



基于傅里叶级数的单相有源电力 滤波器谐波电流检测方法

李自成 刘国海 著



科学出版社

内 容 简 介

有源电力滤波器是一种有效治理谐波与补偿无功的电力电子装置,而谐波电流检测是其关键技术。本书集中介绍基于傅里叶级数的单相有源电力滤波器谐波电流检测方法,内容包括离散傅里叶级数法、直接计算法、简单迭代算法、最优迭代算法、双线性构造算法、补偿电流最小神经网络法、硬件电路自适应法、神经元自适应法、神经网络自适应法、单相电路瞬时功率法,以上检测方法的检测性能比较,以及有源电力滤波器谐波电流检测方法的综合评价。

本书可供从事电力电子技术、电气自动化技术以及电力系统等领域的工程技术人员、研究人员,以及上述领域的高校教师、高年级本科生和研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于傅里叶级数的单相有源电力滤波器谐波电流检测方法/李自成,刘国海著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-033543-2

I. ①基… II. ①李… ②刘… III. ①单相-电力有源滤波器-谐波电流-检测 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 022817 号

责任编辑:潘继敏 张艳芬 / 责任校对:李 影

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 3 月第一次印刷 印张:12

字数:229 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着各种非线性负载在电力系统中的广泛使用,其产生的谐波对电力系统造成的污染日益严重。谐波污染的危害巨大,它使电能生产、传输和利用的效率降低,使电气设备过热,产生振动和噪声,并使绝缘老化、使用寿命缩短,甚至发生故障或烧毁;谐波可引起电力系统局部并联谐振或串联谐振,使谐波含量放大,造成电容器等设备烧毁;谐波还会引起继电保护和自动装置误动作,使电能计量出现混乱等。因此,要求治理电力谐波的呼声日益高涨。有源电力滤波器是一种有效治理谐波与补偿无功的电力电子装置,而谐波电流检测是其需要解决的关键技术。

1983年,日本学者 Akagi 等提出著名的三相电路瞬时无功功率理论。此后,这一理论被不断完善。目前,基于三相电路瞬时无功功率理论的三相有源电力滤波器谐波电流检测方法是得到认可的较为成熟的方法,但其仍存在问题。而对于单相有源电力滤波器,至今还没有一种得到认可的较为成熟的方法。现在,已经提出多种单相有源电力滤波器谐波电流检测方法,如基于三相电路瞬时无功功率理论的单相电路谐波电流检测方法、基于自适应噪声对消技术原理的谐波电流检测方法、基于频率独立的谐波电流检测方法、基于 Goertzel 算法的谐波电流检测方法等。尽管这些方法各有特点,但各自都存在一些难以克服的问题,如有的实时性差、有的检测精度不高、有的稳定性差等。因此,谐波电流检测仍是有源电力滤波器需要研究与解决的关键技术。

近十多年来,作者一直从事有源电力滤波器谐波电流检测方面的研究,取得了一些原创性和许多创新性的研究成果。本书以此为基础撰写而成,它集中反映了作者在有源电力滤波器谐波电流检测方面的研究成果。例如,提出双线性构造算法,该算法包含基本概念定义、双线性构造思想、判别负载电流状态算法等原创性研究成果;提出直接算法、单相电路瞬时功率理论和基于此理论的单相电路瞬时功率法,给出有源电力滤波器谐波电流检测方法的综合评价。另外,采用对比仿真研究两种检测方法的检测性能,无疑是一种简单有效的方法。但在实际应用时,电源频率常常围绕中心频率上下波动,而电源电压也时常发生畸变。因此,倡导在对比仿真时要结合实际应用。

在选材上,本书专注于介绍基于傅里叶级数的单相有源电力滤波器谐波电流检测方法。非线性负载电流的傅里叶级数表示为贯穿本书始终的理论依据,通过非线性负载电流的傅里叶级数表示将全书内容连在一起,因而本书内容具有很大的相关性。

在本书即将出版之际,作者特别感谢周维教授和孙玉坤教授的指导和帮助!课题研究先后得到国家自然科学基金面上项目(55477021)、国家教育部博士点基金资助项目(9461110)、江苏省高新技术项目(GB2004024)、江苏省自然科学基金项目(BK95109504)、机械部教育司基金项目(98250813)、江苏省高校研究生科技创新计划项目和江苏大学高级人才专项基金资助项目的资助,本书的出版还得到江苏省高校优势学科建设工程资助项目的资助,在此对所有资助单位表示衷心的感谢!衷心感谢所引用文献的作者!

限于作者水平,书中内容难免存在不妥之处,诚挚地期望广大读者批评指正。

作 者

于江苏大学

2011年9月16日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 谐波危害与谐波治理	2
1.2.1 谐波危害	2
1.2.2 谐波治理	3
1.3 有源电力滤波器的基本原理	6
1.4 有源电力滤波器谐波电流检测方法的研究现状	7
1.5 本书结构	9
第 2 章 基本理论与相关知识	12
2.1 非线性负载电流的傅里叶级数表示.....	12
2.1.1 傅里叶级数	12
2.1.2 负载电流的傅里叶级数表示	13
2.2 一种简单实用的谐波电流检测实验系统.....	13
2.2.1 UA206 A/D 数据采集卡	14
2.2.2 程序设计.....	14
2.2.3 小结	15
2.3 MATLAB 7.0 Simulink 模块库中的部分模块	16
2.4 参考方法的 MATLAB 仿真.....	17
2.4.1 谐波与无功电流检测框图.....	17
2.4.2 MATLAB 仿真模型	18
2.4.3 仿真	19
2.4.4 小结	23
2.5 本章小结.....	23
第 3 章 离散傅里叶级数法和直接算法	24
3.1 非线性负载电流的傅里叶级数表示简介.....	24
3.2 离散傅里叶级数法.....	24
3.2.1 计算谐波与无功电流的离散傅里叶级数法.....	25
3.2.2 计算谐波电流的离散傅里叶级数法	28
3.2.3 小结	31

3.3	直接计算法	32
3.3.1	计算谐波与无功电流的直接计算法	32
3.3.2	计算谐波电流的直接计算法	37
3.3.3	小结	41
3.4	直接计算法的 MATLAB 仿真	41
3.4.1	计算谐波与无功电流的直接算法简介	41
3.4.2	MATLAB 仿真模型	41
3.4.3	仿真	43
3.4.4	小结	45
3.5	直接计算法的本质及其检测性能	45
3.5.1	计算谐波与无功电流的直接算法和离散傅里叶级数法简介	45
3.5.2	计算谐波与无功电流的直接算法的本质	45
3.5.3	计算谐波与无功电流的直接算法的检测性能	46
3.5.4	小结	47
3.6	直接算法与离散傅里叶级数法的对比仿真	47
3.6.1	问题的提出	48
3.6.2	对比仿真	48
3.6.3	小结	51
3.7	直接算法参考正弦信号的一种构造方法	51
3.7.1	计算谐波电流的直接算法简介	51
3.7.2	参考正弦信号构造方法	51
3.7.3	小结	54
3.8	本章小结	54
第4章	简单迭代算法和最优迭代算法	55
4.1	简单迭代算法	55
4.1.1	计算谐波与无功电流的简单迭代算法	55
4.1.2	计算谐波电流的简单迭代算法	61
4.1.3	小结	66
4.2	最优迭代算法	66
4.2.1	计算谐波与无功电流的最优迭代算法	66
4.2.2	计算谐波电流的最优迭代算法	68
4.2.3	小结	69
4.3	本章小结	69
第5章	双线性构造算法	70
5.1	基本概念定义	70

5.1.1 非线性负载电流的傅里叶级数表示简介	70
5.1.2 定义	70
5.2 计算谐波与无功电流的双线性构造算法	72
5.2.1 计算基波有功电流幅值的双线性构造思想描述	72
5.2.2 计算谐波与无功电流的双线性构造算法描述	75
5.2.3 计算量分析	77
5.2.4 计算精度分析	77
5.2.5 算法的讨论	77
5.2.6 基于动态迭代步长的判别负载电流状态算法	78
5.2.7 仿真与实验	80
5.2.8 小结	83
5.3 计算谐波电流的双线性构造算法	83
5.3.1 计算基波无功电流幅值的双线性构造思想描述	83
5.3.2 计算谐波电流的双线性构造算法描述	85
5.3.3 计算量分析	87
5.3.4 计算精度分析	87
5.3.5 算法的讨论	88
5.3.6 基于动态迭代步长的判别负载电流状态算法	88
5.3.7 仿真与实验	90
5.3.8 小结	92
5.4 本章小结	94
第6章 补偿电流最小神经网络法	95
6.1 补偿电流最小神经网络检测算法	95
6.1.1 检测原理简介	95
6.1.2 算法描述	95
6.1.3 仿真与实验	97
6.1.4 小结	99
6.2 补偿电流最小神经网络法和直接计算法的对比	99
6.2.1 两种检测方法简介	99
6.2.2 对比与对比仿真	100
6.2.3 小结	102
6.3 本章小结	102
第7章 自适应法	103
7.1 自适应噪声对消技术原理及其应用条件	103
7.1.1 非线性负载电流的傅里叶级数表示简介	103

7.1.2	自适应噪声对消技术原理描述	103
7.1.3	谐波与无功电流检测的应用条件	104
7.2	硬件电路自适应法	106
7.2.1	算法描述	106
7.2.2	MATLAB 仿真	107
7.2.3	小结	109
7.3	神经元自适应法	109
7.3.1	算法描述	109
7.3.2	数字仿真	110
7.3.3	小结	113
7.4	神经网络自适应法	113
7.4.1	算法描述	113
7.4.2	数字仿真	114
7.4.3	小结	117
7.5	简化的神经元自适应法和简化的神经网络自适应法的对比	117
7.5.1	两种算法描述	118
7.5.2	对比仿真	119
7.5.3	小结	122
7.6	硬件电路自适应法与神经元自适应法的一致性	123
7.6.1	硬件电路自适应法和最简神经元自适应法的一致性	123
7.6.2	神经元自适应法的硬件电路实现和硬件电路自适应法的一致性	124
7.6.3	小结	125
7.7	本章小结	126
第 8 章	单相电路瞬时功率法	127
8.1	非线性负载电流的傅里叶级数表示简介	127
8.2	单相电路瞬时功率理论	127
8.3	单相电路瞬时功率法描述	128
8.4	仿真与实验	129
8.5	本章小结	131
第 9 章	谐波电流检测方法的 MATLAB 对比仿真	132
9.1	四种检测方法的 MATLAB 仿真模型简介	132
9.2	直接计算法和硬件电路自适应法的对比仿真	133
9.2.1	MATLAB 仿真模型	133
9.2.2	对比仿真	134
9.2.3	小结	140

9.3	直接计算法和单相电路瞬时功率法的对比仿真	140
9.3.1	MATLAB 仿真模型	140
9.3.2	对比仿真	141
9.3.3	小结	145
9.4	直接计算法与参考方法的对比仿真	146
9.4.1	MATLAB 仿真模型	146
9.4.2	对比仿真	147
9.4.3	小结	150
9.5	硬件电路自适应法与单相电路瞬时功率法的对比仿真	151
9.5.1	MATLAB 仿真模型	151
9.5.2	对比仿真	152
9.5.3	小结	155
9.6	硬件电路自适应法与参考方法的对比仿真	156
9.6.1	MATLAB 仿真模型	156
9.6.2	对比仿真	157
9.6.3	小结	160
9.7	单相电路瞬时功率法与参考方法的对比仿真	160
9.7.1	MATLAB 仿真模型	161
9.7.2	对比仿真	162
9.7.3	小结	165
9.8	本章小结	166
第 10 章	有源电力滤波器谐波电流检测方法的综合评价	167
10.1	问题的提出	167
10.2	单相有源电力滤波器谐波与无功电流检测方法的综合评价	169
10.2.1	非线性负载电流的傅里叶级数表示简介	169
10.2.2	有源电力滤波器的工作原理和本质作用	169
10.2.3	综合评价	171
10.3	本章小结	171
参考文献		173

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

在世界各国电力工业中,目前几乎都是采用正弦交流供电方式。在理想的电力系统中,电源以单一恒定频率(50Hz 或者 60Hz)的正弦变化规律向电网供电。电网可近似为一个线性时不变系统,系统中各点的电流、电压都是以单一恒定的供电频率随时间按正弦规律变化的量。这些电压和电流彼此之间也仅存在幅值和相位的差异,都是具有相同频率的正弦量。用复指数或者复平面上的旋转矢量表示的这些同频率正弦量构成了传统电力系统分析与设计方法的基础。在此基础上人们经过多年的努力,对电力系统在各种理想工作状态下的特性已经有了深入和全面的了解。一般地说,一个实际电力系统基本上能够满足理想电力系统的条件。但是随着科学技术的发展,电力系统中非线性负载的比重日益增加,理想电力系统的近似程度变差,其直接表现是电力系统中的电流和电压波形产生周期性畸变。从频域的观点,这些电流和电压的波形,不仅包含与供电电源同频率的正弦量(称为基波分量),而且出现了一系列频率为基波频率整数倍的正弦波分量,这一系列正弦波分量统称为电力谐波^[1]。

当电力系统中的电流、电压波形出现较大畸变,或者说当电力系统中存在较大的谐波污染时,许多问题无法用传统的正弦理论,如相量分析方法进行解释。按照传统正弦理论设计的电力系统已不能安全可靠地运行,故障率大大增加。所以,近 30 年来,电力谐波问题已引起世界各国政府和科技界的广泛关注。许多国家相继颁布了限制含有电力电子控制器件的低压电器和家用电器产生谐波的标准。国际电工委员会(IEC)、电气和电子工程师协会(IEEE)等国际学术机构也成立了专门的电力系统谐波工作组,包括制定标准和组织国际会议专门定期对谐波研究进行学术交流和讨论。近 30 年来对电力谐波问题的研究已经大大超过了电力系统自身的研究范围,渗透到电工理论、非线性系统理论、数字信号处理、电力电子等学科领域,对电力谐波的研究已取得了前所未有的进展,并有许多重要发展。谐波问题逐渐被认识 and 了解,对其产生的原因、计算分析的方法、危害和影响的机理、测量与评估标准的制定,以及综合治理的措施等方面的研究也在不断深入。但由于谐波研究问题复杂、涉及领域宽,目前仍有大量问题需要解决。概括起来,可以分为以下四个方面^[2~8]:

- (1) 谐波功率理论研究。
- (2) 谐波分析以及谐波危害与影响分析。
- (3) 谐波的补偿和抑制。
- (4) 与谐波有关的测量问题以及限制谐波的标准。

这四个方面是按照谐波研究本身的内在规律分类,它们相互关联、相互促进发展。其中,谐波的抑制和补偿,也即谐波治理技术是谐波研究的核心和关键问题。综上所述,谐波问题的研究已成为一门新兴的跨学科领域和亟待加强的重点研究方向。

1.2 谐波危害与谐波治理

本节介绍谐波危害和谐波治理,谐波治理包括谐波源治理、谐波抑制与补偿。

1.2.1 谐波危害

谐波对公用电网和其他系统的危害主要体现在以下几个方面^[5~14]:

(1) 谐波使公用电网中的元件产生附加的谐波损耗,降低发电、输电以及用电设备的效率,大量的3次谐波流过中线时会使线路过热,甚至发生火灾。

(2) 谐波影响各种电气设备的正常工作。谐波对电机的影响除引起附加损耗外,还会产生机械振动、噪声和过电压,使变压器局部严重过热。谐波使电容器、电缆等设备过热、绝缘老化、寿命缩短,以至损坏。

(3) 谐波可引起公用电网中局部的并联谐振和串联谐振,从而使谐波放大,这就使上述(1)和(2)的危害大大增加,甚至引起严重事故。

(4) 谐波可导致继电保护和自动装置的误动作,使电气测量仪表计量不准确。

(5) 谐波对临近的通信系统产生干扰,轻者产生噪声,降低通信质量;重者导致信息丢失,使通信系统无法正常工作。

电力谐波不仅对通信设备和电力系统本身造成危害,而且降低功率因数。这是因为,对于电网电压为正弦波(一般情况都可认为如此),而用电电器的电流含有谐波成分时,功率因数定义为

$$\lambda = \gamma \cos \varphi_1 \quad (1-1)$$

式中, φ_1 为电流基波分量与电压的相位差, $\cos \varphi_1$ 为相移因子, γ 为畸变因子。

$$\gamma = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots}} = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2}} \quad (1-2)$$

式中, $I_1, I_2, \dots, I_n, \dots$ 分别为电流基波分量的有效值, 电流 2 次谐波分量的有效值, $\dots$, 电流 n 次谐波分量的有效值, $\dots$ 。

当电流不含谐波分量时, $\gamma=1$; 当电流包含谐波分量时, $\gamma<1$ 。所以, 当电流包含谐波分量时, 电路的功率因数将降低。用功率关系可表示为

$$\lambda = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + R^2}} \quad (1-3)$$

式中, $P_1 (= UI_1 \cos \varphi_1)$ 为基波有功功率, $Q_1 (= UI_1 \sin \varphi_1)$ 为基波无功功率,

$R \left(= U \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} \right)$ 为谐波功率。其中, U 为电压有效值。

定义总谐波畸变率为

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}{I_1^2}} \quad (1-4)$$

则 THD 和 γ 之间的关系为

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 + (\text{THD})^2}} \quad (1-5)$$

因此, 减小电流中的谐波含量, 不但可以降低总谐波畸变率, 而且能够提高负载功率因数。我国在 20 世纪 80 年代就已经制定了相应的谐波标准, 但由于技术水平限制一直未严格执行。现在, 电力谐波治理已成为我国电气工程领域迫切需要解决的重要课题之一。

1.2.2 谐波治理

抑制或减小电网谐波主要有两种途径^[15~37]: 一是对产生谐波源的电力电子装置进行改造, 使其不产生谐波, 将其功率因数控制为 1, 这当然只适用于作为主要谐波源的电力电子装置; 二是安装谐波补偿装置来补偿谐波, 这对各种谐波源均适用。

1. 谐波源治理

近年来, 随着各种电力电子装置的大量应用, 可控和不可控整流器在电力系统中的应用越来越普遍。这类整流器在带大电感(RL)负载时电流近似为方波, 带大电容(RC)负载时电流为尖脉冲, 使电力系统中的电流严重畸变, 成为电力系统中的主要谐波源, 也是治理的重点。针对这一类整流器减少谐波、提高功率因数的方法和措施, 各种文献报道很多, 而且开发低谐波整流器仍然是研究的热点之一。不

同容量下高功率因数变流器主要采用的技术如图 1-1 所示。

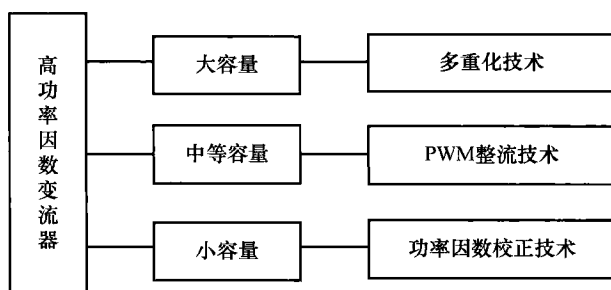


图 1-1 高功率因数变流器技术

大容量变流器减少谐波的主要方法是采用多重化技术，即多相整流技术，如采用 12 相及以上的多相整流技术。它将多个方波叠加，以得到接近正弦波的阶梯波，重数越多，效果越好。

中等容量(10kV·A 到几百千伏安)的单位功率因数变流器主要采用 PWM 整流技术，一般需要使用自关断器件。对电流型整流器，可直接对各个电力半导体器件的通断进行 PWM 调制。对电压型整流器，需要将整流器通过电抗器与电源相连。有两类控制方法，一类是直接对整流器进行 PWM 调制，使流过电抗器的电流为与电源电压同相的正弦波；另一类是检测输入电流，通过电流反馈信号对整流器进行跟踪型 PWM 调制，达到控制输入电流波形和相位的目的。

小容量整流器也可采用 PWM 技术，但目前一般采用二极管整流加 PWM 斩波技术，也称为功率因数校正(power factor corrector, PFC)技术。它是在整流器与负载之间接一个 DC-DC 变换器，控制输入电流为与输入电压同相的正弦波。这一方式在各种开关电源中有非常广泛的应用前景，必将对谐波污染的治理做出很大的贡献。

使电力电子装置本身不产生谐波是一种积极的谐波治理措施，可以有效地减少电力系统中的谐波。但由于电力系统的复杂性以及谐波源本身的工作机理，要完全消除电力系统中的谐波是不可能的。因此，对电网谐波进行有效滤波或补偿是非常必要的。

2. 谐波抑制与补偿

传统的抑制谐波的方法是采用 LC 无源电力滤波器(passive power filter, PPF)。无源电力滤波器一般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、吸收特定次谐波效果明显，并且同时也可补偿无功功率等优点。但由于结构原理上的原因，其在应用中存在以下难以克服的缺点^[38~59]：

(1) 只能抑制按照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,这会使整个滤波装置的成本和体积增加。

(2) 谐波电流超量时可能造成无源电力滤波器的过载,损害设备。

(3) 其滤波特性受电网结构、工作状态和电源频率波动的影响很大,难以获得预期的滤波效果。

(4) 对于特殊的谐波或当系统阻抗和频率变化时,有可能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。

(5) 可能与电力系统发生串联谐振,造成电压畸变而产生附加的谐波电流流入无源电力滤波器,从而影响其滤波效果。

由于无源电力滤波器的上述缺点,它很难满足现代电力系统的要求。

20 世纪 70 年代以来,人们开始致力于有源电力滤波器(active power filter, APF)的研究,以弥补无源电力滤波器存在的缺点。1969 年, Bird 等在其论文^[60]中描述了通过向交流电源注入 3 次谐波电流以改善电源电流波形的方法。文中所描述的方法被认为是有源电力滤波器思想的诞生。1971 年,日本的 Sasake 和 Machida 建立了有源电力滤波器的基本原理结构^[44]。但由于当时是采用线性放大的方法产生补偿电流,其损耗大、成本高,因而仅在实验室中研究,未能在电力系统中得到应用。

1976 年,美国西屋电气公司的 Gyugyi 和 Strycula 在文献[45]中提出采用 PWM 变流器构成的有源电力滤波器,确立了有源电力滤波器的概念,并建立了有源电力滤波器主电路的基本拓扑结构和控制方法。从原理上看, PWM 变流器是一种理想的补偿电流发生电路,但是由于当时电力电子技术的发展水平还不高,全控型器件功率小、频率低,因而有源电力滤波器仍局限于实验研究。

20 世纪 80 年代,随着电力电子技术以及 PWM 控制技术的发展,对有源电力滤波器的研究逐渐活跃起来,成为电力电子技术领域的研究热点之一。这一时期的一个重大突破是:1983 年, Akagi 等提出三相电路瞬时无功功率理论^[61]。以该理论为基础的谐波电流检测方法在有源电力滤波器中得到成功应用,极大地促进了有源电力滤波器的发展。目前,三相电路瞬时无功功率理论被认为是有源电力滤波器的主要基础理论之一。

最早的有源电力滤波器为单独使用的并联型有源电力滤波器。经过多年的发展,为尽量发挥有源电力滤波器的特长,提高其性能,并尽量减小其容量,人们提出串联混合型有源电力滤波器、并联混合型有源电力滤波器等。为适应不同的补偿对象,人们提出串联型有源电力滤波器等。并联和串联是按照有源电力滤波器接入电网的方式来分类的,其分类如图 1-2 所示。

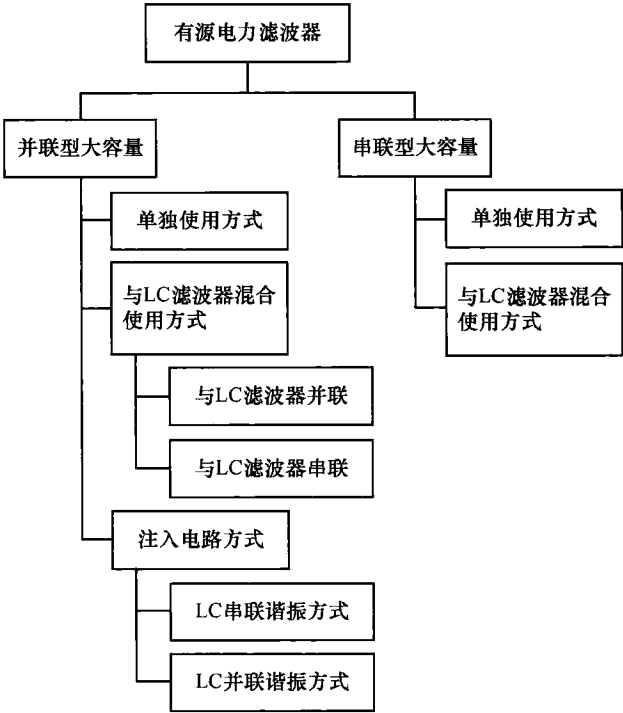


图 1-2 有源电力滤波器的系统构成分类

1.3 有源电力滤波器的基本原理

最基本的并联型有源电力滤波器的工作原理如图 1-3^[8,45]所示。它由补偿电

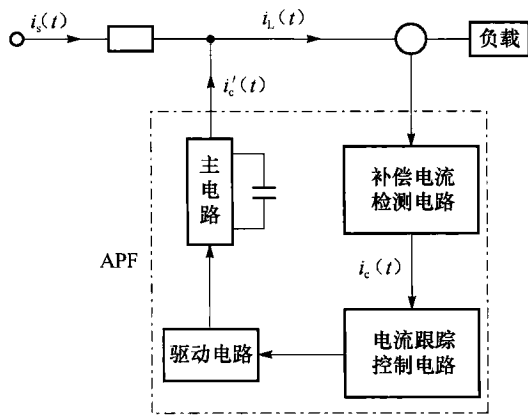


图 1-3 并联型有源电力滤波器工作原理

流检测电路和补偿电流发生电路两大部分组成。补偿电流发生电路由电流跟踪控制电路、驱动电路和主电路组成。补偿电流检测电路的作用是实时检测出非线性负载电流 $i_L(t)$ 中需要补偿的谐波电流。补偿电流发生电路的作用是根据补偿电流检测电路检测出的需要补偿的谐波电流,产生实际的补偿电流。主电路目前均采用 PWM 变流器。图中, $i_s(t)$ 为电源电流, $i_L(t)$ 为非线性负载电流, $i'_c(t)$ 为有源电力滤波器提供的实际补偿电流,而 $i_c(t)$ 为补偿电流检测电路检测出的非线性负载电流 $i_L(t)$ 中需要补偿的谐波电流。

有源电力滤波器既可用于补偿非线性负载电流 $i_L(t)$ 中的谐波电流之和,也可用于补偿 $i_L(t)$ 中的谐波与无功电流之和。当有源电力滤波器用于补偿 $i_L(t)$ 中的谐波电流之和时,补偿电流检测电路检测出的补偿电流 $i_c(t)$ 应逼近 $i_L(t)$ 中理论上的谐波电流之和 $i_h^*(t)$,以 $i_c(t)$ 作为指令信号,由补偿电流发生电路产生实际补偿电流 $i'_c(t)$ 。在理想情况下,有 $i'_c(t) = i_c(t) = i_h^*(t)$,即由有源电力滤波器提供 $i_L(t)$ 中理论上的谐波电流之和 $i_h^*(t)$,而由电源提供 $i_L(t)$ 中理论上的基波电流 $i_1^*(t)$ 。同理,当有源电力滤波器用于补偿 $i_L(t)$ 中的谐波与无功电流之和时,补偿电流检测电路检测出的补偿电流 $i_c(t)$ 应逼近 $i_L(t)$ 中理论上的谐波与无功电流之和 $i_c^*(t)$,以 $i_c(t)$ 作为指令信号,由补偿电流发生电路产生实际补偿电流 $i'_c(t)$ 。在理想情况下,有 $i'_c(t) = i_c(t) = i_c^*(t)$,即由有源电力滤波器提供 $i_L(t)$ 中理论上的谐波与无功电流之和 $i_c^*(t)$,而由电源提供 $i_L(t)$ 中理论上的基波有功电流 $i_p^*(t)$ 。

有源电力滤波器作为一种具有应用前景的治理谐波与补偿无功的电力电子装置,它具有以下特点^[40~52]:

- (1) 实现动态补偿,可对频率和大小均变化的谐波与无功功率进行补偿,对补偿对象的变化有极快的响应。
- (2) 可同时对谐波和无功功率进行补偿,且补偿无功功率的大小可做到连续调节。
- (3) 补偿无功功率时不需要储能元件;补偿谐波时所需储能元件容量也不大。
- (4) 即使补偿对象电流过大,有源电力滤波器也不会发生过载,并能正常发挥补偿作用。
- (5) 受电网阻抗的影响不大,不容易和电网阻抗发生谐振。
- (6) 能跟踪电网频率的变化,故补偿性能不受电网频率变化的影响。
- (7) 既可对一个谐波和无功源进行单独补偿,也可对多个谐波和无功源进行集中补偿。

1.4 有源电力滤波器谐波电流检测方法的研究现状

有源电力滤波器是一种有效的具有应用前景的治理谐波与补偿无功的电力电

子装置。其性能的好坏与其补偿电流检测电路采用的谐波电流检测方法有很大关系。因此,如何实时准确地检测出非线性负载电流中需要补偿的谐波电流是有源电力滤波器的关键^[62~65]。

当有源电力滤波器用于补偿非线性负载电流中的谐波与无功电流之和时,谐波电流检测方法即为谐波与无功电流(之和)检测方法;当有源电力滤波器用于补偿非线性负载电流中的谐波电流之和时,谐波电流检测方法即为谐波电流(之和)检测方法。广义的谐波电流检测方法,既可指谐波与无功电流(之和)检测方法,也可指谐波电流(之和)检测方法;狭义的谐波电流检测方法,则特指谐波电流(之和)检测方法。

有源电力滤波器谐波电流检测方法主要有:

(1) 基于模拟陷波器或者带通滤波器的检测法。最早的谐波电流检测方法采用模拟滤波器来实现,即采用模拟陷波器将基波电流分量滤除,得到谐波分量,或者采用带通滤波器得到基波分量,再与负载电流相减得到谐波分量。其优点为:电路结构简单、价格便宜、易于控制。其缺点为:对电源频率波动和元件参数敏感、输出信号畸变、误差大、补偿效果差。

(2) 基于 Fryze 的时域分析法。该方法将负载电流分解为两个正交分量,一个是与电源电压波形完全一致的有功电流分量,另一个是负载电流与有功电流的差值,包括基波无功和谐波,称为广义无功电流分量。其缺点为:该方法至少有一个周期的时间延迟,故不适用于频繁变化的负载;它只能区分有功电流和广义无功电流,不能将基波无功和谐波电流分离出来,因而只适用于全补偿场合,不能实现基波无功和谐波电流的单独补偿。

(3) 基于频域分析的快速傅里叶变换(FFT)法。该方法以傅里叶分析为基础,要求负载电流是周期变化的,否则误差较大。通过 FFT 将检测到的一个周期变化的非正弦信号分解,得到各次谐波的幅值和相位,将要消除的谐波分量进行 FFT 反变换即得到补偿参考信号。其优点为:可以选择欲消除的谐波次数,还可计算出负载电流的基波有功和基波无功分量,而且受环境因素影响较小。其缺点为:需要进行 FFT 与其反变换,计算量大,因而有较长的时间延迟;当电源电压畸变严重或者频率波动时,误差较大。

(4) 基于瞬时无功功率理论的检测方法。1983 年,日本学者 Akagi 等提出三相电路瞬时无功功率理论^[61]。此后,这一理论被不断完善^[66~72]。现在,基于三相电路瞬时无功功率理论的三相有源电力滤波器谐波电流检测方法(主要有 $p-q$ 法、 i_p-i_q 法和 $d-q$ 法)^[46,73~76]是被实际应用所证实的具有应用价值的得到认可的较为成熟的方法^[77,78],目前生产的有源电力滤波器,多数采用它们检测需要补偿的谐波电流。但是,基于三相电路瞬时无功功率理论的三相电路谐波电流检测方法还存在以下问题:需要进行二次坐标变换,计算量较大;使用模拟电路实现时需要较