

一种新型混合有源电力滤波器的研究

Research on Novel Hybrid Active Power Filter

陶骏 中国科学院等离子体物理研究所 (合肥 230031)

Tao Jun Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (230031)

摘要:本文提出了一种新型的混合滤波拓扑,其有源部分的安装容量相对目前常见的电路有很大程度的降低,理论分析与仿真验证证明了该电路不仅能改善系统波形,而且能抑制无源滤波器与电网之间的谐振。同时,本文中有源滤波器的控制采用了电压空间矢量的方法,它具有很高的直流电压利用率,便于微机实现及减小开关损耗。

叙词:混合滤波器 滤波特性 空间矢量

Abstract: A novel topology of hybrid power filter is introduced in this paper. With such filter, not only the system waveform could be improved, but also the resonance between passive filter and power net could be suppressed. The voltage space vector Modulation is applied in the control of active filter, so the utilization ratio of DC voltage could be high and the switching loss could be reduced evidently.

Keywords: hybrid power filter filtering characteristics space vector

[中图分类号] TM71 [文献标识码] A 文章编号:1561-0349(2007)07-0022-04

1 引言

有源滤波器(APF)是一种动态抑制谐波、补偿无功的新型电力电子装置,它能克服传统的无源滤波装置的不足。与无源滤波器相比,APF 具有高度的可控性和快速响应性。尽管 APF 具有无源滤波器无可比拟的巨大优势,但由于成本原因,目前在电力系统中还不可能完全替代无源滤波装置。一种可能的措施是采用有源滤波与无源滤波相结合的技术,构成混合型滤波系统^[1,2]。滤波与无功补偿主要由无源滤波器承担,用有源滤波器进一步改善滤波与补偿的性能,并抑制串、并联谐振,由此,其安装容量不大,也容易实现。

在无源滤波器的基础上引入有源滤波器,可改变电路的阻抗频率特性,从而改变系统的滤波效果。有源滤波器是由全控型开关器件构成的变流装置,可视为受系统的谐波电流或谐波电压控制的线性受控源。在不同的控制系数与电路结构下,混合滤波器体现出不同的阻抗特性。

本文提出了一种新型的混合滤波拓扑,其有源部分的安装

容量相对目前常见的电路有很大程度的降低,并采用电压空间矢量的方法对其控制,理论分析及仿真均表明了该滤波器具有良好的性能。

2 混合滤波装置的拓扑结构

近年来,如何减少混合滤波器中有源装置的安装容量成为研究热点,这需要从降低有源滤波器承担的基波电压与基波电流两个方面来考虑。Tokuda 等人提出了串联 LC 电路的 APF 注入结构,可大大降低其容量^[3],Fujita 等人提出的混合型滤波电路可大大降低有源装置承担的基波电压^[4]。

本文提出混合型有源电力滤波器的电路拓扑如图 1 所示,它可进一步降低有源装置的安装容量,其中有源滤波器的输出电压为:

$$V_{APF} = Ki_{sh} \quad (1)$$

式中, K 为控制系数, i_{sh} 为电网的谐波电流。

在 Fujita 提出的混合滤波电路^[4]中,流过无源滤波器的基波电流将全部注入有源装置,尽管此时有源滤波器不承受基波

电压,但其容量仍然较大。若将有源滤波器与无源滤波器的电感部分并联,通过无源滤波器的电流只有一部分通过有源滤波器,则进一步减小了有源滤波器的容量。在图1所示电路中,若有源滤波器的进线电感与滤波电感取值相同,流入有源滤波器的基波电流仅为无源支路的一半。同时,有源装置仅承担很小的基波电压。

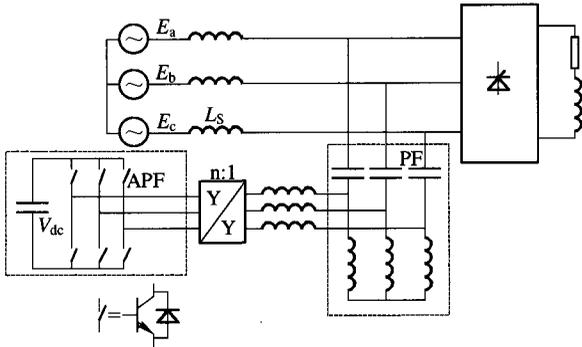


图1 新型混合型有源滤波器拓扑

3 滤波特性

图2为这种结构的有源滤波器的单相谐波等效电路。由图2可得:

$$\begin{cases} V_{sh} = Z_s I_{sh} + Z_1 I_{Fh} + Z_2 I_{Lh} + V_1 \\ I_{sh} = I_{Fh} + I_{Lh} \\ V_1 = -Z_1 I_{Lh} + Z_2 (I_{Fh} - I_{Lh}) \\ V_{APF} = K I_{sh} \end{cases} \quad (2)$$

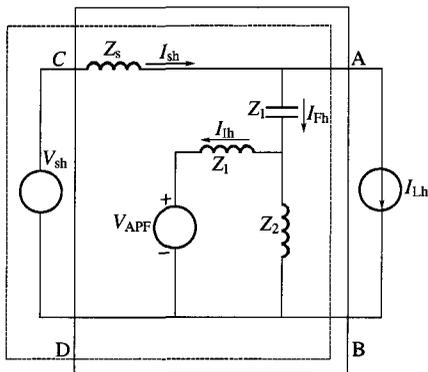


图2 单相等效电路

由式(2):

$$I_{sh} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2(K + Z_1) + (Z_1 + Z_2)(Z_s + Z_1)} \left[\left(Z_1 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) I_{Lh} + V_{sh} \right] \quad (3)$$

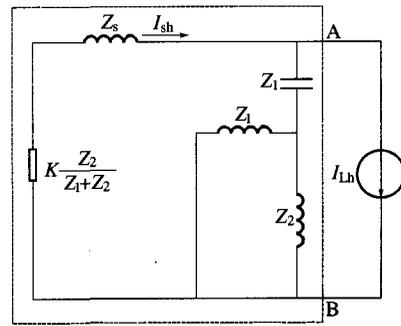
由式(3)得到系统的谐波电流传递函数及谐波导纳传递函数:

$$H_1(s) = \frac{I_{sh}}{I_{Lh}} \Big|_{V_{sh}=0} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2(K + Z_1) + (Z_1 + Z_2)(Z_s + Z_1)} \left(Z_1 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \quad (4)$$

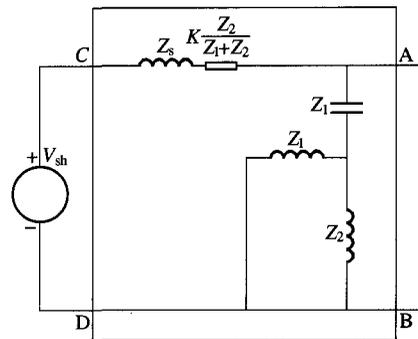
$$Y(s) = \frac{I_{sh}}{V_{sh}} \Big|_{I_{Lh}=0} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2(K + Z_1) + (Z_1 + Z_2)(Z_s + Z_1)} \quad (5)$$

由上式可见,当K趋于无穷大时,电网的谐波电流趋于零,并且能抑制负载与电网可能发生的谐振。

由(3)式,图2可分解成对Ish及Vsh的等效电路,如图3所示。



(a)对Ish的等效电路



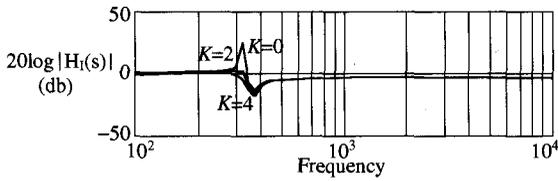
(b)对Vsh的等效电路

图3 图2所示电路的分解

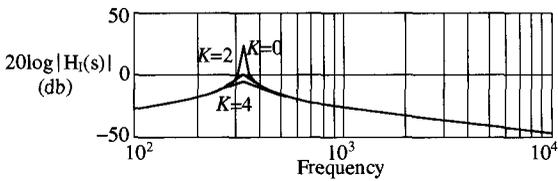
同样,由图3可见,引入有源滤波器后,改变了无源滤波器的阻抗特性,对谐波而言,等效的在电网侧增加了一个电阻,这样无论是负载的谐波电流源,还是电网的谐波电压源产生的谐波均得到了抑制,同时也避免了电网与滤波器之间的谐振。

图4给出了某一5次滤波器与有源滤波器构成的混合滤波系统,在不同的K值下的系统的谐波电流传递函数H1(s)、谐波导纳传递函数Y(s)的幅-频特性。图中无源滤波支路的电容为66.7μF,电感为6.0mH。由图4(a)可见,增大K值时,滤波效果得到改善。同时,系统出现了一个的并联谐振点,谐振点上,谐波电流的放大倍数随K的增加得到了抑制。K>2时,传递函数的幅度被抑制到约0dB。由于无源滤波器与电网构成的串联回路对某些频率的谐波呈现极低阻抗的特性,若系统呈现这些次

数的谐波电压时,有可能在电网中引起谐波电流放大,由图 4(b)可见,随着 K 的增加,对串联谐振点附近的谐波电流放大的抑制作用显著。



(a) 谐波电流传递函数的幅-频特性



(b) 谐波电压传递函数的幅-频特性

图 4 混合滤波系统特性

由前分析,引起混合滤波后,特别是随着 K 的增大,滤波效果得到全面的改善,电网与无源滤波器的串联、并联谐振均得到抑制。

4 有源滤波器的控制

在本文提出的混合滤波装置的控制中涉及了三个方面的内容:谐波电流的检测、有源滤波器的电压跟踪技术及直流侧电压恒定的控制。

4.1 谐波电流的检测

本文中采用基于综合矢量的检测方法,直接根据电网的电流及电压的瞬时值获得谐波电流,它具有算法简单、适用性广的特点^[5]。

4.2 电压跟踪技术

目前对有源滤波器的 PWM 控制主要有正弦波对三角波调制、特定消除谐波的 PWM 技术、滞环控制、定时比较。这些方法各有一定的不足之处。如正弦波对三角波调制不易微机实现,特定消除谐波的 PWM 技术算法复杂,滞环控制方法的开关频率不定,定时比较方法的精度不高。

本文中将电压空间矢量^[6]控制的方法引入有源滤波器。这种方法具有更高的直流侧电压利用率,因此对减少有源滤波器的安装容量有利。在电压型逆变器构成的有源滤波器中,由于上下桥臂的开关信号互补,其输出共对应于 8 个空间矢量,其中 6 个为有效矢量、2 个零矢量。如图 5 所示。若每相上桥臂导通计为 1,下桥臂导通计为 0,则开关管的导通状态与空间矢量对应的关系如表 1 所示。

表 1 空间矢量与开关状态对应关系

开关状态	000	100	110	010	011	001	101	111
空间矢量	V_0	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7

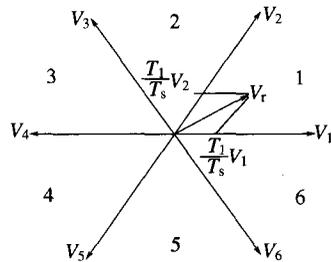


图 5 电压空间矢量示意图

有源滤波器跟踪的三相电压为 (U_a, U_b, U_c) ,其构成的空间矢量必然落在图 5 中的某一扇区,可以用两个有效矢量与一个零矢量去等效。根据被跟踪的三相电压瞬时值的大小关系可唯一确定其空间矢量所在的扇区。

设被跟踪的电压 V_r 空间矢量位于扇区 1 内,则:

$$V_r = \frac{T_1}{T_s} V_1 + \frac{T_2}{T_s} V_2 + \frac{T_0}{T_s} V_x \quad (V_x = V_0 \text{ 或 } V_7 \quad T_0 = T_s - T_1 - T_2)$$

上式中, T_1, T_2, T_0 分别为在一个控制周期 T_s 中矢量 V_1, V_2 及零矢量 V_x 的作用时间,它们可根据 V - s 平衡关系得到。由图 1,在 T_1 时间内,直流电压 V_{dc} 加在有源滤波器的 A、B 相,在 T_2 时间内, V_{dc} 加在 B、C 相,有:

$$T_1 V_{dc} = (U_a - U_b) T_s \quad T_2 V_{dc} = (U_b - U_c) T_s$$

在一个开关周期中各矢量作用的顺序有多种组合,考虑到最大限度地减少开关损耗,可采用两种作用顺序。仍然设空间矢量位于扇区 1 内, $(V_0) \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_7$ 或 $(V_7) \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_0$ 的两种作用顺序的效果是等效的,并且在一个开关周期中,所有的开关只需动作 3 次,开关损耗得到了最大程度的降低。

4.3 有源滤波器直流侧电压的控制

为了保证有源滤波器的补偿效果,逆变器直流侧电容的电压保持恒定是关键,这样,在 PWM 脉冲控制下,各功率管的导通与关断,才能使其输出很好地跟踪参考波形。

有源滤波器运行时存在损耗,如功率管的导通电阻损耗,回路的电阻损耗,开关损耗。因此,它必须吸收一定的有功功率,补偿这些损耗,以维持其直流侧电压。同时,有源滤波器的交、直流侧的能量交换,引起的电容电压波动也可以通过它吸收或发出有功功率得以消除。此外,当有源滤波器启动时,直流侧的电压建起,也必须通过它吸收有功功率得以实现。

在本文提出的混合滤波器中,无源滤波器对基波呈容性,其电流超前供电点电压 90° ,有源滤波器输出与该电流同相位的电压,可使其直流侧电压上升;输出与之反相位的电压,可使直流电压下降。控制上,通过检测电容端的电压,与给定电压比较,再经

过 PI 调节,将结果与一超前电压的指令信号相乘,并与补偿电压指令叠加,获得三相补偿给定信号。控制框图如图 6 所示。

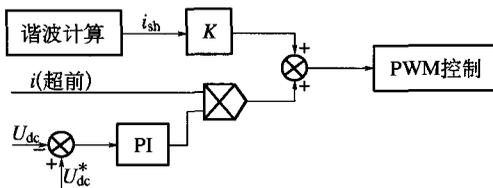
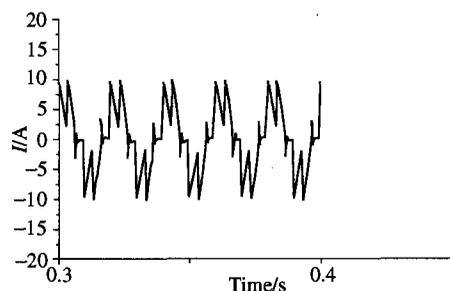


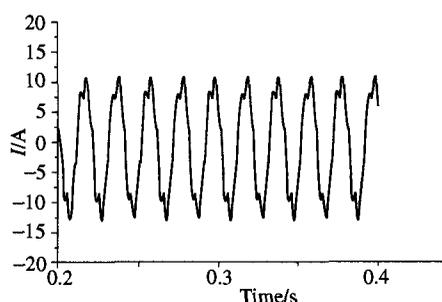
图 6 直流侧电压控制框图

5 仿真研究

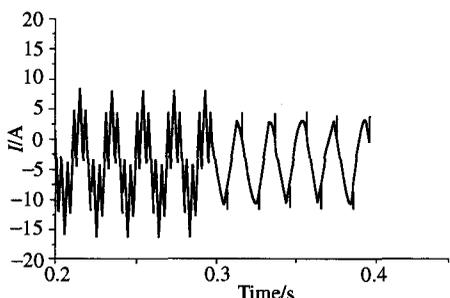
采用 EMTP 程序对本文提出的混合型有源滤波器及其控制



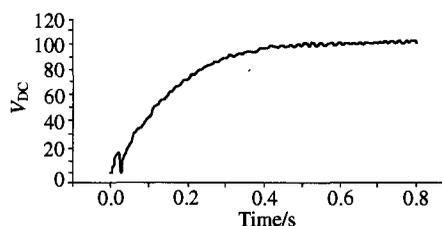
(a) 滤波前的电网电流



(b) 投入滤波器后的电网电流



(c) 有源滤波对谐振的抑制



(d) 有源滤波器直流侧电压的建起与维持

图 7

6 结语

本文提出了一种新型的混合滤波电路,它与传统的混合滤波电路相比,有源滤波器承担的基波电压与流入的基波电流都得到减小,其安装容量得到进一步降低。理论分析与仿真结果表明,该滤波电路具有良好的滤波特性,并且能抑制无源滤波器与电网可能发生的谐振。同时,采用电压空间矢量的方法对有源滤波器控制,一方面可以提高直流侧电压的利用率;另一方面这种方法利于微机实现,只需根据跟踪对象的瞬时值,即可获得各作用的空间矢量及作用时间;此外,该方法还可以实现最小开关损耗运行。

策略进行仿真。

非线性负载为一晶闸管相控整流系统,图 7(a)为投入负载时,网侧电流波形,图 7(b)为投入无源及有源滤波器后的网侧电流,其中有源滤波器在 0.3 秒投入,由图可见,投入滤波装置,特别是投入有源滤波器后对波形有很大的改善作用。

在某种参数配合下,投入无源滤波器后,系统出现谐振现象,当投入有源滤波后,能抑制谐振。图 7(c)给出了这种情况下的仿真结果,有源滤波器在 0.3 秒投入,系统谐振得到抑制,电流波形也得到了很大改善。

图 7(d)给出了有源滤波器直流侧电压的自建起及维持过程(给定值设置为 110V)。

参考文献

- [1] Akagi H. Trends in active power line conditioners. IEEE ON PD, 1994, 9(3): 263—268.
- [2] Rastogi, Mohan N. Hybrid-active filtering of harmonic currents in power systems. IEEE ON PD, 1995, 10(4): 1994—2000.
- [3] Noriaki Tokuda, Yoshiya Ogihara. Active Filter with series LC circuit. Proceeding of IEEE ICHPS, VI, Bologna, 1994.
- [4] H. Fujita, H. Akagia. A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters. IEEE Trans ON IA, 1990, 27(4): 1020—1025.

(下转第 36 页)

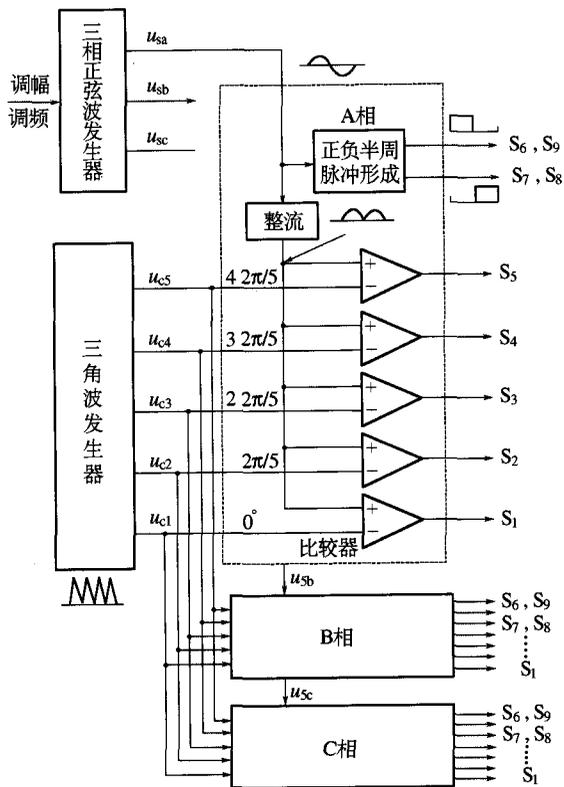


图7 图6所示变频器主电路的控制电路原理示意图

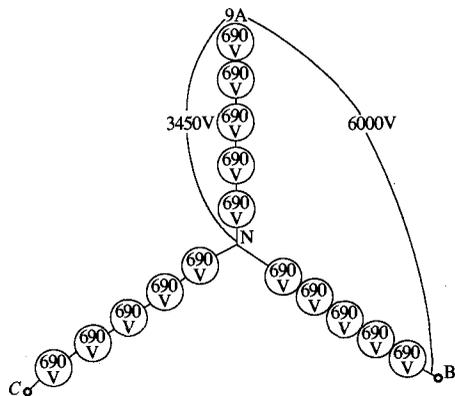


图8 逆变器直流电源的层叠式结构示意图

5 结语

在完美无谐波变频器中,用新型层叠式多电平逆变器取代2H桥级联式多电平逆变器,在不改变变频器技术指标的情况下,可以大大减少开关管的数目,从原来的60只开关管,减少到只用27只开关管就可以了。并且还可以使逆变开关管工作在ZVS状态,降低了成本,减少了开关损耗。但这种改进也存在一个明显的缺点,即其电路结构具有两电平逆变器的特点,因此不便于高压大功率应用。但由于高压大功率IGBT的研制成功,例

(上接第25页)

- [5] 陶骏,刘正之. 谐波及无功电流检测方法的研究. 电力系统自动化,2001,25(1):31-33.
- [6] 詹长江,刘平等. 基于空间矢量SPWM控制的高频整流器. 电力电子技术,1997(2):57-59.

(上接第31页)

作者简介

徐殿国,教授,博士生导师。研究方向为电力电子技术及应

如 EUPEC 公司生产的 IGBT 已经达到了 6500V/2500A。因此用现有的 IGBT 生产出 3000V 和 6000V 的改进型变频器是不存在问题的。

参考文献

- [1] 刘凤君. 完美无谐波高压 IGBT 变频器. 电源技术应用,2001年. 第9期.
- [2] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用. 北京:机械工业出版社,2006年.
- [3] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用. 北京:机械工业出版社,2007年.
- [4] 刘凤君. 逆变器整流电源. 北京:机械工业出版社,2004年.

作者简介

刘凤君,研究员,从事电力电子技术研究40多年,著书10种,发表论文300余篇。

收稿日期:2007-03-15

定稿日期:2007-06-29

作者简介

陶骏,男,1971年生,博士,副研究员,主要从事电网的无功补偿及谐波抑制研究。

收稿日期:2007-03-02

定稿日期:2007-06-21

用,照明电子技术,电力传动自动化系统,信息网络家电及其智能控制技术,电网品质控制技术,交流伺服电机系统等。

收稿日期:2006-08-11

定稿日期:2007-06-20