

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202109

一种基于改进广义积分控制的有源滤波器谐波补偿方法

孙刚, 殷志锋, 胡冠中

(许昌学院电气与机械工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对传统广义积分控制存在的稳定性问题, 提出一种基于改进广义积分控制的谐波补偿方法, 以增强有源电力滤波器的补偿性能。通过在传统广义积分控制器中引入一阶微分环节, 抵消被控对象极点并等效降低系统阶数, 从而使得系统相位裕度提升。同时构建同步旋转坐标系下的多通道改进广义积分控制结构, 使得改进广义积分控制器数量和需整定的控制器参数减半, 降低了设计复杂度且有效避免滤波频段交叉问题。接着开展离散域下的控制器关键参数影响特性分析, 得到不同积分系数下的系统稳定性演化趋势, 校核结果表明了参数设计的合理性。最后, 通过仿真验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波补偿; 广义积分控制; 频率特性; 离散域分析

A harmonic compensation method for an active power filter based on improved generalized integral control

SUN Gang, YIN Zhifeng, HU Guanzhong

(School of Electrical & Mechanic-Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: There is a stability problem in traditional generalized integral control. We propose a harmonic compensation method based on improved generalized integral control to enhance the compensation performance of the active power filter. By introducing a first-order differential link into the traditional controller, the poles of the controlled object are cancelled and the order of the system is reduced, so the phase margin of the system is improved. At the same time, a multi-channel improved generalized integral control structure in the synchronous rotating coordinate system is constructed so that the number of improved controllers and the controller parameters to be set are reduced by half, the design complexity is reduced and the problem of filtering frequency cross is effectively avoided. Then the influence characteristics of the controller's key parameters in the discrete domain are analyzed. The evolutionary trend of system stability under different integral coefficients is obtained and system stability check results show that the parameter design is reasonable. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by simulation.

This work is supported by the Emergency Management Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51741702).

Key words: active power filter; harmonic compensation; generalized integral control; frequency characteristic; discrete domain analysis

0 引言

现代配电网的一个典型特征是各种电力电子设备的广泛使用, 这使得电网谐波问题越来越严重^[1-3]。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)

以其良好的稳态补偿精度和动态调节性能受到青睐。相比于无源滤波器, APF 是一种更为理想的谐波补偿设备^[4-6]。

有源电力滤波器的谐波补偿性能主要取决于指令电流检测和电流跟踪控制两个方面^[7]。目前已有的谐波电流检测算法较多, 很多学者为了改进电流检测精度, 做了广泛而深入的研究^[8-10]。瞬时无功功率谐波检测法精度较高, 延时较短, 且适用于电压不对称及畸变工况, 但存在计算量大, 受滤波器

基金项目: 国家自然科学基金应急管理项目资助“纳米磁流体低频交变电磁场热疗系统关键电磁理论研究与系统集成”(51741702)

参数设计影响的缺点^[11]。傅里叶变换法支持选择性谐波提取, 但易受电压波形及频率偏移影响, 导致检测精度无法满足要求^[12-13]。小波变换检测算法适用于突变信号的分离提取, 且无需对信号整周期采样, 但理论研究尚不够完善, 工程应用可靠性较低^[14]。

目前常见的电流跟踪控制策略包括 PI 控制^[15]、重复控制^[16]、单周控制^[17]等。常规的 PI 控制能有效实现直流信号的无静差跟踪, 但 APF 的指令信号往往是多个频率谐波信号的叠加, 故 PI 控制无法实现理想的跟踪效果。基于内模原理的重复控制稳态跟踪性能出色, 但天然存在一个基波周期的延时, 针对负载工况变化频繁的场所, 补偿效果十分有限。单周控制实现简单, 响应速度快, 缺点是易受噪声等外界因素影响。文献[18]提出一种基于二阶广义积分器的特定次谐波检测算法, 以省去低通滤波器设计环节, 但该方法仅适用于单次谐波检测, 如需检测多个频段的谐波, 需要设置不同的二阶广义积分器。文献[19]提出一种基于二阶广义积分器的 i_p - i_q 谐波检测算法, 能在电网电压含高次谐波和直流分量的情况下提供稳定的电网电压频率, 从而为谐波电流精准检测提供帮助。文献[20]提出一种基于降阶广义积分器的有源电力滤波器电流控制方法, 利用降阶积分器频率选择和相序解耦特性, 实现高精度的谐波补偿, 但该方法针对所有特征次谐波滤除时, 仍需设置较多数量的广义积分器叠加使用, 导致参数设计过程复杂, 计算量较大。

本文提出一种基于改进广义积分控制的有源电力滤波器谐波补偿方法, 通过引入一阶微分环节以提高传统广义积分控制器的相位裕度, 在同步旋转坐标系下构建多通道改进广义积分控制结构, 并从频率特性角度分析了谐波跟踪精度及系统稳定性。接着对离散域下的控制器参数开展影响分析及稳定性校核。最后通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 广义积分器的频率选择特性及限制因素

针对角频率为 ω 的周期信号进行指令跟踪时, 传统积分器无法消除稳态误差, 而采用式(1)所示的广义积分控制器可以实现零静差跟踪。

$$G(s) = \frac{k_p s}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

广义积分控制的频率选择特性数学推导见附录。取 $k_p = 0.05$, $\omega = 600\pi$, 绘制 $G(s)$ 频率特性曲线如图 1 所示。可见, 在特定频率 300 Hz 处, 系统具备高控制增益, 而在其他频段处控制增益迅速衰减, 从而实现了高精度选频。

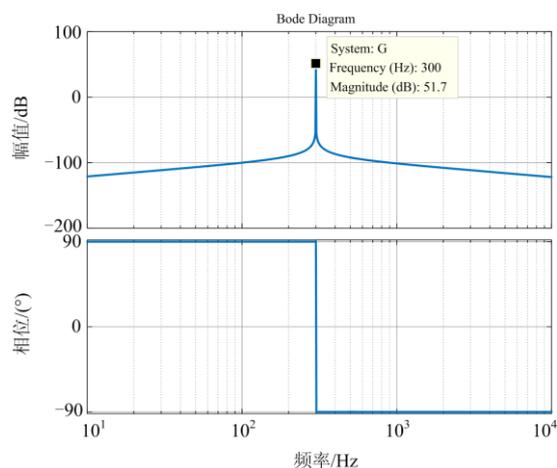


图 1 广义积分控制器频率特性曲线

Fig. 1 Frequency characteristic curve of generalized integral controller

APF 控制系统设计通常选取输出滤波器作为被控对象, LCL 型滤波器的传递函数表达式 $G_p(s)$ 为

$$G_p(s) = \frac{R_f C_f s + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2) R_f C_f s^2 + (L_1 + L_2) s} \quad (2)$$

式中: L_1 为逆变侧电感; L_2 为网侧电感; C_f 为滤波电容; R_f 为阻尼电阻。

为了保证控制系统稳定性, 开环传递函数的幅频特性曲线从上至下穿越 0 dB 时的相位必须在 -180° 以上。广义积分控制器在谐振频率点前的相位 90° , 谐振频率点后存在 90° 的相位滞后。由于 $G_p(s)$ 存在超过 90° 的相位滞后, 故 $G(s)G_p(s)$ 在谐振频率点后幅频曲线从上至下穿越 0 dB 时的相位在 -180° 以下, 如图 2 所示, 此时系统不稳定, 限制了广义积分控制器在 LCL 型 APF 中的应用。

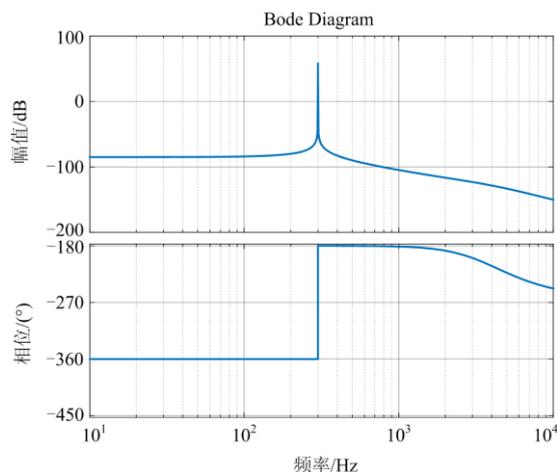


图 2 带被控对象的广义积分控制器频率特性曲线
Fig. 2 Frequency characteristic curve of generalized integral controller with controlled object

2 基于改进广义积分控制的谐波补偿方法

为克服上述问题，在基于广义积分控制器完成选择性谐波控制的基础上，本文采用如式(3)所示的改进广义积分控制器形式。

$$G_{Rn}(s) = \frac{K_{ln}s^2}{s^2 + (n\omega_0)^2} \quad (3)$$

在式(1)的基础上引入一个零点抵消被控制对象的极点，降低系统阶数，也可等效理解为增加一个微分环节以提供 90° 的相位补偿，提高系统稳定裕度。其中， K_{ln} 为 n 次谐波积分系数， ω_0 为基波角频率。

同时，本文在同步旋转坐标下构建多通道广义积分控制算法框架，将典型的 $6n \pm 1$ 次谐波转变成 $6n$ 次，使得需设计的改进广义积分控制器数量得以减半，需整定的 K_{ln} 参数也减半，降低了设计复杂度和对控制器计算能力的要求。同时，abc 坐标系下的 $6n \pm 1$ 次谐波控制转换成同步坐标系下的 $6n$ 次谐波控制，可避免 $6n+1$ 次和 $6n-1$ 次积分控制器单独设置时的滤波频段交叉问题，有效保证两个频率处的谐波跟踪效果。

考虑到工业典型谐波以 20 次以下为主，且数字控制器对高频谐波的跟踪能力有限，增大高频谐波的控制增益容易导致系统稳定性下降，故本文设计的改进广义积分控制仅在 dq 坐标系下选取 300 Hz、600 Hz、900 Hz、1 200 Hz 进行广义积分控制器的并联叠加，系统电流内环控制原理框图如图 3 所示。

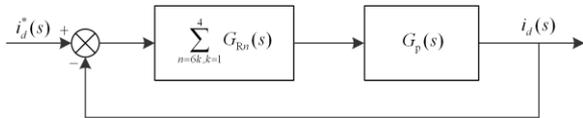


图 3 电流内环控制原理框图

Fig. 3 Control block diagram of inner current loop

根据图 3，推导得到系统电流环开环 $\phi_o(s)$ 、闭环 $\phi_c(s)$ 和误差传递函数 $\phi_e(s)$ 分别为

$$\phi_o(s) = \sum_{n=6k, k=1}^4 G_{Rn}(s)G_p(s) \quad (4)$$

$$\phi_c(s) = \phi_o(s)/(1 + \phi_o(s)) \quad (5)$$

$$\phi_e(s) = 1/(1 + \phi_o(s)) \quad (6)$$

图 4 为开环传递函数的频率特性图。可见，在所设计的特征次谐波(300 Hz、600 Hz、900 Hz、1 200 Hz)处，控制器幅值增益均大于 100 dB，跟踪性能良好，且相位裕度达 90° ，系统可靠性较高。图 5 是闭环传递函数频率特性，在各谐振频率处满足幅值和相位的零静差跟踪条件，而在非谐振频率处则表现出

很高的衰减，系统可实现指定次谐波的有效跟踪。

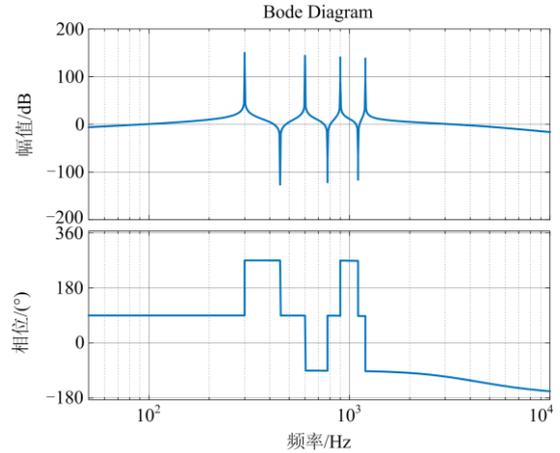


图 4 系统开环传递函数频率特性曲线

Fig. 4 Frequency characteristic curve of system open loop transfer function

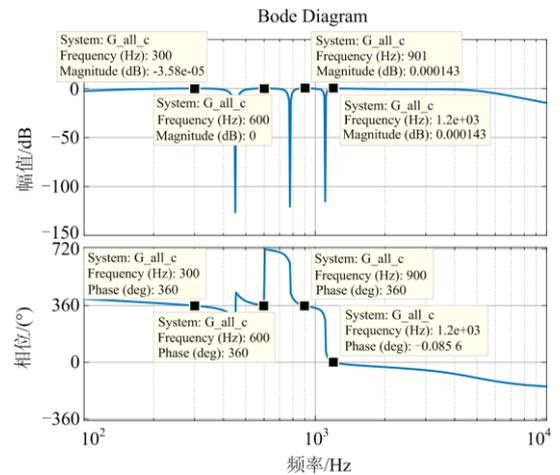


图 5 系统闭环传递函数频率特性曲线

Fig. 5 Frequency characteristic curve of system closed loop transfer function

图 6 是系统闭环误差传递函数的频率特性图。可见系统谐振频率点处的增益幅值都小于 -100 dB，可对误差进行深度校正，有助于实现高精度的特征次谐波跟踪。

3 离散域控制器参数影响分析

控制算法需要基于数字控制器实现应用，但数字离散化过程将引入采样误差及滞后一拍延时，故有必要对离散域下的控制器参数进行影响分析，以减小数字控制对补偿效果的影响。

基于改进广义积分控制的电流环离散域控制原理图如图 7 所示。

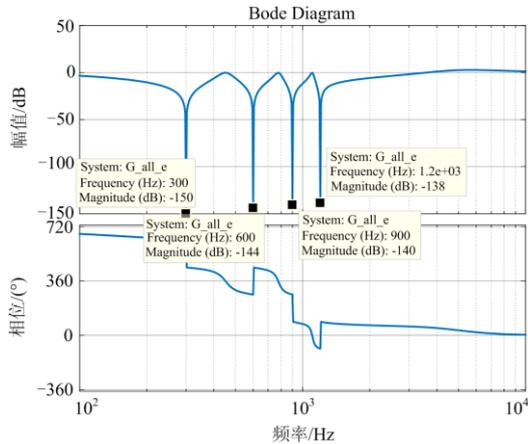


图 6 系统闭环误差传递函数频率特性曲线
Fig. 6 Frequency characteristic curve of system closed loop error transfer function

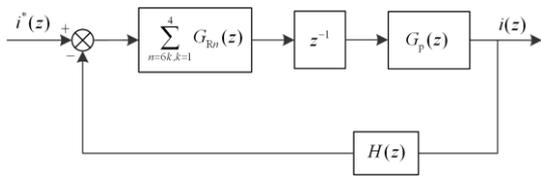


图 7 基于改进广义积分控制的电流环离散域控制原理图
Fig. 7 Control schematic of current loop based on improved generalized integral control in discrete domain

本文采用一阶保持法(First-Order Hold, FOH)进行控制器数字离散化, 其对应的离散域表达式为

$$G_{Rn}(z) = \frac{K_{Ins}(z-1)^2}{z^2 - 2z \cos \omega_n T_s + 1} \quad (7)$$

式中, $K_{Ins} = K_{In} \sin \omega_n T_s / (\omega_n T_s)$, 其中, 采样周期 $T_s = T_0 / N$, 谐波角频率 $\omega_n = 2\pi n / T_0$, 代入式(19)可得

$$G_{Rn}(z) = \frac{K_{Ins}(z-1)^2}{z^2 - 2z(n \cdot 2\pi / N) + 1} \quad (8)$$

绘制不同积分系数下的系统频率特性曲线, 如图 8 所示。可见: K_{Ins} 过大易造成通频带过宽, 选频效果下降, 但响应能力有所提升; K_{Ins} 过小则导致响应能力衰减, 但选频特性明显提升, 有利于谐波指令信号精准跟踪。实际中, 电流环控制器的选频性能与动态响应能力需要加以平衡, 为保证谐波跟踪精度, 广义积分控制器选频带宽不宜大于 20 Hz。

接着分析不同积分系数下的系统稳定性, 绘制 K_{Ins} 取值分别为 0.1、0.01、0.001 时的系统奈奎斯特曲线, 如图 9 所示。可见当 K_{Ins} 取值为 0.1 时, 根据小增益原理, 奈奎斯特曲线超出了单位圆边界, 系统不稳定。 K_{Ins} 取值为 0.01 和 0.001 的曲线边界

均在单位圆内。因此, 过大的 K_{Ins} 易导致系统失稳, 结合本文被控对象参数, 选取 $K_{Ins} \leq 0.08$ 。

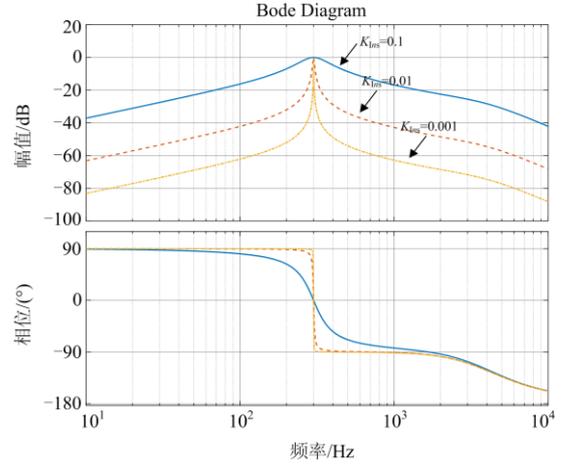


图 8 不同积分系数下的系统频率特性曲线
Fig. 8 System frequency characteristic curves with different integration coefficients

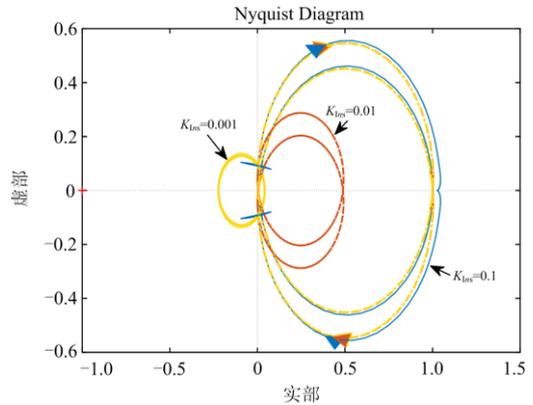


图 9 不同积分系数下的系统奈奎斯特曲线
Fig. 9 System Nyquist curves with different integration coefficients

4 仿真实验

为验证所提方法的有效性, 本文基于 Matlab/Simulink 软件搭建三相四线制 LCL 型有源电力滤波器仿真模型, 系统拓扑结构如图 10 所示, 主要参数如表 1 所示。

为便于效果分析, 电流内环控制器选取传统广义积分控制器和重复控制器作为对比对象, 两者控制结构如图 11 所示^[21]。重复控制在实际应用中需在离散域下进行设计, $Q(z)$ 通常设计为小于 1 的常数, K_r 为重复控制增益, z^k 为相位补偿环节, k 为补偿拍数, $S(z)$ 为补偿器, 用于校正低频段的幅值和相位增益, 本文中设计为二阶低通滤波器^[22]。三种控制器的主要参数如表 2 所示。

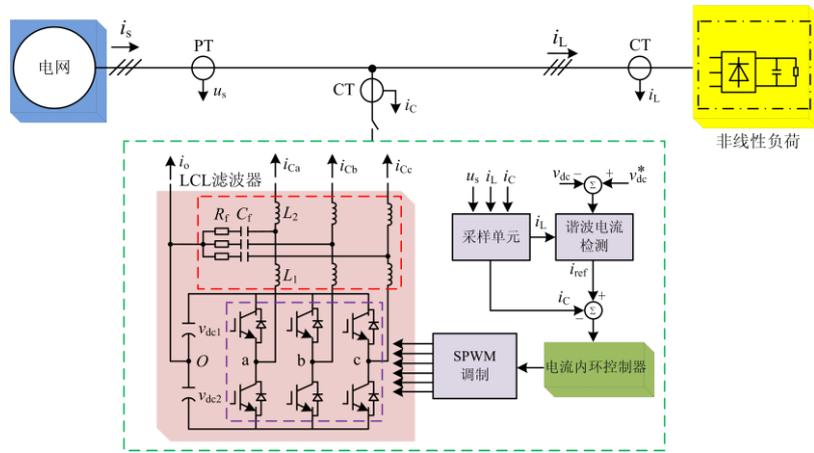


图 10 APF 主电路拓扑

Fig. 10 APF main circuit topology

表 1 系统主要参数

Table 1 System main parameters

参数	参数说明	数值
u_s/V	电网相电压	220
f_s/Hz	电网频率	50
S/kVA	额定容量	66
C_{dc}/mF	直流侧电容	5
$L_1/\mu H$	逆变器电感	185
$L_2/\mu H$	网侧电感	60
$C_f/\mu F$	滤波电容	30
R_f/Ω	阻尼电阻	0.1
v_{dc}/V	直流侧电压	750
f_{sw}/kHz	开关频率	10

APF 整体控制系统框图如图 12 所示。PLL 锁相环用于获取系统相位^[23]，谐波电流检测环节采用离散傅里叶分析算法，直流侧稳压环、均压环采用

PI 控制^[24]，前馈电压用于提高系统动态性能^[25]。电流内环分别采用传统广义积分控制、重复控制和改进广义积分控制开展仿真效果验证。

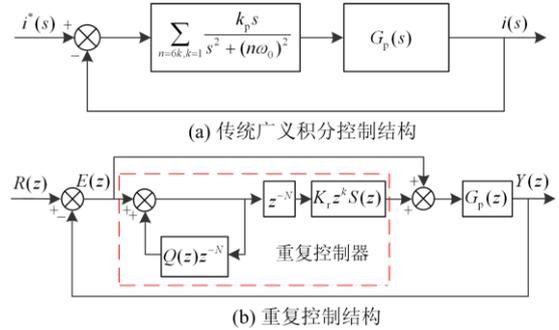


图 11 传统广义积分控制器和重复控制器的控制结构

Fig. 11 Control structure of traditional generalized integral controller and repetitive controller

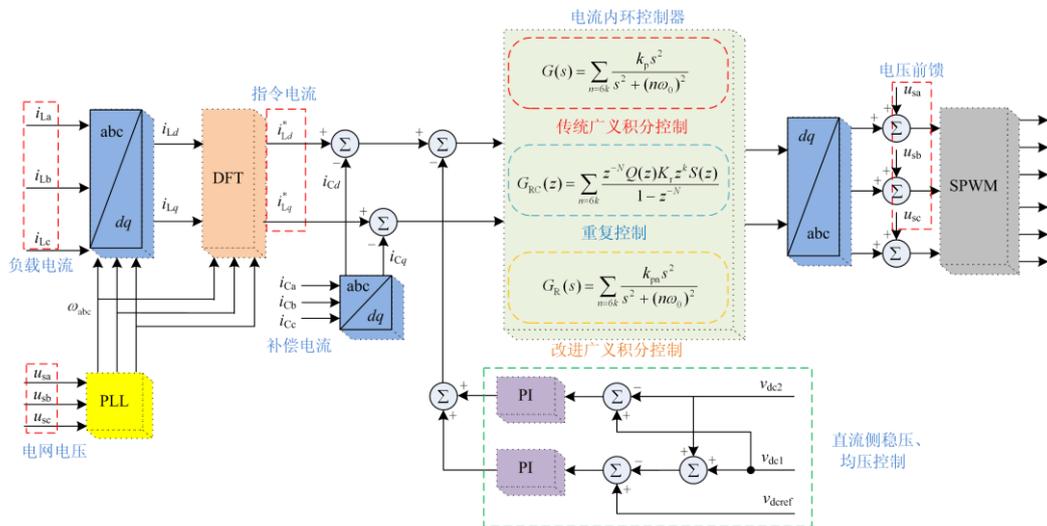


图 12 整体控制系统框图

Fig. 12 Block diagram of overall control system

表 2 三种控制器主要参数

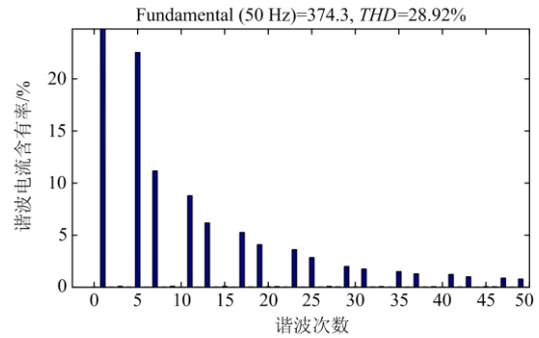
Table 2 Main parameters of three kind controllers

类型	参数	数值
传统广义积分控制器	k_{p6}	0.01
	k_{p12}	0.01
	k_{p18}	0.01
	k_{p24}	0.01
重复控制器	$Q(z)$	0.95
	K_r	1
	k	5
改进广义积分控制器	$S(z)$	$\frac{0.1402z^2 + 0.2804z + 0.1402}{z^2 - 0.5964z + 0.1571}$
	K_{ins6}	0.06
	K_{ins12}	0.06
	K_{ins18}	0.03
	K_{ins24}	0.03

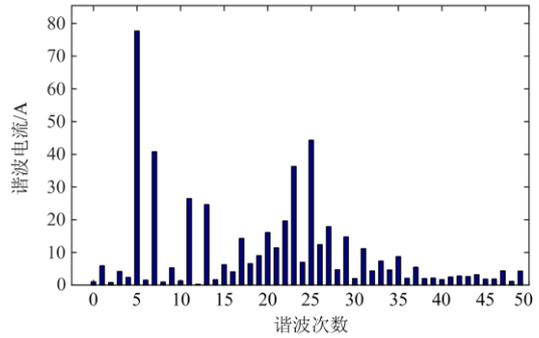
4.1 稳态补偿效果验证

图 13 为传统广义积分控制的稳态补偿电流波形及 FFT 频谱分析,三个通道依次为三相负载电流、补偿电流及电网电流。负载电流波形呈马鞍波状, THD 高达 28.92%。经基于传统广义积分控制的 APF 补偿后, 低次谐波得到一定程度抑制, 但由于传统广义积分控制在较高频段相位裕度不足, 控制不稳定甚至引起振荡, 导致高频毛刺显著, 经频谱分析, 23 次和 25 次谐波电流含有率达到了 9.85% 和 10.62%, 同时导致附近次谐波含量丰富, 电网电流 THD 仍然高达 18.97%。

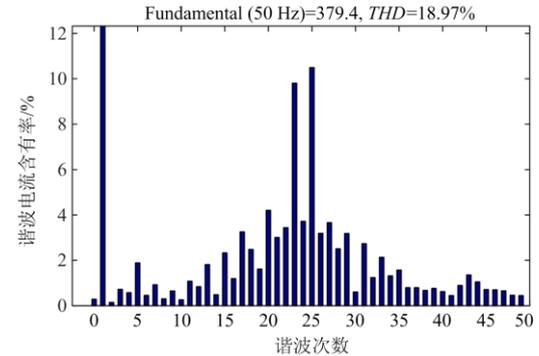
图 14 为重复控制的稳态补偿电流波形及 FFT 频谱分析。经基于重复控制的 APF 补偿后, 电网电流的各频段谐波分量均得到了较好抑制, THD 降低至 4.19%, 波形质量改善明显。但重复控制选频特性和分频次控制增益无法灵活调节, 故主要特征次谐波附近的相邻次数谐波较为丰富, 且限于控制器带宽, 高频处谐波跟踪控制能力有限, 高频分量有所下降, 但依旧存在。



(b) 负载电流频谱



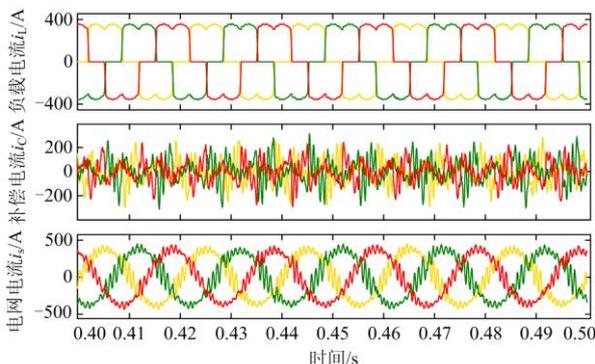
(c) 补偿电流频谱



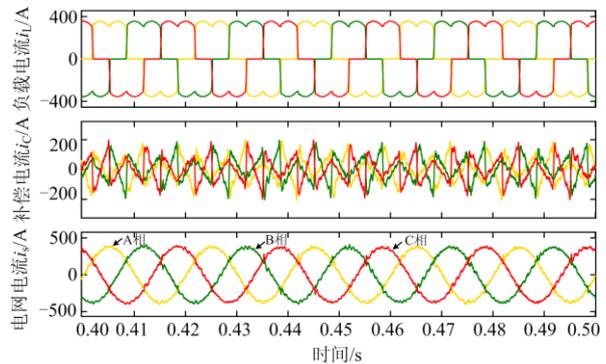
(d) 电网电流频谱

图 13 传统广义积分控制稳态补偿电流及频谱

Fig. 13 Steady-state compensation current and frequency spectrum of traditional generalized integral control



(a) 稳态电流波形



(a) 稳态电流波形

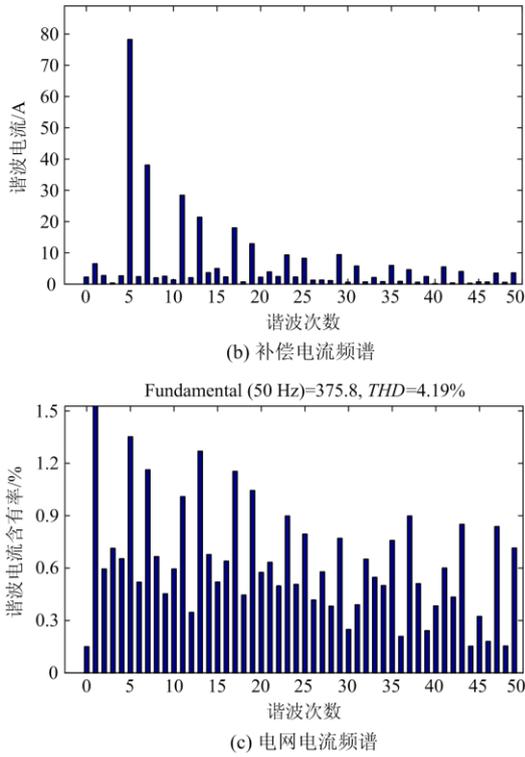
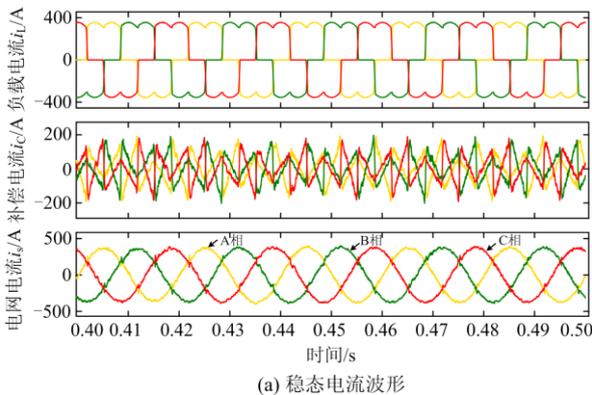


图 14 重复控制稳态补偿电流及频谱

Fig. 14 Steady-state compensation current and frequency spectrum of repetitive control

图 15 为基于改进广义积分控制的稳态补偿电流波形及 FFT 频谱分析。经基于本文所提方法的 APF 补偿后, 电网电流得到了良好补偿, THD 降低至 4.05%, 5、7、11、13 次谐波含有率分别由补偿前的 23.12%、11.08%、9.15%、6.73% 减小至补偿后的 1.16%、1.03%、0.73% 和 0.61%, 抑制效果优于重复控制。由于本文设计的改进广义积分控制仅在 dq 坐标系下选取 300 Hz、600 Hz、900 Hz、1 200 Hz 进行多控制器并联, 故高频段仍存在一定谐波分量。但通过对比重复控制的高频段谐波抑制效果, 两者含量差别不大。



(a) 稳态电流波形

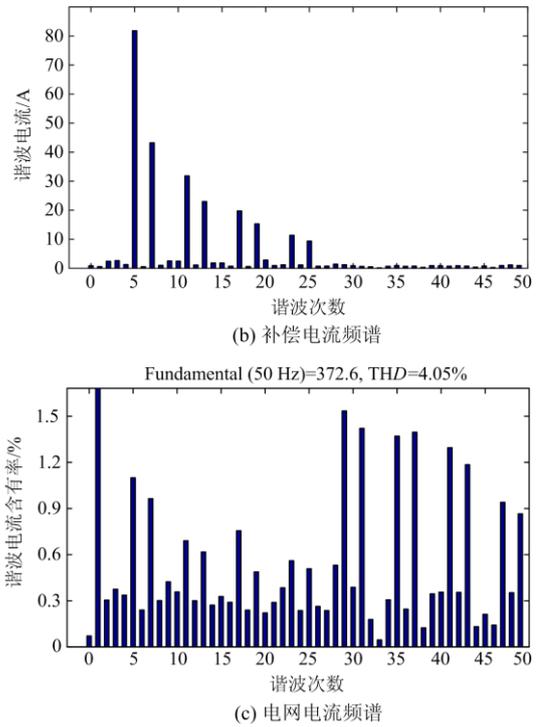
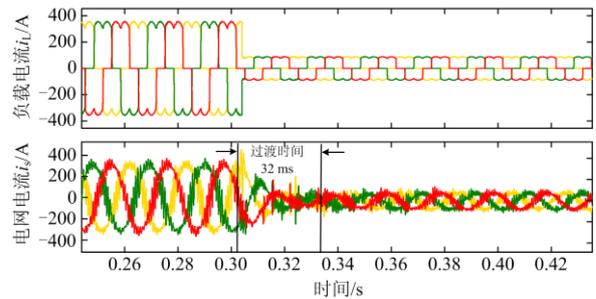


图 15 改进广义积分控制稳态补偿电流频谱

Fig. 15 Steady-state compensation current and frequency spectrum of improved generalized integral control

4.2 动态补偿效果验证

接下来验证本文所提方法的动态响应性能。设置系统突变工况为负载率在 20%~100% 之间变化。由图 16(a) 可见, 传统广义积分控制受限于系统稳定性, 积分系数取值较小, 动态响应能力偏弱, 过渡时间约 32 ms, 且过渡过程前后补偿电流波形很差, 高频振荡严重。由图 16(b) 可见, 重复控制由于存在一个基波周期的固有延时, 故过渡过程持续时间较长, 达到了 43 ms。由图 16(c) 可见, 本文所提方法在响应速度上较之于前述方法有了一定提升, 在突变发生的一个基波周期以内就基本过渡到了新的稳态, 动态响应时间缩减至 21 ms, 具备更良好的工程应用价值。



(a) 传统广义积分控制动态补偿波形

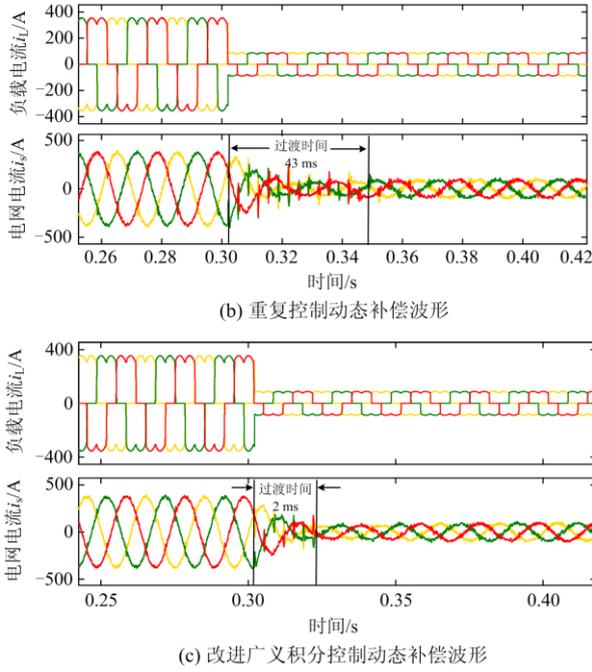


图 16 传统方法和本文所提方法的动态补偿效果对比

Fig. 16 Comparison of dynamic compensation effect between the traditional method and the proposed method

5 结论

本文针对有源电力滤波器的补偿性能提升开展了相关研究工作, 通过引入一阶微分环节以提高传统广义积分控制器的相位裕度, 在同步旋转坐标系下构建多通道改进广义积分控制结构, 以降低计算复杂度和节省计算资源。控制器频率特性表明系统不仅具备良好的谐波跟踪精度, 同时系统稳定裕度较为充足。利用 Matlab/Simulink 搭建系统仿真模型, 动稳态试验结果表明本文方法控制下的 APF 补偿精度和动态响应能力均有了明显提升, 具备一定的工程应用价值。

附录

对于某一频率输入信号 $e(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, 理想的广义积分输出表达式为 $y(t) = At \sin(\omega t + \varphi)$, 对 $e(t)$ 、 $y(t)$ 分别进行拉氏变换可得

$$E(s) = \frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} + \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

$$Y(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \left(\frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} + \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \left(\frac{As \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} - \frac{A\omega \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (2)$$

为推导简便起见, 可定义

$$n(t) = \frac{A \sin \varphi \sin \omega t}{\omega} \quad (3)$$

该式的拉氏变换为

$$N(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \left(\frac{A\omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} + \frac{As \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) - \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \left(\frac{As \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} - \frac{A\omega \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (4)$$

因而

$$Y(s) + N(s) = \frac{2s}{s^2 + \omega^2} E(s) \quad (5)$$

由 $e(t)$ 衍生得到另一信号 $x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, 通过拉氏变换得到

$$X(s) = \frac{As \cos \varphi}{s^2 + \omega^2} - \frac{A\omega \sin \varphi}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

即

$$Y(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X(s) \quad (7)$$

当 $e(t)$ 存在频率偏差 $\Delta\omega$ 时, 有

$$\frac{s}{s^2 + \omega^2} E'(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X'(s) = L \left\{ At \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \varphi \right] \frac{\sin(\Delta\omega/2)}{\Delta\omega/2} \right\} \quad (8)$$

式中, $L\{*\}$ 表示信号*的拉普拉斯变换。当 $\Delta\omega$ 较小时, 有 $\sin(\Delta\omega/2)$ 和 $\Delta\omega/2$ 是等价无穷小量, 即

$$\sin(\Delta\omega/2) \approx \Delta\omega/2$$

此时有

$$Y'(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E'(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X'(s) = L \left\{ At \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \varphi \right] \right\} \quad (9)$$

当 $\Delta\omega \gg 1$ 时, 有

$$\frac{\sin(\Delta\omega/2)}{\Delta\omega/2} \approx 0$$

此时有

$$Y'(s) = \frac{s}{s^2 + \omega^2} E'(s) + \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} X'(s) \approx 0 \quad (10)$$

当 $\Delta\omega$ 较大或者系统频率偏差较大时, $Y'(s)$ 不再是期望信号 $Y'(s)$ 的拉氏变换。由此可见, 式(10)成立的条件是: 输入信号频率偏差 $\Delta\omega$ 小于一定范围。当满足该条件时, 广义积分器控制作用可表示为

$$G(s)E'(s) = L \left\{ A \sin[(\omega + \Delta\omega/2)t + \varphi] \frac{\sin(\Delta\omega \cdot t/2)}{\Delta\omega/2} + \frac{A \sin(\Delta\omega \cdot t/2 + \varphi) \sin[(\omega + \Delta\omega/2)t]}{\omega + \Delta\omega/2} \right\} \quad (11)$$

当 $\Delta\omega$ 很小、 A/φ 一定、 ω 较大时，上式第二项可忽略，此时式(11)可简化为

$$G(s)E'(s) = L \left\{ A \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \varphi \right] \frac{\sin(\Delta\omega \cdot t/2)}{\Delta\omega/2} \right\} \quad (12)$$

当 $\Delta\omega \ll 1$ 时，同样存在

$$\sin \frac{\Delta\omega}{2} t \Big/ \frac{\Delta\omega}{2} \approx 0$$

此时有，

$$G(s)E'(s) = 0 \quad (13)$$

这说明当 $e(t)$ 含有高次谐波成分时，通过式(12)的积分控制，谐波分量将衰减至 0，证明了广义积分控制的频率选择特性。

参考文献

[1] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.

[2] 张国辉, 景柳铭, 王宾, 等. 谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 33-41.
ZHANG Guohui, JING Liuming, WANG Bin, et al. Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 33-41.

[3] 白雪, 高瑞雪, 闻福岳, 等. 特定次谐波注入抑制模块化多电平换流器电容电压波动[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 8-14.
BAI Xue, GAO Ruixue, WEN Fuyue, et al. Suppression of capacitor voltage fluctuation of the modular multilevel converter by specific sub-harmonic injection[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 8-14.

[4] 张桂红. 电网畸变条件下有源电力滤波器控制技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 38-42.
ZHANG Guihong. Research on control technology of active power filter under grid distortion condition[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 38-42.

[5] 周娟, 秦静, 王子绩, 等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 233-238.
ZHOU Juan, QIN Jing, WANG Ziji, et al. Application of deadbeat control with plug-in repetitive controller in active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 233-238.

[6] 王何, 李雨佳, 尹忠东, 等. 弱电网条件下多 APF 并网交互影响分析[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 23-30, 88.
WANG He, LI Yujia, YIN Zhongdong, et al. Analysis on interactive influences among multiple APFs connected to weak-structured power system[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 23-30, 88.

[7] 王雪, 高云广, 齐伶俐, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 177-186.
WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, et al. Research status and prospect of active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177-186.

[8] 王晓庆, 杨剑锋. 改进 SDFT 和预测控制的 APF 选择性谐波补偿[J]. 电力电子技术, 2020, 54(9): 15-18, 70.
WANG Xiaoqing, YANG Jianfeng. Active selective harmonic compensation method based on improved SDFT and predictive control[J]. Power Electronics, 2020, 54(9): 15-18, 70.

[9] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-160.
LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-160.

[10] 张建忠, 耿治, 徐帅, 等. 一种有源电力滤波器的改进自适应谐波检测算法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4323-4333.
ZHANG Jianzhong, GENG Zhi, XU Shuai, et al. An improved adaptive harmonic detection algorithm for active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4323-4333.

[11] 谢少辉, 杨淑英. 基于瞬时无功功率理论谐波检测方法的研究[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(2): 22-27.
XIE Shaohui, YANG Shuying. Research on measurement methods for detecting harmonics based on instantaneous reactive power theory[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(2): 22-27.

[12] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于四项余弦窗三谱线插值 FFT 的谐波检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2002-2008.
NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, ZHANG Jianhua, et al. Harmonic detection approach based on 4-term cosine window triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2002-2008.

[13] 胡殿刚, 马喜平, 赵凤展, 等. 一种基于短时傅里叶变换的电压闪变信号的检测[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 27-33, 41.
HU Diangang, MA Xiping, ZHAO Fengzhan, et al. A new method of voltage flicker detection based on short time fourier transform[J]. Power System and Clean

- Energy, 2020, 36(3): 27-33, 41.
- [14] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [15] 甄远伟, 侯运昌, 沙琮田, 等. 比例重复控制在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力电子技术, 2020, 54(10): 99-102.
ZHEN Yuanwei, HOU Yunchang, SHA Congtian, et al. Application of proportional repetitive controller in active power filter[J]. Power Electronics, 2020, 54(10): 99-102.
- [16] 于晶荣, 粟梅, 孙尧. 有源电力滤波器的改进重复控制及其优化设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 235-242.
YU Jingrong, SU Mei, SUN Yao. Improved repetitive control and its optimization for active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 235-242.
- [17] 黄永红, 柏晶晶, 陈晖. 基于电流跟踪的并联混合有源滤波器单周控制[J]. 电测与仪表, 2013, 50(4): 54-58.
HUANG Yonghong, BAI Jingjing, CHEN Hui. One-cycle control method of SHAPF based on current tracing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(4): 54-58.
- [18] 黄海宏, 魏阳超, 王海欣, 等. 特定次谐波滤除锁相在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 36-40.
HUANG Haihong, WEI Yangchao, WANG Haixin, et al. Application of specific harmonic filtering phase lock in APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 36-40.
- [19] 古超帆, 张新燕, 童涛, 等. 基于二阶广义积分器的改进型 i_p-i_q 谐波检测算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(10): 88-93.
GU Chaofan, ZHANG Xinyan, TONG Tao, et al. An improved i_p-i_q harmonic detection algorithm based on second-order generalized integrator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(10): 88-93.
- [20] 杨家强, 杨磊, 曾争, 等. 基于降阶广义积分器的 LCL 型有源电力滤波器电流控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2057-2068.
YANG Jiaqiang, YANG Lei, ZENG Zheng, et al. A current control method for LCL active power filters based on the reduced order generalized integrator[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2057-2068.
- [21] 郭海波, 孟祥有. 基于同步旋转坐标下多倍频 DFT 算法和重复控制的 APF 快速控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 26-31.
GUO Haibo, MENG Xiangyou. Fast control strategy of apf based on multiple frequency DFT algorithm and repetitive control in synchronous rotation coordinates[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 26-31.
- [22] 武永燎, 李红, 宋欣达, 等. 基于改进型重复控制器的永磁同步电机电流谐波抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2277-2286.
WU Yongliao, LI Hong, SONG Xinda, et al. Suppression of harmonic current in permanent magnet synchronous motors using improved repetitive controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2277-2286.
- [23] 曾正, 邵伟华, 刘清阳, 等. 并网逆变器数字锁相环的数学物理本质分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 808-816.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, LIU Qingyang, et al. Mathematical and physical fundamentals of digital phase-locked loop for grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 808-816.
- [24] 彭咏龙, 黄江浩, 李亚斌, 等. 中压级联 APF 直流侧电压平衡控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4): 157-163.
PENG Yonglong, HUANG Jianghao, LI Yabin, et al. DC side voltage balance control strategy based on medium voltage APF[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(4): 157-163.
- [25] 吴云亚, 谢少军, 阚加荣, 等. 逆变器侧电流反馈的 LCL 并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 54-60.
WU Yunya, XIE Shaojun, KAN Jiarong, et al. A full grid voltage feed-forward control strategy with inverter-side current feedback for LCL grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 54-60.

收稿日期: 2021-03-22; 修回日期: 2021-09-07

作者简介:

孙刚(1983—), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: yunzhe12@xcu.edu.cn

殷志锋(1975—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 149573159@qq.com

胡冠中(1980—), 男, 博士研究生, 讲师, 高级工程师, 研究方向为多能互补综合能源发电系统及其高维多目标优化设计。E-mail: gz_hu@yahoo.com

(编辑 葛艳娜)