

# 柔性直流输电技术及其应用前景研究

刘隽<sup>1</sup>, 何维国<sup>2</sup>, 包海龙<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100085; 2. 上海市电力公司技术与发展中心, 上海 200023)

**摘 要:** 简要介绍了柔性直流输电原理。总结了柔性直流输电技术特点和应用领域, 重点阐述了柔性直流输电在新风电场并网、大城市电网、孤岛、海上钻井平台供电方面的技术应用前景。

**关键词:** 柔性直流输电; 脉宽调制; 应用展望

**中图分类号:** TM 721.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6357(2008)01-0006-04

## Study on the Technology of HVDC based Voltage Source Converter and Its Application Prospect

LIU Jun<sup>1</sup>, HE Weiguo<sup>2</sup>, BAO Hailong<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Institute, Beijing 100085, Beijing China;

2. Technology and Development Center of Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200023, Shanghai China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the principle of VSC-HVDC and summarizes technique characteristics and applied areas. This paper expounds in detail the application prospect of VSC-HVDC in interconnection with wind power generation field, in supply to metropolitan power network and offshore island load

**Key words:** Flexible DC transmission; Pulse Wide Module; Application prospect

20 世纪 90 年代后期, 以 ABB 公司为代表的国外公司发展了轻型直流输电 (HVDC Light) 技术, 即同时应用电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 和脉宽调制技术 (PWM) 的直流输电技术, 并成功应用于多个领域。2006 年 5 月, 我国的“柔性(轻型)直流输电系统关键技术研究框架研讨会”建议国内将该技术统一命名为“柔性直流输电”(VSC-HVDC)。柔性直流输电技术从其技术特点和实际工程的运行来看, 很适合应用于可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、城市电网供电、异步交流电网互联等领域。

要充分利用可再生能源, 提高其供电效率, 需要采用合适的并网与输电方式。

现有特大城市电网存在的结构薄弱、短路电流偏大、动态无功不足等问题也迫切需要采用更加灵活、经济、环保的输电方式来解决。

对一些远距离负荷供电, 如偏远的城镇、村庄、孤岛或海上钻井平台供电, 其输电距离和输电容量均不符合交流输电和高压直流输电的经济性要求。传统直流输电又无法向无源网络供电, 要由当地小型发电机组供电, 而这些机组不仅运营成本高, 而且不环保。因此, 对这些负荷采用何种节能环保的方式供电, 也是一个极具社会意义的

问题。

本文对柔性直流输电技术及其在上述方面的应用前景进行了研究。

## 1 柔性直流输电技术概要

### 1.1 VSC-HVDC 输电原理

以某柔性直流输电系统为例进行阐述。该双端 VSC-HVDC 输电系统的结构示意图如图 1 所示。其中两个电压源换流器 VSC1 和 VSC2 分别用作整流器和逆变器, 主要部件包括全控换流桥、直流侧电容器; 全控换流桥的每个桥臂均由多个绝缘栅双极晶体管 IGBT 或门极可关断晶体管 GTO 等可关断器件组成, 可以满足一定技术条件下的容量需求; 直流侧电容为换流器提供电压支

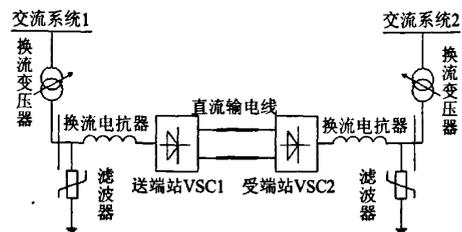


图 1 双端 VSC-HVDC 输电系统示意图

撑,直流电压的稳定是整个换流器可靠工作的保证;交流侧换流变压器和换流电抗器起到VSC与交流系统间能量交换纽带和滤波作用;交流侧滤波器的作用是滤除交流侧谐波。由于柔性直流输电一般采用地下或海底电缆,对周围环境产生的影响很小。

假设换流电抗器是无损耗的,在忽略谐波分量时,换流器和交流电网之间传输的有功功率 $P$ 及无功功率 $Q$ 分别为

$$P = \frac{U_s U_c \sin \delta}{X_L} \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X_L} \quad (2)$$

式中: $U_c$ 为换流器输出电压的基波分量; $U_s$ 为交流母线电压基波分量; $\delta$ 为 $\dot{U}_c$ 和 $\dot{U}_s$ 之间的相角差; $X_L$ 为换流电抗器和换流变压器的电抗。

由式(1)、(2)可以看出,有功功率的传输主要取决于 $\delta$ ,无功功率的传输主要取决于 $U_c$ 。而 $U_c$ 是由换流器输出的脉宽调制(PWM)电压的脉冲宽度控制的。

柔性直流输电技术中的一项核心技术是正弦脉宽调制(Sine Pulse Width Modulation, SPWM),其控制原理如图2所示。图2中A相SPWM的调制参考波 $U_{Aref}$ 与三角载波 $U_m$ 进行数值比较,当参考波数值大于三角载波,触发A相的上桥臂开关导通,并关断下桥臂开关,反之则触发下桥臂开关导通,并关断上桥臂开关。伴随上下桥臂开关的交替导通与关断,VSC交流出口电压 $U_{Ao}$ 将产生幅值为正负 $U_d/2$ 的脉冲序列, $U_d$ 为VSC的直流侧电压。该脉冲序列中的基频电压分量 $U_{Ao1}$ 与调制参考波相位一致,幅值为 $U_d/2$ 。因此,从调制参考波与VSC出口电压基频分量的

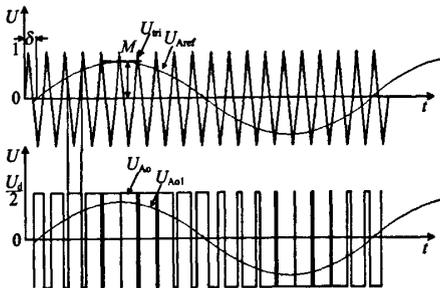


图2 VSC-HVDC系统SPWM控制原理图

关系上看,VSC可视为无相位偏移、增益为 $U_d/2$ 的线性放大器。由于调制参考波的幅值与相位可通过PWM的脉宽调制比 $M$ (VSC交流输出基频相电压幅值与直流电压的比值)以及移相角 $\delta$ 实现调节,因此VSC交流输出电压基频分量的幅值与相位亦可通过这两个变量进行调节。这样,采用SPWM技术的VSC可以同时独立地控制调制比 $M$ 和移相角 $\delta$ 两个物理量。

## 1.2 VSC-HVDC技术特点

柔性直流输电与传统直流输电相比,主要有以下技术特点。

1) VSC的电流能够自关断,可以工作在无源逆变方式。

2) 正常运行时,VSC可以同时且独立地控制有功和无功功率,控制更加灵活方便。

3) VSC不仅不需要交流侧提供无功功率而且能够起到STATCOM的作用,动态补偿交流母线的无功功率,稳定交流母线电压。

4) 在潮流反转时,柔性直流电流方向反转而直流电压极性不变,与传统的高压直流输电恰好相反。

5) 由于VSC交流侧电流可以被控制,所以不会增加系统的短路功率。这意味着增加新的柔性直流输电线路后,交流系统的保护整定基本不需改变。

6) VSC通常采用PWM技术,开关频率相对较高,经过低通滤波后就可得到所需交流电压,使所需滤波装置的容量大大减小。

7) 模块化设计使柔性直流输电的设计、生产、安装和调试周期大大缩短。换流站占地面积仅为同容量下传统直流输电的20%左右。

8) 换流站间的通信不是必需的,控制结构易于实现无人值班。

9) 具有良好的电网故障后的快速恢复控制能力。

10) 在连接两个独立的交流系统的柔性直流输电系统中,一侧交流系统发生故障或扰动时,并不会影响到另一侧交流系统和换流器的工作。

## 1.3 实际工程概略

目前ABB公司投运的柔性直流输电技术实际工程有9项(见表1),最高直流电压等级为±150 kV,最大容量为2006年投运的连接芬兰和

爱沙尼亚两国电网的 Estlink 工程。但在海岛供电与城市电网供电方面还没有实际的应用工程。

表 1 ABB 公司已投运的柔性直流输电工程

投运年份	工程名称	国家(地区)	容量/MW	用途
1997	Hellsjon	瑞典	3	工业试验
1999	Gotland	瑞典	50	风力发电并网
2000	Tjaereborg	丹麦	7.2	风力发电并网
1999	Directlink	澳大利亚	180	电力交易、系统互联
2000	Eagle Pass	美国-墨西哥	36	电力交易、系统互联
2002	Murray link	澳大利亚	200	电力交易、系统互联
2002	Cross Sound Cable	美国	330	电力交易、系统互联
2006	Estlink	北欧	350	电力交易、系统互联
2004	Troll A	挪威	40	钻井平台供电和电机驱动

## 2 柔性直流输电用于风电场并网

随着陆上矿石资源的日渐枯竭和环境污染的日益恶化,我国逐渐加大对绿色可再生能源及海底石油能源的开发利用。我国东部沿海经济发达地区,海上可开发风能资源约 7.5 亿 kW,是陆上风能资源的 3 倍,具有开发利用风电的良好市场条件和巨大资源潜力。就上海而言,"十一五"期间,上海市风力发电总装机容量将达到 334.4 MW,约占全市发电装机容量的 2% 左右。风力发电是典型的间歇性电源,柔性直流输电将是解决其并网问题的必不可少的技术手段。

### 2.1 风电场的无功功率/交流电压控制

对于采用普通固定转速异步发电机的风电场,风电机组在送出有功功率的同时,需要从并网系统吸收大量的无功功率,导致风电并网系统的电压稳定性降低。因此,需要配备并联无功补偿装置。而我国绝大多数风电场中的主流机型仍然是普通固定转速异步发电机,该类发电机对电网的扰动非常敏感,且本身不具备无功功率控制的能力,无法实现穿越故障能力,带来的发电厂并网电压稳定问题也比较突出。对于双馈异步风力发电机,通常在转子中装有急剧短路保护或者增加换流器额定容量用于应对此类故障,可通过控制流入电网的电流,从而实现无功电压控制<sup>[1]</sup>。

### 2.2 风电场的有功功率/频率控制

在电网发生事故时,系统的惯量对于频率变化率起决定作用。不同技术风力发电机组的频率响应特性不同。普通固定转速异步风力发电机转子转速与系统频率的耦合作用较强,当系统频率

降低时,风力发电机组转速将降低,释放部分旋转动能,提供惯量响应,响应的幅度取决于风轮机叶片、风力发电机转子与发电机转子中储存的旋转动能及电网频率变化率;双馈异步发电机由于对有功与无功进行解耦控制,使变速风力发电机组转速与电网频率实现完全解耦控制,致使在电网频率发生改变时无法对电网提供频率响应,无法帮助电网降低频率变化的速率<sup>[1]</sup>。

### 2.3 采用柔性直流输电技术的优越性

为了确保风电场并网系统高效、安全、可靠,风电场并网需满足有关并网导则的如下规定。

1) 故障穿越能力。即规定风电场能够承受的并网电压降低的时间曲线,保证风电场在故障期间或故障后不会退出运行,当交流电压恢复到正常值时,风电场能恢复到故障前的运行点。

2) 有功功率控制要求。即规定风电场有功变化速度低于一定限值;在极限风速条件下风电场内的风力发电机不可同时退出运行,以确保其他常规发电机组有足够的时间改善系统故障时风电场电压跌落,以及增加风电场的故障穿越能力;规定抑制电网故障清除后的过电压,以降低由过电压导致的风电场风力发电机被切除的风险。

柔性直流输电技术应用于风电场并网有以下优越性。

1) 换流站可以进行自换相,运行不需借助外部电压源,不需要同步调相机(或其他方案)来支持其电能传输。

2) 每侧交流电网的无功潮流可独立控制,负荷改变时不需投切滤波器和其他无功补偿设备。

3) 对有功和无功可独立进行控制。可以缓解由风电场输出功率波动而引起的电压波动问题,改善电能质量。与交流联络线并联运行时,通过快速控制有功功率和无功功率能够提高整个输电通道的传输极限。当交流系统发生短路时,柔性直流输电系统能有效地隔离故障,保证风电场的稳定运行,并在系统出现严重故障情况下,风电场可通过柔性直流输电系统为系统提供“黑启动”能力。

目前柔性直流输电用于风电场并网的实际工程有:瑞典哥特兰岛工程用于陆上风电场并网;丹麦 Tjaereborg 工程用于海上风电场并网。这两个工程的顺利投运及其取得的效益,为我国风电

场采用柔性直流输电方式并网提供了应用前提与可行性验证。

### 3 柔性直流输电用于大城市电网供电

1) 北京、上海和广州等特大型城市供电问题受到越来越多的重视。空调的大量应用和负荷的快速增长使电网越来越依赖市中心的动态电压支撑。由于特大城市对环境和占地极为关注,电厂从市中心转移和从外地输入大量电力的趋势不可逆转。例如,北京市大约2/3的电力由外地提供。这种情况给电网安全稳定运行压力越来越大。由于负荷快速增长,城市电网的规模不断扩大,负荷密度越来越大,不同程度的遇到了短路电流超标的问题。以上海为例,500 kV的短路电流即将达到63 kA,届时将无足够遮断容量的断路器可采用,而且也限制了电网供电能力的进一步提高。因此,短路电流超标、电压稳定性差和市中心大负荷供电日益成为特大型城市电网的特殊问题。

2) 柔性直流输电技术应用于大城市电网供电的优越性如下:

(1) 可以快速控制有功功率和无功功率,解决电压闪变问题,改善供电的电能质量,防止敏感设备因电能质量问题造成的经济损失。

(2) 柔性直流输电采用地埋式直流电缆,无交变电磁场、无油污染、无需输电走廊,可以在无电磁干扰及不影响城市市容的情况下,完成城市电网的增容改造,同时满足城市中心负荷需求和环保节能要求。

(3) 可灵活控制交流侧的电流,故可控制电网的短路容量。

(4) 能够提供系统阻尼,提高系统稳定性,并在严重故障时提供“黑启动功能”。

目前柔性直流输电工程还没有用于城市电网供电的实例。随着核心器件IGBT的发展与成熟,及其研发成本的降低,将柔性直流输电技术广泛应用于城市电网供电将有实际的社会意义。

### 4 柔性直流输电用于孤岛及海上钻井平台供电

1) 我国是世界上海岛最多的国家之一。据统计,我国大陆沿海省份约有6500余个海岛,其中有常住人口的海岛433个,占海岛总数的6%,

面积占海岛总面积的98%以上,常住人口有452万。这些海岛的供电问题是多年来一直是影响海岛经济发展和人民生活水平提高的主要问题之一。绝大部分海岛的电力自成体系,难以与大电网并网,无法使用大电网的低价电源。加之海岛用电负荷小、波动大,设备和燃料利用率偏低,电力和电网建设滞后,设备落后,使用的能源结构不合理等,致使各海岛电价过高,而且电力供应无法可靠保证。

2) 通常对海上钻井平台采用独立的燃气轮机或柴油机组进行发电,以供平台上电动机和压缩机的驱动。但在最好的条件下,这种方式的效率也只有20%~25%,而且伴随有大量的高能燃料消耗及CO<sub>2</sub>气体排放。钻井平台上发电设备的定期维护费用很高。这无疑都是以牺牲经济性和环保为代价的。

3) 采用柔性直流输电技术向孤岛和海上钻井平台供电的优越性如下:

(1) 可用于无源电网。

(2) 可采用海底电缆输电,利用陆上资源为孤岛或海上平台供电,既解决了CO<sub>2</sub>排放的问题,又免去额外的发电设备定期维护费用。

(3) 柔性直流输电换流站自身可为系统提供无功补偿,无需另装无功补偿装置,占地面积小。

## 5 结语

基于电压源型逆变器的柔性直流输电技术为电网建设与发展提出了一个新的解决方案。随着电力电子技术的发展,核心设备成本的降低,柔性直流输电技术较其他输电技术将更具竞争力,将其广泛应用在我国新能源并网、城市电网及孤岛供电等方面将是完全可能的。

#### 参考文献

- [1] 魏晓光. 电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.

收稿日期: 2007年12月

刘 勇 博士, 从事柔性直流输电技术的研究工作

何维国 硕士, 高级工程师, 从事电力系统及其自动化方面工作

包海龙 硕士, 高级工程师, 从事电力系统规划方面工作

作者: [刘隽](#), [何维国](#), [包海龙](#), [LIU Jun](#), [HE Weiguo](#), [BAO Hailong](#)  
作者单位: [刘隽, LIU Jun\(中国电力科学研究院, 北京, 100085\)](#), [何维国, 包海龙, HE Weiguo, BAO Hailong\(上海市电力公司技术与发展中心, 上海, 200023\)](#)  
刊名: [供用电](#)  
英文刊名: [DISTRIBUTION & UTILIZATION](#)  
年, 卷(期): 2008, 25(1)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(1条)

1. [魏晓光](#) [电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究](#) 2007

## 相似文献(1条)

1. 会议论文 [郑超](#), [马世英](#), [刘文焯](#), [侯俊贤](#) [多端柔性直流输电系统运行特性的仿真分析](#) 2008

以全控型电力电子器件为基础,以电压源换流器(VSC)为核心部件,以脉宽调制(PWM)为控制手段的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术是新一代的高压直流输电技术。与基于半控型晶闸管的传统高压直流输电技术相比,VSC-HVDC具有可向无源网络供电、不会出现换相失败等优点。此外,由于潮流翻转时VSC直流侧电压极性不变,因此VSC-HVDC易于构成多端直流输电系统。本文首先分析了多端VSC-HVDC的拓扑结构,并分别设计了VSC与有源和无源交流网络连接时的控制系统。利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC建立了一环状多端VSC-HVDC系统,对该系统中无源阻感负荷功率波动、感应电动机再生反馈电力以及有源交流系统不对称故障等扰动下,系统的运行特性进行了仿真分析。

## 引证文献(1条)

1. [刘兵](#), [阮江军](#), [韩海宏](#), [余世峰](#), [吴田](#) [柔性直流输电系统电磁环境分析](#)[期刊论文]-[高电压技术](#) 2009(11)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gyd200801002.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gyd200801002.aspx)

授权使用: 西安理工大学(xalidx), 授权号: d6189cba-90be-4d95-a81b-9db0011bcb13

下载时间: 2010年7月11日