

轧钢用静止无功补偿装置控制器的研制

杨海云¹, 钱政¹, 赵雪莲²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191; 2. 96604 部队, 北京 100192)

摘要: 轧钢机、电弧炉等非线性负荷接入电网, 将使电网供电质量受到严重影响。为了提高供电质量, 应对其进行无功补偿。本文介绍了 TCR+FC 型静止无功补偿装置(SVC)的组成及原理, 并从硬件、软件算法等方面重点分析了基于 DSP 和 CPLD 的 TCR+FC 型 SVC 控制器的实现。该控制器能够根据采集的三相电压信号、三相电流信号应用瞬时无功理论及相关算法, 实时得到各相触发角, 并发出一定时序的信号控制晶闸管导通, 最终达到无功补偿的目的。

关键词: TCR+FC; 无功补偿; 瞬时无功理论; 控制器

中图分类号: TM714.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2009)09-0029-06

Research of Controller for Static Var Compensator Applied in Steel Rolling Mill

YANG Hai-yun¹, QIAN Zheng¹, ZHAO Xue-lian²

(1. School of Instrument Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China.

2. 96604 Troops PLA, Beijing 100191, China)

Abstract: With more and more application of nonlinear loads such as rolling mills and electric arc furnaces in power systems, the power quality becomes badly. So, the reactive power must be compensated in order to improve the power quality. In this paper, the composition and principle of TCR+FC based Static Var Compensator (SVC) is introduced firstly. And then, the hardware and software implementation is presented, especially the SVC controller based on DSP and CPLD. Had sampled the three-phase voltages and currents, the controller could calculate the trigger angle and control thyristor conduction based on the instantaneous reactive power theory. The experiment shows the controller could well compensate reactive power.

Key words: TCR+FC, static var compensator, instantaneous reactive power theory, controller

0 引言

随着电力电子技术的发展、各种非线性负荷的使用以及大型用电设备的启停, 将产生大量谐波电流以及无功功率, 从而使电网供电质量受到严重影响。作为用电大户的钢铁企业, 电弧炉、轧钢机等作为非线性及无规律负荷接入电网, 对电网和其他负载产生一系列的不良影响。

解决上述问题的主要方法是在干扰负荷接入点接入静止型动态无功补偿装置 (Static Var Compensator, SVC), 该装置主要有晶闸管投切电容器 (Thyristor Switched Capacitor, TSC)、晶闸管控制电抗器 (Thyristor Control Reactor, TCR)、TCR+TSC 混合装置三种结构, 对于 TCR 型结构一般并联电容器, 构成固定电容器 + 晶闸管控制电抗器 (Fixed Capacitor + Thyristor

Controlled Reactor, FC+TCR) 结构^[1,2]。通过晶闸管控制无功功率动态补偿, 调节母线电压和线路无功功率在所需水平上, 从而提高电力系统稳定性, 扩大线路输送容量。

通过综合比较上述三种结构的 SVC, 从动态响应时间短、可分相进行控制以及调节的连续性等方面考虑, TCR+FC 型 SVC 能够起到很好的补偿效果。因此, 本文选取该结构实现轧钢厂无功功率的补偿, 并重点从硬件实现、软件算法实现以及控制器的特点等方面进行研究, 并实现了轧钢用静止无功补偿装置控制器的实现方案。

1 系统组成及工作原理

1.1 TCR 基本结构及原理

TCR 的单相基本结构如图 1 所示, 两个反并联的

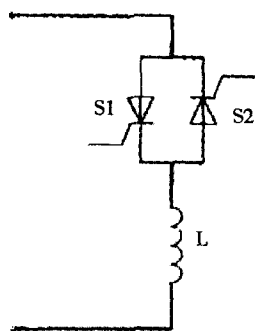


图 1 单相 TCR 基本结构图

Fig.1 Basic structure of single-phase TCR

晶闸管与一个电抗器串联，而三相多采用三角形联结。这样的电路并到电网上，相当于电感负载的交流调压电路结构^[1]。其中与晶闸管串联的电抗器为储能元件，吸收感性无功，通过调整触发延迟角改变系统等效电纳，从而调节补偿器的等效电抗，达到调节感性无功的作用。

1.2 TCR+FC型SVC的组成及原理

TCR+FC型SVC主要由三部分构成：FC滤波器、TCR晶闸管控制电抗器和控制保护系统，如图2所示。FC滤波器用于提供容性无功功率补偿及谐波滤波，TCR晶闸管控制电抗器用于平衡系统中由于负载的波动所产生的感性无功功率。

从图2中可以看出，调节晶闸管触发角的大小，即可控制流过电抗器的电流，从而达到控制无功功率的目的。根据负荷无功功率 Q_F 的变化情况，改变电抗器的无功功率 Q_{TCR} （感性无功功率），即不管负荷的无功功率如何变化，使二者之和恒为常数，这个常数等于电容器组发出的容性无功功率 Q_C 的数值，使取自电网的无功功率为常数或0，即 $Q=Q_C-(Q_F+Q_{TCR})=\text{常数}(\text{或}0)$ ，最终使得电网的功率因数保持在设定值，电压几乎不波动，从而达到无功补偿的目的，以抑制负载波动所造成的系统电压波动和闪变。

2 控制器的实现

TCR+FC型SVC主要包括主电路和控制器两大部分，如图3示。本文重点介绍控制器，其系统框图如图4示，控制器通过采集三相电压、三相电流信

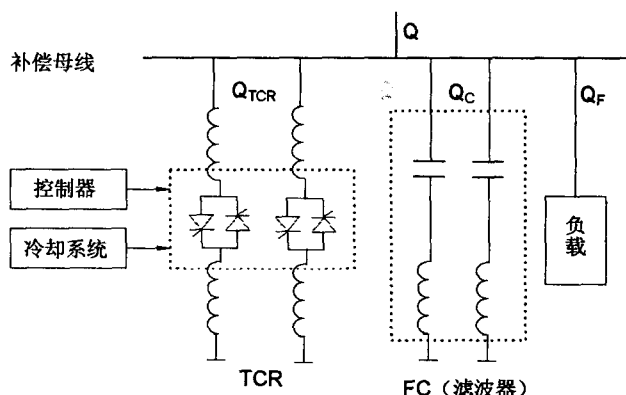


图 2 单相 TCR+FC 型 SVC 组成及原理图

Fig.2 Composition and principle of single-phase SVC of TCR+FC

号，经过瞬时无功理论等算法计算并输出触发角信号来控制TCR的晶闸管导通，实现动态的无功功率补偿。

2.1 硬件实现

控制器的硬件按照模块化的设计思路设计，如

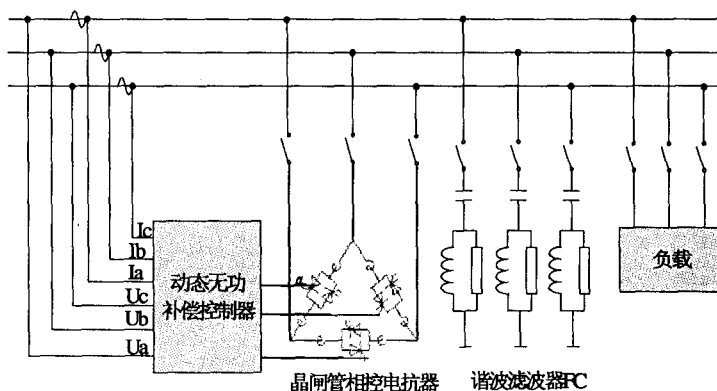


图 3 三相 TCR+FC 型 SVC 组成

Fig.3 Composition of three-phase SVC of TCR+FC

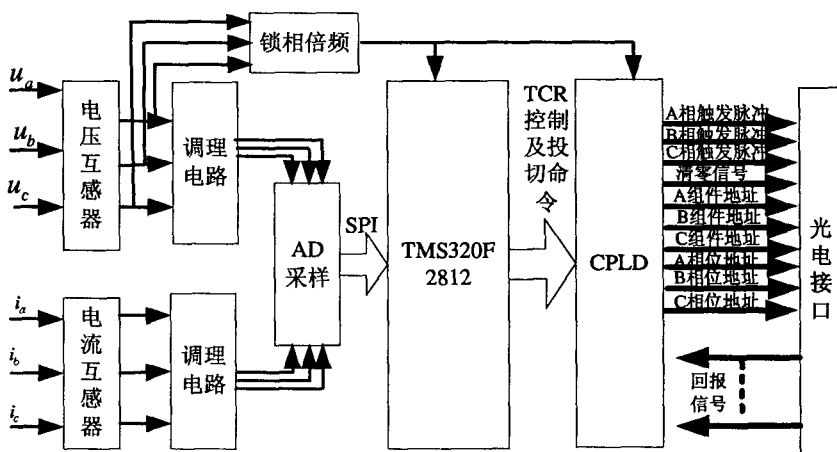


图 4 控制器系统框图

Fig.4 System diagram of controller

图5示,主要由电源模块、电压信号调理模块、电流信号调理模块、DSP模块、CPLD模块构成。

电源模块为整个控制器供电,电压信号调理模块、电流信号调理模块分别实现对三相电压信号、三相电流信号的调理、采样、滤波。DSP模块除了包含其最小系统之外,还包含外部AD采样电路等。CPLD模块除了包含其最小系统之外,还包含触发脉冲发送电路、回报信号接收电路、锁相倍频电路等。

2.2 软件实现

控制器的软件流程如图6示,软件实现主要包括对调理后的三相电压、电流信号进行AD采样,计算电压的有效值、频率值,DSP模块根据算法计算触发角,CPLD模块实现产生触发脉冲信号等。

本文重点介绍根据瞬时无功理论由三相电压、三相电流计算补偿角的算法实现,如图7所示,具体的算

法包括:

(1)根据瞬时无功理论^[9]由采集到的三相电压信号、三相电流信号提取基波正序有功分量、基波正序无功分量、基波负序有功分量和基波负序无功分量;

正负序电流的检测采用的是瞬时无功理论中的 i_p-i_q 算法^[9],其检测正序电流的原理如图8所示。

该方法中,需要用到与电压同相位的正弦信号 $\sin\omega t$ 和余弦信号 $-\cos\omega t$,它们由一个锁相环(PLL)和一个正、余弦信号发生电路得到。根据定义可以计算出 $i_{p1}、i_{q1}$,经LPF滤波得出它们的直流分量 $\bar{i}_{p1}、\bar{i}_{q1}$ 。

按照 i_p-i_q 运算方式,由图8有:

$$\begin{bmatrix} i_{p1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = C \cdot C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

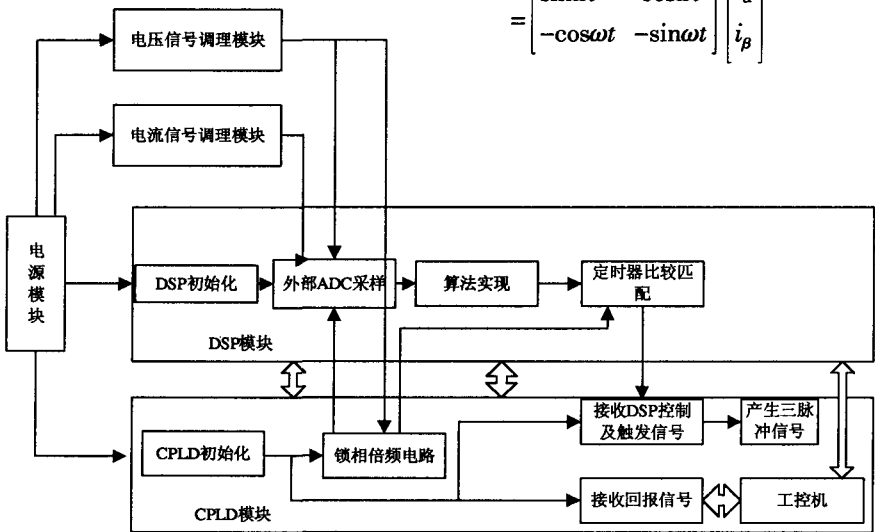


图5 SVC控制器硬件模块图
Fig.5 Hardware module of SVC controller

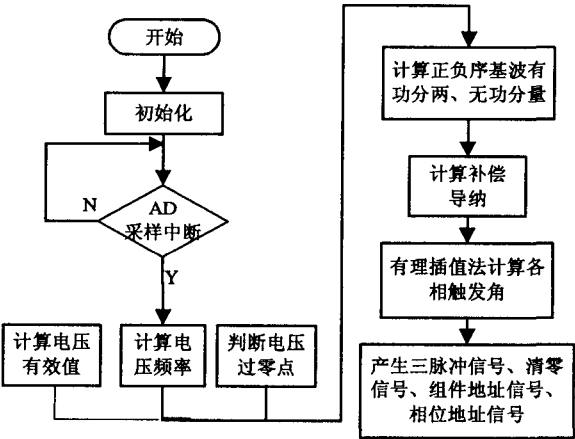


图 6 SVC 软件流程
Fig.6 Software flowchart of SVC

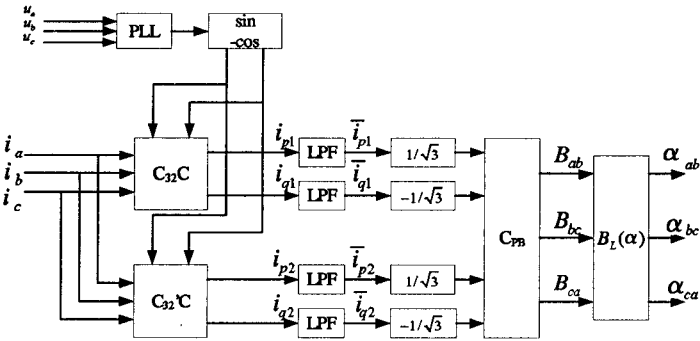


图7 SVC补偿算法
Fig.7 Compensation algorithm of SVC

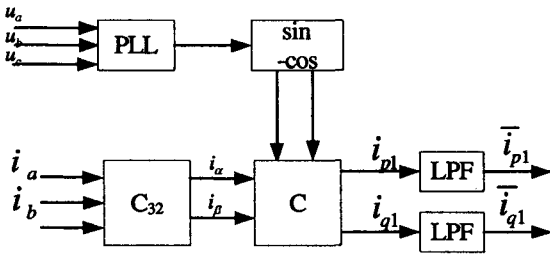


图8 运算方式的正序电流检测原理

Fig.8 Testing principle of positive sequence currents in model

$$= \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_Y \cos \varphi_Y + \sum_{n=2}^{\infty} I_{1n} \cos[(n-1)\omega t - \varphi_{1n}] - \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n} \cos[(n+1)\omega t + \varphi_{2n}] \\ -I_Y \sin \varphi_Y + \sum_{n=2}^{\infty} I_{1n} \sin[(n-1)\omega t - \varphi_{1n}] - \sum_{n=1}^{\infty} I_{2n} \sin[(n+1)\omega t + \varphi_{2n}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 i_{p1} 、 i_{q1} 分别为有功电流与无功电流。

其直流分量与三相电流中基波正序对应,交流分量与三相电流的谐波对应,最终经LPF滤除谐波分量,得:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{p1} \\ \bar{i}_{q1} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_Y \cos \varphi_Y \\ -I_Y \sin \varphi_Y \end{bmatrix} \quad (3)$$

同理基波负序分量分别表示为:

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{p2} \\ \bar{i}_{q2} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I_Y \cos \varphi_Y \\ -I_Y \sin \varphi_Y \end{bmatrix} \quad (4)$$

综合式(3)和式(4)整理得:

$$\begin{bmatrix} I_Y \cos \varphi_Y \\ I_Y \sin \varphi_Y \\ I_{2Y} \cos \varphi_{2Y} \\ I_{2Y} \sin \varphi_{2Y} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \bar{i}_{p1} \\ -\bar{i}_{q1} \\ \bar{i}_{p2} \\ -\bar{i}_{q2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2)分别建立三相所需补偿导纳与上述基波正序有功分量、基波正序无功分量、基波负序有功分量和基波负序无功分量之间的函数关系^[6];

将正序和负序补偿网络综合起来,补偿器的三相补偿导纳可表示为:

$$B_{ab} U = \left(-\frac{\sqrt{3}}{6} I_Y \cos \varphi_Y + \frac{1}{2} I_Y \sin \varphi_Y \right) + \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} I_{2Y} \cos \varphi_{2Y} - I_{2Y} \sin \varphi_{2Y} \right) \quad (6)$$

$$B_{bc} U = \left(-\frac{\sqrt{3}}{6} I_Y \cos \varphi_Y + \frac{1}{2} I_Y \sin \varphi_Y \right) + \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} I_{2Y} \cos \varphi_{2Y} + I_{2Y} \sin \varphi_{2Y} \right) \quad (7)$$

$$B_{ca} U = \left(-\frac{\sqrt{3}}{6} I_Y \cos \varphi_Y + \frac{1}{2} I_Y \sin \varphi_Y \right) - \frac{2}{\sqrt{3}} I_{2Y} \cos \varphi_{2Y} \quad (8)$$

式中 $I_Y \cos \varphi_Y$ 、 $I_Y \sin \varphi_Y$ 、 $I_{2Y} \cos \varphi_{2Y}$ 和 $I_{2Y} \sin \varphi_{2Y}$ 分别是基波正序有功分量、基波正序无功分量、基波负序有功分量和基波负序无功分量;为线电压的有效值。写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} B_{ab} \\ B_{bc} \\ B_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{U} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{6} & -\frac{1}{2} & \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_Y \cos \varphi_Y \\ I_Y \sin \varphi_Y \\ I_{2Y} \cos \varphi_{2Y} \\ I_{2Y} \sin \varphi_{2Y} \end{bmatrix} = C_{PB} \begin{bmatrix} I_Y \cos \varphi_Y \\ I_Y \sin \varphi_Y \\ I_{2Y} \cos \varphi_{2Y} \\ I_{2Y} \sin \varphi_{2Y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(3)利用有理插值等方法求解非线性方程,分别计算三相触发电角;

可控电纳 $B_L(\alpha)$ 与触发延时角 α 的关系为:

$$\sin 2\alpha - 2\alpha = -2\pi + \frac{\pi B_L(\alpha)}{B_L} \xrightarrow{B_L = \frac{1}{X_L} = \omega L} 2\pi + \pi \omega L B_L(\alpha) \quad (10)$$

式中 $X_L = \omega L$ 是电抗器的基频电抗, $\omega = 2\pi f$; α 是触发延迟角(即控制角),令 $x = 2\alpha$, $y = -2\pi + \frac{\pi B_L(\alpha)}{B_L}$, 则有: $\sin x - x = y$ 。利用有理插值法作为晶闸管导通角的计算方法,与多项式逼近法相比,计算量相当,但精度比后者高 10^5 倍,因此采用有理插值的方法进行计算。

2.3 控制器的特点

2.3.1 DSP+CPLD的优点

以数字信号处理为基础的DSP和CPLD系统与传统的模拟信号处理系统相比较精度高,稳定性好。数字信号处理仅受到量化误差和有限字长的影响,处理过程不引入其它噪声,具有较高的抗干扰能力。

基于DSP和CPLD实现的控制器,提供了一个高速计算平台,控制器的功能由软件编程实现。对于控制

器本身而言,在其它模块以及外围电路确定之后,很容易通过软件编程直接实现不同的算法,以找到效果最佳的无功补偿方法,而不用修改硬件电路即可实现,从而为后续控制器的改进、优化留有一定的空间,在一定程度上能够节约成本,节省开发调试的时间。

2.3.2 控制器的精度

控制器的精度首先从元器件考虑。电压信号调理模块、电流信号调理模块中的关键电阻采用了0.01%的高精密电阻。AD采集电路选择了14位的AD芯片AD7856来实现,对应的角度精度能够达到 0.022° ;DSP芯片TMS320F2812自带的AD为12位,精度达到 0.088° ,而交流50Hz信号对应 $0.018^\circ/\mu s$ 。考虑到VBE编码脉冲信号输出最小宽度为 $5\mu s$,综合各种因素,AD转换精度必须达到 0.03° ,选择14位的AD7856芯片能够满足要求。因此,从设备的选型考虑,在硬件电路设计上保证控制器的精度。

控制器的精度从软件算法考虑。软件算法采用了瞬时无功理论;从原理出发,分析建立三相分别所需补偿的导纳值与基波正序有功分量、基波正序无功分量、基波负序有功分量和基波负序无功分量之间的函数关系;最终采用有理插值的方法求解非线性方程,得到各相触发角。在运算量相同的情况下,有理插值的方法与多项式逼近相比精度大大提高,理论计算的精度高达 10^{-7} ,在最大程度上保证了控制器的整体精度^[9]。

2.3.3 控制器的实时性

基于三相瞬时无功理论的方法,在检测无功电流时,可以完全无延时的得出检测结果。瞬时无功理论的核心在于突破了传统功率理论中用平均值定义功率量的局限,应用瞬时无功理论可以使得输出信号没有任何延时而能立即跟随输入交流信号的变化,实时检测出三相电路的谐波电流、无功电流、基波负序电流等分量,因此采用三相瞬时无功理论的方法本身就有很好的实时性^[9]。

触发角的计算与触发的实时性。传统的方法是得到触发角后,在正负周期发出相同的触发角信号。本文研制的控制器在正负半周先分别根据采样得到的电压、电流信号实时计算触发角,然后分别在正、负半周输出各自的触发角,如图9示,控制晶闸管的导通,从而保证触发的实时性。

CPLD能够根据得到的触发角信号实时的产生 μs 级的三脉冲信号、清零信号、组件地址信号、相位地址信号,并将脉冲信号整形放大等实现控制TCR阀,以实现对各相无功补偿,也是控制器在实时性方

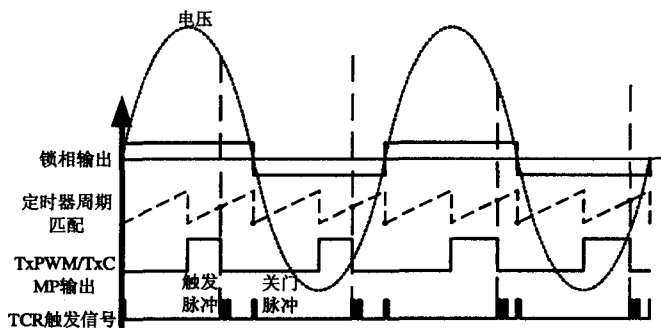


图9 触发时序与计算触发角

Fig.9 Trigger sequence and calculate trigger angle

面的有一个考虑。

3 实验验证

3.1 实验平台介绍

实验平台原理如图10示,380V三相交流电压经调压器调节相电压输出为50V,三相分别接电容提供容性无功,母线上分别串接小阻值、大功率的滑线变阻器,起涌流保护作用。电容依次投切到 $90\mu F$ 、 $30\mu F$,控制器通过采集上述的三相线电压以及流过母线的相电流,计算触发角,触发角信号通过TCR模拟器控制TE板,实现控制晶闸管的导通。实验结果由示波器读取。

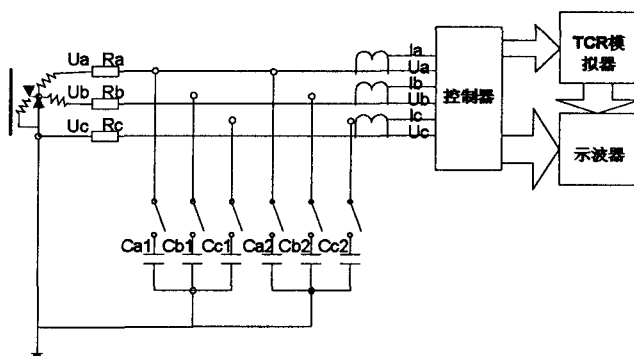


图10 实验平台原理图

Fig.10 Principle diagram of experimental platform

3.2 实验结论

3.2.1 测得触发角实验结论及分析

表1为在 $90\mu F$ 电容、 $30\mu F$ 电容两种情况下,为消除容性无功,控制器所得到的触发角实验结果,它的大小由数字示波器上读取。

从表1中可以看出,当电容固定时,各相的触发角大小基本恒定,但略有变化,分析原因可能是从数字示波器上读取触发角的过程造成的读数误差。当改变电容大小时,即由 $90\mu F$ 电容变到 $30\mu F$ 电容后,触发角明显变大。理论分析:电容减小,吸收的无功功率减

表1 实验结果
Tab.1 The experiment results

	90μ F 电容时触发角	30μ F 电容时触发角
+A 相	126°	135°
-C 相	125°	138°
+B 相	123°	137°
-A 相	126°	139°
+C 相	123°	138°
-B 相	122°	134°

小,也就需要增大补偿器的等效感抗,或者说减小其等效电纳,而增大触发角的效果就是减少电流中的基波分量,因此理论分析电容减小的过程中,相应的触发角理论上应该变大,实验所得与理论分析一致。

3.2.2 连接TCR模拟器实验结论及分析

在如图10的实验平台基础上,连接轧钢用静止无功补偿装置控制器与TCR模拟器后,用模拟示波器测得晶闸管实现正向控制晶闸管导通、正负双向控制晶闸管导通时,模拟示波器所显示的结果如图11、图12所示。

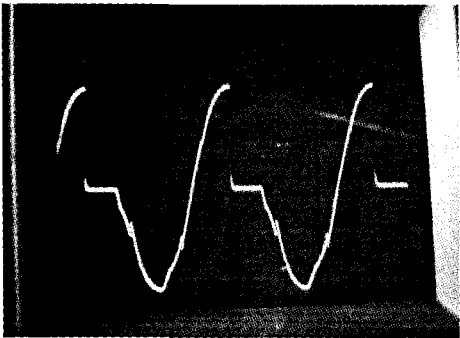


图11 正向导通实验结果

Fig.11 Experiment result of positive conduction

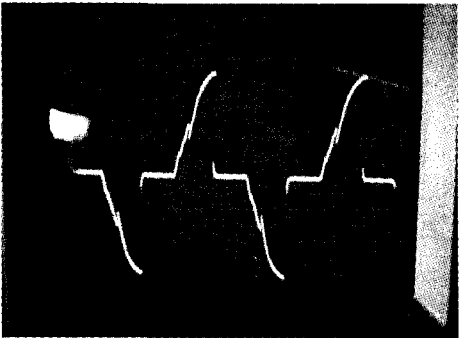


图12 双向导通实验结果

Fig.12 Experiment result of both conduction

4 总 结

针对轧钢机等非线性负荷接入电网,严重影响电网供电质量的问题,提出了采用TCR+FC型的静止无功补偿装置进行补偿,提高了电网供电质量。本文重点研制了基于DSP和CPLD器件实现的轧钢用静止无功补偿装置控制器,介绍了控制器的硬件实现、软件算法实现,并对控制器的特点进行了深入分析。最后对研制的轧钢用静止无功补偿装置控制器进行了实验,实验证明,该控制器能够根据三相电压、三相电流的变化,实时、分相控制晶闸管的导通,进行无功补偿。

参 考 文 献

[1]苏玲,宋珊,陈建业.静止无功补偿器(SVC)应用的最新进展[J].电网技术,2004,8(1):44-49.
SU Ling,SONG Shan,Chen Jian-ye.The Newest Projects of SVC Implemented Worldwide[J]. Power Network Technology, 2004,8(1):44-49.
[2]Jen-Hung Chen,Wei-Jen Lee,Mo-Shing Chen.Using a static var compensator to balance a distribution system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1999,35(2):298-304.
[3]王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2002.
[4]石新春,齐涛,郑庆红等.基于瞬时无功功率理论的SVC设计与实现[J].电力电子技术,2008,42(5):12-14.
SHI Xin-chun,QI tao,ZHENG Qing-hong,ZHANG Ji-yuan.Design and Realization of SVC based on the Instantaneous Reactive Power Theory [J]. Power Electronics,2008,42(5):12-14.
[5]范瑞祥,周腊吾,肖红霞.基于瞬时的SVC无功及负序补偿算法[J].高压电器,2004,40(4):247-249.
FAN Rui-xiang,ZHOU La-wu,XIAO Hong-xia. The Reactive Power and Negative Sequence Compensation Algorithm of SVC Based on Instantaneous Value[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(4):247-249.
[6]Akagi H, Kanazawa Y,Nabae A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [J] IEEE Trans on Ind Appl,1984,20(3):625-630.
[7]李干林,徐国鑫,肖啸,等.电力负荷管理系统仿真软件的开发[J].自动化技术与应用,2009,(2):27-29,124.
Li Gan-lin, Tu Guo-xin, Xiao Xiao, et al. Software Debelopment of the Simulator of Power Load Management System [J].Techniques of Automation and Applications, 2009,(2):27-29,124.
作者简介:
杨海云(1979-),男,硕士研究生,从事现代电气检测技术研究。
Email: yanghy@aspe.buaa.edu.cn
钱政(1973-),男,博士,教授,主要研究方向:先进传感技术、高电压测试技术、电力设备在线监测与故障诊断。Email: qianzheng@buaa.edu.cn
赵雪莲(1980-),女,工程师,主要从事电学参数的计量检定工作。
Email: xlzhao0924@126.com

收稿日期:2009-04-12
(杨长江 编发)