LMAPF 有源电力滤波器的开发与应用

Developments and Application of "LM" Active Power Filter

邓隐北，张子亮，唐庆伟
河南亮明电控设备有限公司 河南郑州 450044

摘 要：有源电力滤波器（APF），通过对谐波的实时监测、在线计算出系统中的谐波分量，并产生相应的控制信号，再由 IGBT 等功率器件构成的逆变电路得到所需补偿的谐波分量，并联接入产生谐波的主回路中，实现动态跟踪抑制谐波和无功补偿的目的。本文重点介绍了“亮明电控”最新研制的 LMAPF 的关键技术及其创新特点，力求在电力系统中推广应用，以有利于节能减排和确保供电质量。

关键词：有源电力滤波器，谐波抑制，无功补偿，电力系统，降损节能

中图分类号：TN713　　文献标识码：B　　文章编号：1606-7517(2014)09-5-136

1 前言

随着电力电子（PE: Power Electronic）技术的迅速发展，PE 装置的工业市场和应用领域正在不断地扩大，越来越多的电气设备对取用的电能形式和质量，以及对功率流动的控制与处理提出了新的要求。作为供电电源和用电设备之间的非线性接口，在实现功率控制和处理的同时，所有 PE 装置均不可避免地产生非正弦波形，向电网注入谐波电流，且随着功率变换装置容量的日益增大，使用数量的迅速上升和控制形式的多样化等，对电气环境将形成一大公害。

在不采取限制或消除谐波电流、电压的措施下，如果按照 PE 装置容量和电力系统短路容量的相对大小，来选择主电路连接形式和控制形式，就势必使谐波分量达到不能允许的程度，其后果是很严重的。表现在：对电子线路和通信系统产生强烈的电磁干扰（EMI），谐波电流引起电网 LC 谐振，使电网高压电容过流、过热而爆炸；使线路上的变流装置交流输入端功率因数降低，发电、配变电设备的功耗加大、效率降低；大量的无功功率引起电网电压波动，使交流电机转矩脉动、温升增高；使电气设备的保护系统误动作而造成重大事故。尤其近年来新型 PE 器件的工作频率不断提高，器件开关的高频 di/dt、du/dt 效应使 EMI 问题日趋严重，和其它环境污染一样，谐波导致的“电气环境污染”影响广泛而深远，治理谐波问题已引起普遍关注和重视，抑制谐波势在必行。

2 谐波抑制技术的分类与性能比较

谐波抑制是提高电能质量，保证供用电设备安全可靠运行的重要手段之一，目前，谐波的抑制方法有补偿和改造谐波源两大类。补偿法是对谐波采取滤波或补偿的方法。通常采用无源滤波装置或有源滤波装置，对谐波或无功功率进行补偿。无源滤波器（PF: Passive Filter）也称为 LC 滤波器，这是最早采用的无源滤波装置；有源滤波装置则是利用 PE 变流技术构成的有源滤波器或无功发生器等。改造谐波源的方法有整流装置的多重化技术，采用先进控制技术的新型整流器等。

作为无源滤波器的 LC 滤波器，由滤波电容器、滤波电抗器和电阻器适当组合而成。因其具有结构简单、设备投资少、运行可靠性高、运行费用较低等优点成为应用最多的谐波补偿装置。LC 滤波器又分为单调谐滤波器、双调谐滤波器及高通滤波器等几种。实际应用中经常是由几组单调谐滤波器和一组高通滤波器组成的滤波装置。高通滤波器也称为减幅滤波器（damped filter），它能在较宽广的频率范围内滤出较高次的谐波，比较适合于一些大功率的应用场合（如电弧炉等）。但无源滤波其滤波效果依赖于系统阻抗特性，并容易受温度漂移、网络上谐波污染程度、滤波电容老化及非线性负荷变化的影响。此外还存在以下缺点：

只能抑制按设计要求规定的谐波成分，有时由于高次

谐波的成分复杂，必须同时加入多个滤波电路，使整个无源滤波装置的体积增大、损耗增加。同时考虑到成本问题，不可能仅靠增加无源滤波器数量来提高滤波效果；

谐波电流过大时可能导致无源滤波器的过载，损害设备；

无源滤波器的滤波效果将随系统的运行情况而变化，特别对电网阻抗和频率变化非常敏感，在这种情况下难以保证滤波效果；

无源滤波器需要使用大量的电感、电容元器件，响应速度慢，占地面积大，维护工作繁重，成本增大。

与无源滤波器相对应的是有源电力滤波器（APF: Active Power Filter)。谐波源一般为非线性负载，如整流器等，产生谐波电流 I，供电系统一般为保护对象；APF 的作用是产生与谐波源的谐波电流具有相同幅值而相位相反的补偿电流 -I，以达到消除谐波的目的。与无源滤波器相比，APF 是一种主动型的补偿装置，具有较好的动态性能。特别是基于电压源型的 APF，结构简单、质量轻、损耗小、价格便宜以及容易实现多重化，从而降低开关器件的开关频率。因此，在工业领域，这种 APF，通常被考虑为优先研发的应用项目。下面重点介绍河南亮明电控设备有限公司，新近开发的 LMAPF 有源滤波器的性能和特点，以及其应用情况。

3 LMAPF 有源电力滤波器的基本原理和特点

有源电力滤波器（APF）是一种新型谐波抑制和无功补偿装置。APF 不同于传统的 LC 无源滤波器（只吸收固定频率的谐波），它能对电流和频率都变化的无功功率进行补偿，并可实现动态补偿。其基本原理是，通过实时检测谐波状况，在线计算出所含谐波分量，产生相应的控制信号，去控制可关断功率器件（如 IGBT）所组成的逆变电路。因而，将电容器中存储的电能逆变为所需补偿的电流谐波分量，并联接入产生谐波的主回路中，以达到迅速动态跟踪抑制谐波的效果。

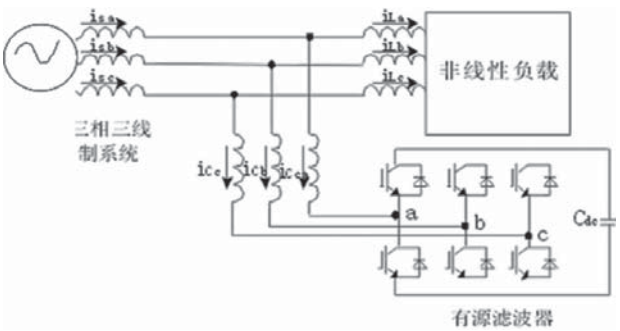


图 1 并联有源滤波器的原理图

“亮明电控”生产的有源电力滤波器（LMAPF）为谐波治理提供了合理的解决方案；同时，还能实现无功补偿的功能，为用户改善功率因数和确保用户用电的质量。

当断路器合闸后，LMAPF 首先通过预充电电阻对 DC 母线的电容器充电，这个过程是防止上电后对 DC 母线电容器的瞬间冲击。当母线电压 VDC 达到额定值后，预充电接触器断开。

直流电容作为储能元件，通过 IGBT 逆变器和内部电抗器向外部输出补偿电流提供能量。

LMAPF 通过外部互感器采集电流信号送至控制 PCB 的谐波分离模块，该模块将基波成分分离，将谐波成分送至调节和监测模块，并将采集到的系统谐波成分和 LMAPF 已发出的补偿电流比较，得到的差值作为实时补偿信号输出到驱动电路。触发 IGBT 逆变器将补偿谐波电流注入到电网中，实现滤除谐波的功能。

4 LMAPF 的主要研制内容及方案比较

4.1 谐波电流检测技术

精确、实时地检测出电网中瞬时变化的畸变电流，是提高有源电力滤波器补偿精度的一个关键问题，以下是目前采用的几种检测方法：

4.1.1 基于 Fryze 功率定义的检测方法

其原理是将负荷电流分解为与电压波形一致的分量，将其余分量作为广义无功电流（包括谐波电流）。它的缺点是：因为 Fryze 功率定义是建立在平均功率基础上的，所以要求瞬时有功电流需要进行一个周期的积分，再加其它运算电路，要有几个周期延时。因此，用这种方法求得的“瞬时有功电流”实际是几个周期前的电流值。

4.1.2 用模拟带通滤波器（或陷波器）检测的方法

用模拟带通滤波器（或陷波器）检测有害电流。由于滤波器中心频率固定，当电网频率波动时，滤波效果会大大下降。此外滤波器的中心频率对元件参数十分敏感，这样要使滤波器得到理想的幅频特性和相频特性是很困难的，并且这种方法也不能同时分离出无功电流和谐波电流。

4.1.3 基于频域分析的 FFT 检测法

此方法需进行两次FFT变换，约需80ms，瞬时性较差，并且电压畸变将带来较大的非同步采样误差，特别是对高次谐波的检测精度影响较大。

4.1.4 基于瞬时无功功率理论的畸变电流瞬时检测方法

该方法基于“瞬时无功功率理论”，先将电网的三相电气量变换到 α、β 坐标，并在此坐标上重新定义瞬时实功率、瞬时无功率等，然后再将这些功率逆变为三相补偿电流。该方法对于三相平衡系统的畸变电流检测具有较好的实时性，有利于系统的快速控制，可以获得较好的补偿效果。但该方法对于三相不平衡负荷所产生的无功和谐波电流，补偿效果则不理想，且只适用于三相系统，不能用于单相系统。

4.1.5 自适应检测法

该方法基于自适应噪声对消原理，把电压作为参考输入，负载电流作为原始输入，电压经自适应滤波处理后，输出一个与负载电流基波有功分量幅值、相位均相等的信号，将此信号从负载电流中扣除后，得到高次谐波和无功电流的分量的总和。目前已用神经网络或硬件实现的方法将自适应滤波理论应用于谐波电流和基波无功电流的检测，结果表明，其系统工作特性几乎不受元件参数变化的影响；当电压发生波形畸变或有基波偏差时，检测系统仍能正常工作，具有良好的自适应能力，但将自适应滤波技术应用于实践构成完整的有源电力滤波器尚不多见，可以认为这种方法是一种很有发展前途的新方法。

4.1.6 自适应线性神经网络检测方法

该算法是在自适应噪声对消原理的基础上发展起来的，采用人工神经网络实现自适应滤波器。自适应检测算法的精度和速度，与神经元的学习速率 η 以及 Adaline 权值的初始值 $W(0)$ 有很大关系。以上几种检测方法，国内外学者都做了较详细的研究，其中基于瞬时无功功率理论的畸变电流瞬时检测方法响应速度较快，但该方法对于三相不平衡负荷所产生的无功和谐波电流，补偿效果则不理想，且对硬件检测电路的要求较高。自适应检测法和自适应线性神经网络检测方法计算精度较高，但计算量较大，影响实时性。

4.2 有源滤波器的控制方式

根据被检测电流的不同，APF 的控制方式可以分为 3 种：检测负载电流控制方式、检测电源电流控制方式和复合检测控制方式。

图 2 中当 K_S 断开，K_L 闭合时为检测负载电流控制方式；K_S 闭合，K_L 断开时为检测电源电流控制方式；当 K_S，K_L 都闭合时为复合控制方式。

通常采用的是检测负载电流控制方式。为滤除补偿电流中开关频率附近的谐波，需设置高通滤波器。但高通滤波器可能和电源阻抗发生并联谐振，从而使补偿特性变差。

检测电源电流控制方式对电源电流构成闭环控制，把产生并联谐振的高通滤波器包含在闭环内，可以有效地抑制谐振。但这种方式为获得较好的补偿特性，需要较大的开环增益，而开环增益过大会导致闭环系统不稳定。

复合控制方式综合了检测负载电流控制方式和检测电源电流控制方式的优点，其补偿效果明显好于前两种控制方式。对于不同的控制方式，并联型有源电力滤波器的数学模型都各不相同。

4.2.1 检测负载电流的控制方式

其指令电流运算电路的输入信号来自负载电流，这是最基本的一种控制方式。但在电力电子开关高频通断的过程中，产生了其工作频率附近一些次数很高的谐波。为滤除这些谐波，设置了 LCR 高通滤波器 HPF。因为要滤除的谐波频率很高，所以只要很小容量的 HPF 就可以了。如果把负载电流和有源电力滤波器电流之和 i_{CL} 看作电流源，则反映 HPF 和电源内阻抗关系的单相等效电路如图 7(a) 所示。以 i_{CL} 为输入，以 i_S 为输出时的传递函数为 $G_Z(s)$，其幅频特性如图 7(b) 所示。可以看出，高次谐波可以很好地被滤除，但在角频率 ω_0 处却发生了并联谐振，这将使得电源电流发生畸变，有源电力滤波器的补偿特性变差。这是该控制方式的主要缺点。

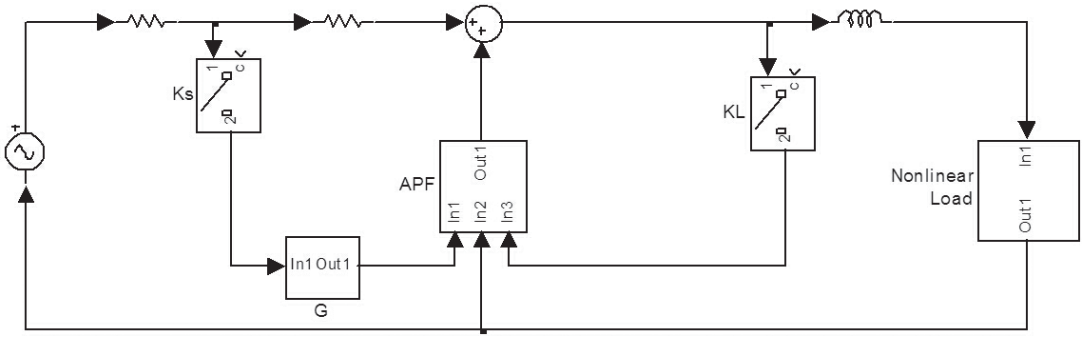
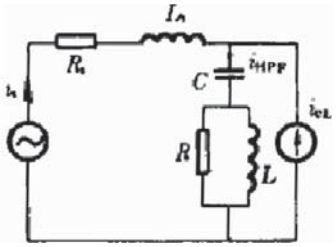
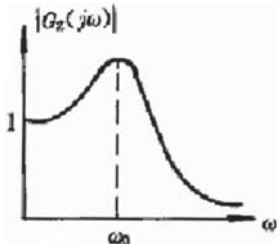


图 2 并联有源电力滤波器系统控制原理图



(a)



(b)

图3 单相等效电路原理图及幅频特性

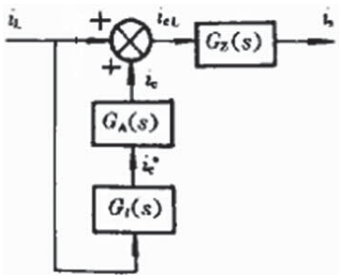
图 3 是这种控制方式的结构图，图中 $G_Z(s)$ 是指令电流运算电路的传递函数。它使输入电流的基波完全被除去，而对输入电流的谐波放大倍数为 -1。$G_A(s)$ 是补偿电流发生器的传递函数，它可以看作一个时间常数很小的一阶惯性环节。可以看出，这种控制方式下的系统是一个开环系统。

4.2.2 检测电源电流的控制方式

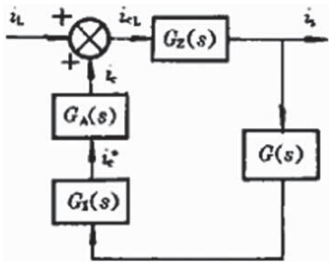
有源电力滤波器的作用是补偿谐波，最终使电源电流成为正弦波。基于此，可考虑检测电源电流，用指令电流运算电路求出其中的谐波，反极性后作为指令电流对补偿电流发生器进行控制。这种控制方式的结构图如图 4(a) 所示。图中 $G_Z(s)$、$G_A(s)$、$G_I(s)$、$G(s)$ 的含义与图 4 相同。$G(s)$ 是为改善补偿特性而加入的校正环节。 与上一种控制方式不同，这种控制方式因电源电流的反馈而构成闭环控制系统。它把产生并联谐振的传递函数 $G_Z(s)$ 包括在闭环内，选择适当的校正环节 $G(s)$，就可抑制并联谐振。为了获得良好的补偿特性，$G(s)$ 应有较大的放大倍数，以增大系统开环增益。但放大倍数过大会使闭环系统不稳定。这里 $G(s)$ 采用的是一阶惯性－微分环节，其传递函数为：$G(s)=KT_S/(1+T_S)$

4.2.3 复合检测控制方式

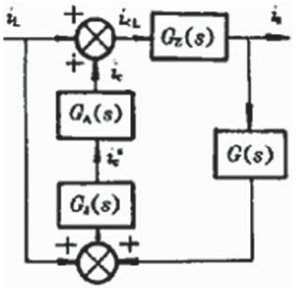
把上述两种控制方式结合起来，就得到复合检测控制方式。在这种控制方式中，指令电流信号主要来自负载电流，在它的作用下，可对负载中的谐波电流进行较好的补偿，而电源电流信号及校正环节 $G(s)$ 的作用主要是抑制 HPF 和电网阻抗的并联谐振。因为电源电流闭环并不承担补偿负载谐波电流的主要任务，所以 $G(s)$ 的放大倍数就不必很大，这样可使系统有较好的稳定性。可以看出，复合控制方式综合了前两种控制方式的优点，是一种较为理想的控制方式。



(a)



(b)



(c)

图4 有源电力滤波器的三种控制方式原理图

4.3 电流跟踪控制方法和直流侧电压控制方法

有源电力滤波器工作时通过控制回路控制 PWM 逆变器中的开关状态，使输出的补偿电流实时跟随参考电流而变，以达到理想的补偿效果。常用的控制方法主要有：

4.3.1 电流滞环比较控制法

这是一种应用较为普遍的方法，其中又以滞后控制法的效果更为理想。它的工作原理是：当输出补偿电流 i_c 超过参考电流 I'_c 上限时，使开关接低状态，从而使加在滤波电抗器上的电压为负，i_c 降低；当 i_c 低于 I'_c 下限时，使开关接高状态，从而使加在滤波电抗器上的电压为正，i_c 增加。这样，使补

偿电流能始终跟随着参考电流而变化，从而获得较好的补偿效果。该方法的缺点是：由于其开关频率受到滞后系统及其上、下限的限制，对于快速暂态控制的效果较差，且开关频率也容易发生较大的变化，给参数设计带来困难。

PWM法常用的是三角载波与补偿参考电流比较以产生PWM信号模式的方法。这种方法简单易行，可预先确定主电路器件的开关频率，调整也十分方便，具有动态响应好，电流跟随能力强的优点，特别适合于模拟控制系统，它已为交直交变流系统和有源电力滤波器广为采用。但是这种方法在开关频率过低时，会使补偿电流的高次谐波分量复制效果变差。

4.3.2 协调三相滞后控制法

该方法是一种实时三相滞后开关方案。它采用协调滞后控制器来控制母线电压偏差的径向和切向分量，利用模拟比较器实现径向和切向滞后的判定，并采用控制器实现协调坐标变换和监视模拟滞后判定的全过程。在小功率三相实验电路上的试验结果表明，该方法具有对暂态扰动快速响应的特点，研制的滞后控制器可以提供完全优化的三相开关模式，并获得较好的补偿效果，又由于该方法在固定和旋转参考坐标上都施加了滞后控制，所以开关频率只有很小的波动。

4.3.3 预测控制法

预测控制法的基本思路是在第k个采样时刻根据所检测到的负载电流及补偿器输出电流，计算k+1时刻的指令电流值及各种可能开关状态下补偿器输出电流的预测值，然后计算某种特定目标函数的大小（一般为指令值和预测值的累计误差），选择目标函数值最小的开关状态作为k+1时刻触发主回路开关的依据。

直流侧电压（并联型）的波动将会影响到谐波电流的补偿效果，增大直流侧电容值将会减小电压波动，但会增加投资费用。所以得增加直流侧电压控制环，目前的文献介绍普遍采用PI控制方法。

5 LMAPF 技术创新点

本产品具有如下技术特点和优势：

①响应速度快：采用了先进算法，响应速度小于100μS，消谐效果明显，治理后谐波含量小于5%；

②可靠性高：采用了IGBT死区保护，确保在系统或设备异常时安全可靠运行；

③补偿容量大：可通过并柜扩容方式提高补偿容量，补偿电流不受限制。目前国内有源滤波装置的补偿容量基本上在450A以下，“亮明电控”的有源滤波装置的补偿容量达到2000A以上；

④结构简单：采用模块化设计，抗干扰能力强，易于安装维护；

⑤性价比高：采用自主知识产权，可有效控制成本，提高性价比；价格仅是国外同类产品价格的60%；

⑥节能效果显著：不需要建立谐波通路，装置自身能耗低，且能将谐波畸变功率转换为有用功，节能效果显著。同时，该项研究在以下几点的技术突破将极大地提高我国在有源滤波领域的国际地位，促进了我国在该领域的技术进步：

①在有源滤波装置中采用直流侧电压环控制和工频数字锁相环控制，改变了我国在该行业中传统的瞬时无功功率自适应算法理论，减少了数学运算，提高了响应速度；

②运用平均电流补偿逆控制的新型电流环控制策略，改变了该领域传统的PWM控制方法，提高了补偿电流的速度和精度；

③采用软开关换流方式，改变了传统硬开关换流方式的工艺结构，使装备更加安全稳定，高效运行。

6 LMAPF 成果转化与应用的条件及前景

河南亮明电控设备有限公司产品技术先进、性能可靠，主导产品有：有源电力滤波器、有源户外功率平衡装置APB、高低压成套开关设备、风力发电和太阳能发电系统、智能工控设备、自动化控制装置（PC、变频器、软启动器系列）等，覆盖电力系统多个领域，生产设备精良，工艺先进，拥有严格的生产和控制体系，公司着重自主创新，通过引进先进设备、吸收先进技术不断开发新产品，打造公司在电力设备制造领域的核心竞争力。

该产品具有极其广阔的市场前景。一方面，大量存在并日益增加的电力谐波严重影响了电网及用电设备的安全运行，造成大量能耗。另一方面，由于技术及观念上的原因，滤波产品没有得到广泛应用。这种矛盾使技术先进、性价比高、消除谐波及节能效果显著的有源滤波产品存在着巨大的市场空间。若每年有800万kVA的谐波采用有源滤波器进行治理，以1200元/kVA的价格计算，则该类产品的市场将达到100亿元/年。按平均每台装置55万元计算，每年约需要装设滤波设备18000多台套。该项目投产后，约占整个市场需求量的4%。