

双环重复控制三相四线制有源电力滤波器

黄海宏¹,王 钰¹,许若冰²,杨佳能¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009;2. 国网南京供电公司,江苏 南京 210019)

摘要: 采用一种适合于三相四线制不对称负载的谐波检测方法,使得逆变器仅需补偿无功及谐波电流而降低了开关器件容量的选取值。将比例调节与重复控制理论相结合,设计了电流双环重复控制系统,提高了电流环跟踪的快速性与稳态精度。通过 MATLAB 仿真验证了该谐波检测算法可顺利分离出各相无功及谐波电流,且控制算法具有快速和高稳定性。通过搭载 DSP 芯片作为主控系统的实验平台验证实际补偿效果,三相网侧电流谐波畸变率分别由补偿前的 54.4%、59.2%、65.2% 降低至补偿后的 2.6%、3.2%、4.4%,证明所提出的检测及控制方法具有实用性和高稳定性。

关键词: 三相四线制; 有源电力滤波器; 谐波检测; 重复控制; 双环; 谐波分析; 补偿

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.007

0 引言

随着现代工业的发展,非线性负载开始广泛使用,谐波及无功电流对电网的污染已不容忽视,有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)的诞生为此提供了有效的解决方案。目前三相三线制 APF 应用已较为成熟,而对于我国大多采用三相四线制线路的市政电网,三相四线制并联 APF^[1-2]由于能够补偿网侧三相和中线上谐波及无功电流,开始逐步受到关注。

目前,APF 电网电流检测算法主要有如下 4 种。
① 基于瞬时无功功率理论的实时检测法^[3],其主要包含 $p-q$ 法和 i_p-i_q 法。这 2 种方法补偿效果都比较明显,但由于其原理是建立在对称的三相三线制电路基础上,三相电流不含零序分量,故而在应用广泛的三相四线制线路中并不适用。
② 基于傅里叶级数的变换法^[4]。该方法具有较高的检测精度而且可以对基波和指定谐波进行检测,但由于对周期数据的分析,不适宜快速实时控制。
③ 基于 $dq0$ 坐标变换的广义瞬时无功功率法^[5]。由于该方法可对零序电流进行运算变换,故而适用于三相四线系统。假设应用该方法进行同步坐标变换并断开瞬时无功 q 轴滤波通道得到指令电流,其补偿后三相网侧电流只含对称的基波正序有功分量且中线电流为 0,这将导致 APF 向网侧注入大量基波电流不对称分量,严重增加了开关器件流通电流大小。
④ 基于瞬时无功功率理论改进的单相谐波检测方法^[6],该方法在单相 APF 中有过应用。本文考虑到三相四线制系统可以看作 3 个依次滞后 120° 的单相系统组合,故而可分别通过低通滤波器获得每相的基波有功电流,使得

APF 仅需补偿无功及谐波电流,并使中线补偿后只含基波电流。而 FBD(Fryze Buchholz Dpenbrock)^[7]、自适应、神经网络检测、小波检测等其他检测手段也曾是 APF 研究的热点^[8-10]。

在控制算法层面,基于 PI 调节的三角载波比较控制法在传统的 APF 控制中被广泛应用,但由于 PI 控制只可以无静差地跟踪直流信号,该电流控制模式在实际的 APF 应用中并不能获得较满意的稳态特性。基于内模原理的重复控制理论上能够在谐波频率处获得无穷大增益^[11],提高稳态特性,但是动态性能较差。为此本文总结其他改进方法^[12-15]并简化得出了一种双环重复控制系统,将比例控制的快速性引入,使得整个 APF 系统能够获得快速高稳态的补偿性能。

在此基础上,在实验室搭载了一台 380 V 三相四线制 APF,并采用 TI 公司的 TMS320F2812DSP 芯片作为主控系统,通过仿真和实验验证了本文提出方法的补偿效果。

1 谐波检测算法选择

对于三相四线制 APF,目前应用较多的是基于 $dq0$ 坐标变换的检测方法,即引言提及的方法③,其检测原理框图如图 1 所示。

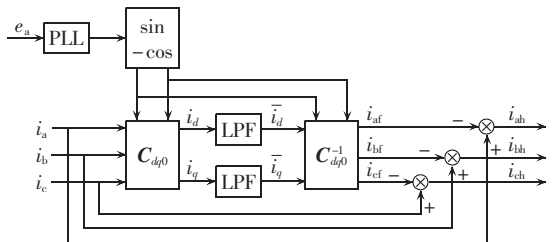


图 1 基于 $dq0$ 坐标变换的检测原理框图

Fig.1 Schematic diagram of detection based on $dq0$ coordinates transformation

通过图 1 可以看出,基于 $dq0$ 坐标变换的检测方法是通过同步坐标变换,将 abc 坐标系下的三相负载电流变换到 $dq0$ 同步旋转坐标系中,原三相基波正序电流分量转成 $dq0$ 坐标系中直流分量,其余分量则转成 $dq0$ 坐标系中交流分量。在这里设计 APF 可补偿谐波及基波正序无功电流,因此断开 q 轴通道,即只用低通滤波器(LPF)滤得 d 轴直流分量,再经同步坐标反变换得到的便是与三相系统基波正序电压同频同相的基波正序有功电流,从而可方便地得出需补偿的指令电流。

基于 $dq0$ 坐标变换的检测方法能准确检测出三相四线系统中需补偿的指令电流(含基波正序无功电流、基波电流不对称分量及谐波电流)。其网侧补偿后理想效果为对称的基波正序有功电流,因此 APF 除需补偿基波正序无功及谐波电流外,还需补偿大量基波电流不对称分量。基波电流不对称分量在 APF 系统的能量流动中表现为瞬时无功功率,虽然对直流侧和交流侧进行的能量交换没有作用,但是在三相间的功率交换会严重增加开关管流通电流大小,在设计时也必须考虑到开关器件容量的增加。

由以上分析可以看出,APF 应用 $dq0$ 坐标变换检测法时的开关器件容量选取值要比仅补偿基波正序无功及谐波电流时增大不少。事实上,三相四线不平衡系统中的中线基波电流是由负载基波电流不对称分量中的零序分量导致的,原则上属于配电问题,不在 APF 的补偿范围内,一般对入网中线电流的要求是不超过其额定值的 25% 即可。故而在实际应用中从降低开关器件成本角度考虑,APF 无需对基波电流不对称分量全部补偿,而对于基波电流不对称分量中的基波无功电流部分可给予补偿。

为了寻找解决以上问题的最佳方案,使得 APF 仅补偿无功及谐波电流并降低开关器件容量选取值,本文将基于单相谐波检测的新方法应用于三相四线制系统中,即引言部分提到的方法④推广。该方法的实质是将待测的三相瞬时电流与和电网电压同频同相的正弦信号相乘,并分别通过低通滤波器,再经运算得出每相的基波有功电流,最后通过负载电流与基波有功电流相减得到仅需补偿的无功及谐波电流。该方法的具体流程见图 2,由逆变器向电网注入与检测出的无功及谐波电流相反的补偿电流,便可极大程度地改善网侧畸变电流波形,提高电能质量。

2 双环重复控制策略分析

重复控制器是基于内模原理提出的控制方案。若 APF 需补偿的谐波信号具有周期性,则在控制器中嵌入一个基波周期的延时,对误差信号进行周期性累加,便可减少系统的静态误差。由于重复控制器

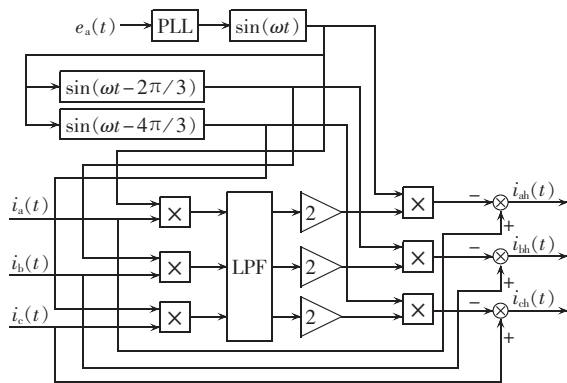


图 2 谐波检测方法原理图

Fig.2 Schematic diagram of harmonic detection

可在谐波频率处提供无穷大增益,能使电流控制环的稳态精度得到提高。但是传统的重复控制策略在补偿时存在一个周期的延迟,在动态性能上表现不佳。为此,本文总结其他改进方法并简化得出了一种双环重复控制策略,其结构框图如图 3 所示。

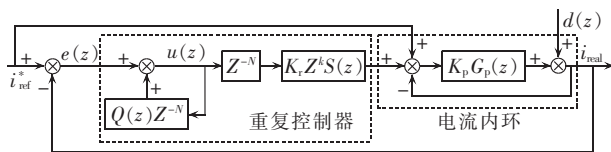


图 3 双环重复控制策略结构图

Fig.3 Structural diagram of dual-loop repetitive control

双环重复控制系统结构的设计主要分为重复控制器和电流内环两部分。谐波电流指令 i_{ref}^* 除输入给重复控制器外,还前馈至电流内环对 $G_p(z)$ 进行比例控制。重复控制器保证了系统的稳定性,使系统做到无静差跟踪谐波指令;而电流内环的比例控制保证了系统的动态快速性,使系统可对谐波指令的变化产生快速响应。

2.1 电流内环设计

首先分析电流内环的受控对象离散模型 $G_p(z)$,采用单电感进行网侧滤波,被控对象的 s 域模型为:

$$G_p(s) = \frac{1}{sL + R_1} \quad (1)$$

取电感 $L = 2 \text{ mH}$,电感等效电阻 $R_1 = 0.05 \Omega$ 。实验中开关频率为 9 kHz ,采用双倍开关频率 18 kHz 来进行采样,则 $G_p(s)$ 经过零阶保持器离散化得:

$$G_p(z) = \frac{0.02776}{z - 0.9986} \quad (2)$$

由于电流内环的闭环特性由其开环传递函数决定,故在电流内环前向通道中加入比例控制 K_p 以提高开环高增益并拓展带宽,其值由经验公式推导:

$$K_p = \frac{L}{T_s} = Lf_{\text{PWM}} = 18 \quad (3)$$

其中, T_s 为载波周期; f_{PWM} 为开关频率。电流内环的闭环传递函数为 $G_c(z)$,且不考虑扰动分量,则:

$$G_c(z) = \frac{K_p G_p(z)}{1 + K_p G_p(z)} = \frac{0.4997}{z - 0.4989} \quad (4)$$

其伯德图见图 4。由图可知,电流内环在中低频段幅值接近于 1,而在中高频段幅值衰减缓慢,且相位滞后严重,将引入系统高频分量并导致整个系统的不稳定,故需要通过重复控制器外环进行校正。

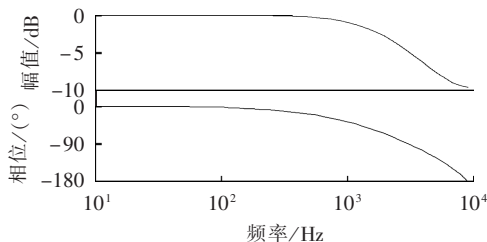


图 4 电流内环的闭环传递函数 $G_c(z)$ 伯德图
Fig.4 Bode plots of transfer function $G_c(z)$ of inner current-loop

2.2 重复控制器外环设计

重复控制器的设计主要包括正反馈回路(重复内模)、周期性延迟环节 Z^{-N} 以及校正器($K_r Z^k S(z)$)的设计。正反馈回路的传递函数为:

$$G_m(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{1}{1 - Q(z)Z^{-N}} \quad (5)$$

其中, $Q(z)$ 是衰减滤波器,目的是为了抑制高频领域增益引发的系统不稳定性,通常选为小于 1 的常数,本文选为 0.96。式(5)可表示成如下差分方程形式:

$$u(k) = e(k) + 0.96u(k-N) \quad (6)$$

该式表示正反馈回路以电网周期 N 为步长对误差进行积分,直到误差小于其输出值的 4%,而指令的周期重复性与重复控制器前向通道中一个电网周期的延时控制可使系统具有提前控制的能力。这样,重复控制器可类似于 PI 调节器对直流量进行积分一样对周期性谐波信号进行积分,理论上能够达到几乎无静差的稳态特性效果。若加大 $Q(z)$,则可得到更小的稳态误差,但是会降低稳定裕度。

将重复控制器应用于电流环跟踪控制的关键在于前向通道中校正器的设计,其主要是针对电流内环的幅频与相频特性进行设计的,以确保整个系统的稳定运行。校正器中, K_r 表示重复控制的增益; Z^k 表示超前环节,起相位补偿作用;而 $S(z)$ 可根据 $G_c(z)$ 的特性设计为陷波器或者低通滤波器等。校正器的设计准则是在 1.25 kHz(25 次谐波)以内的 APF 补偿范围内使得 $Z^k S(z) G_c(z)$ 的频率特性校正为 0 dB 和 0° 相位,以保证在足够的稳定裕度前提下获得良好的稳定精度。

由图 4 分析可知,高频段相位滞后严重难以校正,只有通过衰减高频段的幅值才能不受高频段谐波干扰,因此采用低通滤波器 $S(z)$ 对 $G_c(z)$ 的高频段幅值进行衰减。 $S(z)$ 通常选为二阶巴特沃斯低通滤波

器,且设计转折频率为 3 kHz,阻尼比为 0.707,其 s 域传递函数为:

$$S(s) = \frac{3.55 \times 10^8}{s^2 + 2.664 \times 10^4 s + 3.55 \times 10^8} \quad (7)$$

采样频率取 18 kHz,经双线性变换法得:

$$S(z) = \frac{0.136z^2 + 0.272z + 0.136}{z^2 - 0.7211z + 0.2651} \quad (8)$$

为检验所设计的 $S(z)$ 对电流内环 $G_c(z)$ 的补偿效果,取 $K_r = 1$,画出 $K_r S(z) G_c(z)$ 的伯德图,见图 5 中实线。

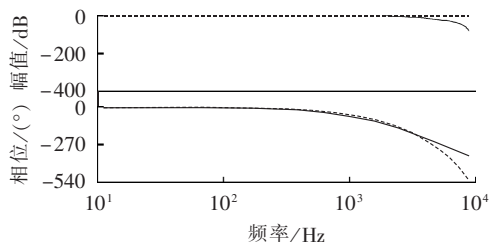


图 5 $K_r S(z) G_c(z)$ 与 Z^{-3} 伯德图

Fig.5 Bode plots of $K_r S(z) G_c(z)$ and Z^{-3}

由图 5 中实线可以看出电流内环 $G_c(z)$ 经过校正后的伯德图幅频特性在 1.25 kHz 以内增益为 1,在 3 kHz 以后开始有明显衰减,至开关频率附近为 -60 dB 左右,实现了滤波器校正后的高频滤波效果;而从中低频段开始,相角滞后的严重性依旧没有改善,故需加入相位补偿器 Z^k 。 Z^{-3} 的伯德图如图 5 中虚线所示,可以看出,在 10 Hz ~ 4 kHz 的频率范围内 Z^{-3} 和 $K_r S(z) G_c(z)$ 相位上基本一致,而在 4 kHz 以上的高频段,由于 $S(z) G_c(z)$ 幅值已大幅降低,故而引入的相位滞后不对系统构成稳定性危害。因此,超前环节 Z^3 可以抵消 $K_r S(z) G_c(z)$ 带来的相位滞后,使补偿电流可以良好地跟踪指令电流。在实际的程序控制中,考虑到超前环节在 DSP 中无法表示,一般取 Z^{k-N} 来代替 Z^k ,即利用 DSP 控制的存储记忆功能,将滞后第 $N-k$ 点的重复指令信号保存后来代替超前的第 k 点的重复指令信号,故 Z^k 取 Z^{3-N} 。

为验证校正器设计的稳定性,根据小增益原理推导出重复系统稳定的充分条件:

$$|Q(e^{j\omega T}) - K_r e^{j\omega k T} S(e^{j\omega T}) G_c(e^{j\omega T})| < 1 \quad \omega \in [0, \pi/T] \quad (9)$$

其中, T 为采样周期即电网周期。将 $K_r Z^k S(z)$ 代入,由上文, $Q(z) = 0.96$, $k = 3$,并代入系统其他参数,经运算,式(9)成立,说明校正器设计方案可行。

3 仿真与实验结果分析

对于三相四线制系统,目前常用的 2 种主电路拓扑为三桥臂分裂电容式^[16]和四桥臂式结构。鉴于四桥臂式结构 APF 比三桥臂分裂电容式 APF 在主电路中增加了一对桥臂为中线电流提供回路,使控制

变得较为复杂且增加成本。本文采取较简单的三桥臂分裂电容式主电路拓扑进行仿真和实验,主电路拓扑见图 6。

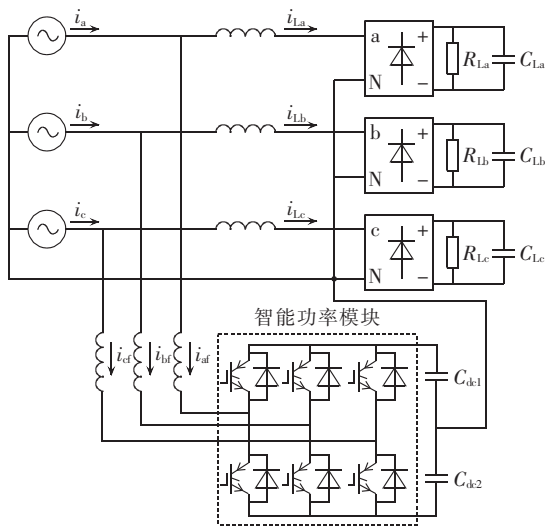


图 6 三桥臂分裂电容式主电路拓扑

Fig.6 Topology of main circuit with three bridges and split capacitors

3.1 谐波检测算法仿真结果分析

在 MATLAB/Simulink 模块中按照图 6 搭建仿真模型,针对三相四线制不对称阻容负载应用广泛性的特点,负载 a、b、c 相分别经单相整流桥后接 $500\ \mu\text{F}$ 滤波电容,负载电阻分别为 $25\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 和 $75\ \Omega$,电网线电压为 $380\ \text{V}$,采样频率为 $18\ \text{kHz}$ 。

应用谐波检测算法后的效果见图 7,由上至下依次为相负载电流、基波有功电流、无功及谐波电流波形。由图知该算法对 a、b 两相可提取出各自大小不一的基波有功电流。a、b 两相负载电流减去基波有功电流后得到各自的无功及谐波电流。只要能够做到指令电流精确跟踪,便能取得良好补偿效果。

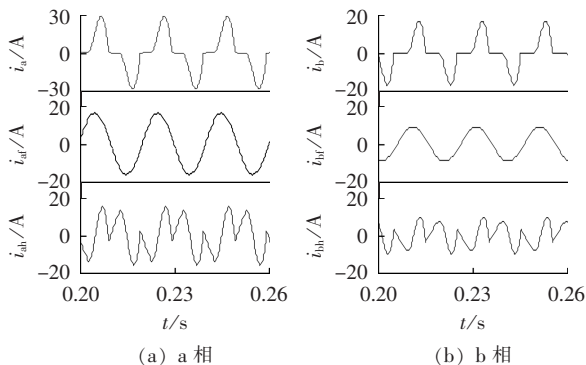


图 7 a 相和 b 相各检测电流波形

Fig.7 Detected current waveforms of phase a and b

3.2 控制策略仿真结果分析

在 APF 控制环节仿真的设计中,电压外环的输出作为电容充放有功电流的给定,起到维持直流侧电

压稳定的作用,并叠加反向的谐波指令作为前文提到的电流指令。本文仿真直流侧电压给定设为 $750\ \text{V}$,开关频率为 $9\ \text{kHz}$,其他控制环参数按照上文分析设计。仿真中为模拟实际,特别加入 $2.8\ \mu\text{s}$ 死区^[14],并考虑控制器输出一拍延时。图 8 为采用传统 PI 调节器、纯重复控制策略与双环重复控制策略的指令电流跟踪效果对比。图中,曲线 1 为指令电流波形,曲线 2 为采用 PI 调节器的电流跟踪波形,曲线 3 为采用双环重复控制策略的电流跟踪波形,曲线 4 为采用纯重复控制策略的电流跟踪波形。

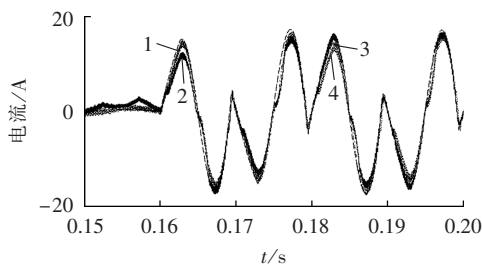


图 8 采用各种控制策略的电流跟踪波形对比

Fig.8 Comparison of tracking current among different control strategies

由图 8 中曲线 2 可以看出,采用传统 PI 调节器进行电流跟踪虽然能够快速跟踪指令电流,但由于 PI 调节器无法精确跟踪交流信号以及存在死区和控制器一拍延时的影响,其跟踪的稳态静差较大;由图 8 中曲线 3 可以看出,采用双环重复控制策略进行电流跟踪,由于其内环可以对谐波指令做出快速响应,再通过重复控制外环对内环剩余误差进行抑制,只需 1 个电网周期的动态过程便能实现无静差跟踪,且几乎不受死区和控制器一拍延时输出的影响;由图 8 中曲线 4 可以看出,采用纯重复控制策略进行电流跟踪虽然最终可以实现无静差跟踪,但由于周期延迟环节的存在,整个动态过程需要 3 个电网周期,这点可以从第二个电网周期曲线 4 与曲线 3 还存在一定误差看出,但在第三个周期时 2 条曲线基本趋于一致。

3.3 实验结果分析

对本文提出的谐波检测算法和双环重复控制策略设计实验样机进行实验验证,测得三相电网线电压为 $400\ \text{V}/50\ \text{Hz}$,负载 a、b、c 相分别经单相整流桥后接 $500\ \mu\text{F}$ 滤波电容,负载电阻分别为 $50\ \Omega$ 、 $75\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$,其余参数同仿真。主控芯片选用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320F2812。使用 HIOKI 公司的 PW3198 电能质量分析仪对实验进行调试和结果记录。

图 9 由上至下为 a 相的负载电流、补偿电流和补偿后网侧电流波形;图 10 由上至下为 a、b、c 三相不对称阻容负载电流波形;图 11 由上至下为补偿后 a、b、c 三相网侧电流波形。

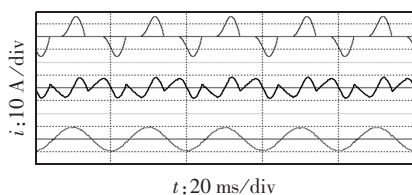


图 9 a 相各电流波形

Fig.9 Current waveforms of phase a

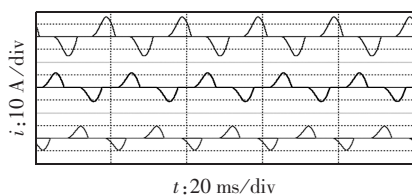


图 10 三相负载电流

Fig.10 Load current waveforms of three phases

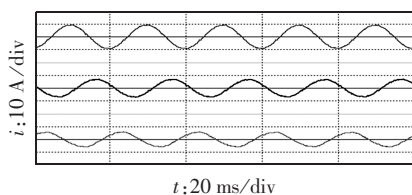


图 11 补偿后三相网侧电流

Fig.11 Grid-side current waveforms of three phases, with compensation

由图 9 可以看出,应用本文的谐波检测法和双环重复控制策略可以实现补偿网侧畸变电流的效果,且由于补偿电流能够快速无静差跟踪指令电流,补偿后网侧电流正弦度较好,没有相位偏差导致的缺口或毛刺出现。

对于三相四线制系统,每一相补偿后 THD 都应达到入网标准规定的 5% 范围内。由图 10 可看出,所搭建的三相负载各相大小不等,不对称情形明显,为三相四线制 APF 提供了恶劣的网侧畸变条件。而由图 11 可看出,经 APF 补偿后,三相网侧电流均具有良好的正弦度,波形平滑稳定。经电能质量分析仪检测:a、b、c 三相 THD 分别由补偿前的 54.4%、59.2%、65.2% 降低至补偿后的 2.6%、3.2%、4.4%,达到了入网标准规定要求。

图 12 为双环控制动态波形,由图可知,采用双环重复控制,当负载突变时,只要 1 个电网周期就可实现电流跟踪,2 个电网周期后即可实现较好的补偿效果。

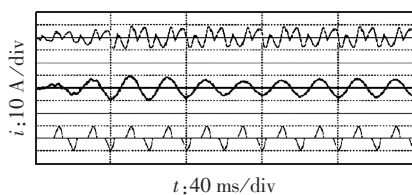


图 12 双环控制动态波形

Fig.12 Dynamic waveforms of dual-loop control

4 结语

为增强三相四线制 APF 的实用性并提高其补偿的快速性和稳态精度,本文对 APF 谐波检测算法和电流闭环控制算法进行了全面的研究。文中采用的谐波检测算法,可使 APF 无需补偿基波电流不对称分量,降低了开关器件容量的选取值。将双环重复控制策略应用于三桥臂分裂电容式结构三相四线制 APF,仿真和实验验证了该控制策略可快速无静差地跟踪电流指令,且补偿后网侧电流具有较高的波形质量。

参考文献:

- [1] PENG F Z, KOHATA M, AKAGI H. Compensation characteristics of shunt and series active filter[C]//Proceedings of 1992 Chinese-Japanese Power Electronics Conference. Beijing, China: [s.n.], 1992: 381-387.
- [2] 梁营玉, 刘建政, 许杏桃, 等. 基于电源电流和负载电流检测的前馈加反馈的三相四线制 APF 控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 94-100.
LIANG Yingyu, LIU Jianzheng, XU Xingtao, et al. Feedforward-feedback control strategy based on detection of power current and load current for three-phase four-wire APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 94-100.
- [3] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, 1A-20(3): 625-630.
- [4] SEBASTIEN M, ALFRED C R. Open loop and closed loop spectral frequency active filtering[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(4): 564-573.
- [5] 刘桂英, 粟时平, 秦志清. 应用多倍频旋转坐标正交变换的三相四线制电路谐波检测方法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 87-93.
LIU Guiying, SU Shiping, QIN Zhiqing. A new harmonic detection method for three-phase four-wire system based on orthogonal transformation of multi-frequency rotating coordinate[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 87-93.
- [6] 黄海宏, 刘鑫, 薛欢, 等. 基于载波相移技术的 H 桥级联高压 APF 研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(8): 687-692.
HUANG Haihong, LIU Xin, XUE Huan, et al. Study of high voltage H-bridges cascaded APF based on carrier phase-shift technique[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(8): 687-692.
- [7] 陈娟, 郑建勇, 丁祖军, 等. p-q-r 法与 FBD 法在三相四线制系统谐波电流检测中的对比[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 30-33.
CHEN Juan, ZHENG Jianyong, DING Zujun, et al. Comparison of harmonic detection in three-phase four-wire system between p-q-r and FBD method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 30-33.
- [8] 赵伟, 王文, 肖勇, 等. 并联有源电力滤波器空间矢量电流控制新方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 83-87.
ZHAO Wei, WANG Wen, XIAO Yong, et al. Space vector current control of shunt active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 83-87.

- [9] 侯桂兵,涂春鸣,罗安,等. 微电网中 APF 接入位置与容量优化配置方案[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):29-33.
HOU Guibing,TU Chunming,LUO An,et al. Optimal configuration of APF in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(5):29-33.
- [10] 王盼,刘飞,查晓明. 基于有源阻尼的并联有源滤波器输出 LCL 滤波器设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):161-166.
WANG Pan,LIU Fei,ZHA Xiaoming. Design of output LCL filter based on shunt APF with active damping[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):161-166.
- [11] TZOU Y Y,OU R S,JUNG S L,et al. High-performance programmable AC power source with low harmonic distortion using DSP-based repetitive control technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1997,12(4):715-725.
- [12] 唐健,王翔,何英杰,等. 三相四线制有源滤波器的新型无差拍控制[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):59-63.
TANG Jian,WANG Xiang,HE Yingjie,et al. A novel deadbeat control scheme for three-phase four-wire active power filters[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):59-63.
- [13] CASTELLO R C,GRINO R,FOSSAS E. Odd-harmonic digital repetitive control of a single-phase current active filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(4):1060-1068.
- [14] GRINO R,CARDONER R,COSTA-CASTELLO R,et al. Digital repetitive control of a three-phase four-wire shunt active filter

[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(3):1495-1503.

- [15] ZHOU K L,LOW K S,WANG D W,et al. Zero-phase odd-harmonic repetitive controller for a single-phase PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2006,21(1):193-201.

- [16] 周晨,郑益慧,王昕,等. 基于双环控制器的电容分裂式三相四线制 DSTATCOM 控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):114-121.

ZHOU Chen,ZHENG Yihui,WANG Xin,et al. Control strategy based on dual-loop controller for split-capacitor-type three-phase four-wire DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(8):114-121.

作者简介:



黄海宏

黄海宏(1973—),男,江西清江人,教授,博士,主要研究方向为电力电子技术(E-mail:hkh@ipp.ac.cn);

王钰(1990—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为电工理论与新技术;

许若冰(1989—),男,江苏南京人,硕士,主要研究方向为电工理论与新技术;

杨佳能(1991—),男,贵州贵阳人,硕士研究生,主要研究方向为数字化电源。

Three-phase four-wire active power filter with dual-loop repetitive control

HUANG Haihong¹,WANG Yu¹,XU Ruobing²,YANG Jianeng¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company,Nanjing 210019,China)

Abstract: A harmonic detection method suitable for the asymmetric load of three-phase four-wire system is presented,with which,only the reactive and harmonic currents are compensated by the inverter,resulting in the reduced switching device capacity. Based on the proportional regulation and repetitive control,a dual-loop repetitive control system is designed to improve the tracking speed and steady precision of current loops. The results of MATLAB simulation show that,the reactive and harmonic current is successfully separated for each phase by the harmonic detection algorithm and the control strategy has fast speed and high stability. An experimental platform with a DSP chip as its main control system is built to verify the actual compensation effect. The grid-side current THD of three phases are reduced from 54.4%,59.2%,65.2%(without compensation) to 2.6%,3.2%,4.4%(with compensation) respectively,verifying the practicality and high-stability of the proposed detection method and control strategy.

Key words: three-phase four-wire; active power filter; harmonics detection; repetitive control; dual-loop; harmonic analysis; compensation