

有源滤波装置中逆变电路的设计

夏向阳¹, 肖德祥²

(1. 长沙理工大学 电气信息与工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 怀化电业局, 湖南 怀化 418000)

摘要:针对如何推进有源电力滤波器(APF)的工程应用,根据大功率APF的要求,对大功率逆变器缓冲电路参数设计,直流侧电容的选取等问题进行讨论,并给出装置在现场的运行情况。

关键词:有源电力滤波器;逆变器;缓冲电路

中图分类号:TM 464 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7140(2006)04-0017-05

The Design of Active Power Filter Inverter Circuit

XIA Xiang-yang¹, XIAO De-xiang²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. Huaihua Dower Supply, Huaihuo 418000, China)

Abstract: In order to promote the industrial application of active power filter (APF), this paper based on the demands of high-voltage APF, makes a discussion about the design of high-voltage inverter protection and absorb circuit parameter and the selection DC capacitance, the practical performance of the device is also presented.

Key words: active power filter; inverter; protection and absorb circuit

随着电力电子装置的广泛应用,一方面电力系统中的谐波污染随着非线性负载的数量和容量日益增加而日趋严重,另一方面供电方及其电力系统设备和用户对电能质量的要求也越来越高,因此要求对电力系统的谐波污染进行综合治理,如有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)等新型电力电子

装置已逐步在中、高电压谐波治理工程中得到应用。在国外,有源电力滤波器已开始工业和民用设备上得到广泛使用,并且谐波补偿的次数逐步提高(典型值达25次),单机装置的容量也逐步提高(如日本和美国,应用领域可以接受的APF的容量已增加到50 MVA),应用领域从补偿用户自身的谐波向

收稿日期:2006-09-10

基金项目:湖南省教育厅资助科研项目((06C121)

作者简介:夏向阳(1968-);男,讲师,博士,主要从事电力系统自动化和电能质量控制等方面的研究。

改善整个电力系统供电质量的方向发展^[1].在我国,有源电力滤波器产品投入工业正处在试运行阶段,如河南电力局与清华大学联合开发的20 MVA静止无功发生器(包含有源滤波器)在郑州孟砦变电站进行300 kVA中间工业样机试运行^[1],该样机主电路由18脉冲电压型逆变器、直流储能电容器、9台曲折绕组变压器及系统的连接变压器组成,18脉冲逆变器分为3个6脉冲电压型逆变器,系统结构较复杂.湖南大学研制并已投入某冶炼厂的有源电力滤波器,它的控制采用核心为DSP(TMS320F240)的数字化控制方案,三相逆变桥主要由三菱公司提供的大功率智能功率模块组成,6只智能IGBT模块(IPM)都采用独立的隔离电源给其内部控制和驱动电路供电,三相电抗器以水平三角排列方式下,以降低无源滤波器三相电抗器之间的互感,该装置在现场取得了较好的效果.总的来说,国内有源电力滤波器的应用技术和电子工业发达的国家相比还有一定的差距.

目前要研究的关键技术是如何推进有源电力滤波器的工程应用.现存在如何增大装置的容量、IGBT保护电路的改进、采用多重化结构、单周控制算法等等问题.随着电力电子装置日益广泛的应用,大容量的高次谐波补偿装置也变得愈来愈重要,特别是兼作闪变抑制及功率因数补偿的装置更是如此.针对大功率APF的要求,目前研究大功率逆变器缓冲电路参数设计的文献比较少,文献[2,3]仅对缓冲电路的工作过程进行讨论,而文献[1,4]只用工程估算的方法对缓冲电路进行了设计.本文在APF主回路电路已经设计好、线路杂散寄生电感已经确定的情况下设计用于IGBT的低电吸收保护电路.

1 浪涌冲击电压的产生

在三相桥式逆变电路PWM调制控制中,IGBT模块由于开关速度快,开关频率高,动态损耗较大,关断过程中功率管上有时会出现危险的过电压,造成功率管的损坏.产生过电压主要有2个原因:关断浪涌电压和续流二极管恢复浪涌电压.关断浪涌电压是在关断瞬间因流过IGBT的电流被切断而产生的瞬态高压;而当续流二极管恢复反向阻断能力时会产生与关断浪涌电压相似的浪涌电压.如图1所

示电路中,当上桥臂的IGBT模块IGBT1开通时,流过感性负载的电流 I_L 不断增加.当该IGBT关断时,感性负载中的电流不可能发生突变,它必然通过下桥臂IGBT模块的续流二极管VD2流通.如果电路是理想的,即不存在寄生的杂散电感,IGBT1关断时其上的电压 V_{CE1} 只会上升到比母线电压 U_d 高出一个二极管的压降值,随后VD2导通防止电压进一步增加.

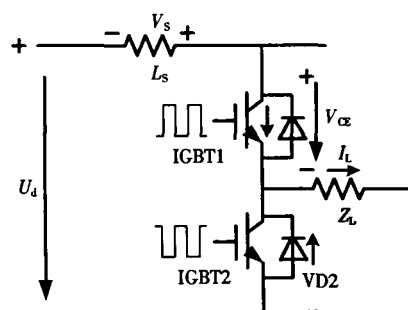


图1 线路杂散寄生电感对IGBT的影响

但在实际的功率电路中线路上存在有寄生的杂散电感,可以在图1所示电路中增加一个总值为 L_s 的漏电感以模拟线路杂散电感的影响.当IGBT1关断时,电感 L_s 阻止负载电流向VD2切换,在该电感两端产生阻止母线电流减少的电压 V_s ($V_s = L_s \cdot dI_L/dt$),电压的极性如图1所示,它与直流电源母线电压相叠加并以浪涌电压的形式加在IGBT1的两端.在极端情况下,该浪涌电压会超过IGBT1的额定值而导致它的损坏.续流二极管恢复时会产生与关断浪涌电压相似的浪涌电压.

2 主电路中逆变电路的设计

主电路中逆变器是非常关键的功率变化电路,它的设计包括功率开关器件的选择、缓冲电路的设计和直流侧电容的选择.

2.1 缓冲回路的设计

线路因杂散电感会产生的瞬态浪涌高压,这种浪涌电压如果不加以抑制,可能会造成功率开关器件的损坏.而减少这种浪涌电压的途径有2种,一是采用层状母线结构,降低母线寄生漏电感;另一种方法是安装缓冲电路.缓冲电路在IGBT关断时工作,起到提供旁路的作用,从而达到抑制尖峰电压的目的,同时还可以减小功率器件的开关损耗.

因为引起功率电路上产生瞬时冲击电压的能量

正比于 $1/2 L_s i^2$ ^[5]. 这里的 L_s 为母线寄生电感, i 为主电路工作电流. 在保证工作电流 i 大小不变的前提下, 为了降低这种能量, 就必须减少主电路的寄生电感. 因此选用了具有如下片状结构的 IGBT, 如图 2 所示. 通过与宽排母线相连, 很好地降低了线路电感.

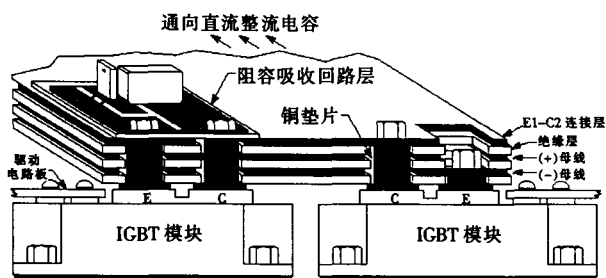


图 2 分层母线结构

IGBT 具有导通电阻小、开关速度快、驱动功率小、工作频率较高、耐压高、承受工作电流大等优点, 在大功率电力电子器件的应用中, 智能功率模块 IPM 集成了 IGBT 及其驱动电路和短路、过热、过流、欠压保护电路, 不仅使系统可靠性高, 而且可以缩短系统的开发周期. 在引用 IPM 模块时需要注意以下几点: ①三相逆变器的每个 IPM 模块都必须采用独立的隔离电源给其内部控制和驱动电路供电, 且该隔离电源的耦合电容必须小于 100 pF, 耦合电容过大会造成 IGBT 的误触发; ②在将模块的控制引脚连接至电路板时, 要通过反接插座进行连接, 可以保证焊接时不会高温损坏模块; ③IPM 接口电路必须采用光隔, 光隔输出脚和 IPM 引脚之间的走线应尽量短, 并且应采用具有高共模抑制比 (CMR) 的高速光隔. 本装置设计的接口电路如图 3 所示.

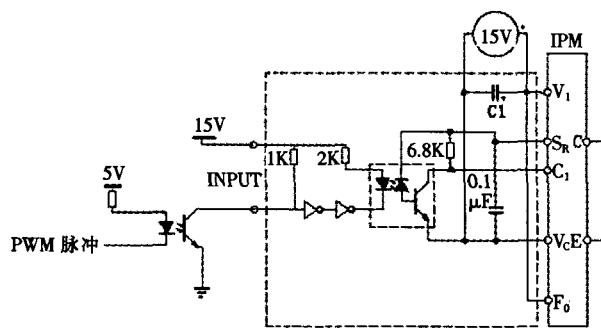


图 3 IPM 接口电路

为保证逆变电路可靠工作, 保证有源滤波器正常运行, 安装缓冲电路是非常必要的. 抑制浪涌冲击

电压的缓冲电路主要有 4 种类型, 如图 4 所示^[6,7].

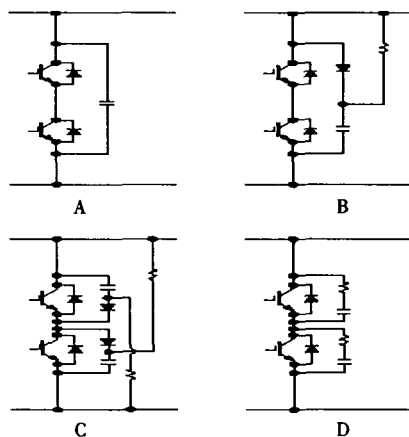


图 4 4 种类型缓冲电路结构

A 型结构的缓冲回路最简单, 通过一个无感电容直接连接 C1, E2. 这种结构适用于低功率电路的设计, 随着功率的增大, A 型结构的缓冲效果将会变差, 甚至可能与母线寄生电感产生振荡. B 型结构通过一个快速恢复二极管来捕捉消除冲击电压和阻塞振荡, 解决了 A 型存在的一些问题. 这种缓冲回路中的 RC 时间常数应该大概为 IGBT 开关周期的三分之一 ($\tau = T/3 = 1/3f$). 这种缓冲回路也会随着逆变器功率的增大而无法有效控制浪涌冲击电压. C 型结构的缓冲回路是在大功率系统中应用最多的一种缓冲回路, 功能上与 B 型类似, 因为它直接连接了上下桥臂 IGBT 的集电极和发射极, 从而大大降低了回路电感. D 型缓冲回路能有效的控制冲击电压、寄生振荡和 dv/dt 噪声问题, 但其本身功率消耗太多而不适用高频系统应用. 在设计中, 采用 A 型和 C 型缓冲回路的复合回路.

图 5 是使用 C 型缓冲回路 IGBT 关断时的典型电压波形. 其初始的尖峰电压 ΔV_1 主要由缓冲回路的寄生电感和缓冲二极管的正向恢复引起的, 当采用快速型缓冲二极管时, 对产生这种尖峰电压的影响较小, 主要由回路寄生电感产生, 这样, 可以通过下面的公式来计算 ΔV_1 的幅值, 即

$$\Delta V_1 = L_s \times di/dt. \quad (1)$$

式中 L_s 为缓冲回路总的寄生电感; di/dt 为 IGBT 关断时的电流变化率.

典型的 IGBT 功率电路的 $di/dt = 0.01 \text{ A/ns} \times I_c$. 当 ΔV_1 的最大允许值被确定后, 就可以通过这个公式来计算缓冲回路的最大允许寄生电感值. 装置

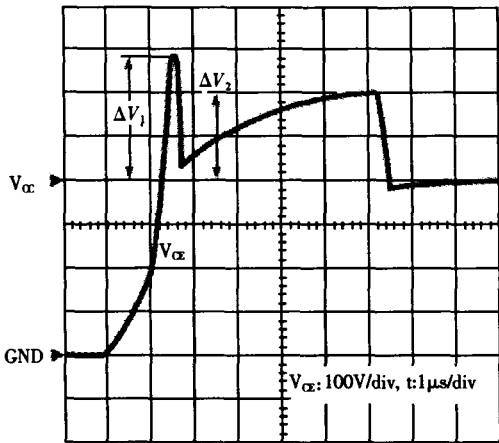


图5 有缓冲回路时的典型关断电压波形

设计时允许流过的电流峰值为 400 A, ΔV_1 限制为 100 V, 由式(1)得

$$di/dt = 0.01 \text{ A/ns} \times 400 \text{ A} = 4 \text{ A/ns} \quad (2)$$

$$L_S = \Delta V_1 \div di/dt = 100 \text{ V} \div 4 \text{ A/ns} = 25 \text{ nH} \quad (3)$$

从上面的计算可以看出, 大功率的 IGBT 电路要求缓冲回路的寄生电感非常小. 在工程实现上可从三个方面到达上述要求.

- 1) 选用无感型电阻、电容和快速恢复型二极管.
- 2) 缓冲回路尽量靠近 IGBT.
- 3) 尽量采用多个小的电容并联构成缓冲电容, 因为越小的电容并联成的等效电容的寄生电感要比单个电容要小得多.

从图 5 可以看出, 在初始尖峰电压 ΔV_1 之后还有一个较小的峰值电压 ΔV_2 , 这个电压的形成主要是由缓冲回路的电容值和 IGBT 母线寄生电感产生的. 可以通过一个能量守恒的公式来估算 ΔV_2 的大小, 即

$$1/2 L_B i^2 = 1/2 C \Delta V_2^2 \quad (4)$$

式中 L_B 为母线寄生电感, i 为工作电流, C 为缓冲电容值.

同样, 在设定 ΔV_2 的最大允许值后, 可以通过对式(4)的变化来计算一个给定功率电路的缓冲电容值的大小, 即

$$C = L_B i^2 \div \Delta V_2^2 \quad (5)$$

具体的相关参数的选择可以参考三菱公司相关资料说明. 通过以上设计原则和反复实验, 本装置缓冲电路选用低电感的聚丙烯无极电容 1.37 μF /

1200 V, 无感泄放电阻 36 Ω /100 W, 以及与 IPM 相匹配的快速缓冲二极管 1200 V/100 A.

2.2 直流侧电容的选取

直流侧电容的容值越大, 电压波动就越小, 但电容器的成本也就越高, 同时装置的体积随之增大, 故在保证电压波动要求的前提下应尽量减小直流电容的容值. 直流侧电容由三相全桥整流电路供电, 为 APF 提供了一个稳定的直流工作电压 U_d , 免去了 APF 控制器对直流电压的控制, 大大减少了控制算法的复杂度, 同时这种结构的直流侧电压 U_d 不因 APF 输出功率的变化而产生电压波动, 提高 APF 输出的稳定性和准确性^[6,7].

三相全控桥式电路直流侧电压平均值为

$$U_d = 2.34 \times U_a = 2.34 \times 220 = 514.8 \text{ V} \quad (6)$$

考虑关断浪涌冲击电压, 选取直流电容额定电压值为 800 V. 直流侧电容的容值主要取决于直流电压的脉动大小, 根据工程设计的经验有计算公式

$$C = \frac{I_r}{U_d f_{\min} \sigma} K\Phi \quad (7)$$

式中 I_r 为逆变器的额定输出电流均方根值(A); U_d 为直流电压平均值; f_{\min} 为逆变器的最低输出频率; σ 为允许直流电压频率低峰值纹波因数; $K\Phi$ 为负载位移因数角 Φ 有关系数, 由上式计算出直流侧电容容值为 5000 μF . 通过上述讨论设计的逆变电路如图 6 所示.

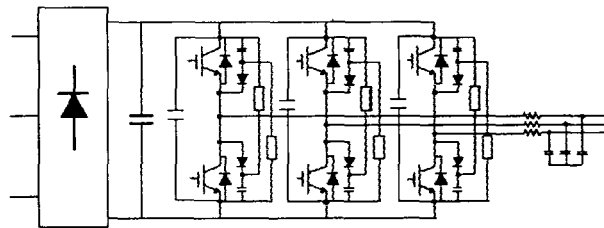


图6 主电路中逆变器总体结构

该系统装置在 10 kV 变电站挂网运行, 通过一个主控室工控机监测系统测得该装置现场运行结果及其对应的频谱分析如图 7 所示.

其中图 7(a) 为滤波前的电网电流波形图, 图 7(c) 为投入有源滤波系统的电网电流波形图. 从图 7 的波形图可以看出, 滤波前电网电流存在畸变情况, 投入有源电力滤波系统后电网电流接近正弦波.

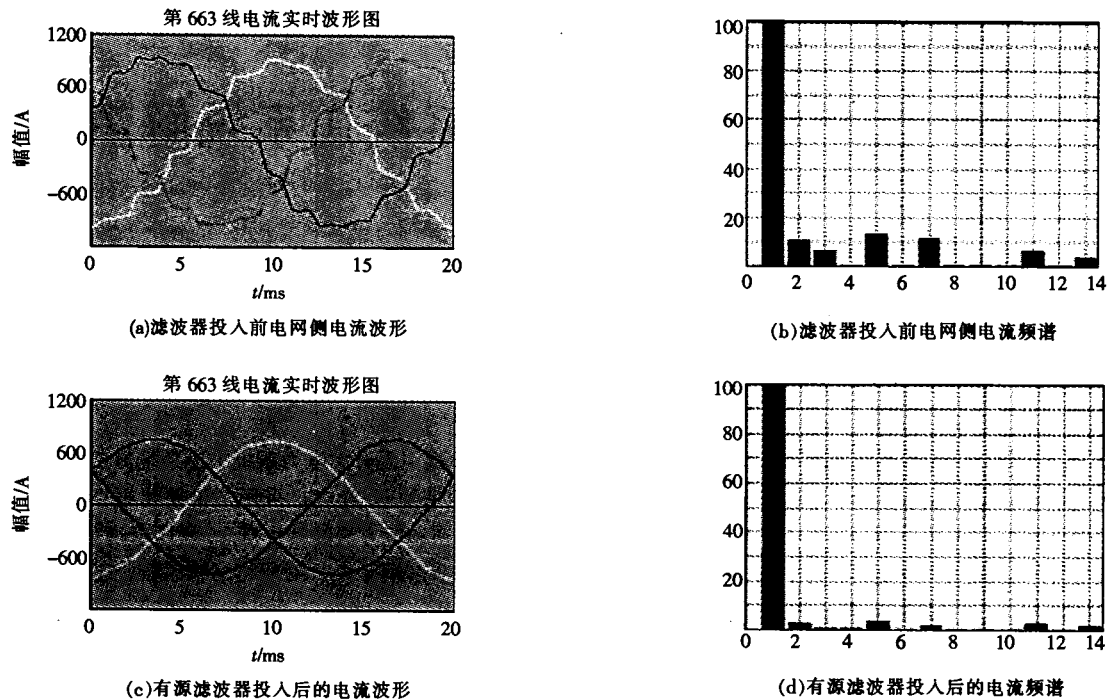


图7 为有源电力滤波系统的现场运行波形图

3 结论

本文在分析浪涌冲击电压的产生原因后,通过采用层状母线结构和安装缓冲电路来抑制浪涌电压.经实践检验 IGBT 模块在这样的缓冲吸收保护电路和低电感叠层母线设计的主电路下能够安全稳定的运行,工程应用价值较高.

参考文献:

[1] Peng F Z, Akagi H, Nabase A. A new approach to harmonic compensation in power systems-A combined system of shunt passive and series active filters [J]. IEEE Trans Ind Appl, 1990, 26 (6): 983-

990.

- [2] 姚为正,王群,刘进军,等.串联型有源电力滤波器控制方式的研究[J].电工技术学报,1999,14(6):47-51.
- [3] 何湘宁,钱照明.高功率逆变桥开通缓冲电路能量回馈研究[J].中国电机工程学报,1997,17(3):157-161.
- [4] 赵正毅,杨潮,赵良炳.对三点平 IGBT 变流器两种缓冲电路的研究[J].中国电机工程学报,2000,20(12):41-46.
- [5] 龚斌,贾正春,熊雅俐,等.IGBT 的开关过电压保护电路研究[J].电工技术杂志,2002,(3):1-5.
- [6] 谭甜源,罗安,唐欣,涂春鸣.大功率并联混合型有源电力滤波器[J].中国电机工程学报,2004,24(3):41-45.
- [7] Hrimichi Ohashi. Snubber circuit for high power gate turn-off thyristors [J]. IEEE trans on Industrial Electronic, 1993 19 (4): 655-664.