

有源电力滤波器的研制和推广

关键词：有源滤波器、无源滤波器、基波、谐波、基波无功、谐波无功、谐波抑制

天津市津开电气有限公司：孙泽林、高屹、王缤、李相国、崔永鹏

一. 概述

谐波抑制和无功功率补偿是涉及电力电子、电力系统、电气自动化技术、理论电工等领域的重大课题。由于电力电子装置的应用日益广泛，谐波和无功问题引起人们越来越多的关注。同时，也正是由于电力电子技术的飞速发展，在谐波抑制和无功补偿方面也取得了突破性的进展。特别是有源滤波技术及其相关理论的提出和不断完善，为解决谐波抑制和无功补偿问题提出了崭新的前景。

电力系统的谐波问题早在 20 世纪 20 年代和 30 年代就引起了人们的注意，到 50 年代和 60 年代，由于高压直流输电技术的发展，大量关于变流器引起电力系统谐波的论文不断发表。70 年代以来，由于电力电子技术的飞速发展，各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及民用领域中的应用急剧增加，电网谐波问题日趋严重，不少国家和国际学术组织都制定了限制电力系统谐波、用电设备谐波的标准和规定，其中较有影响的是国际电子工程师协会（IEEE）提出的 IEEE519—1992 和国际电工委员会（IEC）提出的 IEC555-2

理想公用电网所提供的电压应该是频率单一固定的，且幅值恒定。谐波电流和谐波电压的出现，对公用电网是一种污染，特别是近三、四十年来，随着污染日益严重，谐波的危害引起了极大的关注。

1. 谐波的危害表现在以下几个方面：

①. 谐波对电网的影响。电网中广泛使用补偿无功的电容器，在一定的频率下，可能满足串联或并联谐振条件，当该次谐波足够大时，就会造成危险的过电压或过电流，这往往导致电气元件及设备的损坏，严重影响电力系统的安全运行。此外，谐波电流在电网中的流动会在线路上产生有功功率损耗。导线的集肤效应引起的附加线路损耗比较大；严重的谐波畸变使断路器的开断能力降低，并可能损坏断路器，民用建筑中，由于中性线一般较细（新标准已加大了 N 线导线截面），当大量的谐波（一般为三次谐波）从中流过时，会使导线过热，破坏绝缘，进而发生短路，引起火灾。

②. 谐波对旋转电机的影响。谐波对旋转电机的影响主要是引起附加损耗和过热，其次是产生机械振动、噪声和谐波电压。这些影响将缩短电机的寿命，情况严重时甚至会损坏电机。

③. 谐波对变压器的影响。谐波源的谐波电流流入变压器时，其主要影响是增加了它的铜损和铁损。随着谐波频率的增高，集肤效应更加严重，铁损也更大，引起变压器的发热。谐波还会引起变压器的噪声增大。

④. 对继电保护和电力测量的影响。电力系统中的谐波会改变保护继电器的性能，引起误动作和拒绝动作。当有谐波时，将会产生测量误差。仪表的原理和结构不同，所产生的误差也不相同，其对测量误差的增大是无法估量的。

⑤. 谐波对通讯系统的干扰。谐波干扰会引起通讯系统的噪声，干扰严重时会引起信号的丢失，甚至还可能危及设备和人身安全。

2. 无功功率对公用电网的影响主要由以下几个方面：

①. 无功功率的增加会导致电流增大和视在功率的增加，从而使发电机、变压器、及其他电气设备容量和导线的容量增大。

②. 无功功率的增加，使视在电流增大，因而使设备及线路的损耗增加。

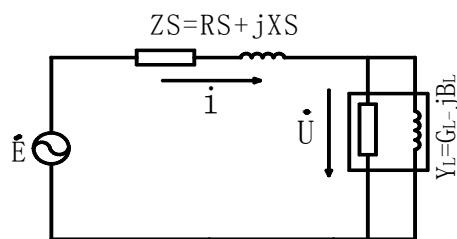
设线路总电流（此处暂不考虑谐波） $I=I_p+jI_q$ ，则线路损耗为

$$\Delta P=I^2 R_s= (I^2_p+I^2_q) R_s= (P^2+Q^2) R_s/U^2$$

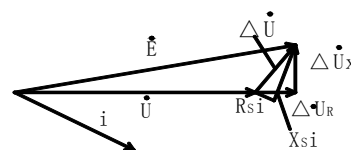
式中， R_s —线路电阻，单位 Ω ；

P —线路上传送的有功功率，单位 W ；

Q —线路上传送的无功功率，单位 Var ， $(Q^2 / U^2) R_s$ 这部分损耗就是由无功功率引起的。



简化电力系统等效电路



简化电力系统相量图

二. 谐波抑制和无功补偿的国内外现状

过去国内外大多采用 LC 无源滤波装置进行谐波抑制和无功补偿。传统的 LC 无源滤波器由电力电容器、电抗器和电阻适当组合而成，与负载并联工作。其中典型的单调谐滤波器是利用串联电感 L、电容 C 谐振原理构成的。在谐振点处， n 次谐波电流主要由 LC 滤波

器分流，很少流入电网，而对其它次数的谐波电流，LC 滤波器的作用不大。

它对第 n 次谐波的阻抗为：

$$Z_{jwn} = R_{jwn} + j(n\omega_s L - 1/n\omega_s C)$$

式中， ω_s —基波角频率，单位 rad/s

ω_n — n 次谐波的角频率，单位 rad/s

则发生谐振的谐波次数为

$$n = \frac{1}{\omega_s \sqrt{LC}}$$

为了克服无源滤波器的种种不足，目前的趋势是采用电力电子装置进行谐波补偿，这就是有源滤波器。

随着半导体行业的迅速发展，加之 PWM 技术的不断进步以及各种谐波电流瞬时检测方法的提出，使有源滤波器得到了迅速完善和发展。自从第一台有源滤波器研制成功并正式投入使用以来，经过 20 多年的研究和探索，越来越多的有源滤波器投入了运行，不论从实现功能还是从运行功率上都有了明显改善。已经使用的有源滤波器从 50KVA 到 60MVA，功率范围越来越宽。

在硬件装置方面，随着快速自换向器件性能的不提高，有源滤波技术有了很大的发展。随着绝缘栅极晶体管（IGBT）的成熟，有源滤波技术得到了真正的推广。同时，微处理器，尤其是信号数字处理器（DSP）的使用，使有源滤波器在线实现大量、复杂算法计算的能力有了很大的提高，也使各种复杂的控制算法得以实现，保证了有源滤波器快速、实时的补偿性能以及稳态性能。

与国外广泛应用有源滤波器相比，由于我国在有源滤波技术方面的研究起步较晚，1993 年该技术才进入试验性的工业应用实验阶段。近些年来，国内相关研究主要以理论研究和实验为主，理论研究水平进步很快，已经接近国际先进水平，但受到技术和设备等多方面的制约，实际应用水平不高，范围不广，与国外存在较大差距。

三. 有源滤波器研究内容和意义

在对有源滤波技术发展过程有了较为深入研究的基础上，对完善有源滤波器应用于电网谐波电流的抑制和无功电流的补偿技术，需要开展进一步的理论研究和应用开发。

有源滤波技术中最重要的一环就是负载谐波和无功电流的检测部分，目前已有的方法

很多，如傅立叶变换法、小波变换法、基于瞬时无功理论的坐标变换法、广义 d-q 坐标变换法等等，其关键要看整个系统能否到达令人满意的瞬时特性。而以上各种检测谐波和无功电流的方法都要求较为复杂的矩阵运算和低通滤波环节，以分离出负载电流中的非基波有功分量，为了改善有源滤波系统的瞬时特性，是研制开发的主要研究内容之一，即如何更好、更快、更精确的对电网或负荷所产生的谐波有一个定性和定量的测量和分析。

电力电子器件容量的增大和开关频率的提高：为实现电流的快速控制，提高补偿效果，开关频率和电力电子器件的大容量开发和使用是关键。如何从两者获得最佳效果是研究开发内容之二。

降低损耗并提高系统可靠性，采用合理的开关频率，选择适当的吸收回路，以提高装置的使用效率，采用过流、过压保护技术，故障诊断技术使系统可靠工作是研究开发内容之三。

四. 谐波抑制和治理的解决方法

目前可用于解决谐波问题的思路有两条：一是装设谐波补偿装置来补偿谐波，这对各种谐波源都是适用的；即在设计时就考虑减小谐波的方法，增加谐波抑制环节，以减少电网的谐波注入量；另一条是对电力电子装置本身进行改造，使其不产生谐波，且功率因数可控制为 1。研究对系统中的谐波进行有效滤波和补偿的方法和措施，最可行的方案为有源电力滤波器方案

1. 无源滤波器

传统的抑制高次谐波的方法，是使用 LC 无源电力滤波器，一般是根据谐振原理来工作。它具有结构简单、一次性投入低、运行费用低，它在很宽的频率范围内呈现为低阻抗，可以抑制多个频率的谐波。在吸收高次谐波的同时补偿无功功率，还具有改善负载功率因数的功能。但由于结构原理上的原因，在应用中存在以下难以克服的缺点。

①. 由于调谐偏移和残余电阻的存在，调谐滤波器的阻抗等于零的理想条件是不可能出现的，阻抗的变化大大妨碍了滤波效果，并且还存在着滤波器过负荷的可能性。

②. 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较多，必须同时加入多个滤波器。这会使整个滤波器的成本和体积增加。

③. 随着电源侧谐波发生源的增加，谐波电流超量时，可能会引起滤波器的过负荷。

④. LC 滤波器电路会因系统阻抗参数变化而发生与系统并联谐振问题，从而使装置无

法运行。

⑤. 对于特殊的谐波, 当系统阻抗和频率变化时, 有可能因与电源阻抗并联谐振而产生“谐波放大现象”, 使电路无法正常工作。

⑥. 消耗大量的有色金属, 体积大, 占地面积大。

2. 有源滤波器

有源滤波器的基本原理是从被补偿对象中检测出谐波电流, 然后由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等但极性相反的补偿电流(并联型)或对应的谐波电压(串联型), 从而消除电网中的谐波电流, 使电网电流只含有基波分量。

与传统的 LC 滤波器相比, 有源滤波器优点如下:

①. 实现了动态补偿, 可对频率和幅值都变化的谐波以及变化的无功功率进行迅速的动态跟踪补偿。

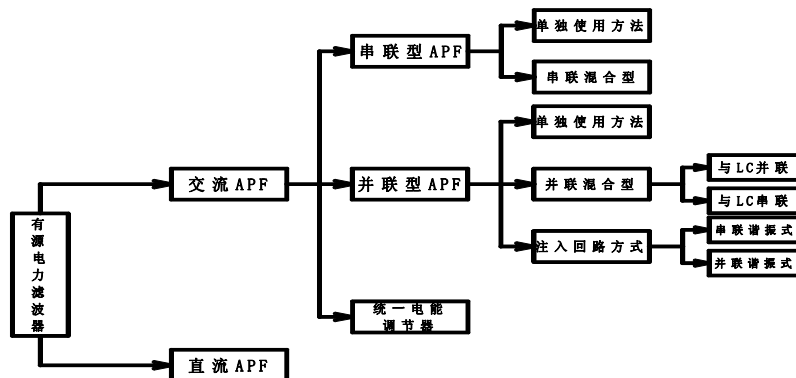
②. 滤波器特性不受系统阻抗的影响, 可消除与系统阻抗发生谐振的危险。

③. 补偿无功功率时不需储能元件, 补偿谐波时所需储能元件容量不大。

④. 可同时对谐波和无功进行补偿, 且补偿无功的大小可做到连续调节, 既可对一个谐波单独补偿, 也可以对多个无功和谐波源集中补偿, 性价比合理。

3. 有源滤波器分类

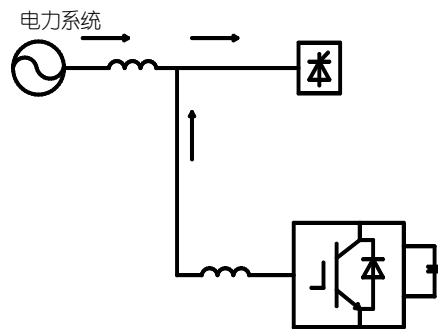
APF(有源电力滤波器)根据系统结构不同有多种类型, 按其接入电网的方式分类, 包括串联型、串联混合型、并联型和并联混合型等。而不同类型的 APF 对同一谐波源的补偿特性也不相同。而在电网中, 产生谐波的谐波源/非线性负载又分为电流型和电压型, 它们注入电网时的谐波特性也不一样。APF 的补偿特性与负载性质和所选 APF 的类型密切相关。在不同负载性质条件下的不同类型的 APF 有不同的补偿特性。



有源电力滤波器的分类

① 并联型有源电力滤波器

并联型有源电力滤波器主要用于补偿感性电流源型负载的谐波，即直流侧含有大电感滤波的整流电路，其本身表现出电流谐波源的特性，由于其与系统相并联，故可等效为一受控电流源。由于 APF 用于三相占多数，故以三相三线制情况为例，并联型有源电力滤波器原理框图如下图：设三相对称电源、对称负载，有 $i_a+i_b+i_c=0$ 和 $e_a+e_b+e_c=0$

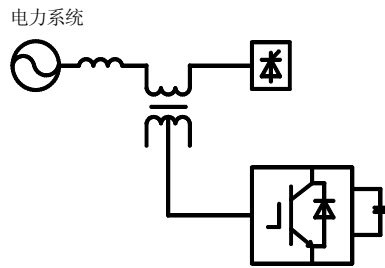


并联型有源电力滤波器原理框图

并联型 APF 在系统中，相当于一个谐波电流发生器。检测的信号经控制电路进行参考电流运算，得出补偿电流的参考信号。该参考信号经主电路放大，得出补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功电流抵消，即得到所期望的与电网电压同相的基波正弦电流，从而抵消了线路中的谐波电流，将电流侧电流补偿为正弦波。

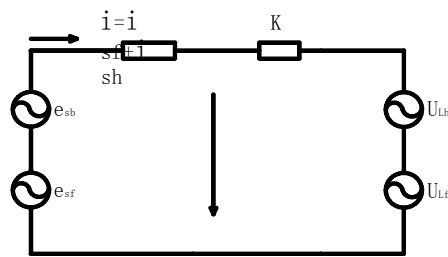
② 串联型有源电力滤波器

串联型有源电力滤波器主要用于补偿容性电压源型负载的谐波，即直流侧含有大电容滤波的整流电路，其本身表现出电压谐波源的特性，APF 通过变压器串联在电网与负载之间，相当于一个受控电压源。它主要用于消除带容性负载的二极管整流电路等电压谐波源对系统的影响，以及系统侧电压谐波与电压波动对敏感负载的影响，串联型有源电力滤波器原理框图如下图：



串联型有源电力滤波器原理图

补偿装置工作时，APF 相当于一个与负载串联且受谐波电流控制的受控电压源，它产生一个 K 倍于谐波电流的谐波电压，因此，APF 对谐波来讲可等效为阻值为 K 的电阻，而对基波来讲，其阻值 K 为零。



谐波电压补偿的一相等效电路

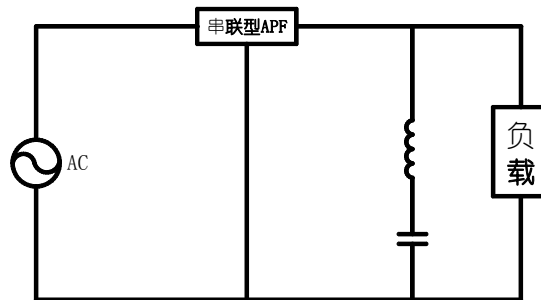
串联型 APF 的主要优点是能补偿电网谐波电压和三相不平衡电压，对电压敏感性负载尤为适用。它的主要缺点是 K 电阻流过很高的负载电流，使得变压器的额定参数上升，体积大，损耗大，此外，串联型 APF 投切、故障后退出及各种保护也较为复杂。

③ 混合型有源电力滤波器

有源电力滤波器 (APF) 作为一种能动态抑制谐波的电力电子装置广受关注，并出现了众多电路结构和控制方案，这其中，将传统的无源滤波器和 APF 结合起来，互相取长补短，组成混合有源滤波器，也是当前 APF 研究领域的一个重要方向。

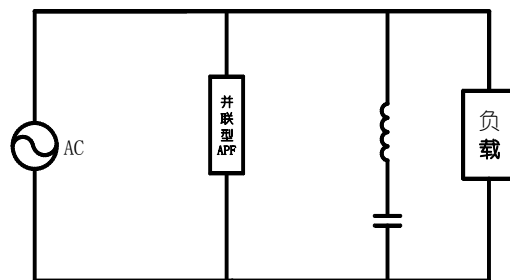
按有源滤波器和谐波负载的电路关系，混合有源滤波器一般可分为串联混合型有源滤波器，并联混合型有源滤波器和串-并联混合型有源电力滤波器：

a. 串联型混合有源滤波器不承受基波电压，但要通过基波负载电流，并在负载侧产生由于负载谐波电流引起的谐波电压，这使得当负载发生短路时对 APF 自身保护的動作速度要求很高。串联混合型有源电力滤波器原理框图如下图：



串联混合型有源电力滤波器

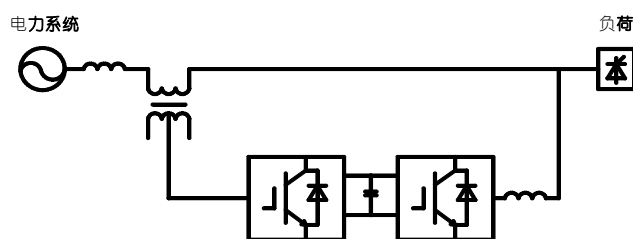
b. 并联型混合有源滤波器也不必承受基波电压，但要通过滤波器支路的基波电流，如果 APF 采用受控电流源形式，则 APF 输出电流跟踪困难，如果 APF 采用受控电压源形式，为使 APF 输出电压波形理想，其输出变压器变比很大，从而影响在高电压等级下的实用性。并联型混合有源滤波器原理框图如下图：



并联混合型有源电力滤波器

这种混合型滤波装置中，无源滤波器对负载的谐波电流进行滤波，并提供一定的基波补偿；而有源滤波器则起改善无源滤波器特性的作用。这样，以非常小容量的有源滤波器，就可以弥补无源滤波器特性的一些固有缺陷，达到提高无源滤波器滤波效果的目的。

c. 串-并联混合型有源电力滤波器原理框图如下图，串联有源电力滤波器将电源和负载及无源滤波器隔离，使负载谐波电流流入无源滤波器，同时阻止电源谐波电压流入负载端，并联有源电力滤波器提供一个零阻抗的谐波支路，使得负载中的谐波电流不会在无源滤波器上产生谐波电压。



串-并混合型有源电力滤波器

4. 有源电力滤波器的缺点

从目前的情况看，有源电力滤波器的不足之处主要表现在：

①. 为了减小滤波器的体积和重量、改进设备性能，势必要提高有源电力滤波器的主开关元件的工作频率。但是，这会受到可关断开关元件本身工作频率的限制；同时，工作频率的提高，将使有源电力滤波器的开关损耗迅速增加。目前，有源电力滤波器的损耗高达 50—90W/KVA，大大高于电容补偿器的 2—4.5W/KVA 和同步调相机的 12—30W/KVA。较高的损耗，既增加了运行成本，也妨碍了设备容量的进一步提高。

②. 与无源滤波器相比，设备的初期（制造）投资大。

③. 由于有源电力滤波器通常以高频开关方式工作，会产生电磁干扰。

因此，降低有源电力滤波器的损耗和初期投资、完善非线性电路功率理论及参考电流的实时检测方法、并提高设备的电磁兼容性，是有源电力滤波技术的发展方向和急需解决的问题。

五. 参考文献

1. 《谐波抑制和无功功率补偿》
王兆安、杨君、刘进军、王跃
2. 《有源电力滤波器—结构、原理、控制》
姜齐荣、赵东元、陈建业
3. 《最新电网谐波抑制与电力无功补偿装置及滤波器选型》
文长清、卢远华
4. 《电力系统谐波分析、测量、评估》
杨啸天主编
5. 天津大学 有源电力滤波器对无功和谐波电流补偿的研究
王晓远、裴钰
6. 天津大学 基于平均功率和 RLS 自适应算法的并联型有源滤波器
陈宜广、孔群
7. 天津大学 基于有功功率平衡和蚁群算法优化 PI 参数的有源滤波器
陈宜广、谷鑫