

有源滤波器实用化保护电路与方法的研究

程汉湘, 田新良, 荆怀成

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 对电力有源滤波器实用化过程中的各种保护电路和方法进行了研究, 介绍了启动过程中电压电流渐变式控制的保护方案, 正常运行过程中逆变器主回路的过流、过压、 du/dt 、 di/dt 、过热等预防保护, 装置自身故障时刻的紧急保护, 并通过大量仿真和实验验证了上述保护电路和方法的可行性和效果, 确保了有源滤波器的安全稳定运行, 为实现其工业化奠定了基础。

关键词: APF; 启动过程; 正常运行; 装置故障; 保护

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0052-04

Research on Protection Circuit & Method of APF Application

CHENG Han-xiang, TIAN Xin-liang, JING Huai-cheng

(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This paper introduces the voltage and current gradual-change control Protection method of APF startup process, the preventable protection of over current, over voltage, du/dt , di/dt , and over heat are presented in normal process. At the same time, through a series of simulations and experiments, the feasibility and impact of the protection methods have been validated, safety & stability operation of APF has been ensured, and industrial base has been laid.

Key words: APF; startup; normal run; equipment fault; protection

0 引言

由于 APF 受到自身结构以及所采用主元件特性和参数的限制, 它们的保护系统显得比普通电力装置的保护更为复杂, 更难以实现。而对于要投入到电网中运行的装置而言, 其保护系统是一个至关重要的环节, 它直接影响到装置和系统的安全稳定, 是 APF 实用化的关键技术。

以和莱福电气有限公司合作研制的 100 kVA 并联型有源滤波器为基础^[1], 研究了有源滤波器实用化过程中各种保护电路和保护方法。装置选用 IXYS 公司的三相全桥型 MWI 225-17E9 IGBT, CONCEPT 公司的 2SD315AI 集成驱动模块, 变流器开关频率 16.2 kHz, 处理器采用 AD 公司的 ADMC401 芯片, 三相连接电感为 0.68 mH, 直流侧电容为 5 000 μ F, 稳定直流电压取 800 V, 系统电压为 380 V。针对装置启动时交流侧产生的大冲击电流, 提出了对变流器直流侧电压和补偿电流进行渐变式控制的保护方案^[2]; 在正常运行中, 设计了逆变

器主回路的过流、过压、 du/dt 、 di/dt 、过热等预防性保护; 另外, 介绍了装置自身发生故障时的紧急保护措施^[3]。

1 启动保护

并联型有源滤波器主电路结构见图 1, 并联型 APF 交流侧的电感很小, 直流侧有较大电容, 启动过程稍有不慎, 将在交流侧产生非常大的冲击电流, 导致直流侧电压波动很大, 对功率器件的安全造成威胁。有源滤波器启动过程分为硬启动和软启动^[4]。硬启动是指 APF 与系统实现物理连接的过程, 软启动是指 IGBT 触发脉冲从最初的封锁状态到解锁状态以及 APF 输出补偿电流的过程。在硬启动过程中, 主要采用限流电阻进行保护, 在软启动过程中, 采用对变流器直流侧电压和补偿电流进行渐变式控制的保护方案。

1.1 硬启动保护

硬启动包括接触器的合闸和限流电阻的切除, 在此过程中, 一定要先投入限流电阻对系统进行保护, 等直流侧电容电压通过二极管充电达到稳定值

收稿日期: 2009-06-10; 修回日期: 2009-08-22

作者简介: 程汉湘(1957), 男, 博士, 教授, 主要从事自动化设备的研究。

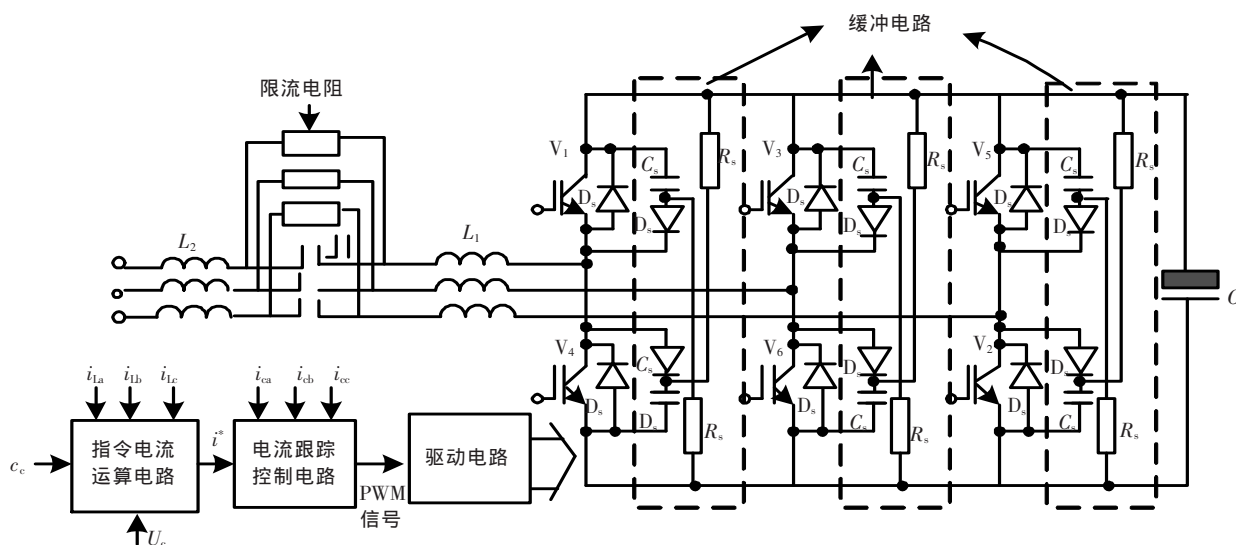


图1 主电路结构图

后再将限流电阻切除。未加限流电阻时,硬启动过程0~1s,装置交流测电流电压的仿真图见图2。可看出,系统会产生很大的冲击电流、电压。实用化过程中,建议采用25Ω左右电阻作为限流电阻。

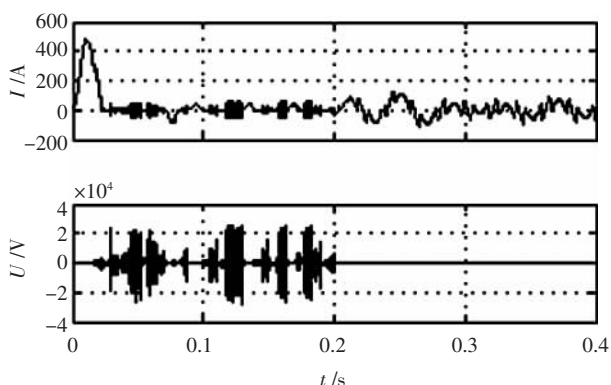


图2 硬启动过程

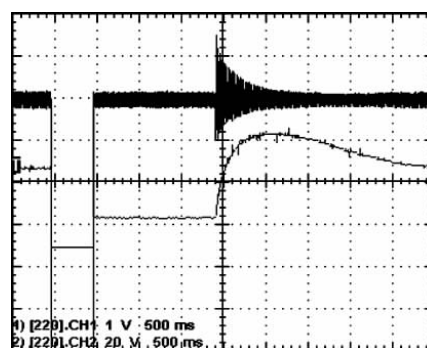


图3 软启动过程

1.2 软启动保护

软启动是指IGBT触发脉冲解锁,APF输出补偿电流。在系统研制试验期间发现,当有源滤波装置投入运行的瞬间,变流器直流侧电压、电流会出现很大的冲击,峰值可达初始值的3倍以上,见图3。该现象对变流器的电力电子元件造成了大的危险,试验过程中就出现了因为冲击电压超过变流器模块耐压范围而导致模块爆炸的现象。此外还会导致补偿装置不能正常投入运行。

APF直流侧电容平均电压的变化能够反映出主电路与负载间功率的转换情况。其关系为

$$P_f = CU_d \frac{dU_d}{dt} \quad (1)$$

$$\bar{P}_f = \frac{1}{T} \int_0^T P_f dt = \frac{1}{2T} C [U_d^2(T) - U_d^2(0)] =$$

$$\frac{C}{2T} \cdot \Delta U_d^2 \quad (2)$$

从式(1)、(2)可推导出

$$I_a = \frac{2}{U_a} [\bar{P}_f - \frac{C}{2T} \cdot \Delta U_d^2] \quad (3)$$

$$\Delta U_d^2 = \frac{U_a T}{C} [\frac{2\bar{P}_f}{U_a} - I_a] \quad (4)$$

由(3)、(4)式可知,系统侧电流 I_a 可以由直流侧电容电压 U_d 的变化量确定。当滤波装置启动时,由于直流侧电压 U_d 突然由未投入装置时的稳定值在极短的时间内上升至设定值,从而造成了较大的 ΔU_d 。由以上可知,变流器直流侧电压较大的变化值将导致 I_a 发生突然的跃变。而且非线性负载往往比APF装置先启动,所以在投入过程中,如果不对APF的指令电流进行限幅,APF会突加较大的谐波和无功补偿指令,产生很大的电流冲击。因此,在启动电压控制上,本装置采取减小装置启动瞬间直流侧电压变化量 ΔU_d 的启动方法。见图4,装置启动时,将变流器直流侧电压 U_d 与一较低设定的电压参考值 U_{ref} 进行比较,并将比较结果送入PI控制器。在装置启动的一段时间内,设定的电压参考值 U_{ref} 逐步由较低值按照启动时间段的设定增加到稳态设定值。

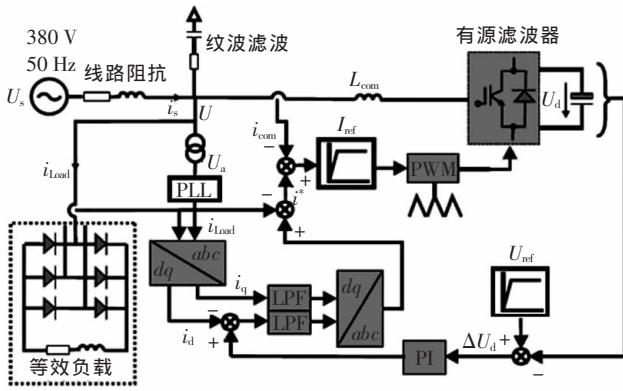


图4 有源滤波器启动控制

在启动电流控制上,采用电流渐变式控制的方法,见图4。系统需要补偿电流 I_{ref} 与限幅函数相乘后输入 PWM 脉冲发生器,在启动时间段 $0 \sim 2s$ 将限幅函数设置为斜坡函数,函数值从 0 慢慢上升到 1,此时系统已经稳定,函数值也一直保持为 1。

通过对系统启动过程进行保护,装置启动过程系统电流、直流侧电压的实验波形见图5。可看出,以上保护会有效减小启动过程对系统的扰动,降低装置启动时刻直流侧电压和系统电流的冲击值,使装置能够正常投入运行,加强系统的稳定性。暂态过程大约持续 6 个周波,即大约持续 120ms。至于启动时间,则应视系统参数情况而定。

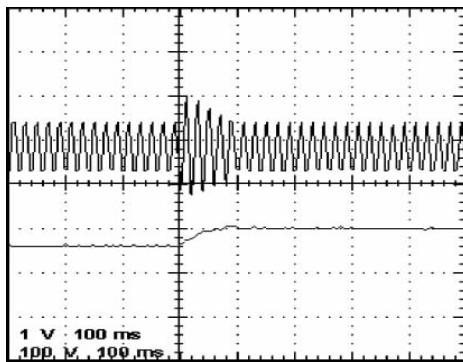


图5 投入保护启动过程

2 正常运行过程中的预防性保护

要想使 APF 装置安全可靠地工作,必须配备过流保护、桥臂直通保护、过压保护、 di/dt 保护、 du/dt 保护以及过热保护。

2.1 过压、 di/dt 和 du/dt 的保护措施

为了使 IGBT 关断时的过电压能够得到有效地抑制并减小 IGBT 的关断损耗,降低 du/dt 和 di/dt ,通常都需要给 IGBT 主回路设置关断吸收电路。本装置选择个别缓冲电路中的放电阻止型 RCD 缓冲电路,见图1。当 IGBT 关断时,C-E 间的电压上升,当电压上升超过直流侧电压时,缓冲电路开始动作,使 IGBT 的关断电压相对平缓。下面对缓冲电容 C_s 、缓冲

电阻 R_s 和缓冲二极管 D_s 的选择作详细的分析。

缓冲电容器的电容 C_s 为

$$C_s = \frac{LI_0^2}{(V_{CEP} - E_d)^2} \quad (5)$$

缓冲电阻 R_s 为

$$R_s \leq \frac{1}{2.3C_s f} \quad (6)$$

通过计算,选择 $1 \mu F/1200V$ DC 的高频薄膜电容作为缓冲电容, $25 \Omega/250W$ 的电阻作为缓冲电阻,选择富士电机生产的 ERG28-12 为缓冲二极管。当系统无吸收电路时,IGBT 两端电压变化仿真见图6,设置好上述吸收电路后,IGBT 两端电压变化见图7。可看出,IGBT 开关过程中的冲击电压得到了有效的抑制,关断浪涌电压和续流二极管恢复浪涌电压都得到了很好的控制,确保了系统的可靠稳定运行。

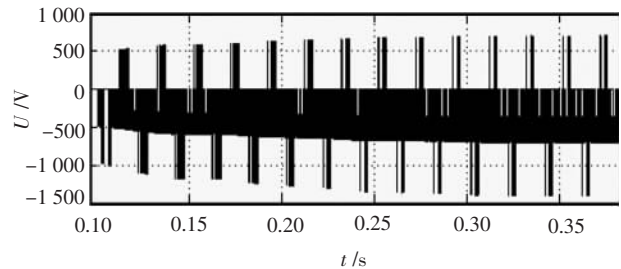


图6 无吸收电路 IGBT 两端电压

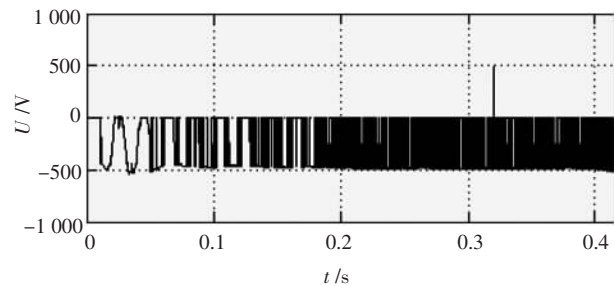


图7 有吸收电路 IGBT 两端电压

2.2 过流保护方法

目前,过流保护从检测电流方法上可分为分散就地式过流保护和集中式过流保护^[5],从关断方法上可采取硬关断和软关断,本装置采用集中式过流保护软关断。集中式过流保护就是通过一定的检测元件检测主回路中的电流,当检测到过流时,给出过流信号,无论哪路过流,均通过控制电路封锁 IGBT 逆变器的驱动信号,使整个电路停止工作。

过载保护和短路保护的整定值差别很大,如果用一种保护不利于实现精确保护,如电流远大于 IGBT 工作电流,但小于短路电流阈值,此时就不能通过检测 IGBT 的导通压降来判别,而要通过检测主回路输出电流来判断。实际中可以对这两种故障分别设置不同的检测方法来实现有效保护。

2.3 过热保护

IGBT 的过热保护主要包括散热器的设计和过

热检测保护电路^[3]。可以从散热器手册中查到适当的散热器尺寸和散热器面积，并且在IGBT的基板和散热器面上均匀涂上一层导热硅脂，提高IGBT的散热效率。图8为温度检测保护电路图。NTC-1、NTC-2端接IGBT温度检测端，TRIP端接控制端。

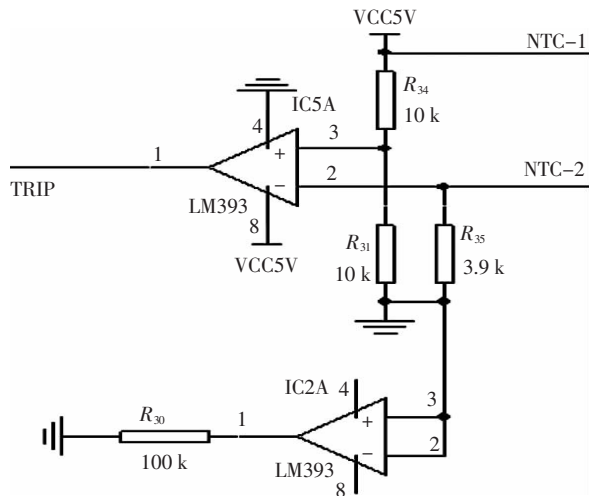


图8 过热保护电路

3 装置自身故障时刻的紧急保护

3.1 直流侧保护措施

针对直流侧短路及过压故障，通常采取以下措施作为保护^[5]。

(1)在直流侧电容器上安装快速熔断器以防止发生短路，电容器还需要过压保护，可附加氧化锌避雷器来防止过电压。

(2)设置检测电容器上的电压检测环节，当电压超过保护设定值时，控制器发出封锁脉冲关断开关器件。

3.2 桥臂直通故障保护措施

虽然驱动信号在形成时考虑了死区时间以防止桥臂直通故障，但在实际应用中，还有可能由于干扰造成桥臂直通故障，应有防止桥臂直通故障的保护措施。采用环流保护电路可以有效地限制这种故障下的短路电流和 di/dt 。环流保护电路见图9^[3]，它由一低压输出的隔离直流电源、限流电抗器 L 和二极极管 VD 组成。

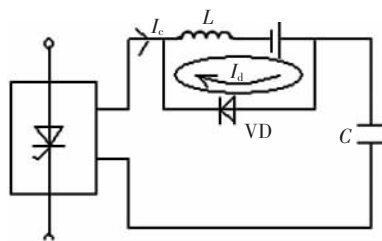


图9 环流保护电路图

当正常工作时， $I_c < I_d$ ，二极极管 VD 上流过电流

$I_d - I_c$ ，限流电感 L 对 I_c 不起作用；当故障时， $I_c > I_d$ ，二极极管截止， I_c 流过电感 L ，电感对 I_c 起一定的限流作用，因此，环流电流 I_d 应等于正常工作时的 I_c 峰值电流。可以看出，环流电路在装置正常工作时不起限流作用，而在发生短路时，由于 I_c 增大，至短路电流满足 $I_c > I_d$ ，此时相当于电感 L 自动投入运行，限制短路电流及其上升速度，这样为监测系统赢得了监测短路电流的时间，并有足够的时间封锁IGBT驱动脉冲，从而有效地实现了桥臂短路保护。

3.3 驱动电路故障保护措施

通常驱动器的故障可能造成两个后果：一是使IGBT不能关断；另一个是使IGBT不能开通^[5]。通过检测脉冲发生器发出的关断信号同栅、射电极电压反馈信号进行比较，同时考虑可能存在的延时，就可判断IGBT是否正常工作。驱动保护电路见图10。

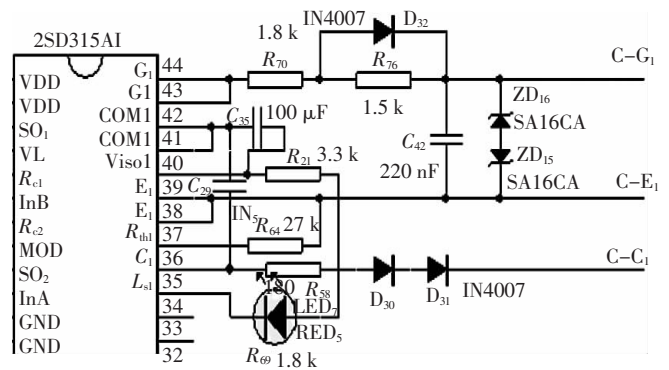


图10 驱动保护电路

4 结语

保证有源滤波装置发挥正常作用，实现安全稳定运行的保护技术是有源滤波装置项目中的一大课题，对其自身故障分析及主回路的保护技术的研究是实现其工业化运行的一大重要因素。对有源滤波器实用化保护电路与方法的研究，为APF安全稳定运行、实现其工业化奠定了基础，也对研制其他电力电子型控制装置保护系统具有参考意义。

参考文献：

- [1] 谭甜源, 罗安, 唐欣, 等. 大功率并联混合型有源电力滤波器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 41-45.
- [2] 商少锋, 朱东柏, 刘骥. 并联型有源电力滤波器的故障仿真及过流保护[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(1): 58-62.
- [3] DAVID D. Harmonic Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and other Nonlinear Loads[J]. IEEE Trans. on IA, 1979, 15(5): 453-458.
- [4] 耿攀, 戴珂, 方昕, 等. 大容量并联型有源电力滤波器的软启动技术[J]. 通信电源技术, 2006, 23(1): 12-15.
- [5] 陈玮, 王彤, 曾继伦. 电网短路故障时并联型电力有源滤波器的过流保护[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 59-62.