

30312

Technology
实用技术

高效电能变换应用丛书

有源电力滤波器

——结构·原理·控制

姜齐荣 赵东元 陈建业 编著



科学出版社

www.sciencep.com

高效电能变换应用丛书

有源电力滤波器

——结构·原理·控制

姜齐荣 赵东元 陈建业 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“高效电能变换应用丛书”之一。随着电力电子技术应用的日益广泛,它在给人类生活带来快捷方便的同时,其负面效应也日益明显。电力电子装置已经成为主要的谐波干扰源而受到日益广泛的关注,而采用滤波的方式抑制谐波已经成为一个必须面对的现实。本书从应用的角度出发,跟踪国内外有源滤波技术的最新进展,并结合作者自身的研究成果,深入浅出地介绍各种有源电力滤波装置的结构、原理和应用实例。本书的特点是注重理论和实际的紧密结合,并侧重于应用技术和实际电路的分析与计算。

本书可作为电气设备制造公司和从事电力系统电能质量控制的专业技术人员在设计、制造、安装、调试各种滤波装置的参考书,也可供高等院校相关专业本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

有源电力滤波器:结构·原理·控制/姜齐荣,赵东元,陈建业编著.

—北京:科学出版社,2005

(高效电能变换应用丛书)

ISBN 7-03-015808-3

I. 有… II. ①姜… ②赵… ③陈… III. 有源电力滤波器-结构-原理-控制 IV. TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 071008 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲/责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平/封面设计:李 祥

北京东方科苑图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 10 月第一次印刷 印张: 20 1/4

印数: 1—4 000 字数: 390 600

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<环伟>)

编著者简介



姜齐荣

湖南浏阳人，1969年生。1992年获得清华大学电机工程与应用电子技术系工学学士学位；1997年获得清华大学电机工程与应用电子技术系工学博士学位。现为清华大学电机工程与应用电子技术系副教授，CIGRE HVDC与FACTS仿真工作组成员，IEEE会员。

主要研究方向：电力系统柔性交流输电技术分析与控制，现代电能质量分析与控制。

曾获“国家科技进步二等奖”一项，“国家教学优秀成果一等奖”一项，“国家电力公司科技进步一等奖”一项。

发表论文60余篇。



赵东元

1973年出生于山西大同。2004年获得清华大学工学博士学位。现就职于中国电力科学研究院，工程师。

主要从事控制理论、无功补偿、电能质量领域的研究和工程应用。

编著者简介



陈建业

1946年出生于江苏南京。1982年获得西南交通大学工学硕士学位。现为清华大学电机系研究员，博士生导师。曾于英国伯明翰，UMIST等大学和GEC - ALSTOM牵引分公司进修和从事研究工作。

主要研究方向：电力电子技术在电力系统中的应用。

已出版著作两本：2003年由清华大学出版社出版了《电力电子电路的计算机仿真》，2004年由机械工业出版社出版了《电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用》；译作一本，即2004年机械工业出版社出版了《电力电子技术手册》；发表文章100余篇，其中SCI和EI收录30多篇。

丛 书 序

电能是现代社会不可或缺的重要能源。在 21 世纪,电力可持续发展已成为实现社会经济可持续发展的基础,并在社会经济、能源与环境协调发展中起着重要的平衡作用。

在现代社会所有的动力资源中,电能使用最方便,适用范围最广泛。电能在不同领域的深入应用,以及对高效率、高功率密度、高可靠性电能变换的需求,推动着电能变换技术、理论、电路、材料和工艺的发展。《高效电能变换应用丛书》即从应用“电能变换”技术的角度,讨论获取最佳供电的方法,同时探求节省能源和保护环境的高效电能变换的有效装置。

我们知道,未经加工和调理的原生态电能是有效电能的初始态。电网是电能的支柱,燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充,太阳能电池、风力发电、潮汐发电等是向自然能换取电能的有效途径,燃料电池、铅酸蓄电池、锂离子电池、干电池等是可再生或一次性的电能载体。

对于现代社会大多数用电领域,原生态电能从某种意义上都是“粗电”。使用“粗电”将不尽如人意。例如,针对不同用户,电网上的电就不一定好用。电网是公用的,电网在高峰期和低谷期的电压存在差异。由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性,特别是大型设备的启动和刹车,会给邻近电网造成随机的瞬时冲击和定式落差;雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等,也将给敏感用户带来麻烦:设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱,严重时还将造成系统硬件损坏,使系统工作陷于瘫痪。为此,需要在电网上游运用柔性输配电控制,而在电网下游采用稳压器和 UPS 对从电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性,电压瞬时波动可能比电网小。但电池在工作中也存在不少问题,最常见的问题是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭。另外,电池单体的电压较低,以其自然形态很少可直接使用,多数是串联或串并联组合使用,这种使用方式很难保证串联或串并组合中的每个单体的特性一致。为此,必须实施合理的充电、放电和监管。

太阳能电池能将阳光转换成电能,但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡,为此需要对转换的电能进行收集储存、再经 DC-DC 或 DC-AC 变换,获得稳定的直流电和交流电。风力等自然能发电同样受自然因素牵制,借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态,也必须实行调整控制。……

在供电和用电的大舞台上,电能变换充当着极其重要的角色;在电能变换领域,以高频逆变技术为核心的 PWM 开关控制能使上述的许多问题迎刃而解,它比传统的低频电能变换有更多的优点。例如,高频逆变可使电能变换设备成十倍地缩小体积和重量,还可显著降低能耗和电磁干扰,可赋予设备数字化、智能化特性等等。这里所谓的高频,是相对于工频变换 50Hz 以及 20 世纪 60 年代兴起的 20kHz 变换频率的更高变换频率:数十 kHz、数百 kHz 乃至数 MHz 等。高频变换装置的功率密度随频率的提高而提高,器件和材料的开关损耗也随之愈加突出,促使高频损耗小的功率器件和材料不断获得改进。由此,高频损耗小的软开关 PWM 电路在近十年中取得了神速的发展。这些都使高效电能变换装置日臻完美。

不论是电网、电池还是相对独立的供电系统,都存在电磁环境问题。即在电力运行中因环境电磁干扰(如雷电、汽车点火引发),或共享电源母线的负载设备的电磁干扰,或 DC-DC、DC-AC 转换装置自身的电磁干扰,搅得“四邻不安”。因此,电磁兼容性成为供电和用电都必须面对的复杂问题。

现代社会的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进,变流设备的功率等级提升极快;又由于采用变流举措的负载设备日益增多,其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此,电能质量控制刻不容缓,电力补偿、有源滤波等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪占据瞩目位置,人们在追求节约电能方面有卓越贡献的高效能供电设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以便控制和调节电机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些浪费掉的非常可观的电能“拣”回来,利用现代电能变换技术对电机实行变频控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电较大比重,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的高频电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的重要手段。

生产力愈发展,技术越进步,环境问题愈加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应气体,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得少一点环境恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21 世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步必定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。《高效电能变换应用丛书》在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。

电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容丰富。一套丛书毕竟规模有限,实难尽述。我们企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。

《高效电能变换应用丛书》编辑委员会

《高效电能变换应用丛书》 编辑委员会成员名单

主任委员	倪本来	中国电源学会编辑工作委员会主任	教授级高级工程师
副主任委员	陈建业	清华大学	研究员
	徐德鸿	浙江大学电气工程学院常务副院长	教授,博士生导师
	阮新波	南京航空航天大学	教授,博士生导师
委 员	(以下按姓氏笔画排序)		
	丁道宏	南京航空航天大学	教授
	区健昌	北京理工大学	教授
	王志通	北方交通大学	教授
	王赞基	清华大学	教授,博士生导师
	邓智泉	南京航空航天大学	教授,博士
	艾多文	航天工业总公司二院 25 所	教授级高级工程师
	刘凤君	航天工业总公司二院 206 所	研究员
	刘晚融	科学出版社	编审
	阮新波	南京航空航天大学	教授,博士生导师
	李永东	清华大学	教授,博士生导师
	李厚福	北京电视技术研究所	高级工程师
	沙 斐	北方交通大学抗电磁干扰中心主任	教授,博士生导师
	张 立	天津大学	教授
	张 宙	香港理工大学	副教授,博士
	张卫平	北方工业大学	教授,博士
	张中相	中国运载火箭技术研究院第十五研究所	研究员,博士生导师
	张占松	广东工业大学	教授
	张志国	中国运载火箭技术研究院第十四研究所主任	研究员
	陈 坚	华中理工大学	教授,博士生导师
	陈永真	辽宁工学院	副教授,硕士生导师
	陈建业	清华大学	研究员
	陈慕平	(台湾)工业技术研究院能源与资源研究所	博士
	罗方林	新加坡南洋理工大学	教授,博士
	季幼章	中科院等离子体研究所	研究员
	郑琼林	北京交通大学电气学院院长	教授,博士生导师
	赵争鸣	清华大学	教授,博士生导师
	赵良炳	清华大学	教授
	赵修科	南京航空航天大学	教授

倪本来 中国电源学会编辑工作委员会主任 教授级高级工程师
倪海东 北京奥米伽电源技术服务中心主任 副教授
徐德鸿 浙江大学电气工程学院常务副院长 教授,博士生导师
黄济荣 株洲电力机车研究所 教授级高级工程师,博士生导师
龚绍文 北京理工大学 教授
龚幼民 上海大学 教授
崔炳哲 科学出版社 编辑
路秋生 北京职业技术学院 教授

前 言

电力电子技术以快速可控的电能变换为主要对象,以方便、节约、安全为特点,大大地提高了人类在生产和生活中的效率和舒适性,从而得到了日益广泛的普及。但是随着作为电网的非线性和时变性负荷的电力电子装置(如逆变器、整流器等)的大规模应用,其负面效应也日益明显。电力电子装置的开关动作向电网中注入了大量的谐波和次谐波分量,导致了交流电网中电压和电流波形的严重失真,早已替代传统的变压器等铁磁材料的非线性引起的谐波成为最主要的谐波源。而随着各种电能质量敏感设备、计算机等信息设备、电视及音响等家用视听设备和空调机等家用电器的大量应用,对于电能质量的要求也日益提高。利用各种无源和有源滤波技术,从根本上解决上述问题已经是一个不得不面对的现实。IEC61000 和国标《电能质量公用电网谐波》及《低压电器及电子设备发出的谐波电流限值(设备每相输入电流 $\leq 16\text{A}$)》,均对注入电网的谐波电流加以明确的限制,把电网谐波电压控制在允许的范围之内,从而保证电网以及电网中的电气设备免受谐波干扰。谐波标准的日趋严格为推动包括有源和无源在内的滤波技术的应用和发展提供了强大的动力。

目前,虽然有源滤波技术的理论和应用,包括治理谐波源本身(如采用各种高功率因数前端变流器来限制装置内部所产生的谐波)和在外部装设谐波滤波装置(包括有源或无源滤波装置)来吸收谐波干扰源所发出的谐波两个领域,均已经得到日益广泛的重视和长足的发展;但是作为一种新技术,它的基本原理和适用范围还不为广大读者所知,本书力求通过对上述技术的介绍,来推动该技术在我国的进一步推广和发展。

由于本书的读者对象主要是电气设备制造公司和从事电能质量控制和管理的技术人员及大专院校相关专业的高年级学生和研究生,所以作者在书中尽可能避免复杂的理论推导,而以定性的方法从物理概念入手对各种滤波装置的结构、原理和应用实例进行介绍,特别是将侧重点放在对于应用技术和实际电路的分析与计算上面。此外,作者假定读者对于电力电子技术的基本理论已经有所了解,所以将讨论的重点放在有源滤波领域的专门技术上。因此,从根本上说本书并非一本理论书籍,而是对迅速发展的有源滤波技术的历史、现状和未来的一个综述。

本书的内容大体可以分为三个部分,第一部分由前三章组成,提供了一般的背景知识。第1章介绍有关谐波问题的基本概念和标准,说明了采用有源滤波器的必要性。第2章介绍了有源滤波器的基本原理,着重讨论了基本的检测和补偿方式。第3章则全面讨论了有源滤波装置的构成和各部分的工作原理及典型结构。

本书的第二部分由4~6章组成,主要讨论外部加装的几种主要类型的有源滤波

器,即并联(第4章)、串联与串并联(第5章)和混合滤波器(第6章)的结构、原理、特性与建模,并介绍相应的应用实例。

第三部分仅包括第7章,主要讨论具有功率因数校正功能的前端变流器(即高功率因数整流器)的基本结构和工作原理。

本书的各章均采用由浅入深的方式逐步展开,利用大量的实例,将理论与实际应用紧密结合,并在可能的地方都会尽可能对过去的经验和现在的发展加以适当的介绍,以供读者对整个谐波补偿领域有一个尽可能全面和深入地了解。

本书作者根据各自熟悉的领域进行了分工,其中第2~5章由姜齐荣撰写,赵东元编写了第1、6两章,第7章由陈建业编著。

由于作者的水平有限,书中难免存在一些错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

陈建业

2005年3月于清华园

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 谐波问题及研究现状	1
1.1.1 谐波的基本概念	1
1.1.2 谐波分析	3
1.1.3 谐波危害	16
1.1.4 谐波标准	20
1.2 谐波抑制	25
1.2.1 高功率因数变流器	25
1.2.2 无源滤波器	27
1.2.3 有源电力滤波器	28
1.2.4 其 他	35
1.3 本书内容概述	36
参考文献	37
第 2 章 有源电力滤波器的基本原理	40
2.1 有源电力滤波器的基本结构	40
2.1.1 陷波器(带通滤波器)	41
2.1.2 分解合成方法	42
2.1.3 自适应噪声的消除方法	42
2.2 谐波的快速检测理论	44
2.2.1 基于 FFT 的数字分析法	45
2.2.2 单相谐波的快速检测方法	46
2.2.3 三相谐波的快速检测方法	48
2.3 电力系统谐波与并联补偿	57
2.4 电力系统谐波与串联补偿	59
参考文献	60
第 3 章 有源电力滤波器的系统构成	61
3.1 谐波检测	62
3.2 控制系统	64
3.2.1 数字模拟混合控制系统	64
3.2.2 数字控制系统	67

3.3 主电路	70
3.3.1 器件选型	76
3.3.2 吸收回路	77
3.4 耦合变压器	81
参考文献	83
第4章 并联型有源电力滤波器	85
4.1 主电路结构与参数选择	85
4.2 控制方法	87
4.2.1 电流跟踪控制	87
4.2.2 电压控制	89
4.2.3 直流侧电压的控制	98
4.3 数学模型	98
4.4 仿真结果	101
4.5 并联型有源电力滤波器的技术要求	102
4.6 实际工程介绍	103
4.6.1 5kV·A DS-UNICON 有源电力滤波器	103
4.6.2 大功率工业免荷补偿	107
4.6.3 基于 PEBB 的有源电力滤波器	108
参考文献	111
第5章 串联型有源电力滤波器	113
5.1 主电路结构与参数选择	114
5.1.1 逆变器	116
5.1.2 串联变压器	117
5.1.3 串联滤波器	119
5.1.4 直流储能单元	119
5.2 串联型有源滤波器分析与数学模型	120
5.3 串联型有源电力滤波器的控制系统	123
5.3.1 控制模式的选择	123
5.3.2 控制系统及主电路参数的选择	132
5.4 串联型有源电力滤波器的补偿极限与优化	135
5.4.1 串联补偿中的两个极限	135
5.4.2 单相串联有源电力滤波器的电压补偿	135
5.4.3 电压突升和功率因数补偿	138
5.4.4 单相串联有源电力滤波器补偿电压优化算法的仿真结果	139
5.4.5 三相串联补偿电压的优化	141

5.4.6 三相三线制系统中的三单相补偿方法	155
5.4.7 旋转和平移的综合	157
5.5 串联型有源电力滤波器实际装置介绍	161
5.6 串并联谐波综合控制器	167
5.6.1 并联型与串联型有源滤波器的特点	167
5.6.2 串并联谐波综合控制器	167
5.6.3 串并联谐波综合控制器的控制方法	169
参考文献	172
第6章 混合型有源电力滤波器	174
6.1 电路结构与器件选取	174
6.1.1 电路结构	174
6.1.2 装置结构和器件选取	176
6.2 数学模型(电路模型)	180
6.3 控制方法	183
6.3.1 常规闭环控制	183
6.3.2 开环控制	186
6.3.3 混合型有源电力滤波器的闭环控制的难点	190
6.3.4 复合控制	192
6.3.5 自适应前馈控制	195
6.4 仿真结果	198
6.4.1 仿真实例一	199
6.4.2 仿真实例二	200
6.5 工程应用实例	202
6.5.1 交流系统实例	203
6.5.2 高压直流系统实例	205
参考文献	213
第7章 具有有源滤波功能的整流器	217
7.1 电力变换装置和高次谐波	217
7.2 无源校正技术	224
7.2.1 单相感容型滤波器	224
7.2.2 改进的单相感容型无源滤波电路	228
7.2.3 三相无源感容型滤波器	237
7.3 单向功率因数校正器	241
7.3.1 输入电流非正弦的单级交直功率因数校正器	244
7.3.2 输入电流为正弦的单级 PFC 交直变换器	253
7.3.3 双级功率因数校正器	274

7.4 双向 PFC 变换器	279
7.4.1 PWM 整流器	283
7.4.2 多电平变换器	291
参考文献	308

第1章 绪论

随着现代工业技术的发展,电力系统中非线性负荷大量增加。各种非线性和时变性电子装置如逆变器、整流器及各种开关电源等大规模地应用,其负面效应也日益明显。电力电子装置的开关动作向电网中注入了大量的谐波和次谐波分量,导致了交流电网中电压和电流波形的严重失真,从而替代了传统的变压器等铁磁材料的非线性引起的谐波,成为最主要的谐波源。特别是办公自动化和家用电器的日益普及,民用和商业用电在城市用电中的比例日益增大;其中计算机、电视机、洗衣机、收录机、电冰箱和电扇等家用电器虽然单台电器的谐波电流不大,由于数量极其庞大,并且工作同时性强(比如每天19:00~21:00的电视黄金时段大量电视机同时工作),所以其逐渐成为配电网谐波污染的主要来源。电能质量的下降严重影响着供、用电设备的安全经济运行,降低了人民的生活质量。世界各国已经十分重视电能质量的管理。谐波治理是电能质量问题的核心内容之一,也是现代电力生产发展的迫切要求。

本章首先介绍谐波问题的研究历史现状,并简明扼要地叙述抑制谐波的主要手段,然后介绍本书的基本结构和各章的主要内容。

1.1 谐波问题及研究现状

1.1.1 谐波的基本概念^[1~4]

1822年,法国数学家傅里叶(J. Fourier, 1768~1830)指出,一个任意函数都可以分解为无穷多个不同频率正弦信号的和。基于此,国际电工(IEC: International Electrotechnical Commission)标准(IEC555-2, 1982)定义谐波为:谐波分量为周期量的傅里叶级数中大于1的 h 次分量(见IEV101-04-39)。把谐波次数 h 定义为:以谐波频率和基波频率之比表示的整数(见IEV101-04-40)。电气和电子工程师协会标准(IEEE标准519~1981)定义谐波为:谐波为一个周期波或量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍。总结二者,目前国际普遍定义谐波为:谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍。

在电力系统中,人们总是希望交流电压和交流电流为工频正弦波形。以正弦波电压为例,可表示为

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \theta) \quad (1.1)$$