

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210756

基于优化分裂基FFT算法的APF谐波检测策略*

上官甲天¹ 王裕²

(1. 国网北京市电力公司房山供电公司 北京 102401; 2. 广东工业大学自动化学院 广州 510006)

摘要: 有源电力滤波器(APF)是一种具备动态谐波抑制和无功补偿功能的新型电力电子装置,对电流谐波实时准确快速检测是决定 APF 性能的一个重要环节。快速傅立叶变换(FFT)是目前应用广泛的谐波检测方法。然而,传统 FFT 算法计算复杂、存在时间延迟、实时性差、容受电网电压波形畸变或频率波动的影响,影响谐波检测的准确性和效率,降低 APF 的补偿效果和综合性能。由此,本文提出一种基于分裂基 FFT 算法的 APF 谐波检测与补偿策略,通过蝶形运算对偶序号输入使用基-2 算法,对奇序号输入使用基-4 算法,比传统基-2 算法减少 10% 以上运算量,比传统基-4 算法减少 2% 以上运算量,可有效降低 FFT 算法复杂程度,增强谐波检测实时性;采用汉宁窗对分裂基 FFT 算法进行优化,提升谐波检测精度与抗干扰能力,保证 APF 谐波检测与补偿效果和整体性能。通过三相四线制 APF 样机实验验证了所提谐波检测与补偿策略的正确性和有效性,在负载突变的情况下,重新到达新稳态的调节时间可缩短约 25%。

关键词: 有源电力滤波器;分裂基 FFT;汉宁窗;谐波检测;补偿策略

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

The harmonic detection strategy for APF based on the optimized split-radix FFT algorithm

Shangguan Jiatian¹ Wang Yu²

(1. Beijing Fangshan Power Supply Company, State Grid, Beijing 102401, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The active power filter (APF) is a new type of power electronic device with the functions of dynamic harmonic suppression and reactive power compensation. The accurate and rapid detection of current harmonics in real time is an important part of determining the performance of APF. The fast Fourier transform (FFT) is a widely used harmonic detection method. However, the conventional FFT algorithm is complicated in calculation, has time delay, poor real-time performance, and is easily affected by grid voltage waveform distortion or frequency fluctuation, which affects the accuracy and efficiency of harmonic detection, thereby reducing the compensation effect and comprehensive performance of APF. Therefore, this paper proposes an APF harmonic detection and compensation strategy based on split-radix FFT algorithm. Through butterfly operation, the radix-2 algorithm is used for the input of even numbers, and the radix-4 algorithm is used for the input of odd numbers, effectively reducing the complexity of the FFT algorithm, enhancing the real-time detection of harmonics. The split-base FFT algorithm is optimized by using Kaiser window to improve the harmonic detection accuracy and anti-interference ability of harmonic detection, ensuring the harmonic detection and compensation effects and overall performance. The correctness and effectiveness of the proposed harmonic detection strategy are verified by the three-phase four-wire APF prototype experiment, and the conditioning time to re-reach the new steady-state can be shortened by 25% in the case of sudden load changes.

Keywords: active power filter; split-radix FFT; hanning window; harmonic detection; compensation strategy

0 引言

随着可再生能源的大规模利用以及电力电子技术的飞

速发展,越来越多的电力电子装置被广泛应用到电力系统各个领域,这些负载的非线性、冲击性和不平衡的用电特性,使电网中暂态冲击、无功功率、高次谐波及三相不平衡

收稿日期:2022-07-21

* 基金项目:国家自然科学基金(61802070)、广东省自然科学基金(2020A1515010766,2021A1515012398)项目资助

问题日趋严重,对电网的供电质量造成了严重影响^[1-2]。因此,消除电网中的谐波污染已成为电能质量研究中的一个重要课题^[3]。有源电力滤波器(active power filter, APF)是解决电能质量问题的有效装置,可以补偿电网谐波和无功功率、提高电能质量、增强电网的可靠性和稳定性,其良好的滤波性引起了人们的广泛关注^[4-5]。

APF 系统研究和应用的关键技术包括^[6-7]: 1) 谐波指令电流运算模块。根据 APF 的补偿目标实时准确的检测出补偿对象中的谐波分量,得出需要补偿的电流指令信号。2) 补偿电流控制模块。根据指令补偿电流和实际补偿电流之间的差值,得出控制主电路各个开关管的通断信号,保证 APF 主电路输出补偿电流严格跟踪指令补偿电流。3) 补偿电流调制技术。电流控制环节得到的电流控制信号需经过 PWM 调制,产生相应的开关驱动信号,控制主电路各个开关的通断,从而产生跟踪指令电流的补偿电流。其调制算法直接关系到补偿电流的性能,从而影响 APF 补偿果。4) 直流侧电压控制模块。控制 APF 直流侧电压维持在设定的电压水平,保证系统的正常运行。

其中,对电流谐波的实时准确快速检测是决定 APF 性能的一个重要环节。为了实现 APF 谐波检测与补偿的功能,必须设计谐波电流检测环节,实时准确地检测出负载中的谐波电流^[8-9]。目前,常用的谐波检测算法有基于瞬时无功功率理论的 p-q-r 法,ip-iq 法, FBD 法,离散傅里叶变换法以及自适应谐波检测法等^[10-11]。其中,基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的谐波检测方法是当今应用广泛的一种方法,其主要原理就是把时域谐波信号变换成频域信号,具有原理简单、实现方便、应用灵活等优点^[12]。然而,传统 FFT 谐波分析方法可能存在频谱泄漏和栅栏效应,影响测量的准确性^[13-14]。虽然已有大量的研究工作通过增加窗函数、混合小波变换等方法降低频谱泄漏。但是,这些做法普遍存在计算量大、计算精度不高的问题,在电网频率波动等复杂工况下谐波检测准确度也较低^[15 16]。

分裂基 FFT 算法由 Dohamel 和 Hollmann 提出,最常用的是基 2-和基-4 算法,使得 FFT 的运算效率得到进一步提高^[17]。目前,分裂基 FFT 及其相关改进算法已被应用于信号快速捕获、语音识别和图像识别等领域,取得了良好的应用效果^[18-20]。然而,目前分裂基 FFT 算法在 APF 谐波检测与补偿领域仍未进行深入的理论探讨和应用研究。因此,本文提出一种基于分裂基 FFT 算法的 APF 谐波检测与补偿策略,有效减少系统运算量,节省运算时间,节省存储单元,提高谐波检测的效率;此外,采用分贝波动最小且可调性较强的汉宁窗进行算法优化,有效提高谐波测量的精度,提升谐波检测的抗干扰能力与可靠性,从而提高 APF 谐波抑制效果和总体性能。本文的研究将为 APF 谐波检测提供一种快速高效方法,也将拓展分裂基 FFT 的应用范畴,具有理论与应用价值。

1 APF 系统的谐波检测与补偿

常用的三相四线制并联型电容中分式 APF 系统主电路如图 1 所示。图中, u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为三相电源电压, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为三相电源电流,非线性负载为三相不控整流桥接纯电阻 R_L , i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} 是由非线性负载引起的负载电流; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为逆变器输出电压,产生逆变器输出补偿电流 i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 经过 LCL 滤波器注入电网;由 L_C, L_G, C_F 组成的 LCL 滤波器用来滤除开关频率处的谐波, R_d 用于抑制 LCL 滤波器在共振频率的共振峰并保持系统的稳定。传统 APF 通常要求补偿的是 50 次以内谐波,这意味着只需要考虑频率低于 2.5 kHz 范围的谐波检测与补偿。此外, LCL 滤波器在低于 2.5 kHz 的频率范围内的性能与单电感几乎一致,因此 LCL 滤波器可等效为单一电感值 L 。APF 直流侧 $C_{dcu}, C_{dcl}, U_{dcu}, U_{dcl}$ 分别表示主电路直流侧的上下电容容量与电压值,其直流侧的总电压值为 $U_{dc} = U_{dcu} + U_{dcl}$ 。

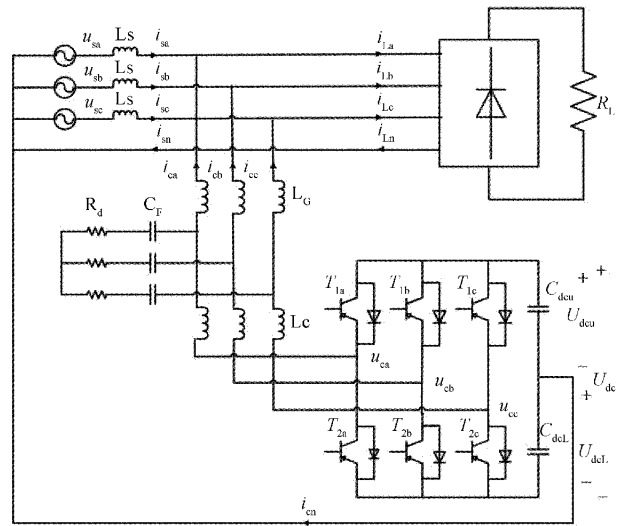


图 1 三相四线制 APF 拓扑结构图

APF 主要由谐波指令电流运算模块、补偿电流控制模块、直流侧电压控制模块、变流器主电路模块和必要的保护及辅助电路等部分组成,图 2 为并联型 APF 系统结构图^[21]。由图 2,根据基尔霍夫定理可得:

$$i_s = i_L + i_C \tag{1}$$

非线性负载产生的负载电流 i_L 由负载基波电流 i_{L1} 及谐波电流 i_{Lh} 组成:

$$i_L = i_{L1} + i_{Lh} \tag{2}$$

通过谐波电流检测电路,以检测到负载电流中的谐波分量 i_{Lh} 作为输出补偿指令电流,即:

$$i_C = -i_{Lh} \tag{3}$$

控制 APF 变流器主电路中开关管的通断,在变流器交流侧产生与谐波电流大小相等、反向相反的补偿电流 i_C 注入电网中,抵消负载电流中的谐波电流,从而抑制谐波分量

注入电网,以免造成谐波污染。

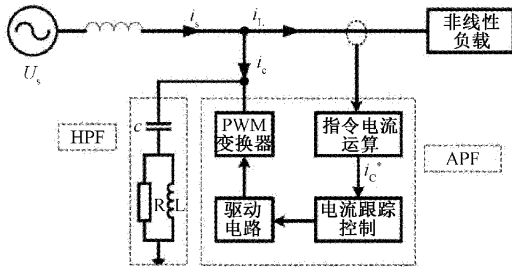


图2 并联型 APF 系统结构图

因此,快速精确地检测负载的谐波电流是 APF 的关键技术,APF 谐波补偿实现的前提就是谐波电流检测环节能实时准确地检测出负载谐波电流。因此,谐波电流检测算法的快速性和准确性将直接影响到 APF 的补偿效果和总体性能^[22]。

2 基于分裂基 FFT 算法的 APF 谐波检测

2.1 分裂基 FFT 算法

分裂基 FFT 算法的基本思路是对偶序号输出使用基-2 算法,对奇序号输出使用基-4 算法。分裂基算法在目前已知的所有针对 $N = 2^L$ (L 为正整数) 点输入的算法中具有最少的乘法次数和加法次数,并且具有和基-2 FFT 算法同样好的同址运算结构,所需乘法次数接近理论上的最小值。因此,分裂基被认为是一种实用高效的 FFT 算法。

分裂基 FFT 算法要求序列次数 N 为 2 的整次幂,即 $N = 2^L$,由此可得:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (4)$$

由式(4),将偶数部分利用基-2 算法计算,奇数部分利用基-4 算法,可将 $x(n)$ 分解成 3 个子序列:

$$\begin{aligned} x_1(a) &= x(2a), 0 \leq a \leq \frac{N}{2} - 1 \\ x_2(b) &= x(4b + 1), 0 \leq b \leq \frac{N}{4} - 1 \\ x_3(c) &= x(4c + 3), 0 \leq c \leq \frac{N}{4} - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

利用旋转因子的周期性和对称性,将式(5)代入式(4)可得:

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{a=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2a)W_N^{2ak} + \sum_{b=0}^{\frac{N}{4}-1} x(4b + 1)W_N^{(4b+1)k} + \\ &\sum_{c=0}^{\frac{N}{4}-1} x(4c + 3)W_N^{(4c+3)k} = \sum_{a=0}^{\frac{N}{2}-1} x_1(a)W_{N/2}^{ak} + W_N^k \sum_{b=0}^{\frac{N}{4}-1} x_2(b)W_{N/4}^{bk} + \\ &W_N^{3k} \sum_{c=0}^{\frac{N}{4}-1} x_3(c)W_{N/4}^{ck} = X_1(k) + W_N^k X_2(k) + W_N^{3k} X_3(k) \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, $X_1(k)$ 为偶序号的 $x(n)$ 组成的 $N/2$ 点 DFT, $X_2(k)$ 和 $X_3(k)$ 为奇序号 $x(n)$ 组成的 $N/4$ 点 FFT,而 $X(k)$ 则为 N 点 FFT。此外,一个 N 点序列

$x(n)$ 的 N 点 FFT 可以分解成 1 个 $N/2$ 点 FFT 和 2 个 $N/4$ 点 FFT。分解后既包含基-2 部分,又有基-4 部分。基-2 部分 $x(2a)$ 的奇数点部分又进一步按基-4 抽取分解,而基-4 部分的偶数点部分又进一步按基-2 抽取分解。由此,分裂基 FFT 算法的 N 点 FFT 一次分解的蝶形流如图 3 所示。

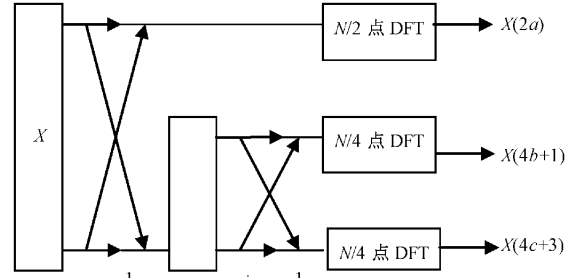


图3 分裂基 FFT 算法分解蝶形流程

第一次分解完成后,所得的 $N/2$ 点 FFT 又可用 $N/8$ 个蝶形运算分解成 1 个 $N/4$ 点 FFT 和 2 个 $N/8$ 点 FFT, 2 个 $N/4$ 点 FFT 又可以分别用 $N/16$ 个蝶形运算分解成一个 $N/8$ 点 FFT 和 2 个 $N/16$ 点 FFT。以此类推的分解下去,直至将序列 $x(n)$ 分解为 4 点或 2 点 FFT,完成序列 $x(n)$ 的 N 点 FFT 的运算。

2.2 基于汉宁窗的优化分裂基 FFT

FFT 算法有很好的频域特性,但无时域局域特性,且频谱泄漏和栅栏效应会影响检测结果,造成谐波检测精度达不到相关标准。为了减小所产生的误差,通常利用加窗插值法对信号相位和幅值进行修正,常用的窗函数有矩形窗、布莱克曼窗、海明窗、汉宁窗。一般而言,旁瓣峰值电平小且旁瓣渐近衰减速率大的窗函数可以有效地抑制频谱泄漏^[23]。其中,汉宁窗函数可以灵活调节采样长度,使得分析电网信号时谐波间泄漏减少;相比其他窗函数计算量较小,易于算法实现,进一步提升检测效率。

由此,本文采用汉宁窗函数来优化分裂基 FFT 算法。根据通用优化原则推导得到最大旁瓣衰落速度的组合余弦窗,实现加窗插值 FFT 的电力谐波分析。采用双峰谱线插值修正和多项式逼近相结合的方法,确定汉宁窗修正公式为:

$$\omega(n) = 0.5 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (7)$$

其中, $n = 0, 1, \dots, N - 1$ 。

插值公式为:

$$\begin{cases} \beta = \frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} \\ \alpha = 1.5\beta \\ A = N^{-1}(y_2 + y_1)(a + ba^2 + ca^4 + da^6) \end{cases} \quad (8)$$

其中, y_1 和 y_2 分别为峰值点附近幅度最大和次最大谱线幅值,且 a, b, c, d 的取值分别为 5.558 892 07, 2.984 105 12, 1.545 924 09, 0.455 102 49。

采用本文所提出的分裂基 FFT 与传统基-2 和基-4 的 FFT 算法运算量对比如表 1 所示。由表中可以看出,对于不同采样数量 ($N=64, 256, 1\ 024, 4\ 096, \dots$),分裂基 FFT 的运算量都比传统基-2 和基-4 FFT 运算量小,且对比基-2 FFT 的运算量降幅尤为明显。此外,随着采样点数的增加,分裂基 FFT 对比传统 FFT 算法的运算量降幅逐渐增大。由此,采用本文提出的优化分裂基 FFT 算法,可以有效降低 APF 谐波检测的运算量,节省运算时间,节省存储单元,提高谐波检测的快速性和效率。

2.3 基于优化分裂基 FFT 的 APF 谐波检测

基于优化分裂基 FFT 方法的 APF 谐波检测程序流程如图 4 所示。分裂基 FFT 输出 $X(n)$ 中存放了 N 个复数, N 为周期采样点数,每一个点对应一个频率点。分裂基 FFT 结果的第一个点的模值为 $X(1)/N$,表示直流分量;某采样点 n 用 $X(n) = a + bi$ 表示,其模值为: $M = 2\sqrt{a^2 + b^2}/N$;相角为 $\varphi = \arctan(b, a)$;其频率为 $F(n) = (n-1)Fs/N$ 。由于 FFT 结果的对称性,通常只使用前半部分的结果,即小于采样频率一半的结果反推算输入信号时域表达式为:

$$i_n = \sum_{k=1}^{N/2} i_n(n) n = a, b, c \quad (9)$$

由此,所求出的 i_{nh} 即为 $2 \sim N/2$ 次谐波的总含量,检测的谐波最高次为 $N/2$ 次。

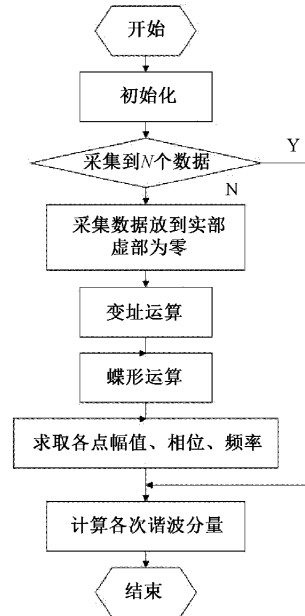


图 4 基于优化分裂基 FFT 的 APF 谐波检测流程

表 1 优化分裂基 FFT 与常规 FFT 运算次数比较

FFT 算法	$N=64$	$N=256$	$N=1\ 024$	$N=4\ 096$
传统基-2	1 296	7 696	40 976	204 816
传统基-4	1 184	6 880	36 192	180 082
优化分裂基	1 160	6 664	34 824	172 040
分裂基对比基 2 运算量	降低 10.49%	降低 13.41%	降低 15.01%	降低 16%
分裂基对比基 4 运算量	降低 2.03%	降低 3.14%	降低 3.78%	降低 4.47%

3 实验验证与分析

为了验证所提出算法的可行性和优越性,搭建了一台 33 kW 的三相四线制电容中分式并联型 APF 进行实验验证,如图 5 所示,其系统参数如表 2 所示。非线性负载为三相整流桥加电阻器,APF 样机采用的检测方法分别为分裂基 FFT 算法和传统瞬时无功功率法,以对比分析所提出算法和传统算法的优越性;直流侧电压和均压环均采用 PI 控制,电流控制则采用基于 PI 与重复控制并联的复合控制策略。

表 2 实验系统参数

电源电压	U_{SN}	220 V
电网频率	f	50 Hz
开关频率	f_s	9 600 Hz
输出滤波电感	L	0.45 mH
直流侧电容	$C_{del} C_{det.}$	10 000 μ F
直流侧电压	U_{dc}	750 V
可变负载电阻	R_L	15 Ω

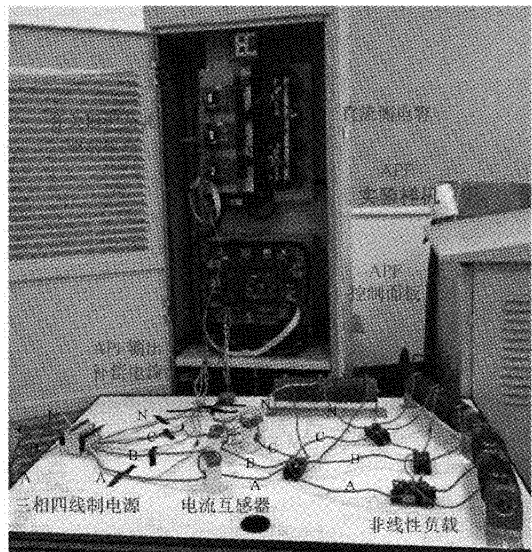


图 5 APF 实验样机

图6为采用本文所提出的优化分裂基FFT以及传统瞬时无功功率谐波检测算法时APF电压电流波形。由图6(a)可看出,采用优化分裂基FFT谐波检测算法,通过谐波检测算法形成的APF直流侧电压环控制能正常工作,直流侧电压 U_{dc} 稳定在预设的750V而且波动很小,直流侧电压实现了稳定控制。以分裂基FFT谐波检测算法得出的谐波电流为指令,APF输出补偿电流 I_f 很好地补偿了负载电流谐波,电源电流 I_s 经补偿后接近正弦波,其THD值由补偿前的21.35%下降至补偿后的4.21%,补偿效果符合国标的标准。由此,优化分裂基FFT谐波检测算法能够实时准确的提取负载谐波分量,APF以此为基准输出补偿电流,实现谐波精确补偿,保证APF正常运行和补偿性能。此外,采用传统瞬时无功功率算法APF能有效补偿谐波,补偿后电源电流THD值为4.89%,如图6(b)所示。对比采用分裂基FFT与传统瞬时无功功率谐波检测算法,APF稳态补偿效果只实现小幅改进,这是因为分裂基FFT优势在于算法简洁,运算量小,快速性好,在稳态效果改善上体现得并不明显。

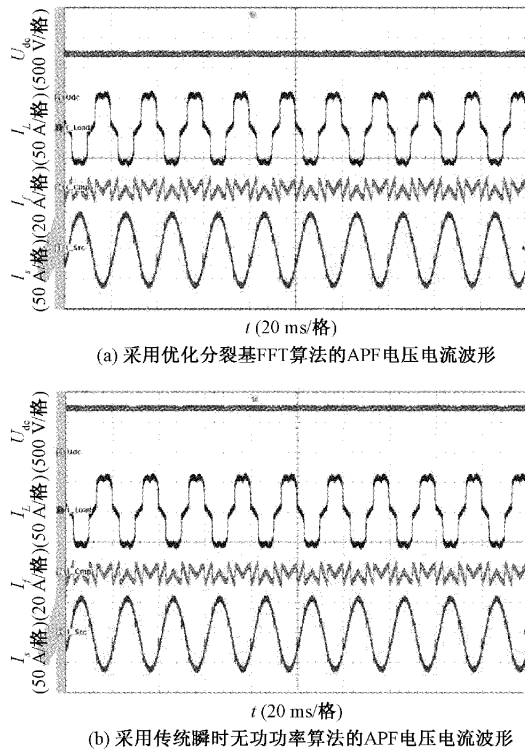


图6 APF稳态实验波形

为了验证本文所提出的优化分裂基FFT算法与传统基于瞬时无功功率算法在谐波检测和补偿方面的快速性和可靠性的性能比较,在负载电阻从 $15\ \Omega$ 突变至 $7.5\ \Omega$ 的情况下,在APF样机上分别采用两种谐波检测算法进行实验,如图7所示。由图7可知,当负载发生突变时,采用传统瞬时无功功率谐波检测算法,APF直流侧电压轻微波动,输出补偿电流因负载突变产生较大的波动,补偿后的

电源电流在波峰处产生小幅畸变,经过约 $1/2$ 个开关周期重新达到稳态,如图7(a)所示。采用本文所提出优化分裂基FFT谐波检测算法,APF输出补偿电流因负载突变产生的超调量更小,经过约 $3/8$ 个开关周期重新达到稳态,调节时间可缩短约25%,能更快到达新的稳态。此外,补偿后电源电流在波峰处波形更圆滑,电流换相处尖峰更小,补偿效果更好。由此,优化分裂基FFT谐波检测算法可以更实时准确的跟踪并检测出谐波电流的变化,具有更好的动态响应性能,保证APF在采用相同电压和电流控制器情况下,APF输出补偿电流能更迅速的跟上谐波变化,更准确高效补偿系统谐波,提高谐波补偿精度和可靠性。

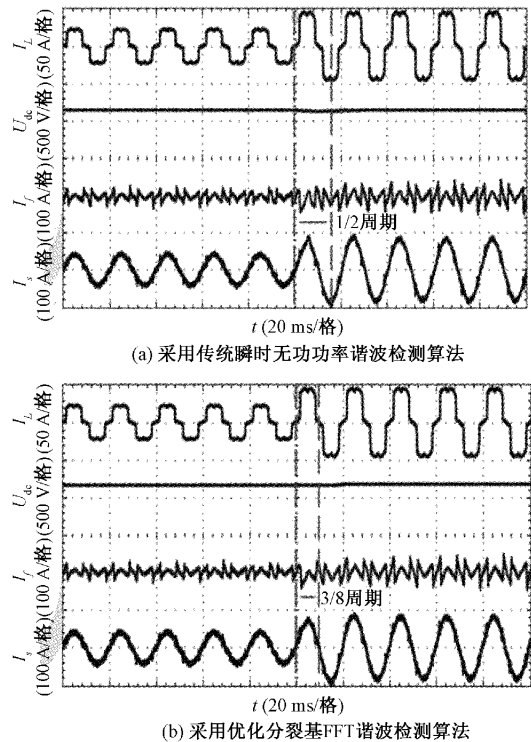


图7 负载突变时采用两种谐波检测算法的APF实验波形

为了进一步验证本文所提出优化分裂基FFT的快速性和实时性,在负载突变和电源电压突变两种运行情况下,采用传统瞬时无功功率、传统FFT、优化分裂基FFT 3种谐波检测算法,对APF谐波检测和补偿达到新稳态的调节时间进行实验,如图8所示。由图8(a)可知,在多种不同程度负载突变情况下,采用优化分裂基FFT谐波检测算法,APF达到新稳态的调节时间均比采用传统瞬时无功功率和传统FFT谐波检测算法的APF达到新稳态的调节时间为短,验证了优化分裂基FFT的快速性和实时性。此外,当电源电压发生多种不同程度负载突变情况下,采用优化分裂基FFT谐波检测算法,APF适应新运行状况下达到新稳态的调节时间也比采用传统瞬时无功功率和传统FFT谐波检测算法的APF达到新稳态的调节时间为短,从另一个方面验证了本文所提出的优化分裂基FFT算法的抗干扰性和系统适应性。

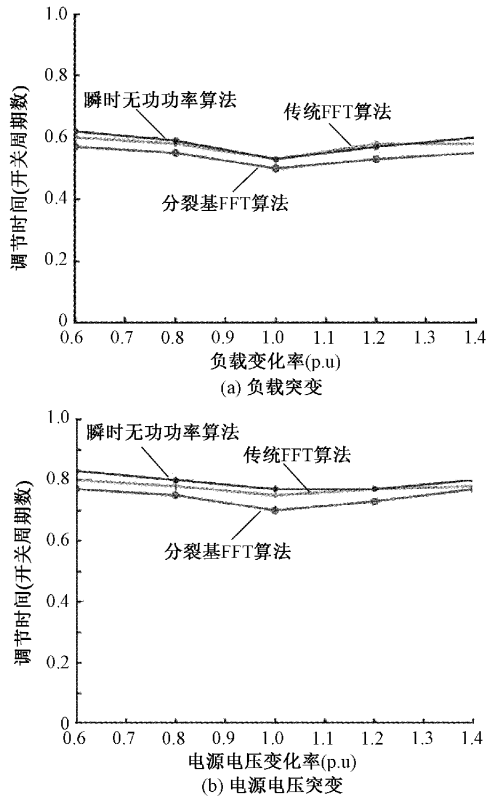


图 8 电源、负载突变时采用 3 种谐波检测算法的调节时间

4 结 论

FFT 算法是目前应用广泛的谐波检测方法,FFT 算法纯频域分析可选择任意需消除谐波次数。然而,传统 FFT 算法计算复杂、存在时间延迟、实时性差、容易受电网电压波形畸变或频率波动的影响,影响了谐波检测的准确性和效率,进而降低 APF 的补偿效果和综合性能。因此,本文提出一种基于优化分裂基 FFT 算法的 APF 谐波检测与补偿策略,可有效降低 FFT 算法复杂程度,增强谐波检测实时性,提升谐波检测精度与抗干扰能力,保证 APF 的谐波检测与补偿效果、可靠性和整体性能。通过三相四线制 APF 样机实验验证了所提谐波检测与补偿策略的有效性和优越性。此外,本文所提出的优化分裂基 FFT 算法也可以尝试应用于其他谐波与无功检测与补偿设备,促进其性能改善和工程应用。

参考文献

[1] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
 [2] 陈露洁,徐式蕴,孙华东,等. 高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2297-2310.
 [3] 魏学良,程婷. 谐波治理设备在供电系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 80-83.

[4] 马立新,项庆,张海兵,等. APF 运行实时监控系统的的设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 152-155.
 [5] 杨帆,马立新. 改进的并联型 H 桥 APF 控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(10): 58-62.
 [6] 黄海宏,高瑞,江念涛,等. APF 二次脉动的指令电流放大效应及其影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(6): 968-973.
 [7] 李镇,潘若妍,朱霄,等. 改进天牛须算法优化自抗扰 APF 直流侧电压控制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 72-77.
 [8] 吴雷,夏世平. 并联型 APF 比例谐振控制优化研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12): 49-53.
 [9] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
 [10] 蔡星月,高云鹏,李云峰,等. 基于自适应 TLS-ESPRIT 和改进全相位多密集谱间谐波检测[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 199-207.
 [11] 陈和洋,吴文宣,郑文迪,等. 电力系统谐波检测方法综述[J]. 电气技术, 2019, 20(9): 1-6.
 [12] WANG R, HUANG W, HU B, et al, Harmonic detection for active power filter based on two-step improved EEMD [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-10.
 [13] 沈廷鳌,管金发,华卫星,等. 基于 FFT 的极端频率信号相位差测量方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 6-10.
 [14] 李一然,田立军,吴勇,等. 基于双窗全相位 FFT 双谱线插值的谐波和间谐波分析算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 55-61.
 [15] 王娟,张尔东,于广艳. 基于加窗 FFT 和 HWT 算法的谐波检测系统设计[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 189-194.
 [16] 李振华,胡廷和,杜亚伟,等. 一种优化窗函数及其在电网谐波检测中的应用分析[J]. 高压电器, 2020, 56(10): 239-246.
 [17] 伍家松,达臻,魏黎明,等. 基于分裂基-2/(2a)FFT 算法的卷积神经网络加速性能的研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 285-292.
 [18] 曾庆喜,唐琳琳,裴凌,等. 基于分裂基 FFT 的 L1 辅助 L2C 双频 GPS 信号快速捕获[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(7): 1638-1643.
 [19] QIAN Z, MARGALA M. Low-power split-radix FFT processors using radix-2 butterfly units [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2016, 24(9): 3008-3012.
 [20] XUE D, DEBRUNNER L, DEBRUNNER V, et al,

Split-radix algorithm for the discrete hirschman transform[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2022, 29: 199-203.

- [21] 王星华,周亚武,许炫壕. 配电系统谐波检测方法研究综述[J]. 宁夏电力, 2017(4): 15-21.
- [22] 冬雷,田昊雷,肖辅荣,等. 基于有源电力滤波与谐波补偿的孤岛检测方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 133-138.
- [23] 陈至豪,王立德,王冲,等. 基于组合余弦优化窗四

谱线插值FFT的电力谐波分析方法[J]. 电网技术, 2020,44(3):1105-1113.

作者简介

上官甲天,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力电子技术,电力市场分析与管理。

E-mail: jiatian1984@126.com

王裕(通信作者),博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电力电子技术,新能源发电与储能系统运行与控制。

E-mail: yuwang@gdut.edu.cn