

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241416

# 一种改进型三相四桥臂有源电力滤波器控制策略的研究

张怡<sup>1</sup>, 张锋<sup>2</sup>, 张炜<sup>3</sup>, 裘愉涛<sup>2</sup>, 吴韬<sup>3</sup>

(1. 浙江水利水电学院, 浙江 杭州 310018; 2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310012;

3. 国网浙江省电力有限公司平湖市供电公司, 浙江 平湖 314200)

**摘要:** 随着电力电子设备在现代电力系统中的大规模普及, 电力系统谐波污染问题愈发严峻, 谐波污染源不断增多。在此背景下, 三相四桥臂有源电力滤波器(active power filter, APF)等装置在解决谐波污染、提升电能质量方面的价值日益凸显。在分析三相四桥臂 APF 数学模型的基础上, 提出 APF 变流器滑模变结构控制(fractional-order sliding mode control, FOSMC)与模糊滞环控制(fuzzy-hysteretic control, FHC)的整体方案。其中, 采用分数阶滑模控制策略以提升 APF 电流跟踪精度, n 相补偿电流采用模糊滞环控制以抑制零序分量。在此基础上提出综合控制方案, 实现 abc 相与 n 相协调控制。MATLAB/Simulink 仿真与实验结果表明, 运用相关策略后电网三相总谐波畸变率得到有效抑制, 零序电流也得到了有效抑制, 表现出良好的应用效果和工程推广性。

**关键词:** 三相四桥臂 APF; 分数阶滑模变结构控制; 模糊滞环控制

## Research on an improved control strategy for three-phase four-leg active power filters

ZHANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>3</sup>, QIU Yutao<sup>2</sup>, WU Tao<sup>3</sup>

(1. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. State Grid Zhejiang

Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. Pinghu Power Supply Company,

State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Pinghu 314200, China)

**Abstract:** As power electronic devices become increasingly prevalent in modern power systems, harmonic pollution has become increasingly severe, with a growing number of harmonic sources. In this context, devices such as three-phase four-leg active power filters (APF) have demonstrated significant value in mitigating harmonics and enhancing power quality. Based on the analysis of the mathematical model of three-phase four-leg APF, this paper presents an integrated control scheme combining fractional-order sliding mode control (FOSMC) and fuzzy-hysteretic control (FHC). Specifically, the scheme adopts FOSMC to enhance the current tracking accuracy of APF, and employs FHC for the n-phase compensation current to suppress the zero-sequence component. A comprehensive control scheme is further developed to achieve coordinated control between the abc phases and the n phase. Simulation results from MATLAB/Simulink and experimental findings indicate that the proposed strategy effectively suppress the total harmonic distortion in the three-phase grid with relevant strategies. Moreover, the zero-sequence current is effectively suppressed, demonstrating excellent performance and strong potential for engineering applications.

This work is supported by the Baima Lake Laboratory Joint Funds of the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LBMHY25F030003).

**Key words:** three-phase four-leg APF; fractional-order sliding mode control; fuzzy-hysteretic control

## 0 引言

在建设新型电力系统的背景下, 大规模电力电子设备广泛应用于电网中<sup>[1-3]</sup>。由于电力电子设备自

身工作于非线性开关状态, 大量谐波电流被注入到电力系统之中, 使得电力系统的谐波污染问题变得日益严重<sup>[4-7]</sup>。因此, 有源电力滤波器(active power filter, APF)被用于抑制电网中的谐波<sup>[8-11]</sup>, 而有效的控制策略可以显著提升 APF 谐波补偿能力。为了提高 APF 谐波电流跟踪补偿的快速性与准确性, 国内外学者提出了许多新型控制策略。比例积分控制

**基金项目:** 浙江省自然科学基金白马湖实验室联合基金项目资助 (LBMHY25F030003)

(proportional integral control, PI)算法成熟, 参数设计简单, 被广泛应用于电力电子系统的控制领域, 可用于实现简单信号的无静差跟踪, 但是 APF 需要动态跟踪不同频率的谐波信号, 跟踪实时性与精度要求均较高, 单纯 PI 控制难以满足工程应用需求。文献[12]将 PI 控制与谐振控制相结合, PI 控制用于调节基波电流, 谐振控制用于调节并补偿谐波电流。该策略融合了 PI 控制与谐振控制的优势, 具有较强的鲁棒性能。比例谐振控制(proportional resonant control, PR)可以避免复杂的坐标变换计算, 精准跟踪给定频率的正弦波信号, 但是频率波动会影响跟踪精度。文献[13]提出一种改进型 PR 控制策略, 在总结 PR 控制器参数调试方法的基础上, 设计合理的参数, 实现谐波补偿。该方法对频率波动具有良好的适应性, 但是动态响应能力一般。重复控制对周期性扰动有良好的控制效果, 但是由于其前向通道上设置了延迟环节, 会产生较大的时滞, 动态响应速度不足。文献[14]提出重复控制与 PI 控制相结合的控制策略, 同时引入三阶牛顿插值预测算法, 弥补了传统重复控制在谐波补偿时动态性能不足的劣势。文献[15]采用固定的电压延迟周期, 来实现对特定次数谐波的抑制, 但是抑制能力较为有限, 不具有普适性。预测控制鲁棒性强, 动态响应能力好, 能有效抵御电网、负载及外界扰动, 传统的模型预测控制利用权重系数实现交流电流与直流电容电压的多目标控制, 但是计算量相对较大, 权重系数不容易设计。文献[16]提出一种基于模型预测控制的单目标预测控制策略, 无需整定权重系数, 控制简单, 计算量较小, 实现了良好的控制效果。三角波控制法硬件实现简单, 但精确性较差, 开关损耗较大<sup>[17]</sup>; 无差拍控制响应速度较快, 但是计算量较大, 鲁棒性不高<sup>[18]</sup>; 模糊控制与人工神经网络控制不需要精确的数学模型, 但缺乏系统理论, 适应性较差<sup>[19-20]</sup>; 遗传算法控制策略全局搜索能力强, 但效率低, 局部搜索能力差<sup>[21]</sup>。单周期控制与滞环控制动态性能较差<sup>[22-24]</sup>。相对来说, 滑模变结构控制<sup>[25-26]</sup>兼具稳定性、鲁棒性与优良的动态性能, 被有效应用于有源电力滤波器控制中, 取得了良好的工程效果, 适用于 APF 对谐波电流的实时跟踪<sup>[27-30]</sup>。因此, 本文在分析三相四桥臂 APF 数学模型的基础上, 提出 APF 变流器分数阶滑模变结构控制与模糊滞环控制相结合的整体控制方案。其中, 采用分数阶滑模控制策略以提升 APF 电流跟踪精度, n 相补偿电流采用模糊滞环控制以抑制零序分量。在此基础上提出综合控制方案, 实现 a、b、c 三相与 n 相协调控制。最后 MATLAB/Simulink 仿真与实验结

果验证了该控制策略具有较好的谐波补偿效果, 本文提出的控制策略也可应用于其他场合中。

## 1 方案提出与数学模型建立

三相四线制供电形式广泛应用于电力系统中。但是由于电力电子设备尤其是整流与变频设备的使用, 大量谐波被注入到电力系统之中, 且供电系统的中线也流过较大电流。三相四桥臂 APF 因此被用于谐波与中线电流的补偿。相对于三相三桥臂 APF 来说, 三相四桥臂 APF 控制灵活, 效果更好, 被广泛应用于谐波抑制。三相四桥臂 APF 主电路的拓扑结构如图 1 所示。

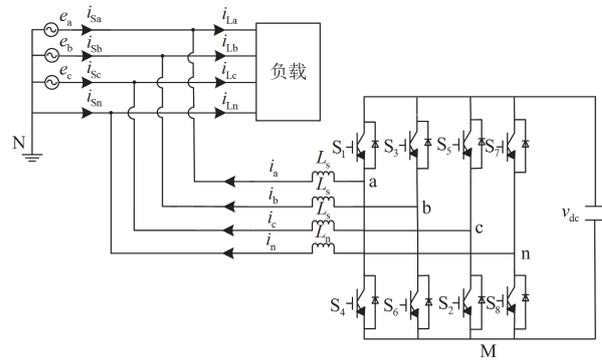


图 1 三相四桥臂 APF 主电路拓扑结构

Fig. 1 Topology of three-phase four-bridge arm APF

如图 1 所示,  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为三相电源电压;  $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$ 、 $i_{sn}$  为电源侧各相电流;  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$ 、 $i_{Ln}$  为负载侧各相电流;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 、 $i_n$  为 APF 各相出线电流;  $L_a$ 、 $L_b$ 、 $L_c$  为 APF 的 a、b、c 相桥臂出线电感;  $L_n$  为 APF 的 n 相桥臂出线电感;  $S_1$ — $S_8$  为 APF 开关器件;  $v_{dc}$  为 APF 直流侧电压。本文假定供电系统输出电压完全对称。供电系统中电源接三相不对称非线性负载, 由此导致三相母线上的线电流含有谐波且中线存在电流。三相四桥臂 APF 实时检测并计算三相母线上电流的谐波分量, 并根据检测结果控制 APF 变流器上开关器件  $S_1$ — $S_6$  的通断, 使其产生相反的波形, 从而抑制供电母线上的谐波, 通过控制 APF 变流器开关器件  $S_7$ 、 $S_8$  的通断, 使其产生相应的电流补偿供电系统中线电流。

本文分析三相四桥臂 APF 输出电压的特点。

设  $u_k$  ( $k = a, b, c, n$ ) 为 APF 各相桥臂的开关状态, 则定义三相四桥臂 APF 变流器各开关函数为

$$u_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂闭合, 下桥臂断开} \\ 0 & \text{上桥臂断开, 下桥臂闭合} \end{cases} \quad k = a, b, c, n \quad (1)$$

则有

$$\begin{cases} v_{aM} = u_a v_{dc} \\ v_{bM} = u_b v_{dc} \\ v_{cM} = u_c v_{dc} \\ v_{nM} = u_n v_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $v_{aM}$ 、 $v_{bM}$ 、 $v_{cM}$ 、 $v_{nM}$  分别为 a、b、c、n 节点相对于 M 节点的电压。

对电源、APF 出线电感、APF 各桥臂列写 KVL 方程, 则有

$$\begin{cases} e_a - L_s \frac{di_a}{dt} - v_{aN} = 0 \\ e_b - L_s \frac{di_b}{dt} - v_{bN} = 0 \\ e_c - L_s \frac{di_c}{dt} - v_{cN} = 0 \\ 0 - L_n \frac{di_n}{dt} - v_{nN} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $v_{aN}$ 、 $v_{bN}$ 、 $v_{cN}$ 、 $v_{nN}$  分别为 a、b、c、n 节点相对于 N 节点的电压。

结合 KCL 方程, 整理可得:

$$\begin{cases} v_{aN} = \frac{1}{4}(3v_{aM} - v_{bM} - v_{cM} - v_{nM}) \\ v_{bN} = \frac{1}{4}(3v_{bM} - v_{aM} - v_{cM} - v_{nM}) \\ v_{cN} = \frac{1}{4}(3v_{cM} - v_{aM} - v_{bM} - v_{nM}) \\ v_{nN} = \frac{1}{4}(3v_{nM} - v_{aM} - v_{bM} - v_{cM}) \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)一式(4), 得到 abc 坐标系下状态方程如式(5)所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_a}{L_s} \\ \frac{e_b}{L_s} \\ \frac{e_c}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{v_{dc}}{4} \begin{bmatrix} \frac{3}{L_s} & -\frac{1}{L_s} & -\frac{1}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{1}{L_s} & \frac{3}{L_s} & -\frac{1}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{1}{L_s} & -\frac{1}{L_s} & \frac{3}{L_s} & -\frac{1}{L_s} \\ -\frac{1}{L_n} & -\frac{1}{L_n} & -\frac{1}{L_n} & \frac{3}{L_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} \\ \frac{1}{4L_s} & -\frac{3}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} \\ \frac{1}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} & -\frac{3}{4L_s} & \frac{1}{4L_s} \\ \frac{1}{4L_n} & \frac{1}{4L_n} & \frac{1}{4L_n} & -\frac{3}{4L_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

将式(5)变换到 dq0 坐标系进行研究, 得到新方程组, 如式(6)所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_d - e_d}{L_s} \\ \frac{v_q - e_q}{L_s} \\ \frac{v_0}{L_s} \\ \frac{v_n}{L_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$ 、 $i_0$  为 dq0 坐标系下 APF 三相出线电流;  $i_n$  为 APF n 相出线电流;  $v_d$ 、 $v_q$ 、 $v_0$ 、 $v_n$  为 dq0 坐标系下 APF 相应各相控制电压;  $e_d$ 、 $e_q$  为 dq0 坐标系下电源电压;  $\omega$  为电网角频率。

同理, 可得 APF 直流侧电压的关系如式(7)所示。

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3v_d i_d}{2C} + \frac{3v_q i_q}{2C} + \frac{v_0 i_0}{C} + \frac{v_n i_n}{C} \quad (7)$$

式中:  $C$  为 APF 直流侧电容值。

## 2 控制策略研究

### 2.1 分数阶滑模变结构控制策略

滑模变结构控制是一种特殊的非线性控制。为了实现 APF 谐波电流的精准跟踪与快速收敛, 本文选用分数阶滑模变结构控制策略。

在 dq0 坐标系下, APF 检测模块检测到的补偿指令电流为  $i_d^*$ 、 $i_q^*$ , 而 APF 实际产生的补偿电流与指令电压分别为  $i_d$ 、 $i_q$ , 则有误差信号  $e = [e_1 \ e_2]$ , 如式(8)所示。

$$\begin{cases} e_1 = i_d - i_d^* \\ e_2 = i_q - i_q^* \end{cases} \quad (8)$$

设计 APF 滑模面函数  $s_1$ 、 $s_2$  如式(9)所示。

$$\begin{cases} s_1 = \lambda_1 e_1 + \lambda_2 \text{sig}(e_1)^\delta + D^\alpha e_1 \\ s_2 = \lambda_1 e_2 + \lambda_2 \text{sig}(e_2)^\delta + D^\alpha e_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为滑模面系数;  $\delta = \frac{j}{k}$ , 且  $j$ 、 $k$  为正奇数。

设计滑模控制作用  $u_1$ 、 $u_2$  如式(10)所示。

$$\begin{cases} u_1 = e_1 + \omega i_q + \frac{\lambda_1 e_1 + \lambda_2 \text{sig}(e_1)^\delta}{L_s} - \eta_1 \text{sat} \left( \frac{s_1}{\phi} \right) \\ u_2 = e_2 - \omega i_d + \frac{\lambda_1 e_2 + \lambda_2 \text{sig}(e_2)^\delta}{L_s} - \eta_2 \text{sat} \left( \frac{s_2}{\phi} \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  为切换增益;  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  为边界层厚度。

构造李雅普诺夫函数  $\dot{V}$ , 如式(11)所示。

$$\dot{V} = s_1 \dot{s}_1 + s_2 \dot{s}_2 = -\eta_1 |s_1| \text{sat}\left(\frac{s_1}{\phi_1}\right) - \eta_2 |s_2| \text{sat}\left(\frac{s_2}{\phi_2}\right) < 0 \quad (11)$$

因此系统具有稳定性。

同时, 当系统在控制作用下到达滑模面后, 则有  $s_1 = s_2 = 0$ 。

此时, 有

$$\begin{cases} \lambda_1 e_1 + \lambda_2 \text{sig}(e_1)^\delta + D^\alpha e_1 = 0 \\ \lambda_1 e_2 + \lambda_2 \text{sig}(e_2)^\delta + D^\alpha e_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

根据分数阶滑模变结构控制理论, 可以得到收敛时间如式(13)所示。

$$t \leq \frac{\Gamma(1-\alpha)e_0^{1-\delta}}{\lambda_2(1-\delta)\Gamma(1-\delta-\alpha)} \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为分数阶次;  $e_0$  为初始状态下的误差。

由式(13)可以看出, 系统具有有限时间内的收敛性。

求取  $u_1$ 、 $u_2$  后, 将  $dq0$  坐标系反变换回  $abc$  坐标系, 即可以得到 PWM 信号。控制策略实现方式如图 2 所示。

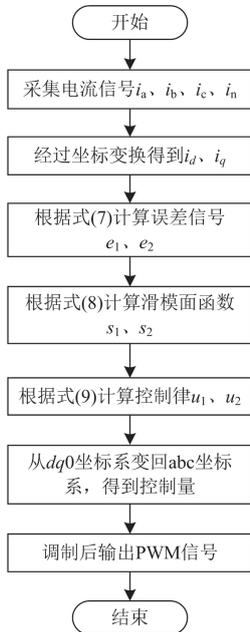


图 2 分数阶滑模变结构控制策略框图

Fig. 2 Block diagram of the fractional-order sliding mode control strategy

## 2.2 n 相桥臂模糊滞环控制策略

为解决传统滞环控制策略开关频率不固定、控

制性能受 APF 运行工况影响较大的问题, 本文在 n 相桥臂选用模糊滞环控制策略。n 桥臂开关管滞环控制原理如图 3 所示。

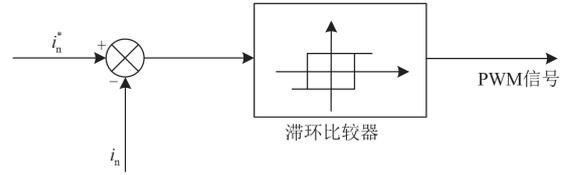


图 3 n 桥臂开关管滞环控制原理

Fig. 3 Hysteresis control principle of n-bridge arm switch tube

模糊滞环控制策略的滞环带宽主要由固定滞环带宽和可调节滞环带宽组成。设计滞环带宽  $h_n$  如式(14)所示。

$$h_n = h_{\text{constant}} + h_{\text{variable}} \quad (14)$$

式中:  $h_{\text{constant}}$  为固定滞环带宽;  $h_{\text{variable}}$  为可调节滞环带宽。

令 APF 的 n 相指令电流为  $i_n^*$ , 则 n 相电流误差  $e_n$  如式(15)所示。

$$e_n = i_n^* - i_n \quad (15)$$

$h_{\text{variable}}$  为模糊滞环控制器部分, 该部分可根据 APF 的 n 相电流误差等参数自动调节滞环带宽。调节方式如式(16)所示。

$$h_{\text{variable}} = K \mu(|e_n|, |\dot{e}_n|, f) \quad (16)$$

式中:  $K$  为滞环系数;  $\mu$  为模糊函数;  $f$  为开关频率。

建立模糊推理规则如表 1 所示。

表 1 模糊推理规则

Table 1 Fuzzy inference rules

$ e_n $	$ \dot{e}_n $	$f$	$h_{\text{variable}}$
小	小	低	小
小	大	低	中
大	小	高	大
大	大	高	大

基于此, 可以设计滞环控制器控制律  $u_{\text{Hysteresis}}$  如式(17)所示。

$$u_{\text{Hysteresis}} = \begin{cases} v_{\text{de}}, & i_n^* - i_n > h_n \\ 0, & i_n^* - i_n < -h_n \\ \bar{u}_{\text{Hysteresis}}, & -h_n \leq i_n^* - i_n \leq h_n \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\bar{u}_{\text{Hysteresis}}$  表示开关状态与前一采样时刻保持不变。

## 2.3 前馈补偿机制

由于 n 相电流与 a、b、c 三相电流存在耦合关系, 因此, 需要设计前馈控制机制。

根据 KCL 方程, 可以得到

$$i_n = -i_a - i_b - i_c \quad (18)$$

在  $dq0$  坐标系下, 则有

$$i_n^* = -(i_d^* \cos \theta + i_q^* \sin \theta) \quad (19)$$

式中:  $\theta$  为相角。

设计综合控制器如式(20)所示。

$$i_n^* = -K_{com} LPF(i_d^* \cos \theta + i_q^* \sin \theta) \quad (20)$$

式中:  $K_{com}$  为固定系数; LPF 为低通滤波器的特性函数。

为了减少 a、b、c 相对 n 相的扰动影响, 设计前馈补偿律  $u_{feedforward}$  如式(21)所示。

$$u_{feedforward} = L_n \frac{d}{dt} K_{com} LPF(i_d^* \cos \theta + i_q^* \sin \theta) \quad (21)$$

因此, n 相实际控制律  $u_{ncontrol}$  如式(22)所示。

$$u_{ncontrol} = u_{feedforward} + u_{Hysteresis} \quad (22)$$

### 3 仿真及分析

本文用 MATLAB/Simulink 对三相四桥臂 APF 进行仿真。电网母线电压为 380 V, 电网频率为 50 Hz, APF 直流母线电压选为 1000 V, 直流侧电容  $C$  取为 6300  $\mu\text{F}$ , APF 变流器三相出线电感  $L_s$  选为 0.1 mH, n 相出线电感  $L_n$  选为 0.2 mH。采用三相可控整流桥模拟谐波源, 整流桥直流侧采用阻感负载,  $R=10 \Omega$ ,  $L=1 \text{ mH}$ 。同时为验证中线电流补偿的可靠性, 在电网 c 相与 n 相之间接单相整流桥, 整流桥直流侧采用阻感负载, 整流桥直流侧电阻  $R_n=5 \Omega$ , 整流桥直流侧电感  $L_n=0.5 \text{ mH}$ 。

在控制器参数选择方面, 本文采用分数阶滑模变结构控制与模糊滞环控制综合策略。对于分数阶滑模变结构控制策略来说, 分数阶次  $\alpha$  需要统筹系统的稳定性能与动态性能进行选择, 如果选取过大, 则系统稳定性能变差, 如果选取过小, 则系统动态性能变差, 因此分数阶次  $\alpha$  选择为 0.6。滑模面系数  $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  需要根据电流跟踪精度进行选择,  $\lambda_1$  为 2.5,  $\lambda_2$  为 2,  $\delta$  的数值影响系统的收敛速度,  $\delta$  选择为 5/7。对于模糊滞环控制策略来说, 固定滞环带宽  $h_{constant}$  选择为 1 A, 滞环系数  $K$  选择为 0.8。对于前馈补偿机制来说, 固定系数  $K_{com}$  选择为 1.2。低通滤波器截止频率选择为 18 Hz。

图 4 是 APF 补偿前三相电流波形。可以看出, 接入不对称非线性负载后, 电网三相电流波形相对于正弦波发生了严重的畸变。

图 5 是 APF 投入补偿前电网谐波频谱分析, 是对图 4 所示三相电流波形各次谐波分量的量化考察。可以看出, 在未投入 APF 前, 电网谐波畸变率

高达 28.18%, 因本文采用了三相整流桥负载, 故 5、7、11、13、17、19 次谐波分量较高, 其他次数谐波分量较低。

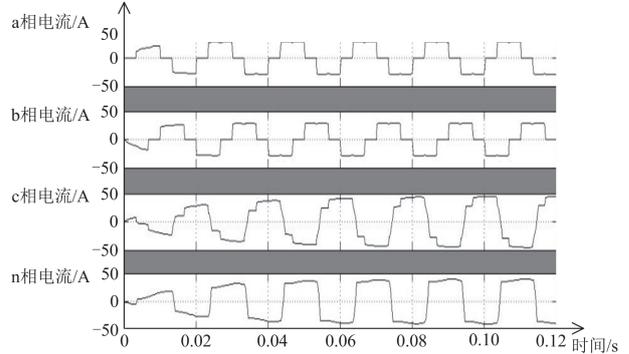


图 4 APF 补偿前电网三相电流波形

Fig. 4 Three-phase current waveforms of power grid before APF compensation

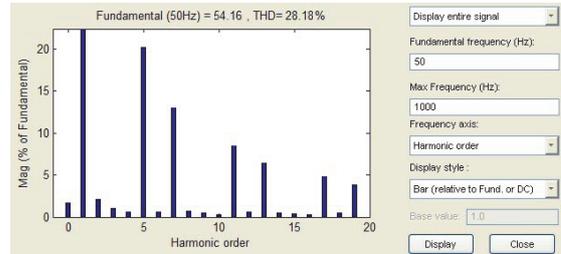


图 5 APF 补偿前电网谐波频谱分析

Fig. 5 Harmonic spectrum analysis of power grid before APF compensation

图 6 为采取本文控制策略 APF 补偿后电网三相波形。可以看出, 三相电流波形已非常接近正弦波。谐波分量相对于图 4 已大幅减少。

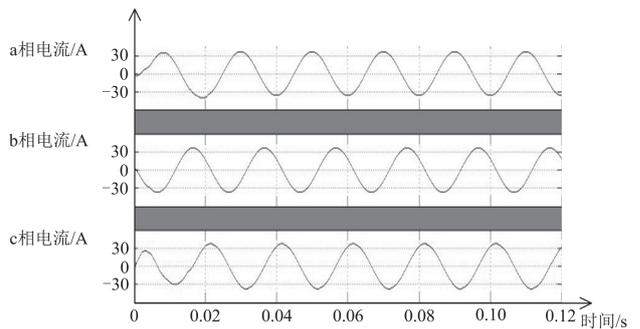


图 6 APF 补偿后电网三相电流波形

Fig. 6 Three-phase current waveforms of power grid after APF compensation

图 7 为 APF 补偿后电网谐波频谱分析。可以看出, APF 补偿后, 电网 a、b、c 三相谐波分量由原来的 28.18% 降为 3.32%, 存在少量 5 次谐波分量,

各次谐波分量尤其是  $6k \pm 1$  次谐波分量已大幅减少, 证明采用本文所提控制策略的三相四桥臂 APF 能有效解决三相四线制电网负载非线性不对称带来的问题。

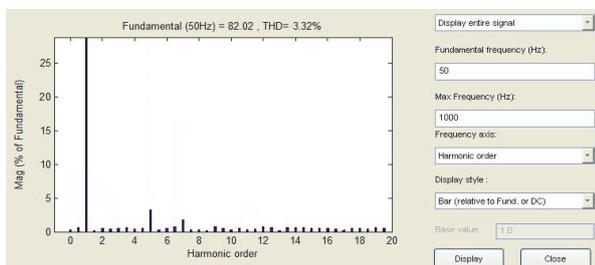


图 7 APF 补偿后电网谐波频谱分析

Fig. 7 Harmonic spectrum analysis of power grid after APF compensation

#### 4 实验及分析

基于 TMS320F2812 + FPGA + CPLD 控制器搭建 APF 实验平台。其整体结构如图 8 所示。

整个实验平台包括主电路、模拟同步装置、控制器、光收发装置、系统前置机、上位机等模块。

模拟同步装置负责模拟量信号的采集、调理, 同步信号的发生和开关量信号的输出等。光收发装置负责接收控制器发出的 PWM 控制命令并将其转

换为光信号转发给 IGBT 驱动板, 并接收 IGBT 驱动板发出的故障信息并将其反馈给控制器。系统前置机负责界面显示和上位机通信、故障上传等。上位机负责远程监控、远程操作、复位等。

实验平台控制器结构如图 9 所示。

监控计算机可完成算法的设定、对整个系统运行状态的实时监控, 数据的记录和保存等。监控计算机通过 RTDX(并口或 USB 口)与 DSP 板连接, 在监控计算机上完成算法设计后, 可直接通过 RTDX 下载到 DSP 板上并运行程序。

DSP 板为算法主控制板, 能够进行数据处理并计算出系统状态量、补偿器各状态之间的转换时序。DSP 板的功能可由监控计算机随时更改。DSP 板可通过与数据接口板的通信获取数据接口板信息, 并通过数据接口获取数据或下发命令。

数据接口板用于接收模拟量、开关量信息, 并根据 DSP 板的要求发出控制脉冲/电平信号。FPGA 完成三相系统电压、电流采样, 补偿器输出电流采样并上传数据至 DSP, 产生 PWM 驱动信号; 由 CPLD 完成死区时间的产生、信号的采集、IGBT 过压过流保护并将故障信号通过光纤异步通信上传给 FPGA。

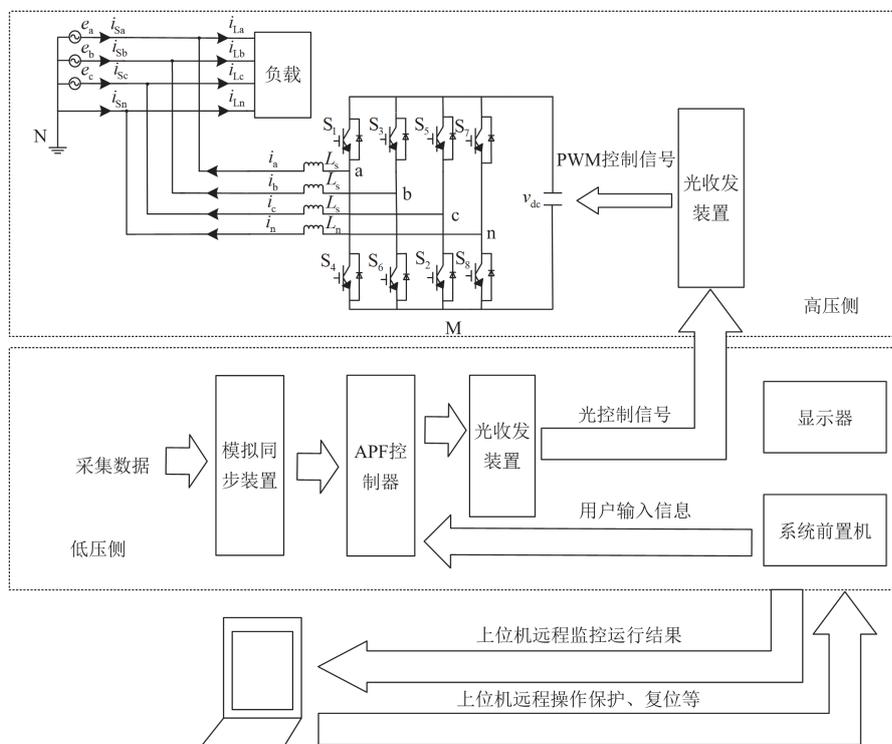


图 8 APF 实验平台整体结构图

Fig. 8 Overall structure of APF experimental platform

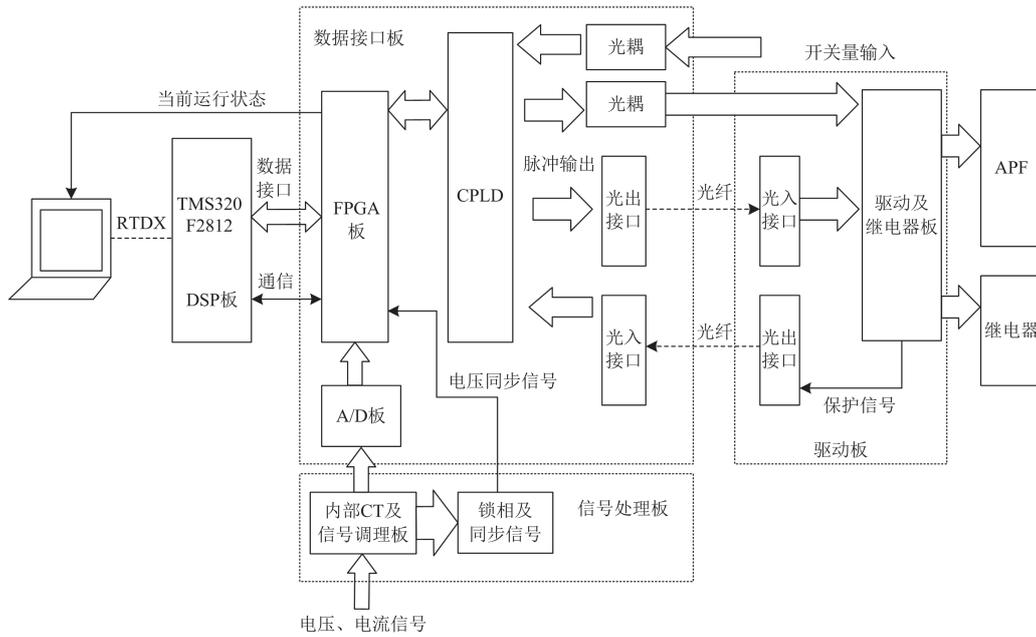


图 9 APF 实验平台控制器结构图

Fig. 9 Structure of APF experimental platform controller

信号处理板用于采集电压、电流输入量，并将调理后的模拟量信息传输至数据接口板 A/D 中。另外，信号处理板还能对电压、电流信息进行锁相和产生同步信号。

驱动板用于接收数据接口板的脉冲或开关量命令，产生驱动继电器、晶闸管的电信号。

DSP 与 FPGA、CPLD 的协同工作，使 DSP 从复杂的控制中解放出来，提高运算的速度和性能。

图 10 中蓝色波形为直流母线电压波形，约为 750 V；绿色波形为补偿前电网电流波形，其中总谐波含量为 25.7%；青色波形为补偿后电网电流波形，补偿后的总谐波含量为 1.9%左右；紫色波形为滤波器输出的谐波补偿电流；补偿率为 92.6%。(注：总谐波含量为 50 次以内的各次谐波总和)。示波器频谱图如图 11 所示。

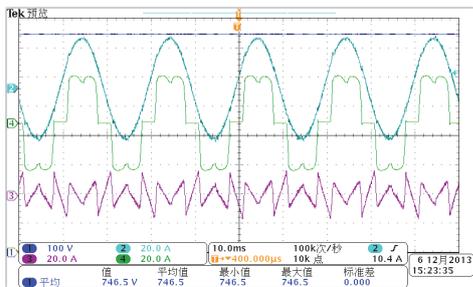
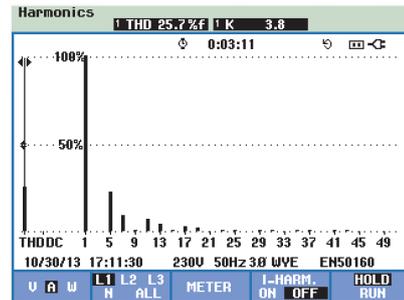
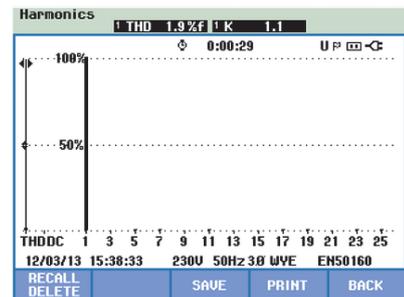


图 10 谐波补偿效果示波器图

Fig. 10 Oscilloscope waveform of harmonic compensation



(a) APF 补偿前电网电流谐波含量柱状图



(b) APF 补偿后电网电流谐波含量柱状图

图 11 示波器频谱图

Fig. 11 Oscilloscope spectrum diagram

实验结果证明了采用本文所提控制策略的三相四桥臂 APF 能有效滤除电网谐波，效果良好。

### 5 结论

本文在研究三相四桥臂 APF 数学模型的基础

上, 提出了一种新的综合控制策略, 并通过仿真与实验分析验证了所提控制策略的正确性, 同时可以得出以下结论。

1) 建立三相四桥臂 APF 的数学模型, 可对 APF 的 a、b、c 相和 n 相分别采用不同控制策略进行控制。

2) 采用分数阶滑模变结构控制策略对 APF 的 a、b、c 三相跟踪电流进行控制, 从而提升电流跟踪精度与速度。采用模糊滞环控制策略对电网中线电流进行补偿。

3) 考虑到 a、b、c 相和 n 相控制的耦合关系, 提出了一种基于前馈补偿的综合控制架构, 实现了 a、b、c 相和 n 相控制的高效协调。仿真与实验结果表明, 投入 APF 后, 电网 a、b、c 三相总谐波畸变率得到了有效抑制, 控制效果良好。

综上所述, 采用本文所提控制策略的三相四桥臂 APF 能有效抑制谐波, 进一步推动了三相四桥臂 APF 在电力系统中的应用。

#### 参考文献

- [1] 张敏, 孙孝峰, 朱艳萍, 等. 驻波移相有源电力滤波器在环形配电网中的应用[J]. 电工技术学报, 2025, 40(1): 203-216.  
ZHANG Min, SUN Xiaofeng, ZHU Yanping, et al. Applications of standing wave phase shifting active power filters in closed-loop distribution power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 203-216.
- [2] 张鸿博, 熊军华, 蔡晓峰. 基于高倍过采样与加窗插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 105-115.  
ZHANG Hongbo, XIONG Junhua, CAI Xiaofeng. Power harmonic analysis based on high-rate oversampling and windowed interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 105-115.
- [3] 路学刚, 朱欣春, 胡斌, 等. 基于等效简化和 GPU 的高比例新能源电网快速仿真系统[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 91-99.  
LU Xuegang, ZHU Xinchun, HU Bin, et al. Fast simulation system of high proportion new energy grid based on equivalent simplification and GPU[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 91-99.
- [4] 孙媛媛, 许庆葵, 马钊, 等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(6): 154-169.  
SUN Yuanyuan, XU Qingshen, MA Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.
- [5] 杨嘉伟, 易杨, 姜浩, 等. 基于随机载波脉冲宽度调制的变换器群超高次谐波抑制机理[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 160-167.  
YANG Jiawei, YI Yang, JIANG Hao, et al. Principle of supraharmmonic elimination based on random carrier sinusoidal pulse width modulation for converter clusters[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 160-167.
- [6] 李凯特, 赵伟, 李世松, 等. 超高次谐波测量方法研究进展[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 1-9.  
LI Kaite, ZHAO Wei, LI Shisong, et al. Advances in supraharmomics measurement methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 1-9.
- [7] 张昱祺, 王波, 金萧, 等. 基于附加电流控制的并网逆变器输出谐波抑制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 34-40, 77.  
ZHANG Yuqi, WANG Bo, JIN Xiao, et al. Current harmonic suppression strategy for grid-connected inverter based on additional current control[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 34-40, 77.
- [8] 张淼, 文俊铭, 吴事煜, 等. 混合型有源电力滤波器双闭环控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(4): 119-126.  
ZHANG Miao, WEN Junming, WU Shiyu, et al. Dual-loop control of hybrid active power filter[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(4): 119-126.
- [9] KIRUTHIGA B, KARTHICK R, MANJU I, et al. Optimizing harmonic mitigation for smooth integration of renewable energy: a novel approach using atomic orbital search and feedback artificial tree control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(4): 160-176.
- [10] 张华赢, 杨泽斌, 易皓, 等. 面向局域配电网谐波网损综合抑制的有源电力滤波器多目标优化配置策略[J]. 供用电, 2024, 41(2): 73-80.  
ZHANG Huaying, YANG Zebin, YI Hao, et al. Multi-objective optimization configuration strategy for SAPF of harmonic loss comprehensive suppression in local distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 73-80.
- [11] 刘金昌, 王久和, 陈东雪. 有源电力滤波器滑模-无源控制策略研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 280-286.

- LIU Jinchang, WANG Jiuhe, CHEN Dongxue. Research on sliding mode and passivity based control strategy of active power filter[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 280-286.
- [12] LASCU C, ASIMINOAEI L, BOLDEA I, et al. Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 337-347.
- [13] 周娟, 张勇, 耿乙文, 等. 四桥臂有源滤波器在静止坐标系下的改进 PR 控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 113-120.
- ZHOU Juan, ZHANG Yong, GENG Yiwen, et al. An improved proportional resonant control strategy in the static coordinate for four-leg active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 113-120.
- [14] 付瑞清. 基于复合控制的三电平 APF 的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 105-112.
- FU Ruiqing. Research on three-level active power filter based on composite control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 105-112.
- [15] ESCOBAR G, HERNANDEZ-BRIONES P G, ARTINEZP R, et al. A repetitive-based controller for the compensation of  $6\pm 1$  harmonic components[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 3150-3158.
- [16] 杨兴武, 雷彪, 欧阳武, 等. 单相 H 桥级联型 APF 模型预测控制方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 962-968.
- YANG Xingwu, LEI Biao, OUYANG Wu, et al. Model predictive control of single-phase cascaded H-bridge active power filter[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 962-968.
- [17] 马海啸, 叶海云, 龚春英. 三相四桥臂逆变器的三角波辅助控制策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(1): 14-21.
- MA Haixiao, YE Haiyun, GONG Chunying. Control strategy of three-phase four-leg inverter using an auxiliary triangle waveform[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(1): 14-21.
- [18] 姜卫东, 汪磊, 马炜程, 等. 一种电流跟踪误差补偿的三相有源电力滤波器的无差拍控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5605-5615, 5737.
- JIANG Weidong, WANG Lei, MA Weicheng, et al. A control method based on current tracking error compensation of deadbeat control for a three-phase active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5605-5615, 5737.
- [19] 杨萍, 陈卓, 罗婷, 等. 基于 VSG 的光伏发电与混合储能的控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 83-91, 113.
- YANG Ping, CHEN Zhuo, LUO Ting, et al. A control method of photovoltaic power generation and hybrid energy storage based on VSG[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 83-91, 113.
- [20] 侯世玺, 汪成, 付士利, 等. 有源电力滤波器神经终端滑模控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 279-287.
- HOU Shixi, WANG Cheng, FU Shili, et al. Neural terminal sliding mode control for active power filter[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(2): 279-287.
- [21] 冯兴田, 孙添添, 马文忠. 一种基于智能改进算法的定制电力设备优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 16-21.
- FENG Xingtian, SUN Tiantian, MA Wenzhong. Optimal configuration strategy of custom power devices based on intelligent improved algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 16-21.
- [22] 梅军, 郑建勇, 胡敏强, 等. 基于单周控制的三相四线制 APF 直流侧电压控制的分析与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 21-25.
- MEI Jun, ZHENG Jianyong, HU Minqiang, et al. Analysis and research of DC voltage control of three-phase four-leg APF based on one-cycle control method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 21-25.
- [23] 乐健, 姜齐荣, 韩英铎. 基于统一数学模型的三相四线有源电力滤波器的电流滞环控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 85-91.
- LE Jian, JIANG Qirong, HAN Yingduo. The analysis of hysteresis current control strategy of three-phase four-wire APF based on the unified mathematic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 85-91.
- [24] 马永翔, 权学红, 闫群民, 等. 基于 PI + QPR 控制的单相有源电力滤波器研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 165-171.
- MA Yongxiang, QUAN Xuehong, YAN Qunmin, et al. Study on the single-phase active power filter based on PI + QPR control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 165-171.
- [25] 刘道兵, 鲍妙生, 李世春, 等. 不平衡电网下 MMC 的 PCHD 模型无源滑模控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 109-116.

- LIU Daobing, BAO Miaosheng, LI Shichun, et al. Passive sliding mode control strategy for PCHD model of MMC in unbalanced power grid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 109-116.
- [26] 石磊, 周宏涛, 赵元莘, 等. 光伏多功能并网逆变器迭代 SMC + LADRC 电流内环控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2023, 51(4): 107-114.
- SHI Lei, ZHOU Hongtao, ZHAO Yuanshen, et al. Iterative SMC + LADRC current inner loop control strategy of photovoltaic multi-function grid connected inverter[J]. *Smart Power*, 2023, 51(4): 107-114.
- [27] 马永翔, 郭阳, 闫群民, 等. 基于滑模变结构的三相并网逆变器重复比例控制策略[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(11): 4668-4676.
- MA Yongxiang, GUO Yang, YAN Qunmin, et al. Repeated proportional control strategy of three-phase grid-connected inverter based on sliding mode variable structure[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(11): 4668-4676.
- [28] 王浩, 聂晶莹, 李斌, 等. 电网电压不平衡下交直流混合微电网互联接口变换器分数阶滑模控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(16): 94-103.
- WANG Hao, NIE Jingying, LI Bin, et al. Fractional order sliding mode control strategy of AC/DC hybrid microgrid interconnection interface converter under grid voltage imbalance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(16): 94-103.
- [29] 党超亮, 同向前, 宋卫章, 等. LCL 滤波型三相并网逆变器的电流滑模控制策略[J]. *电力电子技术*, 2021, 55(6): 1-4.
- DANG Chaoliang, TONG Xiangqian, SONG Weizhang, et al. Control strategy for three-phase inverter with LCL-type filter based on current sliding mode control method[J]. *Power Electronics*, 2021, 55(6): 1-4.
- [30] 程启明, 张昕, 赖宇生, 等. 电网不平衡工况下三电平直接矩阵变换器反步滑模控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(8): 73-85.
- CHENG Qiming, ZHANG Xin, LAI Yusheng, et al. Back-stepping sliding-mode control strategy for a three-level direct matrix converter in unbalanced grid conditions[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(8): 73-85.

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2025-03-14

作者简介:

张 怡(1977—), 女, 通信作者, 副教授, 硕士研究生, 研究方向为新能源运行控制及电力系统谐波抑制; E-mail: zhangyizs@yeah.net

张 锋(1977—), 男, IET Fellow, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制与新能源并网管理; E-mail: 15800110022@163.com

张 炜(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力调度与电能质量研究。E-mail: zh110068@163.com

(编辑 周金梅)