

# 电压源型 AC/DC 换流器的运行机理和特性分析

马林, 俞晓荣, 苏宏营, 廖培金

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**传统的高压直流输电(HVDC)是采用基于晶闸管的自然换相的换流器技术,存在一些固有的缺点。近年来随着电力电子技术领域中具有自关断能力的绝缘栅双极晶体管(IGBT)和门关断晶体管(GTO)等器件的发展,使得电压源型换流器(VSC)在HVDC中的应用越来越引起普遍的重视。VSC控制和运行方式简单,输出波形品质好,运行模式灵活,具有良好的发展前景。介绍基于VSC的HVDC的原理,分析了其控制特性、运行技术特点。

**关键词:**高压直流输电; 绝缘栅双极晶体管; 门关断晶体管; 电压源型换流器

**中图分类号:** TM721 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)10-0047-04

## 1 引言

从1954年世界第一-条连接哥特兰与瑞典大陆的高压直流输电(HVDC)联络线投入商业运行以来, HVDC在远距离大功率输电、海底电缆送电、不同额定频率或相同额定频率交流系统之间的非同步联接等方面得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

多年来进行的广泛深入的研究,虽然使HVDC输电技术的性能有了很大的提高,例如损耗降低、控制和保护技术更为先进、谐波减少等等,但是在技术上并未发生根本性的变化。传统HVDC采用基于晶闸管的自然换相的换流器技术,该技术存在着一些固有的缺点<sup>[1]</sup>:(1)由于导通滞后角(一般为10~15°)和熄弧角(一般为15°或更大些)的存在以及波形的畸变,传统的HVDC吸收的无功功率为传输直流功率的40%~60%,这就需要大量的无功补偿及滤波设备,且甩负荷时会出现无功过剩而可能导致过电压;(2)传统的HVDC不能向无源网络(如孤立负荷)输送电能,而需要有源交流系统为其提供换相电压,且受端交流系统必须具有足够的容量(即必须有足够大的短路比),当受端系统较弱时容易发生换相失败。而基于电压源型换流器VSC(Voltage Source Converter)的HVDC(文中用VSC-HVDC表示)系统除了传统HVDC系统的优点外,还具有许多独特的优点:(1)可以为短路比低的交流系统输送电能,甚至可以为无源网络输送电能;(2)具有静止同步补偿器(STATCOM)的功能,可以为交流系统提供无功功率支持以控制交流节点的电压并改善系统稳定性,而且不会有换相失败的危险;(3)正常运行时VSC换流站可以同时且相互独立地控制有功功率和

无功功率;(4)采用正弦脉宽调制(SPWM或PWM)技术,改善了输出电压波形,减少系统的谐波含量;(5)控制和运行方式简单,减少了换流站之间的数字通信;(6)VSC对所连交流系统的短路功率没有影响,不会增加系统的短路功率。这些优点使得VSC引起广泛的关注和研究。

本文介绍VSC-HVDC的原理,分析了VSC换流器的原理和功率特性、VSC-HVDC的控制特性及其应用范围和前景。

## 2 VSC-HVDC 系统结构

VSC-HVDC系统的主要构成部分包括VSC和高压直流电路。目前,对一个12脉冲双极换流器单元,VSC-HVDC系统的额定功率可以达到200MW,其直流电压为±150kV,直流电流超过700A。

根据运行原理,换流器可以分成两大类:第一类需要交流系统提供换相电压(传统换流器即属此类);第二类不需要交流系统支持换相而被称为“自换相换流器”。自换相换流器克服了传统换流器的许多缺点,有着传统换流器所无可比拟的优势。按照直流电路的设计,自换相换流器可进一步分为电流源型换流器CSC(Current Source Converter)和电压源型换流器(VSC)。它们两者的根本区别在于:(1)CSC在换流变压器每相二次侧绕组与换流桥之间以串联电容连接,而VSC中电容(称为换相电容器)连接在换流桥直流侧正负极之间;(2)基于CSC的HVDC潮流反转是由系统的直流电压极性反转实现的,而VSC-HVDC潮流反转是由系统的直流电流方向反转实现的。

图1为一个VSC(可以是整流器也可以是逆变

器)的示意图<sup>[2]</sup>。VSC 主要由换流变压器、换流桥和换相电容等元件构成。在有些 SVC-HVDC 中,也可以不用换流变压器,而用换流电抗器即可<sup>[3,4]</sup>。换流桥的桥臂由几十乃至数百个有自关断能力的绝缘栅双极晶体管(IGBT)或门关断晶体管(GTO)等全控型器件串联组成以达到所需要的功率额定值,这些器件开关速度快,频率高,且可以工作在无源逆变方式;每个阀都有反向并联连接的二极管,其是负载向直流侧反馈能量的通道并使负载电流连续。换相电容的作用是为换流器提供电压支持、缓冲桥臂关断时的冲击电流和减少直流侧谐波并储备能量以控制潮流。此外,在换流变压器的一次侧(或换流电抗器)交流母线处还接有高通滤波器以滤除交流侧谐波(图中未画出)。

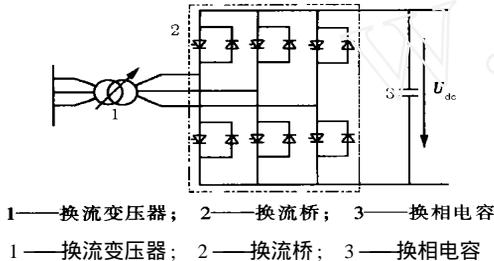


图 1 VSC 示意图

Fig. 1 Illustration of VSC

### 3 VSC-HVDC 的控制

#### 3.1 稳态功率特性

图 2 表示用于计算交流系统与 VSC 间基频潮流的简化单线图。交流系统用换流变压器一次侧母线电压为电势的电压源表示,为简化起见,取该电压为参考电压(相位角为零),换流器用换流变压器二次侧母线电压为电势的电压源表示,而换流变压器用等值电抗表示(假定换流变压器无损)。图 2 中,  $U_s = U_s \angle 0^\circ, U_{con} = U_{con}$ 。

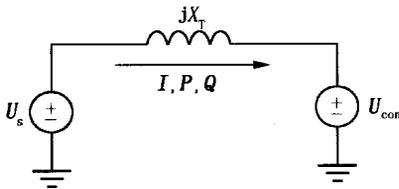


图 2 简化等值电路

Fig. 2 Simplified equivalent circuit

设电流及功率(仅计及基频分量)流向如图 2 所示,则有如下关系:

$$P = - \frac{U_s U_{con}}{X_T} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = - \frac{U_s (U_s - U_{con} \cos \delta)}{X_T} \quad (2)$$

由式(1)可知,当  $\delta < 0$  时,  $P > 0$ , VSC 从交流系统吸收有功功率而运行于整流器状态;当  $\delta > 0$  时,  $P < 0$ , VSC 向交流系统送出有功功率而运行于逆变器状态。由此可知通过控制  $U_s$  与  $U_{con}$  之间的相位角  $\delta$  即可控制有功功率的方向和大小(与传统交流系统中有功功率的控制类似)。由式(2)可知,无功功率的传输由  $U_s - U_{con} \cos \delta$  决定,当  $U_s - U_{con} \cos \delta < 0$  时,  $Q > 0$ , VSC 吸收无功功率;当  $U_s - U_{con} \cos \delta > 0$  时,  $Q < 0$ , VSC 发出无功功率,而相当于无功补偿装置。因此,通过控制  $U_{con}$  的模值  $U_{con}$  就可以控制 VSC 吸收或发出无功功率及其大小。可见, VSC 不仅可以提高功率因数,而且还能起到 STATCOM 的作用,从而稳定交流母线电压。

#### 3.2 谐波特性

像所有的电力电子换流器一样, VSC 要在其所连接的交、直流系统中产生谐波电压和电流。简单地说,从交流系统来看,可以把 VSC 看做在换流变压器阻抗之后的一个谐波电压源;同样地,可以把 VSC 看做在与换相变压器并联连接的一个谐波电流源。

VSC 产生的谐波取决于如下因素:(1)换流站的拓扑结构(即换流站的脉动数,是 6 脉动还是 12 脉动等);(2)IGBT/GTO 等器件的开关频率;(3)所采用 SPWM 的脉冲模式。

使用 12 脉动换流器而不用 6 脉动换流器可以改善交直流侧的谐波状况。VSC 所连接的交流侧的特征谐波次数为:  $12n \pm 1 (n = 1, 2, \dots)$ ; VSC 所连接的直流侧的特征谐波次数为:  $12n (n = 1, 2, \dots)$ ; 理想情况下,所有其它的谐波都被抵消。

为了减少谐波,使用较高的开关频率是有利的;但是,随着开关频率的提高,换流器的运行损耗同时也会成比例地增加。

在 SPWM 技术中,利用特殊优化的脉冲模式可以消除特征谐波。在大多数情况下,利用这种特殊设计的脉冲模式,可以使换流器运行于较低的开关频率(这样可以减少如上所述在较高开关频率所产生的运行损耗)而满足谐波特性要求。

VSC 由于其固有的谐波消除能力,它所产生的谐波干扰要比传统的换流器小得多,因此,所需要的滤波装置容量也大为减少。

### 3.3 VSC 的功率控制

VSC 中目前多使用正弦脉宽调制技术以对电压模值、电压相位角和频率进行控制<sup>[4,5]</sup>。SPWM 技术包括产生一个调制正弦波和一个三角载波,如图 3 所示。其基本原理是:用这两个波形的交点作为发送通断门脉冲给三相换流桥的每个桥臂的上半阀和下半阀的时刻。通过改变调制正弦波形的幅值,就可以成比例地改变 VSC 输出电压的幅值;而通过改变调制正弦波形的频率和相位则可以改变 VSC 输出电压的频率和相位。由 3.1 条分析可知,通过控制调制正弦波形的幅值,可以控制 VSC 发出/吸收无功功率;通过控制调制正弦波形的频率和相位则可以控制 VSC 有功功率的输送方向及大小。因此,通过 SPWM 可以实现 VSC 同时且相互独立地对有功功率和无功功率的调节,从而使控制更为灵活;并且在故障时,如果 VSC 容量允许,VSC-HVDC 系统既可以向交流系统提供有功功率的紧急支援又可以提供无功功率支持,从而提高系统的稳定性。

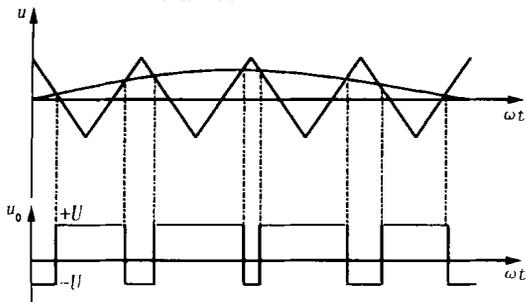


图 3 SPWM 原理图

Fig. 3 Principle of SPWM

### 3.4 VSC-HVDC 系统的控制

两端直流系统中,换流站可以进行遥控,并可以通过两个站中的任何一个站进行监控,或者从另外一个遥控点通过通讯线进行监控。在正常运行方式中,每个站都不受另一个站的影响而独立地各自控制其无功潮流,但是直流电网的有功潮流必须保持平衡,也就是离开电网的有功潮流必须等于电网所接收的有功功率减去直流系统中的损耗,否则会引起系统直流电压的迅速升高或降低。因此,为了实现功率平衡,两个换流站中必须有一个作为直流电压调节器(DC Voltage Regulator)来调节直流电压,而另一个作为功率调节器(Power dispatcher)用于控制系统中传输的有功功率为定值<sup>[4,5]</sup>(这两者都既可以是整流端,也可以是逆变端)。直流电压调节器可以调整其功率信号来保证系统的功率平衡(即获得恒定的直流电压)。站与站之间可以在没有通信的情

况下实现平衡,而只需测量直流电压即可。同理,在多端直流系统中,至少要有有一个换流站作为直流电压调节器,而其它的换流站可以作为功率调节器运行。

此外,与传统 HVDC 换流器不同,VSC-HVDC 系统的直流电压是单方向的,而直流电流是双向的。这样,可以通过多端 VSC 换流站并联连接形成直流电网,网络中的每个换流站都有潮流反转的能力(系统中潮流反转是通过电流反向实现的),从而使得潮流反转易于实现。而在现存多端 HVDC 系统中,双向潮流反转是不可能的。

## 4 VSC-HVDC 的应用

随着电力电子技术领域里具有自关断能力的 IGBT 和 GTO 等器件的发展,使得 VSC-HVDC 成为现实。ABB 公司首先进行了基于 SVC 的 HVDC 研制,并研制出其称为 HVDC Light 的系统<sup>[6]</sup>,该系统容量较低,用于低压系统。1997 年,ABB 公司使用 IGBT 元件的 3 MW/±10 kV 的世界上第一个基于 VSC 的 HVDC 系统正式在瑞典投入运行<sup>[3]</sup>。而日本正在开发研制使用 GTO 元件的 9 脉冲 PWM 控制的 300 MW 大功率 VSC 且已经取得一定成功<sup>[2]</sup>。

除了传统 HVDC 系统的应用范围外,VSC-HVDC 还能应用于以下几个主要领域:(1)弱交流系统或孤立交流系统的互联;(2)较低电压等级的交流系统的互联;(3)向小型、孤立的远距离负荷供电;(4)远距离小规模发电厂的连接。

## 5 结论

通过上述分析,可知 VSC-HVDC 系统具有许多传统 HVDC 系统无法比拟的优点。虽然目前 VSC 仍然有一些问题有待解决(如:与换流阀相联系的高频运行时的开关损耗,阀电压、电流承载能力较低等),但是,随着电力电子技术的进一步发展,IGBT、GTO 等具有自关断能力的元件的额定容量将不断提高,性能将不断改进,价格将不断降低,VSC-HVDC 有望取代传统 HVDC 而应用于高压输电及中低电压系统。

### 参考文献:

- [1] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京:水利电力出版社,1985.
- [2] Hirokazu Suzuki, Tatsuhiro Nakajima, et al. Development and Testing of Prototype Models for a High Performance 300 MW

- Self-Commutated AC/DC Converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, October 1997, 12(4): 1589 ~ 1598.
- [3] Axelsson U, Holm A, Lijiegren C, Eriksson K and Weimers L. Gotland HVDC Light Transmission[C]. CIGRE Conference, Nice, France, May, 1999.
- [4] Boon Teck Ooi, Wang Xiao. Boost Type PWM HVDC Transmission System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, October 1991, 6(4): 1557 ~ 1563.
- [5] Boon Teck Ooi, Wang Xiao. Voltage Angle Lock Loop Control of the Boost Type PWM Converter for HVDC Application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, April 1990, 5(2): 229 ~ 235.
- [6] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC Transmission based on Voltage Source Converters[C]. CIGRE SC14 Colloquium in South Africa, 1997.

收稿日期: 2002-02-04

作者简介:

马林(1974-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定、直流输电;

俞晓荣(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动装置、继电保护;

廖培金(1944-),副教授,从事电力系统及其自动化的研究。

### Operational mechanism and characteristics analysis of voltage source AC/DC converters

MA Lin, YU Xiao-rong, SU Hong-ying, LIAO Pei-jin  
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Conventional HVDC is built around the thyristor converter which requires line-commutation and thus has some inherent shortcomings. Rapid development of power electronic devices with turn off capability like IGBT and GTO makes the Voltage Source Converter VSC more and more attractive for HVDC application. With ideal control and operational characteristics, perfect output waveforms and flexible operation, VSC will have promising applications. This paper presents mechanism of HVDC based on VSC and its operational and control characteristics.

**Key words:** HVDC; IGBT; GTO; voltage source converter