

静止无功补偿系统的研制^{*}

孙频东

(南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京)

[摘要] 讨论了静止无功补偿中晶闸管控制电抗器以及分组补偿电容加晶闸管控制电抗器系统的工作原理, 并阐述了 TCR 中谐波的抑制方法, 最后给出了实际系统的设计方案.

[关键词] 无功补偿, 功率因数, FC-TCR, 单片机

[中图分类号] TN34; TM47; [文献标识码] B; [文章编号] 1672-1292(2002)01-0018-04

0 引言

无功补偿是提高电力系统设备使用效率、减少线路有功损耗的一种常用的方法. 静止无功补偿是一种由电容器、功率控制器件和电抗器组成的无功补偿装置. 常用的无功补偿方案有: 晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管控制电容器投切 (TSC) 及固定并联电容器 (FC) 等方案. 本文讨论固定分组投切电容器加晶闸管控制电抗器的补偿形式.

1 TCR 加分组投切电容方式的无功补偿

用分组电容器投切方式来进行无功补偿, 一般只能实现开环有级补偿. 用 TCR 虽可实现对无功的连续可调补偿却无法吸收感性电流. 将电容器按等比级数的排列方式进行分组, 用断路器实现对固定值电容器进行投切控制, 再结合 TCR 即可实现对电网无功的连续可调补偿.

1.1 TCR 型补偿器的工作原理

晶闸管控制电抗器电路的原理图 (某相) 如图 1 所示, 电路由一个电抗器和两个反并联的晶闸管串联而成. 这里需要说明的是, 为了能承受实际线路上的高电压和大电流应该允许有若干个晶闸管串并联后组成一个等效的晶闸管. 图 1 中的晶闸管作为高压交流开关使用. 改变晶闸管的触发角 α , 流经电抗器的电流波形将发生变化, 从而使电流波形中的基波分量发生变化, 这相当于改变了电抗器的感抗, 使 TCR 等效于一个连续可变的电感器.

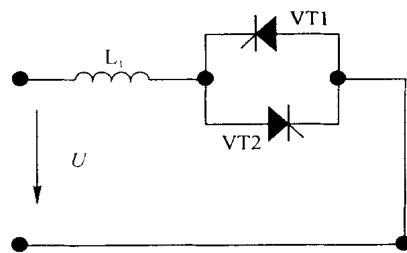


图 1 实现 TCR 补偿的原理图

图 2 给出了对应不同控制角 α 流经电抗器的电流波形图. 当控制角 α 为 90° 时, 电抗器呈纯电感性, 流过电抗器的电流波形滞后电源电压 90° , 此时电流波形连续且为一正弦波.

当控制角 α 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间变化时, 电流波形发生断续, 电流中的基波分量变小, 谐波分量增加, 使电感器的等效电抗增加, 当控制角 α 接近 180° 时电流接近于 0. 由电工原理可知, 流经电感器的电流和电感器两端的电压之间有如下关系:

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \int_0^{\omega \cdot t} u_L d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\omega L} \int_\alpha^{\omega \cdot t} \sqrt{2} U \sin \omega \cdot t d(\omega \cdot t)$$

^{*} 收稿日期: 2001-10-10.

作者简介: 孙频东, 1957-, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 主要从事应用电子方面的教学与研究.

结合图 2 的触发角 α 可得电流瞬时值和触发角 α 之间的关系为:

$$i_L = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} U}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega \cdot t) & \alpha < \omega \cdot t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases}$$

(1) 式中: U 为电源电压有效值; $X_L = \omega L$ 电抗器的基频电抗; α 为晶闸管的触发角.

由傅利叶级数, 可得电流 i_L 中的基波分量为:

$$I_1 = \frac{U}{X_L} \cdot \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}$$

从(2) 式可见, 当 α 等于 90° 时电抗值最小等于接在线路中的电抗本身; 当 α 等于 180° 时电抗值最大等效于开路. 等效电抗值和触发角之间的关系如:

$$X'_L = X_L \cdot \frac{\pi}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}$$

1.2 电容的分组投切方案

电容的容量大小按等比级数分配, 例如在最大为 70kvar 的无功补偿系统中按下下列原则设置电容值 $C_1 = 10\text{kvar}$ 、 $C_2 = 20\text{kvar}$ 、 $C_3 = 40\text{kvar}$, 这种方案的优点是在同级差的补偿系统中所需的电容器数最少, 因此设备占用的空间小、投资少; 缺点是易产生较大的瞬态电流, 控制稍复杂. 电容器接入的算法流程如图 3 所示.

当所需的无功补偿量小于 10kvar 时接入 C_1 , 断开 C_2 、 C_3 , 通过调节 TCR 的值达到所要求的补偿量. 当所需的补偿量 Q 大于 70kvar 时, 作超额补偿报警. 在 70kvar 以内的无功功率都能得到相应的补偿.

1.3 谐波的抑制方案

由于 TCR 的接入, 当晶闸管的触发角大于 90° 时, 将在补偿电路中产生高次谐波, 这些谐波将对电网产生污染, 因此要设法将其清除, 这里采用了如下的清除方法:

(1) 将 TCR 接成 Δ 形, 如图 4 所示, 消除某些谐波. 在三相平衡负载的情况下, 使两个晶闸管的控制角相等, 这时由于电流断续而引起的谐波为奇次谐波. 其中 3 次及其整倍次谐波电流将在闭合的三角形中流动, 而不会出现在线电流中.

(2) 使用和补偿电容器相串联的电感来消除高次谐波. 在补偿电容器的上方接入谐振电感以组成串联谐振电路来消除线路上的 5 次、7 次谐波.

(3) 使用电源变压器, 将电网和谐波进行隔离以减少谐波对其他用户的影响.

2 系统设计实例

用上述等比分组电容加 TCR 可构成性能良好的无功补偿装置, 以下分成补偿系统结构和控制器构成两部分来叙述.

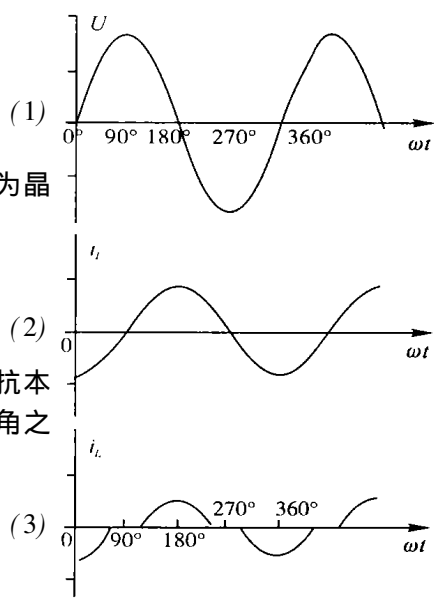


图 2 改变触发角后的电流波形

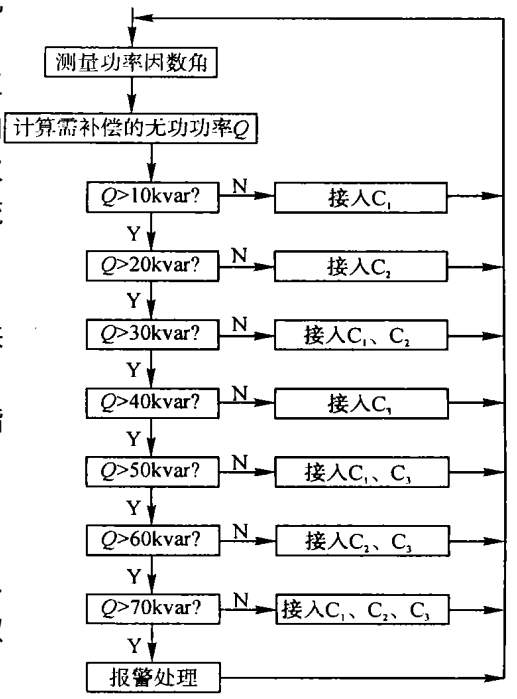


图 3 等比分组电容器的接入流程

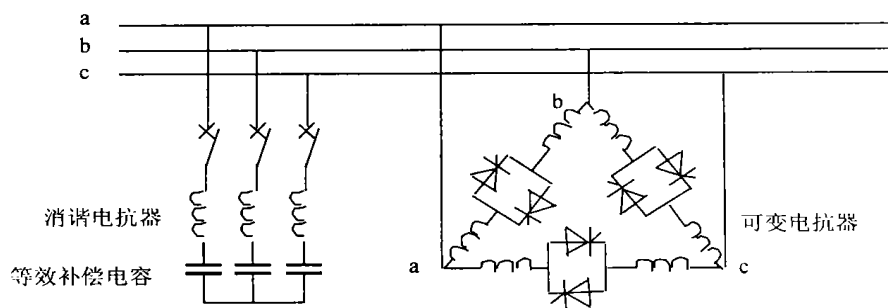


图 4 无功补偿中的消谐措施

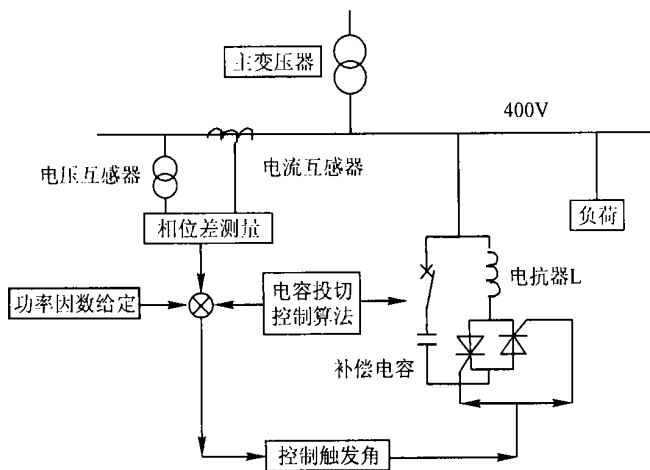


图 5 等比分组补偿电容加 TCR 的补偿原理图

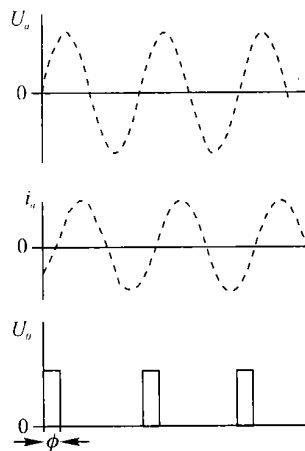


图 6 鉴相器的输出波形图

2.1 系统结构框图

图5为用等比分组的补偿电容和TCR结合的方法来构成实际的无功补偿控制电路的方框图,实际上,只画出了三相中的某一相.选分组投切电容的最小值为 10kvar ,固定电抗器的无功功率为 10kvar ,当 TCR 中的晶闸管导通角大于 90° 时,等效的电抗无功功率值小于 10kvar ,触发角和对应的无功功率值可用(3)式计算,然后,在程序存储器中建立一张对应的表,当计算出所需的无功补偿量后,通过查表法及电容投切算法,得到晶闸管的触发角及投切电容的开关状态,来满足无功补偿的要求.也就是说通过投切电容来实现补偿的粗调,改变晶闸管触发角来实现补偿的细调.最终使系统满足补偿的要求.

在初始状态下,电感器的导通角设置为 90° ,电容组中的 C_1 处于接入状态,两者无功之和为零,当所需的无功在 10kvar 以内时,通过调节 TCR 中的触发角来满足无功补偿的要求.当要求补偿的无功功率大于 C_1 时再考虑接入其他电容器.

2.2 控制器的结构

无功补偿的控制器是由 89C51 单片机构成的,单片机的 P1 口为输出口,控制分组电容器的投切,控制算法原理见图 3 所示.TCR 电路中有 6 个晶闸管,晶闸管的触发脉冲是由单片机系统扩展口 8155 的 PA 口提供的,从 PA 口输出的脉冲信号去控制晶闸管的触发电路,触发电路最终触发晶闸管.两个反并联的晶闸管的触发角相差 180° .功率因数角的检测,通过接在线路上的电压和电流互感器及相应的辅助电路进行,先将电压和电流的相位差转换成矩形脉冲的宽度,然后,通过定时器将脉冲宽度转换成相应的角度值,工作原理如图 6 和图 7 所示.开关量的输入和输出均经过光电隔离,以提高抗干扰能力.具体电路可参阅有关文献.

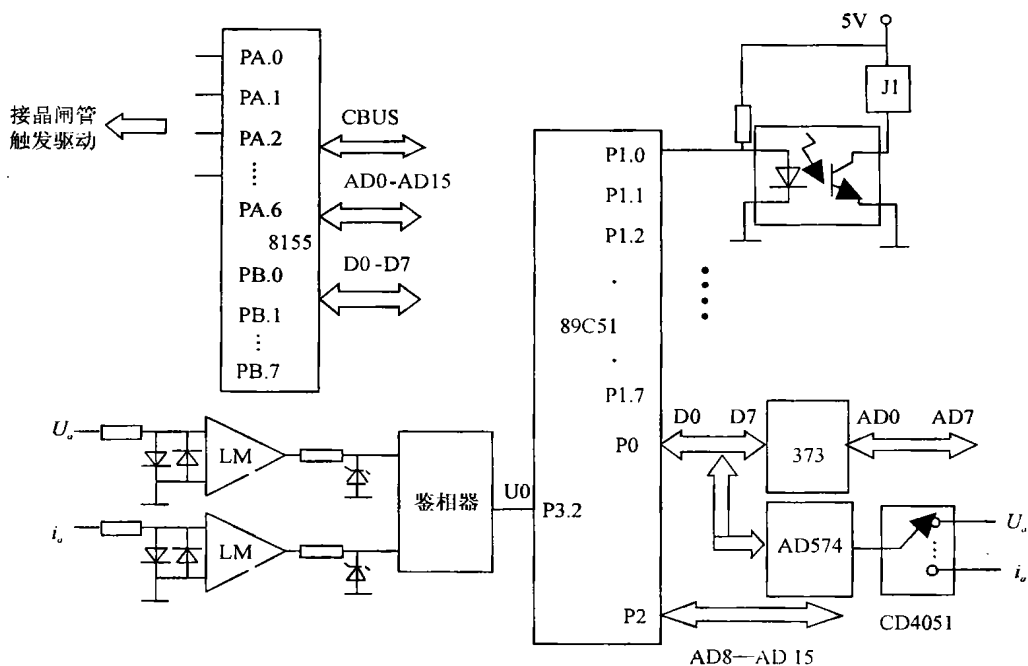


图 7 以单片机为核心的控制系统结构原理图

2.3 系统模拟测试结果

本系统在实验变电所投入运行后,模拟测试点在主变压器的一次侧(6kV),无功补偿装置接在主变压器的二次侧(400V侧)。

①功率因数测试:投入运行前的功率因数设定成 0.7,投入无功补偿装置后,系统的功率因数上升到 0.97. ②电压闪变及波动测试:选用 VF-9101 型数字电压闪变测试仪.电压闪变从 0.2% 下降到 0.1%. ③选用 GXF-9080 功率谐波分析仪检测变压器一次侧的总电压畸变率 $THDU = 1.1$ 其中奇次占 0.57%,偶次占

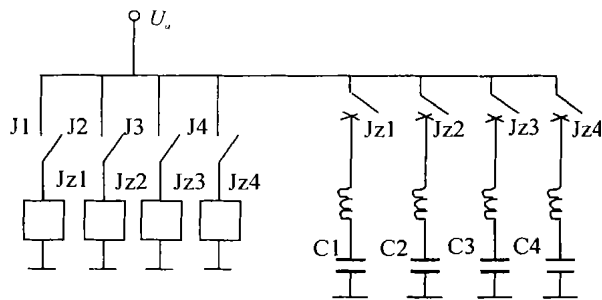


图 8 电容器接入示意图

总电压畸变率 THDU= 1.1 其中奇次占 0.57%, 偶次占 0.42% . 各项指标均符合供电部门的要求.

3 结束语

本装置投入试用后,能有效地调节和提高负荷的功率因数,减少无功电流引起的线路损耗,抑制电网的电压波动,由于在补偿电容前,采用了 LC 串联的谐波消除法和在变压器二次侧对系统功率因数进行补偿,因此,基本克服了因可控电感接入而产生的谐波对一次侧,即电网的影响.同时,本装置具有结构简单,费用投入少等优点.

参考文献

- [1] 邹华铮. 按功率因数为控制量的无功补偿装置分组[J]. 供用电, 1999(4): 25~27.
- [2] 庄华. 数字化功率因数补偿器的设计[J]. 电气自动化, 1966(4): 38~39.
- [3] 薛钧义. 单片微型计算机及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社.

3 控制电源

停电时常规的控制电源也没有了,为此必须安排好停电保护控制电路所必须的电源,否则就谈不上实施保护。对此,一方面要尽量简化保护电路,减少所需的功耗,以利于装备容量较小的不停电电源,降低费用;另一方面在直流控制电源中适当地增加滤波电容,兼作储能,在瞬停后有0.5~1.0s时间维持控制电源,便可作为保护操作所需的电源。一般说,后一种措施已能满足保护操作需要,储能电容容量是可以接受的。

在蓄电池化成和放电过程中,交流电网停电时,蓄电池直流电源仍存在,也可以利用,所以不用装备专用的不停电控制电源。

SCR有源逆变器不仅在蓄电池化成和充放电电源中得到广泛应用,在其它领域(如线绕式异步电动机串级调速装置)也有大量使用。而电网瞬停保护不够完善常常会带来麻烦和故障。寻求简便有效的保护是一项有意义的技术关键。以上讨论的保护电路,可望进一步完善蓄电池化成和充放电电源的性能。

[参考文献]

- [1] 日本电气学会. 电力半导体变流电路[M]. 王兆安,等译. 北京:机械工业出版社,1993.

Power-cut Protection for the Thyristor Inverter with Supply

Wang Yaode

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The protection for the failure of the inverter with supply in the thyristor inverter source to be used for battery formation and as charge/discharge is studied. The auxiliary circuit to switch off the thyristor in the inverter is added in order to improve the properties of battery charge/discharge source. The signal sensing for power-off and the implement of the control source to be used for the protection is analysed in this paper.

Key words: thyristor, inverter with supply, battery

[责任编辑:刘健]

(上接第21页)

The Development of Static Reactive Power Compensation System

Sun Pindong

(College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: The paper introduces the working principle in TCR and the grouped compensation capacitor plus TCR. A suppressing method for high-frequency harmonic in the system is also presented. In addition, an example of real compensation system design is given.

Key words: reactive compensation, power factor, FC+TCR, microprocessor

[责任编辑:刘健]