

有源电力滤波器设计与研究

杨龙月◎著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

有源电力滤波器设计与研究

杨龙月 著

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

有源电力滤波器设计与研究 / 杨龙月著. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2016. 9
ISBN 978 - 7 - 5646 - 3169 - 7
I. ①有… II. ①杨… III. ①电力有源滤波器—研究
IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 156471 号

书 名 有源电力滤波器设计与研究
著 者 杨龙月
责任编辑 马晓彦
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 9.25 字数 177 千字
版次印次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

电能作为一种可再生的能量形式,凭借易于传输、变换、分配和控制的优点,已成为使用最为广泛的现代能源,也是人们生产和生活中的主要动力来源。但是随着电力需求日益扩大,电网结构日趋复杂,各种各样的电能质量问题逐渐凸显出来,其中谐波问题是最主要的问题之一。随着电子技术的发展,大功率半导体开关器件以及各类开关电源等产品以分布式的方式接入电网,其注入的谐波电流对公用电网影响尤为突出,使接入该电网的设备无法正常工作,甚至引起故障,影响供电系统的电力输送。因此,谐波问题得到各方面的高度重视,人们对于电能的要求逐渐由增大供电能力的“量”的追求向提高电能质量的“质”的追求发展,如何提高电能质量、保证供电的可靠性成为电力系统面临的主要问题。

有源电力滤波器(APF)属于新型电能质量治理装置,其采用电力电子技术和现代控制技术,对谐波电流和无功电流进行连续动态补偿。现阶段,随着电力电子开关器件价格逐渐降低,有源电力滤波器已凭借响应速度快、补偿精度高等优势,在中低压电力系统中逐步取代无源滤波器,成为主流的谐波补偿方式。从研究的角度考虑,APF 传统研究主要集中于主回路拓扑结构研究与控制算法研究,现阶段国内外已有 APF 产品在各个场合应用的实例,其基本结构与控制方法基本成熟。随着电网与用户对 APF 性能要求逐渐提高,如何提高补偿效果、改善输出性能、提高恶劣环境下 APF 可靠性等问题逐渐成为有源电力滤波器的研究重点。

在此背景下,作者查阅国内外相关方面的文献,对该领域的研究现状和现有成果进行研究,对现有的有源电力滤波器的结构、控制方法进行分析、归纳和总结,得到各方法的优缺点及其适用条件。通过产学研结合的方式,围绕 LCL 型三电平有源电力滤波器的建模与参数设计,复杂环境下并网逆变器锁相算法和复合控制方法进行学术探索和科技攻关,旨在进一步总结研究成果,归纳梳理、承前启后;分析非理想环境下的电网特性,探索增强系统控制鲁棒性的解决方案,讨论有源电力滤波器的参数选取。

本专著分为七章,从 APF 主回路拓扑结构、检测与锁相技术、输出滤波器性能和有源滤波器控制四个关键性技术进行设计分析与探讨。书中主要研究了基于复数滤波器矩阵正交信号发生器的锁相环算法、基于状态反馈精确线性化的

复合变结构控制算法、LCL 滤波器阻尼与 APF 电流双闭环控制策略,以及基于多目标图解的逆变器主电路参数设计方法,解决了复杂环境下有源电力滤波器系统设计与控制问题,为提高滤波器性能提供了理论支持和实践方法。

最后,借此机会感谢在本书编写过程中对我们提供各种热心支持和帮助的机构和个人,使得我们能够顺利开展工作,取得今天的成果。感谢中国矿业大学王崇林教授,其指导、支持和学科视野对该课题顺利开展起到了重要作用;感谢东南大学林明耀教授和山东大学张庆范教授对本书进行了仔细的审阅,提出了许多宝贵的修改意见;感谢中国矿业大学谭国俊教授、唐轶教授、何凤有教授、邓先明教授对于本书编写和修改的鼎力支持和指导。特别需要感谢中国矿业大学、徐州润泽电气有限公司、合肥华威自动化有限公司等项目依托单位和主要参与单位及相关院所为项目团队所提供的良好工作平台和环境;感谢中国矿业大学电气安全与智能电气研究所的刘建华副教授、董新伟副教授、张栋梁副教授、马草原副教授、李晓波副教授、李国欣副教授、梁睿副教授对于项目的大力支持和诚挚合作;感谢所有研究团队成员对项目工作的积极贡献。此外,对本专著在出版过程中中国矿业大学出版社及其编辑们所付出的辛勤专业努力表示深深的谢意。

由于作者水平有限,疏漏与错误在所难免,敬请读者不吝指教。

作 者

2016 年 5 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 有源电力滤波器国内外研究现状	5
1.3 研究内容	16
2 基于复数滤波器矩阵正交信号发生器的锁相环算法	18
2.1 引言	18
2.2 非理想条件下电网电压分析	19
2.3 基于复数滤波器矩阵 OSG 模块解耦的 SRF-PLL 设计	21
2.4 PLL 系统设计与软启动设计	31
2.5 仿真分析	37
2.6 本章小结	42
3 有源电力滤波器复合变结构控制	43
3.1 引言	43
3.2 有源电力滤波器模型	44
3.3 电流内环状态精确反馈线性化	50
3.4 基于准滑模变结构控制器的 APF 电流控制	56
3.5 滑模变结构控制器性能分析与参数设计	61
3.6 直流电压控制	67
3.7 仿真分析	70
3.8 本章小结	76
4 LCL 滤波器阻尼与 APF 电流双闭环控制	77
4.1 引言	77
4.2 LCL 滤波器谐振原理分析	77
4.3 单状态变量反馈有源阻尼分析	79
4.4 APF 降阶状态反馈精确线性化	86

4.5	电流双闭环 APF 控制系统设计	90
4.6	仿真分析	93
4.7	本章小结	95
5	LCL 型 APF 主电路参数设计方法	96
5.1	引言	96
5.2	系统模型分析	96
5.3	直流母线电容计算	98
5.4	LCL 滤波器参数设计	100
5.5	仿真分析	113
5.6	本章小结	117
6	有源电力滤波器系统实验研究	118
6.1	有源电力滤波器系统结构	118
6.2	基于 CFM-OSG 锁相环实验分析	120
6.3	基于精确反馈线性化准滑模变结构控制 APF 实验分析	123
6.4	降阶状态反馈电流双闭环控制 APF 实验分析	126
6.5	本章小结	128
7	结论与展望	129
	参考文献	131

1 绪 论

1.1 研究背景

随着电力需求日益扩大,电网结构日趋复杂,各种各样的电能质量问题逐渐凸显出来。其中,谐波问题是最主要的问题之一。随着越来越多的工业与民用低功率因数、非线性、冲击性设备投入,低压供电系统谐波问题日益严重,亟待综合补偿与治理。

1.1.1 谐波产生与危害

谐波(harmonic),从电气角度而言,是指电压或电流中所含有的频率为基波整数倍的电量。谐波产生的原因主要是电力系统中存在非线性器件。根据所含非线性器件类型的不同,电网中谐波源可大致分为三类设备^[1]:

(1) 电力电子设备。电力电子设备产生谐波的主要原因是其重要组成元件为非线性半导体器件^[2-4]。随着入网电力电子设备日益增加,此类谐波设备构成了电网的主要谐波来源,如整流器、变频器、交流调压装置、晶闸管系统、开关电源等。其中,整流装置最为常见,且几乎全部为采用带电容滤波的二极管不控整流或晶闸管相控整流。二极管整流负载一般采用桥式结构,输出并联电容,属于电压型谐波源,所引起的谐波含量与电容值的大小有关;晶闸管系统采用相位控制方式,不仅含有整数倍次谐波,还含有部分非整数倍数的间谐波。除整流装置外,斩波电路和逆变器也在工业与民用电力设备得到广泛应用,而其输入直流电源大多来自整流装置,产生的谐波问题也不可忽视。

(2) 可饱和设备。可饱和设备通常为含有电磁能量转换的设备,由于其铁芯材料存在磁滞回线和磁化曲线非线性,其励磁部分为本质非线性。常见的可饱和设备包括电动机、发电机、变压器等^[5,6],当励磁饱和时,加载基波正弦电压,其励磁电流不仅包含基波成分,也包含大量谐波成分,且电流为对称函数。特殊情况下,对于三相对称的变压器设备,为了实现铁芯充分利用,工作点处磁化曲线接近饱和,使得其励磁电流出现奇次谐波成分。另外,变压器原副边接线方式决定了其谐波的成分与相位,而磁饱和程度与磁路结构则直接影响了谐波

电流幅值。

(3) 电弧炉设备及气体放电光源设备。电弧炉通过在电极与炉料间形成电弧产生热量,电弧阻抗不稳定,电流大小与变化不规律,谐波频谱较为复杂,以7次以下低次谐波和间谐波为主,同时伴有电压不平衡、波动与闪变等电能质量问题。气体电光源设备指金属卤化物灯、荧光灯、高压汞灯等,采用气体放电发光。气体放电伏安特性呈严重非线性,有的还含有负伏安特性,引起较大的奇次谐波电流。另外,此类设备需要串联电感性镇流器,其电感铁芯的非线性也会对系统谐波电流造成一定影响。

谐波对电力系统的危害较大,主要有以下几个方面的影响^[7] :

(1) 对电网的影响。谐波增大电网功率损耗,引起线路和设备过热,缩短设备寿命;三次谐波会导致较大中性线电流出现,增大配电变压器零线电流,威胁设备安全运行,且可能造成接地保护功能失常;引起变电站局部出现串联或并联谐振,产生较大幅值的电压电流,造成互感器等设备损坏;可能引起电网整体谐振,严重时造成供电中断、电网解裂等事故。

(2) 对电力变压器的影响。谐波电流增大变压器铜耗,容易引起局部过热、绕组附加发热等问题;谐波电压主要影响励磁电流,增大励磁电流谐波分量,引起磁滞及涡流损耗增加,增大变压器饱和度;谐波增大绝缘材料承受的电气应力与热量,可能引起绝缘损坏,造成局部放电;若 Δ 形绕组流入零序谐波电流,则产生环流,造成绕组温度升高,威胁变压器安全运行。

(3) 对电力电容器的影响。谐波电流流入电容器,增大了电流有效值,可能导致电容器过热降低使用寿命;电容器组谐波阻抗小,电压谐波不仅增大了电容器运行负荷,还可能会使峰值电压增加,引起电容器局部放电,造成不可逆损坏;当线路中存在感性负荷时,可能引起谐振,造成电容器组严重过负荷而损坏。

(4) 对输电线路的影响。由于集肤效应的存在,谐波电流增大电缆损耗,造成电缆发热与输电线路损耗增加;零序谐波电流引起中性线电流增加,中性点漂移,不利于系统运行。

(5) 对同步发电机的影响。附加谐波电流增大了同步发动机附加损耗,容易引起局部过热,影响绕组绝缘;引起输出电压中出现谐波分量,电机转子发生扭振,大大降低了电机工作寿命。

(6) 对继电保护及自动装置的影响。常用的感应型电能表和电子型电能表计量频率响应非线性变化,附加谐波会降低电气测量仪表计量的准确度;谐波电压或谐波电流较高时,可能对单个装置或故障判据造成影响,引起过电压保护、过电流保护误动作与拒动作。

(7) 对载波通信的影响。高次谐波通过电源耦合进入通信系统,产生噪声,引起数据传输失真,降低了通信的可靠性。

1.1.2 低压系统谐波要求

过量的谐波会对电力系统产生较大的危害,影响电网的正常稳定运行,降低供电的可靠性。因此,国际与国内均出台了相关标准,对注入公共电网谐波允许值进行限制。

国际电工委员会出台的欧洲标准《公用低压供电系统中低频传导干扰和信号的兼容性标准》(IEC 61000-2-2)^[8]、电气和电子工程师协会制定的美国标准 IEEE Std. 519—1992 标准^[9]与我国的国家标准《电能质量公用电网谐波》(GB/T 14549—1993)^[10]均给出了中低压配电网电压谐波限值。

考虑到电压畸变的主要原因是谐波电流流过线路阻抗及系统阻抗造成的谐波压降,因此国内外各标准对谐波电流的限制更为详细。欧洲的谐波电流标准主要有 IEC 61000-3-2 和 IEC 61000-3-6,两者对额定电流 16 A 上下的低压设备谐波电流进行了限定^[11,12],并根据系统短路比详细划分,其内容较多,在此不再详细描述。IEEE 标准 IEEE Std. 519—1992 在限制谐波电压的同时对电流也进行限制,其中标称电压 V_N 满足 $120\text{ V} < V_N \leq 69\text{ kV}$ 时奇次谐波电流限制如表 1-1 所列。表中 I_{sc} 表示公共连接点(PCC)的最大短路电流, I_L 表示公共连接点的 15~30 min 最大基频负荷电流, h 为谐波次数。该标准对偶次谐波电流的限值为对应奇次谐波电流限值的 25%。

表 1-1 IEEE Std. 519—1992 谐波电流限值

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 < h$	THD/%
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1 000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1\,000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

同样,《电能质量公用电网谐波》(GB/T 14549—1993)对各电压等级公共连接点允许注入的谐波电流有效值进行限定。其中,低压 380 V 电网各次谐波电流允许值如表 1-2 所列。

表 1-2

低压 380 V 电网各次谐波电流限值

谐波次数	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
电流限值/A	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
谐波次数	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
电流限值/A	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12

应用中需根据最小短路容量与基准短路容量($10 \text{ MV} \cdot \text{A}$)进行谐波有效值折算。

1.1.3 谐波治理方式

1.1.3.1 主动防御型谐波治理方法

主动防御型治理方法指对装置进行改造,采用新型拓扑结构或先进控制策略,减小非线性设备电流谐波含量,适用于电力电子装置谐波源。对于整流设备,常见的做法有增加整流器脉动数^[13]或采用多重化^[14]来实现谐波抑制。

增加脉动数可有效提高整流器特征谐波次数,减小电流的畸变率。增加整流器脉动数一般采用改变系统拓扑结构方法,利用接线方式不同的多输出变压器实现多路移相输出,将传统的 6 脉波变换为 12 或 24 脉波变流器。该方法谐波抑制能力有限,增加了多抽头整流变压器设备,提高了成本和系统复杂程度。

增加整流器脉动数适合中小功率系统,对于大功率场合,常采用多重化技术。目前主流的做法为级联多重化,如级联式高压变频^[15]等。该方法可实现多电平输出,谐波含量减小,输出波形更接近正弦,对电流型和电压型结构均适用。随着系统级联重数提高,输出谐波含量越小,但电路结构越复杂,成本也越高。

功率因数校正技术^[16](PFC)也能够实现网侧谐波电流抑制、功率因数提高的作用。通过附加功率器件与增加控制算法,该技术可有效降低网侧电流总畸变率,同时也伴随着成本的提高与系统复杂程度的增加。

1.1.3.2 被动补偿型谐波治理方法

被动补偿型谐波治理方法主要指安装滤波装置,利用滤波器为谐波电流提供通道,减小流入电网的谐波含量。从补偿方式角度划分,电力滤波器分为无源电力滤波器 and 有源电力滤波器两大类。

无源电力滤波器(passive power filter, PPF)的原理是为谐波电流提供低阻抗通路,实现谐波电流分流。凭借结构简单、运行维护方便、成本低等优势,长期以来无源滤波器被广泛用于各种场合,以实现谐波抑制和无功补偿的功能。工业上常用的无源电力滤波器为多调谐 LC 滤波器^[17],由多个单调谐 LC 滤波器并联而成。利用 LC 谐振原理,可针对负载谐波特征与含量设计滤波器参数,使

其谐振频率靠近谐波电流频率,从而实现指定次谐波滤除。另外,LC 滤波器中的滤波电容可向电网提供基波容性电流,在谐波抑制的同时实现无功功率补偿。

随着电能质量问题日益复杂和系统性能要求逐渐提高,无源滤波器的缺点逐渐显露:① 单调谐 LC 滤波器只针对特定次谐波,若谐波成分复杂,则需多个滤波器并联,装置体积增大,成本与损耗增加。② 滤波器参数误差与漂移会引起谐振频率偏移,且其滤波特性依赖于电网阻抗和电网频率等参数,当电网运行参数变化时,无源滤波器无法实现精确补偿,从而影响滤波效果。③ 电网负荷复杂多变,特定次谐波可能引起 LC 滤波器出现并联谐振或串联谐振,造成保护动作跳闸、设备损坏等事故。

有源电力滤波器(APF)属于新型电能质量治理装置^[18,19],其采用电力电子技术和现代控制技术,对谐波电流和无功电流进行连续动态补偿,响应速度快,补偿精度高。与无源滤波器被动补偿谐波不同,APF 自身输出谐波。其原理为运用谐波检测算法检测待补偿负载的谐波电流,控制电力电子变流器输出幅值相同,相位互差 180° 的补偿电流。从电网角度分析,负载谐波电流与 APF 谐波电流叠加,流入电网的谐波电流为 0。

相比于无源滤波器,有源滤波器具有以下优势:① 响应速度快,补偿精度高。② 对电网参数依赖程度低,补偿容量不受电网电压和频率影响。③ 不受电网中其他负载影响,不会发生谐振和过载。因此,有源电力滤波器逐步在电力系统中得到应用,成为研究的热点。

由于 IGBT 器件限制,目前工业上应用 APF 容量较小。在大功率场合,一般采用无源滤波器和有源滤波器混合补偿的方式。利用无源部分补偿特定次谐波或高次谐波,而 APF 主要针对低次谐波进行补偿,实现成本最优目标。

1.2 有源电力滤波器国内外研究现状

从研究的角度考虑,关于有源电力滤波器传统研究主要集中于主回路拓扑结构研究与控制算法研究。随着电网与用户对 APF 性能要求逐渐提高,如何提高补偿效果、改善输出性能、提高恶劣环境下 APF 可靠性等问题逐渐成为有源电力滤波器新的研究方向。下面对 APF 主回路拓扑结构、检测与锁相技术、输出滤波器性能和有源滤波器控制四个关键性技术进行分析与探讨。

1.2.1 有源电力滤波器分类及拓扑

1.2.1.1 有源电力滤波器分类

自从有源电力滤波器被提出以来,已根据谐波源补偿需求不同发展出了多

种拓扑结构。根据不同的角度和拓扑结构,可以有多种分类方法。根据 APF 电路与谐波负载的连接方式分类,是目前最常用的分类方法。按照该种分类方式,APF 可分为串联有源电力滤波器、并联有源电力滤波器和统一电能质量控制器,其具体划分如图 1-1 所示。

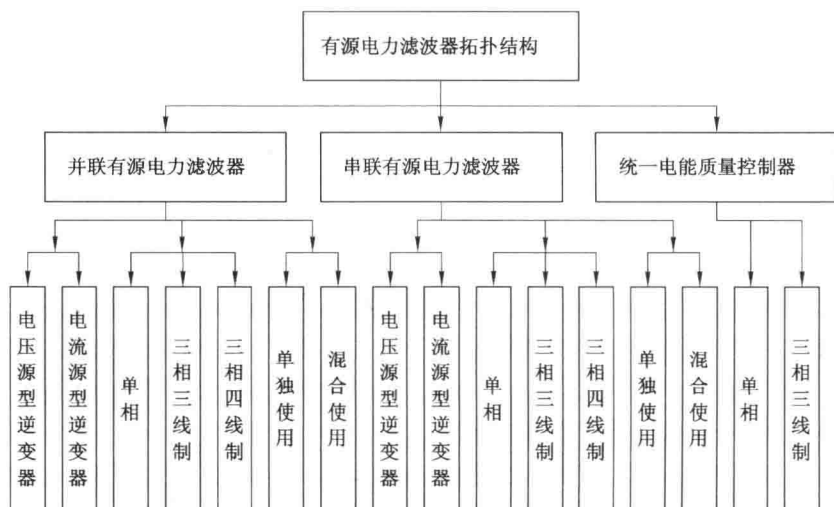


图 1-1 APF 的分类

三种有源电力滤波器的结构如图 1-2 所示。

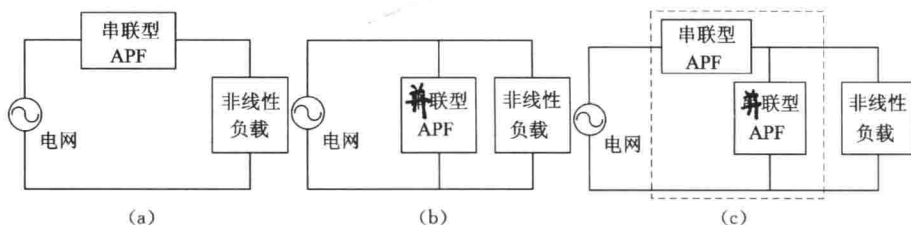


图 1-2 三种有源电力滤波器结构

(a) 串联型 APF; (b) 并联型 APF; (c) 统一电能质量控制器

在有源电力滤波器三种基本拓扑里,其中并联型 APF^[20-22]是目前技术最成熟、应用最广泛的形式,通过在负载的公共连接点处与负载并联,产生与负载电流等幅反向的补偿电流实现谐波治理,可以等效为一个受控谐波电流源。

并联型 APF 可以分成电流源型逆变器拓扑和电压源型逆变器拓扑。对于电流源型逆变器结构,直流侧电抗损耗较大,且需要串联二极管增加反相阻断电

压,以提高开关器件的耐压等级。另外,电流源型逆变器结构难以采用多电平或多级级联模块实现,其谐波补偿性能提高与容量扩展较为困难,因而此类 APF 应用较少,仅在特殊场合使用。而与之对应的电压源型逆变器结构是目前主流的 APF 拓扑结构。该种 APF 结构简单,成本较低,可以同时输出谐波电流与基波无功电流;电压等级与容量扩展简单,可以采用多电平、多级级联或降压变压器等方式提高系统耐压等级和补偿容量。基于以上优势,目前工业现场投运的 APF 几乎全是电压源型有源电力滤波器结构。并联型 APF 等效于受控电流源,它的接入方式决定了其具备对系统影响小、投切灵活方便、容量便于扩展等优点,因而获得较为广泛的应用。

与并联 APF 对偶,串联 APF^[23-25]等效于一个受控电压源,通过耦合变压器串联在电网和负载之间,并针对电压型谐波进行治理。运行过程中,串联 APF 通过输出谐波补偿电压,减小负荷端电压波动与闪变。同时,该结构也能补偿三相不平衡电压,适用于电压敏感型负载。其缺点在于串联型 APF 中流过电流包含负载基波电流,器件耐流要求高,开关损耗大;且串联型 APF 的投切、保护及增容改造也较为复杂,一般情况下很少单独使用。

20 世纪 90 年代,H. Akagi 等学者首次提出了统一电能质量调节器^[26-28](UPQC)的结构,其本质为串联型与并联型 APF 结构组合。UPQC 中的并联型 APF 与负载并联,主要对负载电流进行补偿,起到治理谐波及无功电流、补偿不对称电流的功能;而其中的串联型 APF 通过耦合变压器串接在主电路中,仅对负载端电压进行调节,所需容量较小,起到谐波隔离、电压闪变与不平衡治理的作用。串/并联 APF 均采用电压型逆变器结构,为节省容量,可以共用直流电容器,采用背靠背结构。统一电能质量调节器结合了串联型 APF 与并联型 APF 的优点,具有动态响应时间短、调节范围宽、补偿精度高、输入/输出波形畸变小、效率高等优势。但是,其结构与控制复杂程度远大于单独的串、并联 APF,实际应用较少。

另外,对于每一类 APF,根据补偿电网结构划分,有单相、三相三线制^[29]与三相四线制^[30] APF;根据变流器输出电平划分,有两电平 APF 与三电平 APF。

1.2.1.2 三电平 APF 拓扑

对于并联有源电力滤波器,两电平电路结构简单,但由于仅存在两个电平的切换,输出电流纹波较大;三电平结构^[31-33]复杂,但单管所需承受电压低,输出纹波小,在开关频率不变的情况下,可有效提高有源电力滤波器的等效开关频率。

根据功率器件主电路拓扑结构,常见的三电平逆变器可分为三类:二极管钳位型、飞跨电容型与 H 全桥型。

1. 二极管钳位型三电平逆变器^[34,35]

二极管钳位型三电平逆变结构直流侧由两组电容串联而成,每组电容分压约为直流电压的一半,以直流侧中点为基准实现了三个电平的输出。该种结构形式最接近两电平三相桥式电路,仅需一个公共直流母线,系统控制简单,其拓扑结构如图 1-3 所示。但该结构引入了两电平中未出现的问题:① 一个开关周期内上下两个直流电容电流不相等,引起中点电位偏移,出现直流电容电压不平衡;② 由于二极管钳位作用,桥臂中间的两个 IGBT 开通时间大于两端的 IGBT,器件损耗分布不均;③ 额外增加较多钳位二极管,增加了系统成本和损耗。

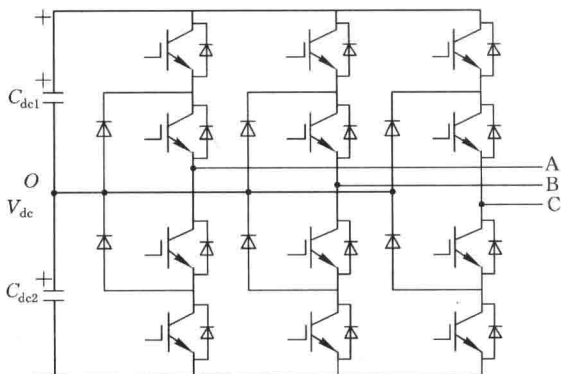


图 1-3 二极管钳位型三电平逆变器

2. 飞跨电容型三电平逆变器^[36,37]

飞跨电容型三电平逆变器结构与二极管钳位型三电平逆变器类似,如图 1-4 所示,采用了悬浮电容取代钳位二极管。其工作原理也与二极管钳位型三电平逆变器相似,不同的是其悬浮电容的引入增加了电压的组合方式选择,提高了控制灵活程度。另一方面,悬浮电容对直流中点平衡问题也可以起到改善作用。该种结构引入了较多电容,系统的体积与成本增加,且电容电压平衡需要更为复杂的算法。此外,系统启动时需对悬浮电容进行预充电,增加了系统的复杂程度。

3. H 全桥型三电平逆变器^[38]

H 全桥结构是大功率领域应用较多的一种拓扑结构,同样在小功率场合也得到了广泛应用,其结构如图 1-5 所示。由于不额外增加钳位二极管和悬浮电容,该方案所需功率器件较少,无电压均衡问题,控制也相对简单。由于其结构的特殊性,在不改变拓扑结构的前提下,仅修改算法即可实现三相三线补偿与三相四线补偿,通用性强,便于模块化实现。另外,采用两个或者多个单相全桥电路级联,可以实现级联多电平调制^[39]。对于 APF,仅需在直流电容电压控制中加入三相平衡策略即可,控制简单,便于实现。

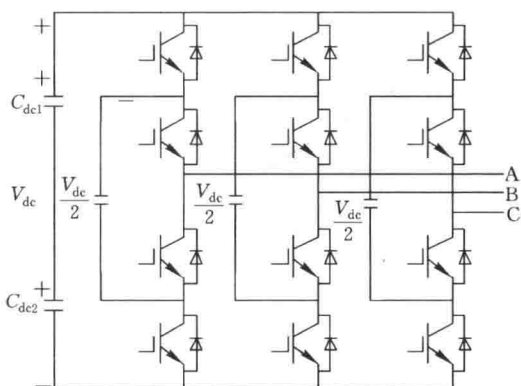


图 1-4 飞跨电容型三电平逆变器

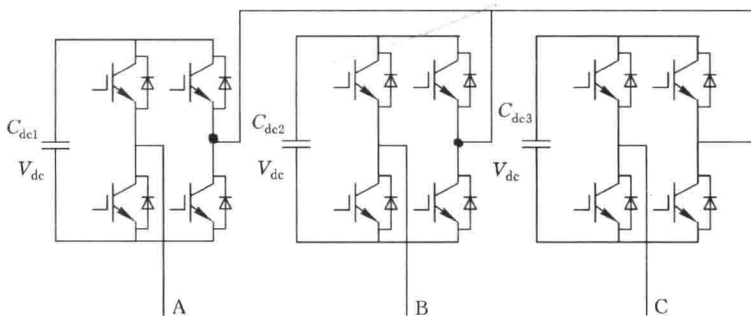


图 1-5 H 全桥型三电平逆变器

1.2.2 并网逆变器锁相算法研究

锁相环(phase-locked loop, PLL)指锁定相位的环路,是一种典型的反馈控制电路,利用外部输入参考信号对环路内部振荡信号的频率和相位进行控制,实现输出信号频率对输入信号频率的跟踪。对于并网逆变器,锁相环的基本功能是获取电网电压的相位信息,实现系统同步。由于锁相环输出作为基准相角参与运算,故其动态响应速度与锁相精度对 APF 电流控制影响很大。尤其是在三相低压电网中,通常存在电压不平衡和畸变的非理想情况,对锁相环性能要求提出了更高的标准。

常见的锁相环分为开环和闭环两类。开环 PLL 主要有过零鉴相 PLL^[40,41]、基于卡尔曼(Kalman)滤波器的 PLL^[42,43]、基于 DFT 的 PLL^[44,45]等。

传统的闭环 PLL 比较输入信号与 PLL 输出的相位差,通过闭环调节该差值为零来完成信号的同步。闭环 PLL 由三部分组成^[46]:鉴相器(phase detector, PD),环路滤波器(loop filter, LF)和压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO),如图 1-6 所示。

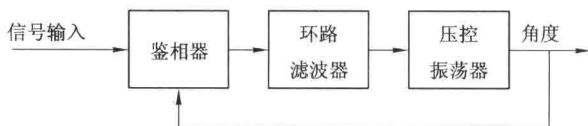


图 1-6 PLL 结构

图 1-6 中鉴相器对输入信号与输出信号之间相位差进行计算鉴别,输出误差信号;环路滤波器通常为低通滤波器,滤除其中的噪声和干扰信号,得到控制信号;压控振荡器等效于一个积分环节,对控制信号积分使其振荡频率逐渐逼近输入信号的频率,当二者偏差为 0 时,PLL 进入稳定状态,实现输入信号跟踪。

常见的锁相算法有以下几种:

(1) 过零鉴相锁相环

过零锁相自提出以来被广泛应用。其原理是设置零点比较器,将正弦信号转化为矩形波信号,再根据两次过零点时间差得到信号的周期,从而可以计算得到信号在任意时刻的相位。该方法易于硬件实现,计算量小,但其精度取决于过零比较器的响应速度,对硬件要求较高。当电网电压出现畸变,过零点处的相位与基波分量的相位并不完全一致,锁相存在误差。

(2) 乘法鉴相器锁相环^[47]

乘法鉴相是利用正弦信号的正交性,获得基波频率信号。对于正弦信号的输入,期望输出为正交信号,将输入、输出信号的乘积作为相位误差送入锁相环,经环路滤波与 VCO,最终得到与输入同频的正交信号。频率跟踪过程中,乘法鉴相器输出存在 2 倍频波动,为了抑制波动,LF 环节截止频率较低,影响系统响应速度。

(3) 基于陷波器的锁相环^[48,49]

为解决电网电压畸变情况下基波电压锁相问题,有学者提出了基于陷波器(notch filter, NF)的锁相环。将陷波器频率设置为基波频率,滤除输入信号中的基波分量,再用原始信号减去陷波后信号实现基波分量的提取。但是由于陷波器的陷波频率固定,当电网电压频率变化时,陷波器的滤波效果会受到影响。

(4) 基于同步参考坐标系的锁相环^[50,51]

基于同步参考坐标系的锁相环(synchronous reference frame phase-locked