

[电力电子]

基于H桥级联型静止无功发生器的分析和探讨

文/上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司 罗韶平

介绍了H桥级联型静止无功发生器的主电路拓扑图及其基本工作原理，进一步对其控制原理和无功指令电流检测方法做了详细介绍，并对比了目前几种主流主电路的拓扑形式，分析了H桥级联型静止无功发生器的优缺点和应用前景。

大功率半导体开关器件经历了晶闸管和GTO，发展到IGBT、IGCT等高性能复合器材，为实现更高开关频率、更大容量逆变器提供了硬件基础。随着开关器件和新型材料的不断发展，静止无功发生器（以下称SVG）朝更大容量、更高电压等级和更低谐波含量的方向突破，SVG逆变器拓扑也出现了许多拓扑形式。例如最初应用在低压SVG的两电平拓扑，发展到现在流行二极管钳位三电平拓扑；在高压SVG方面也经历从多

重化拓扑结构到二极管钳位多电平拓扑结构，再发展出飞跨电容箝位多电平拓扑结构。

近年来，作为一种新型的拓扑结构，H桥级联型技术在高压SVG的应用得到了较快的发展。

H桥级联拓扑及其工作原理

1. 拓扑结构

级联型SVG主电路电气拓扑结构主要分为星形结构和三角形结构，如图1所示。可以看到：

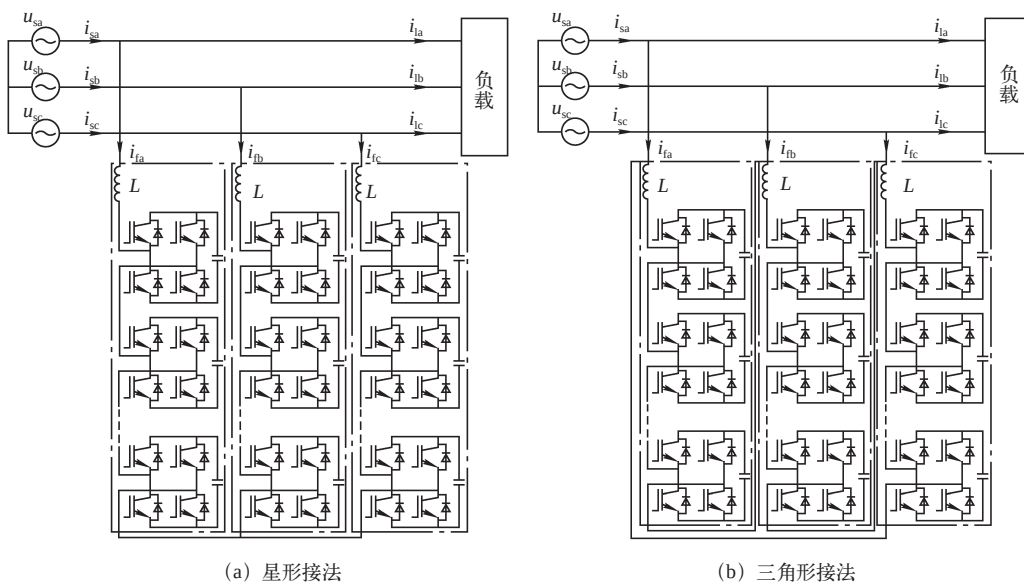


图1 级联型SVG主电路电气原理图

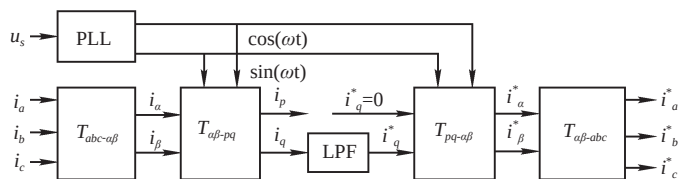


图5 基于瞬时无功理论无功电流检测图

$$T_{\alpha\beta-\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$T_{\alpha\beta-abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$T_{\alpha\beta-pq} = T_{pq-\alpha\beta} = \begin{pmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

为低通滤波。

3. 电压电流双闭环控制策略

该策略综合了直流侧电压稳定、平衡控制与指令电流跟踪两大部分。其中直流侧电压控制是基于PI的外环控制，指令电流跟踪是基于无差拍的内环控制，两个一内一外构成了电压电流双闭环控制。

3.1 基于PI控制的直流侧电压外环控制

级联型SVG直流侧电压是各H桥直流侧电压之和。由于各H桥存在损耗，各直流侧电压存在差异，需要单独控制以稳定控制和平衡控制。

(1) 直流侧电压的稳定控制

对直流侧电压稳定控制也就是控制直流侧电压稳定在目标值，一般采用P控制。

根据图4左上所示可知，直流侧总电压目标值 U_{dc}^* 与各级联单元直流侧实时电压之和 $\sum_{i=1}^n U_{dci}$ 之差，经PI调节器后的输出有功补偿指令电流 I_{dcp}^* 。

(2) 直流侧电压的平衡控制

对直流侧电压平衡控制也就是控制各个级联单元H桥直流侧电压近似等于各个级联单元H桥直流侧电压之和的平均值，属于直流侧电压微调部

分，一般也采用PI调节器进行控制。

根据图4中间所示可知，各级联单元直流侧电压 U_{dci} 与各直流侧电压的平均值 $\sum_{i=1}^n U_{dci}/n$ 的差值经比例调节器P，再与装置输出电流 i_{ox} 相乘得到各级联单元微调量 Δu_i 。

3.2 基于无差拍控制的指令电流跟踪内环控制

根据SVG简化等效电路图3，可得其电路方程

$$u_s(t) = L \frac{di(t)}{dt} + u_o(t) \quad (4)$$

离散化后得

$$\begin{aligned} u_s(k) &= L \frac{di(k)}{dt} + u_o(k) \\ &= L \frac{d(i(k+1) - i(k))}{dt} + u_o(k) \\ &= L \frac{i}{t} + u_o(k) \end{aligned} \quad (5)$$

由于开关周期内级联单元输出电压与直流侧电压成比例关系，则各级联单元调制信号量为

$$u_i = rU_{dc} = (u_s(t) - \frac{L}{T_s} \Delta i) \quad (6)$$

式中， D 是占空比； T_s 是采样周期； $\Delta i = i(k+1) - i(k)$ 是两次采样电流之差； U_{dc} 是各级单元直流侧电压值之和。

根据图4所示可知，基于瞬时无功理论检测到实时无功指令电流 i_{xq}^* 与装置实时并网电流之差经PI调节器后的输出无功补偿指令电流 i_{xq}^* 。补偿指令电流 Δi_x^* 由无功指令电流 i_{xq}^* 和有功直流电流 I_{dc}^* 合成，则第 $k+1$ 时刻调制信号量 $u = u_s(t) - L \frac{\Delta i_x^*}{T_s}$ 。考虑级联单元微调量后，第 n 个级联单元第 $k+1$ 时刻调制信号量 $u = u_s(t) - (\Delta u_i + L \frac{I_{xq}^*}{T_s})$ 。

主流拓扑结构的对比

目前主流的高压大容量的主电路主要有多重

化和多电平两种拓扑结构。

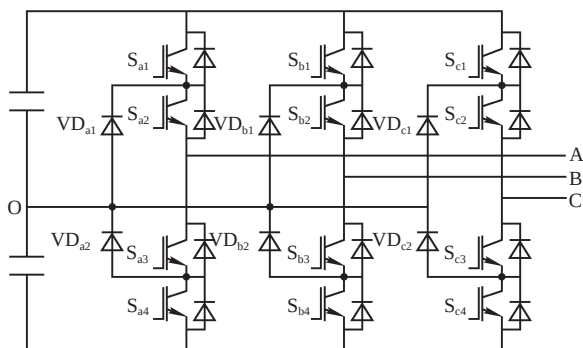
1. 多重化逆变器结构

该拓扑使用移相变压器把若干个逆变器输出错开的电压进行组合，从而得到多种电平，输出近似正弦波的电压。

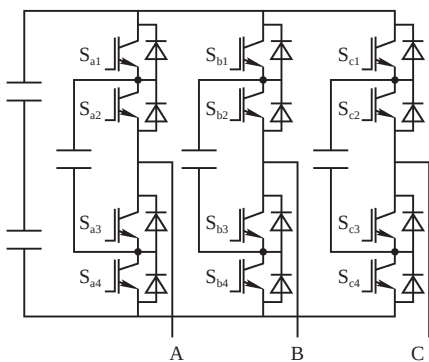
这种结构单个逆变器使用较低的开关频率，叠加后也可以得到较高的等效开关频率，对于改善输出谐波有比较好的效果。但是其增加了移相变压器一者增加了成本，二者增加损耗；同时系统还存在环流和输出波形含有低次谐波等问题；另外多个逆变器控制也相应复杂。近年来多重化结构拓扑形式在高压变频器的场所应用较广，但已经很少在大容量高压SVG应用了。

2. 多电平拓扑结构

除H桥级联型外，市场主流的多电平拓扑结构主要还有二极管钳位型和飞跨电容钳位型。如图6所示。



(a) 二极管钳位型



(b) 飞跨电容钳位型

图6 多电平拓扑结构类型

(1) 二极管钳位型拓扑结构

如图6a所示，该类型为三相三电平拓扑结构，拓扑中如A相中利用钳位二极管 VD_{a1} 与 VD_{a2} 连接点与直流侧两电容中心点连接进行分压，使

开关管只承受单个电容电压，可以输出三个电平数，一定的改善了输出波形。与H桥级联型多电平相比，要达到相同的电平数，二极管钳位型拓扑需要增加相当多数量开关器件，控制更复杂，一般应用在5电平及以下场合。

(2) 飞跨电容钳位型拓扑结构

该拓扑如图6b所示，使用电容替代二极管进行钳位。虽然解决了二极管数量问题和反向恢复延时等问题，但是除了存在二极管钳位型拓扑结构缺点，也增加拓扑中电容预充电控制复杂度。

3. H桥级联型拓扑结构的优缺点

与多电平和钳位型对比，H桥级联型拓扑结构不仅可以以较低的开关频率实现很高的开关频率，降低了开关损耗，输出电压波形含有谐波更少。在大容量高压SVG应用方面具有以下优势。

1) 主电路拓扑简单，级联单元控制简单。

2) 功率单元模块化、拓展容量便捷。

3) 相同容量时，电平数多且低成本。

当然级联型SVG仍存在一些不足。

1) 由于其通过多个子模块串联以支撑直流侧母线电压，各级联单元直流电容电压平衡是级联型多电平逆变器面临的一个特殊问题，会影响到装置的补偿性能和运行安全，需要得到一种很好的控制。

2) 级联型SVG存在多个级联单元亦即控制环节过多，存在多个控制点和监测点，对于软件计算量和保护方面的复杂度相应的增加。

从上述分析可知，基于H桥级联型技术的高压SVG，无需经变压器即可直挂中高压电网，其应用前景较为广阔。

结束语

本文详细地介绍了H桥级联型高压SVG其拓扑形式及其工作原理，同时介绍了相适应的控制策略，并对比了几种现在主要在高压上应用的主电路拓扑结构的优缺点。由此得出结论，H桥级联型高压SVG除具备普通SVG特点外，还易模块化、易拓展，输出谐波含量低，主电路结构简单，可直挂中高压配电网，具有实际工程应用意义和发展前景。EA

(收稿日期：2020.05.21)

(编辑：朱金凤)