重复－模糊PI复合控制策略在APF中的应用

有源电力滤波器（Active Power Filter，APF）要求补偿电流能够无误差地跟踪给定的谐波电流信号，否则会影响APF的补偿效果。传统单一控制方法在控制准确度和响应速度上不能兼顾，应用复合控制策略，将不同控制方法的优缺点进行互补组合，可得到更优的控制策略。重复控制能产生与谐波电流相同的输出，因而可以取得对各次谐波零稳态误差跟踪补偿，但是其动态性能不佳。通过与模糊PI控制相结合，形成复合控制策略，可以利用模糊PI控制器保证系统的动态性能，依靠重复控制器提高输出电流波形的跟踪准确度，显著改善滤波效果。经过仿真证明采用的重复－模糊PI复合控制策略可以同时取得较好的补偿准确度与动态响应速度，比较适合于APF中补偿电流的控制。

张培远　张　浩　蒋　伟　李　虹　金明凤/国网安徽省电力公司滁州供电公司

张培远/工程师

关键词/Keywords
有源电力滤波器·
重复控制·
模糊PI控制·
复合控制策略·
补偿电流控制·

0　引言

现代电网中存在着大量的非线性负载，会引起电网电压畸变，产生谐波污染，严重危害电网的稳定运行和用户的用电安全，目前谐波污染已经成为电力系统发展的巨大障碍[1]。在谐波治理的研究中，有源电力滤波器（Active Power Filter，APF）作为抑制电网谐波最有效的手段之一，已经成为业内共识，有着广阔的应用前景[2]。

及时有效地补偿谐波电流是APF研究工作中的重要环节。而谐波电流是一种高频交流信号，很难做到快速准确地跟踪控制。很多学者做了大量的工作来研究谐波电流的控制问题。目前，APF的补偿电流控制方法主要包括：三角载波控制[3]，该方法易于实现，开关频率固定，响应速度快但控制参数很难确定，易产生超调；滞环控制[4]响应快、不用载波，不含特定次数谐波，缺点是滞环带宽不易设置，功率器件的开关频率也不固定；无差拍控制[5]动态响应快，但是对系统参数比较依赖、抗干扰能力差；PI控制是得到广泛应用的一种控制方法，针对直流信号能够实现无稳态误差调节，而对APF的谐波电流这种高频交流分量，跟踪效果不佳。文献[6]经过理论研究、仿真证明PI控制带宽有限，在中高频段衰减严重，相位滞后也很明显，无法在全频段跟踪交流信号，只能无相移地跟踪直流信号，而对于其他频段都存在相位偏移问题，随着电流信号频率的升高，相移问题愈加严重。因此，PI控制很难对谐波交流信号做到零稳态误差跟踪控制。

目前APF补偿电流控制策略的发展趋势是应用复合控制策略，将不同控制方法进行结合，取长补短，以达到更好的控制效果。为此本文将模糊PI控制与重复控制相结合，组成复合控制策略，弥补模糊PI控制对谐波电流控制准确度不足和重复控制响应速度慢的缺点，对谐波电流进行控制，取得了良好的补偿效果。

1　模糊PI控制

1.1　模糊控制理论

模糊控制（Fuzzy Control，FC）是根据丰富经验总结，用自然语言表述控制策略，通过实际数据归纳总结出控制规则的智能控制策略[7]。

与传统控制策略相比优点如下。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1）不需要准确的数学模型，对系统参数不敏感。

2）其核心控制规则是用“经验”总结出来的，容易入门、掌握。

3）其响应速度快，有一定的自适应性。

模糊控制的缺点是不能有效消除系统稳态误差，控制准确度不高。

图1为模糊控制器的一般基本结构。实际输入变量一般是误差和误差变化率，经输入量化部分把实际变量的范围变换成模糊控制语言的范围，之后经模糊化转换成模糊函数，模糊规则是模糊控制器的核心，这里存放着“经验”，模糊推理在模糊规则的作用下对输入量进行运算得到的结果是一个模糊矢量，需要经过解模糊化、输出量化等部分的处理，输出量才能用于被控对象[8]。

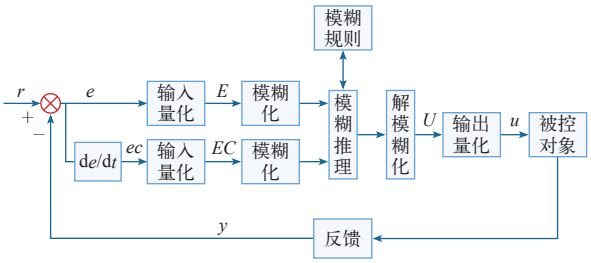


图1　模糊控制器基本结构

1.2　模糊PI控制在APF中的实现

前文已经提到PI控制不能有效地对APF的补偿电流进行跟踪控制，将模糊控制和PI控制相结合，模糊PI复合控制兼具两者优点，又能弥补彼此不足，本文采用模糊PI控制，对APF补偿电流进行跟踪控制。

APF中的模糊PI控制如图2所示，首先应用模糊数学的理论，总结人员的经验和知识形成模糊规则，这些规则是IF（条件）THEN（结果）形式的，并预先把规则和其他参数保存起来。之后将

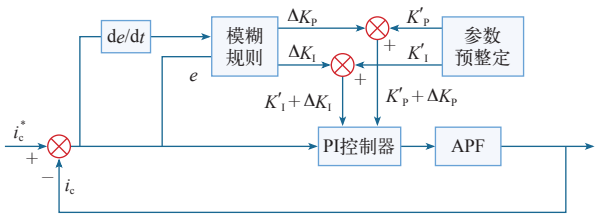


图2　APF装置中的模糊PI控制器结构

补偿电流和谐波电流的误差e和误差的变化率ec，输入模糊PI控制器里面，经过运算处理，得到此时的ΔK_P、ΔK_I，对原PI参数进行在线调整[9]。

模糊PI控制器的实现可以分为以下几个步骤。

（1）参数预整定

应用Ziegler－Nichols方法求解K_P'和K_I'，Ziegler－Nichols是目前广泛应用的计算PI参数的方法之一[10]。

设$K_P=K_I=0$，然后增加K_P，在系统开始振荡时，令此时的K_P值为K_{cr}，振荡周期为T_{cr}，则PI的参数可按如表1所示整定。

表1　控制器参数整定

控制类型	K_P'	K_I'
P	$0.5K_{cr}$	–
PI	$0.45K_{cr}$	$0.85K_{cr}$

（2）模糊化

模糊控制里的模糊推理只能处理模糊量，所以要对输入值模糊化。本文中，输入值的语言为负大（NB）、负中（NM）、负小（NS），零（ZO）、正小（PS）、正中（PM）及正大（PB）。输入值相应的论域为[－6，－4，－2，0，2，4，6]。

（3）总结规则和模糊推理

模糊规则是模糊控制的核心，需要人的经验和知识的总结，设置方法：比例K_P能够反映误差e，出现误差后立即反应，来减少偏差；若其值过大，反而会造成系统振荡。所以，如果误差e较大，为了快速抑制，K_P的值也要变大；反之如果误差e较小，为防止超调太大使系统振荡，K_P的值要变小。综合考虑误差变化率ec时，当ec和e同号时，输出值会偏离稳定值，此时要加大K_P；反之，要减小K_P。ΔK_P的模糊控制规则如表2所示。

表2　ΔK_P的模糊规则控制表

ΔK_P	ec						
e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（续）

ΔK_P / e	ec NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

积分K_I的作用是减少静态误差。若其值过大会引起系统超调增大。为防止积分饱和，如果误差e较大，K_I为零；若e较小，让K_I作用，并令其随e的变小而变大，来减少稳态误差。ΔK_I的控制规则如表3所示。

表3　ΔK_I的模糊规则控制表

ΔK_I / e	ec NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

（4）去模糊化

在模糊推理之后，输出值进行去模糊化，变换成准确值，再输出ΔK_P、ΔK_I。

（5）PI参数在线调整

在线修正PI公式为

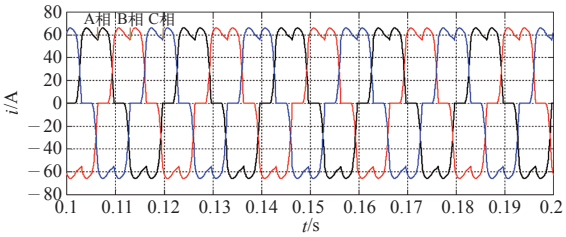
$$\begin{cases} K_P = K_P' + \Delta K_P \\ K_I = K_I' + \Delta K_I \end{cases} \tag{1}$$

1.3　仿真分析

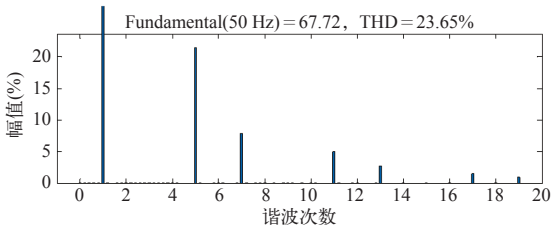
本文在Matlab中进行仿真来分析PI控制和模糊PI控制的跟踪效果。具体仿真参数为：三相电源电压有效值为220 V，频率为50 Hz，系统阻抗忽略不计。谐波源为三相不控整流桥带阻感负载，其中，电阻$R=8\ \Omega$，电感$L=1$ mH。APF进线电感1.5 mH。

1.3.1　PI控制下补偿效果分析

如图3、图4所示，在PI控制下APF补偿后的三相电流正弦度并不高，补偿前三相电流的THD为23.65%，补偿后三相电流THD分别为3.74%、4.20%和3.58%。从电流跟踪情况来说，跟踪电流

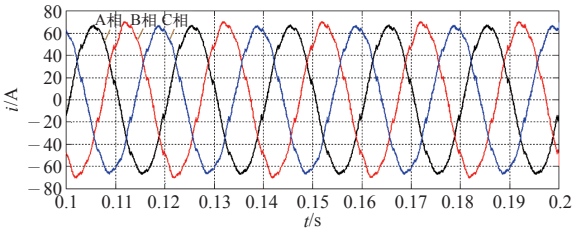


（a）补偿前三相负载电流

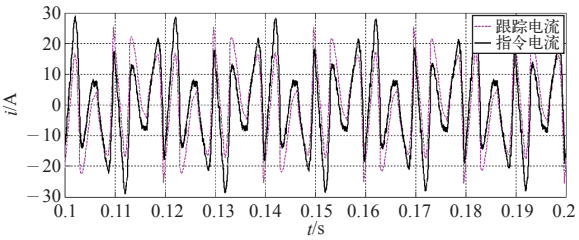


（b）三相负载电流频谱图

图3　补偿前三相负载电流及频谱图



（a）补偿后三相电源电流



（b）电流跟踪情况

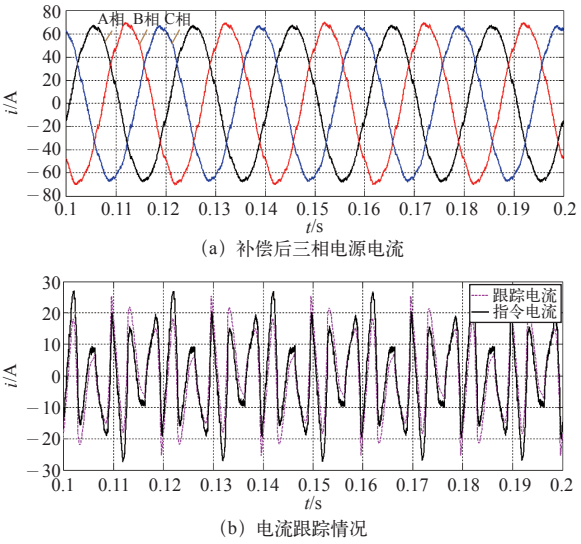
图4　PI控制补偿后三相电源电流及电流跟踪情况

只是曲线形状较像指令电流，但是幅值、相位上都有误差，仿真验证了PI控制不能对APF补偿电流进行零稳态误差跟踪。

1.3.2　模糊PI控制下补偿效果分析

模糊PI可以对PI控制进行一定程度的改进优化，其补偿后的电流波形比单纯PI控制有所改善，如图5所示，补偿后三相电流THD分别为2.86%、3.32%和2.83%。从电流跟踪情况来看，模糊PI控制也不能完全对指令电流进行补偿。由于模糊PI控制本质上还是PI控制起主要作用，所以这种控制策略也不能实现对APF补偿电流的零稳态误差跟踪，必须要寻找一种能在其工作原理上实现对交

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



（a）补偿后三相电源电流

（b）电流跟踪情况

图5　模糊PI补偿后三相电源电流及电流跟踪情况

流信号准确跟踪的控制策略来对APF的补偿电流进行控制。

2　重复控制

2.1　重复控制理论

重复控制是内模原理的一种应用。根据内模原理，控制系统若要取得较好的跟踪性能和零稳态误差，必须在闭环系统内部植入一个与外部输入量（包括指令与扰动）相一致的数学模型[11]。

基于内模原理的重复控制是在APF电流环内植入一个正弦发生器，能提供与谐波电流给定相同的输出量作为控制器输出。虽然谐波电流频率不固定，但这些谐波指令都在每一个基波周期内以完全相同的形式出现，因此可采用下式作为重复控制器

$$G_{\mathrm{RE}}(s)=\frac{1}{1-\mathrm{e}^{-Ts}} \tag{2}$$

式中，T为电流指令信号的周期。其s域频率特性为

$$G_{\mathrm{RE}}(\mathrm{j}\omega)=\frac{1}{(1-\cos\omega T)+\mathrm{j}\sin\omega T} \tag{3}$$

重复控制器的z域离散传递函数为

$$G_{\mathrm{RE}}(z)=\frac{1}{1-z^{-N}} \tag{4}$$

式中，N为单周期采样点数，$N=T/T_s$，T_s为采样周期。

重复控制的原理框图如图6所示，控制器逐周期对输入量进行累加后输出。当输入量趋近于零时，控制器仍然不断输出控制量，实现周期信号发生器的功能。

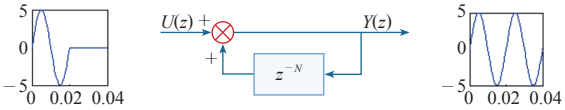


图6　重复控制器原理图

如图7所示，在图7中$f=50$ Hz时$\omega=2\pi f=314$ rad/s。在重复控制器的频率特性曲线图中可以看出，在基频及其倍数频率处，幅值增益基本大于100 dB，为10^5倍，接近无穷大。而且相角为90°，在其他点上增益很小。表明采用重复控制可以取得对各次谐波零稳态误差跟踪补偿，而且不会产生严重的相位滞后[12]。

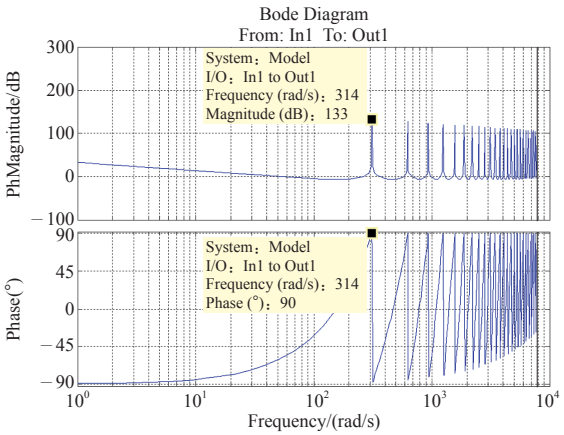


图7　重复控制器频率特性

2.2　模糊PI与重复控制结合的复合控制

重复控制器是一种周期性控制的无差调节，可以很好地抑制谐波，但因为延迟环节的存在，其动态响应速度不快，而模糊PI控制能对输入马上动作，动态性能较好。本文将重复控制与模糊PI控制结合在一起使用，重复控制能够很好地跟踪谐波信号，减少系统的静态误差，而模糊PI可以快速响应，这样就可使APF拥有良好的静态和动态性能。

如图8所示，$C(z)$为补偿器；z^{-N}为延时环节；$Q(z)$为滤波器。重复控制器可以等效地看作一个“纯积分”器，理论上可以实现零稳态误差，但因

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为会带来N个开环极点，降低了系统的稳定性[13]。因此为了改善系统的稳定性，通常取$Q(z)$为接近于1的固定值，本文$Q(z)$设为0.95。

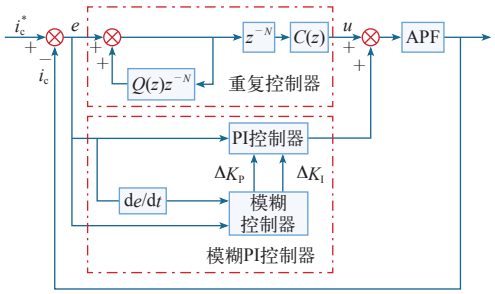


图8　模糊PI和重复控制相结合的复合控制结构图

延时环节z^{-N}的作用是让控制信号延迟一个周期。因为重复控制就是假定指令和干扰都是周期性信号，所以延迟后相对下一个周期来说，控制信号就是超前了一个周期[14]。当然，这影响了系统控制的快速性。在本文中采样频率为10 kHz，基波频率为50 Hz，所以每个周期点数为：$N=10\ 000/50=200$。

补偿器$C(z)$要针对被控对象APF设计。其作用是补偿相位及幅值，来保证重复控制系统稳定[15]。一般$C(z)$采用下面的形式

$$C(z)=k_r z^k S(z) \tag{5}$$

式中，k_r为重复控制增益，k_r取为0.5；$S(z)$为滤波器，主要保证APF的中低频增益为1，提高稳定性，一般采用二阶低通滤波器。超前环节z^k要补偿$S(z)$和APF总的相位滞后，使其在中低频段为零相移，其中k取为2。

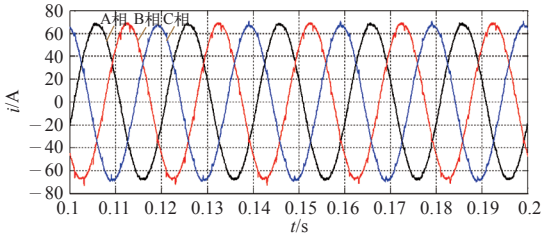
模糊PI控制器和重复控制器并联使用，共同对APF电流跟踪控制产生作用。APF系统达到稳态运行时，电流误差很小，模糊PI控制器输出值不大，复合控制器主要是重复控制在逐周期的输出控制量。当非线性负载突变时，误差突然增大，由于延时环节的存在，重复控制不能立即作用，主要依靠模糊PI控制器动作进行调节。之后重复控制器发生作用，模糊PI作用减弱，直至系统重新稳定运行。

2.3　仿真分析

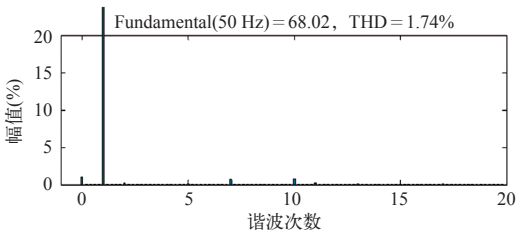
本文在Matlab中进行仿真来验证上述复合控制方法的正确性与有效性。具体仿真与前文一致。

（1）稳态分析

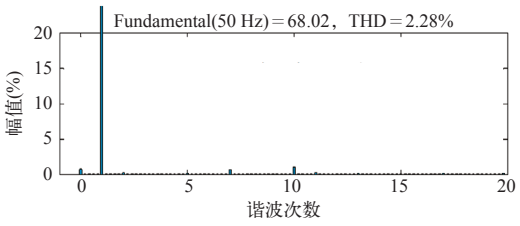
如图9所示，由仿真结果可知，补偿前由于电源接非线性负载，负载电流畸变严重，谐波畸变率达到23.65%。经APF补偿后三相电源电流谐波畸变率分别降到1.74%、2.28%及1.84%，波形正弦度很高。



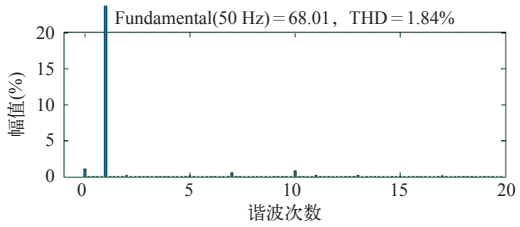
（a）补偿后三相电源电流



（b）A相电源电流频谱图



（c）B相电源电流频谱图



（d）C相电源电流频谱图

图9　补偿后三相电源电流及频谱图

图10中跟踪电流能快速准确地跟踪指令电流，说明重复控制与模糊PI相结合的复合控制策略能够跟踪高频交流信号，且响应速度很快。该复合控制策略可以充分发挥两者的优点，达到最好的补偿效果。

（2）动态分析

为分析该复合控制策略在负载变化情况下的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

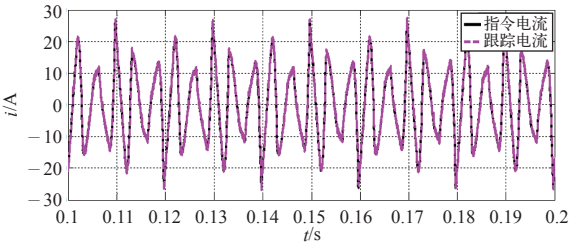
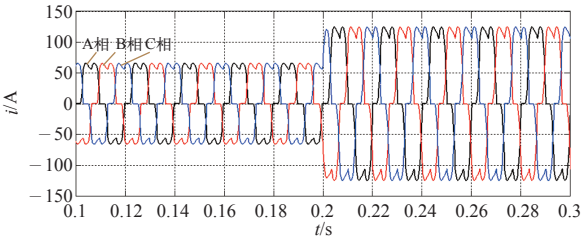
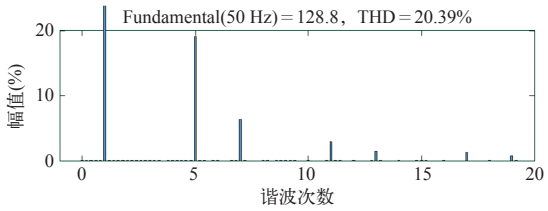


图10　模糊重复PI复合控制下的电流跟踪情况

工作情况，在0.2 s突加并联8 Ω电阻负载，如图11～图13所示。



（a）三相负载电流



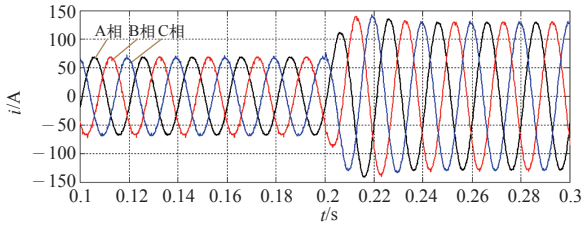
（b）0.2 s后三相负载电流频谱图

图11　负载突变时三相负载电流及频谱图

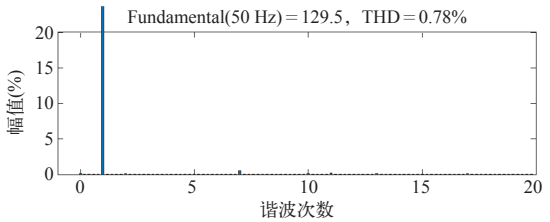
应用模糊PI和重复控制结合的复合控制策略在负载突变时也能很好地达到补偿目的，补偿后的三相谐波畸变率为0.78%、0.99%和1.20%。而且过渡时间大概两个基波周期，动态响应很迅速。跟踪电流在负载突变时也能很快跟踪指令电流。以上结果及分析验证了应用模糊PI和重复控制结合的复合控制策略对负载波动有良好的适应性和抗干扰的能力。

3　结束语

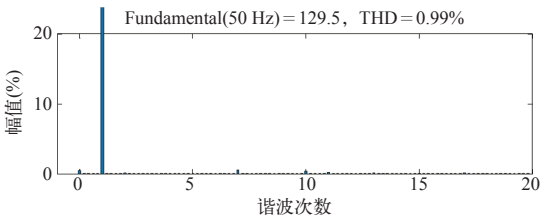
本文针对传统控制策略不能对谐波电流无误差跟踪控制的缺点，采用将模糊PI控制理论与重复控制算法相结合形成复合控制策略的方法对APF进行谐波电流的控制。模糊PI控制响应速度较快，但是对谐波电流的跟踪补偿准确度不高。通过对重复控制理论的分析发现，重复控制可以取得对各次谐波零稳态误差跟踪补偿，但是其存在延时环节，动态性能不好。通过与模糊PI相结合的复合控制策略，可以利用模糊PI部分保证系统的动态性能，依靠重复控制器提高输出电流波形的跟踪准确度，显著改善滤波效果。经过静态分析和负载突变情况下的仿真，发现其稳态准确度高，动态响应快，是一种较理想的APF谐波电流控制方法。



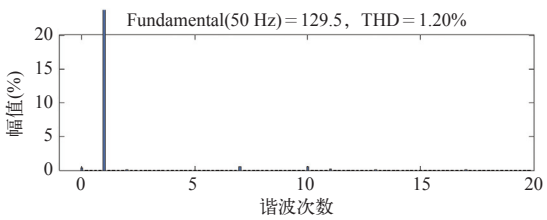
（a）补偿后三相电源电流



（b）0.2 s后A相电源电流频谱图



（c）0.2 s后B相电源电流频谱图



（d）0.2 s后C相电源电流频谱图

图12　负载突变时补偿后三相电源电流及频谱图

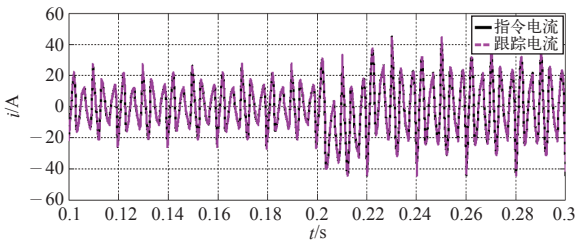


图13　负载突变时电流跟踪情况

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献

[1] 李战鹰，任震，杨泽明．有源滤波装置及其应用研究综述 [J]．电网技术，2004，28 (11)：40-43．

[2] 吴敬兵，罗安，马伏军，等．无功和谐波补偿装置的控制方法 [J]．电力自动化设备，2011，31 (5)：43-48．

[3] 王伟，周林，徐明．有源电力滤波器控制方法综述 [J]．继电器，2006，34 (20)：81-86．

[4] 郭自勇，周友庆，刘宏超，等．一种基于电压空间矢量的有源滤波器滞环电流控制新方法 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (1)：112-117．

[5] 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．

[6] 唐健．三相四线制三电平三桥臂APF关键技术及其控制研究 [D]．武汉：华中科技大学，2010：81-105．

[7] 王晓刚，谢运祥，帅定新．智能控制方法应用于APF的综述与展望 [J]．电网技术，2008，32 (8)：35-41．

[8] 王晓涛，曾成碧，刘晨曦．基于模糊控制的并网逆变器的研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (9)：97-101．

[9] 李帅，李槐树，李文艳，等．三相升－降压PWM整流器Fuzzy－PI控制算法 [J]．电力系统及其自动化学报，2012，24 (4)：120-125．

[10] Zha Xiaoming，Shi Feng，Chen Yunping．A repetitive learning boost converter control of neutral line active power filter based on FPGA and DSP [C]．International Power Engineering Conference，2007：1173-1178．

[11] Hamadi A，Al-Haddad K，Rahmani S，et al．Comparison of fuzzy logic and proportional integral controller of voltage source active filter compensating current harmonics and power factor [C]．2004 IEEE International Conference on Industrial Technology，2004：645-650．

[12] 李翠艳，张东纯，庄显义．重复控制综述 [J]．电机与控制学报，2005，9 (1)：37- 44．

[13] 耿攀，戴珂，魏学良，等．三相并联型有源电力滤波器电流重复控制 [J]．电工技术学报，2007，22 (2)：127-131．

[14] 唐欣，马迎召，李红涛．基于重复控制的有源滤波器双闭环控制 [J]．电机与控制学报，2009，13 (1)：67-71．

[15] 王汝田，王建赜，谭光慧，等．基于重复控制的新型三相变换器研究 [J]．电力自动化设备，2008，28 (6)：11-16．

（收稿日期：2015－09－09）EA

(上接第30页)

45 (2)：49-53．

[6] 倪琳娜，罗吉，王少荣．含风电电力系统的频率控制 [J]．电工技术学报，2011，26 (1)：235-241．

[7] He H，Ni Z，Fu J．A three-network architecture for on-line learning and optimization based on adaptive dynamic programming [J]．Neurocomputing，2012，78 (1)：3-13．

[8] Sui X，Tang Y，He H，et al．Energy storage based low frequency oscillation damping control using particle swarm optimization and heuristic dynamic programming [J]．IEEE Transactions Power Systems，2014，28 (5)：3174-3183．

[9] 何成明，王洪涛，韦仲康，等．风电场与AGC机组分布式协同实时控制 [J]．中国电机工程学报，2015，35 (2)：302-309．

[10] Tang Y，He H，Ni Z，et al．Reactive power control of grid-connected wind farm based on adaptive dynamic programming [J]．Neurocomputing，2014，125 (1)：125-133．

（收稿日期：2015－12－08）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net