

## 微机测控高压无功功率自动补偿系统

任永益 许军

(精密机械与仪器系)

**摘要** 本文介绍了一种由单片微型计算机、高压电力电容器和控制装置组成新的高压无功功率自动补偿系统。该系统采用离散傅里叶变换法解决了电流含大量高次谐波情况下功率因数的检测问题,采用非线性控制技术解决了自动补偿的控制精度问题,因而具有功率因数检测准确、控制精度高、高压真空开关的使用寿命高的特点经实践证明该系统性能优良,工作稳定可靠,节能效果和经济效益显著。

**关键词** 微机,无功功率,自动补偿,离散傅里叶变换

**分类号** TM531.4

在工矿企业和国防科研试验基地,电力网的负载绝大部分是电感性的,它们引起功率因数下降,造成电能的损耗和发电、输电设备容量的增大,为此采用了电力电容器进行无功功率的静止补偿。但是,随着电弧炼钢技术的发展和大型电力电子装置的广泛应用,使负荷电流产生大量高次谐波,波形发生严重畸变,如图1所示。在这种情况下,如何准确地检测功率因数,如何进行功率因数的自动补偿成为一个有待解决的新课题。

### 1 电流含高次谐波情况下的功率因数及其检测

在线性负载情况下,电力电路中电压和电流均为正弦波,其功率因数定义为功率因数角的余弦,即  $\cos\varphi$ 。但当负载具有非线性特性时,电流将含大量高次谐波。图1所示为电弧炼钢炉钢水熔化期的电流、电压波形。由图可见电压波形基本上仍为正弦波而电流则为非正弦波。在这种情况下按正弦波定义的功率因数概念已不适用。为此我们首先给出电流含高次谐波情况下功率因数的定义,然后再寻求新的检测和补偿方法。

设图1中电压为:

$$u(t) = \sqrt{2}U\sin\omega_1 t$$

以电压波为基准,取一个周期的电流波,将它延拓成为一组周期性非正弦波,然后按傅

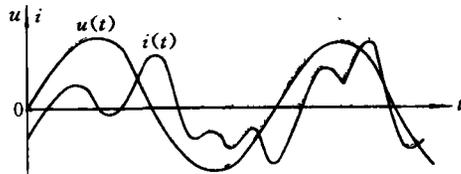


图1 电弧炼钢炉电流、电压波形

里叶级数展开得：

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n)$$

则一个周期的平均功率为：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T 2U \sin\omega_1 t \cdot I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) dt + \frac{1}{T} \int_0^T 2U \sin\omega_1 t \cdot \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) dt \quad (1)$$

式中  $U$  是电压有效值,  $I_n$  是  $n$  次谐波电流有效值,  $\varphi_n$  是  $n$  次谐波电流初相角。

(1) 式中第二项是电压与电流高次谐波在一个周期内的平均功率, 其值为零; 第一项是电压与电流基波在一个周期内的平均功率, 它是负载消耗的有功功率, 其值为:

$$P = UI_1 \cos\varphi_1 \quad (2)$$

从(2)式可知, 在电流含高次谐波的情况下, 功率因数应定义为电压与电流基波相位差的余弦。

根据上述推广的功率因数定义可知, 要检测电流含高次谐波情况下的功率因数, 必须滤除高次谐波获取基波分量。滤波一般可通过模拟电路滤波器和数字滤波器两种方法来实现, 但模拟电路滤波器在滤波的同时将产生附加相移, 滤波时间常数越大相移也越大, 从而给功率因数角的检测带来很大的误差, 为此我们采用数字滤波器, 通过离散傅里叶变换来实现。

设在电压瞬时值过零时开始对电流采样, 一个周期采样  $N$  个点, 得到电流序列  $i(n)$ 。其离散傅里叶变换(DFT)为

$$I(k) = \text{DFT}\{i(n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} i(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

式中,  $k$  表示电流的  $k$  次谐波分量。为求得基波分量可令上式中  $k=1$ , 则

$$I(1) = \sum_{n=0}^{N-1} i(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}n} = a + jb \quad (3)$$

$$\text{式中, } a = \sum_{n=0}^{N-1} I(n) \cos \frac{2\pi}{N}n; b = \sum_{n=0}^{N-1} I(n) \sin \frac{2\pi}{N}n$$

由此可得电流基波幅值为:

$$I_{1m} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4)$$

功率因数角为:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{a}{b} \quad (5)$$

功率因数为:

$$\cos\varphi_1 = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (6)$$

## 2 电流含冲击性高次谐波情况下无功功率的补偿

在获得电流基波有效值  $I_1$  和功率因数角  $\varphi_1$  后, 由图 2 可知需要补偿的无功功率为:

$$Q = UI_1 \sin \varphi_1$$

补偿电容的容量为

$$C = UI_{C1} = UI_1 \sin \varphi_1 \times 10^{-3} \quad (7)$$

由(7)式可确定系统无功功率补偿所需的总电容(单位为千乏)。但系统在实际运行过程中各投切瞬间补偿电容的容量不能简单地按(7)式计算。因为在电弧炼钢过程中电流不仅含大量高次谐波而且是冲击性的,它的幅值和相位都在经常变化中,这种变化会造成补偿电容的频频更换,引起高压真空开关的多次通断,从而影响开关的寿命。为了避免这种不利情况,同时也为了提高补偿精度,我们设计了非线性数字PI调节器,取得较好的效果。

调节器的非线性特性如图3所示。图中 $\Delta Q$ 是本次采样检测所得的无功功率误差信号; $\Delta C$ 是应增加的补偿电容量。图3中 $\Delta C$ 可由(8)式确定:

$$\Delta C = \begin{cases} k_1 \Delta Q & \Delta Q > \Delta e_1 \\ 0 & \Delta e_2 < \Delta Q < \Delta e_1 \\ k_2 \Delta Q & \Delta Q < \Delta e_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\Delta e_1$ 、 $\Delta e_2$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 分别是无功功率为正和为负时的误差门限和比例系数。由于电业部门规定无功功率不得为负,故取 $\Delta e_1 > \Delta e_2$ ,  $k_1 < k_2$ 。每个采样周期补偿电容投切量为:

$$C(n) = C(n-1) + \Delta C(n) \quad (9)$$

### 3 系统的实现

#### 3.1 硬件

系统硬件配置框图如图4所示。

AC相高压经电压互感器 $B_1$ 和降压变压器 $B_2$ 加到电压比较器上,得到一串频率为50Hz的矩形波。该矩形波送到MCS-51单片机的输入口,作为对电流信号进行数据采集的中断信号。 $B$ 相电流经电流互感器HL和隔离变压器 $B_3$ 加到电流滤波及抬电平电路。电流滤波器的截止频率根据采样定理选取。由于本系统每周期采集数据点数为64,故滤波器截止频率取为800Hz,这样既满足采样定理,又使滤波器本身产生的相移相对于功率因数角可以忽略。避免引入附加误差。

信号经模数转换器转换成数字信号后,由单片机进行数据处理,处理后的功率因数由显示电路显示。补偿电容的投切信号由单片机口线输出,经光电隔离和功率放大后,控制补偿电容器进行自动投切。为了补偿高次谐波引起的无功功率损耗,本系统研制了与补偿电容器相串联的空心电抗器。过压检测和延时电路由555定时器及辅助电路组成。当电网电压超过额定值10%时,它使补偿电容器断开;当过压消除后,延迟两分钟再恢复正常投切,以保护高压电容器。

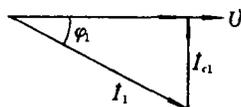


图2 基波相量图

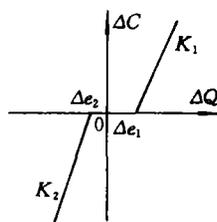


图3 调节器非线性特性

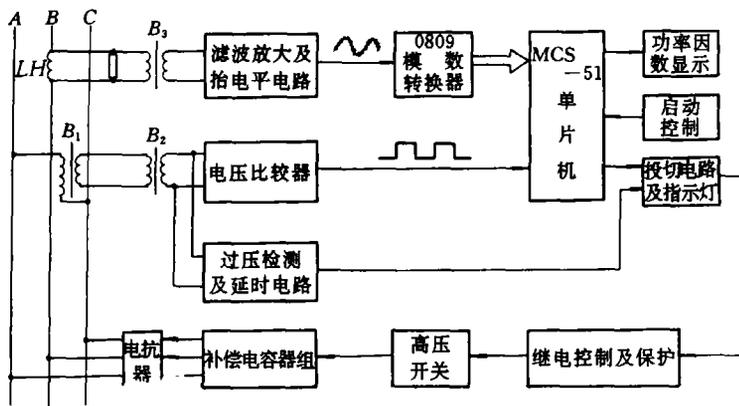


图4 硬件配置框图

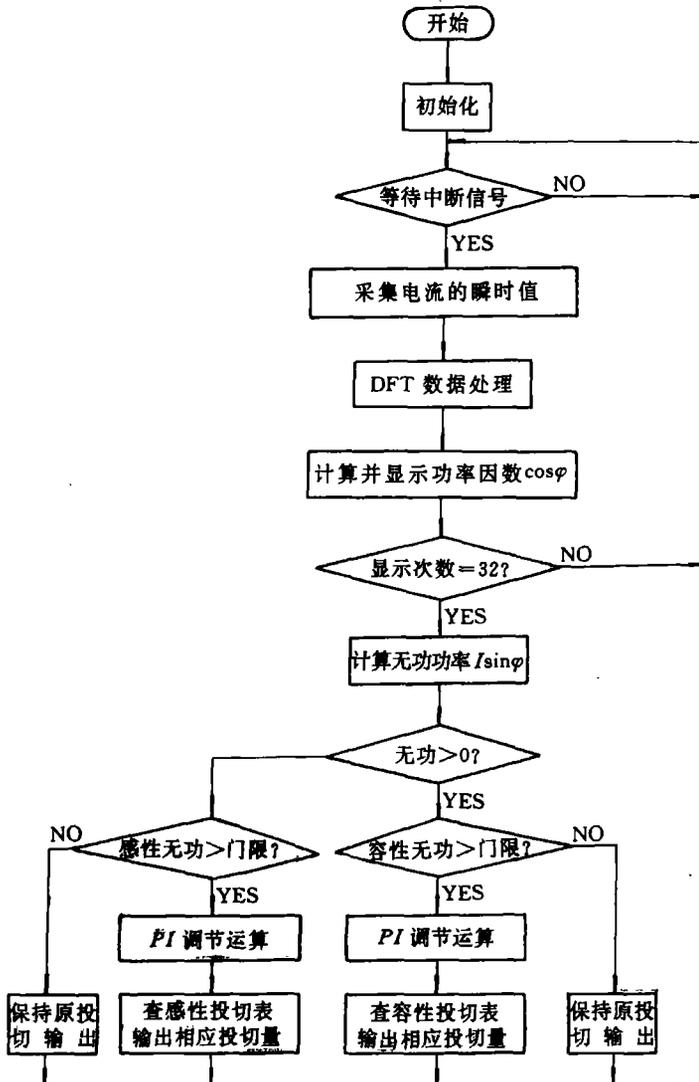


图5 软件主流程图

### 3.2 软件

系统软件主流程图如图 5 所示。当按下面板上的启动按钮后,系统软件即开始运行。首先进行初始化,然后进入中断等待,当电压信号的下降沿由单片机的  $P_{3.2}$  口输入时,单片机响应中断,开始进行电流的数据采集。在电压信号的一个周期内采样 64 次。采集完成后执行 DFT 数据处理程序,算出功率因数  $\cos\varphi$ ,并重复八次取平均值,然后将  $\cos\varphi$  的平均值送显示电路显示。在显示 32 次(约一分钟)后,计算无功功率并判断其符号。符号为正表示感性无功,符号为负表示容性无功。再经门限判断,若大于门限作 PI 调节运算,然后查表输出相应的投切控制量;若小于门限,则保持原投切量,等待下一次中断。

## 4 试验及运行

该系统研制成功后,首先在实验室进行了微机测控装置功率因数检测精度试验,然后全系统在某厂 110kV/6kV 变电站投入实际运行,取得满意效果。

### 4.1 功率因数检测精度实验

为了确定功率因数检测精度,在实验室取两个不同相位差的工频正弦信号,用示波器测得相位差  $\varphi$ ,算出功率因数实验值,与本系统显示值比较,数据如表 1。

表 1 功率因数检测精度实验数据

序号	$\varphi$ 实验	$\cos\varphi$ 实验	$\cos\varphi$ 显示	误差
1	0°	1.00	1	0
2	21°	0.933	0.93	0.3%
3	38°	0.788	0.78	1%
4	90°	0	0	0

由表 1 可以证明本系统具有足够的检测精度,可以满足无功功率补偿的要求。

### 4.2 变电站实际运行试验

在本系统未投入运行和投入运行两种情况下电站功率因数比较见表 2。

由表 2 可见,系统投入运行后功率因数明显提高,可以保持在 0.97 左右。

表 2 实际运行试验数据

序号	$\cos\varphi$ 未补偿	$\cos\varphi$ 已补偿
1	0.84	0.97
2	0.86	0.96
3	0.84	0.98
4	0.85	0.97
5	0.85	0.97
均值	0.85	0.97

## 5 结论

(1) 离散傅里叶变换应用于高压无功功率自动补偿系统是有效的,它成功地解决了在电流含大量高次谐波情况下功率因数的检测问题,达到较高的检测精度。

(2) 在电流含冲击性谐波情况下,采用非线性数字 PI 调节器进行补偿电容器的自动投切控制可以获得较高的补偿精度,同时降低投切频度保证高压真空开关的寿命。

(3) 本系统具有较强的抗干扰性能,工作稳定可靠,节能效果显著,具有广泛的推广应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 苏文成等编著. 无功补偿与电力电子技术. 机械工业出版社, 1989
- 2 何嘉斌等. 微机在电力网静电补偿中的应用——微电脑无功功率自动控制器. 电力电容器, 1986, (1): 44~48
- 3 IEEE Power System Harmonics Working Group Report, Bibliography of Power System Harmonics, IEEE Trans. , 1984, 103 (9)

# Automatic Compensation System of High Tension Reactive Power with Microcomputer Measuring and Controlling

Ren Yongyi Xu Jun

(Department of Precision Machinery and Instrument)

## Abstract

This paper presents a new automatic compensation system of high tension reactive power , which consists of single-chip microcomputer, high tension capacitor and control device. The power factor measurment is solved by using discrete Fourier transform under the condition of a great deal of harmonics , and using nonlinear control technique, the automatic compensation of reactive power is performed. The measurment and compensation is accurate, and the life of high tension vacuum switch is long. It has been proved in practice that the performance of this system is stable and reliable, and its economical effect is remarkable.

**Key words** microcomputer, reactive power, automatic compensation, discrete Fourier transformation