

第10章 电力电子技术的应用

学习的主要内容:

10.2 变频器和交流调速系统

10.3 不间断电源

10.4.1 开关电源

10.5.1 功率因数校正技术

10.6 电力电子技术在电力系统中的应用

掌握的内容:

- 概念
- 分类、基本结构
- 工作原理、分析

10.2 变频器和交流调速系统

当负载为电动机时，通常要求间接交流变流电路输出电压的大小和频率可调，此时该电路又名**交-直-交变频电路**（或称**AC - DC - AC**、**交直交变频电路**）。

10.2.1 交-直-交变频器

■ **交-直-交变频器**（简称**VVVF**电源）

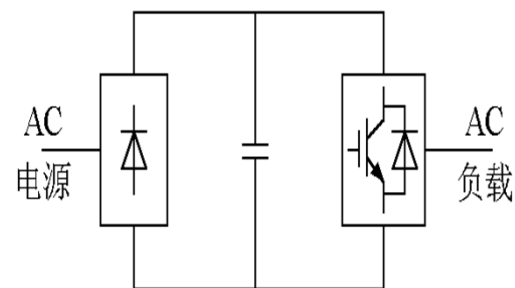
由**AC/DC**、**DC/AC**两类基本的变流电路组合形成，又称为间接交流变流电路，最主要的优点是输出频率不再受输入电源频率的制约。

应用最广泛，主要分为七种类型。

◆ **不能再生反馈电力的电压型交直交变频电路。**

AC/DC部分是不可控整流，它和电容器之间的直流电压和直流电流极性不变，只能由电源向直流电路输送功率，而不能由直流电路向电源反馈电力。

DC/AC部分的能量是可以双向流动的，若负载能量反馈到中间直流电路，而又不能反馈回交流电源，这将导致电容电压升高，称为**泵升电压**，泵升电压过高会危及整个电路的安全。



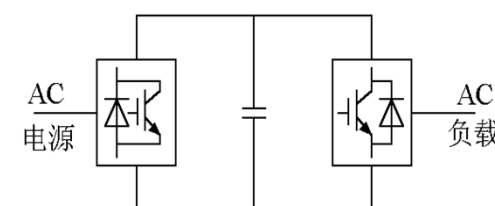
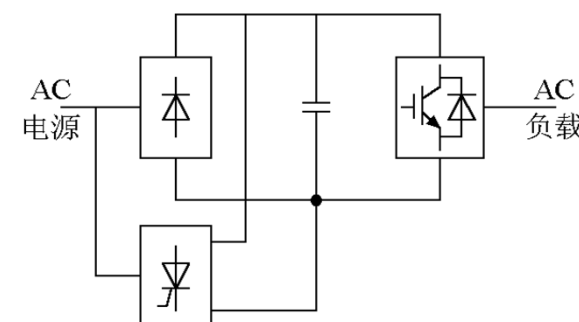
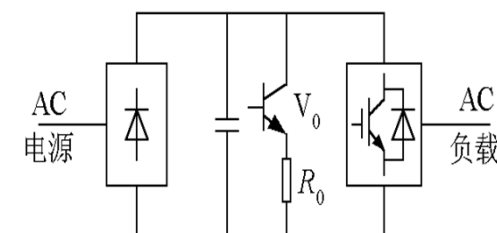
■ 能再生反馈电力的电压型交直交变频电路。

◆ 当负载电动机频繁、快速制动时，通常要求具有再生反馈电力的能力。

◆ 带有泵升电压限制电路的电压型间接交流变流电路：加入一个由电力晶体管 V_0 和能耗电阻 R_0 组成的泵升电压限制电路，当泵升电压超过一定数值时，使 V_0 导通，把从负载反馈的能量消耗在 R_0 上。

◆ 利用可控变流器实现再生反馈的电压型间接交流变流电路：增加了一套变流电路，使其工作于有源逆变状态，可实现电动机的再生制动；当负载回馈能量时，中间直流电压极性不变，而电流反向，通过控制变流器将电能反馈回电网。

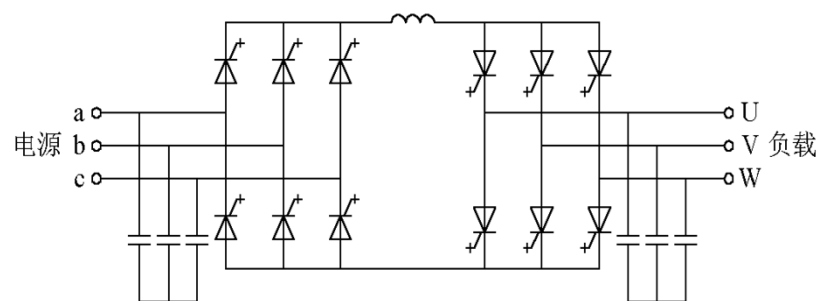
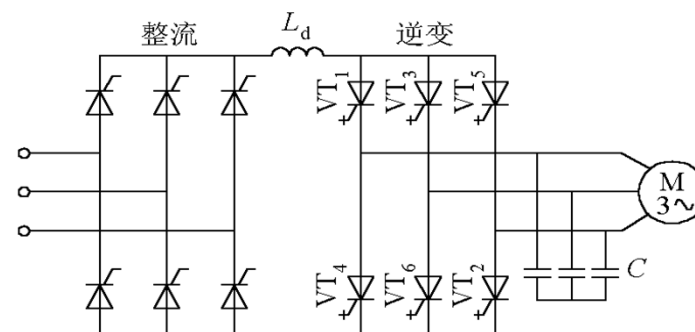
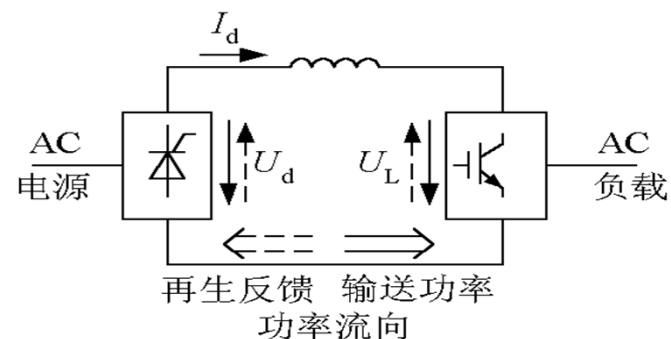
◆ 整流和逆变均为PWM控制的电压型间接交流变流电路：整流电路和逆变电路都采用PWM控制的间接交流变流电路，可简称双PWM电路，该电路输入输出电流均为正弦波，输入功率因数高，且可实现电动机四象限运行，但由于整流、逆变部分均为PWM控制且需要采用全控型器件，控制较复杂，成本也较高。



◆采用可控整流的电流型间接交流变流电路：当电动机制动时，中间直流电路的电流极性不能改变，要实现再生制动，只需调节可控整流电路的触发角，使中间直流电压反极性即可。

◆电流型交—直—交PWM变频电路：基于上述原理的电路图，主电路中的器件换为GTO，适用于较大容量的场合，电容C是吸收GTO关断时产生的过电压，它也对输出的PWM电流波形起滤波作用。

◆整流和逆变均为PWM控制的电流型间接交流变流电路：交流电源侧和交流负载侧电容器吸收换流时的过电压；可四象限运行，同时通过对整流电路的PWM控制可使输入电流为正弦波，并使输入功率因数为1。



10.2.2 交流电机变频调速的控制方式

传统的晶闸管直流电动机传动系统存在一些固有的缺点：(1) 受使用环境条件制约；(2) 需要定期维护；(3) 最高速度和容量受限制等。而交流调速传动系统除了克服直流调速传动系统的缺点外还具有：(1) 交流电动机结构简单，可靠性高；(2) 节能；(3) 高精度，快速响应等优点。

采用变频调速方式时，无论电机转速高低，转差功率的消耗基本不变，系统效率是各种交流调速方式中最高的，节能效果显著，是交流调速传动应用最多的一种方式。

笼型异步电动机的定子频率控制方式，有：(1) 恒压频比 (U/f) 控制；(2) 转差频率控制；(3) 矢量控制；(4) 直接转矩控制等。

$$\Phi \approx \frac{U}{4.44fN} = \frac{1}{4.44N} \cdot \frac{U}{f} \propto \frac{U}{f}$$

◆恒压频比控制

异步电动机的转速主要由电源频率和极对数决定，改变电源（定子）频率可对电动机进行调速，同时为了不使电动机因频率变化导致磁饱和而造成励磁电流增大，引起功率因数和效率的降低，需对变频器的电压和频率的比率进行控制，使该比率保持恒定，即恒压频比控制，以维持气隙磁通为额定值。

◆转差频率控制

一种转速闭环的控制方式，可提高调速系统的动态性能。这种方法是基于电机稳态模型，来控制转差角频率，得到平滑而稳定的调速，保证了较高的调速范围和动态性能。但仍然不能得到理想的动态性能。

◆矢量控制

基于异步电机的按转子磁链定向的动态数学模型，将定子电流分解为励磁分量和与此垂直的转矩分量，分别独立地进行控制，类似直流调速系统中的双闭环控制方式。该方式需要实现转速和磁链的解耦，控制系统较为复杂。

◆直接转矩控制

基于电机的动态模型，其控制闭环中的内环，直接采用了转矩反馈，并采用砰—砰控制，可以得到转矩的快速动态响应，并且控制相对要简单许多。

10.3 不间断电源

■ 不间断电源（**UPS**）是当交流输入电源（习惯称为市电）发生异常或断电时，继续向负载供电，并保证供电质量，使负载供电不受影响的装置。

■ 一般是指输出为交流的**UPS**，通常是**恒压恒频（CVCF）**，广泛应用于各种对交流供电可靠性和供电质量要求高的场合。

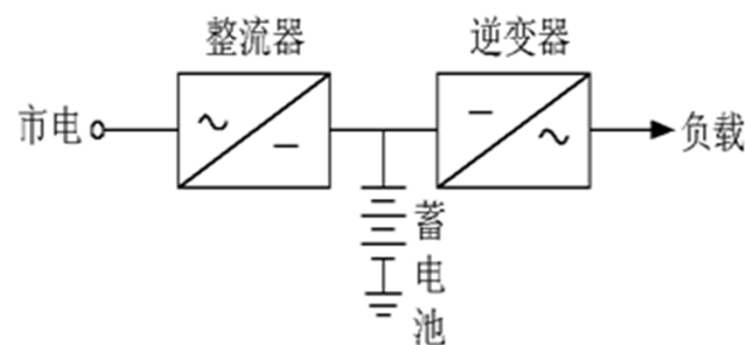
■ UPS的结构原理

◆ 最基本的结构原理如图。

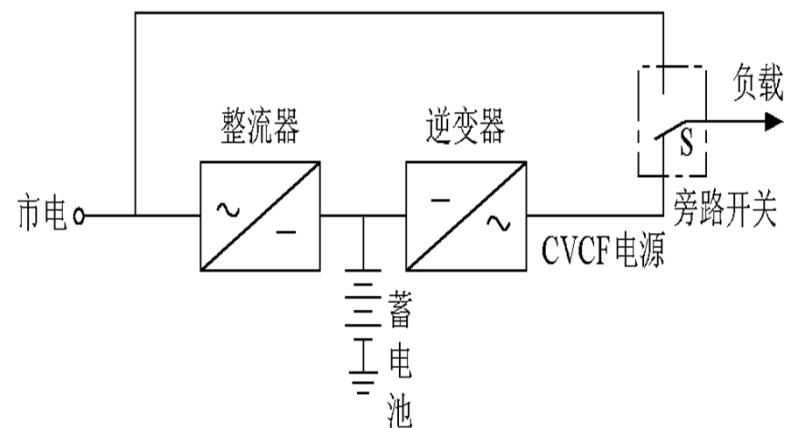
当市电正常时，市电经整流器整流为直流，再逆变为**50 Hz** 恒压恒频的交流电向负载供电。同时，整流器输出给蓄电池充电，保证蓄电池的电量充足。

当市电异常乃至停电时，由蓄电池向逆变器供电。

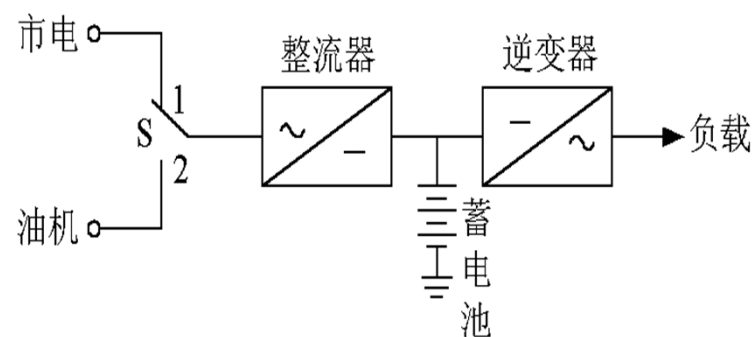
因此，供电不受市电停电的影响，负载得到的交流电压质量高，能获得正常的恒压恒频的正弦波交流输出，并且具有稳压、稳频的性能，因此也称为**稳压稳频电源**。



◆实际的UPS产品中多数都设置了旁路开关，增加旁路电源，可使负载供电可靠性进一步提高。如图所示，市电旁路电源与逆变器提供的CVCF电源，在逆变器故障时，由转换开关S切换；在市电旁路电源与CVCF电源之间切换时，采用锁相同步的方法保证两个电压的相位一致。



◆在市电断电时由于由蓄电池提供电能，供电时间取决于蓄电池容量的大小。为了保证长时间不间断供电，可采用柴油发电机作为后备电源，如图所示，蓄电池只需作为市电与油机之间的过渡，容量可以比较小。



10.4 开关电源

10.4.1 开关电源的结构

先整流滤波、后经高频逆变得到高频交流电压，然后由高频变压器降压、再整流滤波，这种采用高频开关方式进行电能变换的电源称**开关电源**。



- ◆ 整流电路普遍采用二极管构成的桥式电路，直流侧采用大电容滤波。
- ◆ **高频逆变—变压器—高频整流电路**是开关电源的核心部分，具体的电路采用的是隔离型直流直流变流电路。
- ◆ 高性能开关电源中普遍采用了**软开关技术**。
- ◆ 高频变压器可设计**多个二次侧绕组**，实现多组输出。
- ◆ 开关电源采用了工作频率较高的交流环节，变压器和滤波器都大大减小，体积和重量都远小于线性稳压电源，且具有很高的效率。
- ◆ 开关电源为高效节能电源。性能完善、对环境污染小的开关电源被称作绿色电源，代表了稳压电源的发展方向。

10.5 功率因数校正技术

- 以开关电源为代表的各种电力电子装置带来一些负面的问题：输入电流不是正弦波，就涉及到谐波和功率因数的问题。
- 功率因数校正PFC 技术即对电流脉冲的幅度进行抑制，使电流波形尽量接近正弦波的技术，分成无源功率因数校正和有源功率因数校正两种。
 - ◆ 无源功率因数校正技术通过在二极管整流电路中增加电感、电容等无源元件和二极管元件，对电路中的电流脉冲进行抑制，以降低电流谐波含量，提高功率因数。
 - ◆ 有源功率因数校正技术采用全控开关器件构成的开关电路对输入电流的波形进行控制，使之成为与电源电压同相的正弦波。

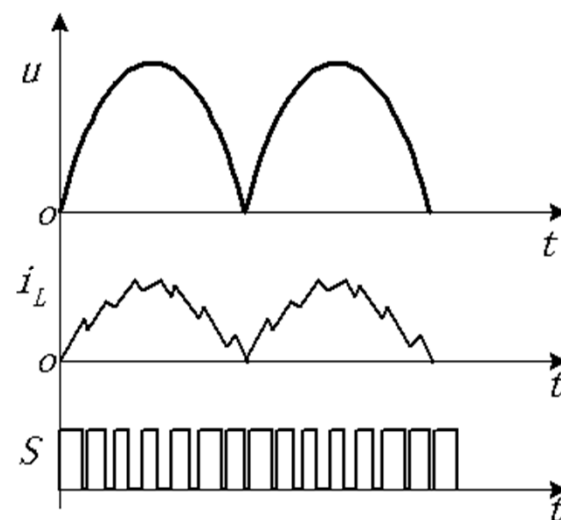
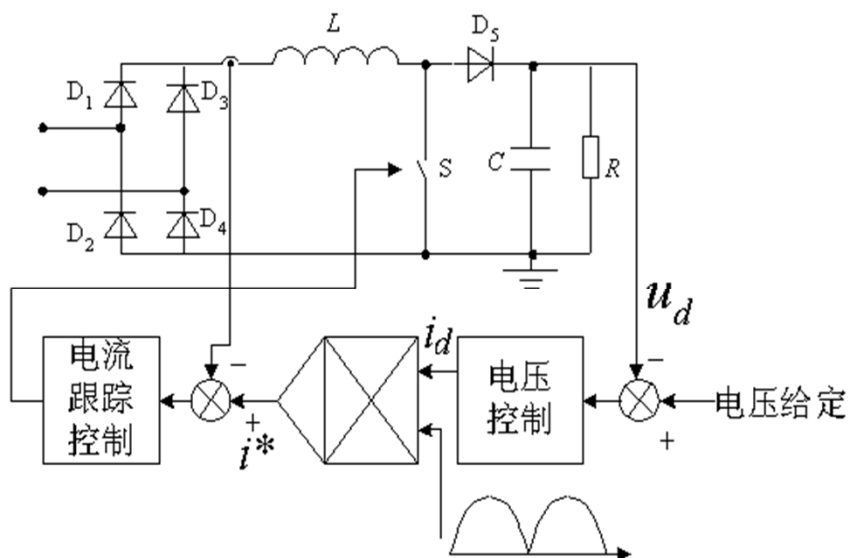
10.5.1 功率因数校正电路的基本原理

1. 单相功率因数校正电路的基本原理

◆ 由二极管整流电路加上升压型斩波电路构成。

◆ 原理

给定的直流电压信号和实际的直流电压 u_d 比较后送入PI调节器，得到指令信号 i_d ， i_d 和整流后正弦电压相乘得到输入电流的指令信号 i^* ，该指令信号和实际电感电流信号比较后，通过滞环（一种控制方法）对开关器件进行控制，便可使输入直流电流跟踪指令值，这样交流侧电流波形将近似成为与交流电压同相的正弦波，跟踪误差在由滞环环宽所决定的范围内。



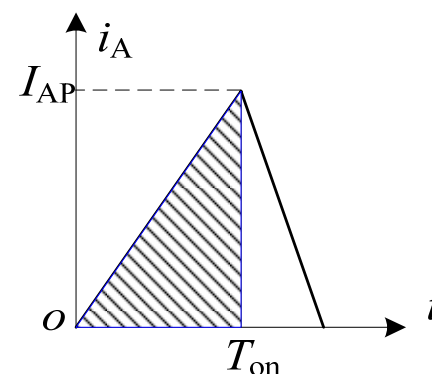
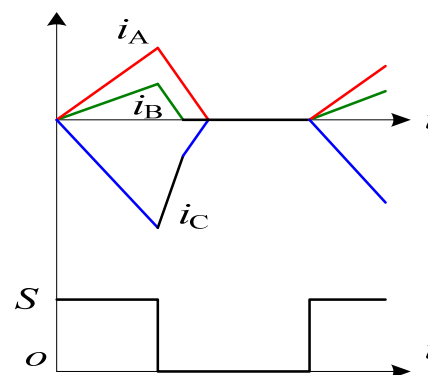
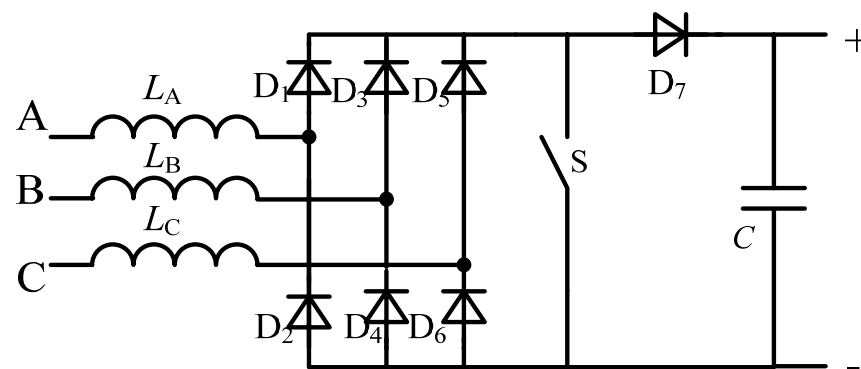
■ 2. 三相功率因数校正电路的基本原理

◆ 电路一种单开关的三相PFC电路，如图所示。工作在电流不连续模式的升压斩波电路（ $L_A \sim L_C$ 的电流在每个开关周期内都是不连续的）；电路的输出电压高于输入线间电压峰值。

◆ 工作原理

S开通后，电感电流值均从零开始线性上升（正向或负向），**S**关断后，三相电感电流通过**D₇**向负载侧流动，并迅速下降到零。

在每一个开关周期中，**电感电流是三角形或接近三角形的电流脉冲**，其峰值与输入电压成正比；假设**S**关断后电流 i_A 下降很快， i_A 的平均值将主要取决于阴影部分的面积，这样 **i_A 平均值与输入电压成正比**，因此输入电流经滤波后将近似为正弦波。



10.6 电力电子技术在电力系统中的应用

10.6.1 高压直流输电

■ **高压直流输电（HVDC）**是PE在电力系统中最开始的应用领域，随着PE的发展，带来了可靠的高压大功率交直流转换技术，高压直流输电越来越受到关注。

■ 原理

发电厂输出交流电，换流变压器升高电压后送到**晶闸管整流器**，由晶闸管整流器将高压交流变为高压直流。

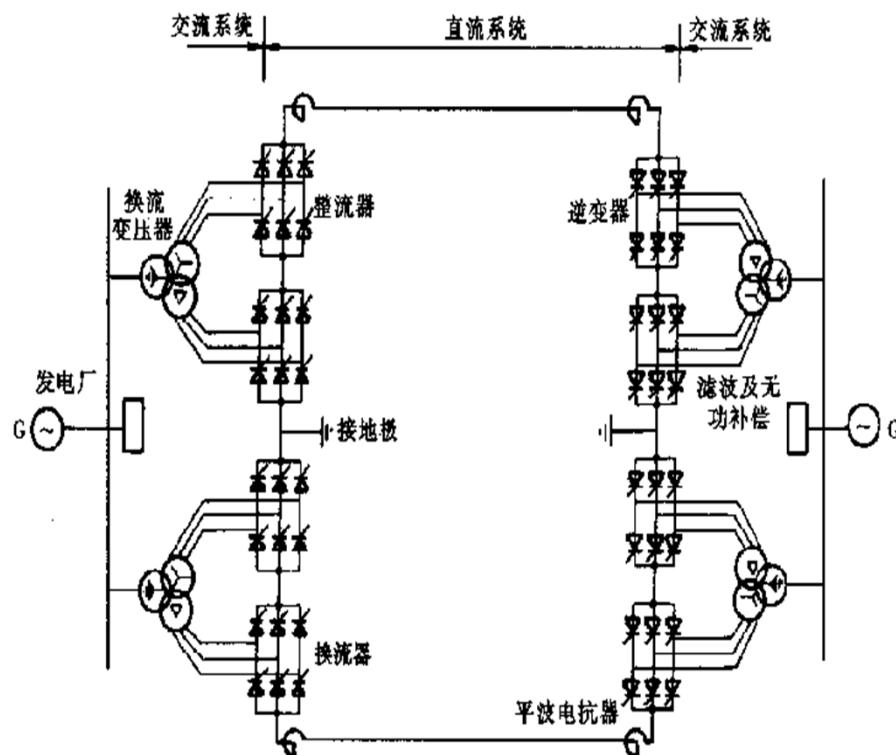
直流输电线路输送电能到接受端。在受端电能又经过**晶闸管逆变器**由直流变回交流，再经变压器降压后配送到各个用户。

■ 典型结构

十二脉波换流器的**双极**高压直流输电线路。如图所示。双极运行接地点电流小。可单极运行，接地点电流大。

与高压交流输电相比，高压直流输电具有如下优势：

- ◆ 更有利于进行远距离和大容量的电能传输或者海底或地下电缆传输。
- ◆ 更有利于电网联络。
- ◆ 更有利于系统控制。



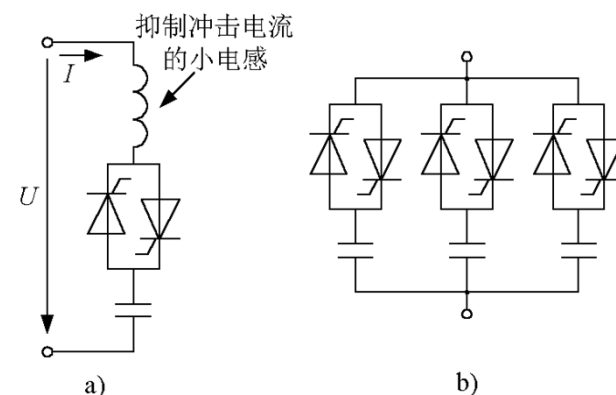
10.6.2 无功功率控制

■在电力系统中控制无功功率，可提高功率因数，稳定电网电压，改善供电质量。

■1. 晶闸管投切电容器 TSC

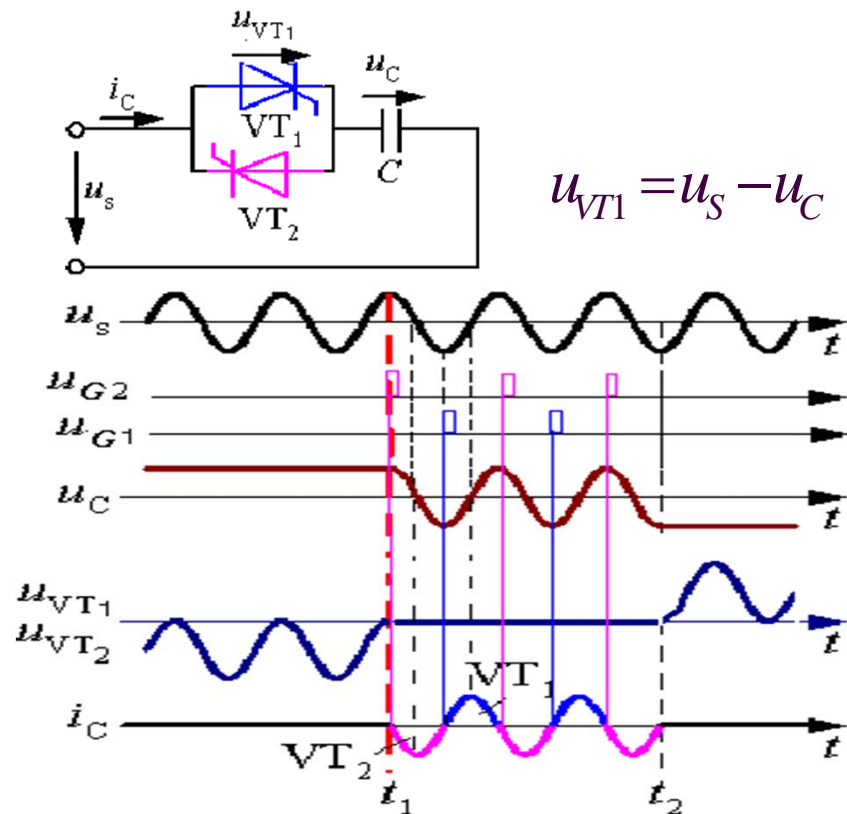
◆TSC是一种性能优良的无功补偿方式。

◆TSC的基本原理如图，用交流电力电子开关来投如或者切除电容器，一般把电容器分成几组，根据电网对无功的需求而改变投入电容器的容量，TSC实际上成为断续可调的动态无功功率补偿器。



◆TSC运行时SCR投入时刻的原则

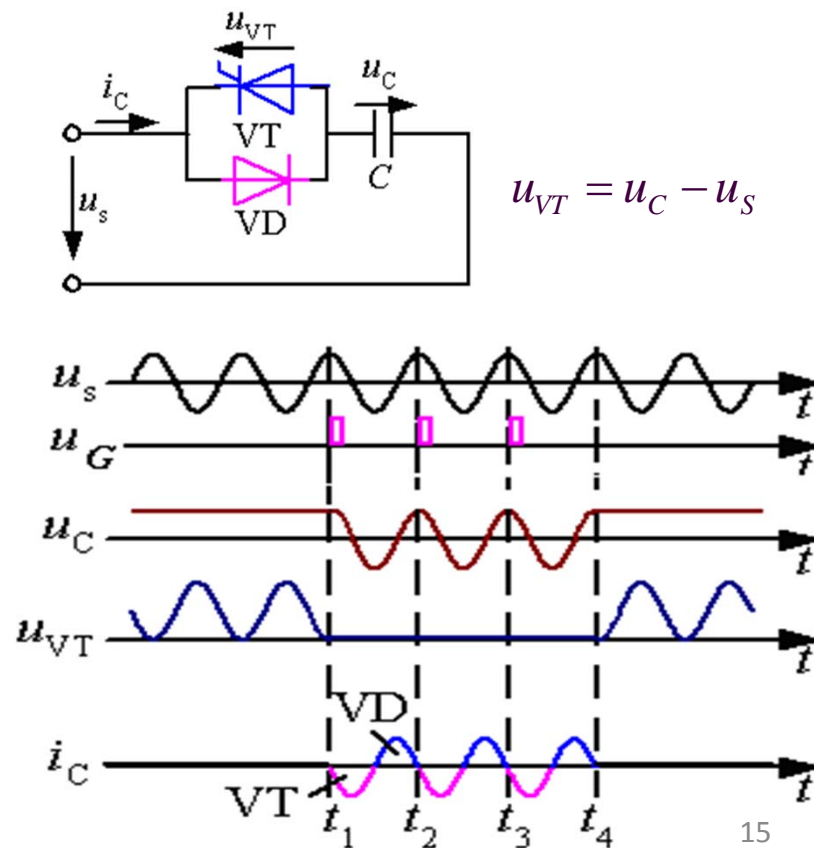
交流电源电压和电容器预先充电的电压相等，不产生冲击电流。一般希望电容器的电压为电源电压峰值，这时电源电压的变化率为零，因此在投入时刻 i_c 为零，之后才按正弦规律上升。



如图所示，导通开始时， u_C 已由上次导通时段最后导通的晶闸管 VT_1 充电至电源电压 u_s 的正峰值， t_1 时刻导通 VT_2 ，以后每半个周波轮流触发 VT_1 和 VT_2 ；切除这条电容支路时，如在 t_2 时刻 i_C 已降为零， VT_2 关断， u_C 保持在 VT_2 导通结束时的电源电压负峰值，为下一次投入电容器做了准备。

◆晶闸管和二极管反并联方式的TSC

二极管的作用是在电路不导通时 u_C 维持在电源电压峰值。这种电路成本稍低，但因为二极管不可控，**响应速度要慢**，投切电容器的最大时间滞后为一个周波。



10.6.3 电力系统谐波抑制

■抑制谐波有两条基本思路：

- 装设补偿装置，设法补偿其产生的谐波；
- 对电力电子装置本身进行改进，使其不产生谐波，同时还不消耗无功功率，或者根据需要能对其功率因数进行控制，即采用高功率因数变流器。

■ L C 调谐滤波器

◆是传统的补偿谐波的主要手段。

◆其结构简单，既可补偿谐波，又可补偿无功，一直被广泛应用于对电力系统中谐波和无功功率的补偿。

■有源电力滤波器（APF）

◆有源电力滤波器的思想最早提出于上世纪60年代末，1976年确立了有源电力滤波器的完整概念和主电路拓扑结构，上世纪80年代以来，由于新型电力半导体器件的出现，PWM逆变技术的发展，以及基于瞬时无功功率理论的谐波电流瞬时检测方法的提出，有源电力滤波器才得以迅速发展。

◆APF的基本原理

如图所示，**APF**检测出负载电流 i_L 中的谐波电流 i_{Lh} ，根据检测结果产生与 i_{Lh} 大小相等而方向相反的补偿电流 i_c ，从而使流入电网的电流 i_s 只含有基波分量 i_{Lf} 。

◆与**LC**无源滤波器相比，有源滤波能对变化的谐波进行迅速的**动态跟踪补偿**，而且补偿特性不受电网频率和阻抗的影响。

◆**APF**的变流电路可分为**电压型**和**电流型**，目前实用的装置大都是电压型；从与补偿对象的连接方式来看，有源电力滤波器又可分为**并联型**和**串联型**。

◆在**大功率装置**中的应用越来越多。

