

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230864

基于一种新型正弦幅值积分器的谐波检测方法

苗长新, 祝宇航, 赵文鹏, 刘家明

(中国矿业大学电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对基于瞬时无功理论的 $i_p - i_q$ 谐波检测法结构复杂、响应速度慢等问题, 提出了一种采用改进正弦幅值积分器结构的谐波电流检测方法。首先, 利用二阶广义积分器的输出滤波特性及正弦幅值积分器的极性选择特性, 使其相结合构造出了一种滤波性能更强, 同时具有频率及极性选择作用的新型积分器。然后, 利用该积分器快速准确地提取基波正序分量, 并有效应用于谐波检测环节中。当电网电压存在直流偏置问题时, 该积分器所构造的锁相环也能准确锁定电网频率及相位信息。最后, 理论分析及仿真实验结果表明: 该方法无需进行瞬时无功分量分离, 就可提取出电网电压及负载电流基波的正负序分量, 计算量小, 谐波检测更精确。

关键词: 谐波检测; 正弦幅值积分器; 基波正序分量; 直流偏置; 锁相环

Harmonic detection method based on a new sinusoidal amplitude integrator

MIAO Changxin, ZHU Yuhang, ZHAO Wenpeng, LIU Jiaming

(School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: There are problems of complex structure and slow response of the $i_p - i_q$ harmonic detection method based on instantaneous reactive power theory. Thus a harmonic current detection method based on an improved sinusoidal amplitude integrator is proposed. First, the method uses the output filtering characteristics of the second-order generalized integrator and the polarity selection characteristics of the sinusoidal amplitude integrator to construct a new integrator with stronger filtering performance and frequency and polarity selection. Then, the integrator is used to quickly and accurately extract the fundamental positive sequence component, and is also effectively applied to harmonic detection. When the grid voltage has DC bias problems, the phase-locked loop constructed by the integrator can also accurately lock the grid frequency and phase information. Finally, the theoretical analysis and simulation experimental results show that this method can extract the positive and negative sequence components of power grid voltage and load current without instantaneous symmetric component separation. The calculation is short and the harmonic detection is more accurate.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62076243).

Key words: harmonic detection; sinusoidal amplitude integrator; positive sequence component of fundamental wave; DC bias; phase-locked loop

0 引言

近年来, 由于一些电力电子设备及非线性负载的广泛应用, 电网中出现大量谐波^[1-3]。电力系统中谐波含量的大小是衡量当前电力系统中电能质量优劣的一项重要指标, 因此解决谐波污染问题是提高电能质量的有效手段^[4-7]。对于谐波的抑制与补偿, 有源电力滤波器(active power filter, APF)是很有效的治理装置, 而对于谐波治理的关键步骤之一是谐波

的实时检测, 谐波电流检测的快速性和准确性将从源头影响 APF 补偿电力系统谐波的动态性能^[8-9]。

迄今为止, 常用的谐波检测方法包括基于瞬时无功功率理论的谐波检测、基于傅里叶变换理论的谐波电流检测法^[10]、基于小波分析^[11]和基于神经网络^[12]的谐波检测法等。基于傅里叶变换的检测方法精度高, 但计算量大, 实时性较差; 基于小波变换的检测方法具有良好的实时性能, 但算法受限。基于瞬时无功理论的谐波检测方法, 特别是 $i_p - i_q$ 法, 原理简单, 实时性能好, 在 APF 实时谐波治理中得到广泛应用。然而, 传统的 $i_p - i_q$ 法需要多次坐标变

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62076243)

换, 结构较复杂, 且需要低通滤波器(low pass filter, LPF)作为基波分量的提取环节, 算法受截止频率的限制, 检测精度和响应速度不能得到很好的平衡。因此, 基于瞬时无功理论的 $i_p - i_q$ 法存在一些问题有待解决。

针对 $i_p - i_q$ 法的不足, 文献[13]采用一种解耦双同步坐标系 dq 电流控制器, 以抵消电流纹波, 该方法虽然没有使用低通滤波器, 但结构过于复杂。为了避免使用低通滤波器, 文献[14]采用了一种改进的最小均方谐波电流检测算法, 但考虑到检测精度及动态响应速度的平衡性, 需要对权重因子进行整定。文献[15]均使用了一种新型的自适应滤波器来代替 LPF 进行滤波, 但并不能有效解决谐波检测的延时性, 具有较大计算量。文献[16]将级联二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)与时变观测器结合, 可以在直流偏置情况下有效地提取谐波, 增强了原 SOGI 的滤波特性, 但结构略复杂。文献[17]提出了一种改进的双二阶广义积分器, 当电网电压存在直流分量时, 也能够很好地补偿谐波及间谐波, 具有良好的动态响应能力, 但谐波补偿精确度略有不足。文献[18]采用一种级联耦合的三阶广义积分器结构实现特定次谐波的检测, 克服了直流偏置畸变电网问题, 但是结构较复杂, 且不能解决间谐波的问题。同时, 文献[19]提出了一种四阶广义积分器(fourth-order generalized integrator, FOGI)结构, 能够有效提取基波正序分量, 大大提高了电网同步信号检测的精确度, 解决了电网电压直流偏置问题, 但由于是一种级联结构, 需要额外的正负序分离模块, 响应速度稍慢。文献[20]分别将四阶广义积分器应用于不平衡电流的补偿及自适应锁频环中, 相对于 SOGI 增强了其检测精度, 但对于四阶广义积分器本身的不足并没有改良。除了 SOGI, 正弦幅值积分器(sinusoidal amplitude integrator, SAI)因其正负极性选择特性也被应用在同步信号提取及谐波检测领域。文献[21]提出采用正弦幅值积分器的同步信号检测结构, 无需进行瞬时无功分量分离, 即可在频率变化的情况下快速提取电网电压基波正负序分量的幅值和相位, 实现同步信号的检测。但是, 单一的 SAI 用于正序基波提取存在直流偏置问题, 文献[22]就此分析了电网电压直流偏置问题对正弦幅值积分器同步信号检测的影响, 并提出了一种解决直流偏置的方法。文献[23]提出了一种基于正弦幅值积分器锁相环的单同步参考坐标系正、负序分量分离方法, 在 dq 坐标系下利用正弦幅值积分器提取并消除 2 倍工频交流分量, 但此方法需要额外的正负序分离单元。文献[24]将耦

合多通道正弦幅值积分器(multichannel sinusoidal amplitude integrator, MSAI)应用在全电流谐波检测上, 利用 SAI 替代了传统 $i_p - i_q$ 法中的 LPF, 增加了响应的快速性, 但是对于谐波检测的精确度有所不足, 且没有讨论直流偏置的问题。

为了解决正弦幅值积分器在谐波检测中精确度不足及电网电压直流分量的影响等问题, 本文提出了一种联合二阶广义积分器的新型正弦幅值积分器(second-order and sinusoidal amplitude integrator, SOSAI)结构。一方面, 将该结构用于锁相环中, 实现在直流偏置非理想电网条件下的频率及相位信息的提取, 另一方面将其应用于传统 $i_p - i_q$ 法中, 取代以 LPF 为滤波环节的正序基波提取模块, 实现更加精确的谐波检测。该方法无需进行瞬时无功分量分离, 就可提取出电网电压及负载电流基波的正负序分量, 计算量小, 能够有效应用于谐波检测领域中。

1 正弦幅值积分器正序基波提取

正弦幅值积分器是一种双输入、双输出结构电路, 可实现对正弦信号的零误差跟踪, 其结构如图 1 所示。

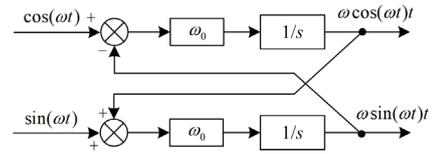


图 1 正弦幅值积分器

Fig. 1 Sinusoidal amplitude integrator

当输入为一对正交信号 $x_r(t)$ 、 $x_i(t)$ 时,

$$\begin{cases} x_r(t) = A \cos(\omega t) \\ x_i(t) = A \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

输出 $y_r(t)$ 、 $y_i(t)$ 为

$$\begin{cases} y_r(t) = \omega A \cos(\omega t)t \\ y_i(t) = \omega A \sin(\omega t)t \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为信号幅值; ω 为角频率。

为了简化分析, 用复数形式表示输入输出 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 为

$$\begin{cases} X(t) = x_r(t) + jx_i(t) = A[\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)] \\ Y(t) = y_r(t) + jy_i(t) = \omega A[\cos(\omega t)t + j\sin(\omega t)t] \end{cases} \quad (3)$$

Laplace 变换得到其传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_0}{s - j\omega_0} \quad (4)$$

取传递函数的中心频率为 50 Hz, 即 $\omega_0 = 100\pi$ rad/s。式(4)的幅频及相频特性曲线如图 2 所示。

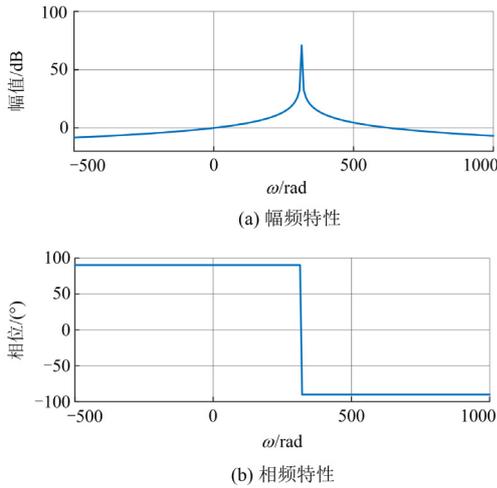


图 2 正弦幅值积分器的频率特性曲线

Fig. 2 Frequency characteristic curve of the sinusoidal amplitude integrator

从图 2 中可以看出, 正弦幅值积分器在中心频率 ω_0 处具有谐振峰, 在其他频率处则具有一定的衰减作用。为了实现正弦信号的无静差跟踪, 在原结构中引入负反馈环节构成闭环结构, 其构成的闭环结构传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{kH(s)}{1+kH(s)} = \frac{k\omega_0}{s - j\omega_0 + k\omega_0} \quad (5)$$

式中, k 为 SAI 的增益系数。

当 $s = j\omega_0$, 即取中心频率时, $G(s)|_{s=j\omega_0} = 1$, 所以该结构可以实现对中心频率正弦量的无静差跟踪。同理, 当中心频率为负频率时, 也能得到此结论。

可以看出, SAI 结构虽然对中心频率以外的频率具有衰减作用, 但并不能达到完全衰减, 所以为了实现正序基波分量的提取, 通常将正负序分量进行交叉解耦^[25], 如图 3 所示。图 3 中: $u_\alpha(s)$ 、 $u_\beta(s)$ 为 SAI 结构的输入; $u_{\alpha p}(s)$ 、 $u_{\beta p}(s)$ 、 $u_{\alpha n}(s)$ 和 $u_{\beta n}(s)$ 为 SAI 结构的输出。根据图 3 得到正负序分量传递

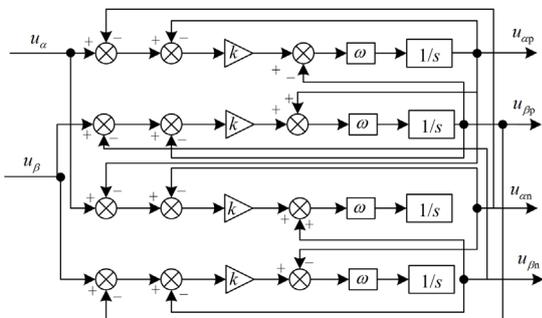


图 3 基于 SAI 的正负序分离框图

Fig. 3 Block diagram of positive and negative sequence separation based on SAI

函数 $H_{\alpha\beta p}$ 、 $H_{\alpha\beta n}$ 为

$$\begin{cases} H_{\alpha\beta p} = \frac{u_{\alpha\beta p}(s)}{u_{\alpha\beta}(s)} = \frac{k\omega_0(s + j\omega_0)}{s^2 + 2k\omega_0 s + \omega_0^2} \\ H_{\alpha\beta n} = \frac{u_{\alpha\beta n}(s)}{u_{\alpha\beta}(s)} = \frac{k\omega_0(s - j\omega_0)}{s^2 + 2k\omega_0 s + \omega_0^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{\alpha\beta p}(s) = u_{\alpha p}(s) + ju_{\beta p}(s)$; $u_{\alpha\beta n}(s) = u_{\alpha n}(s) + ju_{\beta n}(s)$; $u_{\alpha\beta}(s) = u_\alpha(s) + ju_\beta(s)$ 。

取 $\omega_0 = 100\pi \text{ rad/s}$, $k = 0.707$, 得到其正序分量频率特性曲线, 如图 4 所示。

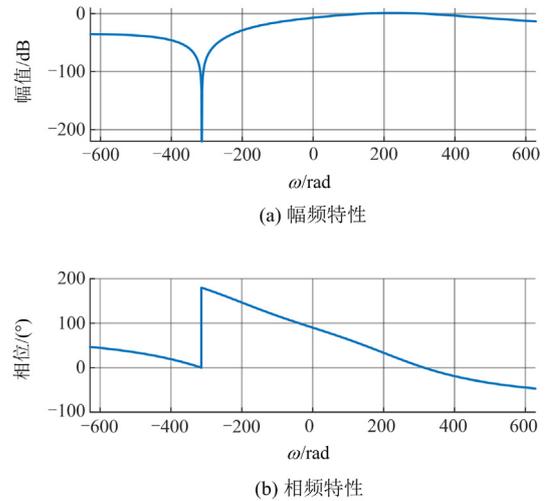


图 4 基于 SAI 的正序基波提取的频率特性

Fig. 4 Frequency characteristics of positive sequence fundamental wave extraction based on SAI

2 基于 SOSAI 的正序基波提取及谐波检测

2.1 基于 SOSAI 正序基波提取的基本结构

从图 4 中可以看出, 在 $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$ 及 $\omega = -100\pi \text{ rad/s}$ 时, $H_{\alpha\beta p}(s)$ 的幅值增益分别为 0 dB 及 $-\infty \text{ dB}$, 在稳态情况下, 基于 SAI 的正负序分离结构可以准确地筛选出正序、负序分量。但是此结构对于一些低频及高频分量的滤波特性并不太好, 特别是对于直流分量的衰减作用很小, 如果将此结构直接用于锁相环及谐波检测领域, 势必会造成相位信息误差, 影响谐波检测的结果。为了解决此类问题, 本文将二阶广义积分器应用于此结构中, 得出一种新的 SAI 结构, 如图 5 所示。

由 SOSAI 结构图得到其传递函数 $G_{\alpha\beta p}(s)$ 为

$$G_{\alpha\beta p}(s) = \frac{u_{\alpha\beta p}(s)}{u_{\alpha\beta}(s)} = \frac{k_1 k \omega_0^2 s(s + j\omega_0)}{s^4 + a\omega_0 s^3 + b\omega_0^2 s^2 + c\omega_0^3 s + \omega_0^4} \quad (7)$$

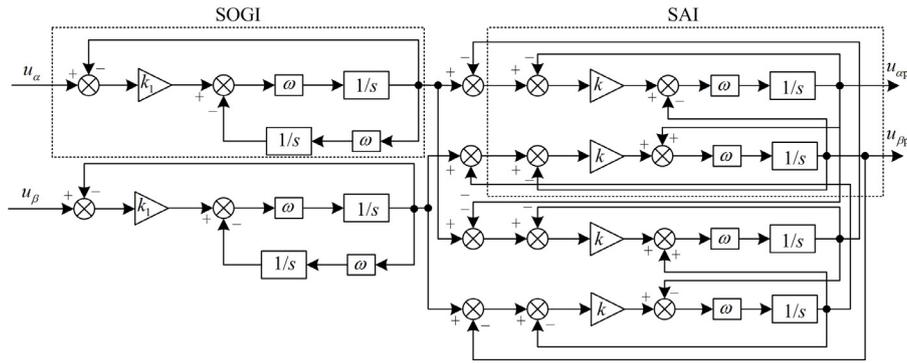
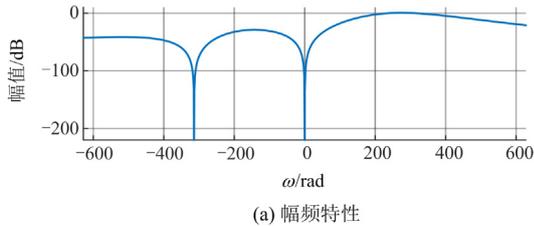


图 5 基于 SOSAI 的正序基波提取的结构框图

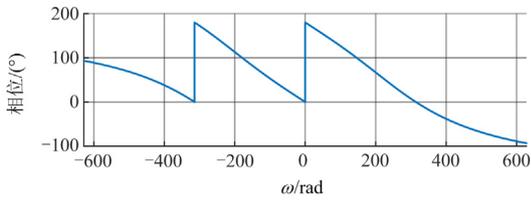
Fig. 5 Structure block diagram of positive sequence fundamental wave extraction based on SOSAI

式中： $a = (2k + k_1)\omega_0$ ； $b = (2 + 2kk_1)\omega_0^2$ ； $c = (2k + k_1)\omega_0^3$ ； k_1 为 SOGI 的增益系数。

可以看出此系统为四阶系统，具有更好的滤波特性。 $G(s)|_{s=j\omega_0} = 1$ ， $G(s)|_{s=j\omega} = 0$ ，能够实现正负序分量完全分离，其频率特性曲线如图 6 所示。



(a) 幅频特性



(b) 相频特性

图 6 基于 SOSAI 的正序基波提取的频率特性

Fig. 6 Frequency characteristics of positive sequence fundamental wave extraction based on SOSAI

图 6 中， $k_1 = 1.414$ ， $k = 1.2$ ， $\omega_0 = 100\pi \text{ rad/s}$ 。可以看出，SOSAI 对负中心频率信号及直流信号均有消除作用，并且可以无相位误差地得到正序基波分量。

为了得到较合适的增益系数 k ，取 $k_1 = 1.414$ ，并分别绘制了不同 k 值下 SOSAI 的伯德图及阶跃响应图，分别如图 7、图 8 所示。

从图 7 中可以看出，随着 k 值的增大，系统带宽也随之增大，但是伴随着其滤波性能将有所下降，且在一定 k 值范围内，系统都是稳定的。同时，从阶跃响应曲线来看， k 值越大，对应曲线的上升时

间越短，动态响应速度越快，但是超调波动也越来越大。所以，必须在稳定范围内对系统的滤波能力和动态响应速度之间进行权衡，本文 k 值折衷取 1.2。

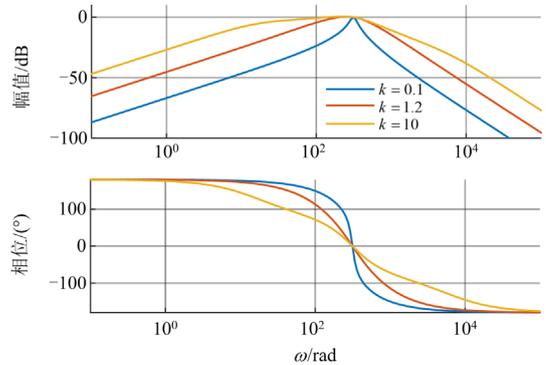


图 7 不同 k 值下 SOSAI 的伯德图

Fig. 7 Bode diagram of SOSAI with different k values

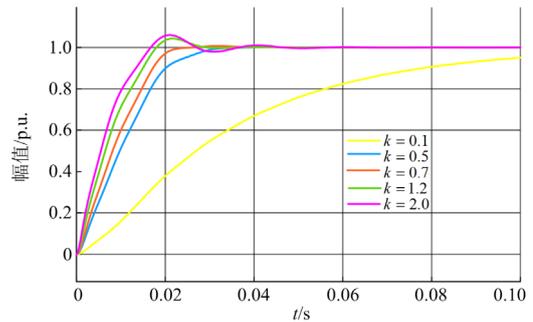


图 8 不同 k 值下 SOSAI 的阶跃响应

Fig. 8 Step response of SOSAI with different k values

2.2 基于 SOSAI 的谐波电流检测方法

本文提出的谐波检测方法主要采用 SOSAI 结构来代替 $i_p - i_q$ 方法中的低通滤波器和功率计算环节，并用 SOSAI 型锁相环代替传统锁相环，以提高其谐波检测的精度，克服直流分量的干扰。基于 SOSAI 的谐波检测结构及相应的锁相环结构如图 9、图 10 所示。

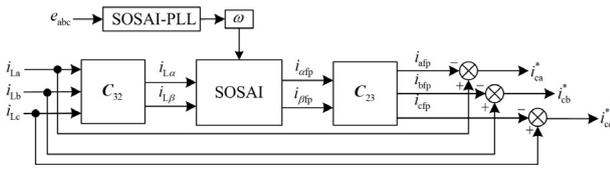


图9 基于 SOSAI 的谐波检测结构

Fig. 9 Harmonic detection structure based on SOSAI

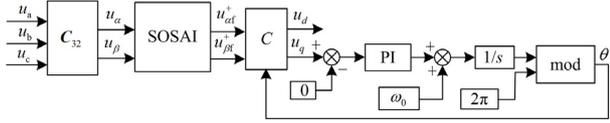


图10 基于 SOSAI 的锁相环结构

Fig. 10 Phase locked loop structure based on SOSAI

在三相三线制系统中, 忽略零序分量, 负载电流表示为

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{an}^+ \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{bn}^+ \sin\left(n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_n\right) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{cn}^+ \sin\left(n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_n\right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{an}^- \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{bn}^- \sin\left(n\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_n\right) \\ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{cn}^- \sin\left(n\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_n\right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 分别为各相负载电流; I_{an}^+ 、 I_{bn}^+ 、 I_{cn}^+ 分别为各相负载电流正序分量有效值; I_{an}^- 、 I_{bn}^- 、 I_{cn}^- 分别为各相负载电流负序分量有效值; n 为谐波次数; φ_n 为初相位。

负载电流经过 Clarke 变换得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的 $i_{L\alpha}$ 、 $i_{L\beta}$ 。

$$\begin{bmatrix} i_{L\alpha} \\ i_{L\beta} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{32} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^+ \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^- \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{C}_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$; I_n^+ 、 I_n^- 分别为两相坐标系下负载电流正序分量和负序分量值。

负载电流 $i_{L\alpha}$ 、 $i_{L\beta}$ 经过 SOSAI 结构进行滤波及正负序分离处理, 可得到相应的两相正序基波电流 $i_{\alpha fp}$ 、 $i_{\beta fp}$, 再经过坐标反变换处理得到三相正序基波电流 $i_{\alpha fp}$ 、 $i_{\beta fp}$ 和 $i_{\gamma fp}$ 。

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha fp} \\ i_{\beta fp} \\ i_{\gamma fp} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{23} \begin{bmatrix} i_{\alpha fp} \\ i_{\beta fp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_1^+ \sin(\omega t + \varphi_1) \\ \sqrt{2} I_1^+ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right) \\ \sqrt{2} I_1^+ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: \mathbf{C}_{23} 为 \mathbf{C}_{32} 的逆矩阵; $\begin{bmatrix} i_{\alpha fp} \\ i_{\beta fp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} I_1^+ \sin(\omega t + \varphi_1) \\ \sqrt{3} I_1^+ \cos(\omega t + \varphi_1) \end{bmatrix}$;

I_1^+ 为正序基波电流有效值。

最后, 用三相负载电流与三相正序基波电流作差, 即为检测所得到的谐波电流 i_{ca}^* 、 i_{cb}^* 和 i_{cc}^* 。

3 仿真对比

为了验证基于 SOSAI 谐波检测法的性能, 使用 Matlab/Simulink 搭建其仿真模型, 并与基于耦合多通道正弦幅值积分器 MSAI 及四阶广义积分器 FOGI 的谐波检测性能作对比。仿真中, 三相电网电压的幅值为 311 V, 频率为 50 Hz, 所用负载为三相不可控整流桥, 其电阻 $R = 7 \Omega$, 电感 $L = 2.5 \text{ mH}$, 增益系数如表 1 所示。

表 1 各方法增益系数值

谐波检测方法	增益系数
MSAI 法	$k = 0.707$
FOGI 法	$k_1 = 0.707, k = 2.828$
SOSAI 法	$k_1 = 1.414, k = 1.2$

3.1 三相理想电网下谐波电流检测性能对比

图 11 为三相理想电网电压。A 相负载电流及其 FFT 分析如图 12 所示。

可以看出, 负载电流中包含大量谐波电流, 从而导致负载电流发生畸变。其总谐波失真(total harmonic distortion, THD)达到 25.06%, 远远大于 IEEE Std.929-2000 的标准中规定的当前 THD 不大于 5% 的值。

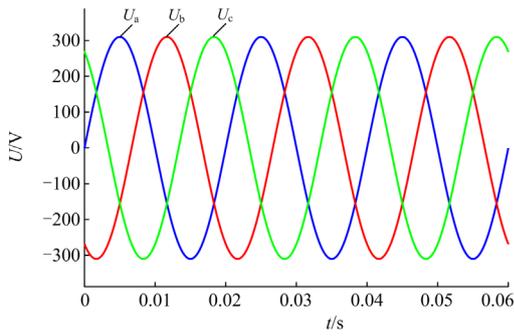


图 11 三相理想电网电压

Fig. 11 Three-phase ideal grid voltage

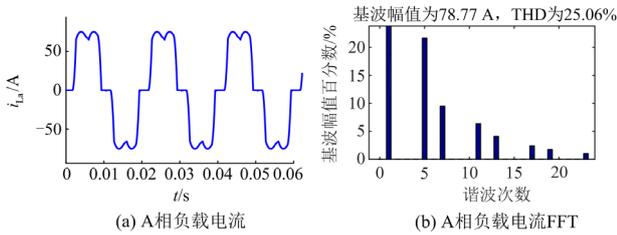


图 12 A 相负载电流及其 FFT

Fig. 12 Phase A load current and its FFT

对比图 13 及图 14 可以看出,传统 i_p-i_q 法检测的延迟比较大,响应速度很慢,在其基础上改进的 SOSAI 法、MSAI 法及 FOGI 法的动态响应性能均有所提升,3 种改进方法均能有效地补偿谐波电流,且 SOSAI 法补偿后的负载电流的 THD 值最小。由于 SOSAI 法与 FOGI 法均是级联型四阶系统,响应速度较 MSAI 法略有下降,而 SOSAI 法由于自身也能实现正负序分离,所以检测速度较 FOGI 法也略有优势,可以在不到 2 个工频周期内趋于稳定。

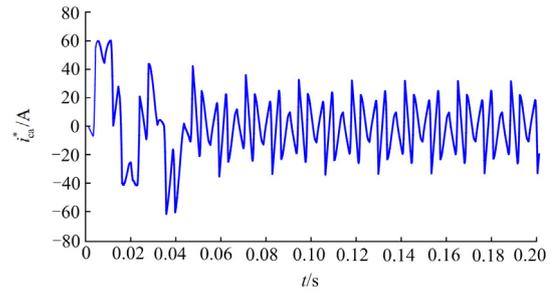


图 13 基于 i_p-i_q 法的 A 相谐波电流

Fig. 13 A-phase harmonic current based on i_p-i_q method

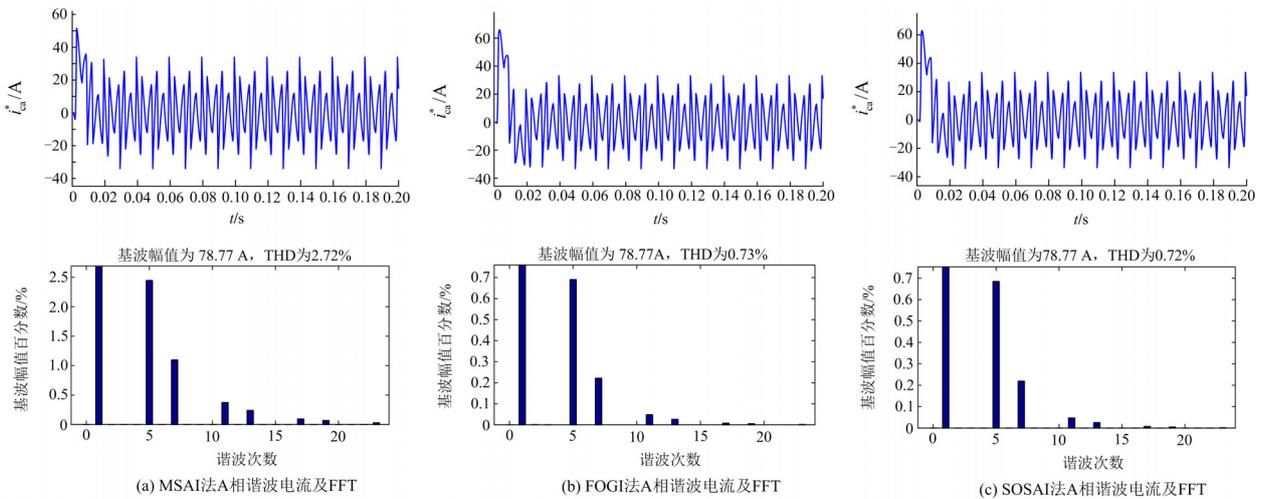


图 14 3 种谐波检测法谐波电流仿真对比

Fig. 14 Simulation and comparison of harmonic current of three harmonic detection methods

3.2 电网直流偏置下仿真对比测试

图 15 为 SOSAI 法在理想电网条件下提取到的频率及检测到的正序基波电流分量 i_{afp} 、 i_{bfp} 、 i_{cfp} 。

可以看出,由 SOSAI 锁相环提取的频率能稳定在 50 Hz, i_{afp} 、 i_{bfp} 、 i_{cfp} 基本为正弦波形,且在相位上互差 120° 。为了验证 SOSAI 在电网电压直流偏置下的效果,在电网电压中加入直流信号,分别为 $d_a = 10\text{ V}$ 、 $d_b = 8\text{ V}$ 、 $d_c = -5\text{ V}$ 。图 16 为直流偏置下电网电压及负载电流波形,由于直流分量的加

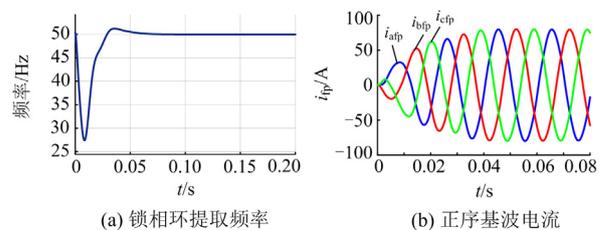


图 15 理想电网下频率及正序基波电流波形

Fig. 15 Frequency and positive sequence fundamental current waveform in ideal grid

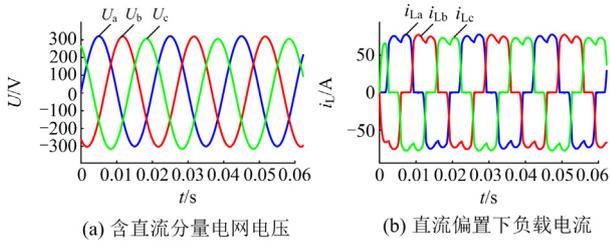


图 16 直流偏置下电网电压及负载电流

Fig. 16 Grid voltage and load current under DC bias

入, 三相电压及电流峰值不等, 波形不对称, 符合直流偏置下电网特点。

图 17 为 3 种方法的频率及正序基波电流的仿真波形。从图 17 中可以看出, 由于 MSAI 法对直流信号的衰减作用较弱, 导致无法准确提取出电网相位信息, 造成频率信号波动, 使得无法完全提取基波正序电流, 而 SOSAI 法则可以很好地克服直流偏置的影响, 很快将频率稳定在 50 Hz, 得到三相对称的正序基波电流。

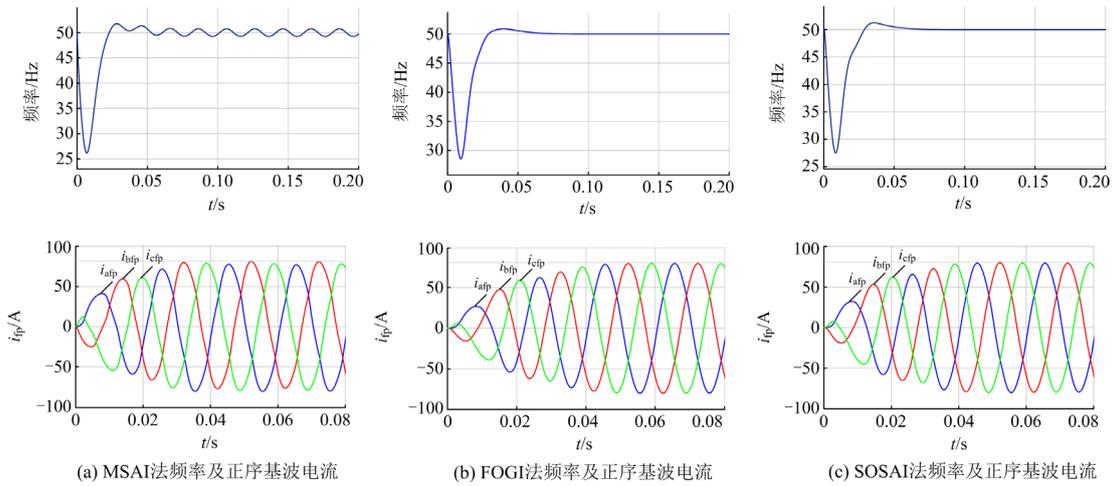


图 17 直流偏置下三种谐波检测法的频率及正序基波电流

Fig. 17 Frequency and positive-sequence fundamental current of three harmonic detection methods under DC bias

4 实验验证

为了进一步对本文所提方法进行验证, 搭建了基于 RT-LAB 实验验证平台, 其工况与仿真相同。实验波形如图 18—图 20 所示, 所有实验波形图效果与仿真结果一致。

图 18 为三相对称电网下利用 SOSAI 提取的谐波电流, 该电流很快可以达到稳定, 可作为谐波补偿的指令电流。

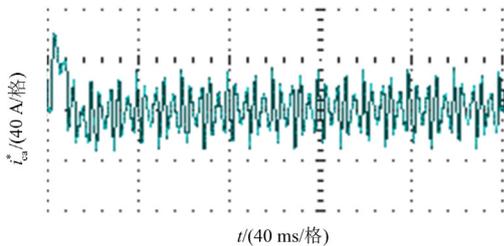


图 18 SOSAI 谐波检测实验波形

Fig. 18 SOSAI harmonic detection experimental waveform

图 19 为电网电压存在直流分量时, 利用 SOSAI 得到的频率及正序基波电流实验波形, 可以看出频

率稳定在 50 Hz, 正序基波电流接近正弦波, 进一步验证了基于 SOSAI 谐波检测法在直流偏置下的可行性。

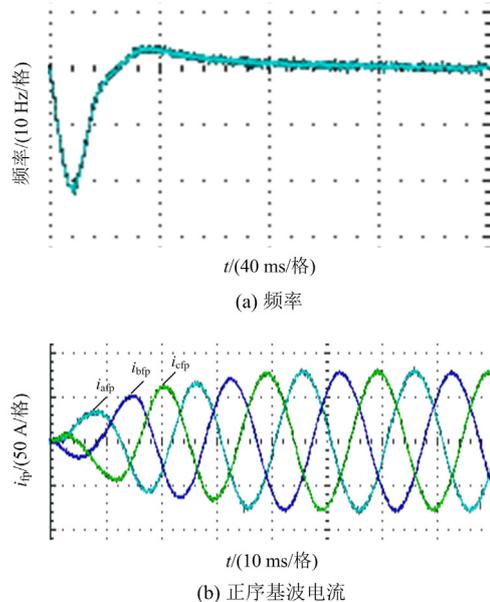


图 19 直流偏置实验波形

Fig. 19 DC bias experimental waveform

图 20(a)为实验负载的电流波形图,其中含有大量谐波电流,畸变较严重。利用 APF 来实现所检测的谐波电流的跟踪控制,将电流大小相等方向相反地注入到电网中,从而大大减少了电网中的谐波电流,其补偿后的电流波形如图 20(b)所示。

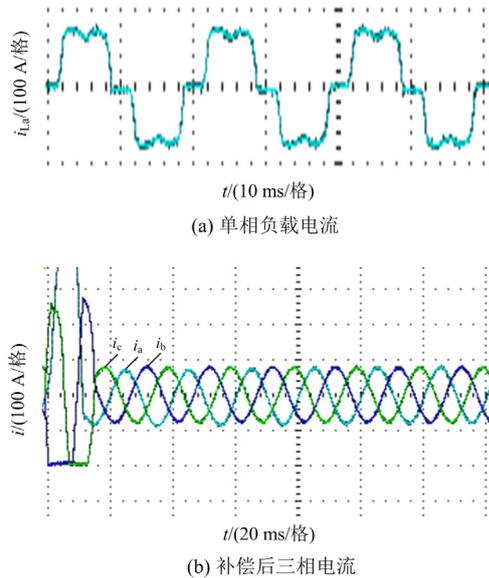


图 20 APF 补偿实验波形

Fig. 20 APF compensation experimental waveforms

5 结论

为了提高正弦幅值积分器在谐波检测中的精确度,同时克服电网电压直流偏置的影响,本文设计了一种基于新型正弦幅值积分器的谐波检测方法。该方法将二阶广义积分器与正弦幅值积分器联合组成一种新型四阶积分器,可以实现正负序分量分离,其构成锁相环能快速准确提取电网相位及频率信息,该积分器应用于 $i_p - i_q$ 谐波检测中,简化了系统结构,提升了谐波补偿能力。仿真实验表明,该方法可以很好地检测谐波电流,具有良好的性能。

参考文献

- [1] 马思棋, 王忠. 基于贝叶斯优化弹性网络回归的谐波状态估计方法[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 104-112.
MA Siqi, WANG Zhong. Harmonic state estimation method based on Bayesian optimized elastic network regression[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 104-112.
- [2] 王世雨, 李绍令, 郑征, 等. 并网逆变器超高次谐波产生与传播机理分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 80-89.
WANG Shiyu, LI Shaoling, ZHENG Zheng, et al. Analysis of generation and propagation mechanism of supraharmonic in grid-connected inverter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 80-89.
- [3] 林勇, 康佳乐, 余浩, 等. 大规模光伏发电经串补输电线路并网系统强迫次同步振荡机制[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(9): 1118-1127.
LIN Yong, KANG Jiale, YU Hao, et al. Mechanism of forced subsynchronous oscillation of large-scale photovoltaic power generation grid-connected system with series compensation transmission lines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(9): 1118-1127.
- [4] 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 supraharmonic elimination based on random carrier sinusoidal pulse width modulation for converter clusters[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 160-167.
- [5] 田莞菘, 李建国, 张雅静, 等. 基于无源控制的并网逆变器特定次谐波电流抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 215-222.
TIAN Yuansong, LI Jianguo, ZHANG Yajing, et al. Selective harmonic current suppression method for grid-connected inverters based on passivity-based control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 215-222.
- [6] 余斌, 李辉, 赖锦木, 等. 基于桥臂电流控制的模块化多电平储能系统谐波抑制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 82-92.
YU Bin, LI Hui, LAI Jinmu, et al. Harmonic suppression strategy of MMC-BESS based on arm current control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 82-92.
- [7] WANG Yang, TANG Junmiao, SI Jiandong, et al. Power quality enhancement in islanded microgrids via closed-loop adaptive virtual impedance control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 163-179.
- [8] 王昊, 黄文焘, 邵能灵, 等. 直流配网多滤波器交互影响机理分析[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 393-402.
WANG Hao, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Interaction mechanism for multiple active power filters in DC distribution networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(4): 393-402.
- [9] 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.
- [10] 商立群, 许海洋, 臧鹏, 等. 基于DFT和群谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 91-98.
SHANG Liqun, XU Haiyang, ZANG Peng, et al. A

- harmonic and interharmonic detection algorithm based on DFT and group harmonic energy recovery theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(15): 91-98.
- [11] 陶佳兰, 喻敏, 陈贵词, 等. 基于 SWT 的电力系统基波检测[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(18): 39-49.
TAO Jialan, YU Min, CHEN Guici, et al. Fundamental detection for a power system based on SWT[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(18): 39-49.
- [12] 杨旭红, 陈阳, 贾巍, 等. 基于 RBF 神经网络的电压外环滑模控制的 Vienna 整流器[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(18): 103-115.
YANG Xuhong, CHEN Yang, JIA Wei, et al. Vienna rectifier with voltage outer loop sliding mode control based on an RBF neural network[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(18): 103-115.
- [13] ABULANWAR S, CHEN Z, IOV F. Improved FRT control scheme for DFIG wind turbine connected to a weak grid[C] // 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), December 8-11, 2013, Hong Kong, China: 1-6.
- [14] ZHOU Y, SHAO W, CHENG Y, et al. An improved LMS harmonic current detection algorithm[C] // 2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), March 26-29, 2021, Chengdu, China: 50-54.
- [15] VAZQUZE S, SANCHEZ J A, REYES M R, et al. Adaptive vectorial filter for grid synchronization of power converters under unbalanced and/or distorted grid conditions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1355-1367.
- [16] XU Maoguang, SANG Zhongqing, LI Xiang, et al. An observer-based harmonic extraction method with front SOGI[J]. *Machines*, 2022, 10(2): 95.
- [17] YADA H K, KUMAR A S, PRAKASH K. Improved dual-SOGI control for three-phase unified power quality conditioner under distorted grid and load conditions[C] // TENCON 2017-2017 IEEE Region 10 Conference, November 5-8, 2017, Penang, Malaysia: 2536-2541.
- [18] 武健, 张彩红, 王蕊, 等. 基于三阶广义积分器的谐波检测算法[J]. *电源学报*, 2018, 16(2): 131-136.
WU Jian, ZHANG Caihong, WANG Rui, et al. Harmonic detection algorithm based on third-order generalized-integrator[J]. *Journal of Power Supply*, 2018, 16(2): 131-136.
- [19] XIN Zhen, WANG Xiongfei, QIN Zian, An improved second-order generalized integrator based quadrature signal generator[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(12): 8068-8073.
- [20] 吕世轩, 郑丽君, 王子鹏, 等. 一种穿越频率自适应的四阶广义积分锁频环[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4142-4151.
LÜ Shixuan, ZHENG Lijun, WANG Zipeng, et al. Fourth-order generalized integrator frequency-locked loop with crossover frequency adaptation[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 4142-4151.
- [21] 杜雄, 王国宁, 孙鹏菊, 等. 采用正弦幅值积分器的电网基波电压同步信号检测[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(36): 104-111, 15.
DU Xiong, WANG Guoning, SUN Pengju, et al. Synchronization signal detection for grid fundamental voltage through employing sinusoidal amplitude integrators[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 104-111, 15.
- [22] 杜雄, 王国宁, 孙鹏菊, 等. 直流分量对正弦幅值积分器同步信号检测方法的影响及其抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(24): 4084-4091.
DU Xiong, WANG Guoning, SUN Pengju, et al. Effect analysis and eliminating scheme for DC components to sinusoidal amplitude integrators based synchronization signal detection method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(24): 4084-4091.
- [23] 杜雄, 刘延东, 王国宁, 等. 采用正弦幅值积分器的单同步参考坐标系同步信号检测方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(8): 167-175.
DU Xiong, LIU Yandong, WANG Guoning, et al. Synchronization signal detection method in synchronous reference frame through sinusoidal amplitude integrators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(8): 167-175.
- [24] 李建霞, 闫朝阳, 代会文, 等. 基于正弦幅值积分器的全电流谐波检测方法[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 172-180.
LI Jianxia, YAN Chaoyang, DAI Huiwen, et al. Full current harmonic detection method based on sinusoidal amplifier[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(2): 172-180.
- [25] 徐青青, 陈莹, 刘莉, 等. 一种双正弦幅值积分器解耦锁相环的设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 132-137.
XU Qingqing, CHEN Ying, LIU Li, et al. Design of decoupled double sinusoidal amplitude integrator phase-locked loop[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 132-137.

收稿日期: 2023-07-07 修回日期: 2023-10-26

作者简介:

苗长新(1976—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为无功补偿与谐波治理、电能质量的控制及应用;

祝宇航(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为谐波抑制与无功补偿。E-mail: a18438698116@163.com

(编辑 张颖)