基于特定消谐技术的单相有源滤波器设计

王建元，于洪洋，孙澄宇，史海涛

（东北电力大学电气工程学院， 吉林 吉林 132012）

摘要：设计了一种新型的单相有源电力滤波器(APF)，应用特定消谐技术，不需实时检测负载的无功电流和高次谐波电流，即可实现同时补偿负载无功及高次谐波电流的需求。给出了一种优化特定谐波消除PWM技术开关角的求解方法；设计了单相有源电力滤波器PI控制器。仿真结果表明该滤波器具有响应速度快，稳定性好，能有效地消除和抑制谐波，并能够对无功功率进行灵活地调节等特点。

关键词：特定谐波消除PWM； δ相移控制； 有源滤波器

A design of active power filter based on selective harmonic elimination technique

WANG Jian-yuan, YU Hong-yang, SUN Cheng-yu, SHI Hai-tao

(School of Electric Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The paper designs a new type of single—phase active power filter(APF).By applying selective harmonic elimination technique ,the APF can compensate the reactive component and high harmonics of line current without detecting the reactive current and harmonic current of the load. A switch angle's solution method of optical SHEPWM is presented. PI controller of the APF is also designed. The simulation results show the APF has the advantages of fast response time and good stability, effectively restraining and eliminating harmonics, and flexible regulation of reactive power.

Key words: SHE PWM; δ phase-shifting control; active power filter

中图分类号： TM76 文献标识码： A 文章编号： 1003-4897(2008)06-0046-04

0 引言

在电力系统中，随着计算机、彩色电视机、变频空调等办公、家用电器的越来越广泛的应用，使低压三相供电系统中的单相整流器负载越来越多，所产生的高次谐波电流对供电系统的影响也越来越大，甚至影响供电系统的安全运行。为了减小无功和谐波问题给电力系统带来的危害，各国研究人员对谐波和无功的特性进行了深入的研究，并提出了相应的补偿方法[1~7]。目前的研究多是对三相系统进行补偿，对于单相系统研究的很少，所提出的单相APF的方法都有一定的缺陷，基于自适应干扰对消原理的有源滤波器采用开环控制，稳定性比较差[8]；单周控制[9]需要快速复位的积分电路，开关误差校正能力有限，系统存在稳态误差，在负载电流快速发生变化时无法准确复位，导致电源电流有突变；80年代末，加拿大Phoivos D.Ziogas等人提出的三相电压源型APF[10]，能够用于无功和谐波补偿。既可以应用于三相系统中，又可以应用于单相系统中，它不需要实时检测负载电流的无功和谐波分量，只通过调节逆变器输出电压的幅值和相位就可以实现对电网进线端电流的谐波和无功补偿，很好地解决了电流跟踪型APF的缺点[11, 12]。本文将牛顿迭代算法应用到特定消谐技术中，求解速度快，最后在PSCAD/EMTDC进行了仿真，并给出了仿真的结果，证明了该种方法的可行性。

基金项目： 吉林省教育厅科技资助项目（2006-023）

1 系统组成和工作原理

本文设计的APF由消除特定次谐波的PWM电压型逆变器构成，它强迫逆变器输出端电压为正弦的电压源。由于逆变器交流侧电压输出仅由直流侧的电压以及开关所采取的调制方式确定，当逆变器直流侧为一恒定电压源且开关控制采用特定消谐PWM技术时，其交流侧输出电压主要包括基波以及PWM调制频率及其倍频附近的高次谐波。因此，将逆变器并联在负载侧，如能保证逆变器直流电容

的电压稳定，则负载的输入电压将被强制为逆变器的输出电压。当采用适当的调制方式使逆变器的输出为正弦波时，不仅可保证用户的电压质量，而且可抑制非线性负荷产生的谐波注入电网。

单相有源滤波器结构如图 1 所示。

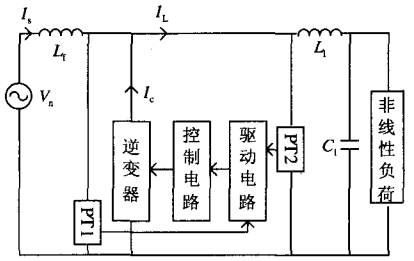

图 1 单相有源滤波器结构图

Fig.1 Configration of single-phase APF

如图 1 所示：I_s为电源电流，I_L为负载侧电流，I_c为逆变器输出电流，电网电压 V_n通过补偿电感 L_f与 H 桥逆变器并联，电压互感器 PT1、PT2 分别检测控制回路所需的电网电压，逆变器输出电压。为了减小负载进线电压的畸变程度，在逆变器输出端和负载输入端连接了由 L_1作为高次谐波滤波器。

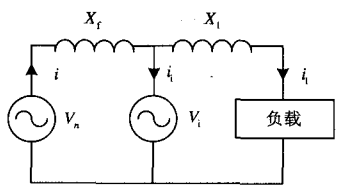

图 2 电力有源滤波器单相等值电路

Fig.2 Single phase equivalent circuit of APF

图2为电力有源滤波器单相等值电路，V_i为逆变器输出电压，具体实现原理如下：

1)　电压补偿通过维持V_i恒定实现；

2)　逆变器输出电压V_i滞后于交流电网电压V_n的移相角为δ，输入电流i滞后于系统侧一阶低通滤波器的电压大约90°；

3)　由交流电网向负载和补偿器传递的有功功率可由下式决定：

$$P=\frac{V_n V_i}{X_f}\sin\delta \qquad (1)$$

流入逆变器的有功功率为电网输出有功功率P与负载消耗的有功功率之间的差额，由于稳态运行时滤波器的损耗基本不变，因此改变移相角δ可以调节负载消耗的有功功率，从而迫使负载电压改变。因为电力有源滤波器运行于一种自足方式，即逆变器直流侧没有额外的功率输入，因此逆变器输出端电压V_i的幅值可以通过调节相角差δ来实现。在系统进入稳态运行时，PWM电压型逆变器仅从电网吸收少量的有功功率来补偿直流电容与开关器件的损耗，以维持V_i的幅值恒定。

1）负荷动态调节

当电网电压低于额定电压时，为了维持负载电压恒定，必须保证V_i的幅值恒定，此时应增大δ角，由式(1)可知，δ角增大将使得电网向补偿器与负载提供的有功功率增加，由于逆变器所消耗的有功功率基本不变且很小，实际分析时可认为近似为零，因此负载消耗的有功功率将增加，如果认为负载电阻不变，则负载电压将上升，此时逆变器的直流侧电容被充电，直至直流电容电压V_{dc}增加到需要的值。同理，当电网电压过高时，将产生相反的变化来维持直流电容电压的恒定。

2）负荷无功功率调节

当控制逆变器输出端电压V_i和系统侧电压V_n之间的相角差δ较大时，系统侧注入负荷侧的有功功率P增加，在负荷阻抗固定的情况下将迫使负荷端电压(逆变器输出端电压)增加，以使注入系统的有功功率与负荷吸收的有功功率相平衡，此时，补偿器向系统注入感性无功功率，功率因数为超前的功率因数。同理，控制逆变器输出端电压V_i和系统侧电压V_n之间的相角差δ较小时，补偿器向系统注入容性无功功率，功率因数为滞后的功率因数，从而补偿器起到调节负荷功率因数的作用。

2　优化特定消谐 PWM 技术（SHEPWM）

1973年，美国著名电力电子学专家Richard G. Hoft提出了特定消谐PWM技术[10]，此技术可以有效地消除低次谐波。和其它调制技术相比，特定消谐技术有许多优势，开关频率低、输出电压、电流的质量较高。双极性SHEPWM的原理如下。

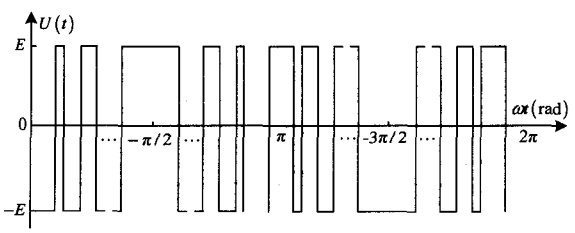

图 3 双极性 SHEPWM 输出电压波形

Fig.3 Waveform of output voltage of bipolarity SHEPWM

$$U(t)=\sum_{n=1}^{\infty}[a_n\sin(n\omega t)+b_n\cos(n\omega t)] \qquad (2)$$

$$a_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}U(t)\sin(n\omega t)\mathrm{d}(\omega t)$$
$$b_n=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}U(t)\cos(n\omega t)\mathrm{d}(\omega t) \quad (3)$$

由于图3中输出电压波形$U(t)$为奇函数，又是奇谐函数，即$U(t)$在[0，π]区间以π/2为轴对称，在[0，2π]区间以π点对点对称[11]，因此使得傅里叶分解式中的直流分量、余弦分量和偶次正弦分量系数为零，其傅里叶分解系数可简化为：

$$\begin{cases}b_n=0,n=1,2,3,\cdots\\ a_n=0,n=2,4,6,\cdots\\ a_n=\dfrac{4E}{n\pi}[-1-2\sum_{k=1}^{N}(-1)^k\cos(n\alpha_k)]\\ n=1,3,5,\cdots\end{cases} \quad (4)$$

初值选取是影响算法收敛性的一个关键因素。单相双极性SHEPWM的初值给定公式见式（5）：

$$\begin{cases}\alpha_1=90/N\\ \alpha_i=i\times\alpha_1,i=2,3,\cdots,N\\ N\le 21\end{cases} \quad (5)$$

搭建PSCAD仿真模型得到逆变器输出电压及其等效图、频谱图如图4、图5所示。

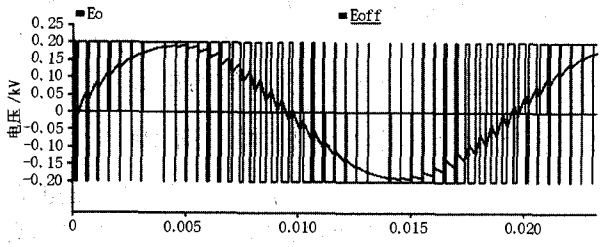

图 4 逆变器输出电压及其等效图

Fig.4 Waveform of voltage of inverter output

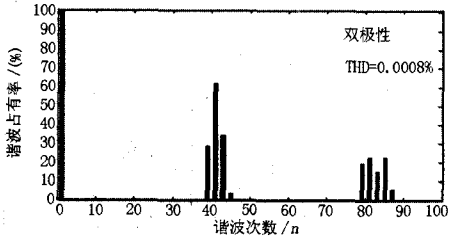

图 5 逆变器输出电压频谱图

Fig.5 Spectrum of voltage of inverter output

从单相双极性输出频谱可以看出，37 次及以下的谐波几乎被完全消除，且在开关频率附近，谐波幅值较小，消谐效果非常好。

3 PI 调节器设计

文中实现对相角差δ的控制主要是通过 PI 调节实现的，交流侧输入电压和逆变器输出电压之差作为 PI 控制器的输入量，同时交流侧电压输入锯齿波发生器产生同步的锯齿波信号，PI 控制器的输入量与锯齿波信号通过比较器比较后，产生随系统电压和逆变器输出电压之差成线性变化的可移相方波信号，此方波信号通过触发器→计数器→存储单元→驱动电路控制主桥路的 IGBT 输出从而实现 δ 角的调节改变 APF 输出端无功功率的大小和极性。

PI 调节器的方程可描述为：

$$\delta(t)=K_{pv}e_v+K_{iv}\int_0 e_v\mathrm{d}t \quad (6)$$

K_{pv} 与 K_{iv} 分别为δ相移控制环节中的 PI 调节器的比例和积分系数，e_v 为误差电压，V_{ref} 为电容参考电压。有：

$$e_v=V_{ref}-V_{dc} \quad (7)$$

通过调节 K_{iv} 提高系统的无差度，进而提高了系统的稳态性能。当负载稳定时，系统有好的稳定性；当负载变化时，系统又能及时跟踪负载变化。 增大 K_{pv} 可以提高系统的阻尼程度，减小系统稳态误差。

本文中 K_{pv} 取值为 1，K_{iv} 取 0.02。

4 仿真结果

1）非线性负荷补偿，运行在稳定状态时波型如图 6 所示。

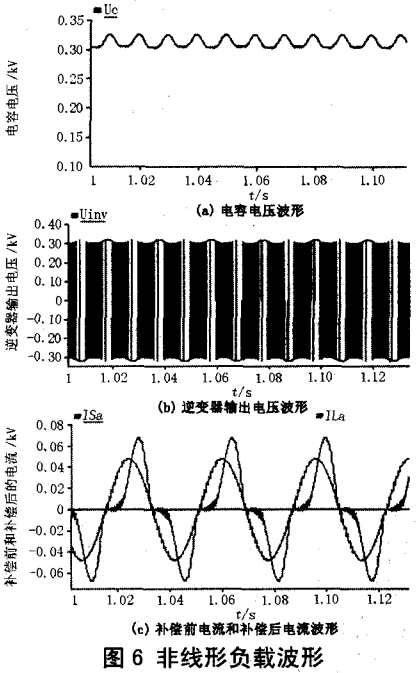

图 6 非线形负载波形

Fig.6 Waveform of non-linear load

2）动态非线性负荷补偿波形如图 7 所示。

在 3.2~3.4 s 之间加一个动态负荷，电流变大。

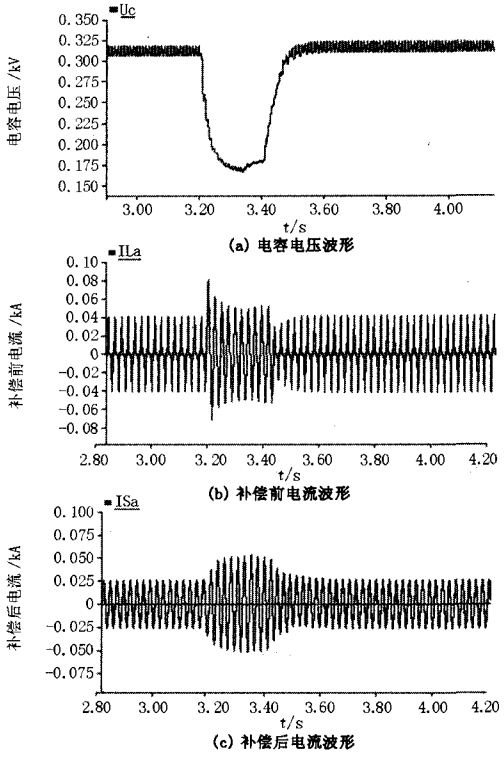

图 7 动态非线性负荷波形

Fig.7 Waveform of dynamic non-linear load

非线性负荷中 37 次以下谐波基本被滤掉。仿真研究的结果表明：APF 作为一种新型的负荷补偿装置，可以有效地调节无功功率以及抑制非线性负荷谐波，同时也有稳定负荷电压的功能，并可对动态非线性负荷进行补偿。

5 结论

本文设计的单相有源滤波器采用了特定消谐技术，具有响应速度快，谐波含量小等优点。本文实现的方法强制逆变器的输出电压为正弦波电压，因此在某些场合还可以作为稳定负荷电压使用，它可以推广应用于电力系统、发电厂、变电所，特别适用于电弧炉、牵引变电所和需要抑制大容量非线性负荷所产生谐波的场所。结果表明，APF 能有效地消除和抑制谐波，并能灵活地调节无功功率，具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 王兆安,杨军,刘进军．谐波抑制和无功功率补偿[M].北京：机械工业出版社，2002.
WANG Zhao-an，YANG Jun，LIU Jin-jun．Harmonic Control and Reactive Power Compensation[M]．Beijing: China Machine Press，2002.

[2] 王卫勤，刘汉奎，徐殿国，等．电压跟踪型单相电网有源滤波器补偿特性的研究[J]．中国电机工程学报，1997，19(7)：72-76.
WANG Wei-qin，LIU Han-kui，XU Dian-guo，et al．Study on the Compensation Characteristics of the Voltage-tracking Single—Phase Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE，1997，19(7)：72-76.

[3] 王建元，俞红祥，王琦．基于 DSP 新型 PWM 三相逆变器的研究[J]．电力系统及其自动化学报，2003，15(4)：38-41.
WANG Jian-yuan,YU Hong-xiang,WANG Qi.Research of a Novel Three-phase Converter-inverter Based on DSP[J]．Proceedings of the EPS，2003，15(4)：38-41.

[4] Moran L，Ziogas P D，Joos G．A Solid-State High Performance Reactive-Power Compensator[J].IEEE Trans on Industry Applications，1993，29(5)：969-978.

[5] 杨君，王兆安．三相电路谐波电流两种检测方法的对比研究[J]．电工技术学报，1995，10(2):43-48.
YANG Jun，WANG Zhao-an．A Study on the Comparison of Two Metho-ds Used to Detect the Harmonic Currents of Three-Phase Circuit[J]. Transactions of China Electro Technical Society，1995，10(2):43-48.

[6] 杨君，王兆安，邱关源．单相电路谐波及无功电流的一种检测方法[J]．电工技术学报，1996，11(3)：42-46.
YANG Jun，WANG Zhao-an，QIU Guan-yuan．A Detection Method for Harmonics and Reactive Currents in Single-Phase Circuits[J]. Transactions of China Electro Technical Society，1996，11(3)：42-46.

[7] 李乔，吴 捷．自适应谐波电流检测方法用于有源电力滤波器的仿真研究[J]．电工技术学报，2004，19（12）：86-90.
LI Qiao，WU Jie．Simulation Study of Adaptive Harmonic Current Detection Method for Active Power Filters[J]．Transactions of China Electro Technical Society，2004，19（12）：86-90.

[8] 丁勇，张方华，王慧贞．基于特定消谐技术的四桥臂三相逆变器[J]．电力电子技术，2006，40(4)：1-3.
DING Yong，ZHANG Fang-hua，WANG Hui-zhen. Three-phase Inverter with Four Legs based on Selected Harmonic Elimination[J]．Power Electronics，2006，40(4)：1-3.

[9] 王广柱.并联型有源电力滤波器电流控制的等效原理[J]．中国电机工程学报，2006，26（15）：40-45.
WANG Guang-zhu．Equivalence Principle of Current Control for Shunt Active Power Filters[J]．Proceedings of the CSEE，2006，26（15）：40-45.

（下转第 54 页　continued on page 54）

[3] 叶鹏，宋家骅. 基于不同交易阶段的电力市场阻塞管理方法研究[J]. 中国电力，2003,36(6)：27-30.
YE Peng, SONG Jia-hua. A Congestion Management Framework Based on Different Power Trade Stage[J]. Electric Power, 2003,36(6):27-30.

[4] 王永福，张伯明，孙宏斌. 实时电力市场运营模式[J]. 电力系统自动化，2002，26（11）:1-4.
WANG Yong-fu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin. Spot Market Operation Modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(11):1-4.

[5] 鲁丽娟，侯云鹤，吴耀武，等. 计及用户需求弹性影响的输电阻塞解决方案研究[J]. 电网技术，2004,28(5): 46-49.
LU Li-juan, HOU Yun-he, WU Yao-wu, et al. A Research on Transmission Congestion Menagement Considering Influnence of Consumers' Demand Elasticity[J]. Power System Technology,2004,28(5):46-49.

[6] 刘昌，姚建刚，余虎，等. 一种新型的电网输电阻塞管理模式[J]. 电网技术，2005,29(12):16-21.
LIU Chang, YAO Jian-gang, YU Hu, et al. Research of A New Congestion Management Mode[J]. Power System Technology, 2005,29(12):16-21.

[7] 孙昕，童明光，赵庆波，等. 二级备用辅助服务市场中可中断负荷管理模型研究[J]. 中国电机工程学报，2004, 24(3):30-33.
SUN Xin, TONG Ming-guang, ZHAO Qing-bo, et al. A Study on Management Model of Secondary Reserve for Auxillary Services Market[J].Proceedings of the CSEE, 2004,24(3):30-33.

[8] 曾鸣，刘万福，张毅，等. 满足电网安全运营约束的辅助服务交易模式研究[J]. 中国电机程学报，2005, 25(5): 82-87.
ZENG Ming, LIU Wan-fu, ZHANG Yi, et al. Study on Auxillary Service Trade Model with Grid Operation Constrained[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(5): 82-87.

[9] 丁军威，沈瑜，康重庆，等. 备用辅助服务市场的组织与交易决策[J]. 电力系统自动化. 2003,27(2):29-32.
DING Jun-wei, SHEN Yu, KANG Chong-qing, et al. Organization and Trading Decision of Reserve Service Market for Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(2):29-32.

[10] 王建学，王锡凡，张显，等. 电力市场和过度期电力系统可中断负荷管理（二）--可中断负荷运营[J]. 电力自动化设备，2004,24(6):1-5.
WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, ZHANG Xian, et al. Interruptible Load Management in Power Market and Interim System –Part 2 Operation of Interruptible Load[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(6):1-5.

[11] Dounda H. Overview of California ISO summer 2000 demand response programs[A]. In:Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting[C]. Ohio (USA): 2001. 228-223.

[12] New York Independent System Operator, NYISO Auxillary Services Manual, 1999 [EB/OL]. http://www.nyiso.com, 2002-09-15.

[13] CHEN C S,LEU J T. Interruptible Load Control for Taiwan Power Company[J].IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2):460-465.

[14] Matpower. A Matlab Power System Simulation Package, Version 3.0b3[Z]. Power Systems Engineering Research Center, School of Electrical Engineering. NY: Cornell University.

收稿日期：2007-09-24； 修回日期：2007-12-06

作者简介：

张 涛(1981-)，男，硕士，研究方向为电力系统分析，电力市场；E-mail: ztcolonel@hotmail.com

王 琪（1955-），男，工程师，研究方向为电力系统继电保护；

司春旺（1980-），男，硕士，研究方向为配电网自动化与小电流接地系统故障选线。

（上接第 49 页 continued from page 49）

[10] Patel H S, Hoft R G. Generalized Technique of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverter: Part 1[J]. IEEE-IA, Harmonic Elimination,1973，9(3)：310-317.

[11] LI Zhi-dian, ZHOU Qin-ying, LI Hong, et al. A Novel Algorithm for Real-time Solution of Nonlinear Surmount SHET Equations[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University，2004， 22(1)：37-40.

[12] 张文义，杨乐民，佟为明，等. 特定消谐式变频器的研究[J]. 电力电子技术，2002，36(4)：53-56.
ZHANG Wen-yi, YANG Le-min, TONG Wei-ming, et al. Study of Selective Harmonic Elimination Inverter[J]. Power Electronics,2002,36(4):53-56.

收稿日期：2007-08-28； 修回日期：2007-11-26

作者简介：

王建元（1971-），男，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用；E-mail: free1971@163.com

于洪洋（1982-），女，硕士，主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用；

孙澄宇（1974-），男，硕士，主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。