

APF 控制及检测电路实现方法综述

张光烈¹, 徐海利¹, 韩学军¹, 黎建华², 张根元³, 王俊霞⁴

(1. 东北电力大学电力工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 浙江台州学院, 浙江 临海 317000; 3. 云南电力试验研究院, 云南 昆明 650051; 4. 葫芦岛市供电公司, 辽宁 葫芦岛 121500)

摘要: 有源电力滤波器 APF (active power filter) 是补偿电力系统谐波及无功功率的重要装置, 其控制的实时性和准确性是实现有效补偿的一个关键, 就目前所研究的几种有代表性的单相 APF 方法进行了——分析, 阐述了它们的原理, 并指出了它们的缺点和优点。其中逆变器输出电压恒定控制, 单周控制, 基于有功能量平衡原理的并联型有源滤波器由于能够保持逆变器输出端电压恒定, 并且电流畸变率 (THDi) 能保持在 5% 以下, 因而具有广阔的发展前景, 就最后一种方法在 Matlab7. 0 中进行了仿真, 仿真结果表明, 此种方法实现的 APF 具有很好的谐波补偿效果。

关键词: 逆变器输出电压恒定控制; 单周控制; 有功能量平衡

A summary about implementation of APF controlling and detecting system

ZHNAG Guang-lie¹, XU Hai-li¹, HAN Xue-jun¹, LI Jian-hua², ZHANG Gen-yuan³, WANG Jun-xia⁴

(1. Department of Electric Power Engineering, Northeast China Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China; 2. Taizhou Institute, Linhai 317000, China; 3. Yunnan Electric Experiment Research Center, Kunming 650051; 4. Huludao Power Supply Bureau, Huludao 121500, China)

Abstract: Active power filter (APF) is an important device to compensate harmonic and reactive current in power system and the key of the effective compensation lies in the real-time and accurate control. The paper analyzes some representative methods on single-phase APF, and introduces the principle, points out their demerits and merits. Around them constant control on inverter output voltage, one-cycle control, the active power filter based on the active power balance theory has a better development because they can hold the inverter output voltage a constant value and keep the THDi below 5%. The paper simulates the last method in the Matlab7. 0, which the result shows is quite simple and performs good harmonics compensation.

Key words: constant control on inverter output voltage; one-cycle control; active power balance

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)02-0069-05

0 引言

随着谐波问题的日益突出, 无源的谐波补偿方法显示出很大的不足, 而有源电力滤波器 APF (Active Power Filter) 为谐波问题提供了有效的解决途径。APF 运用瞬时滤波形成技术, 对包含谐波和无功分量的非正弦波形进行“矫正”, 它能对变化的谐波(包括无功)进行迅速的动态跟踪补偿, 且补偿特性不受电网阻抗的影响。对于 APF 的实现方法, 目前已经提出了很多种, 本文将比较有代表性的几种, 以单相 APF 为例将其——进行原理说明, 另外还有空间矢量最优控制, 滞环电流控制, 单周控制, 变结构控制(VSC), 无差拍控制, 基于单位功率因数(UPF)的控制, 组合变流器相移 SPWM 技术, 就不进行——说明了。

1 5 种 APF 实现方法

1.1 检测负载侧电流的方法

从负载中检测出要抑制的谐波电流, 将其作为控制电路的指令电流, 控制逆变器使其产生出与指令电流相等的补偿电流 i_c , 再使其反相后并入电网, 从而使电网电流 i_g 在理想情况下成为纯正弦波。

控制电路如图 1 所示。

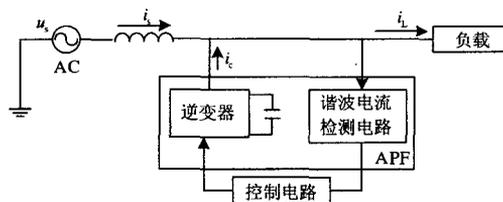


图 1 检测负载侧电流的方法原理图

Fig.1 Diagram for fundamental of detecting the current on the load side

在检测负载侧电流的方法中，最具有代表性的方法是自适应检测法。根据负荷电流的基波分量和电源电压相关的原理，以电源电压为参考输入，负荷电流为原始输入，经自适应滤波器和减法电路后，系统输出就没有与基波电压同频同相的分量，达到检测目的；如仅以电流有功分量相同的信号作为参考输入，则系统输出为无功和高次谐波电流之和。

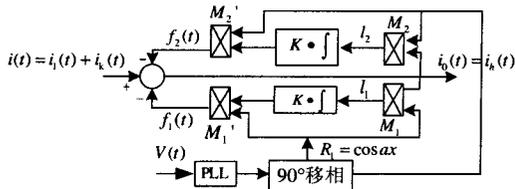


图2 自适应检测法原理框图

Fig.2 Diagram for fundamental of the adaptive detecting method

自适应检测法的原理框图如图2所示。当检测输出电流中 $i_0(t)$ 含有与 $R_1(t)(R_2(t))$ 相同的干扰成分时， $i_0(t)$ 通过反馈支路中乘法器 $M_1(M_2)$ 与 $R_1(t)(R_2(t))$ 作乘法，只有与 $R_1(t)(R_2(t))$ 同频率的干扰成分与 $R_1(t)(R_2(t))$ 相乘后才能产生直流分量。这个直流分量经积分器的累积放大，其输出产生一逐步增长的直流量 $W_1(t)(W_2(t))$ ，再经乘法器 $M_1(M_2)$ 后得到与 $R_1(t)(R_2(t))$ 同相或反相的反馈量 $f_1(t) = W_1(t) \cdot R_1(t)$ 和 $f_2(t) = W_2(t) \cdot R_2(t)$ ，以抵消作为原始输入的负载电流中 $i(t)$ 的干扰 $i_1(t)$ 与 $R_1(t)(R_2(t))$ 同相或反相的分量，直到输出中 $i_0(t)$ 的干扰为0。

1.2 补偿剩余无功功率恒为零控制

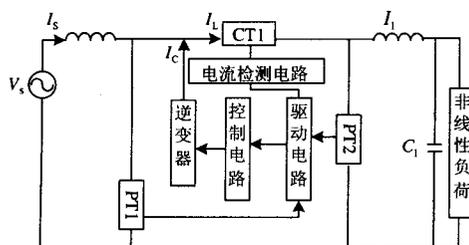


图3 有源滤波器模型图

Fig.3 Model of the active power filter

APF 电路拓扑结构如图3所示：电网电压 V_s 通过补偿电感 L_f 与 H 桥电压源逆变器并联，电压互感器 PT1、PT2 和电流互感器分别检测控制回路

所需的电网电压、逆变器输出电压和负载电流。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级联了由 L_f 和 C_f 组成的二阶低通滤波器。

为了建立滤波器的数学模型，将其等效为如图4(a)所示的模型电路。其中 V_s 为电网电压， V_c 为电压源逆变器的输出电压。为方便起见，将逆变器输出低通滤波器和非线性负载一起用一个含有各次谐波成分的理想电流源来等效。图4(b)和图4(c)分别为滤波器的基波等效电路和高次谐波等效电路。

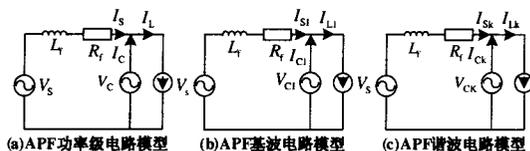


图4 电路模型

Fig.4 Circuit model

设逆变器输出电压 V_{c1} 滞后电网电压的角度为 δ ，则逆变器输出电压的基波分量的相量可以表示为：

$$\dot{V}_{c1} = V_{c1} e^{-j\delta}$$

P_L 和 P_C 分别为负载吸收的有功功率和无功功率， Q_L 和 Q_C 分别为逆变器吸收的有功功率和无功功率。

$$Q_C = Q_L + (V_{c1}^2 - V_{c1} V_s \cos \delta) / X_f = Q_C + \Delta Q_C$$

$$\Delta Q_C = (V_{c1}^2 - V_{c1} V_s \cos \delta) / X_f$$

由上式可以看出，逆变器发出的无功功率一部分为负载所需的无功功率，一部分为补偿剩余无功功率分量 ΔQ_C 。只要选择合适的控制方式，便可使得逆变器发生的补偿剩余无功功率分量 ΔQ_C 在一定范围内变化，同时使逆变器的输出电压 V_{c1} 也在一定范围内变化，就能够保证电网发出的无功功率在很小的范围内变化，从而提高了电网进线端的功率因数，达到无功补偿的目的。

1.3 逆变器输出电压恒定控制

原理图如图5所示，逆变器输出电压与电网电压的差值作为调节器的输入信号，调节器的输出信号与一个固定最小偏差电压的差值和与电网电压同步的谐波电压信号进行比较，比较器的输出脉冲作为存贮优化特定消谐 PWM 脉冲开关角的 EPROM 的复位信号，以实现调节逆变器输出电压和电网电

压的相角差。无论负载电流怎样变化时, 逆变器输出电压始终保持恒定。从 EPROM 中输出的开关信号经光电隔离后输入到功率器件的驱动电路。电压源逆变器中的功率开关采用的是 IGBT(绝缘栅双极晶体管)。

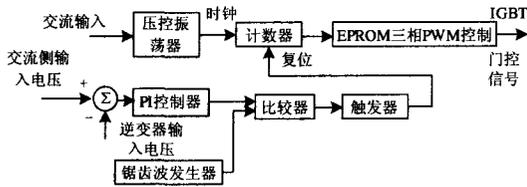


图 5 δ 相移控制电路

Fig. 5 Controlling circuit for δ -phase shift

本电路具有强制输出端电压为同步的基波电压, 且谐波电压很小的特点, 不需要跟踪非线性负荷谐波电流进行控制就具有高效电力有源滤波器的功能, 能完全补偿系统电压的不平衡和负荷的不对称。除此之外, 它还可以连续、快速、灵活地调节无功功率, 稳定电压, 改善负荷功率因数。并且, 较低的斩波频率 ($f=1.15$ kHz 左右) 为该装置提供无功补偿时带来较高的效率。

1.4 单周控制单极性单相有源电力滤波器

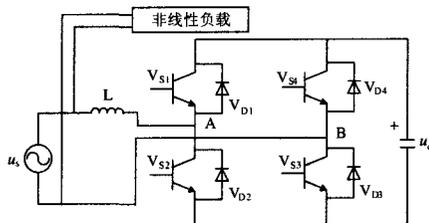


图 6 单相 APF 主电路结构图

Fig.6 Diagram of the structure of the main circuit of the single-phase APF

单周控制单相有源滤波器有双极调制和单极调制 2 种调制方式, 双极调制的单周控制 APF 中由于电感电流纹波的存在, 导致补偿后电源电流含有严重的直流分量。所以, 目前主要采用单极性控制。控制电路主要由可复位积分器、比较器、触发器及时钟组成, 产生的偏差通过 PI 控制器得到补偿而产生误差电压 u_m , PI 控制器的目的是维持直流侧电容电压的恒定。由于开关的调制频率 f_s 远大于电网频率, 因此可以认为在一个开关调制周期内, 电感电流变化量为零, 从而电感两端的电压 u_L 在 1 个调制周期内满足伏秒平衡方程。

当 $u_s > 0$ 时,

$$u_s DT_s + (u_s - u_c)(1 - D)T_s = 0$$

当 $u_s < 0$ 时,

$$u_s DT_s + (u_s + u_c)(1 - D)T_s = 0$$

对上两式进行求解可得:

$$u_c(1 - D) = |u_s|$$

假设接入 APF 后, 电网侧的功率因数为 1, 即

APF 与负载并联后等效为一个纯电阻, 用 R_e 表示,

因此有:

$$|u_s| = R_e |i_s|$$

取电源电流采样电阻为 R_s , 可得单极调制时单

周控制 APF 的控制方程:

$$u_m(1 - D) = R_s |i_s|$$

式中: $u_m = u_c R_s / R_e$

1.5 基于有功能量平衡原理的控制方法

从瞬时有功能量在系统中传递的角度出发, 以调节电网输入的有功能量为目标, 直接对输入的电流进行控制, 避开了传统的检测有功和无功分量的繁琐过程, 使得谐波检测的过程十分简单, 从而有利于降低有源滤波器的控制成本。同时这种控制方法采用了检测电源电流的控制方式, 属于闭环控制, 具有较好的谐波补偿性能。

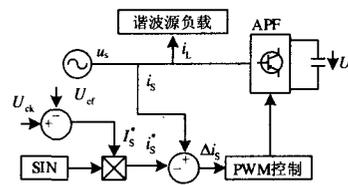


图 7 控制原理图

Fig.7 Diagram of the controlling fundamental

U_{cr} 是 u_c 的给定值, U_{cf} 是 u_c 的反馈值, 给定电压和反馈电压的差值是这时整个系统所需的有功功率的总和。假设电源电压无畸变, 电网输入的有功功率和输入的有功电流是成比例的, 因此有功电流的大小也就反映了输入有功功率的大小。电流指令信号与电源电流信号相减得到的偏差与三角波相比较得到 PWM 信号来控制开关管的导通和关断。当电源电流的输入值高于系统消耗的有功功率时, 直流侧电压增加, 使得指令电流减小, 输入有功电流降低, 反之亦然。由于只是对电流进行控制, 系统可以在一个比较宽的输入电压范围内自动达到输

入输出的能量平衡。当负载波动时,也可以调节输入电流,达到输入能量和输出能量的平衡,同时保证直流侧电压不变,这种控制方法不需要复杂的计算,从有功平衡的角度出发,控制思路也比较明确。

2 各种 APF 电路的优缺点

2.1 基于自适应干扰对消原理的自适应检测法

优点:这种方法构成的检测系统是 1 个死循环连续调节系统,其运行特性与器件的依赖性不大;具有良好的自适应能力,当电压发生波形畸变和频率波动时,检测装置仍能正常工作。缺点:动态响应速度较慢。导致系统动态响应速度较慢的原因主要是积分器的影响。另外系统对各高次谐波(3次、5次、7次和9次)的检测精度也不是很理想。因为自适应采用开环控制,稳定性比较差。考虑系统 1.2 倍的裕量,直流侧电容电压采用 500 V 已经足够大,采用自适应控制方法时,根据仿真情况,稳定电压大约在 700 V 左右,这就要求器件耐压高,无形中增加了成本,电压越高,器件就容易损坏。另外,逆变器输出端电压谐波较大,不适宜采用此种方法。

2.2 补偿剩余无功功率恒为零控制

令 $V_{C1} = k \cdot V_s$ (k 为一常数,为逆变电压系数),电网输出的无功功率为 Q_s ,逆变器补偿剩余无功功率 ΔQ_c 。负载所需要的无功全部由逆变器提供,因此 Q_c 和 Q_s 几乎相等。 $Q_c = 0$ 时, $\Delta Q_s = 0$ 。电网几乎不发出无功。根据仿真情况,电网进线端的功率因数 PF 在 0.9~1 之间变化。但是由于逆变器输出端电压谐波较大,与此相对应,它的补偿效果就没有下面介绍的好。

2.3 后三种方法都采用了闭环控制,逆变器输出电压恒定控制

其中第三种方法谐波滤波器采用特定消谐优化 PWM 技术,以特定消谐 PWM 技术解出的解为初值,以谐波畸变率为优化目标,优化 PWM 波形的开关角,可以实现既消除 PWM 波形的固定次数谐波,同时,又能有效地减小特定消谐 PWM 波形剩余谐波含量及其改善剩余谐波的频谱分布。特定消谐的第一个波峰在 41、43 次谐波附近,而优化特定消谐的第一个波峰在 47、49 次谐波附近。在谐波幅值比较接近的情况下,较高频率的谐波电压形成的电流比较低频率的谐波电压形成的电流要小,因此,优化特定消谐 PWM 波形形成的电流谐波畸变率相对于特定消谐 PWM 波形形成的电流谐波畸变率要小,可以把谐波畸变率降到 2.1%。

而第四种——单极性单周控制单相有源电力滤

波器能优化系统响应、减小畸变和抑制电源干扰,具有反应快、开关频率恒定、鲁棒性强、易于实现、抗干扰、控制电路简单等优点,但是其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,可以把谐波畸变率降到 3% 以下。

第五种方法——基于有功能量平衡原理的并联型有源滤波器的控制方法,可以不用通过获得 APF 指令电流值和检测 APF 电流的办法来得到电流误差,而可由电源电流指令值与电源电流检测值之差得到。因此,只要传统 APF 控制方式的 APF 电流可控,则电源电流就可控,这样就简化了电路,使得实现变得容易,只需要检测电源电流即可。

3 仿真

由于上述列举的 APF 实现方法众多,就不在此一一进行仿真了,本文主要就第 5 种方法进行仿真,结果如图 8 所示。

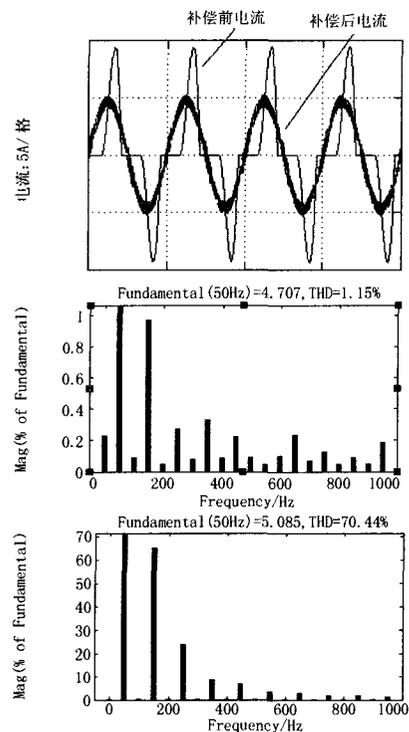


图 8 基于有功功率平衡原理 APF 仿真结果

Fig.8 Simulation results of APF based on the balanced active power theorem

从图 8 可以看出,谐波畸变率由 70.44% 降到 1.15%,补偿效果明显。降到了国家规定的 5% 以下。

4 结论

本文将目前所研究的具有代表性的有源滤波器

的检测方法进行一一介绍, 经过理论分析证明, 后三种谐波方法都可以在保证逆变器输出端电压稳定的情况下, 将谐波畸变率降到 5% 以下, 具有非常广阔的发展空间。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 蒋斌, 颜钢锋, 赵光宙. 一种单相谐波电流检测法的研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 65-69.
JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. Study

on a Detecting Method for Harmonic Currents in Single-Phase Circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 65-69.

- [5] 戴朝波, 林海雪, 雷林绪. 单相并联型电力有源滤波器的仿真分析[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 28-32.
DAI Chao-bo, LIN Hai-xue, LEI Lin-xu. Simulation and Analysis of Single Active Power Filter[J]. Power System Technology, 2001, 25(8): 28-32.
- [6] 戴朝波, 林海雪, 雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 80-84.
DAI Chao-bo, LIN Hai-xue, LEI Lin-xu. A Study on the Comparison of Two Harmonic Current Detecting Methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 80-84.
- [7] Singh B, Verma V. An Indirect Current Control of Hybrid Power Filter for Varying Loads[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1).

收稿日期: 2007-04-19; 修回日期: 2007-09-20

作者简介:

张光烈(1965-), 男, 讲师, 主要研究方向为高、低频电子技术在电力系统中的应用;

徐海利(1981-), 男, 研究生, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: xuhaili33@126.com

韩学军(1953-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化及计算机控制。

(上接第 68 页 continued from page 68)

参考文献

- [1] Kim Eun-Soo, Kim Tae-Jin, Byun Young-Bok et al. High Power Full Bridge DC/DC Converter Using Digital-to-phase-shift PWM Circuit[A]. In: IEEE Power Electronics Specialists Conference[C]. Vancouver (Canada): 2001. 221-225.
- [2] Bester DD, du Toit J A, Enslin J H R. High Performance DSP/FPGA Controller for Implementation of Computationally Intensive Algorithms[A]. In: IEEE Symposium on Industrial Electronics[C]. Pretoria South Africa: 1998. 240-244.
- [3] Bibian S, JIN Hua. Time Delay Compensation of Digital Control for DC Switch Mode Power Supplies Using Prediction Techniques[A]. In: IEEE Trans on Power Electronics[C]. 2000. 835-842.
- [4] Panov Y, Jovanovic M M. Design and Performance Evaluation of Low-voltage/high-current DC/DC

On-board Modules[A]. In: IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. 1999. 545-552.

- [5] RUAN Xin-bo, WANG Jian-gang, CHEN Qian-hong. An Improved Current-doubler-rectifier ZVS PWM Full-bridge Converter[A]. In: Power Electronics Specialists Conference[C]. Vancouver(Canada): 2001. 1749-1754.
- [6] 胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 312-313.
HU Shou-song. The Theory of Automation, 4th Edition[M]. Beijing: Science Press, 2001. 312-313.

收稿日期: 2007-01-19; 修回日期: 2007-09-24

作者简介:

刁均伟(1973-), 男, 本科, 主要从事高电压试验技术。

E-mail: diao731@sohu.com