

文章编号: 1001-1609(2007)05-0333-03

# 同步关合技术在无功补偿中的应用

徐晓静<sup>1</sup>, 孙明灿<sup>2</sup>, 陈庆春<sup>2</sup>

(1. 山东建筑大学计算机科学与技术学院, 山东 济南 250101; 2. 山东轻工业学院电子信息与控制工程学院, 山东 济南 250353)

Application of Synchronous Closing Technology for Var Compensation

XU Xiao-jing<sup>1</sup>, SUN Ming-can<sup>2</sup>, CHEN Qing-chun<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science & Technology, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. College of Electronic Information and Control Engineering, Shandong Institute of Light Industry, Jinan 250353, China)

**摘要:** 针对电力线路在进行无功补偿时,投切电容器组产生的涌流和过电压的危害,提出了一种基于PIC单片机的同步关合技术。它采用PIC单片机作为主控芯片,进行数据处理和发出控制指令。功率因数的测量采用了CS5460A芯片。同步关合技术实现的关键是准确地预测合闸时间。笔者提出利用双线性插值法进行合闸时间的预测,且对数据进行了归一化处理,以降低单片机的数据处理量。最后给出了试验结果分析。分析结果表明,利用双线性插值进行合闸时间的预测是可行的。

**关键词:** 永磁机构; 无功补偿; 功率因数; 同步关合; 双线性插值; 归一化

中国分类号: TM51

文献标志码: A

**Abstract:** In order to decrease surge current and over voltage when the var compensation capacitors being plunged into power system, the synchronous closing technology based on PIC was described in this paper. The PIC as the CPU was used to deal with data and sends controlling order, and CS5460A was used to measure power factor in the synchronous closing technology system. Forecasting the closing time accurately was the key point of the synchronous closing technology system. Double-bilinear interpolation with forecasting the closing time was described in this paper. In order to simplify the CPU work, normalization was applied to the data. The result of experiment shows that double-bilinear interpolation with forecasting the closing time is practicable.

**Key words:** permanent magnetic actuator(PMA); var compensation; power factor; synchronous closing technology; double-bilinear interpolation; normalization

## 0 引言

提高电力线路的功率因数是提高电能质量的关

键。采用投切并联电容器组来控制电网无功潮流的合理平衡是变电站综合自动化系统控制电网电压的有效措施<sup>[1]</sup>。随机投切电容器组所导致的涌流和过电压会对电网上的用电设备产生危害,甚至会导致线路中的保护装置误动作。同步关合技术则提出了在电压零点将电容器组投入,在电流零点切除的思想。试验结果证明采用同步关合技术能很好地减小电容器组投切过程中的涌流和过电压。断路器的投切是由断路器来完成的,传统的弹簧机构断路器具有很大的时间分散性,并且不容易控制,不利于实现同步关合。近年来出现的永磁机构断路器具有简单可控等优点<sup>[2]</sup>,为实现同步关合提供了良好的载体。但永磁机构受外界环境温度和电压的影响较大,因此在以永磁机构作为载体时,准确的预测合闸时间是实现同步关合技术的关键,笔者利用双线性插值原理进行合闸时间的预测。

## 1 同步控制器的工作原理

同步投切系统整体示意图见图1,控制器实时测量电网的功率因数,当检测到电网的功率因数较低或较高时,同步投切装置准备开始动作。在动作之前,控制系统需要检测外界环境的温度和储能电容器两端的电压。根据环境温度和储能电容器两端的电压预测合闸时间,以确定发出合闸指令的时刻。同时控制器还要实时检测电压和电流信号的零点到来时刻,根据零点到来时刻与合闸时间的大小确定发出合闸指令的时刻,以使断路器在电压零点关合,在电流零点断开。

图2为控制器同步投入电容器的时序图。图中 $t_z$ 为电压过零时刻; $t_{d\text{oss}}$ 为合闸指令发出时刻; $t_c$ 为合

收稿日期: 2007-03-13; 修回日期: 2007-05-21

作者简介: 徐晓静(1979-),女,博士研究生,研究方向为粗集理论与应用模糊系统理论与应用。

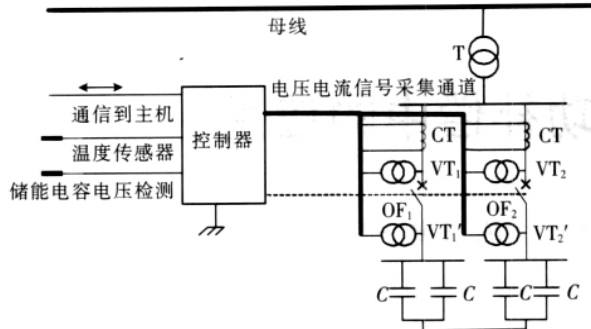


图 1 同步投切系统整体示意图

闸触发时刻;  $t_{current}$  为电容出现电流时刻;  $t_d$  为触发延时;  $t_{closing}$  为实际合闸时间。具体描述为: 当合闸命令  $t_{close}$  到来时, 由于机械分散性和永磁体的动作特性而产生一定的延迟时间  $t_d$ , 断路器动触头真正的动作时刻为  $t_c$ , 直到断路器触头上出现电流, 表明在时刻  $t_{current}$  断路器已经关合。  $t_{closing}$  是指断路器从开始动作到真正合上这段时间。真正的合闸时间是从发出合闸指令到断路器真正合上这段时间, 因此, 在实际中要预测的合闸时间是  $t_d$  和  $t_{closing}$  两者的和。

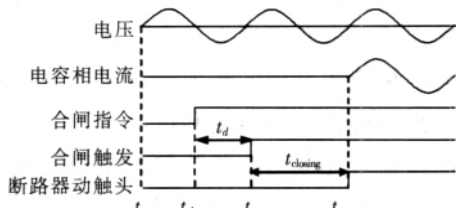


图 2 同步关合时序图

## 2 同步控制器的硬件构成

同步控制器的硬件框图见图 3。

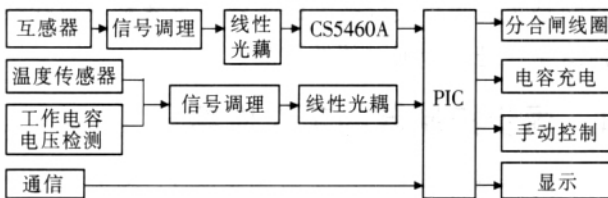


图 3 同步控制器硬件框图

### (1) 功率因数的测量

为了确定向电网投入电容的多少, 控制系统需要实时检测电网的功率因数。如果电网的功率因数低于设定值, 就需要向电网投入一定量的电容; 如果电网的功率因数高于设定值, 就需要从电网上切除一部分电容, 以防止“过补”。

在测量功率因数时采用专门的功率/电能芯片 CS5460A, 先用互感器把电压, 电流转换并送入 CS5460A, CS5460A 内部有一个增益可编程的放大器, 两个模数转换器, 两个高速滤波器, 具有系统校准和功率计算功能, 用以计算电能、电压、电流、功率及功率因数。其测量功率因数的原理为: 利用其

内部的一个电量寄存器积累电能。根据电能与功率的关系  $W=Pt$ , 在 1 s 内积累的电能数值上等于其有功功率  $P$ ; 再根据公式  $\cos \phi = P/(UI)$  算出功率因数。CS5460A 的测量结果通过串行口送入单片机。其与 PIC 单片机的连接电路见图 4。

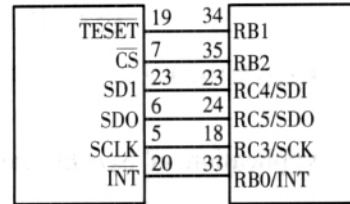


图 4 CS5460 和 PIC16F877 接口电路

### (2) 环境温度的测量

采用 DS18B20 进行温度的测量, DS18B20 中的温度传感器可完成对温度的测量, 测得的数据转换为数字值存放在内部存储器中, 温度传感器的内部存储器包括一个高速暂存和一个非易失性的可电擦除的、后者存放高温和低温触发器 TH、TL 和结构寄存器。根据 DS18B20 的通信协议, 主机控制 DS18B20 完成温度转换必须经过 3 个步骤: 每一次读写之前都要对 DS18B20 进行复位, 复位成功后发送一条 ROM 指令, 最后发送 RAM 指令, 这样才能对 DS18B20 进行预定的操作。复位要求主 CPU 将数据线下拉 500  $\mu$ s, 然后释放。DS18B20 收到信号后等待 16~60  $\mu$ s, 后发出持续低脉冲, 主 CPU 收到此信号表示复位成功。

### (3) 与上位机通讯

与上位机的通信采用 RS485 通讯标准, 在电磁干扰较为强烈的环境中, RS485 能很好地完成通讯任务。

## 3 合闸时间的预测

由于永磁机构的分合闸时间受外界环境温度和在工作电容(即为分合闸线圈提供电能的电容)电压的影响较大, 因此准确预测合闸时间是实现同步关合技术的关键。

在预测合闸时间时利用了双线性插值, 并运用归一法进行了数据的简化, 以利于单片机的实现。

双线性插值就是对  $x$  和  $y$  分别取线性插值, 其基本表达形式为<sup>[3]</sup>

$$u(x, y) = a + bx + cy + dxy \quad (1)$$

式(1)共有 4 个系数, 可由顶点上的函数值确定。

将测得的不同温度下、不同工作电容电压下的合闸时间在直角坐标系中的表示见图 5。由双线性插值原理可知, 合闸时间  $t$  和环境温度  $T$ 、控制电压  $U$  的关系可以表示为

$$t = a + bT + cU + dTU \quad (2)$$

图 5 中的  $t(T_i, U_j)$  表示在温度为  $T_i$ 、控制电压为

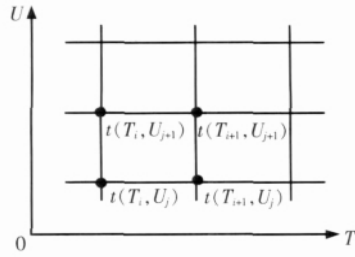


图5 合闸时间在坐标中的表示

$U_j$  的情况下合闸时间的大小,为了书写方便,在下面的叙述中,将用  $t(i, j)$  代替。那么合闸时间  $t(i, j)$  和温度  $T_i$ 、控制电压  $U_j$  的关系可表示为

$$t(i, j) = a_{i,j} + b_{i,j}T_i + c_{i,j}U_j + d_{i,j}T_iU_j \quad (3)$$

在图5标示的区间上,可由  $t(i, j)$ 、 $t(i+1, j)$ 、 $t(i, j+1)$  和  $t(i+1, j+1)$  的值列四元一次方程组求出  $a_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ 、 $c_{i,j}$  和  $d_{i,j}$  的值,这样对每个矩形区间进行求解分析,在每个区间中有唯一的一组值,并将这些值制成表格对应存放,当外界的控制电压和环境温度在某个矩形区间时,根据对应的  $a_{i,j}$ 、 $b_{i,j}$ 、 $c_{i,j}$  和  $d_{i,j}$  利用式(3)计算合闸时间  $t(i, j)$ ,提前进行时间补偿。

由于断路器在运行中的磨损和断路器动静触头的烧蚀,合闸时间与控制电压和环境温度的关系将发生变化。为了提高预测合闸时间的准确性,预测合闸时间的公式的系数也要实时更新。为了求解系数方便,降低单片机的计算量,把图5中所标示的区间归一化,转换成标准单元区间。归一化单元表示为

$$e = \{ (x, y) | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1 \} \quad (4)$$

归一化处理:

(1) 对环境温度的归一化处理为  $x = \frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i}$ ,  $T$  为

实际的环境温度,  $x$  为经过归一化处理后的环境温度值,其值适用于  $(x, y)$  坐标系。

(2) 对控制电压的归一化处理为  $y = \frac{U - U_j}{U_{j+1} - U_j}$ ,  $U$  为

实际的电压值,  $y$  为经过归一化处理后的电压值,其值适用于坐标系。那么式(3)在  $(x, y)$  坐标系中可以表示为

$$t = a(1-x)(1-y) + b(1-x)y + c(x)1 - y + d \quad (5)$$

式(5)中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的值不同于式(1)中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的值,但意义是相同的;为了书写方便和表示通用性,此处  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  没有加脚标。

从式(5)可以看出

$$t = \begin{cases} a & =0, =0 \\ b & =1, =0 \\ c & =0, =1 \\ d & =1, =1 \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,只要把实际的电压值和环境温度值归一化之后,求解  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  的值就不用再解复杂的四元一次方程组,在很大程度上简化了计算

量和计算的复杂程度。

## 4 利用双线性插值可行性分析

为了说明双线性插值对预测合闸时间的可行性,引用了文[4]中的一些试验数据,见表1,利用表1中的试验数据对双线性插值进行可行性分析。具体的测量方法和测量条件可参考文[4],为了验证的简单化,采用表1中的数据来计算其中的部分数据,计算结果见表2。和表1中对应的不同电压和温度下合闸时间的值相比较,计算出它们之间的绝对误差见表3。从表3的数据可以看出,经双线性插值计算出的合闸时间和实测值之间的最大误差为 0.214 ms,最小误差为 0.004 ms,符合同步关合允许的误差  $\pm 1$  ms。为了更好地说明双线性插值法的可行性,可将区间取大一些。区间为:电压为 164 V 和 168 V,温度为 21.8 和 -13.3。利用这两组数据下的4个合闸时间的值,求解控制电压为 166 V、温度为 -7.1 时的合闸时间。计算出的合闸时间为 39.952 ms,与试验测得数据 40.624 ms 进行比较,其误差为 0.672 ms。可以看出,误差还在  $\pm 1$  ms<sup>[5]</sup>内。

表1 不同控制电压和不同环境温度下合闸时间的大小 ms

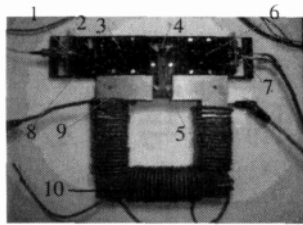
温度/	164/V	165/V	166/V	167/V	168/V
21.8	40.174	39.903	39.595	39.375	39.195
11.1	40.408	40.140	39.814	39.612	39.448
3.2	40.697	40.426	40.103	39.898	39.670
-4.3	40.886	40.613	40.309	40.085	39.936
-7.1	41.195	40.923	40.624	40.395	40.172
-8.3	41.375	41.101	40.796	40.573	40.323
-10.0	41.577	41.305	40.995	40.777	40.628
-11.6	41.811	41.563	41.231	41.046	40.882
-13.3	42.076	41.839	41.529	41.383	41.168

表2 经过双线性插值计算的合闸时间的值 ms

温度/	165/V	166/V	167/V
11.1	40.181	39.939	39.677
3.2	40.360	40.118	39.883
-4.3	40.771	40.523	40.259
-7.1	40.939	40.690	40.428
-8.3	41.065	40.817	40.569
-10.0	41.309	41.077	40.815
-11.6	41.536	41.317	41.071

## 5 结语

在投切电容器组进行无功补偿时,如果随机投切则会产生较大的涌流和过电压,而同步关合技术则能很好的解决这个问题。同步关合技术的关键在于合闸时间的准确预测,笔者采 (下转第 339 页)



1—法兰(内装准直自聚焦镜) 2— $\lambda/4$ 波片 3—起偏器  
4—反射式光学结构 5—磁光晶体 6—检偏器  
7—光电检测器 8—垫板 9—聚磁环 10—一次线圈

图 8 聚磁式光学电流互感器输入输出关系图

影响较大,应选用带有制冷器和光功率可控的激光器。在后面的研究中将采用补偿的方法以消除由温度变化对磁光晶体费尔德常数和光学器件尺寸所带来的不利影响。

对于图 6 中传感器输出的光电流经过电流电压转换电路、信号调理以及低通滤波后输送给计算机进行处理,计算机通过软件编程实现低通滤波和频谱幅值判别相结合的消噪算法有效地分离了噪声信号,实验结果见图 9,从图中可以看出该互感器在 0~500 A 测量范围内具有良好的线性度。

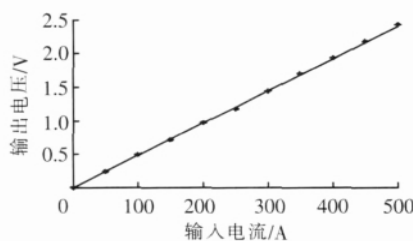


图 9 聚磁式光学电流互感器输入输出关系图

## 4 结语

笔者在介绍聚磁式光学电流互感器的基础上,给出了一种聚磁器的结构,并利用仿真软件搭建模型对聚磁器进行分析,验证了不同气隙下的聚磁效

果,最后制作了聚磁式光学电流互感器的实物试验模型。在光路设计中应用反射式结构解决了增加磁光晶体长度以及缩短气隙长度来提高传感器测量灵敏度的矛盾。试验结果表明,聚磁式光学电流互感器由于缩短了磁光晶体长度,线性双折射效应的影响较小,且易于加工实现,传感器输入输出线性度较好,因而具有良好的应用前景。

## 致谢

该课题的研究获得了高等学校博士点专项科研基金资助,在样机试制中得到了西安应用光学研究所的协助,特此致谢!

## 参考文献:

- [1] 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [2] 卢振松. 聚磁式光学电流互感器的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [3] MIHAJLOVIC P, PETRICEVIC S, STOJKOVIC Z, et al. Development of a Portable Fiber-optic Current Sensor for Power Systems Monitoring [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2004 (53): 24-30.
- [4] YI B, CHU B C B, CHIANG K S, et al. New Design of Electric-current Sensor for Sensitivity Improvement [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 2000(49): 418-423.
- [5] KATSUKAWA H, ISHIKAWA H, OKAJIMA H, et al. Development of an Optical Current Transducer with a Bulk Type Faraday Sensor for Metering [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1996(11): 702-707.
- [6] LI C, KONG M G, JONES G R, et al. Sensitivity Improvement of an Optical Current Sensor with Enhanced Faraday Rotation[J]. J Lightwave Technol., 1997, 15(12): 2246-2252.
- [7] B B 阿法纳西耶夫(苏). 电流互感器[M]. 陆安业, 肖耀荣, 朱英浩译. 北京: 机械工业出版社, 1989.

(上接第 335 页)

表 3 通过双线性插值计算出的合闸时间和实测值之间的误差 ms

温度/	165/V	166/V	167/V
11.1	0.041	0.125	0.065
3.2	0.065	0.015	0.014
-4.3	0.158	0.214	0.174
-7.1	0.016	0.066	0.033
-8.3	0.035	0.021	0.004
-10.0	0.004	0.082	0.038
-11.6	0.026	0.086	0.025

用双线性插值法及归一化处理方法进行合闸时间的预测。实验结果分析表明,该方法简单、快捷,能很好地满足同步关合误差在  $\pm 1$ ms 内的要求。

## 参考文献:

- [1] 施玉祥, 陶晓农. 中低压变电站无功调节的研究 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 54-57.
- [2] 林 莘. 永磁机构与真空断路器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 胡建伟, 汤怀民. 微分方程数解法 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 李 利. 配永磁机构真空断路器测控系统及其同步关合技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002.
- [5] CEREDA C, GEMME C, REUBER C. Synchronous Medium Voltage Circuit Breaker [C]// ABB Solution Based on Magnetic Drive and Electronic Control, CIGRED 99-15th Conference on Electric Distribution, 1999: 13-21.