

基于虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 控制有源滤波器

张倩倩

(徐州供电公司铜山县域检修分公司, 江苏 徐州 221008)

摘要:谐波对于电网稳定性和设备有非常大的危害性,而有源电力滤波器能对频率和幅值都变化的谐波跟踪补偿,可以有效的隔离系统与谐波源。本文深入分析了有源滤波器的工作原理,采用了虚拟磁链定向无锁相环 ip-iq 法谐波电流检测法,补偿电流发生电路采用了电压前馈电流解耦 SVPWM 控制方法。在 MATLAB/simulink 下建立仿真模型,仿真结果表明有源滤波器对于不可控制整流桥非线性负载有良好的补偿作用。因此,基于虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 控制有源滤波器对于频率和幅值都变化的谐波有很好的动态补偿效果好,并且补偿精度高,具有高度可控性和快速响应。

关键词:有源滤波器;无锁相环 ip-iq 法;电压前馈电流解耦;SVPWM

0 引言

随着全世界工业化进程的不断加快,电力电子设备在各个行业的应用越来越广泛,尤其是直流输电,电气化铁道,柔性交流输电系统及化工、冶金、煤炭等工业部门中大量应用^[1],这些都使得电力系统的谐波问题日益严重,而绿色能源又是一个极其重要的问题,因此人们对于谐波治理和电能质量越来越重视,从而将谐波的管理、监测和治理等摆到了十分重要的位置^[2]。谐波作为衡量电力系统电能质量的主要技术指标,对电力系统有相当大的影响,本文主要针对电能质量问题中的谐波治理进行谐波抑制方法的探讨,主要是针对电力有源滤波器的分析和设计方面做深入的研究。

1 有源滤波器的工作原理

1.1 有源滤波器

有源滤波装置是由采用可控功率开关储能元件(包括电容和电感)构成的基于电压或电流谐波以及无功进行补偿的电力电子装置。有源滤波系统从补偿对象中检测出谐波电流,通过补偿装置产生与这个谐波电流相等的反向电流注入电网,从而把补偿对象中的谐波电流抵消。有源电力滤波器可以跟踪补偿频率和幅值都不固定的谐波,并且所需的储能元件容量较小,能对频率和幅值都变化的谐波跟踪补偿,可以有效的隔离系统与谐波源,补偿效果好,因而在国内外都受到了广泛的重视。目前,利用有源电力滤波器进行谐波和无功补偿已经成为一

种发展趋势。

有源滤波中的核心问题之一是将不同类型谐波源所产生的谐波,精确快速的检测出来,将其作为生成补偿电流的给定。如何精确快速的检测谐波电流,保证有源滤波系统快速,稳态的运行,是有源滤波器中研究的一个重要方面。有源滤波器的另一核心是补偿电流发生电路,由电流跟踪控制电路、驱动电路、主电路三部分组成。采用电流控制时,由电流跟踪控制电路依据谐波检测电路检测出的谐波电流给定和由补偿电路产生的补偿电流之间的关系,得到补偿电流发生电路中主电路的每个开关器件开通与关断的 PWM 信号,最终得到所需要的补偿电流。采用功率控制时,通过跟踪瞬时有功功率和瞬时无功功率控制开关通断,最终得到所需要的补偿电流。

1.2 有源滤波器的工作原理

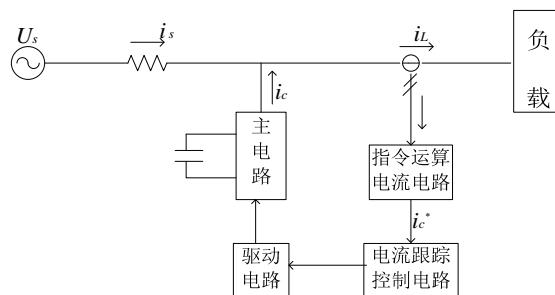


图1 有源滤波原理图

有源滤波器由谐波电流检测电路和补偿电流发生电路两部分组成。当三相电源的负载为非线性负载时,电源电压通过非线性负载产生谐波电流,使

得电网电流的工作特性不是以正弦规律变化的,此刻电源电流是基波电流和谐波电流之和即 $i_s = i_{sf} + i_{sh}$, 它产生谐波并消耗无功功率。有源滤波器核心是谐波电流检测和补偿电流生成,有源电力滤波器的系统框图 1 所示,由指令电流运算电路、电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路四个部分构成。其中,指令电流运算电路的核心是检测并计算出补偿对象电流中的谐波电流分量,被称为谐波电流检测电路。电流跟踪控制电路、驱动电路、主电路的作用是将产生的指令电流转化为实际的补偿电流。目前,主电路一般采用 PWM 逆变器^[3]。单独使用方式的并联型有源电力滤波器是以谐波对抵消原理工作的,并可实现多种补偿功能。可以用下式表示其原理。

$$\begin{cases} i_s = i_L + i_c \\ i_L = i_{Lf} + i_{LH} \\ i_c = -i_{LH} \\ i_s = i_L + i_c = i_{Lf} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 i_s 为电源端电流, i_L 为负载端电流, i_{Lf} 负载消耗的基波电流, i_{LH} 为负载电流中的谐波电流成分, i_c 为有源电力滤波器交流侧输出的补偿电流。从原理表达式可以看出,有源滤波器交流侧输出的电流与负载侧检测出的谐波电流幅值相等相位相反,在注入电力系统后,与谐波电流抵消,使得电源电流只剩下基波分量,因此有源电力滤波器补偿了谐波电流,使电网只提供负载的基波电流,阻止了谐波电流进入公用电网,改善公用电网电流波形。

2 虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 法谐波电流检测

2.1 虚拟磁链定向

传统的电压定向 $ip-iq$ 谐波电流检测^[4],使用传感器获得电网侧电压,经过锁相环得到电网电压的基频和初相角,进行谐波电流检测。采用虚拟磁链定向可以省去电压传感器,一方面可以节约成本,另一方面虚拟磁链定向在电网电压畸变时受电网条件影响较小。在虚拟磁链定向系统中,通过对磁链的观测实现矢量定向,磁链是电网电压的积分,根据对于积分器的分析,积分环节带有低通滤波器的特性,系统中的谐波在经过纯积分器后, K 次谐波电压的幅值以基波的 K 倍衰减,对于高次谐波有一定的滤除作用,因此虚拟磁链定向在电网电压不稳

定时,对干扰有良好的抑制作用。

2.2 虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测仿真分析

基于以上有关谐波电流检测的分析,本节对虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测进行仿真分析。根据虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测原理框图,在 MATLAB/simulink 下建立仿真模型如图 2 所示。

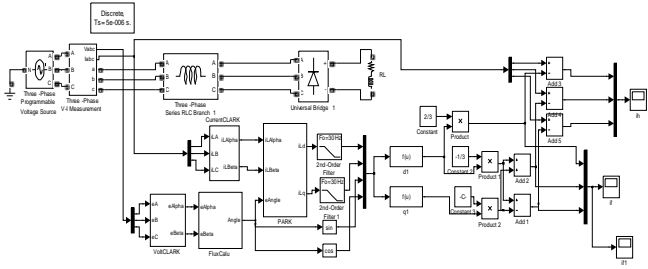


图 2 虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测仿真模型

仿真系统中,三相电源电压为 220V/50Hz,非线性负载为不控整流桥带阻感负载,电阻为 8Ω ,电感为 $1mH$ 。根据虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测原理,由电网侧电压估算磁链,观测磁链定向角,负载侧电流经坐标变换到 dq 轴下,通过两阶滤波器滤波,截止频率选为 30Hz,得到的负载侧基波电流经坐标反变换到三相旋转坐标系下,与负载电流相减得到负载侧谐波电流,仿真波形如下。

为了体现虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测方法抗电网畸变的性能,在三相电源上加入谐波源。在 0.05s 投入三次谐波和五次谐波,加入谐波源的电源电压畸变波形如图 3 所示。

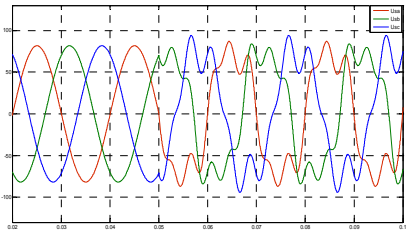


图 3 加入谐波源的电源电压畸变波形

不控整流桥带阻感性负载的非线性负载电流波形如图 4 所示,经过 FFT 分析如图 5 可知,谐波含量为 24.43%。

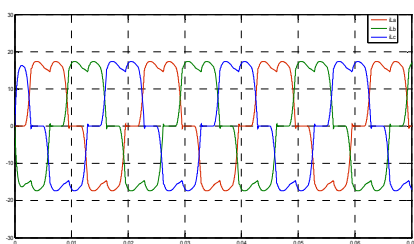


图 4 非线性负载侧电流

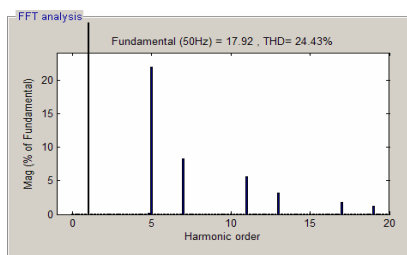


图 5 非线性负载侧电流 FFT 分析

虚拟磁链定向系统观测的虚拟磁链定向角度如图 6。

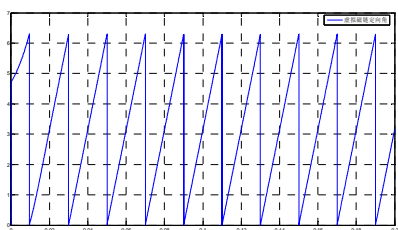


图 6 虚拟磁链定向角

经过谐波电流检测电路，得到的负载侧电流基波电流如图 7 所示。经过 FFT 分析如图 8 所示， $ip-iq$ 谐波电流检测电路的基波电流谐波含量为 0.25%。检测到的基波电流谐波含量跟选择的低通滤波器有很大的关系，截止频率越低所含谐波越少，但是影响系统的动态性能，因此，综合考虑选择了截止频率为 30 Hz ，仿真验证结果经过低通滤波器后基波的谐波含量较低，说明谐波检测电路检测出的谐波电流值更为精确。

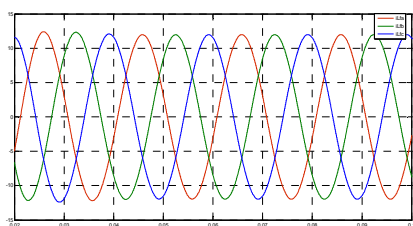


图 7 虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测电路负载电流的基波电流

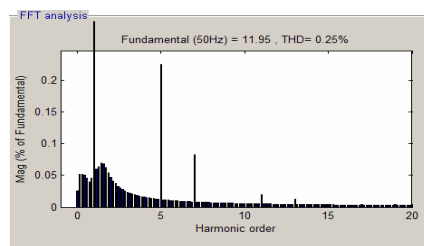


图 8 虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测电路负载电流的基波电流 FFT 分析

谐波电流检测中负载电流减去基波电流后的谐波电流如图 9 所示。

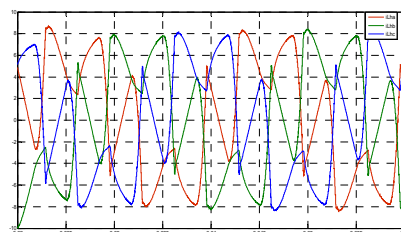


图 9 虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测电路谐波电流

由仿真结果可以看出，虚拟磁链定向无锁相环 $ip-iq$ 谐波电流检测电路，针对不控整流桥带阻感性负载的非线性负载谐波源的谐波电流检测出的谐波电流精度较高，在电源电压严重畸变的情况下，仍然能够准确的检测谐波电流。由仿真结果可以看出，非线性负载的电流畸变率由 FFT 分析为 24.43%，谐波含量较高，检测电路在电网电压畸变的情况下，虚拟磁链定向角度不受电网畸变的影响，观测出的矢量角度较为准确，因此，得到的与电网电压同相位的正余弦函数较为准确，负载电流经过坐标变换到 dq 坐标系下通过二阶低通滤波器后得

到的负载侧基波电流畸变率仅为 0.25%，可以看出负载侧基波电流所含谐波量很低，说明负载侧电流与检测电流检测出的负载侧基波相减得到的负载侧电流的谐波电流精度也较高，完全实现了 $ip-iq$ 谐波电流检测的不受电网电压畸变影响的优点，并且实现了无锁相环的谐波电流检测，有很好的实用价值。

3 虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 控制有源滤波器

3.1 基于虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦 SVPWM 控制有源滤波器补偿原理

基于虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦SVPWM控制有源滤波器^[5]在谐波电流检测部分采用的虚拟磁链定向下的负载侧谐波电流检测系统,通过虚拟磁链定向矢量的相位。补偿电流生成控制部分采用间接电流控制的SVPWM控制方式。根据虚拟磁链定向下dq轴有源滤波器数学模型变形可以得到输入电流满足下式

$$\begin{cases} L \frac{di_{cd}}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q + e_d - v_d \\ L \frac{di_{cq}}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d + e_q - v_q \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,在 dq 坐标系下,交直流的变量是互相耦合的。 dq 轴电流除受交流侧电压 v_d 、 v_q 的影响外,还受交叉耦合电压 ωLi_q 、 $-\omega Li_d$ 扰动和电网电压 e_d 、 e_q 扰动。若采用常见的PI调节,则

实际直轴电流 i_d 与给定电流 i_d^* 的跟随还受到 i_q 和电网直轴电压 e_d 的影响, 实际交轴电流 i_q 的情况也类似, 无法对 i_d 、 i_q 进行单独的控制。因此不能单纯地对 dq 轴电流进行简单的负反馈控制, 需要寻找一种解除 dq 轴之间电流耦合的控制方法。将上式变换为以 v_d 、 v_q 为计算量的形式

$$\begin{cases} v_d = e_d - L \frac{di_{cd}}{dt} - Ri_d + L\omega i_q \\ v_q = e_q - L \frac{di_{cq}}{dt} - Ri_q - L\omega i_d \end{cases} \quad (3)$$

将 PI 控制器的输出记为 A,B,

$$\begin{cases} A = -(L \frac{di_d}{dt} + Ri_d) \\ B = -(L \frac{di_q}{dt} + Ri_q) \end{cases} \quad (4)$$

由于引入了电流状态反馈解耦以及电网扰动电压作为前馈补偿,两轴电流已实现独立控制,系统的动态性能获得进一步的提高。当电流环采用 PI 调节引入电压前馈电流解耦控制时, v_d 、 v_q 的解耦控制方程为

$$\begin{cases} v_d = -(k_p + \frac{k_t}{s})(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ v_q = -(k_p + \frac{k_t}{s})(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (5)$$

这样实现了电压前馈电流解耦。这种控制算法

最大的优点在于两轴的电流之间不再存在相互影响, PI 控制性能较好。基于虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦矢量控制系统原理框图如图 10 所示, 系统由有源滤波直流侧电容电压外环和电流内环组成。

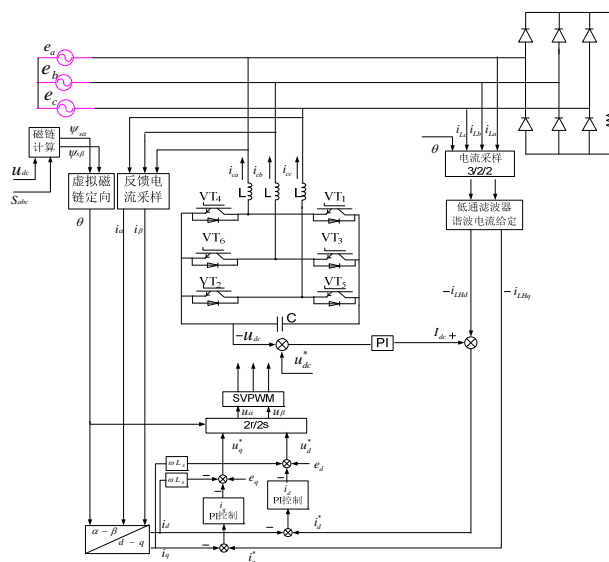


图 10 虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦矢量控制系统

虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦矢量控制系统的虚拟电网磁链矢量 ψ 的空间位置角 θ 在第三章给出了详细的计算公式,如式(6)所示

$$\begin{cases} \sin \theta = \psi_\beta / \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \\ \cos \theta = \psi_\alpha / \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \end{cases} \quad (6)$$

根据磁链与电压的关系 $\psi^{\overline{\omega}} = \int e dt$ 可以计算出

$\alpha\beta$ 坐标系中电网侧的磁链为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int e_\alpha dt \\ \psi_\beta = \int e_\beta dt \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, e_{α} 、 e_{β} 三相电网侧电压在 α 、 β 分量。在无传感器虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦矢量控制系统中, e_{α} 、 e_{β} 可以由有源滤波器交流侧电压计算。根据有源滤波器拓扑结构, 由基尔霍夫电压定律得

$$\begin{cases} e_\alpha = L \frac{d\mathbf{i}_\alpha}{dt} + \mathbf{v}_\alpha \\ e_\beta = L \frac{d\mathbf{i}_\beta}{dt} + \mathbf{v}_\beta \end{cases} \quad (8)$$

v_α , v_β 为 PWM 变流器交流侧三相电压的 α 、 β 分量。可以由 PWM 变流器直流侧母线电压和脉冲输出计算

$$\begin{cases} v_\alpha = \frac{2}{3}u_{dc}\left(s_a - \frac{1}{2}(s_b + s_c)\right) \\ v_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}u_{dc}(s_b - s_c) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, u_{dc} 为有源滤波器直流侧母线电压。将上式带入式(7), 得到电网侧虚拟磁链 ψ_α , ψ_β 的计算公式为:

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int \left(\frac{2}{3}u_{dc}\left(s_a - \frac{1}{2}(s_b + s_c)\right) \right) dt + Li_\alpha \\ \psi_\beta = \int \left(\frac{\sqrt{3}}{3}u_{dc}(s_b - s_c) \right) dt + Li_\beta \end{cases} \quad (10)$$

虚拟电网磁链是由有源滤波器直流侧母线电压和 PWM 变流器的开关状态得出的^[6]。基于虚拟磁链定向的电压前馈电流解耦矢量控制系统通过对于电网电压磁链的观测既可以得到电网电压矢量的相位, 实现无锁相环谐波电流检测, 同时可以通过计算得到电网电压的幅值, 实现无电压传感器控制。

4 虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 有源滤波器系统仿真

基于虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 矢量控制系统, 采用虚拟磁链定向无锁相环谐波电流检测, 减少了电网电压畸变的影响。仿真模型如图 11 所示, 仿真参数如下:

- (1) 三相电源相电压有效值为 220V, 三相电源频率为 50Hz
- (2) 三相电源为不理想电源, 阻抗为 $R=0.001394\Omega$, $L=1.2\text{mH}$
- (3) 负载为不控整流桥带阻感负载 $R=8\Omega$, $L=1\text{mH}$, 进线电感为 $L=1\text{mH}$
- (4) 直流母线电压 $U_{dc}=1000\text{V}$
- (5) PWM 交流侧滤波电感为 1mH , 直流侧电容为 $3300\mu\text{f}$
- (6) 开关频率为 20kHz

根据给定的仿真条件和主电路参数, 建立有源滤波系统仿真模型进行仿真。

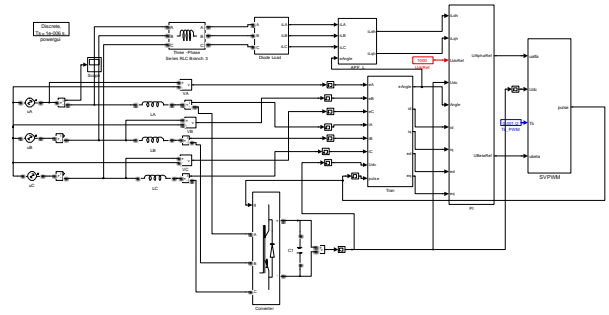


图 11 虚拟磁链定向电压前馈电流解耦矢量控制系统

虚拟磁链定向电压前馈电流解耦有源滤波器中, 交流侧电压的估算模型如图 12 所示。

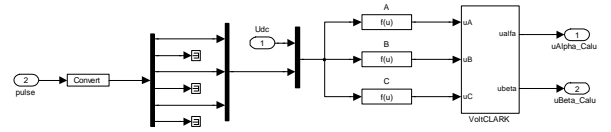


图 12 交流侧电压的估算仿真模型

虚拟磁链观测器的仿真模型如图 13 所示。

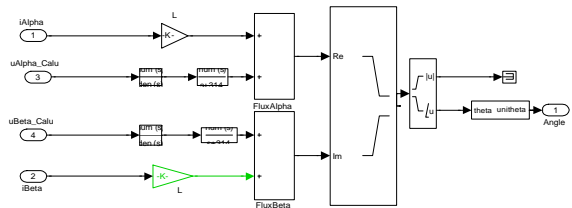


图 13 虚拟磁链观测器的仿真模型

并联电压型有源滤波系统中, 负载为不控整流桥带阻感性负载, $R=8\Omega$, $L=1\text{mH}$, 补偿前的负载电流如图 14 所示。通过 FFT 分析, 见图 15, 其畸变率为 24.43%。

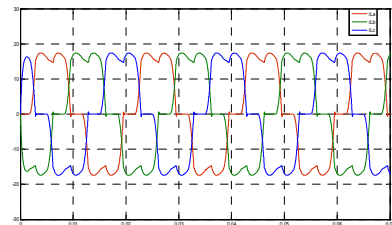


图 14 补偿前负载侧谐波电流

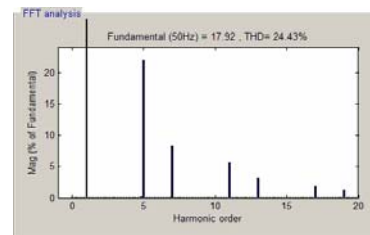


图 15 补偿前谐波电流 FFT 分析

有源滤波器接入系统补偿后的电源电流如图 16。通过仿真波形可以看出, 基于虚拟磁链定向电压前馈电流解耦矢量控制系统补偿效果良好, 补偿后的电源电流经 FFT 分析畸变率为 2.68%, 在 5% 以内, 符合国家有关标准。见图 17。

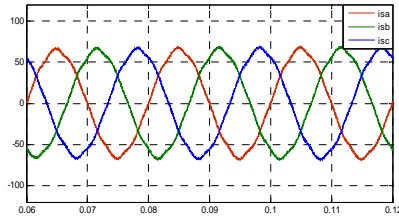


图 16 补偿后电源电流

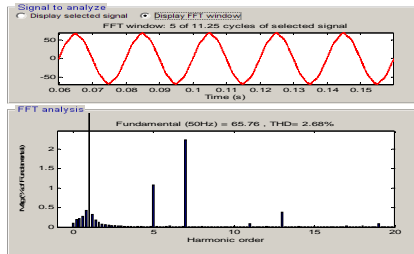


图 17 补偿后电源电流 FFT 分析

图 18 为虚拟磁链定向角度, 用弧度表示。由于有源滤波系统开始运行时, 需要时间建立磁链, 因此在最初的一个周期内磁链角有波动, 但在一个周期后从图中可以看出磁链角进入稳定状态。

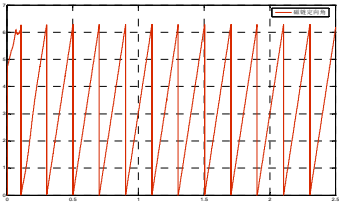


图 18 虚拟磁链定向角

在第四章, 分析了有源滤波系统能量交换的过程, 有源滤波直流侧电容电压存在电压下降和波动。虚拟磁链定向电压前馈电流解耦矢量控制系统采用了电压外环, 系统达到稳定后的有源滤波器直流侧母线电压如下图 19 所示, 稳定后的电压与给定电压相符。电压在 1000V 上下波动, 波动幅度大致在 2V 左右, 表明系统达到稳态后, 有源滤波器直流侧能量只与负载之间存在能量的交换。

电流内环采用 PI 控制, 使得反馈电流可以无静差的跟踪给定量。虚拟磁链定向电压前馈电流解耦矢量控制系统在 dq 坐标系下 i_{Hd} 和 i_{Hq} 的反馈与给定波形如图 20 和图 21 所示, 跟踪效果良好。

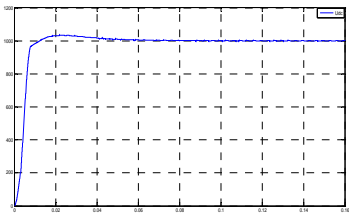


图 19 有源滤波直流侧电容电压

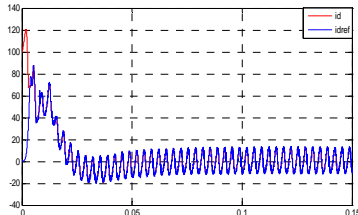


图 20 有功电流的跟踪效果

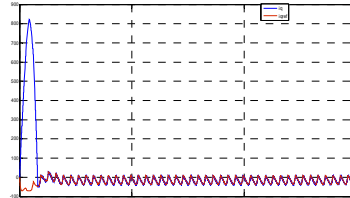


图 21 无功电流的跟踪效果

5 结论

从以上仿真分析可以看出, 虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 控制有源滤波器对不可控制整流桥非线性负载有良好的补偿作用。有源滤波器在投入系统前, 负载侧电流的谐波畸变率为 24.43%, 系统采用虚拟磁链定向系统, 不受电网波动干扰, 谐波电流检测电路采用第三章的虚拟磁链定向无锁相环 $i_p - i_q$ 谐波电流检测, 检测出的谐波电流精度较高。电压前馈电流解耦控制系统采用解耦控制, dq 坐标系下电流分量互不影响, 可以实现单独控制两轴的电流, 电流控制精度较高, 控制性能较高, 补偿后的电源电流畸变率为 2.68%, 补偿效果较好。电流内环 PI 控制能够实现无静差的跟踪控制, 从仿真结果可以看出电流跟踪量基本上与反馈量重合。综上, 虚拟磁链定向电压前馈电流解耦 SVPWM 控制有源滤波器系统稳态补偿效果良好。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 80-98.
- [2] 赵良炳, 马维新, 陈建业. 现代电力电子学及其在电力系统

统中的应用（四）[J].电网技术,1995, 19(3):64-67.

[3] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制(第一版)[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[4] 赵仁德, 贺益康. 无电网电压传感器三相 PWM 整流器虚拟电网磁链定向矢量控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005(10), 56-61.

[5] 赵仁德, 贺益康. PWM 整流器虚拟电网磁链定向矢量控

制仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2005(05).

[6] 吴勇.有源电力滤波器的若干关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2007.

作者简介:

张倩倩（1986—），女，江苏徐州人，从事继电保护工作，

E-mail: zhangqian579@126.com。