + I_{o1}}{s^2 LC_o + (1-d_p)^2} \\ G_{iio}(s) = \frac{1-d_p}{s^2 LC_o + (1-d_p)^2} \\ G_{vi}(s) = \frac{-sL_{L1} + U_{in}}{sC_o U_{o1} + I_{o1}} \\ G_{vio}(s) = \frac{-U_{o1}}{sC_o U_{o1} + I_{o1}} \end{cases} \quad (10)$$

式中： d_p 为稳态时开关管 S_2 的占空比； U_{o1} 、 I_{o1} 分别为源变换器 1 号的直流输出电压和电流；其余变量见图 6。

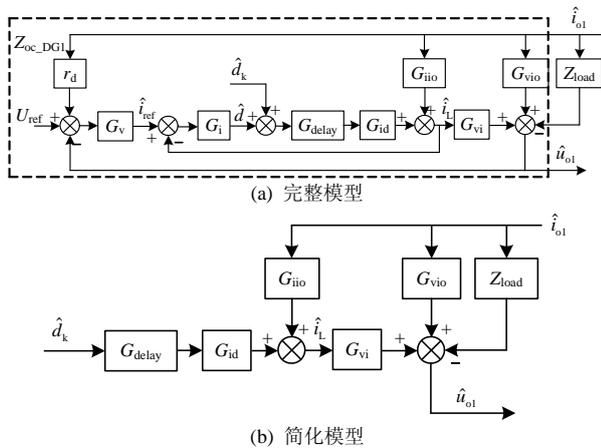


图 7 源变换器的控制框图

Fig. 7 Control block diagram of the source converter

由图 7(a)可求得源输出阻抗如式(11)所示，其中 $T_v = G_v G_i G_{delay} G_{id} G_{vi}$ ， $T_i = G_i G_{delay} G_{id}$ 分别为电压环与电流环的开环环路增益。

$$Z_{oc_DG1} = \frac{r_d T_v - G_{vio} (1 + T_i) - G_{iio} G_{vi}}{1 + T_i + T_v} \quad (11)$$

1 号源变换器的负载为微网内的其他变换器。对于 i 号源变换器和 j 号负载变换器，其从微网母线端口视入的等效阻抗 Z_{DGi} 和 Z_{Lj} 分别为：

$$Z_{DGi} = R_{1_DGi} + sL_{1_DGi} + Z_{oc_DGi} \quad (12)$$

$$Z_{Lj} = R_{1_Lj} + sL_{1_Lj} + Z_{ic_Lj} \quad (13)$$

因此，可求得 PCC 点除 1 号源变换器外其余变

换器的等效输入阻抗为

$$Z_{PCC} = 1 / \left(\sum_{i=2}^{n_1} 1 / Z_{DGi} + \sum_{j=1}^{n_2} 1 / Z_{Lj} \right) \quad (14)$$

1 号源变换器的等效负载阻抗为

$$Z_{load} = R_{1_DG1} + sL_{1_DG1} + Z_{PCC} \quad (15)$$

由于占空比扰动频率 f_{ck} 高于电压电流环采样截止频率，因此闭环和下垂控制支路均不起作用，当求取 \hat{d}_k 与 \hat{u}_{o1} 关系时，控制框图可简化为图 7(b)，可得：

$$\frac{\hat{u}_{o1}}{\hat{d}_k} = G_{delay} G_{id} G_{vi} \quad (16)$$

1 号源变换器输出电压扰动 \hat{u}_{o1} 至负载变换器号 1 端口的电压扰动 \hat{u}_{sig} 的传递函数为

$$\frac{\hat{u}_{sig}}{\hat{u}_{o1}} = \frac{\hat{u}_{sig}}{\hat{u}_{PCC}} \frac{\hat{u}_{PCC}}{\hat{u}_{o1}} = \frac{Z_{ic_L1}}{R_{1_L1} + sL_{1_L1} + Z_{ic_L1}} \frac{Z_{PCC}}{Z_{load}} \quad (17)$$

由式(16)—(17)可求得：

$$G_{sig}(s) = \frac{\hat{u}_{sig}}{\hat{d}_k} = \frac{Z_{ic_L1} Z_{PCC} G_{delay} G_{id} G_{vi}}{(R_{1_L1} + sL_{1_L1} + Z_{ic_L1}) Z_{load}} \quad (18)$$

从式(18)可看出，信号增益主要受微网内变换器的输入输出阻抗影响，增大负载变换器的输入阻抗有助于提升信号幅度。由于源变换器的输出阻抗 Z_{oc_DGi} ，负载变换器的输入阻抗 Z_{ic_Lj} 在高频段受母线端口电容影响较大，在满足系统稳定性要求的前提下，可适当减小变换器在母线端口的电容值，以提高信号增益，增大信噪比。

3 通信系统设计

3.1 数据接收方案设计

OFDM 通信对信号同步要求较高，因此具有较好性能的数据接收方案对于数据的成功解调非常关键。在本文中，数据接收端由硬件滤波电路和软件解调算法 2 个部分构成。如图 8 所示，其中硬件滤波电路采用差分带通滤波器和 Sallen-key 低通滤波

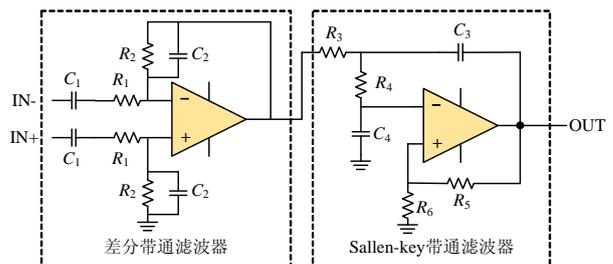


图 8 数据接收滤波器结构

Fig. 8 Structure of the filter for data receiving

波器级联的结构,用于对母线电压信号进行滤波,滤除开关频率次和直流分量,以保留 OFDM 频带内的分量。软件解调算法采用离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT),通过对各频率子载波进行相位计算,解调出数据。

3.2 帧格式设计

从式(18)可以看出,不同频率的子载波信号经电力电子信道传输至接收端,具有不同的增益和时延。在传统的 OFDM 通信技术中,通常采用加入循环前缀的方法消除 ICI 并减少 ISI。

为克服 OFDM 系统的同步偏差,本文设计的 OFDM 通信帧格式如图 9 所示,首先发送同步位,作为接收端与发送端的码元同步信号。同步位所使用的载波频率一般在 OFDM 子载波频率 $f_{c1} \sim f_{cN}$ 中选择。接收端通过滑窗 DFT 算法检测同步载波的幅值,实现发送端与接收端的帧同步。每个码元周期 T_b 均由循环前缀 T_{CP} 和载波周期 T_{SC} 组成。循环前缀 T_{CP} 和载波周期 T_{SC} 内,各路子载波的频率与相位均相同,该方法保证了即使接收端 DFT 窗口并未完全与载波周期 T_{SC} 对准,数据解调结果依然正确。循环前缀的长度 T_{CP} 需大于最大多径时延。 T_{CP} 的计算方法为

$$T_{CP} > \max\left\{\frac{1}{\omega_k} \angle G_{sig}(\omega_k)\right\} - \min\left\{\frac{1}{\omega_k} \angle G_{sig}(\omega_k)\right\} \quad (19)$$

式中 $\omega_k = 2\pi f_{ck}$ 为第 k 路子载波的角频率。

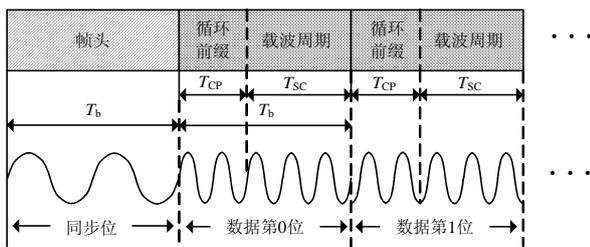


图9 OFDM 通信系统中的帧格式

Fig. 9 Frame format in the proposed OFDM communication system

3.3 PAPR 问题及其抑制方法

当子载波数目较多时,OFDM 系统的 PAPR 问题将影响通信传输性能。在功率/数据双载波调制技术中,电力电子变换器成为了通信信道的重要组成部分,而为了保证电能质量,电力电子变换器的输出端对最大纹波有限制。较高的 PAPR 显然会增大纹波峰峰值,为了保证最大纹波不超过允许的输出纹波峰峰值要求 $\Delta U_{o,max}$,需要限制 PAPR 值。

考虑到直流微网中各电力电子变换器的控制

器计算能力有限,可采用信号预畸变方法来降低载波数目较多时的 PAPR。信号预畸变方法包括限幅法,压扩变换法和加窗法等。压扩变换法的处理过程前后信号平均功率不变,因此不降低通信系统的信噪比,对通信性能的影响较小。基于 μ 律的其中一种压扩变换函数如下:

$$s'(t) = C_T \{s(t)\} = \frac{As(t)}{\ln(1+\mu)|s(t)|} \ln\left(1 + \frac{\mu}{A}|s(t)|\right) \quad (20)$$

式中: A 为压扩变换的拐点,同时也为信号的平均功率,如式(21)所示; μ 通常取 $\mu < 5$ 。

$$A = \frac{1}{T_b} \int_0^{T_b} s^2(t) dt \quad (21)$$

变换后的峰值为

$$s'_{max} = \frac{A}{\ln(1+\mu)} \ln\left(1 + \frac{\mu}{A} \sum_{k=0}^{N-1} d_k\right) \quad (22)$$

给定 $\Delta U_{o,max}$ 下,根据第 2 节系统建模分析的内容,可求得允许的最大占空比扰动值,当预设的 OFDM 子载波幅值 d_k 之和超过最大占空比扰动值时,可运用上述 PAPR 方法压缩信号幅值。

4 实验验证

为了验证理论分析的正确性,搭建了一套容量为 2kW 的直流微网系统,该系统采用 OFDM 功率/数据双载波调制技术实现了变换器间的数据通信,其电路结构和照片如图 10、11 所示。实验平台由 2 个采用 Boost 拓扑的源变换器和 2 个采用 Buck 拓扑的负载变换器组成,其具体参数见表 1,因线路阻抗较小,实验中予以忽略。

在该平台上进行实验,测得信号增益 G_{sig} 随频率变化的理论与实验数据如图 12 所示。可以看出,实验数据与理论基本相符,验证了模型分析的正确性。而随着频率的升高,信号增益逐渐降低,这表明若要在接收端获得相同的信号幅值,则发送端发出的子载波幅值需随频率升高逐渐增加。

在实验系统中,对其中的 1 号源变换器采用 6 路子载波 $x_1 \sim x_6$ 进行 OFDM 调制,且每路子载波采用 QDPSK 进行调制。表 2 列出了 1 号源变换器向 1 号负载变换器发送十进制数据序列“21 148 164 134 85 170 31 188 182 78 27 228”,经进制转换和串并转换后分配至各路子载波各个参数,包括子载波频率、扰动深度及对应的四进制数据。根据式(18),可得到通信引入的微网母线电压扰动峰峰值为

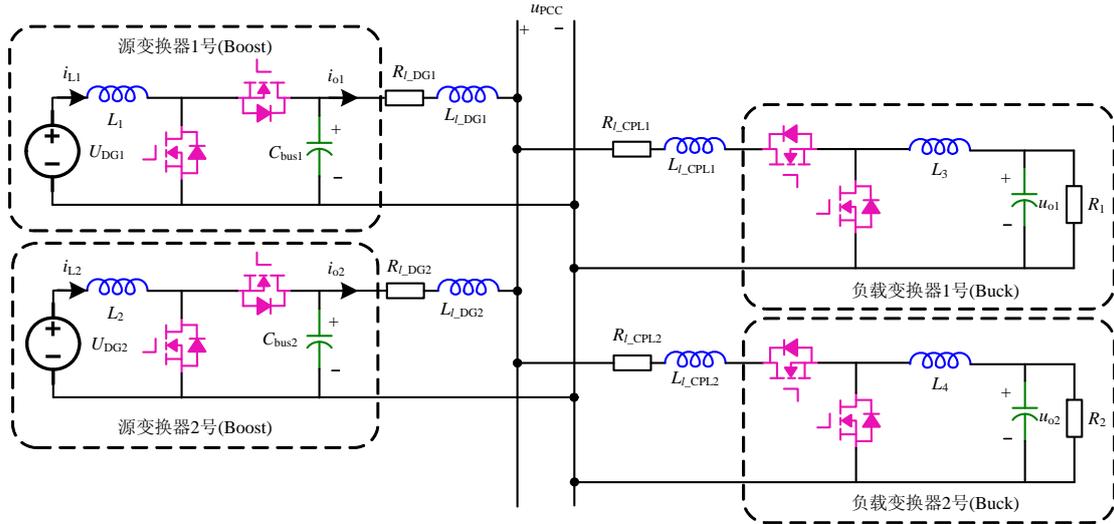


图 10 直流微网实验平台结构

Fig. 10 Experimental platform structure of the DC microgrid

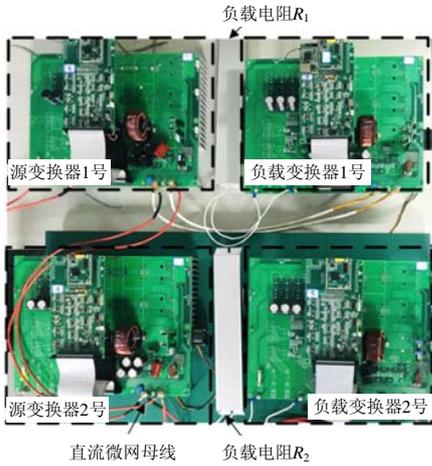


图 11 实验平台实物图

Fig. 11 Photo of the experimental platform

表 1 微网实验平台功率系统参数

Table 1 Experimental parameters

参数	数值
1 号、2 号源变换器输入电压 $U_{DG1}, U_{DG2}/V$	200
微网母线参考电压 U_{ref}/V	380
1 号、2 号负载变换器额定输出电压 $U_{o1}, U_{o2}/V$	200
负载电阻 $R_1, R_2/\Omega$	40
源变换器下垂系数 $r_d/(V/A)$	3
开关频率 f_s/kHz	50
源变换器输出电容 $C_{bus1}, C_{bus2}/\mu F$	100
负载变换器输入电容 $C_{bus3}, C_{bus4}/\mu F$	50
负载变换器输出电容 $C_{o1}, C_{o2}/\mu F$	300
电感 $L_1, L_2, L_3, L_4/mH$	2

$$\hat{u}_{sig} = \sum_{i=1}^6 \hat{d}_k G_{sig}(\omega) = 118mV \quad (23)$$

该值符合微网电能质量要求。

根据式(19), 可得最大多径时延为 0.089ms, 为

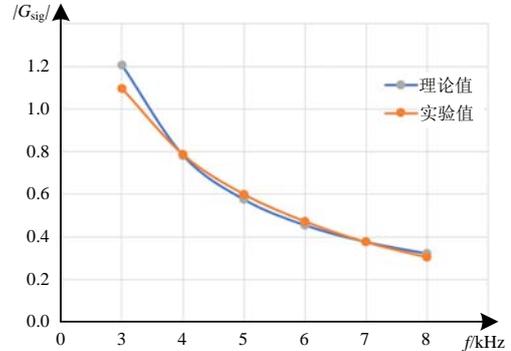


图 12 信号增益的理论实验数据对比

Fig. 12 Comparison of theoretical and experimental data of signal gain

表 2 各路子载波参数

Table 2 Parameters of subcarriers

序号	载波频率 f_{ck}/kHz	扰动深度 d_k	发送的数据
1	3	0.028	01112110
2	4	0.032	22102012
3	5	0.032	11112222
4	6	0.034	01332330
5	7	0.036	23121032
6	8	0.038	01233210

减小码间串扰的影响, 设定循环前缀 T_{CP} 的长度为 0.2ms。实验中的其余通信相关参数见表 3。其中通信波特率 R_B 可由式(24)计算得到, M 为进制, N 为 OFDM 子载波路数。

$$R_B = \frac{N \log_2 M}{T_b} = \frac{6 \log_2 4}{1.2 \times 10^{-3}} = 9.6(kb/s) \quad (24)$$

当 1 号源变换器根据表 2 发送通信数据时, 发送端的调制波形如图 13 所示, $x_1(t)$ 和 $x_4(t)$ 分别为第 1 路 3kHz 和第 4 路 6kHz 子载波调制波形的 DA 输

表3 实验平台通信系统参数

Table 3 Parameters of communication systems

参数	数值
码元周期 T_b /ms	1.2
循环前缀长度 T_{CP} /ms	0.2
信号载波周期 T_{SC} /ms	1
通信波特率 R_B /(kb/s)	9.6
同步位载波频率 f_{synch} /kHz	3
帧数据位	9

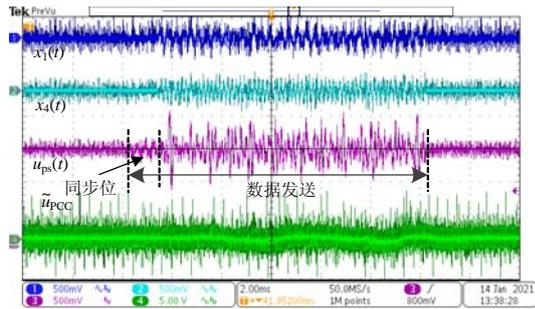


图13 发送端的调制波形

Fig. 13 Modulation waveforms at the transmitter

出结果, $u_{ps}(t)$ 为经过功率信号双载波调制后, 源变换器号1 开关管 S_2 占空比的 DA 输出结果, \hat{u}_{PCC} 为母线电压 u_{PCC} 的交流分量。可以看出, 同步位所使用的载波频率为 3kHz, $x_1(t)$ 、 $x_4(t)$ 和 $u_{ps}(t)$ 的波形与图 1、图 5 的理论相符。

系统各关键节点的波形如图 14 所示, 其中 CH1 为母线电压 u_{PCC} , CH2 为母线电压 u_{PCC} 的交流分量, CH3 为 1 号负载变换器的输出电流 i_{o1} , CH4 为 1 号负载变换器通信滤波器输出信号 u_{fil} (交流耦合), 从图 14 中可以看出, 1 号负载变换器的输出电流稳态值 I_{o1} 约为 5A, 输出功率约为 1kW。直流微网母线电压 u_{PCC} 约为 370V。由通信引入的母线纹波电压波动不超过 1V。

接收端(1 号负载变换器)控制器对滤波器输出信号进行 DFT 解调, 并将解调得到的各路子载波基

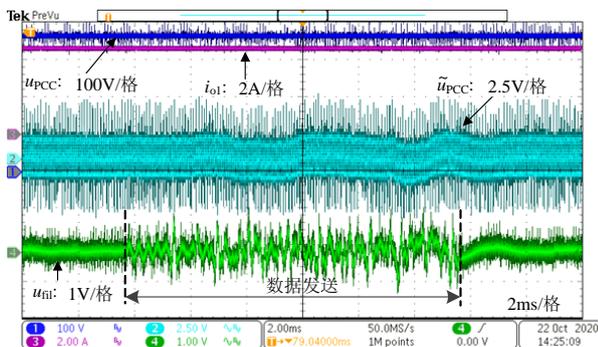


图14 应用 OFDM 技术的微网系统实验波形

Fig. 14 Experimental waveforms of microgrid system using OFDM technology

带数据 DA 输出, 其结果如图 15 所示, 其中 CH1 为待解调的滤波器输出信号 u_{fil} , CH2—CH7 为解调后的结果。解调得到的数据与表 2 一致, 证明了该通信方法应用于直流微网系统的可行性。CH2—CH7 滞后于 CH1 一段时间 T_d , 这是因为控制器需要对一个完整载波周期 T_{SC} 的信号进行 DFT, 才能解调出当前码元周期的数据。

对滤波器输出信号作频谱分析, 结果如图 16 所示, 可以看到, 其 FFT 结果的频带分布在 2.5kHz~

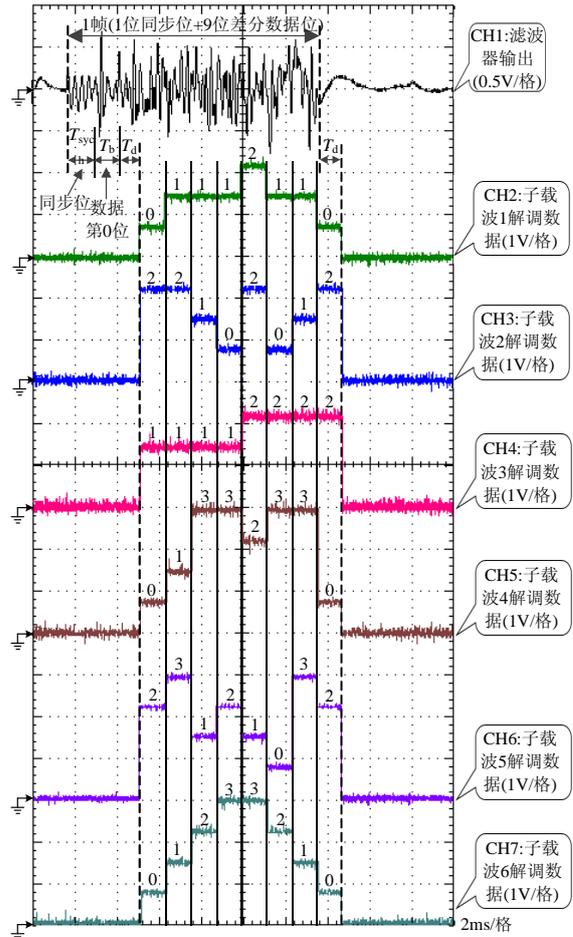


图15 OFDM 通信的解调结果

Fig. 15 Demodulation results of OFDM-based communication

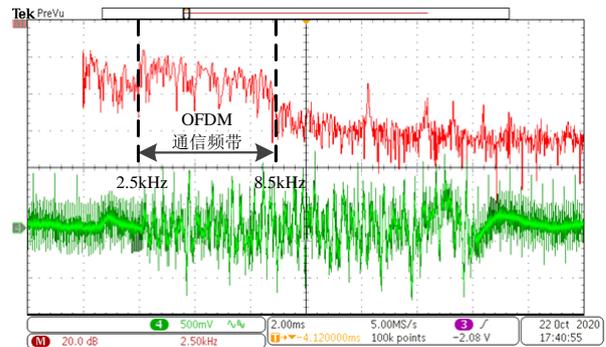


图16 滤波器输出信号的频谱分析
Fig. 16 Spectrum analysis of filter output signal

8.5kHz。且频带较平坦, 进一步验证了第 1 节的相关分析。

5 总结与展望

本文对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进行了研究, 并进行了建模分析和实验验证。采用本方法设计的变换器在容量为 2kW 的直流微网中的通信速率可达 9.6kb/s, 满足微网应用要求。由于不需要增加额外的通信控制器或耦合元件, 该技术具有实施成本低、集成度高的优势, 具有广阔的应用前景。

但是, 本研究仍有一些不足之处有待完善: 在长距离应用中, 线路阻抗对发送信号的衰减较大, 可能会影响到通信质量; 且本文实验中采用的滤波器结构较简单, 在更大功率场合对于噪声的抑制效果有待验证。因此, 如何在较长距离或更大功率工况下保证本通信系统的通信质量, 将成为今后研究的重要内容。

参考文献

- [1] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2028.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028(in Chinese).
- [2] 王晓辉, 季知祥, 周扬, 等. 城市能源互联网综合服务平台架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2310-2320.
WANG Xiaohui, JI Zhixiang, ZHOU Yang, et al. Comprehensive service platform architecture and key technologies of urban energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2310-2320(in Chinese).
- [3] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494(in Chinese).
- [4] 尹积军, 夏清. 能源互联网形态下多元融合高弹性电网的概念设计与探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 486-497.
YIN Jijun, XIA Qing. Conceptual design and exploration of multi-factor integrated high-elastic power grid in energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 486-497(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [8] 金鑫, 肖勇, 曾勇刚, 等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2800-2808.
JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2800-2808(in Chinese).
- [9] 潘轲. 面向新能源微网的电力线与无线异构通信技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
PAN Ke. Research on power line and wireless heterogeneous communication technology for new energy micro network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017,

- 37(4): 1136-1141.
CAO Wangbin, YIN Chengqun, XIE Zhiyuan, et al. Research on broadband MIMO power line communications model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1136-1141(in Chinese).
- [12] 李建岐, 陆阳, 高鸿坚. 基于信道认知在线可定义的电力线载波通信方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5235-5243.
Li Jianqi, LU Yang, GAO Hongjian. On (Power-) line defined power line communication solution based on channel sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5235-5243(in Chinese).
- [13] 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): 1579-1586.
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): 1579-1586(in Chinese).
- [14] 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 Electro technical Society, 2014, 29(4): 166-172(in Chinese).
- [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] WANG Ruichi, LIN Zhengyu, DU Jin, et al. Direct sequence spread spectrum-based PWM strategy for harmonic reduction and communication[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4455-4465.
- [17] LOOSE F, DUARTE R R, BARRIQUELLO C H, et al. Ripple-based visible light communication technique for switched LED drivers[C]//2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Cincinnati: IEEE, 2017: 1-6.
- [18] 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.
- [19] 肖丽萍, 韩平. 降低电力线正交频分复用系统峰均比的方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 99-103.
XIAO Liping, HAN Ping. Peak-to-average power ratio reduction scheme for orthogonal frequency division multiplexing system in power line communication channels[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 99-103(in Chinese).
- [20] 朱晓东. 宽带无线 OFDM 系统中降低峰均功率比的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
ZHU Xiaodong. Research on the peak-to-average power ratio reduction in broadband wireless OFDM systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009(in Chinese).
- [21] 徐童晖. 复杂环境下 OFDM 信号同步技术及其 FPGA 实现研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
XU Tonghui. Research on synchronization technology of OFDM signal and implementation with FPGA in complex environment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020(in Chinese).
- [22] YANG Shan'an, WU Jingshoun. A robust timing synchronization scheme in multiple antenna systems with Doppler frequency shifts[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(3): 118-120.
- [23] GUL M M U, MA Xiaoli, LEE S. Timing and frequency synchronization for OFDM downlink transmissions using Zadoff-Chu sequences[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(3): 1716-1729.
- [24] 甘华强. 多载波通信信号生成与检测关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
GAN Huaqiang. Research on the key technologies of generation and detection of multicarrier communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016(in Chinese).
- [25] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6791-6801.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801(in Chinese).
- [26] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84.

- ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84(in Chinese).
- [27] 顾云杰. 新能源发电直流微网分散对等运行控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
GU Yunjie. Distributed peer-to-peer control for renewable power generation DC microgrid [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015(in Chinese).
- [28] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 基于信息物理系统的孤岛微网实时调度的一致性协同算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1471-1480.
LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. A consensus-based collaborative algorithm for real time dispatch of island microgrid in cyber physical system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1471-1480(in Chinese).
- [29] 杨燕华, 曼苏乐. 基于通信网络的直流微网分布式协同控制[J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 34-36.
YANG Yanhua, MAN Sule. Distributed cooperative control of DC micro grids based on communication networks[J]. Electrical Automation, 2018, 40(5): 34-36(in Chinese).
- [30] 宁枫根. 基于低带宽通信的直流微网分层协调控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
NING Fenggen. Hierarchical coordination control for DC microgrid based on low-bandwidth communication [D]. Changsha: Hunan University, 2018(in Chinese).
- [31] 梁海峰, 丁锦睿, 边吉. 考虑通信延时的直流微网分组一致性控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 20-29, 39.
LIANG Haifeng, DING Jinrui, BIAN Ji. Research on control strategy of DC microgridsbased on group consensus algorithm considering communication delay[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2021, 48(2): 20-29, 39(in Chinese).
- [32] 张占强, 窦春霞, 岳东, 等. 考虑通信时延的事件触发电压分布式协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5426-5434.
ZHANG Zhanqiang, DOU Chunxia, YUE Dong, et al. Event-triggered voltage distributed cooperative control with communication delay[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5426-5434(in Chinese).
- [33] LIU Guangyuan, CALDOGNETTO T, MATTAVELLI P, et al. Suppression of second-order harmonic current for droop-controlled distributed energy resource converters in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 358-368.



张若琦

在线出版日期: 2021-03-29。

收稿日期: 2020-11-23。

作者简介:

张若琦(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子控制与网络通信技术, rockyzhangped@zju.edu.cn;

惠悦(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子控制与网络化技术, 3160105180@zju.edu.cn;

翁婉莹(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子控制与网络化技术, wyweng@zju.edu.cn;

*通信作者: 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;

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。

(责任编辑 乔宝榆)

Design Method of Converters Realizing Carrier Communications in DC Microgrids by Superimposing OFDM Signal Into Control Loop

ZHANG Ruoqi, HUI Yue, WENG Wanying, WU Jiande*, LI Wuhua, HE Xiangning

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University)

KEY WORDS: power/data dual modulation; orthogonal frequency division multiplexing(OFDM); DC microgrid; peak-to-average power ratio(PAPR)

Power electronic converters have the potential of sending message during power conversion process. There are two main types of technologies for power electronic converters to send information: power/data single-carrier modulation and power/data dual-carrier modulation.

In this paper, an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-based power/data dual-carrier modulation technique is proposed. The proposed method adopts an independent communication carrier and does not require an additional communication controller or coupling circuits, leading to low implementation costs. The signal strength can be adjusted for long transmission distance.

First, the basic principles of OFDM-based power/data dual-carrier modulation technology are introduced, as shown in Fig. 1. The power/data dual-carrier modulation is realized by superimposing the signal carrier on the power output reference. Then, the DC microgrid system is modeled, and the transfer function of the signal channel is analyzed. Furthermore, the practical issues including the communication frame format and the suppression of peak-to-average power ratio (PAPR) are discussed in detail, based on which a low PAPR design method suitable for power/data dual-carrier modulation is adopted.

Finally, a DC microgrid platform with a capacity of 2kW is built. The modulation waveforms at the

transmitting converter and filtered waveforms at the receiving converter are as shown in Fig. 2 and Fig. 3. The proposed system realizes the functions of power conversion and information transmission simultaneously. The communication between two converters at the rate of 9.6kb/s is realized, which verifies the correctness of the method.

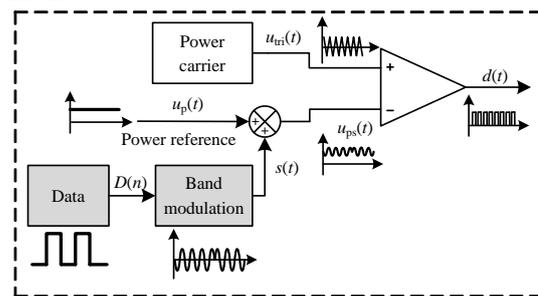


Fig. 1 Basic principle of power/signal dual-carrier modulation

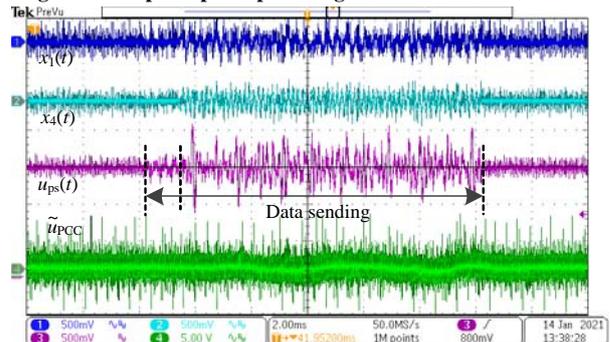


Fig. 2 Modulation waveforms at the transmitter

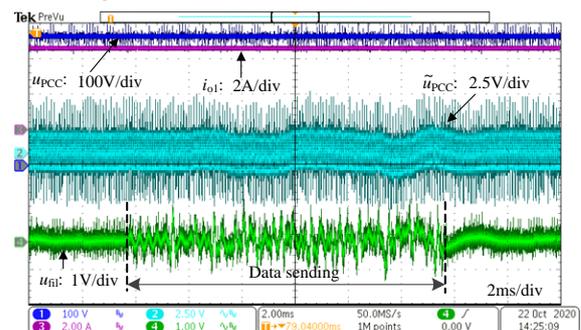


Fig. 3 Experimental waveforms of the proposed microgrid system