DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.25 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

基于电能信息一体化传输的 APF 多机并联系统及其均流方法

苏敏超[1]，邹 杰[2](中国电源学会学生会员)，王 雷[2]，郭 琴[1]，周 磊[1]
(1.安徽铜冠铜箔集团股份有限公司，合肥 230601；2.湖南大学电气与信息工程学院，长沙 410082)

摘要：由于微电网中分布式电源的间歇性、非线性负荷增减频繁等原因，导致谐波能量变化较大，采用多台并联运行的有源电力滤波器 APF(active power filter)能够对微电网谐波进行有效治理。然而，多台 APF 并联运行会因各 APF 补偿的电流不均而形成环流，从而导致系统损耗增加。为此，本文提出 1 种基于电能信息一体化传输技术的均流控制方法，通过在逆变器功率调制环节加入信息调制，实现电能变换的同时传递关键信息，完成并联系统的均流控制。相较于传统的集中式、主从式控制方法，本文提出的方法无需额外的通信设备和通信线路，可进一步提高系统的可靠性、灵活性和可扩展性。通过 RT-LAB 仿真实验验证了所提均流控制方法的可行性与有效性。

关键词：APF 多机并联系统；均流控制；电能信息同步传输；谐波治理

Multi-APF Parallel System and Current Sharing Method Based on Integrated Energy and Information Transmission

SU Minchao[1], ZOU Jie[2], *Student Member*, *CPSS*, WANG Lei[2], GUO Qin[1], ZHOU Lei[1]
(1. Anhui Tongguan Copper Foil Group Co., Ltd., Hefei 230601, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Due to the intermittency of distributed generations and frequent fluctuations in non-linear loads in microgrids, significant changes in harmonic energy will occur. Although multiple parallel active power filters (APFs) can be used to effectively mitigate harmonics in microgrids, the parallel operation will result in circulating currents due to uneven compensation currents among the APFs, leading to increased system losses. To address this issue, a current-sharing control method based on the integrated transmission technology for electric energy information is proposed. With the incorporation of information modulation at the power modulation stage of an inverter, the transmission of key information is realized while the converting the electric energy, thereby enabling current-sharing control of the parallel system. Compared with the traditional centralized and master-slave control methods, the proposed method eliminates the need for additional communication equipment and lines, enhancing the system's reliability, flexibility and scalability. The results of a simulation experiment based on RT-LAB validate the feasibility and effectiveness of the proposed current-sharing control method.

Keywords: Multi-active power filter (APF) parallel system; current-sharing control; simultaneous transmission of electric energy information; harmonic control

收稿日期：2024-08-07；**修回日期**：2024-10-18，2014-10-29；
录用日期：2024-11-07；**网络首发日期**：2014-12-05
基金项目：湖南省科技厅杰出青年基金资助项目(2022JJ10013)
This work is supported by Department of Science and Technology of Hunan under the grant 2022JJ10013

由于微电网中分布式电源的间歇性、非线性负荷增减频繁等原因，导致谐波能量变化较大，传统单个有源电力滤波器 APF(active power filter)已不能满足微电网谐波治理要求，因此，采用多台 APF 并联运行是一种切实可行的方案[1]。该方案可根据

用户需求灵活配置谐波电流补偿容量，具有良好的扩展性。同时，多台 APF 并联运行也易于实现冗余控制，维护方便，可靠性较高。然而，该方案需要对各 APF 进行均流控制。否则，因各 APF 补偿电流不均而产生的环流将导致系统损耗增加[2]。此外，部分 APF 在满载状态下长期运行也会加速老化，降低系统的整体可靠性。

近年来，APF 多机并联系统采用的控制策略大多是集中控制补偿模式，即由主控制器统一处理均流限流系数的计算、故障判断与切除等任务[3-5]。然而，一旦主控制器故障，整套装置将无法使用，系统可靠性较低。主从控制、分布式控制虽然克服了集中控制的缺点，但也依赖实时通信实现各个模块之间的协调控制，因此通信故障对于系统的影响较大[6-7]。此外，这些控制策略均需要部署额外的通信设备和线路，导致控制复杂化，不便于扩展和维护。在分散控制中，各模块之间无通信线路连接，有的通过下垂控制来实现并联运行[8-11]。文献[9]提出了 1 种改进的下垂控制方法，通过建立谐波电流基准与 APF 输出电流幅值之间的下垂关系，使得每台 APF 按照各自额定容量的比值输出对应的谐波补偿电流。然而，下垂控制方法存在固有缺陷：当下垂系数较大会导致系统外部特性的软化，降低系统稳定性；而下垂系数较小则会导致系统稳态误差增大，降低补偿精度[3]。因此，亟需 1 种新的控制方式，在无需通信设备和线路情况下实现精确、稳定的谐波补偿控制。

与此同时，不断有学者尝试将电力电子与信息传输交叉融合，在不额外增加硬件的条件下，利用电力电子变换器电能调制过程中的离散特性，实现电能信息一体化传输[12-13]。文献[14]探索了直流变换器装置的数据发送方法，并无需增加任何电路或器件；文献[15]重点探索了交流变换器装置的数据调制策略。电能信息一体化传输技术深度集成了电力电子与信息技术，可实现电能流与信息流的融合以及信息实时采集和控制策略实时部署，完全满足 APF 多机并联系统的通信和均流控制的需求。

本文针对单相 APF 多机并联系统，提出了 1 种基于电能信息一体化传输的均流控制方法。首先，介绍了基于电能信息一体化传输的 APF 多机并联系统的拓扑结构与工作原理，给出了基于直接序列扩频-差分相位键控 DSSS-DPSK(direct sequence spread spectrum-differential phase shift keying)的信息调制和信息解调的方法；接着，针对并联系统提出了基于电能信息一体化传输的均流控制策略。最后，通过 RT-LAB 实验验证了所提 APF 并联系统及其控制策略的有效性。

1 APF 多机并联系统拓扑与工作原理

APF 多机并联系统的电路结构如图 1 所示，共由 $N(N\geqslant 1)$台 APF 组成。其中：u_{s}为电网电压，i_{s}为电网电流，L_{s}为电网等效电感；负载由阻感负载和非线性负载构成，R_{l}为阻感负载的电阻，L_{l}为电感，非线性负载为单相二极管整流电路；$L_{\mathrm{out}n}$为第 $n(1\leqslant n\leqslant N)$台 APF 的输出滤波电感，$C_{\mathrm{dc}n}$ 为第 n 台 APF 的直流侧支撑电容，$V_{\mathrm{dc}n}$为第 n 台 APF 的直流侧支撑电压，每台 APF 都通过电压传感器采集网侧电压 V_{G}，通过电流传感器采集并网点近负载侧电流 $i_{\mathrm{L}n}$ 和逆变器输出电流 $i_{\mathrm{c}n}$。每台 APF 都有相同的控制单元，由补偿控制模块、信号发生模块、信号采集解调模块组成。

1.1 补偿控制模块

补偿控制模块主要实现指令电流计算和电流跟踪控制。单相谐波检测方法参考文献[16]，其原理如图 2 所示。图 2 中：$i'_{\mathrm{L}n}$ 由近侧负载电流 $i_{\mathrm{L}n}$乘以补偿系数 $K_{\mathrm{d}n}(K_{\mathrm{d}n}\leqslant 1)$得到；$V^{*}_{\mathrm{dc}n}$ 为直流侧参考电压，与实际电压 $V_{\mathrm{dc}n}$ 的偏差通过 PI 控制器输入到 i_{p} 通道，使得逆变器输出或吸收功率中包含基波有功分量，从而维持直流侧电容电压的稳定；经过计算得到指令电流参考信号 $i^{*}_{\mathrm{c}n}$。为实现电流跟踪控制，将计算得到的指令电流信号 $i^{*}_{\mathrm{c}n}$ 与实际输出的电流信号 $i_{\mathrm{c}n}$ 的偏差通过 PI+重复控制器，在 APF 的额定补偿频率范围内(50 次谐波内)实现精确的全谐波补偿[17]。此外，再加入电网电压前馈环节以加快控制的响应速度，最终得到功率调制波。

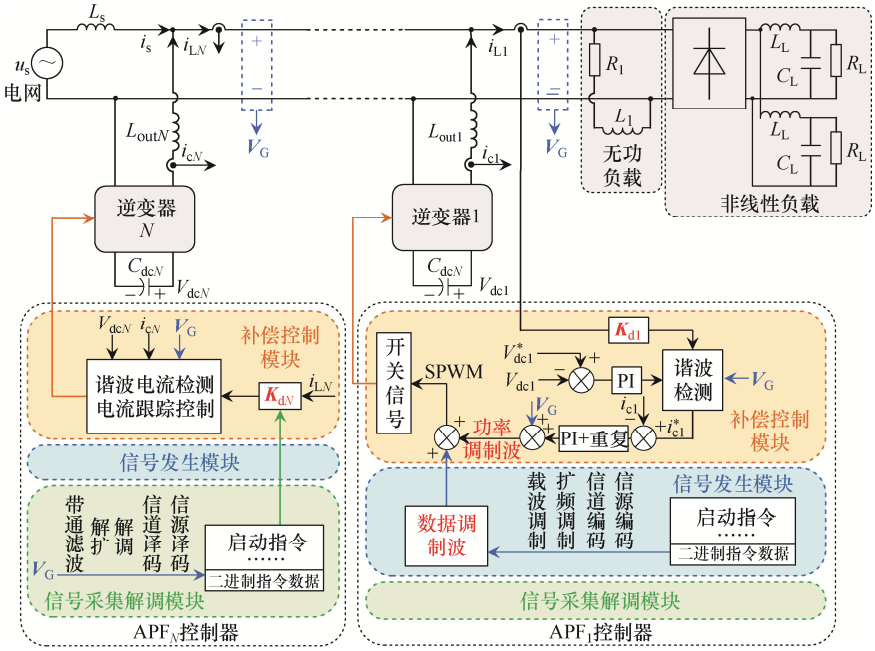


图 1　APF 多机并联系统拓扑

Fig. 1 Topology of multi-APF parallel system

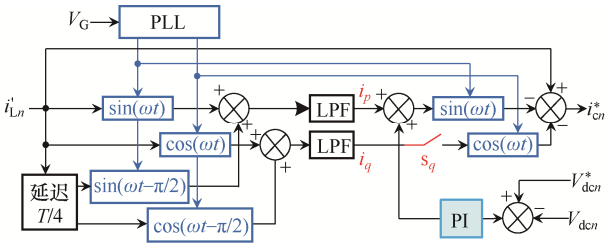


图 2　单相谐波电流检测方法的原理

Fig. 2 Schematic of single-phase harmonic current detection method

同时，补偿控制模块可以采用电能信息一体化调制技术，即将信号发生模块生成的数据调制波与功率调制波叠加，通过正弦脉宽调制法 SPWM (sinusoidal pulse width modulation)得到开关驱动信号，从而实现功率与数据的复合传输。此外，补偿控制模块还可以根据信号采集解调模块得到的指令信息调整补偿系数，实现所需的控制策略。

1.2　信号发生模块

信号发生模块将需要传递的指令信息调制成数据调制波，为此需要确定合适的数据载波频率。一般而言，APF 补偿谐波的频率范围是 50 次谐波以内，即 50 Hz~2 500 Hz，因此，数据载波频率应大于该补偿频率范围以减小电能传输对信息传输的干扰。而且为了使数据载波经过逆变器输出后畸变较小，数据载波的频率需要远小于开关频率，一般为开关频率的 1/5 以内[12]。同时，APF 为实现精度较高、带宽较大的补偿电流输出，开关频率应为补偿谐波频率的 10 倍以上。然而，开关频率过高也会导致器件损耗增加，设备散热压力加大，APF 补偿容量减小。因此，选择逆变器开关频率为 25 kHz，数据载波频率为 5 kHz。

由于信息传输与电能传输共用电力线通道，因此通信不可避免地受到较强的突发噪声干扰。为有效抵抗信道噪声对通信的干扰，本文选用基于 DSSS-DPSK 的数据调制方式[18]，其调制流程如图 3(a)所示。

首先对指令信息进行信源编码，规定指令信息由 2 部分组成，且每台并入的 APF 有唯一的 8 位二进制地址。前一部分为地址信息，为“发送地址”+“目的地址”。后一部分信息可以为启动指令、切除指令、补偿系数信息、近负载侧谐波电流有效值信息、问询信息，按照如下规则转换为二进制序列：启动指令为“000”；切除指令为“001”；补偿系数 K_{dn} (0<1/K_{dn}<255，K_{dn} 为整数)的倒数转换为 8 位二进制序列，则补偿系数信息为“010”+8 位二进制序列；通过近负载侧电流 i_{Ln} 计算谐波电流有效值，并取整转换为 16 位二进制序列，则近负载侧

谐波电流有效值信息为“011”+16 位二进制序列；问询信息为“111”。

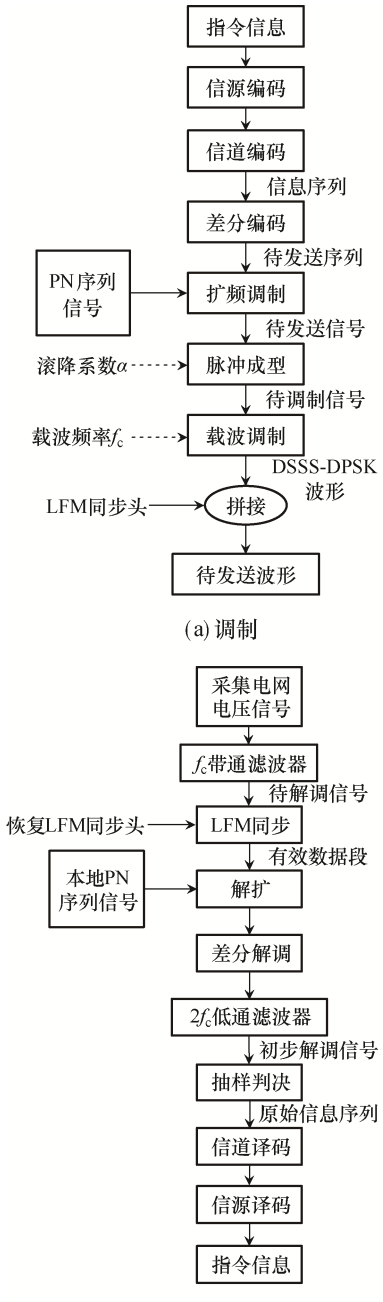


图 3 基于 DSSS-DPSK 的数据调制/解调流程

Fig. 3 Data modulation/demodulation process based on DSSS-DPSK

然后对信息序列进行卷积信道编码，得到编码后二进制序列$\{a_i\}$,$1 \leqslant i \leqslant N_1$，其中 N_1 为信息序列长度。再对$\{a_i\}$进行差分编码得到待发送序列$\{d_i\}$接着，将$\{d_i\}$序列转化为信息速率为 R_b 的双极性基带信号 $d(t)$并对 $d(t)$进行扩频调制，可以得到待发送信号 $b(t)$，即

$$b(t) = d(t) \cdot c(t) \tag{1}$$

式中：$c(t)$为信息速率为 R_c 的 m 序列信号发生器产生的信号，可表示为

$$c(t) = \sum_{i=1}^{kN_1} c_i p[t-(i-1)T_c] \tag{2}$$

式中：$\{c_i\}$为取值是±1 的 6 阶 m 序列，其特征多项式为 x^6+x+1；$p(t)$为幅度是 1，宽度 $T_c=1/R_c$ 的矩形脉冲。

设置滚降系数 α=0.7，可以生成升余弦滚降滤波器的冲激响应 $h(t)$为

$$h(t) = \frac{\sin(\pi t/T_c)}{\pi t/T_c} \cdot \frac{\cos(\alpha \pi t/T_c)}{1-4\alpha^2 t^2/T_c^2} \tag{3}$$

将 $b(t)$通过升余弦滚降滤波器进行脉冲整型，可以得到$b'(t)$ 为

$$b'(t) = b(t) * h(t) \tag{4}$$

然后进行载波调制，生成 DSSS-DPSK 波形 $s(t)$为

$$s(t) = b'(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) \tag{5}$$

式中：f_c 为载波频率。

最后，在待发送信号 $s(t)$前插入一段特定时长 T_{LFM}=0.1 s 的线性调频波 $s_{LFM}(t)$，即

$$s_{LFM}(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi \Delta f t^2) \qquad t \in [0, T_{LFM}] \tag{6}$$

式中：f_0 为线性调频波的起始频率；Δf 为线性调频波的调频频率。得到发送数据调制波 $s'(t)$ 为

$$s'(t) = [s_{LFM}(t), s(t)] \tag{7}$$

根据 1.2 节分析，调频波频率范围也应和数据载波频率范围相同，即 2.5 kHz~5.0 kHz，故 f_0 可以设置为 4 kHz，Δf 为 1 kHz。

1.3 信号采集解调模块

接收端 APF 为了获得传递的信息，其信号采集解调模块采用基于 DSSS-DPSK 数据解调方法，将采集的电网电压信号 V_G 进行滤波、解扩、解调，还原为相应的指令信息，流程如图 3(b)所示。

首先，采集的电网电压信号 V_G 通过带通滤波器滤除信号频带外的噪声干扰，得到待解调的信号 $r(t)$。然后，结合 LFM 同步头的长度 T_{LFM} 以及

空白窗口的长度 T_{blank}，可得到 DSSS-DPSK 波形的起始位置 τ_0 为

$$\tau_0 = \tau_{\max} + T_{\text{LFM}} + 2T_{\text{blank}} \tag{8}$$

式中，$\tau_{\max}$ 为使得线性调频信号 $s_{\text{LFM}}(t)$与接收信号相关运算取最大相关值时的自变量。于是，可以从 $r(t)$的 τ_0 处开始截取有效数据段 $r_{\text{m}}(t)$。

之后，将 $r_{\text{m}}(t)$与数据调制时使用的相同的本地 m 序列信号 $c(t)$相乘，从而得到解扩后的数据信号 $r'(t)$ 为

$$r'(t) = r_{\text{m}}(t) \cdot c(t) \tag{9}$$

接下来对 $r'(t)$ 进行差分解调，即将 $r'(t)$ 延迟一个基带信号周期 T_{b}，再与 $r'(t)$ 相乘

$$r'(t) \cdot r'(t+T_{\text{b}}) = \sum_{i=1}^{N_1} a_i' g_{\text{T}}[t-(i-1)T_{\text{b}}]\left(\frac{1}{2}\cos(2\pi) \cdot 2f_{\text{c}}t + \frac{1}{2}\right) \tag{10}$$

式中：$a_i' = 2a_i - 1$，$a_0' = 0$。将上述输出结果通过一个截止频率位于 f_{c} 和 $2f_{\text{c}}$ 之间的低通滤波器，滤除 2 倍频信号分量即可得到初步解调信号。

由于低通滤波器并非理想滤波器，所以需要对滤波器的输出信号做抽样判决，将大于 0 的采样点判定为“0”，小于 0 的采样点判定为“1”，得到原始信息序列。然后，再对原始信息序列进行卷积信道译码得到接收比特。最后，根据信息调制流程中的规则，对接收比特进行译码，其中，前 16 位接收比特译为地址信息，后部分接收比特可以译为对应的启动指令、切除指令、补偿系数信息、近负载侧电流有效值信息、问询信息。

2　基于电能信息一体化传输的均流控制策略

对于 APF 多机并联系统，会因各 APF 补偿的电流不均而形成环流，从而导致系统损耗增加，甚至可能导致部分 APF 单元损坏，系统可靠性下降。针对这一问题，本文提出了基于电能信息一体化传输的均流控制策略，如图 4 所示。

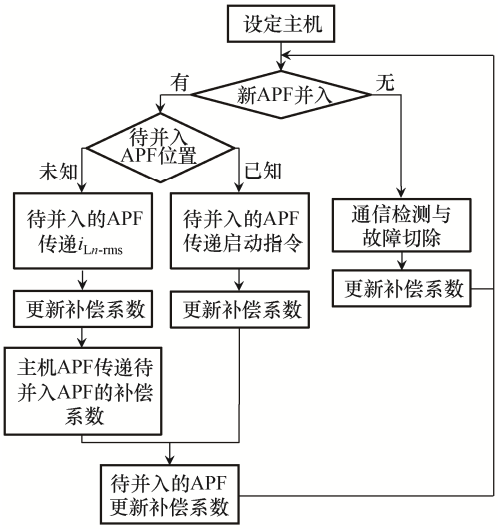


图 4　APF 多机并联系统均流控制策略

Fig. 4 Current-sharing control strategy for multi-APF parallel system

首先，设定 1 台 APF 作为主机：当多台 APF 同时启动时，靠近负载侧的为主机，否则先启动的为主机。选定主机的目的是为了更好地进行信息传递和更新补偿系数，主机、从机本身无任何不同。

然后，主机监测是否有新 APF 传递启动指令信息，以此判断是否有新 APF 并入。

若有新机需要并入，设新机为 APF_x($1 \leqslant x \leqslant N+1$)。当 APF_x 相对位置已知（接入点在 APF_n 与 APF_{n-1} 的中间时，$x=n$，$1 \leqslant n \leqslant N$；接入点在 APF_N 左侧时，$x=N+1$），则实现方法如下。

(1)待并入的 APF 传递启动指令。

(2)各已接入的 APF 更新补偿系数。各已接入的 APF 根据接收到的启动指令和已知的相对位置信息，当 $x=n$ 时，APF_n、APF_{n+1}、…、APF_N 更新为 APF_{n+1}、APF_{n+2}、…、APF_{N+1}，即可计算出第 m 台 APF 的补偿系数为

$$K_{\text{d}m} = \frac{1}{N+2-m} \qquad 1 \leqslant m \leqslant N+1 \tag{11}$$

(3)待并入的 APF 更新补偿系数。APF_x 根据 $K_{\text{d}x}=1/(N+2-x)$更新补偿系数。

当 APF_x 相对位置未知，实现方法如下。

(1)待并入的 APF 传递近侧负载电流谐波有效值。APF_x 检测近负载电流 $i_{\text{L}x}$，计算出谐波电流有效值 $i_{\text{L}x\text{-rms}}$，将此数据信息进行调制发送。

(2)传递待并入 APF 的补偿系数。各已接入的 APF 接收到 $i_{Lx\text{-rms}}$ 数值信息，与本地检测到的谐波电流有效值进行比较，由此获得 APF_x 的相对位置。以 APF_n 接收到 $i_{Lx\text{-rms}}$ 为例，设本地检测到的谐波电流有效值为 $i_{Ln\text{-rms}}$。当 $i_{Ln\text{-rms}}<i_{Lx\text{-rms}}$ 时，APF_n 更新为 APF_{n+1}；当 $i_{Ln\text{-rms}}=i_{Lx\text{-rms}}$ 时，可以获知 APF_x 在 APF_n 与 APF_{n-1} 的中间，此时 $x=n$，APF_n 根据 $K_{dx}=1/(N+2-x)$ 计算出补偿系数，并调制发送给 APF_x，然后 APF_n 更新为 APF_{n+1}。特别地。若 $i_{Ln\text{-rms}}>i_{Lx\text{-rms}}$，则 APF_x 在 APF_N 左侧，此时 $x=N+1$，APF_N 计算出补偿系数 $K_{dx}=1$，并调制发送给 APF_x。

(3)各已接入的 APF 更新补偿系数。利用式(11)即可计算出各台 APF 的补偿系数。

(4)待并入的 APF 根据接收到的补偿系数信息进行更新。

若无新机需要并入，则通过主机、从机之间的通信来判断故障。主机每隔 1 h 通信依次询问各从机，若连续 3 次间隔 1 s 的询问无应答，则判定该 APF 故障，由此传递切除指令切除该 APF；若从机 APF 在 1 h 内未接收到主机的询问，则判定主机故障，由此传递切除指令切除主机，并选定靠近负载侧的为新主机。其他的 APF 根据切除指令，更新当前的相对位置信息，如切除 APF_n，则将 APF_{n+1}、APF_{n+2}、…、APF_N 更新为 APF_n、APF_{n+1}、…、APF_{N-1}，再计算出各自的补偿系数 K_{dq}，即

$$K_{dq}=\frac{1}{N-q} \qquad 1\leqslant q\leqslant N-1 \tag{12}$$

3 RT-LAB 实验验证

为进一步验证所提方法的有效性，本文在 RT-LAB 平台(OP5600, Opal-RT)上进行硬件在环 HiL(hardware-in-the-loop)实验。HiL 实验系统如图 5 所示，由上位机、RT-Lab 目标机、DSP 控制器及以太网交换机组成。其中上位机通过 Simulink 搭建如图 1 所示的主电路，以 3 台规格参数完全相同的 APF 为例(N=3)，具体实验参数见表 1。

在未投入 APF 时，网侧电流谐波含量高达 45.19%，主要包含幅值为 90 A 的 3 次谐波，如图 6 所示。APF_1 开始投入运行，由于其容量限制，只能补偿一定比例的总负载谐波、无功电流。因此，再增加 2 台 APF 进行扩容补偿。若 APF_1、APF_2 接入位置已知，下面对接入的第 3 台 APF_x 按照接入位置已知和未知的情况分别进行分析。

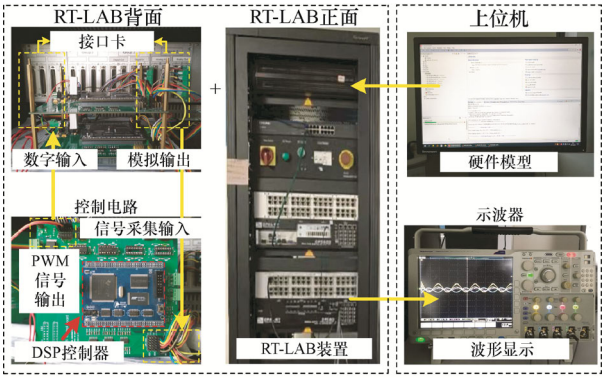


图 5 RT-LAB 实验平台

Fig. 5 Experimental setup of RT-LAB platform

表 1 APF 多机并联系统的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the multi-APF parallel system

参数	数值
电网电压 u_s/V	220
等效电感 L_s/mH	0.03
无功负载电阻 R_1/Ω	2
无功负载电感 L_1/mH	15
非线性负载电阻 R_L/Ω	5
非线性负载电感 L_L/mH	2
非线性负载电容 C_L/μF	700
APF 直流侧电容 C_{dcn}/μF	4 000
APF 直流侧电压 V_{dcn}/V	400
APF 输出电感 L_{outn}/mH	2
数据载波频率 f_c/kHz	5
信息传输速率 R_b/bps	100
扩频信号传输速率 R_c/bps	5 000

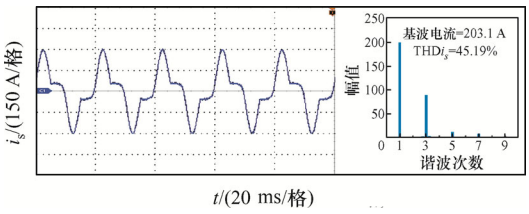


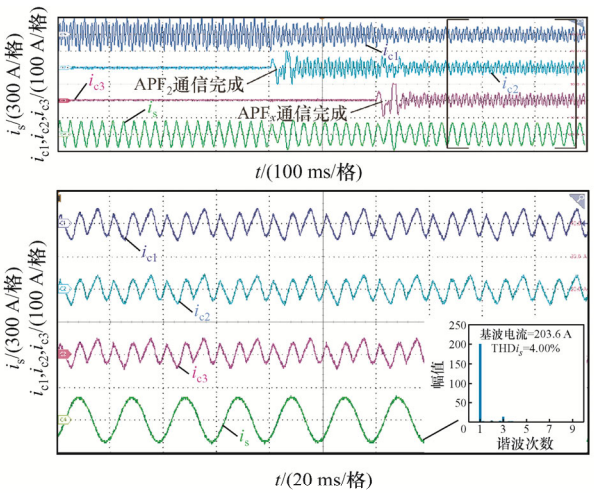
图 6 补偿前的网侧电流波形

Fig. 6 Grid-side current waveform before compensation

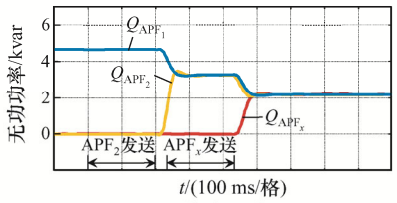
3.1 APF_x 接入位置已知

APF_x 接入点在 APF_2 的左侧，则 x=3。APF_3 并入后传递启动指令，各台 APF 接收到消息后调

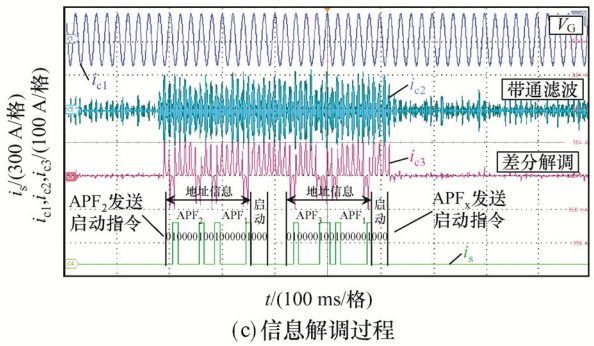
整补偿系数，使得 K_{d1}=1/3、K_{d2}=1/2、K_{d3}=1，此时，各台 APF 输出的补偿电流波形完全一致，输出的无功功率相同(基波无功功率由实验记录的补偿电流、网侧电压数据计算得出)。图7(b)为提取电网电压 V_G 波形进行信息解调的过程，APF_2 首先向 APF_1 发送启动指令，实现 APF_1、APF_2 的均分补偿，接着 APF_3 再向 APF_1 发送启动指令，最终实现 3 台 APF 的均分补偿，电网电流 THD 下降到 4.00%。



(a) 网测电流、补偿电流



(b) 基波无功



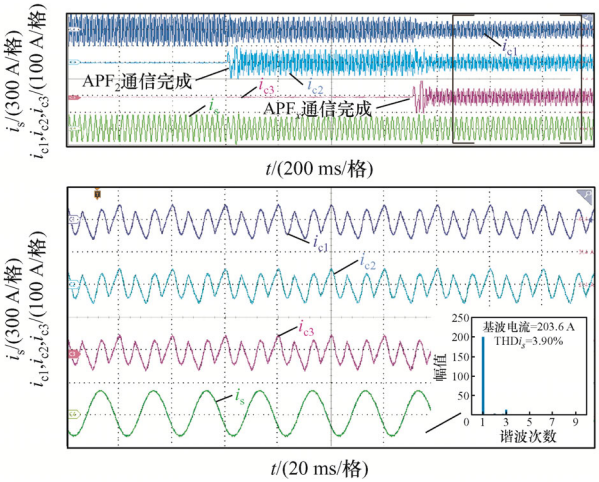
(c) 信息解调过程

图 7　APF$_x$ 位置已知时的波形

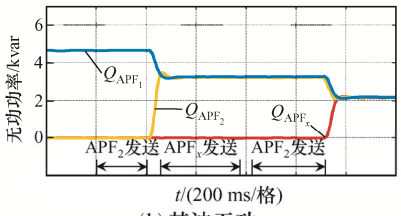
Fig. 7 Waveforms when the APF$_x$ position is known

3.2 APF$_x$ 接入位置未知

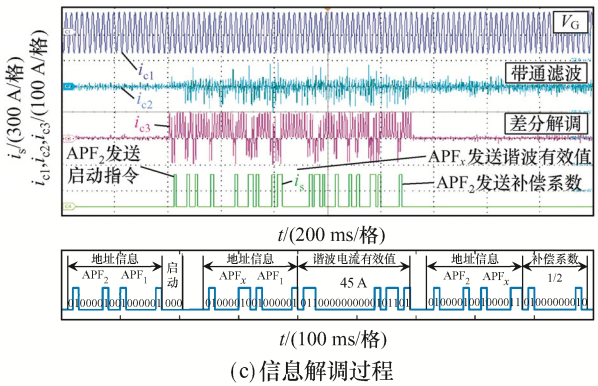
假定 APF_x 接入点在 APF_2 与 APF_1 之间。当 APF_x 并入后，传递检测到的谐波电流有效值信息：$i_{Lx\text{-}rms}$=45 A(16 位二进制：0000 0000 0010 1101)。APF_2 本地检测到 $i_{L2\text{-}rms}$=45 A=$i_{Lx\text{-}rms}$，由此获知 APF_x 在 APF_2 和 APF_1 之间，然后 APF_2 向 APF_x 传递补偿系数信息：$1/K_{d2}$=2(8 位二进制：0000 0010)，之后 APF_2 更新为 APF_3，补偿系数更新为 K_{d3}=1/(2+2−3)=1；APF_1 本地检测到 $i_{L1\text{-}rms}$=90 A>$i_{Lx\text{-}rms}$，补偿系数更新为 K_{d1}=1/(2+2−1)=1/3；APF_x 接收到补偿系数信息，APF_x 更新为 APF_2，补偿系数更新为 K_{d2}=1/(2+2−2)=1/2，最后 3 台 APF 实现了均分控制补偿，电网电流总谐波失真 THD(total harmonic distortion)下降到 3.90%，如图 8 所示。相较于 APF_x 接入位置已知的情况，接入位置未知时，APF_x 需要通过与其他 APF 进行通信交流来获取自身接入



(a) 网测电流、补偿电流



(b) 基波无功



(c) 信息解调过程

图 8　APF$_x$ 位置未知时的波形

Fig. 8 Waveforms when the APF$_x$ position is unknown

位置，因此，实现 3 台 APF 均分控制的耗时更长。

3.3 APF 运行故障

以 APF_2 故障为例，APF_1、APF_3 仍然维持正常运行，各 APF 输出补偿电流波形如图 9 所示，此时仍有 K_{d1}=1/3，K_{d3}=1，故 APF_1 补偿总负载谐波无功电流的 1/3，APF_2 补偿总谐波无功电流的 2/3。APF_1 经过 3 次间隔 1 s 的问询后，APF_2 仍无法应答，遂发送切除指令，切除 APF_2 运行；然后，APF_3 更新为 APF_2，按式(12)更新补偿系数 K_{d2}=1/(3−2)=1；APF_1 按式(12)更新补偿系数 K_{d1}=1/(3−1)=1/2。最后，2 台正常的 APF 再次实现均流控制。

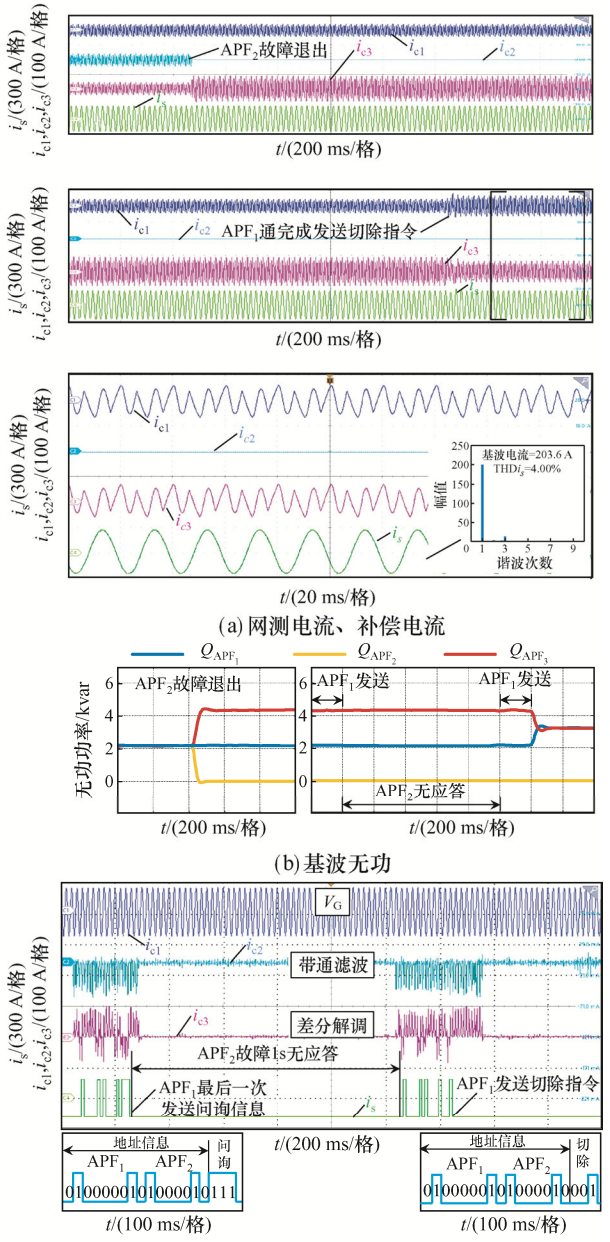


图 9 APF_2 故障时的波形

Fig. 9 Waveforms during APF_2 fault

3.4 与传统控制策略对比

不同控制策略下的实验波形如图 10 所示。其

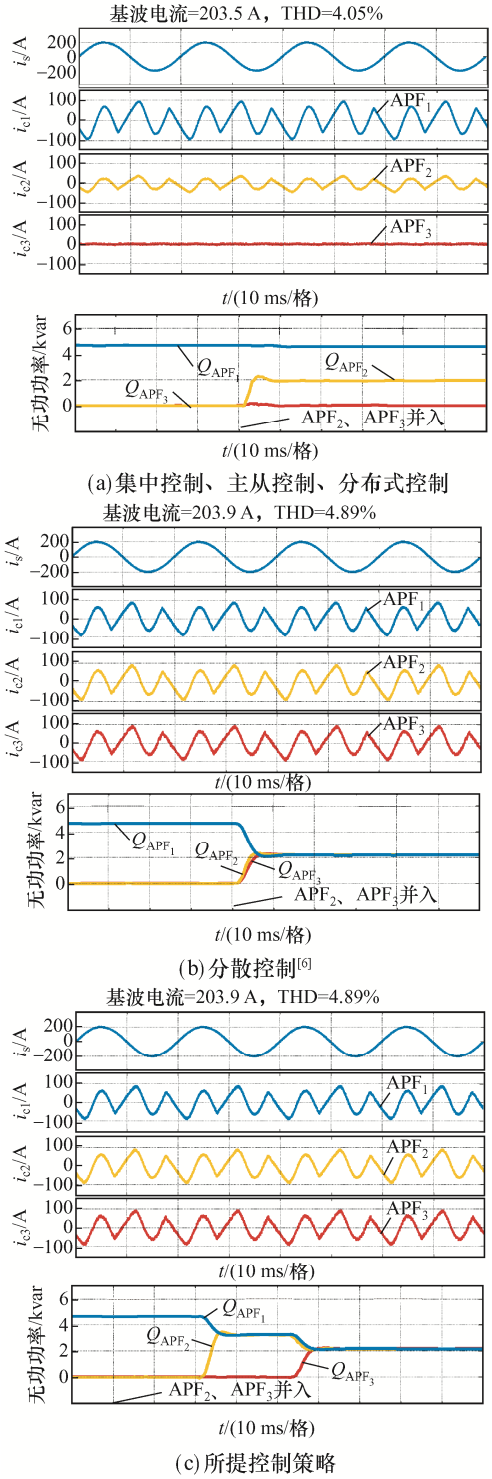


图 10 不同控制策略的实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of different control strategies

中，集中控制、主从控制、分布式控制在 APF 并入时，即可进行通信实现均分控制，具备较高的补偿精度和响应速度，但对通信质量要求较高，一旦通信故障将无法实现控制。采用文献[8]的分散控制策略，由于各台 APF 之间无通信交流，每台 APF 只可就近补偿前一台 APF 补偿后剩余的负载谐波无功电流，故越靠近负载的 APF 输出的补偿电流越大，同时该 APF 老化损坏也越快。采用本文所提　控制策略补偿后的网侧电流 THD=4.00%，可见系统能够实现较高的补偿精度，且通信可靠性较高，只要逆变器正常工作，通信即可正常进行，虽然响应速度较慢，每台 APF 从并入到实现均流控制有约 0.2 s 的通信延迟，但如此短时间内各台 APF 输出不均，不会对系统可靠性产生较大影响。

3.5 通信传输的性能和对电能传输的影响

图 11 为 APF 通信前后的电网电流、补偿电流波形，可以看出，APF 在通信传输时，由于在补偿指令信号上叠加了经过 DSSS-DPSK 调制后的数据调制波，相较于无通信传输时，输出的补偿电流在 5 kHz 范围附近有更高幅值的谐波，这些谐波注入电网，使得电网电流 i_s 在通信时谐波畸变率由 3.90%增加到 4.64%。

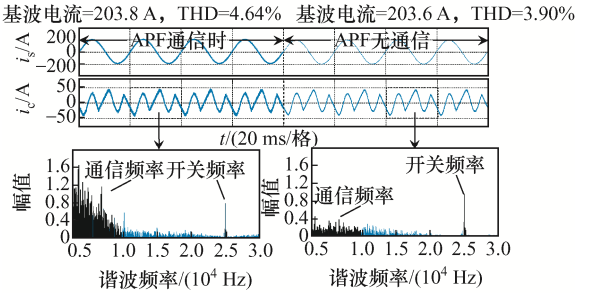


图 11　APF 通信前后的电网电流、补偿电流波形

Fig. 11 Current and compensation current waveforms before and after APF communication

实际电力系统中会有很多噪声干扰，比如典型的非线性负载产生的 6k±1、12k±1 次谐波，电力电子设备产生的高频噪声等，会对 5 kHz 的通信信号造成干扰，此时为了保证通信效果，将会提高电能信息一体化调制中的数据调制波的幅值占比，通过该方式来增加通信信号的强度，从而提高系统的信噪比。而在干扰较小的环境中，数据调制波的幅值占比较小，叠加在输出电流上的通信纹波信号强度，仅需维持在逆变器开关噪声频率的水平，因而对电能质量影响相对较小。

设信息调制比 S_g =信息调制波幅值/功率调制波幅值，在 3 台 APF 多机并联系统中，APF_3 向 APF_1 传递 1 000 bits 数据信息，以评估系统的通信性能，如表 2 所示。随着 S_g 增加，通信可靠性增加，但是也会影响 APF 的输出补偿电流，导致过多的高频谐波注入电网，引起电能质量下降。

表 2　系统通信性能测试

Tab. 2 System communication performance testing

S_g	电网电流 THD/%	误码率
2.0	24.25	0.000
1.5	4.98	0.000
1.0	4.00	0.000
0.8	3.80	0.001
0.6	3.50	0.010
0.4	3.48	0.050
0.2	3.48	0.400

4　结论

本文提出了 1 种基于电能信息一体化传输的 APF 多机并联系统及其均流控制方法。利用电能信息一体化调制技术，APF 并联系统仅依赖电力线传输通道，即可在有效补偿负载谐波的同时实现数据传输。为了保证通信的可靠性，选择了合适的数据载波频率，并采用基于 DSSS-DPSK 数据调制/解调方法，抵抗电力线通道噪声对通信的干扰。通过在 APF 之间传递补偿系数等简单的指令信息，当有新的 APF 并入或 APF 故障时，可以实现多机并联系统的均流控制，验证了本文所提均流控制策略的有效性。RT-LAB 实验结果表明，数据传输过程对电网电能质量无显著影响，进一步验证了 APF 多机并联系统电能与信息同步传输的可行性和有效性。本文的贡献总结如下。

(1)与传统的集中控制、主从控制、分布式控制相比，基于电能信息一体化的传输方法无需额外

布设通信设备和线路，仅依靠电力线即可实现通信传输，从而降低了系统的复杂性，提高了系统的扩展性和维护便捷性。

(2)与分散控制或下垂控制相比，本文所提控制策略避免了稳定性和精度相互矛盾的缺点，能够利用简单的通信信息实现精确、稳定的均分补偿，减小环流损耗，使各台 APF 输出均匀，从而提高了系统的可靠性。

(3)从APF的补偿范围出发，本文提出了适用于APF 电能信息一体化传输的通信频率选择方法和数据调制解调方法，有效降低了APF补偿电流和电力线噪声对通信的干扰，从而提升了系统通信的可靠性。

(4)本文所提均流控制策略，在新 APF 并入位置未知或 APF 故障的情况下，能够协调各台 APF 实现均流控制。

参考文献：

[1] 付勉, 刘志涵, 宋振浩, 等. 配电网络电能质量综合治理设备优化配置策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 336-344.
Fu Mian, Liu Zhihan, Song Zhenhao, et al. Optimal allocation strategy for comprehensive control equipment of power quality in distribution area [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 336-344. (in Chinese)

[2] 孙宁. 模块化 APF 多机并联拓扑及环流问题研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
Sun Ning. Study on the topology and circulating current of multi-module APF parallel [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)

[3] Wu Zhaokang, Xu Guoqing, Zhu Wei, et al. The stability analysis and control strategies of multiparalleled SAPFs: A comprehensive overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 7444-7457.

[4] Liu Kangli, Cao Wu, Zhao Jianfeng. Dual-loop-based harmonic current control strategy and admittance modeling for a multimodular parallel SAPFs system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5456-5466.

[5] 李惠庸，张宏，张海平，等. 基于 LCL 滤波器优化的微电网多逆变器稳定运行控制系统[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 83-90.
Li Huiyong, Zhang Hong, Zhang Haiping, et al. Control system for stable operation of multiple inverters in microgrid based on optimization of LCL filter [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 83-90. (in Chinese)

[6] Xi Ziqiang, Xiao Zhenren, Li Kaicheng. Design of master-slave active power filter control system based on concerto FPGA [C]// 2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. Hangzhou, China, 2013: 470-473.

[7] Mortezaei A, Simões M, Savaghebi M, et al. Cooperative control of multi-master-slave islanded microgrid with power quality enhancement based on conservative power theory [C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, IL, USA, 2017: 1.

[8] Leng Siyu, Chung I Y, Cartes D A. Distributed operation of multiple shunt active power filters considering power quality improvement capacity [C]// The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China, 2010: 543-548.

[9] Vaidya T G, Chatterjee K. A decentralized control scheme for multimodular shunt active harmonic filters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1081-1090.

[10] Cheng P T, Lee T L. Distributed active filter systems (DAFSs): A new approach to power system harmonics [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1301-1309.

[11] Lee T L, Cheng Potai, Akagi H, et al. A dynamic tuning method for distributed active filter systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(2): 612-623.

[12] 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, (5): 9.
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, (5): 9. (in Chinese)

[13] 孙跃，马皓，赵雷. 无线电能传输技术及应用专辑主编述评[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 1-6.

Sun Yue, Ma Hao, Zhao Lei. Editorial for the special issue on wireless power transfer technology and its applications [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 1-6. (in Chinese)

[14] 李凌宇, 刘科明, 赵科科, 等. 一种在 LLC 谐振变换器的输出端实现数据调制的方法及系统: CN113098290A[P]. 2021-07-09.

Li Lingyu, Liu Keming, Zhao Keke, et al. A method and system for data modulation at the output of an LLC resonant converter: CN113098290A [P]. 2021-07-09. (in Chinese)

[15] 赵科科, 吴建德, 张若琦, 等. 共用逆变电路实现 DC/AC 功率变换和电力线载波通信的方法: CN110474361B[P]. 2020-11-17.

Zhao Keke, Wu Jiande, Zhang Ruoqi, et al. A method of achieving DC/AC power conversion and power line carrier communication using a shared inverter circuit: CN110474361B [P]. 2020-11-17. (in Chinese)

[16] 侯鹏飞, 杨跃文, 徐海东. 一种单相系统参考电流检测改进算法[J]. 电工技术, 2022(5): 45-47, 53.

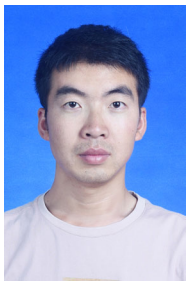
Hou Pengfei, Yang Yuewen, Xu Haidong. An improved algorithm for reference current detection in single-phase system [J]. Electric Engineering, 2022(5): 45-47, 53. (in Chinese)

[17] 边庆超, 胡铭, 杨沛豪. 基于 PI+自适应内模重复控制的并网逆变器系统研究[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 97-106.

Bian Qingchao, Hu Ming, Yang Peihao. Research on grid-connected inverter system based on PI and repetitive control of adaptive internal mode [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 97-106. (in Chinese)

[18] 曹旺斌, 康辉, 谢志远, 等. MIMO-PLC 直接序列扩频系统编码方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(zk): 121-129.

Cao Wangbin, Kang Hui, Xie Zhiyuan, et al. Research on coding method of MIMO-PLC direct sequence spread spectrum system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(zk): 121-129. (in Chinese)



苏敏超

作者简介：

苏敏超(1991—)，男，本科。研究方向：电能质量控制。E-mail：tuxq@tlys.cn。

邹杰(2000—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，博士研究生。研究方向：电能质量控制，电能信息同步传输技术。E-mail：clovinzj@hnu.edu.cn。

王雷(1988—)，男，博士，教授。研究方向：电能变换，信号处理，无线电能传输。E-mail：jordanwanglei@hnu.edu.cn。

郭琴(1996—)，女，本科。研究方向：电能质量控制。E-mail：2012105059@qq.com。

周磊(1995—)，男，本科。研究方向：电能质量控制。E-mail：2811622256@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)