

# 海上平台混合直流供电方案研究与仿真分析

刘军伟<sup>1</sup>, 张紫凡<sup>2</sup>, 钟杰峰<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 华南理工大学广州学院, 广州 510800)

**摘要:** [目的]海上平台一般采用海上自供电方案, 该供电方式电源形式单一、可拓展性差、抗冲击能力弱、供电可靠性和保障程度低, 同时, 海上平台的空间非常有限, 建设自供电电源投资较高。[方法]在对比研究利用岸电交流送电和直流送电方案优缺点的基础上, 提出了技术可行、经济性较优的海上平台采用混合直流输电的方案。在此基础上, 建立陆地电网侧常规直流、海上平台侧柔性直流的数学模型, 结合传统直流的换流器的典型控制方式和柔性直流换流器的典型控制方式, 提出混合直流的控制策略。[结果]在 PSCAD/EMTDC 上建立混合柔性直流输电系统的电磁暂态仿真模型, 包含近区交流电网、混合直流系统以及海上平台系统的仿真系统模型, 并开展建模仿真分析研究, 分析近区交流电网、直流系统、海上平台的运行特性、故障特性以及交互影响。[结论]研究成果对解决海上平台的安全可靠供电问题具有十分重要意义。

**关键词:** 海上平台; 供电方案; 混合直流。

中图分类号: TM614; TM721.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0115-06

## Research on Hybrid HVDC and Simulation of Offshore Platform

LIU Junwei<sup>1</sup>, ZHANG Zifan<sup>2</sup>, ZHONG Jiefeng<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** [Introduction] Offshore platforms generally use self-powered offshore solutions. The power supply has a single power source, poor scalability, weak impact resistance, and low reliability and reliability of power supply. At the same time, the space of the offshore platform is very limited, and the investment in building a self-powered power supply is relatively high. [Method] Based on a comparative study of the advantages and disadvantages of shoreline AC power transmission and DC power transmission schemes, this paper proposes a hybrid HVDC transmission scheme for a technically feasible and economical offshore platform. On this basis, this paper establishes the mathematical model of the conventional direct current and offshore platform side flexible DC on the land network. Combining the typical control method of the traditional HVDC converter and the typical control method of the flexible DC converter, a hybrid HVDC control strategy is proposed. [Result] An electromagnetic transient simulation model of a hybrid flexible HVDC transmission system is established on PSCAD/EMTDC, including simulation system models of near area AC grid, hybrid HVDC system and offshore platform system. Carry out modeling and simulation analysis and analysis. [Conclusion] The research results are very important to solve the safety and reliable power supply of offshore platform.

**Key words:** offshore platform; power supply strategy; hybrid HVDC

目前, 海上平台(主要是石油平台)主要采用自发自用的供电方式, 即依托平台上建设发电机组或者依靠发电船, 并通过海缆构建交流微网, 将电源

电力送往各个平台。随着生产任务生活用电的增加, 海上平台供电能力不足和供电可靠性不足的问题逐步凸显。

常规海上自供电方案, 该供电方式电源形式单一、拓展性能力差、抗冲击能力弱、供电可靠性和保障程度低, 同时, 海上平台的空间非常有限, 建设自供电电源投资较高。引入柔性直流输电技术,

通过交流-直流-交流变换,将岸电送入海上生产平台,满足平台安全可靠供电需求,具有较高的应用前景。柔性直流主要采用模块化的电压源性换流技术,具有有功和无功可控、不依赖交流电网短路容量、无需配置大量的电容器等优点,这些特点使得柔性直流可向弱系统或者孤岛无源系统供电<sup>[1]</sup>。

然而,现有的柔性直流输电技术的工程应用主要在海上风电场送出工程,以及区域电网的互联互通等领域,在对海上生产平台应用的研究较少。因此,根据海上生产平台的用电需求与负荷特点,研究柔性直流输电方案在海上平台的应用,对解决海上平台的供电问题,以及高端电力电子设备的国产化具有重要的意义。

本文综合考虑了自组网供电、交流送电输电、常规直流和柔性直流输电方式的优缺点,提出了海上平台采用混合直流输电<sup>[2]</sup>的方案,并开展建模仿真分析研究,为解决海上平台柔性直流输电系统关键技术提供相应的仿真模型支撑和理论分析。

## 1 传统供电方式研究

海上平台的负荷主要分为连续性负荷、间歇性负荷和备用负荷。单个平台负荷从100 kW到将近20 MW,平台群负荷从8 MW到将近100 MW。平台配备主电源和应急电源。组网电压等级一般为3.3 kV、6.3 kV、10.5 kV或35 kV。电压稳态波动范围一般不超过10%,电压稳态波动范围一般不超过5%。

海上平台自供电,是最初海上平台所采用的供电方式,其主要依靠海上平台自身装设的发电机发电,其缺点在前面已经指出,下面主要针对利用岸电采用交流供电方案和直流供电方案展开分析。

### 1.1 交流供电方案

交流输电(AC)是在海上平台供电中较为常见的一种技术,优点是技术成熟、可拓展性强、拓扑结构简单。该系统主要分为三个部分:(1)海上平台升压变电站及其相应的设备,如无功补偿装置;(2)交流海底电缆,为保证供电可靠性,一般是2回;(3)陆地上的变电站及其相关设备,交流输送拓扑结构如图1所示。

交流输电是海上平台供电的常规方法,因为岸上主电网是高压交流电网。当海上平台的用电需求不大,且输电距离不长的情况下,可以考虑采用交

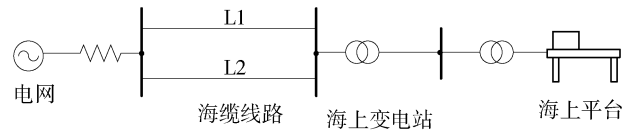


图1 交流输送拓扑结构

Fig. 1 AC transport topology

流输电方案,同时需结合实际情况,考虑是否需要海上平台加静止无功补偿器。

交流输电方式传输距离受限,主要原因是在输电电压等级基本确定的情况下,交流电缆电容电流较大。针对交流海缆输电的可用输电能力,国外有相关的研究成果表明,以380 kV的交流海底电缆为例,如果只考虑电容充电电流的影响,交流系统的频率按50 Hz考虑,最大输电距离可达到约140 km。若果要进一步考虑一定的裕度,并按0.8额定功率输电,交流最大输电距离降低至90 km左右。

### 1.2 直流供电方案

直流输电(DC)系统主要由整流站、海底电缆、逆变站与无功补偿设备等部分组成,其结构组成如图2所示。电源的交流电经逆变后转换成直流电,接入海底电缆输送到海上平台,经逆变后转换成交流电使用。目前主要有常规直流和柔性直流两种技术路线<sup>[3-5]</sup>。

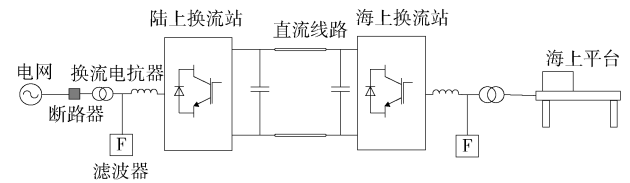


图2 直流输送拓扑结构

Fig. 2 DC transport topology

常规高压直流输电(Line Commutated Converter Based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)的技术已广泛应用,在2017年底投产的滇西北直流工程,输电电压等级已达到 $\pm 800$  kV,输电容量达到5 GW。LCC-HVDC技术已得到广泛的工程应用,主要是大范围功率输送(如国内的西电东送)和区域电网的互联互通(如云南与南网主网异步运行)等场合。

柔性直流输电(Voltage Source Converter Based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)理论研究较多,工程应用方面相对滞后于常规直流,但发展

较为迅速<sup>[6]</sup>。以国内为例, 2011 年, 上海南汇柔性直流输电示范工程投运, 该项目由国家电网公司建设。2013 年, 广东南澳三端柔性直流输电示范工程投运, 该项目由南方电网建设。2014 年, 浙江舟山五端柔性直流输电投运。此外, 大容量高电压柔性直流输电技术也将得到工程应用, 如规划建成的乌东德直流送出工程中, 柔直换流站规模将达到  $\pm 800$  kV、5 GW。

直流输电方式传输距离和传输容量理论上不受限制。在相同的敷设方式下, 两路直流海缆的输电能力是同规格参数交流海缆的 1.7 倍。同时, 直流输电方式还具有故障隔离的效果, 减少岸电和海上平台交流故障的交互影响。此外, 虽然直流输电换流站的投资成本高于交流输电的变电站, 但由于直流线路的花费较少, 年运行费较少。故相比于交流输电, 直流输电在远距离、大容量电力输送场合具有较好的经济效益。

## 2 混合直流供电方案

常规直流输电方式优点在于输电容量大、输送距离远, 一般适用于电网结构相对较强的电网。而柔性直流不依赖交流系统短路容量, 可以实现无源逆变, 不需要外加的换向电压, 从而克服了常规直流输电的受端必须是有源网络的缺陷<sup>[7]</sup>。从工程经济特点来说, 同等送电规模下, 柔性直流换流站本体造价较常规直流换流站高出约 30%, 柔性直流输电设备比较少(主要是滤波器容量小, 甚至可以没有), 比常规直流换流站占地面积小(目前同等容量可以小 40%), 建造海上平台费用较小。因此, 陆地换流站侧采用常规直流方案经济性较好; 而海上平台上统筹考虑平台建造费用, 使用柔性直流方案经济性也具备竞争力。

综合考虑 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的优势, 本研究提出海上平台采用混合直流输电方式。该输电方式整流侧是传统的电网换相整流站 LCC, 逆变侧是柔性直流的电压源换流站 VSC, 这种混合直流输电模型系统的自换相能力可以避免传统高压直流输电 LCC-HVDC 的逆变侧换相失败的问题, 大大提高输电的可靠性。同时, 因为受端海上平台的电压源换流器可以提供动态无功功率, 提高系统电压恢复速度, 进而提高电压稳定性。混合直流送电系统拓扑结构如图 3 所示。

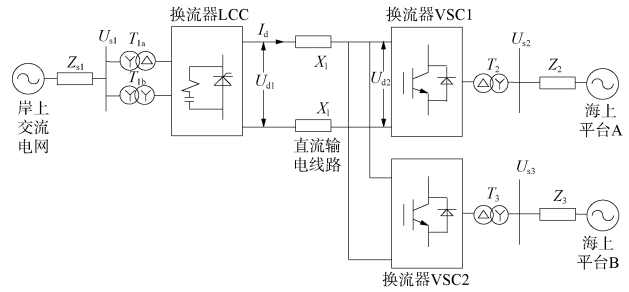


图 3 混合直流输送拓扑结构 (多平台)

Fig. 3 Hybrid DC transport topology

## 3 数学模型和控制策略

### 3.1 数学模型

整流侧双极 LCC 模型, 以常规 12 脉波换流器拓扑结构为例, 其数学模型为:

$$U_{d1} = 2.7 U_1 \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{c1} I_d \quad (1)$$

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{2X_1} \quad (2)$$

$$P_{d1} = U_{d1} I_d \quad (3)$$

$$Q_{c1} = P_{d1} \tan \varphi \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)] \quad (5)$$

逆变侧采用的是 VSC 模型, 为实现解耦控制, 给出在两相旋转 dq 坐标系下模块化多电平换流器的数学模型:

$$\begin{cases} (R + sL_{eq}) i_{sd} = u_{sd} - v_d + wL_{eq} i_{sq} \\ (R + sL_{eq}) i_{sq} = u_{sq} - v_q - wL_{eq} i_{sd} \end{cases} \quad (6)$$

$$P = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) = \frac{3}{2} u_s i_{sd} \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) = -\frac{3}{2} u_s i_{sq} \quad (8)$$

### 3.2 控制策略

整流侧 LCC 常见控制策略有定直流电流、定直流电压和定直流功率控制三种方式<sup>[8-10]</sup>。具体是通过晶闸管阀触发脉冲的相位控制来改变换流器的直流电压实现的: 定直流电流控制是指, 通过给定直流电流的参考值, 使直流电流跟踪参考值的控制方法。同理可知, 定直流电压控制的原理是跟踪给定的直流电压参考值。定直流功率控制的原理是跟踪给定的直流功率参考值。

逆变侧 VSC 控制策略一般采用双闭环控制, 即功率外环和电流内环控制, 其中外环基本控制方

式有定直流电压、定有功功率、定交流电压控制三种。当交流系统是弱系统或无源网络时，为提高系统的电压支撑能力，一般会采用定交流电压的控制方式。

综上所述，拟定海上平台采用多端混合直流输电系统控制策略为：在整流侧 LCC 是定直流电压控制方式，为逆变侧 VSC 提供功率传输所必须的稳定的直流电压；逆变侧 VSC 是定有功功率和定交流电压控制方式，实现受端的功率灵活控制。

## 4 实例仿真

### 4.1 主要边界

实际海岸电网较为复杂，需要进行等值处理。根据仿真精度需要，选择典型的四机两区域系统等效交流海岸电网。交流侧额定电压 230 kV。直流侧额定电压 100 kV，额定传输功率 50 MW。海上平台最大负荷约 50 MW，含 35 kV 和 10 kV 两个电压等级静态负荷和电动机负荷，其供电系统结构图如图 4 所示。

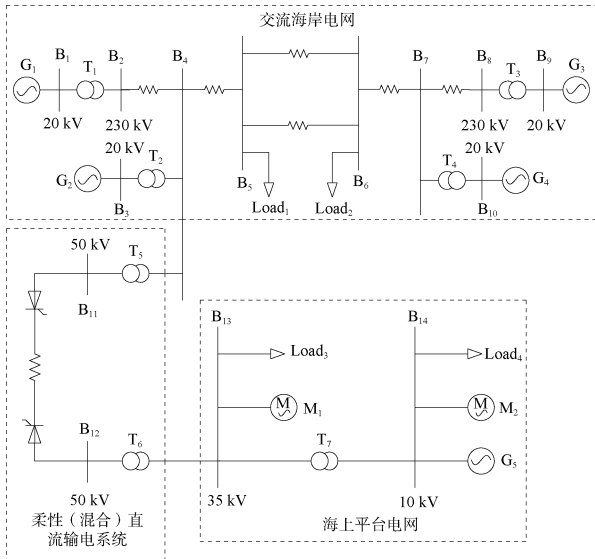


图 4 海上平台供电系统结构图  
Fig. 4 Offshore platform topology

### 4.2 仿真模型

根据所设计的模型，在 PSCAD 中搭建该混合直流输电模型，其中整流侧采用常规直流 12 脉动整流器模型，逆变侧采用柔性直流两电平模型，输电线路采用无损线路模型，两端交流系统采用无穷大电源串联阻抗代替。

PSCAD 中建立的混合直流输电系统参数如表 1

所示。

表 1 系统参数表

Tab. 1 System parameter table

参数名称及单位	整流侧	逆变侧
直流侧额定电压/kV	100	100
直流额定传输功率/MW	50	50
交流侧额定电压/kV	230	230
交流侧阻抗/ $\Omega$	1	8.84
换流站变压器变比	230/50	50/230
换流站变压器额定容量/MVA	1 000	1 000

基于 PSCAD 仿真平台建立的混合直流输电系统的控制模块中直流控制采用 LCC 定直流电压控制，其控制模块如图 5 所示。

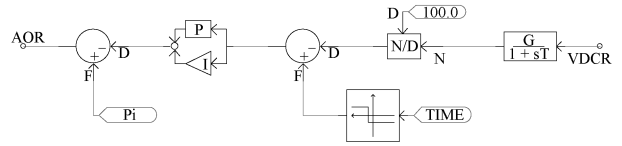


图 5 LCC 定直流电压控制模块  
Fig. 5 LCC DC voltage control module

混合直流系统中 VSC 部分定有功功率控制模块如图 6 所示。

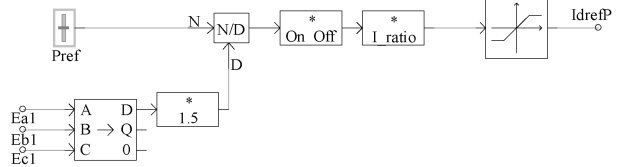


图 6 VSC 定有功功率控制模块  
Fig. 6 VSC active power control module

混合直流系统中 VSC 部分电压控制采用外环定交流电压控制方法，其仿真模块如图 7 所示。

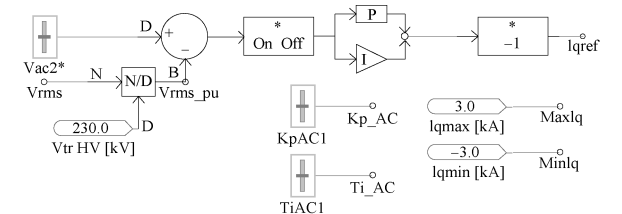


图 7 VSC 外环定交流电压控制模块  
Fig. 7 VSC AC voltage control module

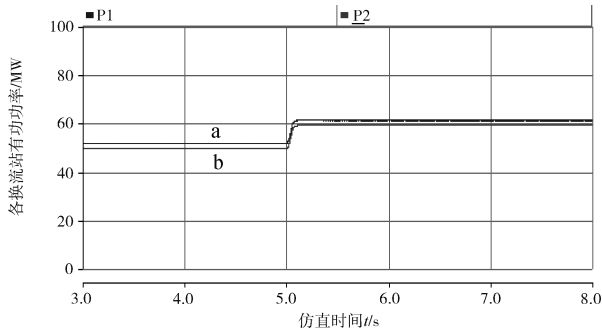
### 4.3 仿真计算

海上平台电气计算一般包括潮流计算、短路计算和稳定计算三大块。潮流和短路问题较为简单，

本研究重点研究暂态过程交直流网络交互影响, 主要是海上平台负荷突变、电压波动, 直流降压运行, 以及陆地交流电网短路故障。

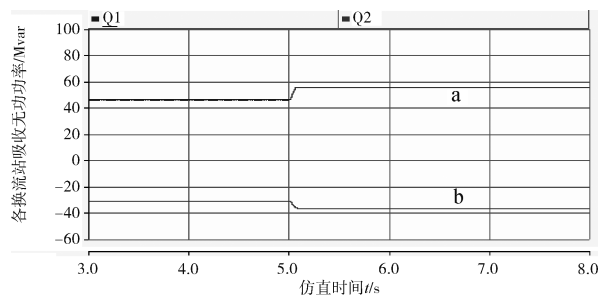
#### 4.3.1 海上平台负荷突变

当  $t=5\text{ s}$  时, 海上平台突增静态负荷 5 MW 和动态负荷 5 MW。VSC 的有功功率指令值由 50 MW 阶跃到 60 MW 时, VSC 端传输的有功功率迅速跟踪指令值, 并且快速趋于稳定, 其整流侧与逆变侧的有功功率变化波形如图 8(a) 所示。在此过程中, LCC 端采用定直流电压控制, 直流侧电压几乎不会发生变化, 但由于输送有功功率提升, 这也会导致 LCC 端吸收无功功率增加, 其整流侧与逆变侧的无功功率波形如图 8(b) 所示。



注: a 为整流侧有功功率; b 为逆变侧有功功率。

(a) LCC-VSC 有功功率变化



注: a 为整流侧无功功率; b 为逆变侧无功功率。

(b) LCC-VSC 无功功率变化

图 8 海上平台负荷突变

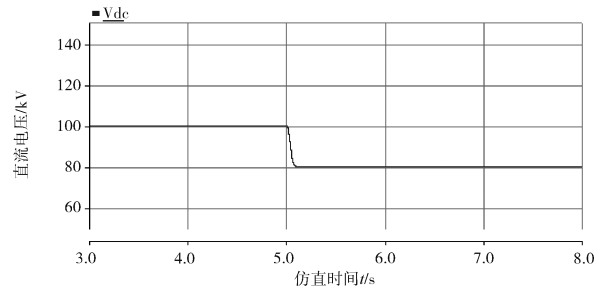
Fig. 8 Offshore platform load mutation

#### 4.3.2 直流降压运行

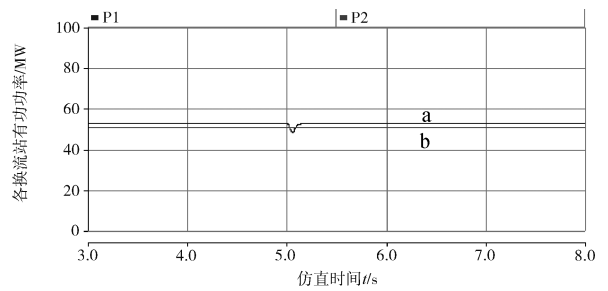
当  $t=4\text{ s}$  时, 当直流电压指令值由 100 kV 阶跃到 80 kV 时, 直流电压迅速做出反应, 准确跟踪指令值, 快速稳定在 80 kV, 其直流电压波形、直流输出有功功率的波形与换流站无功功率的波形如图 9 所示。

VSC 端由于存在定有功功率控制和定交流电压控制, 所以 VSC 端传输功率基本不变, 交流测电

压也基本不变。LCC 端由于传输功率恒定, 而电压降低, 吸收无功功率增加。

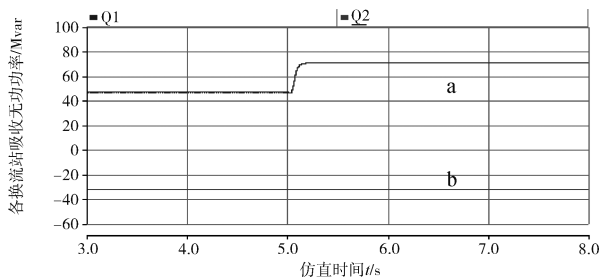


(a) 直流电压变化



注: a 为 LCC 端有功功率; b 为 VSC 端有功功率。

(b) 直流输送有功功率变化



注: a 为 LCC 端无功功率; b 为 VSC 端无功功率。

(c) 换流站无功功率变化

图 9 直流降压运行

Fig. 10 DC reduce-voltage operation

#### 4.3.3 岸上交流短路故障

当  $t=4\text{ s}$  时, 近海岸四机两区交流网中间两联络线发生三相短路接地故障, 80 ms 后交流断路器跳开故障线路, 直流保护不启动。当近海岸四机两区交流网中间两联络线发生三相短路接地故障, 交流网送端节点电压由 230 kV 下降到 200 kV, 有功功率也由 50 MW 下降到 30 MW, 故障切除后, 0.5 s 后电压和有功功率恢复到原来水平, 但是由于无功功率未完全没有恢复, 还存在一点的波动, 因此交流电网的送端节点电压也存在一点的波动。

由于在故障时, 送端节点电压最大波动幅度为 15%, 而有功功率波动幅度为 30%。阀侧交流电压

和送端节点电压动态保持一致, 阀侧电流值先减小再增大。交流电网发生故障后, 系统电压水平有所下降, 直流控制参数未发生变化的情况下, 整流输出的电压也相应下降。由于 LCC 侧采取定直流电压控制, 此时为提高直流电压, 控制系统改变换流站的触发角来逐步提高直流电压。在故障切除后, 直流电压很快恢复为正常值。直流线路传输功率保持和送端出口处功率一致。

逆变侧采取定有功功率和定交流电压控制策略, 由于控制系统的作用, 在故障切除后, 电压和功率都很快恢复为正常值。其中, 直流系统在暂态过程存在较大的过电流。在岸上交流系统发生短路故障时, 直流侧电压、直流侧电流与直流线路传输的功率均受到故障冲击而发生波动, 其波形如图 10 所示。

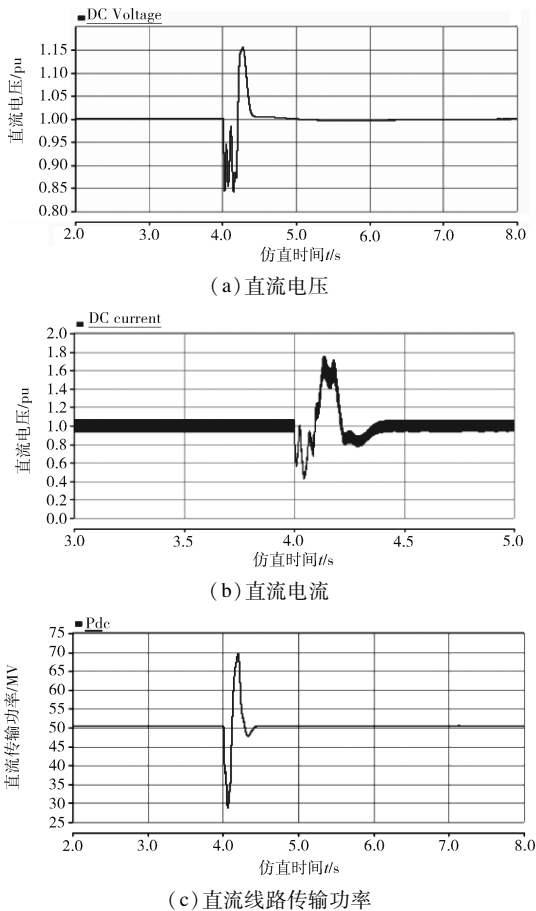


图 10 岸上交流短路故障

Fig. 11 Short circuit fault of grid on land

## 5 结论

海上平台一般均采用海上自供电方案, 该供电方式电源形式单一、可拓展性差、抗冲击能力弱、

供电可靠性和保障程度低, 同时, 海上平台的空间非常有限, 建设自供电电源投资较高。受输送距离的限制, 常规交流输电方式难以满足远距离海上平台供电需求, 而直流输电方式则基本不受输电距离的限制。本文综合考虑了常规直流和柔性直流输电方式的优缺点, 提出了海上平台采用混合直流输电的方案, 建立陆地电网侧常规直流、海上平台侧柔性直流的数学模型, 结合传统直流和柔性直流换流器的典型控制方式, 提出混合直流的控制策略。最后, 在 PSCAD 软件平台上建立海上平台采用混合柔性直流输电方案的模型, 并开展了相关的稳态和暂态仿真研究。

### 参考文献:

- [1] 钟杰峰, 陈丽萍, 袁康龙, 等. 多端柔性直流输电技术的现状及应用前景分析 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(增刊1): 42-45.  
ZHONG J F, CHEN L P, YUAN K L, et al. Analysis on present situation and application prospect of VSC-MTDC technology [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2 (Supp. 1): 42-45.
- [2] 许烽, 宣晓华, 江道灼, 等. 常规直流输电系统改造用的混合直流输电技术 [J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3209-3216.  
XU F, XUAN X H, JIANG D Z, et al. Study on hybrid HVDC transmission technology used for upgrading of conventional HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3209-3216.
- [3] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5460-5466.  
WANG X F, WEI X H, NING L H, et al. Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5460-5466.
- [4] 李强, 李鑫, 魏澈. 海上油气田群电力组网技术 [J]. 中国造船, 2011, 52(7): 218-223.  
LI Q, LI X, WEI C. Power grid interlinking technology for offshore oil fields [J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(7): 218-223.
- [5] 吴锋, 胡辉, 胡鹏, 等. 海上油气田电力组网技术研究与实践 [J]. 中国海上油气, 2010, 22(1): 54-58.  
WU F, HU H, HU P, et al. Study and practice of powergroup network technology for offshore oil and gas fields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(1): 54-58.
- [6] 许树楷, 罗雨. 背靠背输电系统中柔性直流与常规直流的协调控制策略 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 9-15.  
XU S K, LUO Y. Study on coordination control strategy of VSC/LCC BtB HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 9-15.

(上转第 114 页 Continued on Page 114)

## 参考文献:

- [1] 邓明. 牵柔性直流输电系统及其无网侧电动势传感器控制技术的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 16-25.
- [2] 季叔平. 上海南汇柔性直流输电示范工程关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 12-23.
- [3] 杨光亮. 高压直流输电系统控制保护配置方案研究及谐波影响分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 34-37.
- [4] 张豹. 高压直流输电的控制和保护系统策略分析 [D]. 南京: 东南大学, 2015: 21-31.
- [5] 聂雪松. 特高压直流输电控制系统模型的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015: 16-38.
- [6] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电控制保护系统分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3277-3283.  
YANG G L, TAI N L, ZHENG X D. Discussion of  $\pm 800$  kV UHVDC transmission control and protection system [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3277-3283.
- [7] 廖武. 模块化多电平变流器(MMC)运行与控制若干关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 30-34.
- [8] 李探. 模块化多电平换流器直流输电系统稳定性关键问题研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 50-55.

## 作者简介:



BAI J C

白晋川(通信作者)  
1989-, 男, 湖北荆州人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站、换流站电气设计及研究等工作(e-mail) baijinchuan@gedi.com.cn。



ZHANG X G

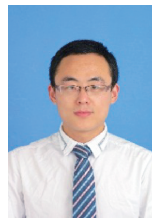
张旭光  
1981-, 男, 浙江浦江人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电气二次设计工作(e-mail) zhangxuguang@gedi.com.cn。

(责任编辑: 高春萌)

## (下接第 120 页 Continued from Page 120)

- [7] 董云龙, 胡兆庆, 田杰, 等. 多端柔性直流控制保护系统架构和策略 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 21-26.  
DONG Y L, HU Z Q, TIAN J, et al. Frame of control protection system and control strategy implement in Multi-terminal VSC-HVDC system [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2): 1-26.
- [8] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风力发电机组对电力系统稳定性影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 7-12  
HAO Z H, YU Y X. The influence of doubly-fed induction generator on stability of power system [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 7-12.
- [9] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39-44.  
HU Z Q, MAO C X, LU J M. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39-44.
- [10] 彭冠炎, 卢毓欣, 简翔浩. 常规直流柔性化改造过渡方案研究 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 61-65.  
PENG G Y, LU Y X, JIAN X H. Research on transition scheme of LCC-HVDC retrofitting for VSC-HVDC [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 61-65.

## 作者简介:



LIU J W

刘军伟  
1987-, 男, 湖北枣阳人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统规划研究工作(e-mail) liujunwei@gedi.com.cn。



ZHANG Z F

张紫凡(通信作者)  
1987-, 女, 河北石家庄人, 讲师, 硕士, 主要从事电力系统及其自动化研究工作(e-mail) zzf3345@qq.com。

(责任编辑: 高春萌)