

中压有源电力滤波器主电路拓扑结构研究

王碧芳¹, 刘 溟², 袁拓来¹, 张振环¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 华中电网有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 目前, 广泛研究的中压有源电力滤波器(APF)主电路结构有 2 种: 有源无源混合结构和多电平级联结构。在分析这 2 种结构特点的基础上, 提出一种带隔离变压器的级联型多电平逆变器作为 APF 主电路, 采用多载波脉宽调制(PWM)控制, 输出由一系列阶梯变换的脉冲方波组成, 非常接近正弦波。该电路具有结构简单、直流电压容易控制等特点, 仿真试验验证了其可行性。

关键词: 有源电力滤波器; 多电平逆变器; 多载波

中图分类号: TN 713+8

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0023-04

0 引言

随着各种大功率电力电子设备的应用, 电能质量受到较大影响, 并带来了一系列的危害^[1-2]。电能的质量及其控制问题已引起电力企业和广大用户的高度关注^[3-5]。近年来, 不断有关于谐波造成的危害和损失的报道。以一个年用电量为 $12.05 \times 10^5 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 的电弧炉为例。如谐波损耗按 0.3 % 考虑(此处还不包括由于谐波导致的间接损耗), 1 年中谐波功率损失的电量约为 $3\ 615 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 如按 $0.5 \text{ 元} / (\text{kW} \cdot \text{h})$ 的电价考虑, 1 年经济损失约达 $180.75 \times 10^4 \text{ 元}$ ^[6-7]。

对于一些已投运的非线性负荷, 一般可以采取增加交流滤波器抑制注入系统的谐波电流。目前, 较为广泛采用的是无源 LC 滤波器。其工作原理是将电感和电容按一定的参数和拓扑结构连接, 利用电感、电容的谐振, 滤除某次或某些次谐波。

有源电力滤波器(APF)的原理与无源电力滤波器(PF)完全不同, 其通过一个可控的电力电子电路, 产生与需补偿的谐波波形一致、相位相反的电流, 从而抵消负荷产生的谐波电流, 防止其注入系统。

理论上, 中压和低压配电网的 APF 在检测方法和控制理论上是一致的。然而, 中压配电网的 APF 难点和重点在于如何提高电力电子主电路的电压和电流容量。目前, 广泛研究的中压 APF 的主电路结构形式主要有 2 种: 有源无源混合结构、多电平级联结构。本文在分析以上 2 种结构特点的基础上, 采用一种带隔离变压器的级联型多电平逆变器作为有源滤波主电路, 具有结构简单、直流电压容易控制等特点。

1 有源无源混合滤波结构

一种混合滤波主电路结构如图 1(a)所示, 该结构采用 APF 通过耦合变压器与 PF 组相串联的方案。

其中, PF 对系统中的无功和谐波进行相应的补偿; 而 APF 主要作用是改善 PF 的滤波效果, 抑制可能发生的电网与 PF 的振荡。这种结构的显著优点是: 有源部分的容量可以比较小, 一般为补偿对象的 3%~5%; 此外, 有源部分在低压侧, 所需承受的电压低^[8]。

另一种结构为 APF 通过 1 个 LC 电路与系统相联, 如图 1(b)所示。

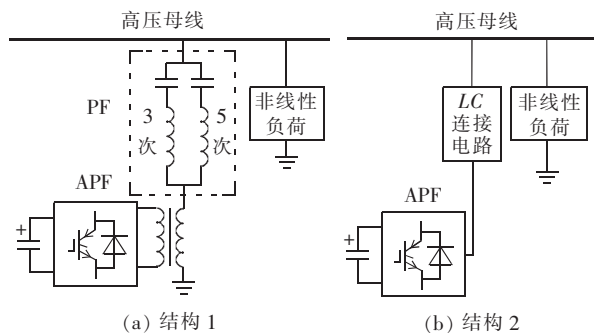


图 1 混合滤波器结构示意图

Fig.1 Structure of hybrid APF

图中 LC 连接电路的结构有多种, 通过选择合适的 L 和 C 参数, 使 LC 电路的基波阻抗 $Z_{f1} \approx \infty$, 高压母线的基波电压降落在 LC 电路上, 而 APF 的逆变器主电路无需承受基波电压, 从而降低了有源部分的容量^[9]。

以上给出的 2 种混合电路结构具有 3 个特点。

a. 可以利用已安装的 PF。一方面可降低 APF 容量, 另一方面可防止已安装的 PF 的闲置。这也是该方案的可取之处。

b. 滤波器和 LC 连接电路设计困难。混合结构图 1(b)中, LC 并联谐振电路或 C 型滤波器的阻抗特性难以达到理想特性, 给 APF 的控制带来困难。

c. 难以实现对基波无功的大容量补偿。

混合滤波电路实现的难点和重点在于:

a. LC 连接电路设计;

b. 有源和无源配合下的控制策略;

c. 当 APF 电力电子器件封锁时,系统通过 PF 和 APF 主回路的续流二极管向其直流侧充电,控制不当可能给 APF 主回路带来灾难性的后果。

2 级联型混合多电平结构

自从多电平逆变器结构被提出来后^[10],将这种新型的电力电子电路应用于中压有源电力滤波的研究不断出现^[11-13]。图 2 所示为 10 kV 电压等级的级联型混合逆变器示意图。该电路的结构为:单相全桥逆变器组构成的串联多电平逆变器与三相桥式逆变器串联。其中,串联多电平逆变器可采用移相 SPWM 控制,产生与系统相电压等幅、同相的基波正弦电压,而三相桥式逆变器采用任意波形 PWM 调制,2 个电路相互配合,发出需补偿的谐波电流。

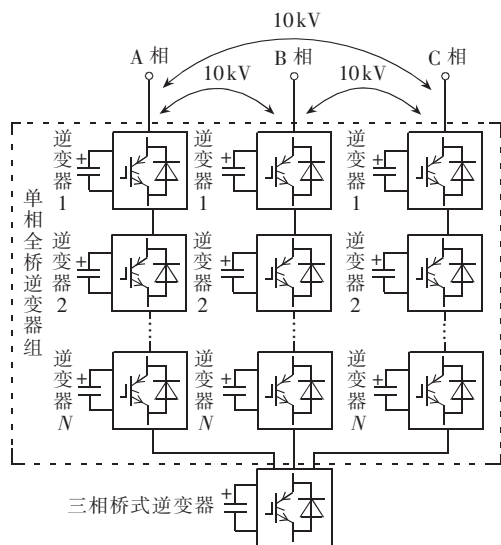


图 2 级联型混合逆变器主电路

Fig.2 Main circuit of cascaded hybrid inverter

这种电路有以下几个特点。

- 系统基波电压由串联多电平逆变器承受,三相桥式逆变器无需承受基波电压。
- 串联多电平逆变器采用移相 SPWM 控制,可在较低的开关频率下发出理想的正弦波形,从而降低整个电路的开关损耗。
- 直流侧是独立电容时,所有逆变电路可以无需隔离变压器直接串连。直流侧共用电容时,则联接时需要隔离变压器。
- 串联的单相桥式逆变器结构相同,调试和互换简单。
- 三相桥式逆变器由于无需承受基波电压,只需发出谐波电压,以产生补偿电流。该电路中的开关器件可以工作在较高的开关频率下,但是其电压、电流容量小。
- 这种电路是采用有源部分承受基波电压,与有源和无源混合方式相比,具有很小谐波阻抗。而有源和无源混合方式中,需要用 LC 谐振来承受基波电压,但是实际中不能设计出理想的阻抗特性 LC 谐

振电路,因此其谐波阻抗较大。

采用这种混合结构的难点和重点在于:

- 直流电容充电和直流侧电压的稳定控制方法;
- 串联多电平逆变器和三相桥式逆变器的配合;
- 主电路故障检测,当串联支路上某一个器件或逆变桥发生故障时,如何及时发现,并采取相应的措施保证电路正常工作或及时退出运行。

在图 2 所示电路的基础上,为减少串联电路的数目,可以选用大容量电力电子器件,如 GTO、GTR 等组成单相逆变器。其电路结构如图 3 所示。

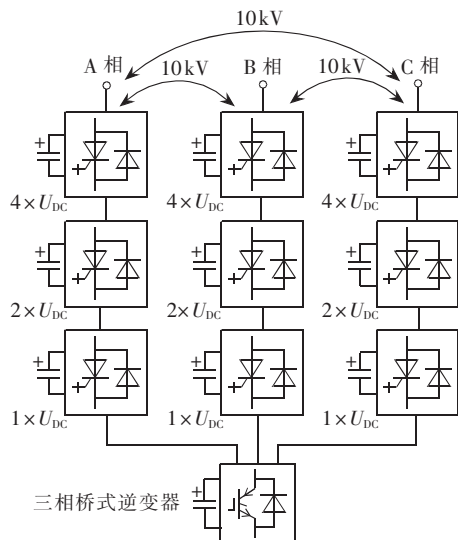


图 3 采用 GTO 的级联型混合逆变器主电路

Fig.3 Main circuit of cascaded hybrid inverter with GTO

目前,GTO 的单个器件容量可以做到 6 kV/4kA 的水平,采用这种器件承担基波电压是非常理想的。该电路有 3 个主要特点。

- 具有第 1 种有源电路的特点。
 - 采用大容量器件可以减少串联的电路数,从而降低电路的控制复杂程度。
 - 串连多电平逆变器中直流电压按 1:2:4(也可按 1:3:9)的比例变化,可以在不增加串联电路数的前提下提高输出电压的电平数,从而提高输出基波电压质量。
- 在级联型混合多电平电路中,控制和检测方法与低压下的有源滤波器是相同的。区别在于串连的多电平逆变器采用 SPWM 控制,而三相桥式逆变器输出电压中不含有基波电压,可以减小其容量。

3 带隔离变压器的级联型多电平结构

综合以上所介绍电路结构,本文拟采用如图 4 所示电路作为中压 APF 拓扑结构。这种结构具有图 2 和图 3 所示结构的优点,并且由于所有逆变器单元共用直流电容,直流电压控制非常简单。并且,当系统电压基本对称、正弦时,由于补偿电流主要为谐波和无功,APF 与系统交换的瞬时功率很小,直流电压一般无需补偿。

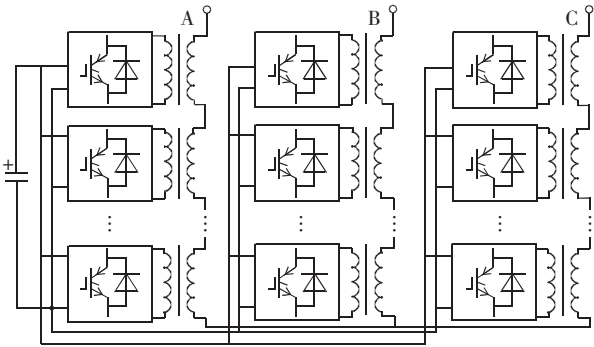


图 4 带隔离变压器的级联型多电平逆变器

Fig.4 Cascaded multilevel inverter with isolation transformer

对图 4 所示主电路,可采用多载波 PWM 控制,其示意图如图 5 所示。每相 N 个逆变电路共用一个调制波 u_r ,载波不同。各逆变器的载波频率和相位相同、幅值依次增加 $1/N$ 。其中,当 $u_r > 0$ 时,将 u_r 与 u_{Ci+} 比较结果分别控制相应的开关器件;而当 $u_r < 0$ 时,将 u_r 与 u_{Ci-} 比较结果分别控制相应的开关器件。每个单相逆变器桥采用单极性控制方式。由图 5 可见:由于 u_r 的幅值远大于 u_{Ci+} 和 u_{Ci-} 的幅值,所以逆变器 1 中的开关器件大部分时间状态不变,因此其开关频率和开关损耗低。其余的逆变器情况相同。

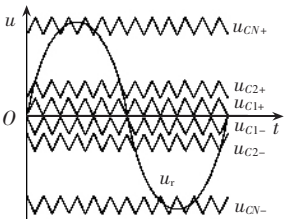


图 5 多载波控制示意图

Fig.5 Multi-carrier control

图 6 是 A 相第 1 个逆变器的结构和控制示意图,其余 $N-1$ 个逆变的结构和控制与其相似,只是载波不同。

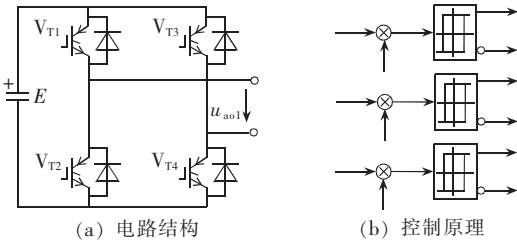


图 6 单相全桥逆变电路

Fig.6 Single-phase full-control inversion circuit

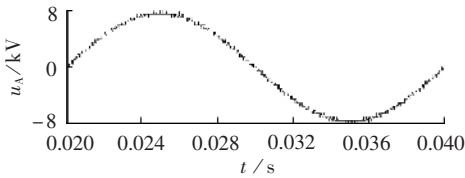
4 仿真结果

4.1 正弦波发生仿真试验

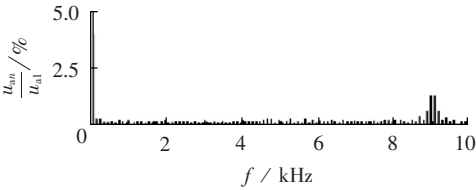
仿真的主电路结构如图 4 所示,控制采用多载波 PWM 控制如图 5 所示,逆变器直流侧的电容用理想直流电压源代替。三相调制波分别为

$$\begin{aligned} u_{ra} &= U_{am} \sin \omega t \\ u_{rb} &= U_{bm} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{rc} &= U_{cm} \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned}$$

其中, $U_{am} = U_{bm} = U_{cm} = 0.9 \text{ p.u.}$, 直流侧电压 500 V , 级联电路数 $N=16$, 载波频率 9 kHz 。仿真结果见图 7、8。



(a) 电压波形



(b) 频谱

图 7 多电平级联逆变电路 A 相输出电压波形及频谱图

Fig.7 Output voltage and spectrum of phase A of cascaded multilevel inversion circuit

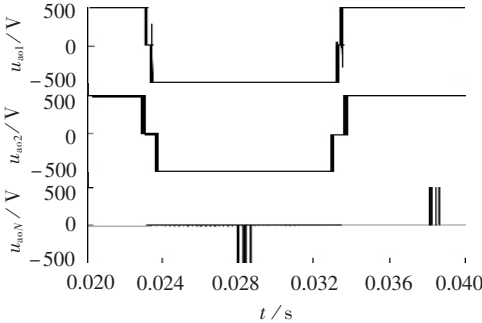


图 8 A 相第 1、2、N 路逆变器输出电压波形

Fig.8 Output voltages of inverter branch 1, 2 and N of phase A

图 7 所示,级联多电平逆变器输出电压是由一系列阶梯变换的脉冲方波组成,无需滤波就已经非常接近一个正弦波。从频谱中可以看出,开关次谐波 (9 kHz 及其附近频率) 的含量很小,相对于 SPWM 控制而言这是一个显著的优点,因此逆变器输出滤波电感可以选择得很小。这个优点是多电平电路所固有的,它可以通过改变各级逆变器的输出状态组合,使得输出电压逼近正弦波。

如图 8 所示各单元逆变器输出电压波形,开关器件在 1 个工频周期中的开关次数相对于 SPWM 控制要少得多,输出电压中不仅含有脉冲方波,还有一个占空比较大的方波。通过这些电压叠加后就得到如图 7 所示的电压。

4.2 任意波形仿真试验

仿真的主电路结构如图 4 所示,控制采用多载波 PWM 控制,逆变器直流侧的电容用理想直流电压源代替。调制波 $u_{ra} = 0.9 \sin \omega t + 0.055 \times (\sin 5\omega t + \sin 23\omega t)$, 三相调制波对称,直流侧电压为 500 V ,级联电路数 $N=16$,载波频率为 9 kHz 。仿真结果见图 9。

如图 9 所示,输出电压的谐波分量与调制波相同,失真很小,且开关次谐波 (9 kHz 及其附近频率) 的含量很小。

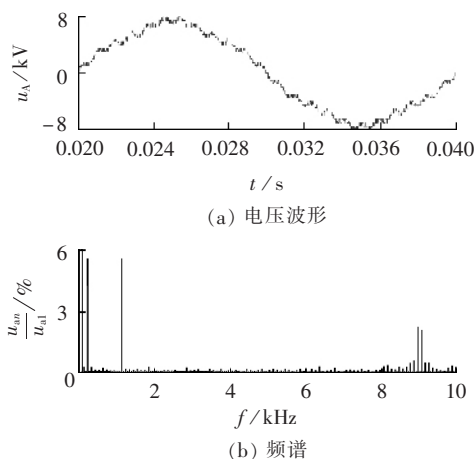


图9 多电平级联逆变电路A相输出电压波形及频谱图

Fig.9 Output voltage and spectrum of phase A of cascaded multilevel inversion circuit

4.3 并网仿真试验

逆变器主电路结构如图4所示,控制采用多载波PWM控制,逆变器直流侧为电容而不是理想电压源。三相调制波对称,其中: $u_{ra}=U_{am}\sin\omega t$,直流侧电压设定为550 V,级联电路数 $N=16$,载波频率为9 kHz。系统额定电压为10 kV,内阻抗为 $R=5\ \Omega$, $L=5\text{ mH}$ 。仿真结果见图10。

从仿真结果可以看出,直流侧电压可以稳定,但是有一定的波动。且由于各个逆变单元直流侧并联,因此不存在逆变器直流电压不对称的情况。采用这个结构直流侧电压控制简单。

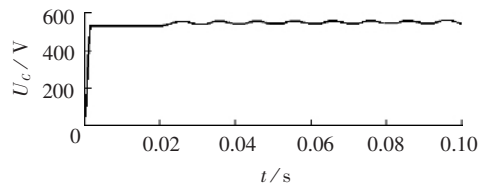


图10 并网后直流电容电压波形

Fig.10 Voltage on DC capacitor after parallel-in

5 结论

本文在比较几种中压滤波电路的基础上,提出一种带隔离变压器的级联型多电平逆变电路。该电路具有逆变器单元结构一致,易于生产、调试和更换,是一种较适合中压大容量有源电力滤波的电路拓扑结构。仿真试验验证了该电路的可行性。

参考文献:

- [1] ARRILLAGA J, WATSON N R, CHEN S. Power system quality assessment [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2000.
- [2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
LIN Hai-xue. Main problems of modern power quality [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12.
- [3] BOLLEN M H J. Understanding power quality problems, voltage sags and interruptions [M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [4] 许遐, 王慧仁. 电能质量的全过程检测技术[J]. 电测与仪表, 1999, 36(8): 4-9.

XU Xia, WANG Hui-ren. The entirely course detecting technique of power quality [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1999, 36(8): 4-9.

- [5] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 王雪峰, 刘玉民. 对山西电网谐波源用户普查测试的分析 [J]. 华北电力技术, 1996(9): 4-7.
WANG Xue-feng, LIU Yu-min. Analysis on the harmonic source of Shanxi power system [J]. North China Electric Power, 1996(9): 4-7.
- [7] 寇慧珍, 张遵运. 谐波对山西化工厂 10 kV 补偿电容器运行影响的分析 [J]. 电网技术, 1996, 20(7): 42-44.
KOU Hui-zhen, ZHANG Zun-yun. The influence of harmonics on the operation of 10kV compensation capacitors [J]. Power System Technology, 1996, 20(7): 42-44.
- [8] 王跃, 杨君, 王兆安, 等. 电气化铁路用混合电力滤波器的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 23-27.
WANG Yue, YANG Jun, WANG Zhao-an, et al. Study on hybrid power filter used in electrified railway system [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 23-27.
- [9] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 低成本混合滤波方案及其特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 5-8, 45.
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han, et al. Research on low cost hybrid active filter [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 5-8, 45.
- [10] PENG F Z, SLAI J, JOHN M K, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation [C]// IEEE / IAS Annual Meeting. [S.l.]: IEEE, 1995: 2541-2548.
- [11] LOPEZ M G, MOROM L T, ESPINOZA J C, et al. Performance analysis of a hybrid asymmetric multilevel inverter for high voltage active power filter application [C]// Proceeding of IEEE Annual Conference, Industrial Electronics Society. [S.l.]: IEEE, 2003: 1050-1055.
- [12] PENG F Z, AKAGI H, NABAE N, et al. A study of active power filter using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1990, 5(1): 9-15.
- [13] 徐永海, 肖湘宁, 韩民晓. 采用级联多电平逆变器的混合型有源电力滤波器 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 47-50.
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, HAN Min-xiao. Hybrid active filter using cascade multilevel inverters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 47-50.
- [14] 李健, 范瑞逢. 浙江电网大型整流负载的谐波状况及抑制对策 [J]. 浙江电力, 1998(4): 32-36.
LI Jian, FAN Rui-feng. The situation and restrain of the harmonic of Zhejiang power system [J]. Zhejiang Electric Power, 1998(4): 32-36.
- [15] 赵东元, 于歆杰, 金春莲, 等. 高压直流输电系统中的滤波装置 [J]. 输配电, 2002, 6(2): 38-40.
ZHAO Dong-yuan, YU Xin-jie, JIN Chun-lian, et al. Filtering equipment in high voltage direct current transmission system [J]. Transmission & Distribution, 2002, 6(2): 38-40.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

王碧芳(1979-), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术及其应用 (E-mail: wangbifang_wtc@tom.com);
刘 溟(1975-), 男, 湖北大悟人, 工程师, 从事电网运行与管理工作;
袁拓来(1977-), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术及其应用、电能质量监测;
张振环(1980-), 男, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术及其应用、电能质量控制。

Study on topological structure of medium voltage active power filter

WANG Bi-fang¹, LIU Min², YUAN Tuo-lai¹, ZHANG Zhen-huan¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430072, China)

Abstract: The main circuits of middle voltage APF have two types: passive & active hybrid structure and cascaded multilevel structure. Based on the analysis of these structures, a cascaded multilevel inverter with isolation transformer is presented, which is used as the main circuit of APF. It has the advantages of simple structure and easy DC-side voltage control. Simulation verifies its feasibility.

Key words: active power filter; cascaded multilevel inverter; multi-carrier