

基于 DSP 和 ARM 的磁阀式可控电抗器控制系统^{*}

王 浩, 陈 乐, 陈国柱

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了对磁阀式可控电抗器(MCR)进行有效的控制和监测,以 DSP 和 ARM 数字处理器为核心,设计了 MCR 的控制系统。系统采样负载电压、电流,由 dq 算法得到需要补偿的无功功率,再由 DSP 控制算法输出对应晶闸管导通角的触发脉冲,进而调节 MCR 无功补偿量。基于 ARM 系统建立了界面友好的人机界面系统,供用户设置系统运行参数,查看系统运行数据,保存和查询故障记录。实验结果表明该系统可靠、实用。

关键词: 磁阀式可控电抗器;控制策略;数字信号处理;ARM

中图分类号:TM714.3

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)03-0103-04

Controller of magnetic-valve controllable reactor based on DSP and ARM

WANG Hao, CHEN Le, CHEN Guo-zhu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to effectively accomplish control and detection of magnetic-valve controllable reactor(MCR), a control system with digital signal processing(DSP) and ARM as the core was designed. Load current and voltage was sampled, and the reactive power for compensation was gotten, and through dq algorithm thyristor trigger pulse which adjusted MCR reactive power output was generated by DSP. Human-machine interface system for users was established based on ARM to set the system operating parameters, view the system operating datas, record and access failures. Experimental results show that the system is reliable and practical.

Key words: magnetic-valve controllable reactor(MCR); control strategy; digital signal processing(DSP); ARM

0 引 言

无功功率对电气设备建立和维持交变磁场起着至关重要的作用。电力系统的负荷总体表现为感性,若负荷滞后的感性无功功率不能得到补偿,电网功率因数会随之降低,电网运行电压会因之下降,因而实现无功功率在额定电压下的平衡是保证电压质量的基本条件^[1]。当前广泛应用的无功功率补偿装置是静止无功补偿器(SVC),主要包括晶闸管控制电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)、晶闸管控制变压器(TCT)等。上世纪 80 年代中期前苏联学者提出了磁阀式可控电抗器(MCR),通过晶闸管的导通和关断获得控制电路所需的直流电流,进而调节阀体小面积段铁芯的饱和程度,达到平滑调节电抗器容量(即无功功率)的

目的。磁阀式可控电抗器结构简单、成本低廉、控制简洁、维护方便、可靠性高,目前已成功应用于中高压电网无功控制^[2],电气化铁路动态无功功率补偿系统^[3-4],高压电机磁控软启动中^[5]。“ARM + DSP”的双核结构在检测领域已有应用^[6-7],但双核结构与控制相关数据的交互性不强,同时界面未移植操作系统,界面程序功能扩展性不足。

本研究首先深入分析磁阀式可控电抗器工作原理和控制策略,然后基于 DSP 和 ARM 设计数字控制平台相关硬件和软件,最后进行 MCR 模拟运行。

1 磁阀式可控电抗器原理及数学模型

MCR 原理图如图 1 所示,单相磁阀式可控电抗器是四柱铁芯,主铁芯分裂成半铁芯 1 和半铁芯 2,通过

旁轭建立交流磁通回路。在每个半铁芯上都有一小段面积减小的部分(面积为 A_{bt} , 长度为 l_t), 其余部分面积为 A_b , 长度为 l ($A_b > A_{bt}$)。每个半铁芯上下两部分都有抽头比为 $\delta = N_2/N$ 的抽头、线圈等效电阻 R 。通过调节晶闸管 VT1 和 VT2 的导通关断(VT1 在 i 的正半周导通, VT2 在负半周导通)经自身耦合建立直流励磁, 进而调节铁芯的饱和程度 β , 改变 MCR 等效电抗, 达到调节无功功率的目的。直流励磁的大小通过晶闸管触发角 α 调节, α 越小直流励磁越大, 铁芯也就越饱和, MCR 等效电抗越小, 容量越大, 提供的无功电流越大。

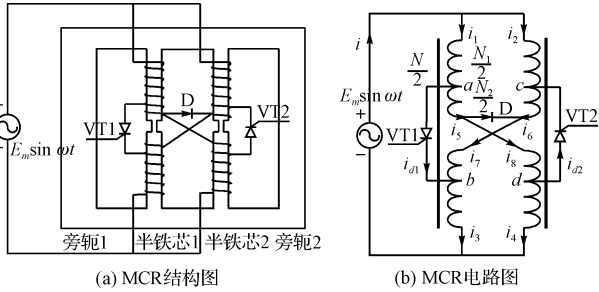


图 1 MCR 原理图

由于 MCR 正常工作状态下两个半铁芯只有面积减小的一段饱和, 可知半铁芯的磁势 F 主要降落在面积减小一段。如图 2 所示, 设小面积段铁芯长度和面积为 l_t 和 B_t 。由参考文献[8], 可得 VT1 导通, D 和 VT2 截止时的磁路方程如下:

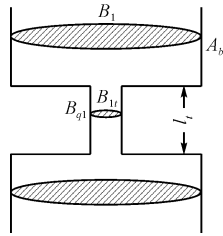


图 2 MCR 半铁芯 1 的磁路结构图

$$\frac{dB_1}{dt} = \frac{E_m \sin \omega t}{(1-\delta)NA_b} - \frac{Rf(B_{1t})l_t}{(1-\delta)N^2A_b} + \frac{\delta Rf(B_{2t})l_t}{(1-\delta)N^2A_b} \quad (1)$$

$$\frac{dB_2}{dt} = \frac{(1-2\delta)E_m \sin \omega t}{(1-\delta)NA_b} + \frac{Rf(B_{1t})l_t}{(1-\delta)N^2A_b} - \frac{\delta Rf(B_{2t})l_t}{(1-\delta)N^2A_b} \quad (2)$$

式中 $f(B)$ —相应铁芯磁化后的磁感应强度 H 。

因为半铁芯 1 的磁势 $F_1 \approx f(B_{1t}) \cdot l_t$, 同理半铁芯磁势 $F_2 \approx f(B_{2t}) \cdot l_t$, 若设 $F_1 + F_2 = Ni$, 则由式(1)、式(2)相加并化简得:

$$E_m \sin \omega t = \frac{N}{2} A_b \left(\frac{dB_1}{dt} + \frac{dB_2}{dt} \right) + \frac{R}{2} i \quad (3)$$

经过推导可知, 式(3)同样适用于 D 导通、VT1 和 VT2 关断以及 VT2 导通、D 和 VT1 关断的情况。

将式(1)、式(2)相减并化简可得 VT1 导通, D 和 VT2 关断时有:

$$\frac{\delta}{1-\delta} E_m \sin \omega t = \frac{N}{2} A_b \left(\frac{dB_1}{dt} - \frac{dB_2}{dt} \right) +$$

$$\left(1 - \frac{2\delta}{1-\delta} \right) \frac{R F_1 - F_2}{2 N} \quad (4)$$

同样可得 D 导通、VT1 和 VT2 关断以及 VT2 导通、D 和 VT1 关断时的电路方程如下:

$$0 = \frac{N}{2} A_b \left(\frac{dB_1}{dt} - \frac{dB_2}{dt} \right) + \frac{R}{2} \frac{F_1 - F_2}{N} \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{1-\delta} E_m \sin \omega t = \frac{N}{2} A_b \left(\frac{dB_2}{dt} - \frac{dB_1}{dt} \right) + \left(1 - \frac{2\delta}{1-\delta} \right) \frac{R F_2 - F_1}{2 N} \quad (6)$$

由式(3)~式(6)可得磁阀式可控电抗器的等效数学模型如图 3 所示, 其中:

$$k(t) = \begin{cases} 1, & \text{VT1 导通, D 和 VT2 关断时} \\ 0, & \text{D 导通, VT1 和 VT2 关断时} \\ -1, & \text{VT2 导通, D 和 VT1 关断时} \end{cases}$$

由图 3 可知, MCR 本质上类似于一个由直流控制回路和交流工作通路组成、控制绕组串联反接、工作绕组串联顺接的可控饱和电抗器。

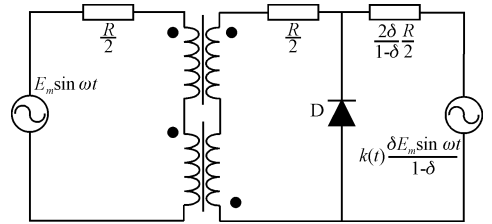


图 3 单相 MCR 的等效数学模型

2 磁阀式可控电抗器控制策略

三相 MCR 的原理接线图及控制框图如图 4、图 5 所示, 本研究采用开环控制, 在满足精度基本要求的前提下响应速度更快, 且控制简单, 避免了闭环控制在未知扰动时的不稳定问题。三相 MCR 吸收滞后的感性无功功率, 滤波支路可过滤 5、7、11 及 13 次谐波并吸收容性无功。总的无功功率补偿为两者代数和。

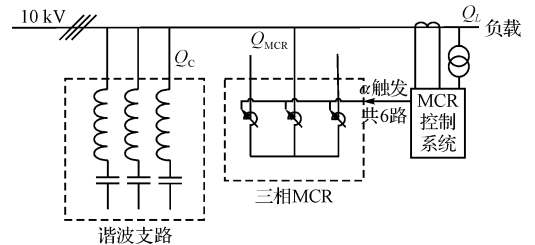


图 4 MCR 原理接线图

控制策略的核心是通过改变晶闸管控制角 α 来改变铁芯小面积段的饱和度 β 。根据文献[8], 本研究设额定饱和度 $\beta_n = 2\pi$, 则晶闸管触发角 α , 饱和度 β 及工作基波电流标幺值 I_{lm}^* 之间的关系为:

$$\begin{cases} I_{1m}^* = \frac{1}{2\pi}(\beta - \sin \beta) \\ \cos \alpha = \frac{2}{\pi}(\sin \frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2}\cos \frac{\beta}{2}) - 1 \end{cases} \quad (7)$$

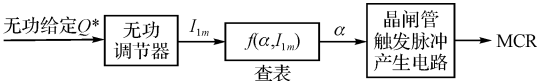


图5 MCR 开环控制框图

为保证式(7)的可靠性,笔者按第1节MCR模型在 Matlab 中建立了仿真模型,主要仿真参数为容量 $Q=1\text{ MVar}$,工作电压为线电压 10 kV ,工作电流额定有效值为 $I_{rms}=173.2\text{ A}$,抽头比 $\delta=0.024$,回路损耗电阻 $R=5\text{ }\Omega$ 。根据式(7)绘制的触发角与工作电流基波标么值关系图如图6所示。通过改变 Matlab 仿真模型中的触发角 α ,从 $0^\circ\sim180^\circ$ 内选取 19 个不同的 α 值,得到相应的工作电流标么值 I_{1m}^* ,在图6中绘出叉号所示的点。可见理论关系式与仿真模型能够很好地吻合。

控制策略实现:首先采样三相电流、电压,经 dq 变换获得负载侧的有功和无功功率,结合目标功率因数 $\cos\varphi$ (如设为 1) 得到无功功率给定 Q^* ,经变换后得到对应的 MCR 基波电流 I_{1m} 。由式(7)可得 MCR 的触发角 α 与 MCR 基波无功电流 I_{1m} 之间存在的对应关系,由此建立数据表,通过 DSP 查表输出相应触发角度 α ,经晶闸管触发脉冲产生电路触发晶闸管。

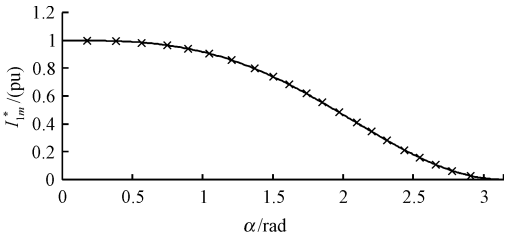


图6 触发角与工作电流基波标么值关系图

3 控制系统硬件设计

基于上述 MCR 数学模型和控制方法,本研究建立了基于 DSP 和 ARM9 的控制系统。设计的核心为“以 DSP 为主,ARM 为辅”的双核主从结构,外围辅以采样环节。硬件平台结构如图7所示,MCR 设备的电压、电流等电信号经过采样电路、滤波电路、电平转换和 A/D 转换之后送入 DSP,计算后实现晶闸管触发脉冲产生及故障处理等功能。DSP 和 ARM 之间的数据通讯由 RS485 实现,电压、电流、有功功率、无功功率和晶闸管控制角等数字信号在既定的通讯协议框架内传入 ARM,并由 ARM 处理后在触摸屏上实现图形界面

的波形和数字显示,同时触摸屏界面程序为操作人员提供接口,通过修改 MCR 设备的各项参数,最终实现监控功能。芯片选型方面,DSP 选用 TI 公司的 TMS320LF2407,ARM 芯片选用 ATMEL 公司 ARM9 架构的 32 位处理器 AT91RM9200。

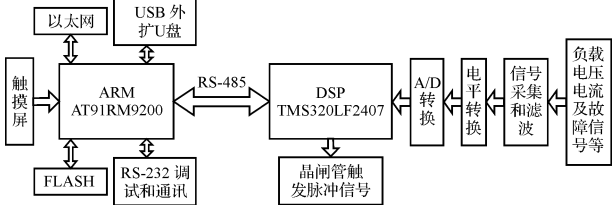


图7 数字平台硬件框图

晶闸管脉冲产生电路如图8所示,Pulse 信号来自 DSP 的输出口,由 74LS221 检测 Pulse 的上调沿,继而输出脉宽恒定的脉冲,经放大以及 4N25 光耦隔离输出脉冲 P0 触发晶闸管。

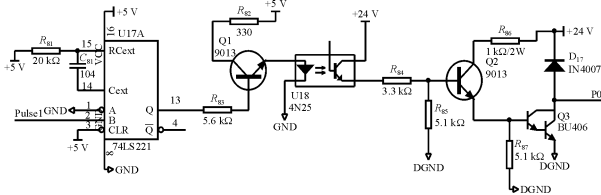


图8 晶闸管脉冲产生电路

4 控制系统软件设计

DSP 程序功能模块如图9所示,在 DSP 的集成开发环境中采用 C 语言和汇编语言混合编程,实现捕获中断,捕捉母线电压过零信号,并计算采样周期长度。采样中断用于对母线及 MCR 各电压、电流信号瞬时值进行 A/D 转换。对母线及 MCR 电压、电流进行 dq 变换,得到有功、无功电流。输出中断用于读取相应有功电流、无功电流及电压,计算 MCR 输出母线的有功、无功,查表得到对应的晶闸管触发角。计算母线电压有效值。比较中断用于比较输出触发信号,将触发角对应触发时间赋给比较寄存器,并将相应 I/O 口置高电平。

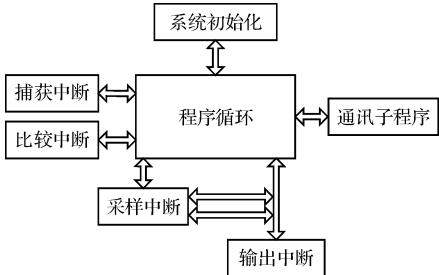


图9 DSP 程序功能模块图

ARM9 人机界面系统移植 Linux2. 4、U-boot、CRMFS 和 jffs2 文件系统,在 MimiGUI(Lite 模式)的框架内开发图形界面应用程序,同时开发 USB 驱动插接 U 盘,触摸屏驱动和 RS485 收发控制,建立界面及功能友好的用户接口,并提供运行及控制参数设置入口、运行状况数字与波形显示等功能。

5 实验结果

本研究对上述控制系统在实验室内进行了模拟实验,采样模拟负载得无功给定,经 DSP 算法控制后产生晶闸管触发脉冲,触发角为 60° 。 α 为 180° 时 MCR 相当于空载变压器运行。负载为单相 1 mH 电感与 200 Ω 电阻串联,星型连接。触发脉冲的波形如图 10 所示。

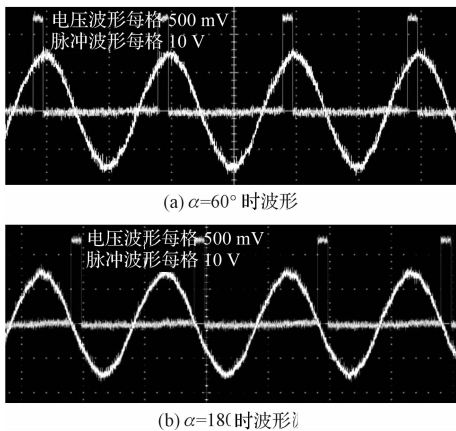


图 10 晶闸管触发脉冲波形

6 结束语

本研究设计制作了用于磁阀式可控电抗器的控制装置,由 DSP 完成无功功率调节算法,基于 ARM9 建立人机界面系统,方便用户操作。试验结果表明,此系统可以出色地完成 MCR 无功功率调节的数字控制,实现采样、算法实现、脉冲触发、故障检测、运行数据显示等功能。同时采用了 ARM Linux-MiniGUI 人机界面友好系统,具有推广价值。

参考文献(References):

- [1] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [2] 田翠华,陈柏超. 可控电抗器在西北 750 kV 系统中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(3):18-21.
- [3] 钱建华,陈柏超. 基于磁阀式可控电抗器的无功补偿系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(2):66-70.
- [4] 尹忠东,程行斌,刘虹. 可控电抗器在电网电容电流自动补偿中的应用[J]. 高电压技术,1996,22(3):85-87.
- [5] 杜姗姗,陈柏超,余梦泽,等. 磁阀式可控电抗器在高压电机软起动中的应用[J]. 高压电器,2006,42(3):228-230.
- [6] 任乃红,吴为麟. 实时电能质量数据压缩的 DSP 实现[J]. 机电工程,2008,25(7):37-39.
- [7] 唐秋杭,符丽娜,朱善安. 基于 DSP 和 ARM 的滚动轴承自动监测和故障诊断系统[J]. 机电工程,2006,23(2):1-5.
- [8] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器的理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999. [编辑:柴福莉]

(上接第 102 页)

此通过增加扫频点数,提高系统检测频率精度的同时会减小扫频点时间间隔。而当时间间隔过小,会导致上次写入的频率控制字还没使 AD9830 合成对应频率,下次的频率控制字却再次写入,从而无法得到设计所需要的扫频源。在下一步的研究中要优化扫描点数,避免出现上述问题。

参考文献(References):

- [1] 迟忠君,徐云,常飞. 频率合成技术发展概述[J]. 现代科学仪器,2006(3):21-24.
- [2] 华金,姜伟,李存兵. 基于 FPGA 的直接数字合成器的设计[J]. 机电工程,2007,24(12):38-40.
- [3] 黄爱蓉. 高性能 DDS 信号产生器的设计研究[J]. 微计算机信息,2005(22):21-23.

- [4] 陆静,徐志鸥. 基于 DDS 芯片的扫频信号源设计[J]. 煤矿机械,2006,27(8):18-20.
- [5] SONG Yong-chui, KIM B. Quadrature direct digital frequency synthesizers using interpolation-based angle rotation[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems,2004,12(7):701-710.
- [6] 程明,赵恒,陈莹. 基于 DSP 和 DDS 的商品防盗监视器扫频信号源[J]. 国外电子元器件,2006(2):21-24.
- [7] Analog Devices Inc.. CMOS Complete DDS AD9830[M]. Analog Devices Inc.,1996.
- [8] WANG Zheng-yu, CHANG M C F, CHOU J C. A simple DDS architecture with highly efficient sine function lookup table[C]//Proceedings of ACM Great Lakes Symposium on VLSI. 2004:154-157.

[编辑:柴福莉]