

# 微机控制晶闸管投切电容器无功补偿装置

刘岸杰, 宋伶俐

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 微机控制晶闸管投切电容器补偿装置以 80C320 单片机为控制核心, 采用新颖的快速无功功率检测方法和独特的晶闸管控制技术, 实现了对多组电容器快速自动分级投切, 可满足低压配电网基波无功补偿的快速性和实时性要求。介绍了该装置主回路控制方式和控制电路构成, 并通过模拟负荷投切试验中的有关数据验证了其投切的正确性。

**关键词:** 无功补偿; 晶闸管; 补偿电容器; 80C320 单片机

**中图分类号:** TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)07-0028-03

## 0 引言

随着电力系统的发展和技术进步, 无论是供电部门还是用户, 对具有降低线损和提高电能质量作用的无功补偿措施越来越关注。无功补偿不仅要求有足够的无功补偿容量, 而且要求被补偿装置具有灵活性和较高的自动化水平, 以达到优化补偿的目的。目前, 无功补偿大多以交流接触器作为电力电容器的投切执行元件, 投入时冲击电流大, 切除时产生过电压, 自身触头易损甚至熔焊, 噪声大, 设备故障率高, 可靠性差。在控制环节上基本不能满足分相、分级、快速及跟踪补偿的要求。鉴于此, 本文根据 TSC<sup>[1]</sup>无功补偿原理, 以晶闸管作为执行元件, 用 80C320 单片机进行控制, 设计了一种 TSC 微机控制的动态无功补偿装置。它具有以下新特点: 不需检测功率因数角即可快速检测出无功功率; 利用微机同步相位控制技术和自适应晶闸管触发技术, 当实时检测到电容器两端电压与电网电压大小相等、极性一致时, 瞬时投入电容器, 电流过零时晶闸管自然关断。不需加装限流电抗器、不需专门的放电电阻、不需对电容器预充电, 可随时实现无冲击投切电容器。可以对不平衡的无功功率进行完全补偿, 这是以往补偿装置难以胜任的。

## 1 TSC 主电路结构

主电路设计除了满足分级快速补偿要求外, 还应考虑限制并联电容器组的合闸涌流和抑制高次谐波等问题。

通常我国低压配电网采用三相四线制, 且以三相不平衡负荷情况居多, 因此本文采用了图 1 所示的 TSC 主电路结构。其中三相电力电容器接成星

形, 以满足分相补偿的要求; 每相电容器按 8 - 4 - 2 - 1 的比例分成不同容量的 4 组, 通过对 4 组电容器组不同组合的控制, 以提高静态补偿精度。不同组的电容器容量不同, 晶闸管的额定电流也不同。主电路如图 1 所示, 图中每相只画出其中的两组。

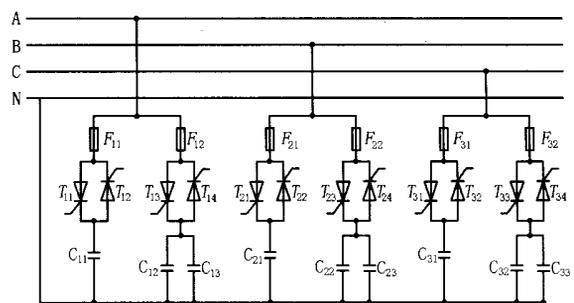


图 1 主电路图

Fig. 1 Main circuit

图 1 中控制电容器投切的无触点开关由晶闸管模块上的 2 只晶闸管反并联组成。当主回路施加正向电压且晶闸管的控制极有触发脉冲信号时, 晶闸管导通, 把电容器投入电网; 而当去掉触发脉冲后, 电流过零时晶闸管自然关断, 从电网上切除电容器。晶闸管上并联有 RC 阻容吸收电路, 用于吸收开关过程中的瞬变电压和瞬变电流。另外, 在主回路上还专门装有一组氧化锌避雷器, 用以吸收操作过电压和雷击过电压等。在每一相中都串有快速熔断器作为快速过流保护。晶闸管电压值  $U_{SCR}$  的选择要考虑电力电容器上的充电电压, 一般按式(1)选择:

$$U_{SCR} = 2 K_1 K_2 \sqrt{2} U_1 \quad (1)$$

式中:  $K_1$  为电压裕度, 这里取 1.1;  $K_2$  为电网电压波动系数, 这里取 1.1;  $U_1$  为电网额定电压。晶闸管电流值  $I_{SCR}$  一般按式(2)选择:

$$I_{SCR} = 2.5 f C U_1 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中:  $f$  为电网额定频率;  $C$  为电容量(单位为  $\mu\text{F}$ )。这里所取的裕度比通常方法要小,这就较大地提高了晶闸管容量的利用率<sup>[2]</sup>。只要能在投切控制技术上保证无过电压、无冲击电流,按以上原则选择晶闸管参数就能保证装置长期可靠运行。

通常我国低压采用三相四线制 TN-C 系统供电。其特点是工作中性线 N 与保护接地线 PE 合为一根 PEN 线,所有设备的外裸可导电部分均与 PEN 线相连。当三相不平衡时,PEN 线上有电流通过。分相补偿时电容器频繁投切引起的三相不平衡合闸涌流,可使 PEN 线过负荷发热,引起零电位漂移,危及人身安全,影响用电设备的正常工作。所以应尽可能降低星形接法电容器中性点的接地电阻,以保证由三相不平衡合闸涌流引起的零电位漂移较小。

## 2 补偿装置工作原理及构成

本装置是为低压用户研制的动态无功补偿设备,它由 80C320 单片机作为中央控制单元,通过检测负荷的无功功率来控制晶闸管实现对多组电容器的动态无触点分级快速投切。在本装置中,核心部分选用 80C320 单片机。80C320 是一种可与 80C31/80C32 兼容的高速微控制器,它利用一个重新设计的处理器内核,消除空时钟和存贮周期,从而使每条 8051 指令的执行速度在相同的晶振频率下都比原来快 1.5~3 倍。在典型应用中,采用相同的代码和石英晶体,速度会改善 2.5 倍。80C320 提供的最大晶振频率为 33 MHz,因此运行速度就相当于 8051 使用 82.5 MHz。这种速度能够很好地满足无功补偿中实时性、动态补偿的要求。而且 80C320 对 8051 用户来说非常熟悉,指令系统完全与 8051 相兼容,但却为用户提供了 16 位微处理器的速度。

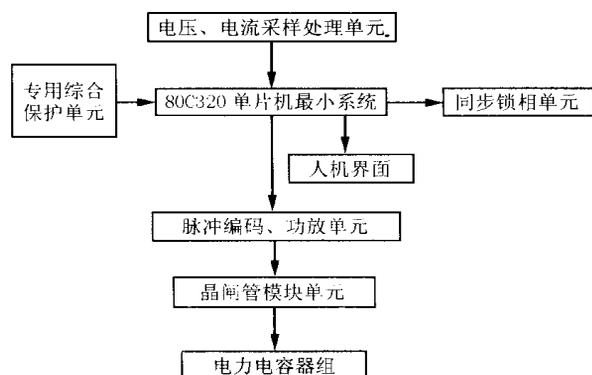


图 2 补偿装置结构框图

Fig. 2 Structure of compensation device

本装置的结构框图如图 2 所示,主要由微机系统、同步锁相单元、脉冲编码与功放单元、专用综合保护单元等部分组成。

负荷电压、电流的采样信号经阻容滤波、增益调整环节送入单片机的模入通道,经 A/D 转换,再经快速运算处理,得到负载所需的无功功率,再快速查表决定应投入电容器的级数,由晶闸管动态无冲击地投入电容器,同时数码管随时跟踪显示投入级数,保证达到用户要求的功率因数指标。对不对称负载,可采取分相检测、分相补偿的措施,以降低负序分量,改善三相不对称度。

## 3 几个核心技术问题

### 3.1 晶闸管无冲击投切电容器

目前其它采用晶闸管或固态继电器投切电容器的装置大多都专门加装了限流电抗器,其缺点是:容易引发谐振,降低可靠性;加大功率损耗;易造成电容器过电压;增加了装置的制造成本、复杂程度及故障率等。另外,还有一些同类装置,需对电容预充电或放电才能再投入电容,这样就影响了电容器投入的快速性。由于电容器是储能元件,在每次被切除后,会保持有一定值的残余电压 ( $U_{C0}$ ),显然投切控制的最佳时机是当网压等于  $U_{C0}$  时,理论上不会产生暂态过程,避免产生较大的“合闸涌流”,这不仅保证晶闸管的安全,还可减小对电容器的损伤。所以,控制器必须实时监测电容器残压  $U_{C0}$ 。而本装置采用的投切原理如下:当检测到电容器两端电压与电网电压大小相等、极性一致时,利用微机同步相位控制技术瞬时投入电容器,电流过零时晶闸管自然关断,不需要专门的放电电阻或对电容预充电,即可随时再投入电容器,从原理上实现了无过渡过程的投切。长期的运行结果表明此方法有效地避免了电流冲击,显著地延长了电力电容器的使用寿命,克服了投切电容对电网产生的扰动,提高了电能质量。

### 3.2 同步锁相单元

此单元由 RC 阻容滤波环节、锁相环和分频器等组成。任取一相电压作为电网电压的同步信号,此信号经过锁相分频处理后,其中 50 Hz 的方波信号送入单片机的 EXTINT 口作为与电网频率同步的外部中断信号源;另外把由分频器产生的与电网电压同步的高倍频脉冲信号送入单片机的 HSI. 1 口作为其外部时钟源,即使电网频率在 45~55 Hz 范围内变化,也能保证外部时钟源与电网频率完全

同步,确保触发角度稳定而可靠。

### 3.3 精确、快速实现无功功率检测

为满足冲击性负荷动态无功补偿和抑制电压波动、电压闪变的要求,提出一种只需检测电压、电流波形上任意 2 个时刻的瞬时值,即可快速检测出无功功率的检测新方法,大大提高了无功检测速度。同时由于此方法不需检测功率因数角(功率因数角往往不能准确快速检测),再结合阻容波和数字滤波技术,大大提高了无功的检测精度。

### 3.4 脉冲编码与功放单元

此单元由脉冲编码环节、高频调制环节、功率放大环节、脉冲变压器等组成。由单片机高速输出口发出的触发脉冲,经此单元后形成相应组别、相应相别的强触发脉冲信号,再经脉冲变压器隔离送到相应需触发的晶闸管模块上,控制晶闸管的导通。

### 3.5 专用综合保护单元

此单元由过压保护电路、欠压保护电路、负序保护电路、零序保护电路、断相检测电路、过流保护电路及温度保护电路等部分组成。当电网发生各种故障或设备本身出现故障时,均可灵敏地对本设备快速保护,从而避免损坏器件,保证设备常年安全运行。当配电系统出现短路、断路故障时,还可通过人机界面将故障信息提示给运行人员。

### 3.6 避免投切振荡和过分频繁投切的措施

本装置不采用功率因数而采用无功功率作为控制变量,按负荷实际所需无功自动分级投切电容器组,同时设置独特的自适应梯级死区,一次调节到位,不仅避免了投切振荡,还避免了电容器组不必要的频繁投切。

## 4 模拟负荷投切试验

本控制器在低压情况下进行了单相模拟负荷投切实验。试验条件如下:

1) 试验中电压的有效值为 230 V 左右,频率为 50 Hz。

2) 采用移相变压器来模拟感性负荷。移相变压器原边作为电压输入信号,移相变压器副边作为电流输入信号,调节原副边的相位角差来模拟感性负荷。

3) 电容器每相分为 3 组,容量分别为 100  $\mu\text{F}$ , 200  $\mu\text{F}$ , 400  $\mu\text{F}$ 。在条件(1)的情况下,能够补偿的感性无功大小分别为 1 662 var, 3 324 var, 6 648 var。

4) 模拟电压和电流信号的采样均采用 WB 系

列电量隔离传感器 V411Q0,输入电压有效值最大为 400 V,对应的输出电压有效值为 3.5 V。为了与补偿电容器补偿的无功值相匹配,在实际程序中将电流的有效值缩小了 8 倍,所以最后的电流结果为电压的 1/8。

5) 试验中没有接入晶闸管和电容器,所以在实际补偿中,每执行一次程序,显示出的电容器投入组数就从开始应投入值一直增加到 7 为止。

在以上条件下,计算出的几组数据如表 1 所示:

表 1 计算数据

Tab. 1 Calculated data

| 移相角<br>/ ° | 电压有效<br>值/V | 电流有效<br>值/A | 无功功率<br>/ var | 应投入电<br>容器组数 |
|------------|-------------|-------------|---------------|--------------|
| 0          | 230         | 28.75       | 0             | 0            |
| 20         | 230         | 28.75       | 2 261.5       | 1            |
| 30         | 230         | 28.75       | 3 306.25      | 1            |
| 45         | 230         | 28.75       | 4 675.74      | 2            |
| 60         | 230         | 28.75       | 5 726.59      | 3            |
| 90         | 230         | 28.75       | 6 612.5       | 3            |

表 1 中,投入电容器的组数是相对于最小电容器(在本控制器中指对于 100  $\mu\text{F}$  的电容器组数,如 3 组表示总容量为 300  $\mu\text{F}$ ,投入 100  $\mu\text{F}$  和 200  $\mu\text{F}$  的电容器各一组)。

实际试验中各项数据如表 2 所示:

表 2 实验数据

Tab. 2 Experimental data

| 移相角<br>/ ° | 电压有效<br>值/V | 电流有效<br>值/A | 无功功率<br>/ var | 投入电容<br>器组数 |
|------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| 0          | 229.3       | 28.66       | 7.453 3       | 0           |
| 20         | 231.5       | 28.94       | 2 365.4       | 1           |
| 30         | 228.9       | 28.61       | 3 232.3       | 1           |
| 45         | 232.4       | 29.05       | 4 752.6       | 2           |
| 60         | 229.6       | 28.45       | 5 613.1       | 3           |
| 90         | 228.7       | 28.59       | 6 538.8       | 3           |

由于移相变压器齿轮传动的机械偏差导致实际刻度可能与标度盘不符,在本试验中,移相变压器的相位差是通过示波器看出来的。

从模拟负荷投切试验数据可以看出,控制器对于电压和电流的采样,电压电流有效值、无功功率的计算以及电容器的投切控制电路均是正确的。

## 5 结论

实验效果说明:本装置全静态运行,自动化程度高,运行稳定可靠,能改善电能质量且降损节能效果显著,适合普通低压配电网用户作无功补偿。

(下转第 34 页 continued on page 34)

- 划与设计(第二版)(Plan and Design of Distribution Network, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1999. 47-53.
- [3] 顾秀芳,王仁洲,梁志瑞(GU Xiufang, WANG Rerrzhou, LIANG Zhi-rui). 配电网开关设备选择定位及效益分析(Location Selection and Benefit Analysis of Distribution Circuit Breaker) [J]. 河北电力技术(Hebei Electric Power), 1999, 18(5): 1-4.
- [4] 刘洁,余熙(LIU Jie, YU Xi). 配电网自动化工程综合

效益分析(Economic Evaluation of Distribution Automation Project) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2000, 20(3): 56-58.

收稿日期: 2003-07-15; 修回日期: 2003-09-05

作者简介:

王敏(1966-),女,工程硕士,讲师,研究方向为供电系统与继电保护。

### Investment evaluation of reliability of distribution network automation

WANG Min

(Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** The power supply enterprise will have a sharp increase on its cost on reliability improvement of power supply, when the reliability of power supply is increased by one percent. Some abroad reference indexes and engineering calculation methods are recommended in this paper. Meanwhile, through a calculation case of a basic radiation distribution network, and from the perspective of economy, the paper analyses and calculates the influence of the main means of distribution network automation, i. e. cable fault indicator (CFI) and distribution management system (DMS) on reliability improvement. Also, it puts forward the main means to realize distribution network automation and the ideal investment cut-in point.

**Key words:** distribution network; automation; reliability; investment evaluation

(上接第 30 页 continued from page 30)

#### 参考文献:

- [1] Engberg K, et al. Thyristor Switched Capacitors (TSC) in Theory and Practice [A]. The Fourth International Conference on AC and DC Transmission. London: 1985. 183-186.
- [2] 徐爱钧(XU Ai-jun). 功率因数自动补偿装置(Power Factor Auto-compensation Device) [J]. 电气自动化(Electrical Automation), 1992, (5): 28-31.

- [3] 胡萌林,蔡蜀青(HU Meng-lin, CAI Shu-qing). 低压电容无功补偿装置的控制方式(Low Voltage Capacitor Reactive Compensation Control) [J]. 电工技术杂志(Electrotechnical Journal), 1995, (1): 5-7.

收稿日期: 2003-06-20; 修回日期: 2003-09-25

作者简介:

刘岸杰(1974-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统实时控制与安全;

宋伶俐(1978-),女,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与监测。

### Thyristor switched capacitor reactive compensation device controlled by microcomputer

LIU An-jie, SONG Ling-li

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In this dynamic reactive power compensation device, 80C320 single-chip processor is employed as the control center, and a rapid reactive power detecting method with a special thyristor controlling technique is proposed. It can switch capacitors rapidly without any impacts, and the fast and real-time compensation characteristics can be obtained with this system on compensating the fundamental-wave reactive power in low-voltage networks. The control mode of the main circuit and the composition of the control circuit are also presented in detail. The relevant data of the simulated load switching test show that the device is available.

**Key words:** reactive compensation; thyristor; compensation capacitor; 80C320 single-chip processor