

±50 kvar 静止无功发生器的软硬件设计

黄振跃, 孙玉坤, 任明炜

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 根据中、低压配电系统或工业负荷补偿的要求, 提出了基于 DSP 的静止同步补偿器(STATCOM)软硬件的设计方法, 并在此基础上研制了一台±50 kvar STATCOM 装置。重点介绍了装置的主电路设计、基于 TMS320F2812 DSP 的闭环反馈间接电流控制器的硬件结构和控制系统的软件设计以及 STATCOM 的保护电路设计。实验结果表明, 基于该设计方法的±50 kvar STATCOM 装置有着较好的无功补偿效果, 具有较好的工程应用前景。

关键词: 静止无功发生器; 主电路; 控制; DSP; 实验

中图分类号: TM922.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)06-0034-06

Development of a ±50 kvar Static Synchronous Compensator

HUANG Zhen-yue, SUN Yu-kun, REN Ming-wei

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract: According to the requirement of middle- and low-voltage power distribution system or industrial load compensation, this paper presents a software and hardware design method for the STATCOM. The emphasis is placed on the main circuit design, the TMS320F2812 DSP based hardware structure design of closed-loop feedback indirect current controller, the software design of control system, and the protective circuit design of STATCOM. A ±50 kvar STATCOM is developed based on the proposed method. The experimental result shows that every performance index of STATCOM meets the expectation, and the developed STATCOM has better prospect in engineering application.

Key words: static synchronous compensator; main circuit; control; DSP; experiments

0 引言

随着工业自动化水平的不断提高, 用户对供电质量的要求越来越高。目前, 电力系统无功补偿容量不足, 谐波污染日趋严重, 尤其是冲击性无功负荷的存在, 不仅增加了各种损耗, 而且严重影响了供电质量。因此, 谐波抑制和无功功率补偿已经成为电力电子技术和电力系统等领域所面临的一个重大课题, 受到越来越多的关注^[1-2]。相比于传统无功补偿装置, 静止同步补偿器(STATCOM)具有响应速度快、调节范围广、装置体积小、补偿电流波形品质高等优点, 已经成为世界上静止无功补偿发展研究的方向。

将静止无功发生器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)技术应用于中、低压配电系统或工业负荷补偿中, 在国内目前相对较少, 且技术不成熟。笔者针对中、低压配电系统和工业负荷的特

点, 提出了±50 kvar STATCOM 装置的软硬件设计方法。实验结果表明, 设计的 STATCOM 装置无功补偿效果优良, 具有较好的工程应用前景。

1 装置的总体结构和主电路参数设计

1.1 装置的整体结构

笔者设计的 STATCOM 硬件系统基本结构见图 1。STATCOM 系统主要由主电路和控制电路两部分组成。主电路的作用是根据需要补偿的指令电流产生相应的补偿电流 i_c 。控制电路的主要作用是检测出负载电流 i_L 中的无功及谐波电流分量, 通过 DSP 计算出逆变器交流侧期望电压, 经过 PWM 脉冲调制算法输出驱动 STATCOM 的 PWM 波。

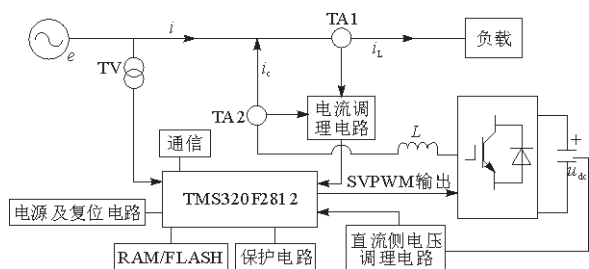
1.2 主电路开关器件的选择

为简化设计, 功率器件选用智能功率模块(Intelligent Power Module, 简称 IPM)。参数主要根据装置的容量和直流侧电压的大小来选择。一般情况下, 为了保证器件的可靠工作, 器件的耐压水平

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2009-12-17

基金项目: 江苏大学高级人才专项基金资助项目(07JJD036); 省工业攻关项目(BE2007069)。

作者简介: 黄振跃(1971—), 男, 讲师, 主要从事谐波抑制、无功补偿及电力电子技术应用的研究。



e—交流电源,用户负载为非线性负载;TA₁、TA₂—电流传感器;
TV—电压传感器;L—连接电抗器。

图1 系统总体结构框图

应选择其工作中可能承受的最大值的两倍。直流侧电压 $U_d = 2.34 U$, U 为电源相电压 220 V, 确定 U_d 为 513 V, 所以耐压水平选择为 1 026 V 为宜。这里取 1 200 V。下面确定额定电流大小。

逆变器输出的电压最大值 U_{imax} 为

$$U_{imax} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times U_d = 0.866 \times 513 = 444 \text{ V} \quad (1)$$

逆变器输出电压实际的有效值 U_i 为

$$U_i = \frac{U_{imax}}{2} \times \alpha \times \beta = \frac{444}{2} \times 0.95 \times 0.95 = 283 \text{ V} \quad (2)$$

式(2)中,考虑的最大调制度 $\alpha = 0.95$;考虑死区影响产生的系数 $\beta = 0.95$ 。所以在 $\pm 50 \text{ kvar}$ 容量下的输出线电流 I_N 近似计算为

$$I_N = \frac{50\ 000}{U_i \times \sqrt{3}} = \frac{50\ 000}{283 \times \sqrt{3}} = 102 \text{ A} \quad (3)$$

通态峰值电流 I_m 为

$$I_m = \sqrt{2} \times I_N = \sqrt{2} \times 102 = 144.2 \text{ A} \quad (4)$$

考虑 1.5~2 的安全系数,取额定电流为 300 A。

实际选择 300 A、1 200 V 的 IPM 模块。

1.3 直流侧电容的选取

由直流侧电压波动范围和补偿容量,根据能量守恒和经验推导得到工程应用上估算电容大小的经验公式为^[3]

$$C = \frac{0.2 \times I_N}{\omega \times U_{dc} \times k} \quad (5)$$

式(5)中,0.2 为补偿能量系数; k 为允许直流电压波动系数,取 0.5%~1%; U_{dc} 为直流电容电压,取 513 V; ω 为系统电源频率,为 100π 。 k 取 0.6%时, $C = 2.7 \text{ mF}$,取电容值为 2.7 mF。

1.4 连接电感的选择

对于连接电感的选择必须满足无功发生器对补偿电流的跟踪能力的要求,所以电感不能过大,过大会使跟踪电流变化缓慢,会导致跟踪电流和参考电流之间的误差较大。但是当电感选择太小,虽然动态相应快,但实际补偿电流相对于期望补偿电流具有较大的超调,形成毛刺且容易造成系统震荡

和工作不稳定。根据文[4]可以确定

$$L \frac{di_h(t)}{dt} + R \cdot i_h(t) = u_{dc}(t) - u_s(t) \quad (6)$$

式(6)中, U_s 为负载侧交流电压值; U_{dc} 为直流侧电压值; $di_h(t)/dt$ 为参考电流的变化率。忽略电阻大小,可以得到 L 为

$$L \leq \frac{U_{dc} - U_{lm}}{\max \left| \frac{di_h}{dt} \right|} \quad (7)$$

在电感值的选择时,可参考工程上推导出的经验公式:

$L \leq \frac{4 \times U_{dc}}{9 \times \omega \times i_{max}}$,考虑到 STATCOM 同时补偿谐波成份,假设补偿到 15 次谐波,则最大电感值 L 为

$$L \leq \frac{4 \times 513}{9 \times 2 \times \pi \times 15 \times 50 \times 102} = 0.47 \text{ mH} \quad (8)$$

所以选取连接电感值为 0.47 mH。

2 STATCOM 的控制系统设计

TMS320F2812 数字信号处理器是 TI 公司最新推出的 32 位定点 DSP 控制器,是目前控制领域最先进的处理器之一。TMS320F2812 芯片基于 C/C++ 高效 32 位 TMS320C28x DSP 内核,并提供浮点数学函数库,从而可以在定点处理器上方便地实现浮点运算。在 STATCOM 控制系统中,F2812 主要完成采样、控制算法的计算和 PWM 脉冲的生成^[5]。

2.1 相电压 e_a 过零检测电路与倍频电路

以 a 相为例,系统的过零检测电路见图 2。它的输入端为经过霍尔电压传感器变送后的网侧电压信号,通过变换、电压跟随、低通滤波、过零比较、电平变换后,输出幅值为 3.3 V 的同步方波信号,送入 F2812 的 EXINT1 口,通过定时器测定出两个上升沿之间的时间,则可测出正弦信号过零点之间的时间,从而得到电网电压信号的周期。其中电压跟随器是为了提高电路的输入阻抗。

将检测出的电网基波过零信号引入 256 倍频电路,产生一个 256 倍频的方波信号送到 F2812 的 CAP3 口,启动 A/D 转换,这样 A/D 转换电路一个周期中采样 256 次,从而保证了测量的精度。

电网基波过零信号的 256 倍频电路由 CMOS 数字集成锁相环 CD4046 和 12 位二进制计数器 CD4040 组成,见图 3。CD4046 内部仅集成有鉴相器和压控振荡器,没有环路滤波器和分频器。采用 RE804 和 CE802 形成简单的片外积分环路滤波器,并用 CD4046 形成 $N=2^8=256$ 分频器,则工作在锁定状态的电路可将电网电压的 1 个周期严格等分为 256 份,从而产生了一个 256 倍频的方波信号。

2.2 闭环反馈的 STATCOM 电流间接控制

将需补偿的电流参考值 I_{ref} 与 STATCOM 吸收的电流值 I_Q 进行实时比较, 对其差值进行比例积分调节, 产生的 δ 值控制 STATCOM 的脉冲触发。这种控制方法通过对 STATCOM 吸收的无功电流 (或无功功率) 进行反馈控制, 从而使无功电流的控制精度和响应速度都得到显著提高。原理图见图 4。

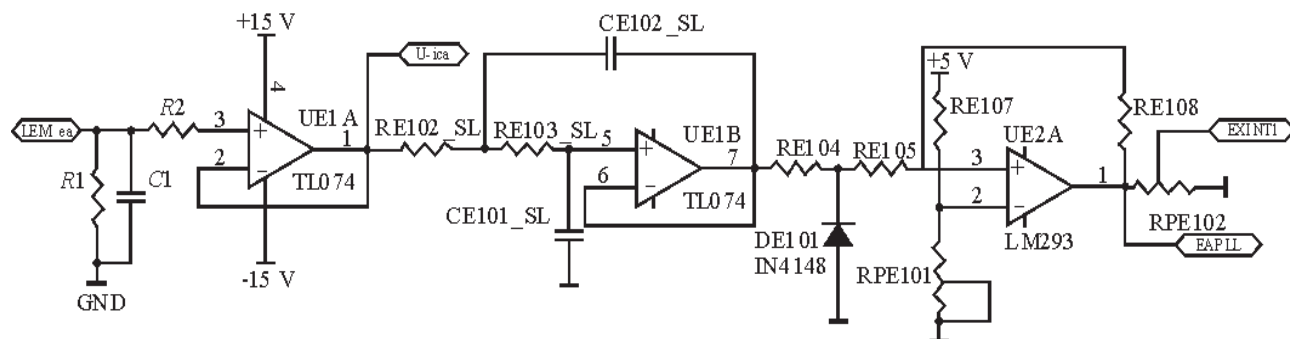


图 2 相电压 e_a 过零检测电路

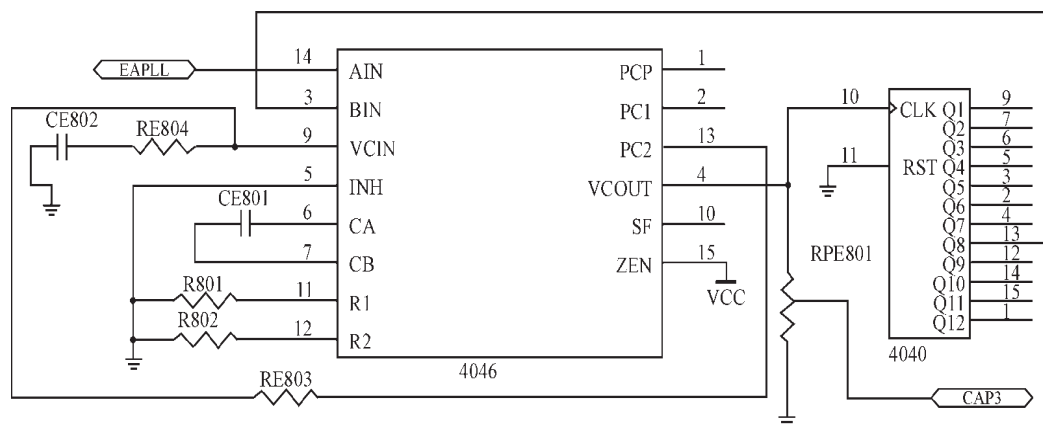


图 3 过零信号的 256 倍频电路



图 4 闭环反馈控制的电流间接控制方法

制 VT3 和 VT4; CMPR3 与 T_1 比较产生的信号 PWM5 控制 VT5 和 VT6。

3 STATCOM 保护电路设计

3.1 STATCOM 过流保护

经过流保护电路见图 5。其功能是将三相电压整流以后进行运算, 如果任意相电流超标则启动保护信号, 触发 DSP 的 PDPINTA 中断, 封锁 PWM 波脉冲^[6-9]。

3.2 IPM 的自保护功能

在 STATCOM 系统保护电路中, IPM 的保护最为关键, IPM 内置有驱动和保护电路, 用以防止系统相互干扰或者过载时损坏功率芯片。虽然在 IPM 模块中集成有过压保护电路, 但为了提高系统的可靠

2.3 PWM 电路设计

TMS320F2812 的外设 EVA 中共有 3 个完全比较单元 CMPR₁~CMPR₃。为使信号同步, 所有 PWM 均选择定时器 T1 为时基。通过比较寄存器 MPR1 与 T1 比较, 产生两路互补带死区的信号 PWM1 和 PWM2, 分别控制 VT1 和 VT2; CMPR2 与 T1 比较产生两路互补带死区的信号 PWM3 和 PWM4, 分别控

性, 还必须针对系统可能出现的故障设计片外的过压保护电路。

考虑到中国电网电压的线性度较差, 容易导致直流母线过压, 因此必须在系统中设置过压保护, 电路见图 6, 当直流母线电压大于正常电压的 10% 时, OV 输出为低电平。

3.3 直流侧过流保护

正常工作时, STATCOM 直流侧母线上的电流比较小。但当发生直流侧短路或上下桥臂直通时, 直流电流会很大, 这时要对系统保护的最好手段便是切断直流回路, 为实现这一目的, 在直流侧串联一个快速熔断器。

3.4 系统整体保护电路

当系统出现 IPM 故障 (FO)、系统过压 (OV)、系统过流 (OC) 中任何一种故障时, 必须把保护信号经过逻辑处理后与 DSP 的 PDPINT 管脚相连, 当 PDPNIT 收到低电平信号, DSP 将做相应的中断处

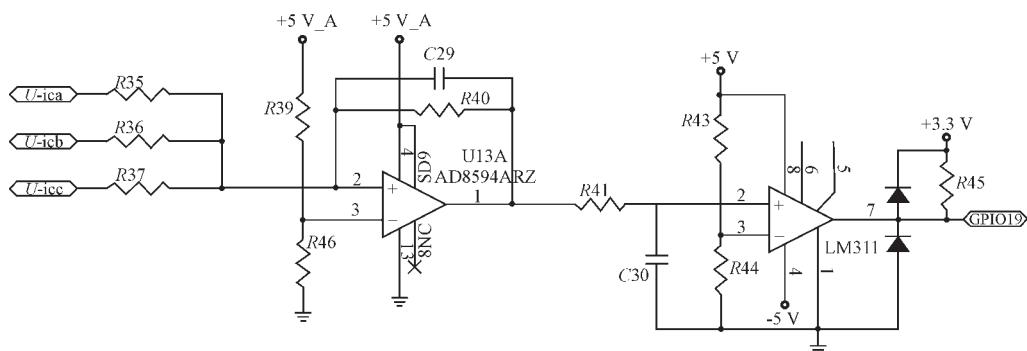


图 5 STATCOM 的过流保护

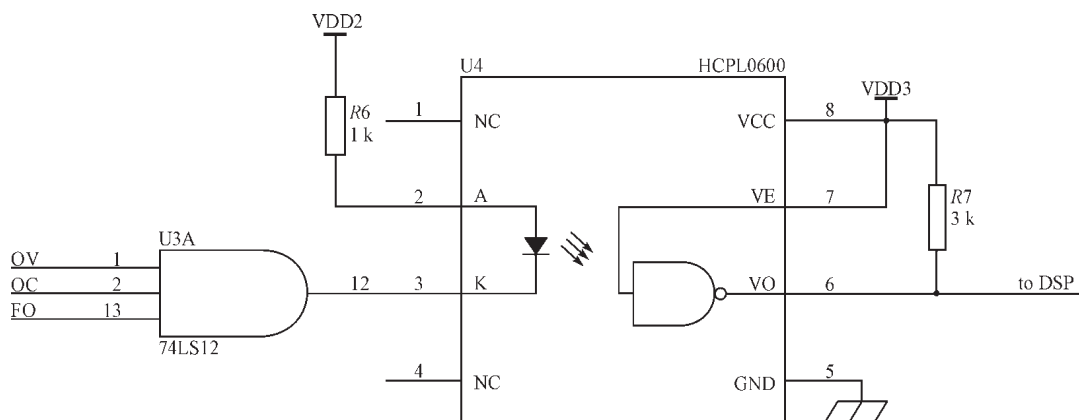


图 6 电压保护电路

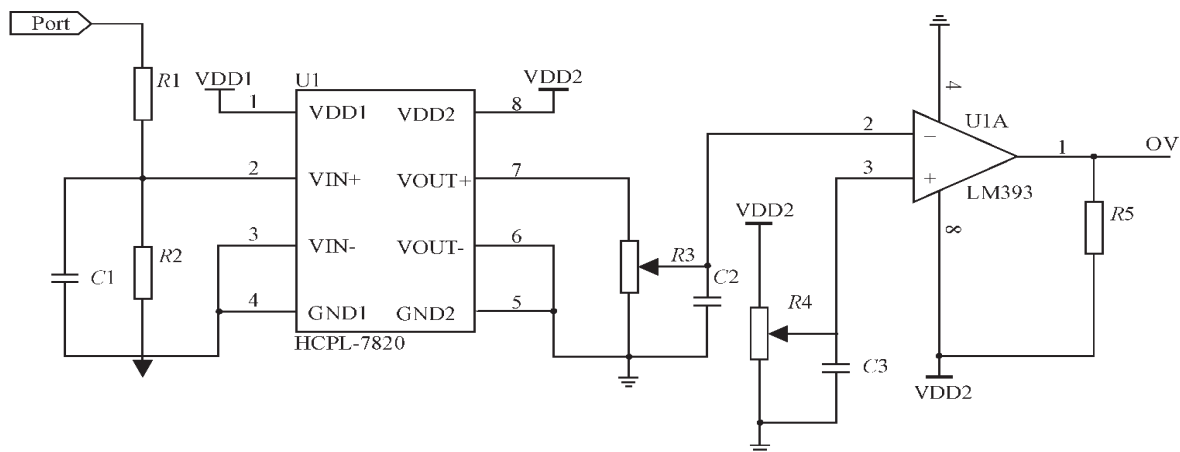


图 7 系统整体保护电路

理,立即封锁 PWM 输出及停止运行。整体系统保护电路见图 7。

4 软件设计

4.1 主程序设计流程

主程序流程图见图 8。程序启动前对 DSP 进行必要的初始化设置,经初始化设置后程序不断判断有无外部中断(过零检测)、捕获中断(过零检测信号 256 倍频后送入 CAP₃ 口)、ADC 中断以及故障保护中断。如果没有中断,程序不断循环等待直到有中断的到来。

4.2 外部中断 EXINT1 子程序和捕获中断子程序

外部中断子程序流程图见图 9。其主要功能是:

外部过零脉冲信号触发 F2812 的外部中断 EXINT₁,中断子程序设置过零标志,同时复位正、余弦表。

外部过零脉冲信号经过倍频电路后变成 256 倍频的高频信号送入 CAP₃ 捕获单元,用来启动 ADC 转换并移动正余弦表指针,使得从正余弦表中取出的数据的相位与采样电压相位同步,同时 A/D 转换电路一个周期中采样 256 个点,保证了电流波形的精度。CAP₃ 中断程序流程见图 10,为防止指针走到未知单元,检测数据指针位置是否到正弦表尾,程序设计当指针走到表尾软件将指针复位至表头,将误差控制在一个周期内。

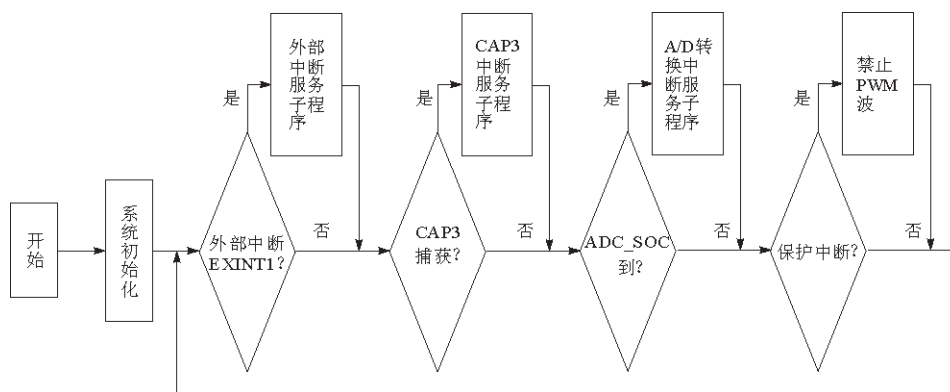


图8 主程序设计流程图

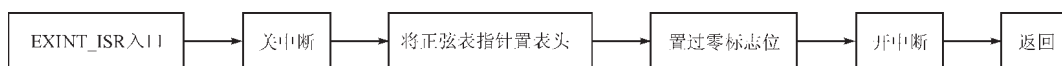


图9 外部中断子程序流程

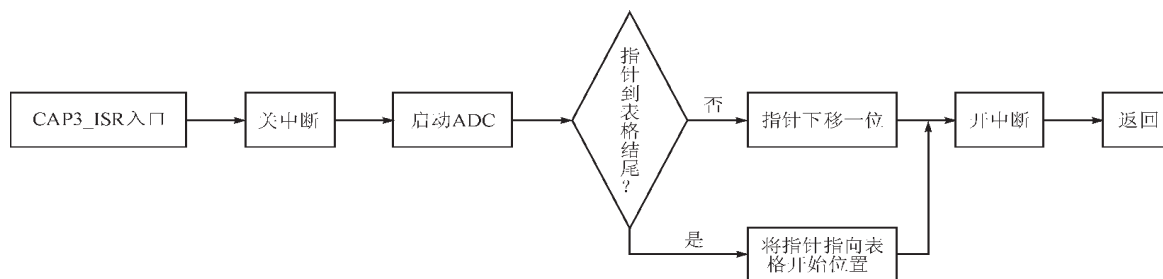


图10 CAP3 中断程序流程

4.3 A/D 中断服务子程序

每次 A/D 转换结束, 进入 ADC_ISR 服务子程序。该中断程序需要完成指令信号的运算、反馈信号的处理以及 SVPWM 脉冲输出, 是整个控制系统功能实现的关键。ADC 中断程序流程图见图 11。进入 ADC 中断服务程序入口后, 首先进行清中断、读取 A/D 转换结果, 进行指令信号运算, 然后送入控制器调节得到期望交流侧电压矢量, 最后由 SVPWM 脉冲调制得到 PWM 脉冲驱动 STATCOM。流程图见图 12。

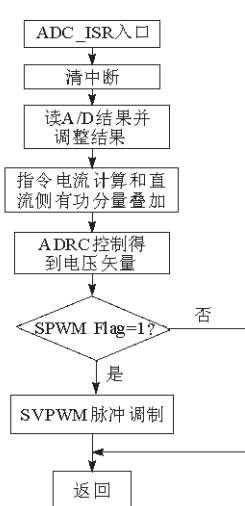


图11 ADC 中断程序流程图

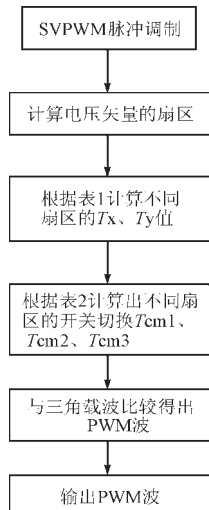


图12 SVPWM 波调制流程图

基于瞬时无功功率理论的指令运算流程见图 13。从 ADCRESULT 寄存器中读出所采集的信号数据量, 经过处理后得到电流的实际值, 然后对这三相电流数字量进行 C_{32} 变换、 C 变换得到 i_p, i_q 。由于设计补偿无功电流的同时补偿谐波电流, 将 i_p 进行低通数字滤波得到有功电流的直流分量, 将其加上直流侧控制补偿的有功分量后进行 C, C_{23} 变换, 得到三相电网电流的基波有功分量。只需要从电网电流的总量中减去处理得到的基波有功分量即可得到基波无功分量及谐波分量之和。

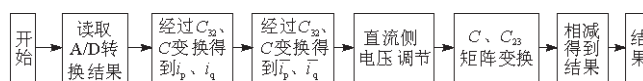


图13 指令运算流程图

5 实验结果

根据以上的软硬件设计方案, 课题组制作了一台基于 IPM 的 ± 50 kvar STATCOM 装置实验用样机, 其实物照片见图 14。

利用前节所述的控制电路设计思路, 进行了简单的试验研究, 由于受实验室条件的限制, 实验以原理性验证为目的, 没有进行装置的满额运行。实验波形见图 15, 图 15(a) 为补偿前电网电压与电网电流波形, 图 15(b) 为补偿后电网电压与负载电流波形,

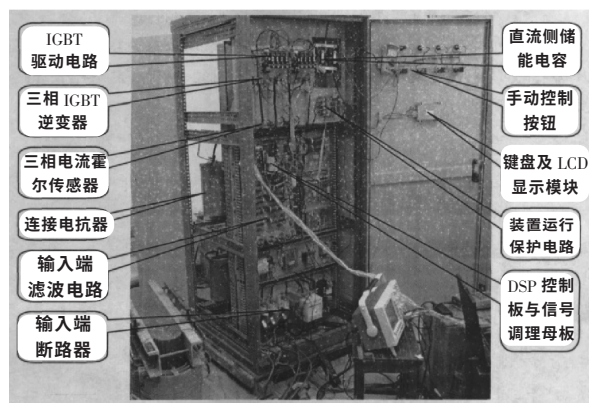
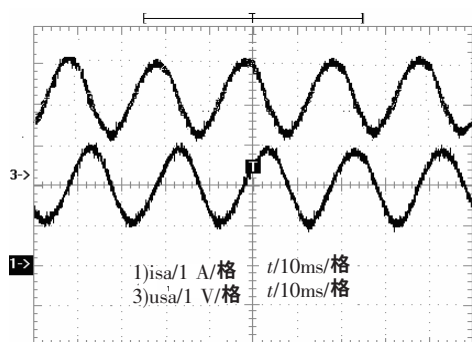
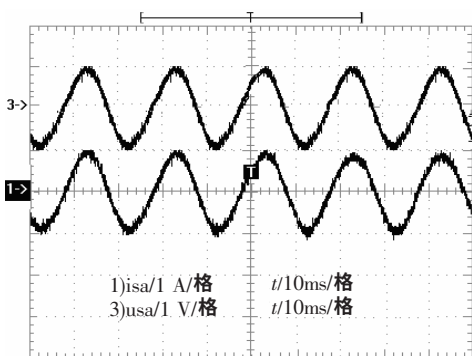


图 14 STATCOM 装置样机



(a) 补偿前电网电压与电流波形



(b) 补偿后电网电压与电流波形

图 15 实验结果波形

可以清晰地看到补偿前电网电流与电压之间相位差近 90° , 补偿后电压电流消除了相位差, 达到了同相位, 补偿效果较为明显。

6 结语

以中、低压配电网的无功补偿为目的, 介绍了 ± 50 kvar STATCOM 装置的研制, 阐述了装置的主电路设计、基于 TMS320F2812 DSP 的数字控制器的硬件结构和控制系统的软件设计。实验结果表明, 基于该设计方法的 STATCOM 装置无功补偿效果优良, 能维持公共连接点电压稳定在给定值附近, 具有良好的工程推广应用前景。

参考文献:

- [1] 王仲鸿, 沈 裴, 吴铁铮. FACTS 技术研究现状及其在中国的应用与发展[J]. 电力系统及其自动化, 2000, 24(23): 1-6.
- [2] 许树楷, 宋 强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式 DSTATCOM 的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-143.
- [3] 李海鹏. 新型静止无功发生器控制器的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [4] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 魏文辉, 刘文华, 宋 强, 等. 基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23-28.
- [6] YUAN Zhi-chang, SONG Qiang, LIU Wen-hua, et al. Development of Ascaled STATCOM Prototype Based on 21-level Cascade H-Bridge Inverter [C]. Proceeding of IECON'05, Raleigh, 2005.
- [7] 鲁 庆, 张健文, 苏利雅, 等. 对称分量法控制的静止无功补偿装置设计[J]. 电力电容器, 2007, 28(3): 26-28.
- [8] 蒋日升, 唐永奎. TCC 型低压静止无功补偿装置 [J]. 电力电容器, 2008, 29(1): 17-19.
- [9] 王云杰, 曾国宏, 郭文帅, 等. 基于双 DSP 的无功与谐波自动补偿装置的设计[J]. 电力电容器, 2006, 27(2): 4-7.

(上接第 33 页)

- [13] SUDA T. Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of an Artificially Polluted Suspension Insulator [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(4): 705-709.
- [14] EL-HAG A H, JAYARAM S, CHERNEY E A. Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of Silicone Rubber Insulators[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Canada, 2001: 597-600.
- [15] SUDA T. Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 481-487.
- [16] GB/T 4585—2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S].
- [17] 徐 涛, 吴光亚, 周文俊. 交流特高压输电线路绝缘子串污秽耐压特性试验[J]. 高压电技术, 2007, 33(7): 9-13.
- [18] 马 仪, 姜虹云. 求取绝缘子串 50% 耐受电压的直流人工污秽试验[J]. 云南电力技术, 2003, 31(2): 35-37.
- [19] 王 黎, 李卫国, 戴子勤, 等. 绝缘子泄漏电流预测方法综述[J]. 电瓷避雷器, 2008(2): 17-21.
- [20] 端木林楠, 文远芳, 黄 斌, 等. 绝缘子泄漏电流与脉冲电流特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2008(6): 8-12.
- [21] 文 博, 张亚婷, 王清亮, 等. 污秽不均匀性对绝缘子电场的影响[J]. 电瓷避雷器, 2008(3): 13-16.