

# 柔性直流输电不同电压等级的经济性比较

曾 丹, 姚建国, 杨胜春, 王 珂, 李亚平

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

**摘要:** 分析了柔性直流输电输送容量与电压等级的关系, 提出了确定经济输送范围的方法, 比较分析了不同电压等级的换流站造价、电缆造价、传输损耗、运行费用、总投资以及投资回报等经济性指标。以典型柔性直流工程为例, 研究表明, 对于输送容量为几百兆瓦的柔性直流工程, 考虑换流站、电缆和环境等因素, 在输送容量和传输距离相同的情况下电压等级越高, 工程造价越小、运行维护费用和传输费用越小; 考虑贷款本金、贷款方式、售电量、投资收益和内部收益等多方面因素, 工程的电压等级越高, 柔性直流输电总投资越小, 投资回收期也越短。因此, 合理选择电压等级能提高柔性直流输电系统的经济性。

**关键词:** 柔性直流输电技术; 电压等级; 工程造价; 运行成本; 投资回收

## 0 引言

柔性直流输电技术是智能电网发展具有代表性的关键技术之一。随着全控型功率器件的发展及其性能的不断改善, 基于电压源换流技术的高压直流输电(HVDC)的工程应用越来越多。这种以电压源型换流器(VSC)、可关断器件和脉宽调制(PWM)技术<sup>[1]</sup>为基础的新一代直流输电技术, 被 CIGRE<sup>[2]</sup>和 IEEE 正式命名为 VSC-HVDC, 即电压源换流器型直流输电。从该技术特点和实际工程运行来看: 一是能够解决可再生能源的并网问题, 不仅具备优异的风电场、太阳能并网可控性能和较强的抗干扰能力, 还能有效改善低电压穿越能力, 满足并网系统对暂态性能的要求<sup>[3]</sup>; 二是由于电压源换流技术在输电可控性能和潮流反转方面, 直流线路在投资、运行费用、长距离输电等方面具有优势<sup>[4]</sup>, 因此在孤岛供电领域, 柔性直流技术经济性指标优于其他输电方案; 三是在城市配电网供电领域, 柔性直流输电技术具有模块化结构、标准化设计、建设工期短、结构紧凑、对环境影响较小等优势, 可防止敏感设备因电能质量问题造成的经济损失<sup>[5]</sup>, 当系统发生大面积停电事故时, 柔性直流输电技术可实现黑启动控制, 快速恢复供电<sup>[6]</sup>。国内关于柔性直流输电技术的研究起步较晚, 2011 年 3 月首个柔性直流输电试点工程试运行, 并已顺利完成了模块化多电平柔性直流输电换流站的控制性能测试。

本文针对城市供电领域特点, 分析了柔性直流输电输送容量与电压等级的关系, 提出了确定经济

输送范围的方法。综合考虑换流站、电缆和环境等因素, 选取实际柔性直流工程数据和电力规划标准数据作为参考, 针对一个输送容量、传输距离确定的柔性直流输电工程, 比较分析了不同电压等级的换流站造价、电缆造价、运行费用、总投资以及投资回收期等经济性指标。最后以典型陆上网电为例, 研究输送容量与电压等级对柔性直流输电系统的经济性影响, 可为今后实际的柔性直流输电工程提供支撑。

## 1 柔性直流输电经济运行范围

考虑到柔性直流设备(主要是直流断路器、换流设备及滤波设备)的价格较高, 对于一个实际工程, 在不同条件下, 选择交流输电、常规直流输电还是柔性直流输电, 在很大程度上取决于其技术指标和投资费用<sup>[7]</sup>, 因此需要进行经济分析。

### 1.1 柔性直流输电容量与电压等级的关系

在实际工程初步估计电压等级时, 有以下几种方式可以确定直流输电电压等级<sup>[8]</sup>。

#### 1) 经验公式

根据瑞典乌尔曼的经验公式:

$$V_d = \pm 12\sqrt{P} \quad (1)$$

式中:  $V_d$  为双极直流线路的对地线电压;  $P$  为双极直流线路的输送功率。直流电压应选取在  $(-12\sqrt{P}, 12\sqrt{P})$  区间内。

根据西德公式:

$$V_d = \pm \sqrt{\frac{PL}{3.398 \times 10^{-3}L + 1.4083 \times 10^{-3}P}} \quad (2)$$

式中:  $L$  为线路长度。

## 2) 统计曲线

将世界各国已投运或正在施工的柔性直流输电工程<sup>[9-10]</sup>的输送容量与输电电压间的关系,进行统计分析后绘制成统计曲线,如图1所示。

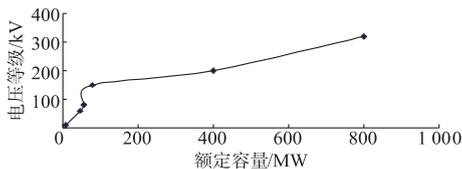


图1 柔性直流工程输电容量与电压等级的关系  
Fig. 1 Relationship between transmission capacity and voltage in VSC-HVDC

当柔性直流输电线路输电功率给定后,可通过统计曲线快速查出电压等级。由图1可知,目前国际上柔性直流输电工程的输送容量水平一般在几百兆瓦内,电压等级水平在几十千伏到几百千伏之间。

## 3) 电缆手册

参照厂家提供的电缆参数<sup>[11]</sup>,根据输送容量,选择电缆材质和电缆敷设方式,选取电压等级。

在实际工程初步估算电压等级时,可应用式(1)、统计曲线或电缆手册来确定柔性直流输电线路的电压等级 $V_d$ 。最终采用的 $V_d$ 值还应通过经济技术比较才能确定。

## 1.2 柔性直流输电的经济输送范围

当输电工程的输送容量确定后,其输电距离将影响输电工程投资和运行成本,输电成本变化的速率也随着电压等级的不同而不同,所以在对2种电压等级的柔性直流输电技术进行经济比较时,存在一个经济性分界点,即临界经济距离。在对多种电压等级的柔性直流输电技术进行比较时,每2种电压等级的柔性直流输电技术间都会存在一个临界经济距离。输电技术的2个临界经济距离间的范围即为该输电技术的经济输电距离<sup>[12]</sup>。

## 2 投资成本分析

以一个温带环境下的陆上柔性直流工程为例,输送电力额定值为300 MW,输送距离70 km。根据1.1节提供的电压选择方案,柔性直流电压应选取在(-207 kV, +207 kV)区间内,再查某公司电缆手册,可选择电缆有±150 kV和±80 kV这2种电压等级的铝材料双极地下电缆,并需带空隙敷设。对上述2种电压等级的柔性直流输电工程进行经济性对比分析。

### 2.1 换流站造价

换流站主要设备有交流变压器、换流反应器、直流电容器、交流滤波器、阀塔和水冷设备。采用柔性

直流输电系统还可以节省大量电气设备。表1列出了其换流站造价。

表1 换流站造价  
Tab. 1 Cost of converter station

电压等级/kV	单位造价/(元·kW <sup>-1</sup> )	换流站总造价/亿元
±80	1 000	6.0
±150	1 100	6.6

### 2.2 电缆造价

电压等级为±80 kV和±150 kV的柔性直流输电电缆的密度、重量等原材料参数如表2所示<sup>[11]</sup>。

表2 柔性直流输电电缆原材料参数  
Tab. 2 Material parameters of XPLE cable

电压等级/kV	横截面积/mm <sup>2</sup>	重量/(kg·m <sup>-1</sup> )	直径/mm
±80	2 200	9	81
±150	800	5	71

经计算,可得在±80 kV和±150 kV电压等级下,其原材料消耗分别为630 t和350 t。可以看出,采用±80 kV电压等级时,其电缆总重是±150 kV电压等级时电缆总重的1.8倍。电缆造价见表3。

表3 柔性直流电缆造价  
Tab. 3 Cost of XPLE cable

电压等级/kV	单位造价/(元·m <sup>-1</sup> )	电缆总造价/亿元
±80	630	0.441
±150	610	0.427

### 2.3 总工程造价

从目前实际上已经建成和正在建设的柔性直流输电线路来看,换流站的造价一般占总工程造价的30%~40%,电压等级越高换流站造价占总工程造价的比例越高<sup>[9]</sup>,在实际工程造价初始评估时,可根据电压等级选择不同比例。预估总工程造价如表4所示。

表4 总工程造价预估  
Tab. 4 Estimation of project total cost

电压等级/kV	换流站造价/亿元	换流站所占比例/%	工程造价/亿元
±80	6.0	30	20
±150	6.6	35	19

综上所述,对于几百兆瓦的柔性直流输电工程,选取不同电压等级的传输电缆,其电压等级越高,柔性直流换流站的造价就越高,所占总工程造价的比例也越高,影响总工程造价的主要因素是换流站造价。

## 3 运行成本分析

年运行费用是指所实施工程在正常运行中所需

的年经常性支出。对于输电工程通常包括传输损耗以及年运行维护费用等。

### 3.1 线路损耗

柔性直流输电电缆双极线路损耗  $P_{\text{line}}$  如下:

$$P_{\text{line}} = 0.002RI^2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出,导线截面越大线损越小,但增加了线路投资;导线截面越小线损越大,且无法满足供电需要,降低了安全系数。在实际工作中,最好的办法就是按导线的经济电流密度来选择导线的截面面积。

### 3.2 换流站损耗

柔性直流输电系统的换流站损耗比常规直流输电系统的换流站损耗大。开关频率为 1 950 Hz 的两电平柔性直流输电系统换流站的功率损耗为系统额定功率的 6% 左右,开关频率为 1 260 Hz 的三电平柔性直流输电系统换流站的损耗降低至 3.6%,最新的采用优化脉宽调制(OPWM)技术的两电平换流器站损约为 1.6%;常规直流输电的功率损耗一般只有系统额定功率的 0.8%<sup>[13]</sup>。

换流站损耗  $P_{\text{con}}$  计算如下:

$$P_{\text{con}} = P_{\text{cap}} C_{\text{Crate}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{cap}}$  为传输容量; $C_{\text{Crate}}$  为换流站损耗率。

### 3.3 传输损耗率

输电运行中的传输损耗率,是指输电运行中损耗的电能(线路损耗和换流站损耗)与传输容量的百分数;传输损耗率用来考核电力系统运行的经济性。

传输损耗率  $f_{\text{TRate}}$  计算公式如下:

$$f_{\text{TRate}} = \frac{P_{\text{line}} + P_{\text{con}}}{P_{\text{cap}}} \times 100\% \quad (5)$$

### 3.4 年运行维护费用

根据输电线路损耗、换流站损耗、传输损耗等参数分析柔性直流输电工程的运行维护费用。柔性直流输电工程年运行维护费用  $F_{\text{opr}}$  定义如下:

$$F_{\text{opr}} = f_{\text{opr}} C_{\text{total}} \quad (6)$$

式中: $f_{\text{opr}}$  为运行维护费率,电力工业通常将其定为 1.8%; $C_{\text{total}}$  为总工程造价。

年传输损耗费用  $F_{\text{tra}}$  定义如下:

$$F_{\text{tra}} = f_{\text{TRate}} P_{\text{cap}} Sh \quad (7)$$

式中: $S$  为售电电价; $h$  为利用小时数。

由式(3)~式(7)可知,对于输送容量相同的柔性直流输电工程,选择不同电压等级,其年运行维护费用和年传输损耗费用均不同。

## 4 投资回报分析

### 4.1 投资收益率

投资收益率又称投资利润率,是指投资收益(税

后)占投资成本的比率,也称投资效果系数,定义为每年获得的净收入与原始投资的比值。

投资收益率反映了投资的收益能力。当该收益率明显低于工程净资产收益率时,说明该工程投资是失败的,应改善该投资项目;而当该收益率远高于一般净资产收益率时,则存在操纵利润的嫌疑,应进一步分析各项收益的合理性。

输电工程年度投资收益  $F_{\text{Inv}}$  和投资收益率  $f_{\text{Inv}}$  定义如下:

$$F_{\text{Inv}} = F_{\text{Sale}} - F_{\text{opr}} - F_{\text{tra}} \quad (8)$$

$$f_{\text{Inv}} = \frac{F_{\text{Inv}}}{I_{\text{total}}} \times 100\% \quad (9)$$

其中

$$F_{\text{Sale}} = P_1 Sh \quad (10)$$

$$I_{\text{total}} = P_d + P_r + F_{\text{Topr}} + F_{\text{Ttra}} \quad (11)$$

式中: $F_{\text{Sale}}$  为年售电收益; $I_{\text{total}}$  为总工程投资; $P_1$  为用电负荷量; $P_d$  为工程首付款; $P_r$  为总还款额; $F_{\text{Topr}}$  为运行维护费用总额; $F_{\text{Ttra}}$  为传输费用总额。

柔性直流工程的贷款还款方式选择等额本息还款法,即把按揭贷款的本金总额与利息总额相加,然后平均分摊到还款期限的每个月中,每个月的还款额固定。

### 4.2 投资回收期

投资回收期,又称投资返本年限,是该项目或方案的净收益抵偿全部投资(包括固定资产和流动资金)所需的时间。投资回收期可用财务现金流量表中累计净现金流量计算求得。定义投资回收期  $N$  和年内部收益  $I_{\text{ner}}$  如下:

$$N = \frac{I_{\text{total}}}{I_{\text{income}} - I_{\text{ner}}} \quad (12)$$

$$I_{\text{ner}} = f_{\text{ner}} I_{\text{total}} \quad (13)$$

式中: $I_{\text{income}}$  为年投资收益; $f_{\text{ner}}$  为内部收益率,电力工业暂定其为总工程投资的 8%<sup>[15]</sup>。

## 5 典型工程计算分析

以 2.1 节中的假设算例为例,柔性直流输电年运行费用主要参数如表 5 所示。

表 5 年运行费用主要参数  
Tab. 5 Parameters of annual operating costs

电压等级/kV	线路损耗/(MW·km <sup>-1</sup> )	换流站损耗/MW	传输损耗率/%
±80	0.122	4.8	4.45
±150	0.105	4.8	4.05

近年来,为缓解华东地区和南方地区的电力供应压力,三常、三广直流输电工程的利用小时数均超过了 6 000 h。同时,规划中的海上风电场、太阳能

等可再生能源接入电网预计利用小时数为 5 500 h。因此,本算例将柔性直流输电工程的利用小时数选取为 6 000 h。经计算,年运行费用结果见表 6。

表 6 年运行费用计算结果  
Tab. 6 Results of annual operating costs

电压等级/kV	运行维护费率/%	运行维护费率/上网电价/(元·(亿元·a <sup>-1</sup> ))	传输费用/(kW·h) <sup>-1</sup>	传输费用/(亿元·a <sup>-1</sup> )
±80	1.8	180	0.49	396.90
±150	1.8	171	0.49	357.21

柔性直流输电±80 kV 电压等级的年运行维护费用约为±150 kV 电压等级的 1.05 倍。±80 kV 电压等级的线路损耗费用约为±150 kV 电压等级的 1.11 倍。对于输送容量为几百兆瓦的柔性直流输电工程,选取电缆的电压等级越高,运行维护费用和传输费用越小。

假设本算例中贷款额为总工程造价的 50%,售电量为负荷的 80%,按运行的最长年限 25 a 做投资贷款,计算其投资回收期如表 7 所示。

表 7 投资回收分析  
Tab. 7 Analysis of investment recovery

电压等级/kV	投资收益/(亿元·a <sup>-1</sup> )	内部收益/(亿元·a <sup>-1</sup> )	总工程投资/亿元	投资回收期/a
±80	6.45	3.632	45.40	17
±150	6.53	3.400	42.46	14

由表 7 可知,柔性直流输电±80 kV 电压等级的总工程投资约为±150 kV 电压等级的 1.1 倍,2 种电压等级的投资回收期都在工程运行年限内,经济可行,且±80 kV 电压等级的投资回收期比±150 kV 电压等级的投资回收期多 3 a。

综合以上经济性指标可知,本文列举的柔性直流输电工程应选择电压等级为±150 kV 的柔性直流电缆输送更为经济。

## 6 结语

本文重点分析了柔性直流输电输送容量与电压等级的关系,提出了确定经济输送范围的方法。针对陆上输电系统采用柔性直流输电时的经济性进行了详细分析。考虑相同的输送容量在柔性直流输电电压区间( $-12\sqrt{P}$ ,  $12\sqrt{P}$ )内,选取 2 种电压等级下的换流站造价、电缆造价、传输损耗和运行成本等经济性指标进行了比较,得出以下结论。

1) 几百兆瓦及以下的柔性直流输电工程,电压等级水平在几十千伏到几百千伏之间。

2) 工程电压等级越高,换流站造价越高。

3) 工程电压等级越高,电缆所消耗的原材料越少,电缆造价越小。

4) 考虑换流站、电缆和其他因素,工程电压等级越高,柔性直流输电的总工程造价越小。

5) 工程电压等级越高,运行维护费用和传输费用越小。

从长远看,随着柔性直流输电技术的成熟,以及换流站等设备的造价进一步降低,柔性直流输电系统运营的经济性将会更好,综合优势更加明显,从而更具有推广应用价值。

## 参考文献

- [1] TADASHI Sato, YOSHINAO Matsushita, KOJI Temma, et al. Prototype test of STATCOM and BTB based on voltage source converter using GCT thyristor[C]// Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference: Vol 3, October 6-10, 2002, Yokohama, Japan; 2037-2042.
- [2] 汤广福,刘泽洪. 2010 年国际大电网会议系列报道: 高压直流输电和电力电子技术[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 1-4. TANG Guangfu, LIU Zehong. A review of CIGRE' 2010 on HVDC transmission and power electronic technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 1-4.
- [3] YAO Xingjia, SUI Hongxia, XING Zuoxia. The study of VSC-HVDC transmission system for offshore wind power farm[C]// Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems, October 8-11, 2007, Seoul, Korea.
- [4] ZHANG Lidong, HARMEFORS L, NEE H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 26(2): 783-793.
- [5] 李庚银,吕鹏飞,李广凯. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81. LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [6] 李胜. 柔性直流输电技术在城市电网中应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [7] 赵清声,王志新,张华强. 海上风电场轻型直流输电的经济性分析[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 94-98. ZHAO Qingsheng, WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang. Economic analysis on HVDC-light for off-shore wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(5): 94-98.
- [8] 孔庆东. 交、直流输电的经济输送范围及直流输电电压等级的确定[J]. 吉林电力技术, 1991(6): 27-30. KONG Qingdong. Economic and transmission range of AC/DC HVDC transmission in different voltage grade identified[J]. Jilin Power Technology, 1991(6): 27-30.
- [9] ABB. It's time to connect—technical description of HVDC light technology[EB/OL]. [2011-02-02]. <http://www.abb.com/hvdc>.
- [10] Presentation to board of governors California independent system operator [EB/OL]. [2011-02-02]. <http://wenku.baidu.com>.
- [11] ABB. HVDC light cables—submarine and land power cables [EB/OL]. [2011-02-02]. <http://www.abb.com/hvdc>.
- [12] 张运洲,韩丰,王乐,等. 直流电压等级序列的经济比较[J]. 电

网技术, 2008, 32(9): 37-41.

ZHANG Yunzhou, HAN Feng, WANG Le, et al. Economic comparison of HVDC voltage class sequence[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 37-41.

[13] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

方向: 柔性直流输电系统、特大交直流协调优化. E-mail: zengdan@sgepri.sgcc.com.cn

姚建国(1963—), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统及其自动化。

杨胜春(1973—), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统及其自动化。

曾丹(1986—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究

### Economy Comparison of VSC-HVDC with Different Voltage Levels

ZENG Dan, YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, LI Yaping  
(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The relationship between transmission capacity and voltage level of the voltage source converter (VSC)-HVDC is analyzed. The method for determining the scope of economical transportation is proposed. It emphatically analyzes such economic parameters as the total cost of the VSC-HVDC project, annual operation cost, maintenance cost, and the fund recovery period. A typical VSC-HVDC line is used as an example. The study shows that, by taking into account the factors such as the converter station, cable and environment for a project of a few hundred MW-level VSC-HVDC, the higher the voltage level is, the lower the operation and maintenance cost of the project will be. Furthermore, considering the loans, electricity sales, investment income, internal revenue, etc, the higher the voltage level is, the lower the total investment of project cost, and the shorter the investment recovery period. So the selection of a proper voltage level can improve the economy of the VSC-HVDC project.

**Key words:** VSC-HVDC technology; voltage level; project cost; operating cost; investment recovery