

模块化 PWM 主电路实现的大容量有源电力滤波器

卓 放, 周 新, 李 可, 雷万均, 王兆安

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049)

摘要: 有源电力滤波器在抑制电网谐波、提高电能质量方面有良好的应用前景。提高有源电力滤波器的装置容量是应用中有待解决的关键技术问题之一。文中在综合国内外目前实现大容量有源电力滤波器方法的基础上, 介绍了一种采用多个模块化 PWM 主电路单元组合实现的大容量并联型有源电力滤波器, 给出了该有源电力滤波器的主电路结构拓扑, 分析了系统的工作原理及控制方法, 并对在实现该装置时所遇到的问题进行了讨论。工业现场实验结果表明, 采用该方法实现的有源电力滤波器有着良好的补偿特性, 有效地解决了有源电力滤波器在大容量时器件与装置容量之间的矛盾。

关键词: 谐波; 有源电力滤波器; 模块化

中图分类号: TN713.8; TM761

0 引言

大容量的工业装置产生的谐波对电网危害很大, 尤其是对一些负载变化剧烈、电网扰动较大的场合, 必须给予足够的重视^[1]。有源电力滤波器(APF)以其良好的动态响应速度和补偿特性, 被用于补偿电力系统或大容量工业装置中的谐波与无功是许多研究者所关心的问题之一^[2]。在国外, 使用有源电力滤波器对大功率负载和电网进行谐波抑制和无功补偿近年来迅猛增加^[1,2], 这也是今后的一个发展方向。

由于大功率负载的功率较大, 在使用有源电力滤波器进行谐波抑制和无功补偿时, 相应地要求有源电力滤波器要具有一定的容量。如何实现大功率有源电力滤波器的方法已取得了不少的研究成果^[3~5]。对于大容量的电力电子装置, 如果简单采用普通电路的主电路拓扑, 就要求所使用的电力电子器件在容量方面具有比较高的要求。众所周知, 电力电子器件随着容量的增大其所容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。

为解决大容量有源电力滤波器所使用的开关器件在容量和开关速度之间的矛盾, 有以下几种常用的主要方案可供选择: ①采用容量小但开关速度相对较快的器件进行串并联以达到容量和开关速度要

求; ②采用多个独立的小容量有源电力滤波器并联使用; ③寻找新的主电路拓扑, 如主电路采用多电平级联方案, 采用多重化的主电路实现大容量的有源电力滤波器。

1 大容量有源电力滤波器的实现方案

1.1 采用多个开关器件串并联

这往往是对较大容量的电力电子装置在单个电力电子器件的电压或电流定额不能满足要求时通常采用的一种方案, 尤其是在一些二极管电路和晶闸管电路的使用中。采用该方案的优点在于主电路的基本拓扑不发生变化, 系统的控制方法也不用改变。但这种方案存在着器件的均压均流问题, 这也是使用该方法的一个关键技术。也正是由于这一原因, 在大容量有源电力滤波器的研究中, 采用这种方法来实现的方案不多见。

1.2 采用多个小容量有源电力滤波器并联

这是目前在一些工业现场中经常采取的一种方案, 尤其是对一些具有电流源性质的设备。从并联型有源电力滤波器的工作补偿原理可知, 其具有典型的电流源性质。这种方案的补偿控制原理参见图 1。在这种连接补偿方式下, 为了协调各个 APF 之间的工作情况和平衡各自的功率输出, 每个 APF 上要加一并联工作板, 主要是用于反映自身的工作情况(如是否处于工作状态), 以及传递负载电流信号和协调各自的输出功率。很明显, 这种连接补偿方式下的各 APF 的控制和补偿是自身来完成的, 每个 APF 有自己的主电路和控制电路。这种方式的优点在于各个 APF 具有相对独立性, 当其中的某一个 APF 出现问题时, 并不影响其他 APF 的工作。不足之处主

要在于各 APF 之间缺乏协调控制,并且控制电路的数量相对较多。

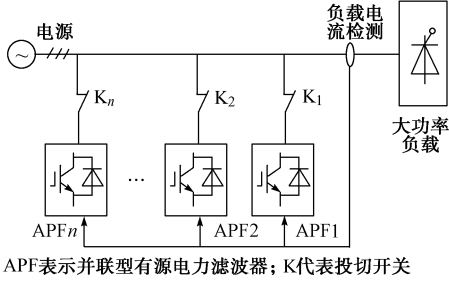


图 1 多个有源电力滤波器为对同一大功率负载进行谐波补偿时的连线示意图

Fig. 1 Connection diagram of a large volume non-linear load compensated by multi-APF

1.3 采用多重化主电路

近年来,为抑制大功率负载谐波源所产生的谐波,已研究出多种多重化的主电路拓扑,比较有代表意义的是 Peng 等人在 1995 年提出的由带有独立电压源的单相桥式逆变器组合而成的新型有源电力滤波器拓扑,并陆续发表了多篇该方面的研究论文^[3]。

在上述 3 种方案中,采用多重主电路是最为合理、有效的方案,各国的研究工作者都非常重视。与小容量开关器件串并联的方案相比,多重化的主电路在满足容量要求的同时,控制电路也可以只用一套,在经济上也比较合理。另外,采用多重化主电路还可以通过控制上采取措施,提高整个装置的等效开关频率,使系统最后得到的开关频率数倍于电力电子器件自身所允许的开关频率,以取得良好的补偿特性。

基于上述设想,我们设计制作了采用模块化 PWM 主电路结构组成的有源电力滤波器装置,每个 PWM 变流器模块设计容量 30 kVA,使整个有源电力滤波器装置的谐波补偿容量达到 120 kVA;在控制电路中,采用了基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法^[4],以获得良好的动态响应性能。另外,4 组变流器在做电流跟踪控制时,每组变流器开关时刻的控制不再相互独立,而是统一进行协调,使每组变流器的开通时刻彼此在相位上错开一定的角度,增加系统最后输出的等效开关频率,以改善补偿效果。

2 采用模块化 PWM 主电路实现的大容量并联型有源电力滤波器

结合国内外目前大功率有源电力滤波器发展的基本情况,设计、采用了一种不带变压器的 4 重模块化 PWM 变流器为主电路的有源电力滤波器,电路可直接接入工业电网,以减小设备投资。有源电力滤

波器的主电路原理示意图如图 2 所示。其中主电路由 4 个 PWM 变流器模块并联组成。4 个 PWM 变流器模块的直流侧并联在一起,公用一组直流电容器。每个模块的交流侧通过进线电抗与负载谐波源并联。工作时,各组 PWM 变流器根据控制电路计算的谐波指令电流,通过各自的电流跟踪环节控制,产生谐波补偿电流,这些谐波电流相加后以抵消谐波源负载电流中的谐波成分,使流入电源侧的电源电流为不含谐波的正弦基波电流^[4]。

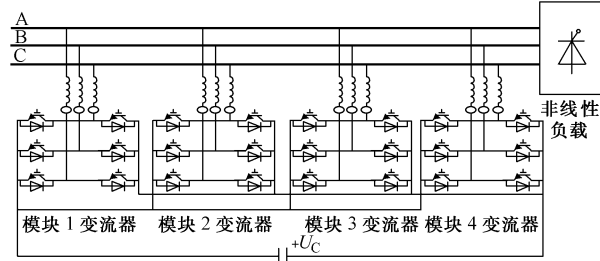


图 2 4 重化 PWM 变流器主电路实现的有源电力滤波器

Fig. 2 Main circuit of APF consisted of 4-modularized converter

按照主电路的拓扑结构,结合并联型有源电力滤波器的工作原理,对于采用 4 个 PWM 模块组成的有源电力滤波器,其工作原理可用图 3 所示的单相等效电路加以说明。

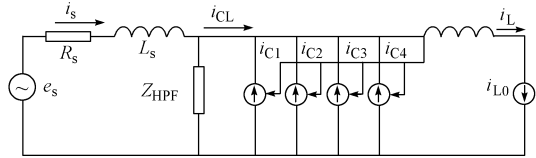


图 3 4 重化 PWM 变流器单相等效电路

Fig. 3 Single-phase equivalent circuit of 4-modularized converter

在进行谐波补偿时,4 组变流器所产生的谐波补偿电流可看成是 4 个电流源输出的电流与负载谐波电流 i_L 之间进行叠加运算。控制时,为均衡每组变流器所输出的功率,使每组变流器所产生的谐波电流均为负载电流中谐波电流的 1/4。这样当各组变流器的电流 $i_{C1}, i_{C2}, i_{C3}, i_{C4}$ 与负载电流 i_L 相加后,系统的电流 i_{CL} 便成为不含有谐波成分的基波电流。

图 4 给出了整个控制系统的计算电路原理框图和时基脉冲分配示意图。为协调 4 组 PWM 变流器的补偿控制,对每组变流器均设置了电流跟踪控制电路和驱动保护电路,电流跟踪控制的时基脉冲由控制电路统一处理,按一定的时序分配到各跟踪控制模块。具体实现时,让第 2 组 PWM 变流器的基准时钟落后第 1 组基准时钟折合电角度 90° ,第 3 组 PWM 变流器的基准时钟落后第 2 组基准时钟折合

电角度 90° , 依次类推。各 PWM 变流器的时基脉冲分配原理图可参见图 4。

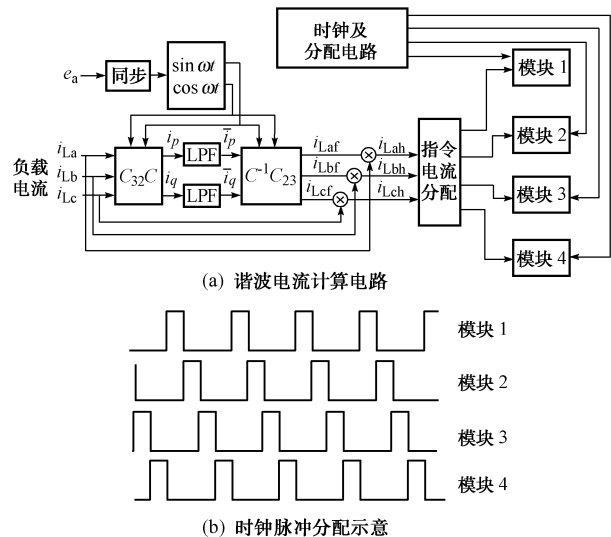


图 4 谐波电流计算电路及时基脉冲分配示意图

Fig. 4 Schematic diagram of harmonic current calculation and pulse arrangement

3 问题讨论

3.1 进线电抗器数值大小的选择

交流进线电抗 L 的选择必须考虑 2 个因素: 一是有源电力滤波器对补偿电流的跟踪控制能力, 要使其在负载电流有较大的电流变化率时仍能产生相应的补偿电流; 二是满足跟踪补偿电流纹波大小的要求。前一个因素要求交流进线电抗 L 不能过大, 否则, 电流变化的快速性不能满足要求; 而后一个因素则要求 L 不能太小, 否则会使滤波器的输出电流相对于补偿电流有很大的超调, 特别是晶闸管导通期间 di_a/dt 很小, 滤波器输出电流就有很大的毛刺。因此, 交流进线电抗 L 的选择应按照所要求的电流跟踪能力及负载中最大的电流变化率两方面因素来折衷。

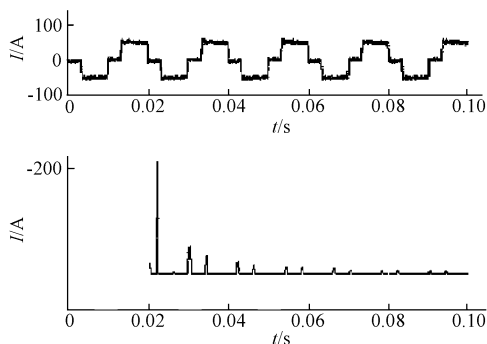
3.2 主电路开关器件工作频率大小的选择

从有源电力滤波器的工作原理可知, 由于主电路采用电流跟踪的 PWM 方式控制, 所以, 补偿电流实际上是在指令信号两侧呈锯齿波状地跟随其变化。在交流电压和直流侧电压一定的情况下, 决定跟踪电流的波形主要有 2 个因素: 一个是器件的工作频率; 另一个是交流进线电抗器值的大小。对于开关频率而言, 过低的开关频率会使得补偿电流中的纹波成分加大; 反之, 若开关频率过高, 则开关过程中的损耗也随之增大, 增加了系统的损耗。因此, 需将开关频率设定在一个合适的范围之内。在本系统中, 综合主电路所用开关元件 IGBT 和所要达到的补偿

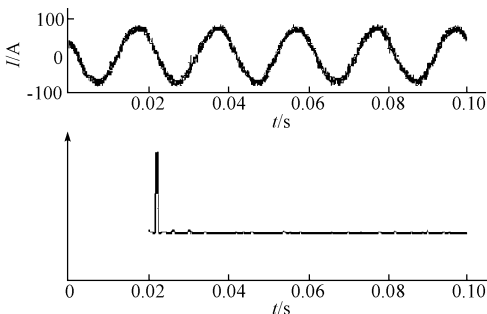
效果, 开关频率定为 10 kHz。

4 实验结果

利用所研制的有源电力滤波器装置对图 2 所示的谐波源负载进行了补偿实验。谐波源由一带阻感性负载的三相整流桥组成。图 5 给出了在投入有源电力滤波器前后的流入电源的电流波形及频谱。从波形图和频谱图中可看出: 三相电流的波形为正负交变的梯形波, 波形畸变严重; 补偿后的电源电流波形, 可以看出三相电流波形中的谐波基本消除。说明有源电力滤波器有着良好的补偿效果。



(a) 补偿前负载电流波形及频谱



(b) 补偿后流入电源侧的电流波形及频谱

图 5 补偿前后的电流波形及频谱

Fig. 5 Waveforms and frequency-table results of experiment

5 结论

本文介绍了采用模块化 PWM 变流器主电路组成的大容量有源电力滤波器的实现方法, 给出了系统结构拓扑、控制原理和实验中所遇到的问题。实验表明该系统可以有效解决有源电力滤波器在大容量时所遇到的容量和开关频率问题。解决了单个电力电子器件开关频率过低而产生的补偿效果差的问题, 使系统最终的等效开关频率大为提高, 从而改善了有源电力滤波器的补偿效果。同时, 采用模块化 PWM 主电路结构也成倍扩大了整个装置的补偿容量, 使其可以适用于对大容量谐波源的补偿与抑制。

(下转第 61 页 continued on page 61)

参 考 文 献

- 1 電力用アクティグワイルタ技術調査専門委員会(The Special Committee on Active Power Filter). 電力用アクティグワイルタ技術(The Investigation Report of Active Power Filter Using for Power System). 電気学会技術報告 (Technology Report of Japanese Electrical Institute). 1992(Ⅱ-425):1~62
 - 2 The Special Committee on Active Power Filter and Power Converter Circuit. The Investigation Report of Active Power Filter and Power Converter. Technology Report of Japanese Electrical Institute, 1997
 - 3 Peng F Z, Kohata M, Akagi H. Compensation Characteristics of Shunt and Series Active Filter. In: Proceedings of 1992 Chinese-Japanese Power Electronics Conf. Beijing: 1992. 381~387
 - 4 Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning. IEEE Trans on Ind Appl, 1996, 32 (6): 1312~1322
 - 5 Akagi H. Control Strategy and Site Selection of a Shunt Active Filter for Damping of Harmonic Propagation in Power Distribution Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 354~363
-
- 卓 放(1962—),男,副教授,研究方向为谐波抑制与电力电子技术。E-mail: zffz@pevirc.xjtu.edu.cn
- 周 新(1979—),男,硕士研究生,研究方向为谐波抑制和无功补偿。
- 王兆安(1946—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术、谐波抑制和无功补偿、工业自动化技术。

LARGE VOLUME ACTIVE POWER FILTER BASED ON MODULARIZED PWM MAIN CIRCUIT

Zhuo Fang, Zhou Xin, Li Ke, Lei Wanjun, Wang Zhaoan (Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Active power filter has a good application foreground on decreasing harmonics and improving the power quality. How to increase the volume of the active power filter is one of the key problems in practice. Based on the existing methods of realizing large volume active power filter, a new large volume active power filter is introduced. The main circuit of the large volume active power filter consists of multiple modularized PWM converters. The topology structure of main circuit, system principles and control methods are described, and the exceptional problems are also discussed. The experiment results show that the large volume active power filter in use of multiple modularized PWM has good effects on decreasing harmonics and it effectively solves the contradiction between frequency and volume.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59737140).

Key words: harmonics; active power filter; modularization