上海磅帛实业发展有限公司
中国 上海 长阳路 235 号申茂大厦 1701-1702
电话：86-21-51273866 传真：86-21-51273860

有源电力滤波器技术的发展与电能质量的提高

1 引言

在输电系统和配电网中，大量非线性负荷的使用，使电网存在电压闪变、波动、频漂、三相不平衡、谐波等影响电能质量和效率的问题，尤其是以开关电源和交流调速设备为代表的各种电力电子装置的大量使用，对其他用户产生扰动，威胁电网和用电设备的安全运行，使得电力系统中无功功率和谐波补偿成为迫切需要解决的问题。

以往，这一方面的问题主要是靠使用无源滤波器装置来解决。传统的无源 LC 滤波器可以减少谐波，使用的电容器可以改善交流负载的功率因数，但存在明显的不足与缺陷：设计的无源滤波器通常选定特定频率，滤除指定次谐波；存在与电网发生谐振的可能性；对电网阻抗和频率变化十分敏感，同时，也存在体积大、损耗大等问题。

如何进一步提高电能质量，有效地抑制电网中的谐波和无功功率，这一问题已引起广泛的关注。许多专家和学者一直在研究和开发动态可调装置来解决电能质量的问题，其中具有代表意义的是有源电力滤波器。从目前国外的情况来看，利用有源电力滤波器进行谐波和无功补偿以提高电能质量的技术是今后的一个发展趋势。

2 有源电力滤波器技求的发展历史

20 世纪 70 年代初，有源电力滤波器的基本原理和电路结构就已确定，但由于受当时的技术条件限制而未能得以实施。80 年代后，新型电力电子器件的出现、PWM 控制技术的发展以及瞬时无功功率理论的提出，极大地促进了有源电力滤波器技术的发展。交流电网中用于对谐波、无功功率和中线电流进行补偿的有源电力滤波器技术已经日趋成熟。在过去的 25 年中，提出了大量的有关有源电力滤波器的拓扑结构和控制方法。有源电力滤波器已在提高电能质量、消除三相电力系统中的电压谐波、调节终端电压、抑制电压波动和改善电压平衡等技术中得到应用。

电力电子装置的广泛应用，使电能质量问题变得更加突出。国内外已有大量的有关电能质量问题的调查报告关注这方面的问题。在这些报告中，通过对谐波和无功的测量、分析，来认识谐波和无功等电能质量问题对电网和用户的影响。按照用电设备的使用场合，谐波源有单相、三相三线和三相四线等多种形式。单相负载，如家用日光灯、微波炉、电视、计算机开关电源、空调、激光打印机和复印机等等，均是非线性负载；在三相负载中，各种变频调速装置等都会引起电能质量问题的发生。

自 1980 年起，已有大量论著论述了有源电力滤波器的研究工作，其中包括并联型、串联型及混合型。与无源滤波器混合使用的串联型、并联型有源电力滤波器是其中的典型装置。许多控制方法，如瞬时无功功率理论，同步 d－q 坐标系原理，同步检测方法和陷波滤波器方法等都被用来发展三相有源电力滤波器。

在三相四线制系统中，一些论著主要研究了由非线性不平衡负载，如计算机电源、荧光灯等引起的中线电流过大的问题。对各种解决中线电流和不平衡负载电流的方法也作了尝试，主要内容包括：消除或减少中线电流、谐波补偿、负载平衡、无功功率补偿等。

3 有源是为滤波器的结构与类型

有源电力滤波器可以按照所使用的变流器类型、拓扑结构和电源相数来进行分类。交流器类型分为CSI(电流型）和 VSI（电压型）结构；拓扑结构分为并联型、串联型和串、并联混合型；第三类是根据电源相数来分，则单相、三相三线或三相四线等。

3.1 根据使用的变流器类型分类

有源电力滤波器的主电路有两种类型的交流器即电流型 PWM 逆变电路和电压型 PWM 逆变电路。它的作用是产生非正弦电流来补偿非线形负载的谐波电流。电流型有源电力滤波器虽有较高的可靠性，但却有较高的损耗并且在交流侧需要并联数值较大的电感，因此在一般场合下使用较少。而电压型 PWM 变流器在它的直流侧带有一个大电容，因为其轻便且特性较好,所以现在主要使用的是这种装置。

3.2 根据拓扑结构分类

按照拓扑结构有源电力滤波器可分为串联型、并联型和两者混合使用的统一电能质量调节器。串联有源和并联无源混合使用的滤波器被称作复合型滤波器。图 1 给出了有源电力滤波器的分类，图中 APF 为有源电力滤波器，从与负载联接形式的角度可分为并联型有源电力滤波器和串联型有源电力滤波器两大类。目前的研究主要集中在交流有源电力滤波器，直流有源电力滤波器的研究也在逐步开展，典型的研究之一是在直流输电系统中的应用。图 2 给出了有源电力滤波器与供电系统、负载之间的联线示意图。

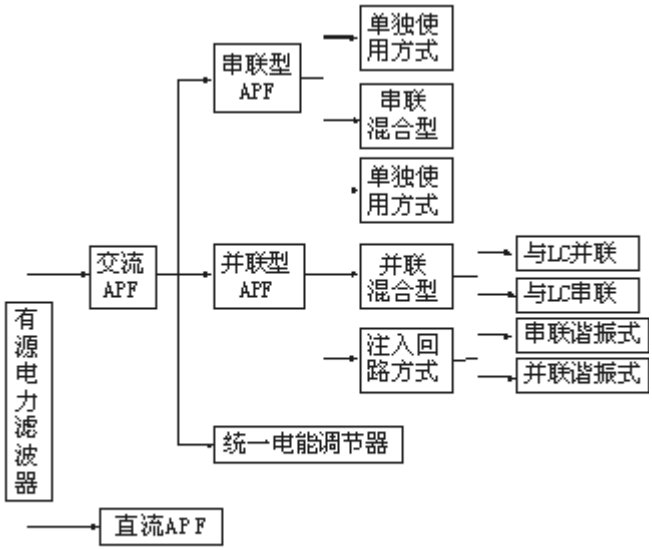
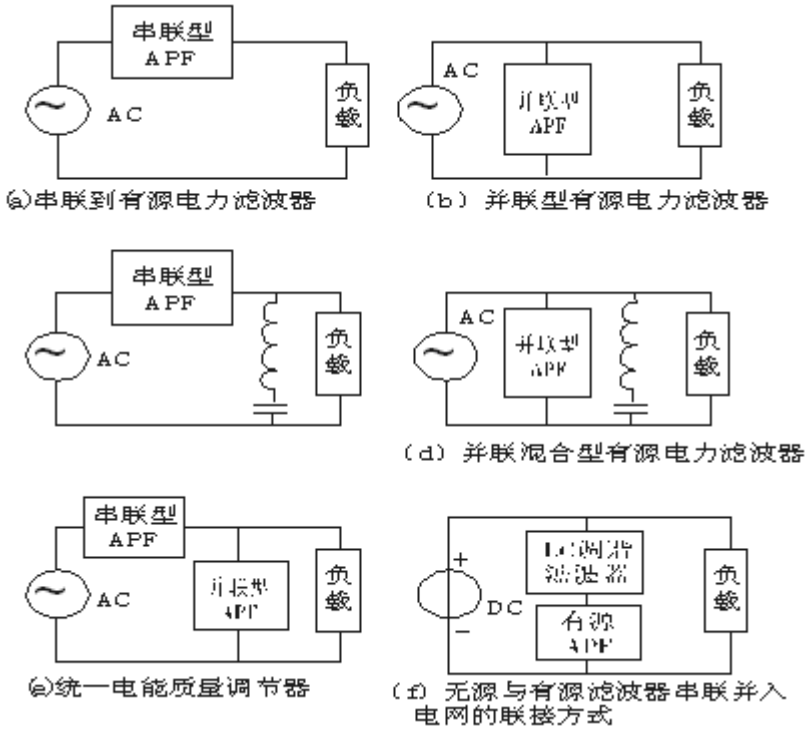


图1 有源电力滤波器的分类

图 2a、b 是单独使用 APF 的补偿方式，就目前来看，单独使用串联型 APF 的方式并不多见，大多数 APF 采用并联或混合型补偿方案，单独使用 APF 时所要求的装置容量较大，这在经济上是不合算的。所以混合型 APF 引起了大家的广泛重视，也是目前研究的一个热点。混合型 APF 中有源电力滤波器部分的容量一般仅占总补偿容量的 5%～10%，这样整个补偿装置将有一个好的性价比。



3.3 根据电源的类型分类

有源电力滤波器可以按照单相和三相（三线或四线）电源或负载系统分类。有许多非线性负载，如家用设备，联接在单相电源系统中。一些不带中线的三相负载由三相电源供电。还有许多单相非线性负载，如计算机、家用电灯等，分布在三相四线制系统中。所以，有源电力滤波器可根据单相、三相三线和三相四线进行分类。

4 技术与经济考虑

经过近二、三十年的发展，至 1990 年在国外的许多商业发展计划已被完成并投入了实施，这反映了有源电力滤波器在制造技术上已走向成熟。一些国家如日本和美国，投运的有源电力滤波器容量已超过 1000kVA。近几年 50kVA 以下的有源电力滤波装置迅速增加，反映了社会对谐波抑制重要性的认识在提高。可以断定，随着电网谐波污染的加重，对有源电力滤波器数量的需求将会不断增加。一些标准(如 IEEE-519 [15]）的相继出台，也使有源电力滤波器的使用大为增加。

目前看来，妨碍有源电力滤波器大量使用的主要

因素有以下几个方面：

(1) 与无源滤波器相比，设备的初期费用偏大。目前这两者的费用比大约在 7:1 左右。但从长远来看，随着电力电子器件价格的下降，这个比值会随着技术的成熟而大幅下降。

（2）有源电力滤波器的自身损耗问题。有源电力滤波器的主开关器件由于工作在高频状态，其开关损耗是不可避免的。与无源滤波器的 2～4.5W/kVA 和同步调相机 12～30W / kVA 相比，有源电力滤波器的损耗要达到 50～90W / kVA。较高的损耗 ，即妨碍设备容量的进一步提高，也增加了运行成本。因此，如

何减少这一部分的损耗，也是今后研究的一个重点。

(3) 有源电力滤波器工作在高频状态，其产生的电磁干扰、电磁元件的发热也是妨碍使用的一个因素。

5 有源电力滤波器的其他功能

有源电力滤波器在控制上有相当的灵活性，可以将其用在一些特殊的场合。除了单相、三相三线或三相四线系统要求电流或电压补偿外，这里对特殊应用有源电力滤波器的选择标准作讨论，如表 1 所示

电流型补偿可分为电流谐波补偿、无功功率补偿、三相负载平衡和中线电流抑制等。这些补偿可以单独进行，也可以同时进行。对于谐波电流补偿，并联有源电力滤波器是一个理想的选择。而无功功率补偿要分情况而定，对可调负载采用并联有源电力滤波器，对固定负载采用交流电容器。在三相三线或三相四线系统中负载的平衡通常是由并联型有源电力滤波器来完成的。

电压补偿可分为电压谐波补偿、改善电压调节、平衡电压、减小电压波动、消除电压倾斜和下陷等。通常采用串联型有源电力滤波器进行电压补偿。目前，有源电力滤波器也可用于短时间内修正电压的瞬时倾斜和下陷方面。有许多装置都需要电压和电流的联合补偿。对此，理想的选择是串联型有源电力滤波器与并联型有源电力滤波器混合使用。此外，这样的混合使用（称为统一电能质量调节器 UPQC）也适合于单独的电流或电压补偿。

6 结论

本文从电能质量问题出发，对未来在提高电能质量方面有源电力滤波器所起的作用做了简单的总结。目前，有源电力滤波技术已发展成熟，很多设备可以使用有源电力滤波器来保证电能质量。用户可根据需求选择特定的有源电力滤波器。许多制造商（如 ABB、东芝、富士、三菱等）都在制造有源电力滤波器。国内的许多研究机构和高等院校（如西安交通大学、浙江大学、东南大学、清华大学等）也在积极开展这方面的研究工作，并取得了许多研究成果。希望本文能给从事电能质量研究工作的技术人员和正在承受谐波污染的用户提供一些有益的帮助。

表1 特殊应用要求的有源电力滤波器的选择

上海磅帛实业发展有限公司
中国 上海 长阳路 235 号申茂大厦 1701-1702
电话：86-21-51273866 传真：86-21-51273860

序号	应用目的	有源电力滤波器的结构形式			
		申联型有源电力滤波器	并联型有源电力滤波器	复合型滤波器	统一电能质量调节器
A	抑制电流谐波		＊＊	＊＊＊	＊
B	补偿无功功率		＊＊＊	＊＊	＊
C	负载平衡		＊		
D	抑制中线电流		＊＊	＊	
E	抑制电压谐波	＊＊＊		＊＊	＊
F	电压调节	＊＊＊	＊	＊＊	＊
G	电压平衡	＊＊＊		＊＊	＊
H	抑制电压波动	＊＊	＊＊＊		＊
I	抑制电压倾斜与下陷	＊＊＊	＊	＊＊	＊
J	A+B		＊＊＊	＊＊	＊
K	A+B+C		＊＊		＊
L	A+B+C+D		＊		
M	E+F	＊＊			＊
N	E+F+H+I	＊＊			＊
O	A+E			＊＊	＊
P	A+B+E+F			＊	＊＊
Q	F+G	＊＊		＊	
R	B+C		＊		
S	B+C+D.		＊		
T	A+B+G		＊＊	＊	
U	A+C		＊		
V	A+D+G		＊	＊＊	

注：“＊”越多，有源电力滤波器的结构形式就越适用。