

[控制系统]

电网混合型无功补偿系统

文/河北工业大学电气工程学院 董 浩 牛云涛 聂海龙
天津市电力公司城西供电分公司 张渭澎

随着电网对无功补偿的要求越来越高，为了对无功功率进行精确补偿，将晶闸管投切电容器TSC和静止无功发生器SVG相结合，设计了一种混合型无功补偿系统。该系统由TSC、SVG和无功补偿控制器组成，TSC用于无功功率的大范围粗略补偿，SVG则用于无功功率的精确补偿，无功补偿控制器用于实时电压、电流的采集和处理，控制产生TSC和SVG中开关器件的脉冲信号。该系统的实际应用，可显著提高电网的功率因数，并以较高精度实现无功功率的大范围连续补偿。

随着我国电网规模的不断增大，电力系统中的变压器、电动机等需要从电网中吸收无功功率来维持运行的设备逐渐增多，而在电力系统中的无功功率基本均由发电机发出。但是，在电力系统飞速发展的今天，发电机发出的无功功率早已满足不了电网的需求，当无功功率无法及时输送时，线路的损耗会增大，设备的容量需求就会增高，甚至影响到供电质量，因此，对电网进行无功补偿就显得尤为重要了。现在，常用的无功补偿方式是在各级电网中设置相应的无功补偿装置来补偿电力设备所需的无功功率，以维持各设备的正常运行，提高功率因数。本文所研究的是一种混合型无功补偿系统，该系统可以实现大范围、高精度和实时性好的无功功率补偿。

无功补偿的发展

电网的无功补偿经过了多年的发展，产生了许多种无功补偿的方式，从最初的调节电容补偿，到调压调容补偿，再到动态无功补偿，下面介绍几种无功补偿方式。

传统的无功补偿方式主要有同步调相机，并联电容器等。同步调相机是一种特殊的同步电机，它不带负载，可以工作在过励磁和欠励磁两个状态：过励磁运行时，它可以向系统供给感性无功功率，相当于一个无功电源；在欠励磁运行时，它会从

系统吸取感性无功功率，此时相当于一个无功负荷。运行状态可以通过调节励磁电流来改变。但是它也有很多缺点，如损耗大、运行维护复杂，投资费用大、动态调节响应慢等。并联电容器是现在我国应用较多的一种方法，通过向负荷侧投入电容器组来提高功率因数以减少无功功率流动而提高受端电压、降低网损，但是它不能吸收无功功率，投入和切除较慢，且补偿的无功均为固定容量，无法动态补偿。

如今，随着电力电子器件的高速发展，以及电力电子器件在电力系统中的应用越来越广泛，无功补偿技术也得到了不断进步，最具代表性的有静止无功补偿器SVC，静止无功发生器SVG。SVC通常由静电电容器、电抗器及检测与控制系统组成，有以下几种形式：固定电容加晶闸管控制电抗器型（FC+TCR）、晶闸管投切电容器型TSC、饱和电抗器型SR以及混合型（TCR+TSC）。SVC发出与吸收无功功率是通过控制晶闸管的触发延迟角来动态调节的，响应时间较短，但是其在运行时会产生谐波，必须加装滤波器，而且不能对负载进行分相补偿。SVG是如今较为先进的补偿技术，它是在电网上直接并联自换相桥式电路，或者再串联一个电抗器。与SVC相比，SVG具有响应速度快、运行范围宽、产生谐波少等优点，但由于电力电子器件的

频率限制，其补偿容量往往达不到要求。

综上所述，本系统决定采用晶闸管投切电容

器TSC和静止无功发生器SVG混合使用的补偿方式。其原理如图1所示。

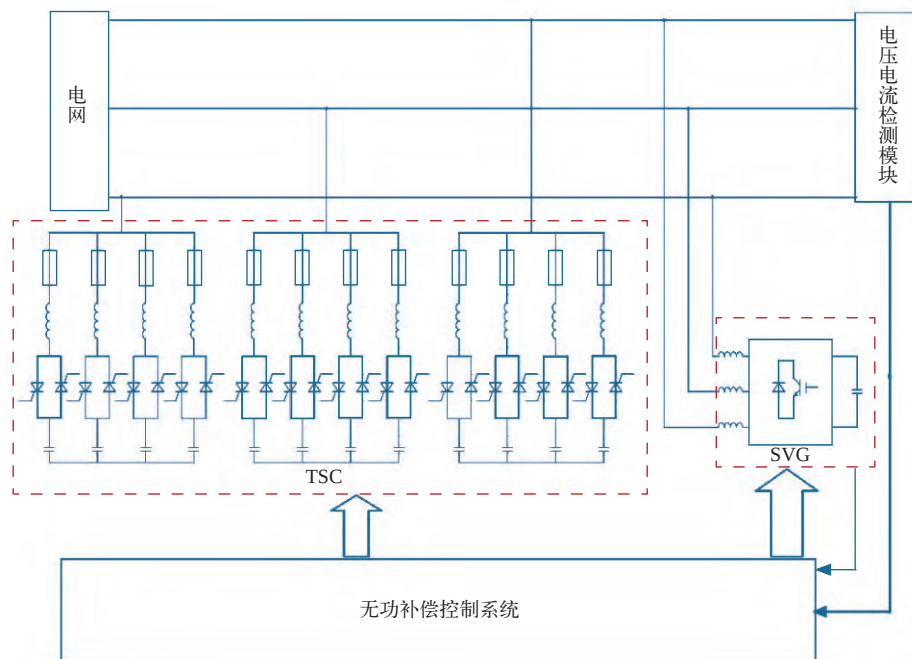


图1 混合型无功补偿系统原理图

混合型无功补偿系统的设计

混合型无功补偿控制系统，包括晶闸管投切电容器TSC、静止无功发生器SVG和无功补偿控制器。TSC、SVG并联在电网的公共节点上，TSC用于无功功率的大范围粗略补偿，SVG则用于无功功率的精确补偿；所述的无功补偿控制器用于实时电压、电流的采集和处理，控制产生TSC和SVG中开关器件的脉冲信号，从而实现电网无功功率的大范围连续补偿。

1. 晶闸管投切电容器TSC的组成及原理

晶闸管投切电容器TSC由三相相同的拓扑结构构成，其中每一相均设有4个由电容、小电感和反并联晶闸管串联组成的支路，电容的大小则按2的加权分布，即电容值之比为8:4:2:1，通过控制电容支路上的反并联晶闸管的开关状态，确定电容器的接入量而改变电容器组的电容值，4个支路共有16种通断组合，则TSC可实现16级无功功率补偿，实现无功功率的大范围、粗略补偿。以电网的某一相为例，记电网相电压为 U ，频率为 ω ，TSC各支路的电容值分别为 $8C$ 、 $4C$ 、 $2C$ 和 $1C$ ，忽略TSC支路的小电感作用，则TSC可发出的感性无功为

$$Q_{TSC} = n\omega CU^2$$

$$n=0, 1, \dots, 15 \quad (1)$$

2. 静止无功发生器SVG的组成及原理

静止无功发生器SVG为三相电压型主电路，由三相逆变器、直流侧储能电容和交流侧电感组成，直流侧电容的储能为逆变器提供直流电压输入，交流侧电感用于抑制电流突变，三相逆变器则在不同的开关状态下输出所需要的电压和无功补偿电流，以实现无功功率的精确补偿。也就是说，通过控制三相逆变器的驱动信号，而对各相无功功率进行精确补偿。

SVG发出的最大无功功率为

$$Q_{STAT} = \frac{U^2}{2R} \sin 2\delta \quad (2)$$

式中， R 为SVG的等效电阻； δ 为SVG输出端电压与电网电压的相位差， δ_m 为其最大值。

因此，只要选择合适的TSC电容 C 值和SVG各主器件参数，即可以实现无功功率的从0到 $15\omega U^2 + \frac{U^2}{2R} \sin 2\delta_m$ 的、连续大范围的精确、连续补偿。

3. 无功补偿控制器的组成及原理

无功补偿控制器以DSP和FPGA为核心，包括电网电压检测模块、电网电流检测模块、SVG输出电流检测模块、A-D转换模块、DSP信号处理模块、FPGA脉冲生成模块和保护电路模块。电网电压检测模块、电网电流检测模块、SVG输出电流检测模块连接到A/D转换模块上，A-D转换模

块的输出端分别与DSP信号处理模块、FPGA脉冲生成模块相连接，DSP信号处理模块以及保护电路模块与FPGA脉冲生成模块相连接，FPGA脉冲生

成模块生成TSC脉冲信号和SVG脉冲信号分别连接到TSC和SVG上对其进行控制。无功补偿控制器的电路方框图如图2所示。

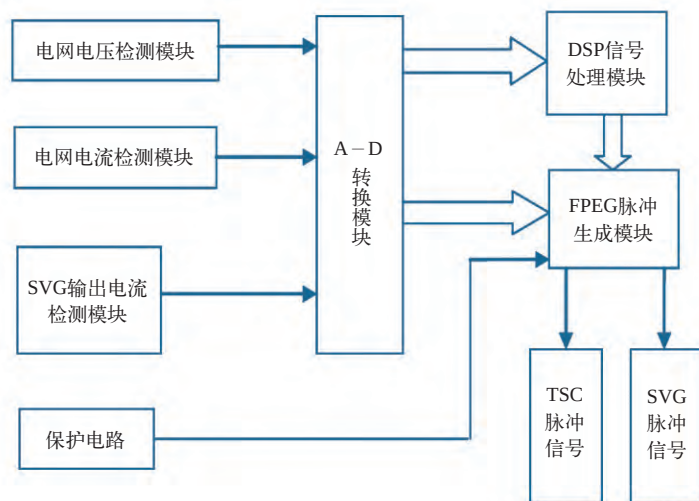


图2 无功补偿控制器电路

无功补偿控制器的各个模块的具体功能是：电网电压检测模块用于实时获取电网电压；电网电流检测模块用于实时获取电网电流；SVG输出电流检测模块用于实时获取SVG输出的补偿电流；A-D转换模块用于将检测到的电压、电流模拟信号转换为高精度的数字信号；DSP信号处理模块通过相关算法对实时的电网电压和电流进行分析、运算，获取无功指令电流；FPGA脉冲生成模块在无功指令电流和补偿电流反馈值的作用下产生需要的PWM脉冲信号；保护电路模块用于进行器件的过电流保护。

(1) 电网电压检测模块

电网电压检测模块如图3所示，主要由电压互

感器、运算放大器构成，对电网的电压信号进行检测和处理，其中电压互感器选用HPT303的跟踪型电压隔离互感器，运算放大器选用TL084D型运算放大器，其中运算放大器需要两个。HPT303的跟踪型电压隔离互感器将大电压信号按某一规律转换为小电压信号，通过一个TL084D运算放大器构成的低通滤波电路后，再通过另一个TL084D运算放大器构成的调理电路，最终得到符合A-D芯片模拟输入的电压信号。另外，电网电流检测模块、SVG输出电流检测模块电路结构的实现与电网电压检测模块类似，在此不再详述。

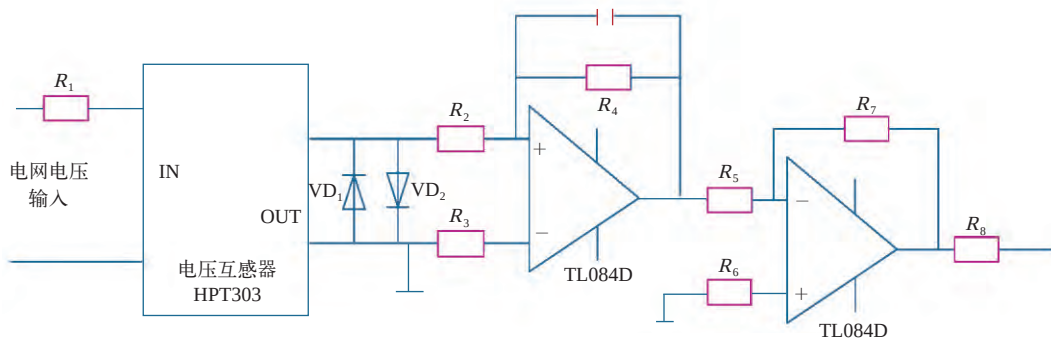


图3 电网电压检测模块

(2) A-D转换模块

A-D转换模块如图4所示，该模块采用AD

公司的6通道16位高速AD芯片AD73360，能够保证检测的精度，其输入信号范围为 $\pm 10\text{ V}$ ，其

DSP (TMS320F2812芯片) 的通信方式采用同步串行接口McBSP进行, DSP通过程序即可控制

AD73360的A-D转换过程, 并读取所需要的信号的数字量。

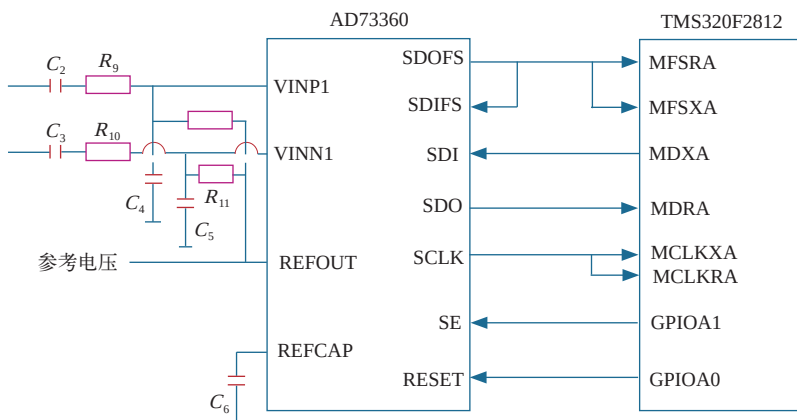


图4 A-D转换模块

(3) DSP与FPGA的选型与连接

DSP与FPGA的连接如图5所示。为了保证无功补偿的实时性, 无功补偿控制器采用DSP和FPGA共同实现系统的数据处理和信号控制功能。DSP信号处理模块、FPGA脉冲生成模块之间的通信设计采用串口实现快速可靠的数据交换。DSP信号处理模块选用的DSP芯片为TI公司的TMS320F2812, 主要完成实时信号的处理和保护控制功能; 所述FPGA脉冲生成模块选用的FPGA芯片为Altera公司Cyclone II系列的EP2C8Q208C8N, 主要完成PWM信号的产生输出。在实现过程中, 还需要配置一些基本的外围电路和扩展电路, EP2C8Q208C8N的外围电路包括时钟电路、复位电路、电源电路、JTAG

接口和外扩FLASH电路, 用于保证EP2C8Q208C8N正常工作 and 存储器要求, 控制信号输入则对其工作状态进行控制; TMS320F2812的外围电路包括时钟电路、复位电路、电源电路、JTAG接口, 用于保证TMS320F2812正常工作。EP2C8Q208C8N和TMS320F2812间的通信采用串行通信方式, 由数据线、地址线、控制线、中断线和串口线构成, 数据线为两者间数据交换通道, 为16位并行接口, 由通用I/O口实现, 地址线为地址通道, 为16位并行接口, 由通用I/O口实现, 控制线用于TMS320F2812对EP2C8Q208C8N的控制, 中断线用于EP2C8Q208C8N向TMS320F2812的中断申请。SRAM为外扩的静态存储器, 由数据线和地址线控制访问。

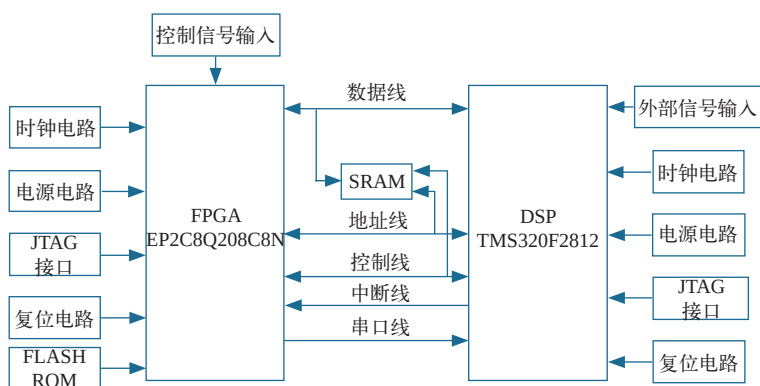


图5 DSP与FPGA的连接

结束语

该混合型无功补偿系统采用了TSC与SVG混合补偿的方式, 克服了TSC补偿不够精确以及SVG补偿容量不足的缺点, 从而实现了大范围的精确补

偿。在无功补偿要求越来越高的今天, 该补偿系统的研究具有一定的实际意义。EA

(收稿日期: 2015.04.27)

(编辑: 杨得润)