

## 第八章 有源电力滤波器

有源电力滤波器 (Active Power Filter 简称 APF) 是一种新型的电力电子装置, 从它提出以来一直受到广泛的重视。有源电力滤波器的根本思想是从补偿对象中检测出谐波电流等分量, 由补偿装置产生一个与该分量大小相等而极性相反的补偿电流分量, 抵消谐波电流分量从而使流入电网的电流只含基波分量。它具有动态响应快、补偿功能多样化、且补偿特性不受电网阻抗影响的特点, 克服了传统 LC 滤波器和无功补偿方法的缺点, 是谐波抑制的一个重要开展方向。本章首先介绍有源滤波器的根本原理和结构、开展现状和应用情况、三相电路的瞬时无功功率理论以及检测方法, 最后着重介绍目前应用比拟广泛的并联型有源电力滤波器。

### 8.1 有源电力滤波器概述

#### 8.1.1 有源电力滤波器的开展

电力电子技术开展带来了许多的经济效益和用电便利, 如装置体积的减小, 能量转换效率的提高等, 但同时也带来了一系列的问题, 最主要的是对电网的谐波污染。为了抑制对电网的谐波污染, 可以采取两种方法: 一种是采取主动的方式, 即应用先进的技术将电力电子装置产生的谐波降低至最低水平; 另外一种方法是被动的方式, 即装设谐波补偿装置来补偿谐波, 对已经投入运行的电力电子装置, 可以通过这种方式进行改造。早期使用的补偿装置是 LC 无源滤波器, 其主要思想是根据 LC 的串并联谐振原理, 为谐波电流提供一个低阻通路, 将其旁路, 无源滤波器同时提供一定的基波无功补偿。LC 无源滤波器由于其构造简单, 一直被广泛使用, 但其只能补偿固定频率的谐波, 而且补偿特性易受电网阻抗和运行状态的影响, 容易与系统发生谐振。为解决无源滤波器的局限性, 人们做了很多的研究和探索, 其中最具有代表性的是有源电力滤波技术的提出。

有源电力滤波器从提出到投入实际应用, 经历了几个开展阶段。

(1) 根本原理的提出和概念的形成。有源电力滤波的想法最初于 1969 年出现在 B. M. Bird 和 J. F. Marsh 发表的论文中, 在文章中提出了向交流电网注入三次谐波电流来减少电源电流中的谐波成分, 从而改善电源电流波形的新方法。虽然这种方法还缺乏以使电源波形成为正弦波, 但可以认为是有源电力滤波器的诞生。1971 年, 日本长岗科技大学 H. Sasaki 和 T. Machida 发表的论文中首次完整地描述了有源电力滤波器的根本原理。1976 年, 美国西屋电气公司的 L. Gyugyi 等人提出了用四象限 PWM 变流器构成有源电力滤波器, 他们还讨论了有源电力滤波器的实现方法和相应的控制原理, 确立了有源电力滤波器的根本概念, 并建立了当今有源电力滤波器的根本拓扑结构, 这标志着有源电力滤波器根本概念的形成。但在七十年代, 由于受半导体功率器件研制水平的制约, 有源电力滤波器的研究没有取得突破, 仅限于实验研究。

(2) 快速开展。进入 80 年代, 有两大因素促进了有源电力滤波器的研究进展: 一是大功率可关断器件的研制和应用, 如大功率门极可关断晶闸管 (GTO) 和绝缘栅极双极型晶体管 (IGBT) 等的逐步应用, 性价比不断提高, 使大功率逆变器生产成为可能; 二是 1983 年 H. Akagi 等人提出了“三相电路瞬时无功功率理论”, 为三相系统畸变电流的实时检测提供了理论依据, 该理论在有源电力滤波器中得到了成功的应用。随后, H. Akagi 等又研制出 7kVA 的有源电力滤波器, 用于补偿 20kVA 的三相整流器在交流侧产生的高次谐波和无功电流, 使有源电力滤波器开始进入工业应用阶段。

(3) 持续开展。80 年代末至今, 有源电力滤波器一直是电力电子技术领域的研究热点之一, 关于有源电力滤波器研究的论文在国际刊物和国际学术会议上不断发表, 这些论文从有源电力滤波器的主电路结构、谐波电流检测、电流跟踪控制等方面进行研究和改良, 这标志着该领域的研究持续开展, 不断深入。为适应不同的补偿对象和实现补偿的多功能化, 人们先后提出了并联型结构、串联型结构和混合型结构等。

有源电力滤波器在国外已经进入工业实用化阶段。世界上有源电力滤波器的主要生产厂家有日本三菱电机公司、美国西屋电气公司、德国西门子公司等。其中有源电力滤波器技术在日本已经成熟, 自 80 年代以来, 已有 1000 多台有源电力滤波器投入市场, 其容量越来越宽, 已经开展到 MVA 等级, 功能也越来越丰富, 除补偿谐波电流外, 还补偿基波无功、平衡三相电压, 抑制电压闪变等功能。1986

年，日本的Komatsugi和Imura研制了一套用于三相整流器补偿的15kVA两重型APF，能够补偿19次以下的高次谐波电流，补偿率可以到达90%。另外还有将48MVA的并联型有源滤波器安装于向列车供电的某电站，用于补偿无功电流和负序电流，抑制电压闪变和三相电压不平衡。

我国在有源电力滤波器的研究方面起步较晚，直到二十世纪八十年代末才有论文发表。九十年代以来一些高等院校和科研机构开始进行有源电力滤波器的研究，但有关研究主要以理论研究和实验为主，虽然在理论上取得了一些进展，但由于多方面条件的限制，有源电力滤波器未能在我国工业领域得到广泛应用，我国实际应用并经过鉴定的是北京电力科学研究所和冶金科学研究所共同研制成的，用于380V三相系统的50KVA电力有源滤波器。西安交通大学已研制出120kVA并联型有源电力滤波器的试验样机。随着电力电子及相关技术的开展以及电力市场的形成和开展，电能质量问题会越来越引起人们的关注，因此有源电力滤波器有着良好的开展前景和潜在的技术经济效益。

### 8.1.2 有源电力滤波器的根本原理

有源电力滤波器的根本原理如图8-1所示，图中， $e_s$ 表示系统的等效电源，提供的电流为 $i_s$ ，非线性负载产生的电流为 $i_L$ ，有源电力滤波器并联在负载端，产生的电流为 $i_c$ 。根据基尔霍夫定律得：

$$i_s = i_L + i_c \quad (8-1)$$

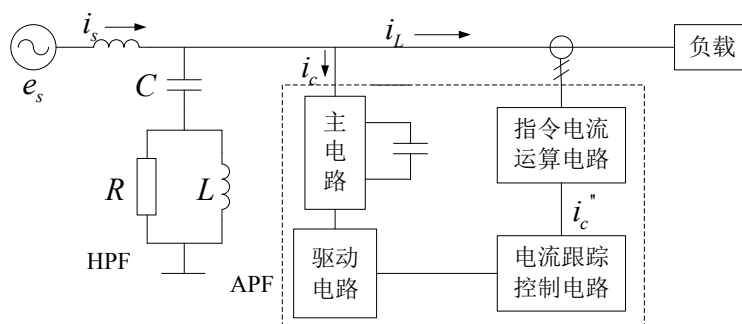


图8-1 并联型有源电力滤波器系统构成原理图

假设负载电流含有谐波和无功分量，如式（8-2）所示，式中 $i_{Lfp}$ 、 $i_{Lfq}$ 和 $i_{Lh}$ 分别负载电流的基波有功分量、基波无功分量和谐波分量。

$$i_L = i_{Lfp} + i_{Lfq} + i_{Lh} \quad (8-2)$$

当需要补偿负载电流产生的谐波电流时，只需要有源电力滤波器产生的补偿电流与负载电流的谐波分量 $i_{Lh}$ 大小相等、方向相反，如式（8-3）所示，代入到式（8-1），与谐波分量相互抵消，如式（8-4），那么电源电流中只含基波分量，不含谐波，这样就到达了抑制电源电流中谐波的目的。当需要在补偿谐波的同时，补偿负载的基波无功功率，那么只需要在有源电力滤波器的输出中增加基波无功分量 $i_{Lfq}$ 的反极性分量就可以了，这样，电源电流只提供负载电流的基波有功分量 $i_{Lfp}$ ，最终电源电压和电流同相位。

$$i_c = -i_{Lh} \quad (8-3)$$

$$i_s = i_L + i_c = i_{Lfp} + i_{Lfq} \quad (8-4)$$

所以有源电力滤波器的根本工作原理是根据补偿目的，检测出需要补偿的电流作为参考量，然后根据有源电力滤波器的控制电路，产生一个与参考量大小相等，方向相反的谐波或无功量注入到系统中去，使系统电流最终满足要求。从另一个角度讲，有源电力滤波器向系统注入的量是谐波分量，所以有源电力滤波器也可以看成是一个谐波源。

通过分析,有源电力滤波器应该包含两个局部:一个是指令电流运算电路,用来检测出补偿对象电流中的谐波和无功电流等分量;另一个是补偿电流发生电路,即根据检测电路所得出的补偿电流指令信号,产生实际的补偿电流。由图8-1所示,补偿电流发生电路包含三个局部:电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路。其中,电流跟踪控制电路是根据补偿电流的指令信号和实际补偿电流的关系产生相应的PWM控制信号;驱动电路是根据所得的控制信号直接驱动相应器件的开通和关断;主电路目前采用PWM变流器,在图中是一个电压型变流器,它的直流电容提供逆变用的直流电压。与有源电力滤波器并联的小容量一阶高通滤波器(或采用二阶高通滤波器),用于滤除有源电力滤波器所产生的补偿电流中与变流器开关频率有关的谐波。

### 8.1.3 有源电力滤波器的特点

与传统的无源滤波器相比,有源电力滤波器有如下特点:

1. 具有自适应能力,能自动跟踪补偿频率和大小都变化的谐波和无功分量,响应速度快,可控性能较高,补偿效果好。有源电力滤波器采用瞬时谐波检测理论,能快速检测出所要补偿的谐波和无功分量,并通过有效的控制进行补偿,它的实时性好,而且在理想的情况下,可以实现完全补偿。
2. 补偿特性受电网系统参数的影响不大,不易于电网阻抗发生谐振,且能抑制由于外电路的谐振产生的谐波电流的大小。相比于无源滤波器在某些条件下可能与系统发生谐振,导致事故,有源滤波器从根本上解决了这个问题,这是有源电力滤波器受到重视的原因。
3. 补偿功能、补偿方式多样化。有源电力滤波器不仅可以补偿谐波、无功和负序电流,还可以抑制电压闪变,平衡三相电压等,有一机多能的特点,在性价比上较为合理。另外有源电力滤波器不仅可以对单独的谐波和无功源进行补偿,也可以对多个谐波和无功源进行集中补偿。
4. 装置所占的空间小,初期投资较大,电磁干扰较大。有源电力滤波器主电路中采用全控型器件,目前全控型电力电子器件的价格相对于无源滤波器中的电感、电容高,并且随着容量的增大,耐压等级的提高而增加,这使得投资比拟大,但电力电子器件的体积比拟小,目前已有模块化的产品,使得有源电力滤波器装置的体积减小,另外通常有源电力滤波器的电力电子开关换相为硬开关,存在着较大的电磁干扰。
5. 有源电力滤波器控制快速,不存在过载问题,即当系统中谐波较大时,装置仍可以运行,无需断开。

#### 有源电力滤波器的主电路形式

有源电力滤波器主电路目前均采用PWM变流器,根据直流侧储能元件的不同,可分为电压型和电流型两种,图8-2和图8-3分别示出了可应用于三相三线制系统的电压型和电流型两种主电路,图中的电力电子器件为IGBT,实际中可在GTO、IGBT、IGCT等器件中选择。图8-4和图8-5分别示出了应用于单相系统的电压型和电流型两种主电路形式。

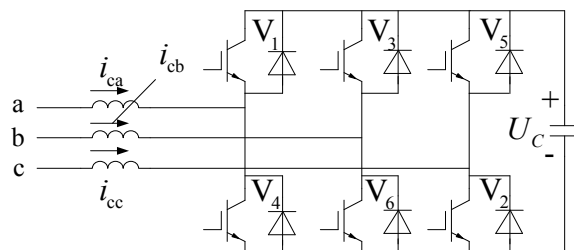


图8-2 三相电压型PWM变流器

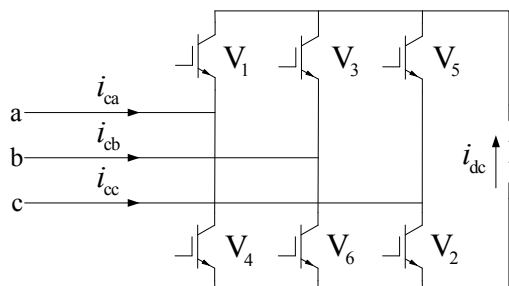


图8-3 三相电流型PWM变流器

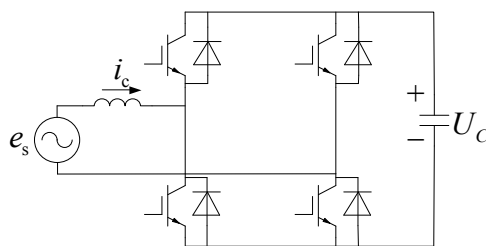


图 8-4 单相电压型 PWM 变流器

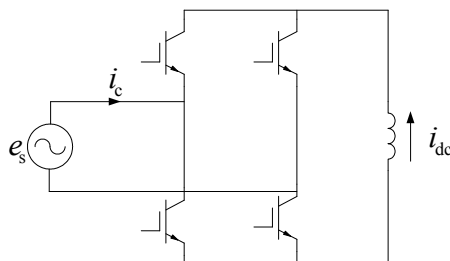


图 8-5 单相电流型 PWM 变流器

通过对图8-2和图8-3的比拟分析,可得出电压型和电流型变流器的区别:电压型PWM变流器的直流侧接有大电容,在正常工作时,其电压根本保持不变,可看作电压源,为保持直流侧电压不变,需要对直流侧电压进行控制,交流侧输出电压为PWM波;电流型PWM变流器的直流侧接有大电感,在正常工作时,其电流根本保持不变,可看作电流源,为保持直流侧电流不变,需要对直流侧电流进行控制,交流侧输出电流为PWM波。

对于电压型的有源电力滤波器,它的优点是用电容器储存能量,其损耗较小,效率高,但它不能直接控制输出补偿电流,而是通过控制电压间接控制电流。而电流型的有源电力滤波器能够直接输出补偿电流,不仅可以补偿正常的谐波,还可以补偿分数次谐波和超高次谐波,并且不会由于主电路开关器件的直通而发生短路故障,因而在可靠性和保护上占有较大的优势。但是,电流型PWM变流器直流侧大电感上始终有电流流过,该电流将在大电感的内阻上产生较大的损耗,因此目前较少使用。根据调查,目前使用电压型的PWM变流器占90%左右。随着对超导贮能磁体研究的进展,一旦超导储能磁体实用化,必可取代大电感器,促使电流型PWM变流器的应用增多。

在实际应用中有源电力滤波器往往要求容量较大,如果采用上述普通的主电路拓扑结构,那么对所使用的电力电子器件在容量方面有比拟高的要求。由于电力电子器件随着容量的增大其所允许的开关频率却越来越低,而较低的开关频率又直接影响有源电力滤波器的补偿效果,所以在将有源电力滤波器用于大容量谐波补偿时就面临着器件开关频率与容量之间的矛盾。为解决这一矛盾,国内外学者提出了各种性能优越的有源滤波器主电路拓扑结构,如采用多电平级联方案 and 多重化主电路实现大容量的有源电力滤波器。目前这些结构的理论研究正在进行,在多重化技术方面已经有局部投入运行。

#### 8.1.4 有源电力滤波器的分类

用户所使用的电源是直流电源和交流电源,所以有源电力滤波器按供电的类型可分为交流有源电力滤波器和直流有源电力滤波器,根据有源电力滤波器接入电网的方式,有源电力滤波器主要分为三大类,即并联型、串联型和串—并联型。目前,有源电力滤波器的研究主要集中在交流有源电力滤波器上,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高压直流输电系统中的应用。图8-6给出了有源电力滤波器的根本分类图。下面比照拟常用的有源电力滤波器分别介绍如下:

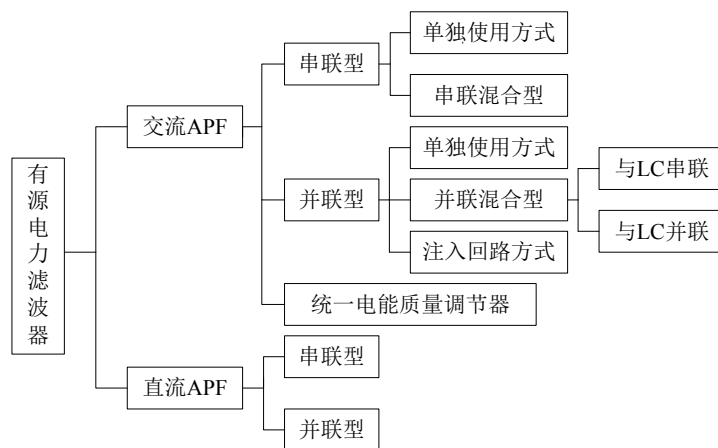


图8-6 有源电力滤波器的分类

## 1. 交流有源电力滤波器

### (1) 并联型有源电力滤波器

#### a) 单独使用的并联型有源电力滤波器

1986年，H. Akagi提出用并联有源电力滤波器消除谐波的方法，其原理图如图8-1所示。有源电力滤波器的主电路与负载并联接入电网，故称为并联型。又由于其补偿电流根本上由有源电力滤波器提供，故称之为单独使用的方式。这是有源电力滤波器中最根本的形式，也是目前应用最多的一种。在这种方式中，有源电力滤波器相当于谐波电流发生器，其电流值为所要补偿的电流值。该图和后面介绍的原理图均以单线图画出，它们均可用于单相或三相系统。

这种方式的优点是：通过不同的控制作用，可以对谐波、无功、不对称分量等进行补偿，因此补偿功能较多，且连接方便；对于电流源性质的谐波源，补偿特性不受电源阻抗的影响。

这种方式的缺点是：电源电压直接加在逆变桥上，对主电路中开关器件的电压等级要求较高。有源电力滤波器全部承担负载的谐波补偿，当负载电流谐波含量高时，要求有源电力滤波器容量较大，补偿频带宽。而PWM变流器的容量和动态性能成反比，很难使APF在保证容量的同时，还具有好的动态特性和低的开关损耗。

适用的场合：主要用于电流源性质的谐波源（如带感性负载的整流器）。

#### b) 与LC滤波器并联的混合有源电力滤波器

与LC滤波器混合使用的有源电力滤波器的根本思想是利用LC滤波器来分担有源电力滤波器的局部补偿任务，这主要是为了减小有源滤波器补偿容量。而且LC滤波器的本钱低，结构简单，可降低整个装置的造价。

1987年，M. Takeda等人首先提出用LC滤波器和有源电力滤波器并联的混合型有源电力滤波器方案。其原理图如图8-7所示。这种方案有两种补偿方式：一种是LC滤波器主要补偿较高次谐波，而大局部谐波由有源电力滤波器补偿，这对减低有源电力滤波器的容量起不到明显的作用，但因对有源电力滤波器主电路中器件的开关频率要求不高，实现大容量相对容易些；另一种方式是LC滤波器分担大局部谐波补偿的任务，而有源电力滤波器是为了改善整个系统的性能，那么所需容量与单独使用方式相比可大幅度降低，在这两种方式中，有源电力滤波器都相当于受控电流源。

这种方案的缺点是：电网与有源电力滤波器及有源电力滤波器与LC滤波器之间存在谐波通道，特别是有源电力滤波器和LC滤波器之间的谐波通道，可能使有源电力滤波器注入的谐波又流入LC滤波器中。

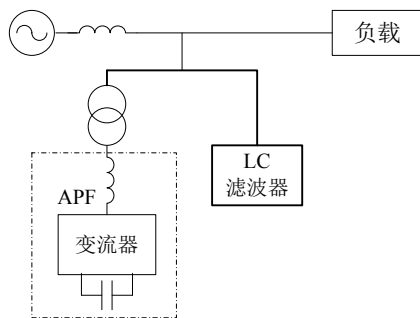


图8-7 有源电力滤波器与LC滤波器并联方式

### c) 与LC滤波器串联的混合有源电力滤波器

1990年，H. Fujit等人提出将有源电力滤波器与LC滤波器相串联后与电网并联的混合型方案，其原理图如图8-8所示，其中有源电力滤波器相当于一个电流控制电压源。该方式中，谐波和无功功率主要由LC滤波器补偿，而有源电力滤波器的作用是改善无源滤波器的滤波特性，克服无源滤波器易受电网阻抗的影响，易与电网发生谐振等缺点。

这种方案的优点是：有源电力滤波器不承受交流电源的基波电压，因此装置容量小；有源电力滤波器与LC滤波器通过变压器连接，电压隔离和保护比拟方便。有源电力滤波器发生故障不会危及电网。

这种方案的缺点是：对电网中的谐波电压非常敏感。

适用的场合：适于高压电力系统。

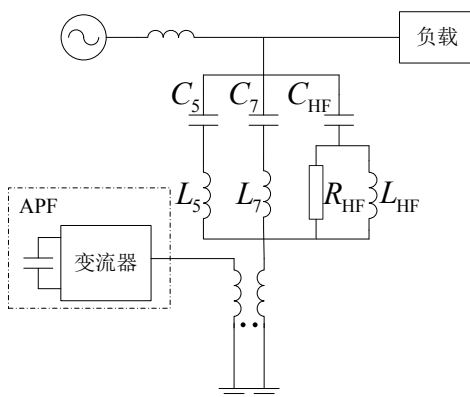


图8-8 并联型有源电力滤波器与LC滤波器串联方式

目前已大量使用的LC滤波器，均可采用图8-7或图8-8的方式进行改良和提高性能。

## (2) 串联型有源电力滤波器

### a) 单独使用的串联型有源电力滤波器

图8-9是单独使用的串联型有源电力滤波器的原理图。在这种方式中，有源电力滤波器作为电压源串联在电源和谐波源之间。相比于并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可看作电压源的谐波源。这种谐波源的一个典型例子是电容滤波型整流电路，这种整流电路从交流侧可被看作电压源。针对这种谐波源，串联型有源电力滤波器输出补偿电压，抵消由负载产生的谐波电压，使供电点电压波形成为正弦波。因此串联型与并联型可以看作是对偶的关系。对于电压源性质的谐波源，补偿特性不受电源阻抗的影响。

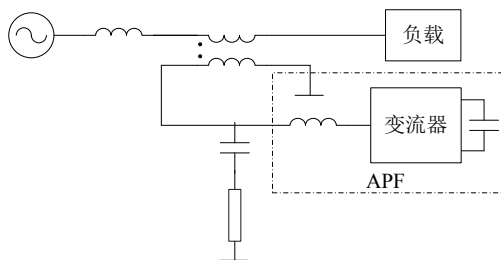


图8-9 单独使用的串联型有源电力滤波器

### b) 与LC滤波器并联的混合有源电力滤波器

1988年, F. Z. Peng等人首先提出了串联有源滤波器加并联LC滤波器的结构, 其结构图如图8-10所示。这种方式中, 有源滤波器对谐波呈现高阻抗, 而对工频分量呈现低阻抗, 因此有源滤波器相当于电源和负载之间的一个谐波隔离装置, 电网的谐波电压不会加到负载和LC滤波器上, 而负载的谐波电流也不会流入电网。

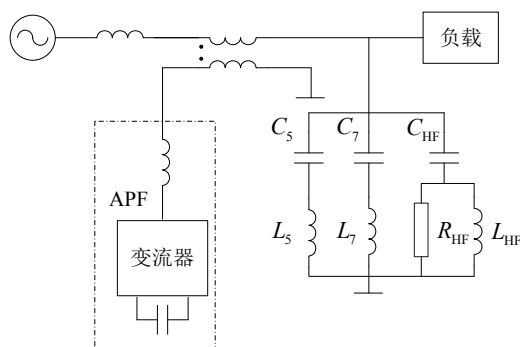


图8-10 与LC滤波器混合使用方式

这种方式的优点是: 运行效率高, 有源滤波器的容量很小, 投资少。

这种方式的缺点是: 由于有源电力滤波器串联于电路中, 很难把电源和有源滤波器分开, 易发生短路, 绝缘比拟困难, 而且维修也不方便; 有源滤波器一旦发生故障也将危及电网; 在正常工作时, 耦合变压器流过所有的电流; 不能抑制电源电压的闪变。

### (3) 串—并联型有源电力滤波器

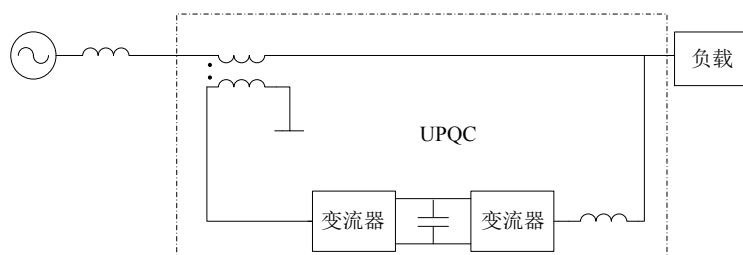


图8-11 串—并联型有源电力滤波器

为实现有源电力滤波器的多功能补偿, 1994年, H. Akagi 等人提出一种综合了串联APF和并联APF的混合型滤波器, 称之为统一电能质量调节器 (Unified Power Quality Conditioner简称UPQC), 可兼并二者之间的功能, 其结构如图8-11所示。串联有源滤波器用于对电力系统和负载之间的谐波起隔离作用, 并在电压波动时进行电压调节, 同时它可以防止电力系统的内阻抗和无源滤波器之间发生谐振。并联型有源滤波器主要进行谐波和无功功率的补偿, 它同时还用于调节并联型和串联型有源电力滤波器所共用的直流侧电容的电压,

这种方式的优点是: 具有良好的动态性能, 对电压和电流、无功功率都可补偿。

这种方式的缺点是: 控制功能比拟复杂, 而且并联有源电力滤波器负担谐波补偿的任务, 所需容量大, 消耗大。具体实用性有待于进一步的研究。

适用的场合: 用于电力配电系统和工业电力系统。

### 2. 直流有源电力滤波器

有源电力滤波器应用于高压直流输电系统起步较晚, 1988年, C. Wong和N. Mohan等人首次提出将有源电力滤波器用于高压直流输电系统, 并于隔年进行了可行性的验证。到九十年代初, 直流有源电力滤波器取得实质性的进展, 最有代表性的是1991年12月首次将并联混合型直流有源电力滤波器样机在瑞典—丹麦的250kV直流输电Konti-Skan2工程中投入工业试运行, 取得了满意的结果。此后直流有源滤波器受到了广泛的重视。

直流有源电力滤波器和交流有源电力滤波器类似, 随着不断的开展, 也产生了不同的类型, 以补偿不同的要求, 主要分为并联型和串联型两大类, 其特点与交流滤波器相似。

## 8.2 基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测

三相电路瞬时无功功率理论首先于1983年由H. Akagi提出, 此后该理论经过不断研究逐渐完善, 在许多方面得到了成功的应用。该理论突破了传统的以平均值为根底的功率定义, 系统地定义了瞬时无功功率、瞬时有功功率等瞬时功率量。以该理论为根底, 可以得出用于有源电力滤波器的谐波和无功电流实时检测方法。

### 8.2.1 瞬时无功功率的根底理论

#### (1) 传统功率的概念

传统的电力系统的交流电流和电压的有效值、有功功率、无功功率的概念都是建立在工频周期的根底上的。如对于单相交流电路, 设其电压和电流分别为

$$\begin{cases} u(t) = \sqrt{2}U \sin \omega t \\ i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (8-5)$$

设:

$$p = u(t)i(t) = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) - UI \sin \varphi \sin 2\omega t \quad (8-6)$$

定义其有功功率为:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi \quad (8-7)$$

定义其无功功率为:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (8-8)$$

其中  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  为其周期。

比拟式 (8-6)、(8-7) 和 (8-8), 有功功率为电压电流的乘积在一个周期内的平均值, 而无功功率相当于式 (8-6) 中的第二项在一个周期内的最大值。

对于三相交流电路, 定义其有功功率为三个单相电路有功功率之和, 无功功率为其三个单相电路无功功率之和。

从上述有功功率、无功功率的定义可以看出, 它们只能表征一周期内功率变化的情况。而新型的基于电力电子开关的补偿装置的时间常数在毫秒以至微秒级, 如有源电力滤波器的时间常数约为1ms, 远小于电力系统20ms (对50HZ系统而言) 的工频周期。对于此类电力电子装置, 采用上述功率定义无法正确地描述装置在一小段时间内有功功率和无功功率的意义, 因而开展新的能准确描述与功率、电压瞬时值相对应的瞬时有功功率、瞬时无功功率等概念是必要的。

#### (2) 瞬时无功功率理论

H. Akagi最初提出的理论亦称pq理论, 是以瞬时实功率p和瞬时虚功率q的定义为根底, 其根本思想是将abc三相系统电压、电流转换成 $\alpha\beta$ 坐标系上的矢量, 将电压、电流矢量的点积定义为瞬时实电功率, 电压、电流矢量的矢量积定义为瞬时虚电功率, 并由此导出相应的概念, 其主要一点缺乏是未对有关的电流量进行定义。下面介绍以瞬时电流 $i_p$ 和 $i_q$ 为根底的理论体系, 主要考虑三相三线制的情形。

设三相电路各相电压和电流的瞬时值分别为 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 和 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ , 将其变换到 $\alpha$ - $\beta$ 两相正交的坐标系中, 具体如图8-12所示。

##### (a) 在 $\alpha$ - $\beta$ 两相坐标系中的定义

由下面的变换可得到 $\alpha$ - $\beta$ 两相瞬时电压 $e_\alpha$ 、 $e_\beta$ 和两相瞬时电流 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 。

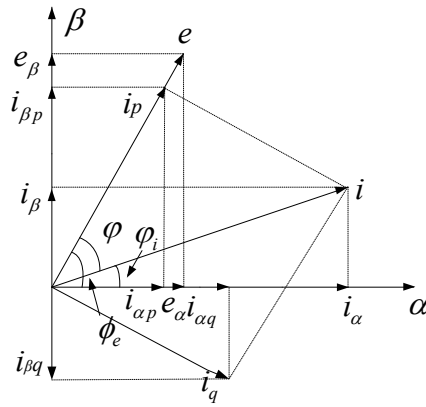


图8-12 α—β坐标系中的电压、电流矢量

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (8-9)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8-10)$$

式中  $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$

由矢量图可知

$$\overset{\mathbf{v}}{e} = \overset{\mathbf{w}}{e_\alpha} + \overset{\mathbf{w}}{e_\beta} = e \angle \varphi_e \quad (8-11)$$

$$\overset{\mathbf{v}}{i} = \overset{\mathbf{w}}{i_\alpha} + \overset{\mathbf{w}}{i_\beta} = i \angle \varphi_i \quad (8-12)$$

$$i_p = i \cos \varphi \quad (8-13a)$$

$$i_q = i \sin \varphi \quad (8-13b)$$

在上述公式中，其中 $i_p$ 和 $i_q$ 分别为三相电路瞬时有功电流和瞬时无功电流，它们为矢量 $\overset{\mathbf{v}}{i}$ 在矢量 $\overset{\mathbf{v}}{e}$ 及其法线上的投影，式中 $\varphi = \varphi_e - \varphi_i$ 。

定义三相电路瞬时无功功率 $p$ （瞬时无功功率 $q$ ）为电压矢量 $\overset{\mathbf{v}}{e}$ 的模和三相电路瞬时有功电流 $i_p$ （三相电路瞬时无功电流 $i_q$ ）的乘积。即

$$p = e i_p \quad (8-14a)$$

$$q = e i_q \quad (8-14b)$$

把式（8-13）及 $\varphi = \varphi_e - \varphi_i$ 代入式（8-14）中，并写成矩阵形式得出

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/656020004031010205>