

# 海上风电经 DR-MMC 并联混合直流送出系统启动及协调控制策略

程帆<sup>1,2</sup>, 姚良忠<sup>2\*</sup>, 谢立军<sup>1</sup>, 梁帅<sup>2</sup>, 徐业琰<sup>2</sup>, 李琰<sup>1</sup>, 王志冰<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072)

## Start-up and Coordinated Control Strategies for Offshore Wind Power Transmitted by DR-MMC Parallel Hybrid HVDC System

CHENG Fan<sup>1,2</sup>, YAO Liangzhong<sup>2\*</sup>, XIE Lijun<sup>1</sup>, LIANG Shuai<sup>2</sup>, XU Yeyan<sup>2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, WANG Zhibing<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**Abstract:** The modular multilevel converter (MMC)-based HVDC system has been widely adopted for deep sea offshore wind power delivery engineering projects because of its islanded operation ability and flexibility. Additionally, the diode rectifier (DR) is considered as a competitive option for offshore wind power delivery owing to its small platform size. This paper proposes a hybrid HVDC system composed of a parallel MMC and DR. The proposed system can realize islanded system startup and operation without storage equipment installation and wind turbines (WT) control strategy modification. The hybrid system establishes AC voltage on the offshore side through the offshore MMC, realizes the partial grid-connected operation of WT and starts DR, thereby realizing the power delivery of the entire system. In addition, the mechanism of the reverse active power phenomenon for the parallel DR and MMC with conventional V/F control is analyzed using a simplified model. A coordinated power-voltage droop control strategy is proposed for the hybrid DC system. This strategy can regulate the MMC power output at different wind velocities. The PSCAD/EMTDC simulation of a type-IV wind farm connected to a  $\pm 200$  kV/800 MW hybrid HVDC system is performed, and the results verify the effectiveness of startup and active power control strategy.

**Keywords:** offshore wind power; diode rectifier; modular multilevel converter; hybrid HVDC; coordinated control

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51861135312)。

International(Regional) Joint Research Project of National Natural Science Foundation of China (51861135312).

**摘要:** 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电系统由于运行方式灵活、具备无源运行能力的特点,在远海风电送出工程中获得了广泛应用;基于二极管不控整流(diode rectifier, DR)的送出方式由于海上平台体积小、造价低等优点,也是海上风电送出极具潜力的备选方案,但其缺乏无源运行能力。利用MMC并联DR构成海上风电混合直流送出系统,使得海上风电机组无需加装储能装置和控制策略改造,实现无源系统的启动和运行。混合系统通过海上MMC建立海上风电场侧交流电压,实现部分风电机组并网运行并启动DR,进而实现整个系统的功率送出。对传统V/F控制MMC的并联混合直流系统有功功率倒送现象进行了机理分析。基于分析模型,提出了一种基于有功-电压下垂的协调控制策略,实现了风功率变化下MMC送出功率的控制。最后利用PSCAD/EMTDC建立了直驱海上风电场经 $\pm 200$  kV/800 MW混合直流输电送出的系统模型,仿真结果验证了上述启动和协调控制策略的有效性。

**关键词:** 海上风电; 二极管不控整流; 模块化多电平换流器; 混合直流; 协调控制

## 0 引言

未来海上风电的大规模开发呈现出远距离、深海化及机组大型化趋势,直流输电送出方案更适用于海上风电的大规模远距离功率输送<sup>[1]</sup>。目前,德国已有的海上风电柔性直流送出系统已达十余个,最大输送距离、容量和电压等级分别达到了200 km、900 MW和 $\pm 320$  kV<sup>[2]</sup>。中国的上海南汇、广东南澳和浙江舟山柔直系统也实现了海上风电的送出<sup>[3]</sup>;同时,即将

投运的全球首个直流电网—张北四端柔直工程也将在送端康保和张北站实现无源系统送出<sup>[4]</sup>。Tennet规划的欧洲北海风电开发计划，依托直流系统构建未来北海风电输送网，并计划修建人工岛作为周边海上风电汇集点，接入换流站进行远距离输送<sup>[5]</sup>。

目前的海上风电直流送出系统大多采用模块化多电平换流器（multilevel modular converter, MMC）<sup>[6]</sup>，早期的Borwin1工程采用了两电平电压源型换流器（two level voltage source converter, 2L-VSC）的柔直输电方案，均具备无源系统运行能力。SIEMENS公司在2015年推出了基于不控二极管整流（diode rectifier, DR）的海上风电直流送出方案，具备体积小、成本低、运行控制简单的优势<sup>[7]</sup>，成为未来极具竞争力的备选方案之一。但DR方案需要海上风电场交流侧具备无源运行能力<sup>[8]</sup>，同时其启动过程需要交流回线、储能设备或启动电源<sup>[9-10]</sup>。文献[11]针对DR设计了一种新型改进拓扑，利用并联换流器实现无源系统的启动和运行。文献[12-13]针对DR送出方式提出了一种串联MMC的改进方案，利用了MMC的无功电压支撑能力。文献[14-15]构建的DR海上风电送出系统中均包括并联交流线路，可采用交直流并列送出方式。文献[16]和文献[17]分别对海上风电机组采用了GPS同步信号和分布式控制方式，实现了海上系统同步交流电压的建立。文献[18]通过移相变压器结合脉动数提高的方式提升DR方案的谐波特性。对于DR送出方案，目前存在的主要难点包括无源系统交流电压难以建立、系统启动需要依赖启动电源。为有效解决上述问题并充分利用MMC和DR各自的优点，送端结合MMC和DR，构成混合直流并联送出系统，成为未来远海风电送出系统的可行方案之一。

本文首先介绍了海上风电经DR-MMC并联混合直流送出系统的拓扑结构和运行特性；在此基础上提出了混合直流系统的启动策略；对并联送出系统所存在的有功功率倒送现象进行了机理分析，并提出基于有功-电压下垂的无源控制策略；最后利用构建的混合直流系统模型验证了所提出策略的有效性。所提拓扑和控制策略实现了在风电机组控制策略不变、机组间无通信和额外启动设备下，混合直流送出系统启动和稳态运行，实现送端换流器间有功功率的合理分配。

## 1 DR-MMC并联混合送出系统拓扑

远海风电场的离岸距离一般在100 km以上，采用

DR-MMC并联送出方式，能够减少平台投资和体积。风电机组考虑66 kV汇集方式，从而进一步减小海上平台的空间需求，送出拓扑如图1所示。

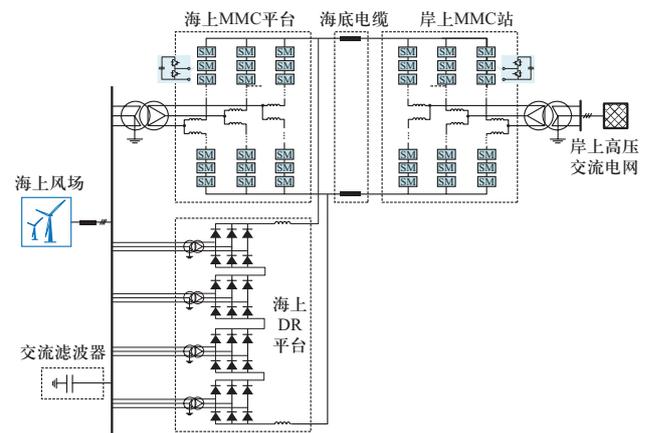


图1 海上风电DR-MMC并联直流送出拓扑

Fig. 1 Topology of offshore wind power transmitted by DR-MMC parallel hybrid HVDC system

为了进一步减少海上平台的滤波器和无功补偿需求，DR采用基于移相变压器的24脉动方案<sup>[18]</sup>；MMC采用常规的基于半桥子模块（half bridge submodule, HBSM）的方案。由于DR运行给交直流侧带来特征次谐波，采用双调谐滤波器方案实现特征频次分量的滤除，并配备一定的无功补偿设备。

考虑到DR的功率因数取决于阀侧电流基波和电压基波之间的夹角，可由下述近似公式表示：

$$\cos \alpha \approx \cos \frac{\mu}{2} \quad (1)$$

式中： $\alpha$ 表示功率因数角； $\mu$ 为换相重叠角。考虑平波电抗器的作用，假设直流电流恒定，则功率因数角约为换相重叠角的二分之一。 $\mu$ 的表达式为：

$$\mu = \arccos \left( 1 - \frac{\sqrt{2} X_T I_{DC}}{U_1} \right) \quad (2)$$

式中： $X_T$ 为换流变压器等值电抗； $U_1$ 为阀侧开路的基波线电压有效值； $I_{DC}$ 为直流电流。得到DR换流器的功率因数角与直流电流、换流变等值电抗之间的关系如图2所示。

如图2所示，DR功率因数随着直流电流和变压器等值电抗的增大而减小，考虑到海上风电出力变化导致的直流电流变化，DR功率因数也在一定范围内变化。在直流电流较大、变压器等值电抗较大的情况下，功率因数会降至0.92，此时无功补偿容量较大，约为有功传输容量的42.6%，需要配置多组补偿装置。

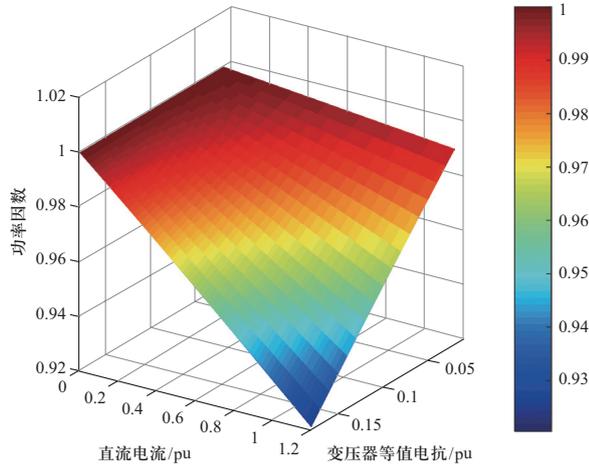


图 2 DR功率因数与直流电流和变压器等值电抗关系  
Fig. 2 Relationship among power factor of DR with DC current and transformer equivalent impedance

综合海上平台无功补偿装置安装体积需求，可采用减小变压器短路电抗的方法实现功率因数的提升。

换相过程中的交流电流变化过程近似线性，多单元组成的DR直流侧电压 $U_{DC\_DR}$ 满足如下关系：

$$U_{DC\_DR} = \frac{6\sqrt{2}nU_1}{\pi} \left[ \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}+\mu} \sin \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) d\alpha \right] \quad (3)$$

忽略第二项的换相过程影响，有：

$$U_{DC\_DR} \approx \frac{6\sqrt{2}nU_1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha = \frac{3\sqrt{2}nU_1}{\pi} \approx 1.35nU_1 \quad (4)$$

式中： $n$ 为DR单元数。如 $n=1$ 的情况对应6脉动DR换流器，其直流电压近似等于阀侧交流电压的1.35倍。故对于完全不可控的DR换流器，需要采用改变交流侧电压的方式实现DR直流侧电压的改变，从而改变传输的直流功率。

## 2 DR-MMC并联送出系统启动策略

启动策略可以充分利用海上MMC的黑启动能力，实现送端交流电压的建立。相比较于纯DR送端，DR并联MMC系统的启动方式无需配置黑启动储能装置或备用交流回线。同时风电机组的控制和并网策略无需进行修改，利用送端DR和MMC之间的配合实现大规模海上风电的功率送出。

### 2.1 直驱型海上风电控制策略

直驱型海上风电机组采用常规的基于电流内环矢量控制方式。对于机侧换流器（machine side

converter, MSC)和网侧换流器（grid side converter, GSC)的外环控制目标，分别采用定有功功率和定直流电压/无功功率的方式；MSC基于定子电压定向，GSC利用锁相环（phase locked loop, PLL)跟踪并网电压。由于直驱风机并网特性主要由GSC决定，故此只给出GSC控制策略，具体结构如图3所示。

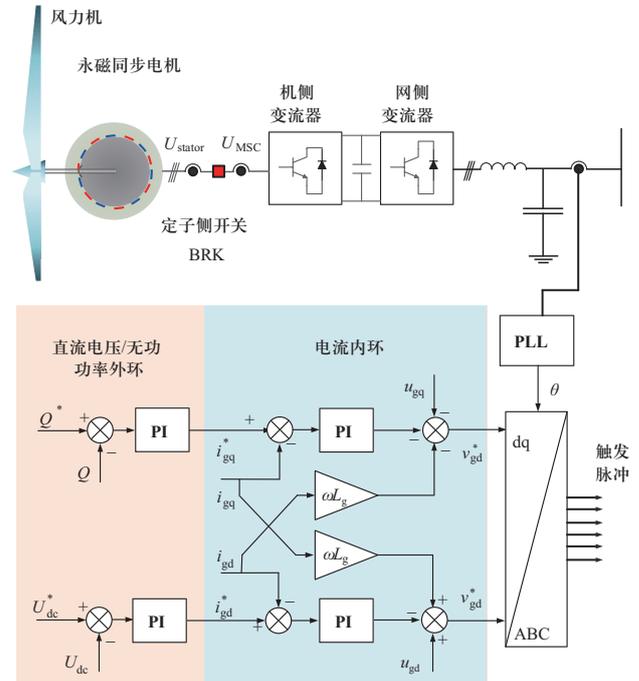


图 3 直驱风电机组及网侧变流器控制策略  
Fig. 3 Block diagram of control strategy for type-IV wind turbine and GSC

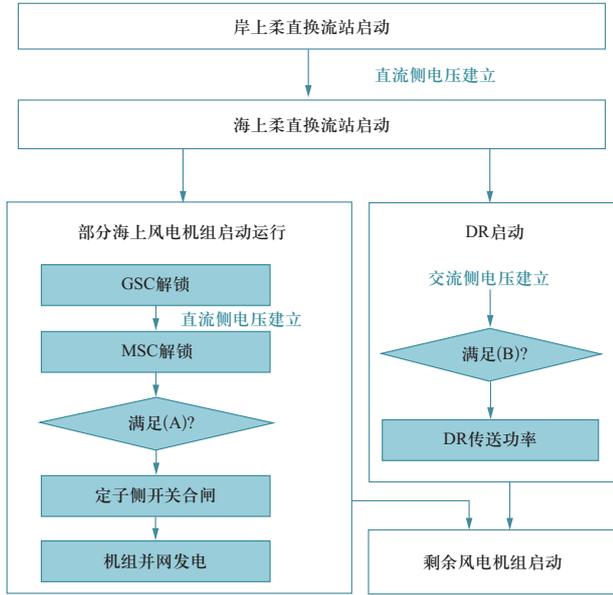
图中GSC控制策略采用直流电压和无功功率外环的矢量控制方案；定子侧开关BRK用于连接发电机定子和MSC，当满足同期并网判据(A)时合闸，具体如下：

$$\begin{cases} |U_{stator} - U_{MSC}| \leq U_{on} \\ \text{phase}(\dot{U}_{stator} - \dot{U}_{MSC}) \leq \delta_{on} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)两式分别表示机侧变流器MSC电压 $U_{MSC}$ 和发电机定子侧电压 $U_{stator}$ 的幅值差小于启动阈值 $U_{on}$ ，相角差小于启动阈值 $\delta_{on}$ 。满足上述软并网条件时，定子侧开关BRK合闸，风电机组输出功率。

### 2.2 启动策略

DR-MMC并联送出系统启动策略首先通过岸上柔直换流站建立直流电压，结合海上柔直站的无源启动能力实现部分机组并网，从而带动DR启动并实现剩余机组并网。主要分为以下步骤，其详细过程如图4所示。



(A): 电机定子侧电压与MSC出口电压幅值相位同期条件  
(B): 交流侧空载整流电压大于受端直流侧电压

图4 DR-MMC海上风电送出系统启动策略

Fig.4 Flowchart of start-up strategy for offshore wind power transmitted by DR-MMC system

1) 岸上柔直流换流站启动: 结合MMC的充电电阻, 利用岸上交流系统对柔直流换流站进行充电, 建立系统的直流侧电压。

2) 海上柔直流换流站启动: 在直流侧电压维持稳定后, 海上MMC工作在无源运行模式, 建立海上交流系统的电压。

3) 部分直驱风电机组并网运行与DR启动: 考虑到MMC容量有限, 首先启动部分直驱风电机组, 启动逻辑为GSC, 建立风电机组直流侧电压, 定子侧开关在检测到机侧换流器空载电压与电机定子侧电压相位幅值满足前述判据(A)后合闸, 实现并网发电; 当海上风电场侧交流电压超出阈值范围, 导致海上风电场侧直流电压大于受端直流电压时, DR开始传输部分功率。

4) 全部风电机组并网: 少部分风电机组并网发电且DR开始传输功率后, 剩余全部风电机组并网, 实现整个海上风电场的电能输送。

判据(A)为2.1节的发电机同期并网判据; 判据(B)为DR启动判据, 表示当交流侧电压大于阈值时, 送端直流电压高于受端, 二极管正向导通, 开始传输功率, 具体有:

$$U_{DC\_DR} \geq U_{DC\_MMC\text{onshore}} \quad (6)$$

式中:  $U_{DC\_MMC\text{onshore}}$  为受端MMC直流电压。

### 3 送端协调控制策略

对于DR并联MMC海上风电孤岛送出场景, 若维持风电机组的电网跟随型控制策略不变, 则需要利用MMC的孤岛运行能力作为支撑电源运行。这里首先对DR-MMC并联送出场景下的有功功率分配机理和MMC倒送功率现象进行分析阐述, 在此基础上给出MMC和DR之间的协调控制策略, 实现有功功率的合理分配, 从而有效避免MMC有功倒送现象。

#### 3.1 DR-MMC并联送出系统有功功率分配机理

考虑稳态运行时送端MMC处于运行区间范围内, 采用V/F控制模式可视为潮流计算的平衡节点 ( $V\theta$ 节点); 受端柔直站直流侧电压维持恒定, 视为理想直流电压源; 海上风电视为输出功率变化的等值电流源。对整个系统进行相应简化后, 得到的交直流系统简化示意图如图5所示。

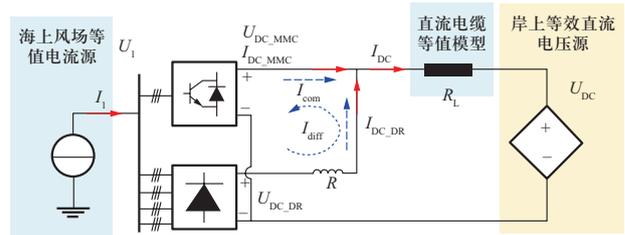


图5 DR-MMC海上风电送出系统简化分析图

Fig.5 Simplified scheme of offshore wind power transmitted by DR-MMC system

当海上风电场并网点线电压有效值为  $U_1$  时, DR 直流侧出口电压由式(4)得到, 按照图中定义的电流量和方向, 满足如下关系:

$$\begin{cases} I_{DC} = I_{DC\_DR} + I_{DC\_MMC} \\ P_{DC} = U_{DC\_DR} I_{DC\_DR} + U_{DC\_MMC} I_{DC\_MMC} \end{cases} \quad (7)$$

考虑平波电抗的存在以及直流侧连接线路阻抗, 在DR传输功率时会导致MMC直流侧出口电压  $U_{DC\_MMC}$  与DR直流侧出口电压  $U_{DC\_DR}$  存在差值。若定义MMC与DR输出直流电流均以送出方向为正, 直流电流的差模分量为  $I_{diff}$ , 共模分量为  $I_{com}$ , 满足如下关系:

$$\begin{cases} I_{diff} = 0.5 \times (I_{DC\_DR} - I_{DC\_MMC}) \\ I_{com} = 0.5 \times (I_{DC\_DR} + I_{DC\_MMC}) \end{cases} \quad (8)$$

DR直流侧电压和MMC直流侧电压差值满足:

$$U_{DC\_DR} - U_{DC\_MMC} = R I_{DC\_DR} \quad (9)$$



表1 DR-MMC海上风电混合直流送出系统参数  
Table 1 Parameters of offshore wind power transmitted by DR-MMC parallel hybrid HVDC system

参数	数值	参数	数值
海上风电场MMC		岸上MMC	
容量/MVA	350	容量/MVA	1000
变压器网侧电压/kV	66	变压器网侧电压/kV	230
变压器阀侧电压/kV	220	变压器阀侧电压/kV	220
子模块数/个	125	子模块数/个	250
子模块电容/ $\mu\text{F}$	5000	子模块电容/ $\mu\text{F}$	15 000
桥臂电抗/mH	20	桥臂电抗/mH	20
海上DR (24脉动)			
容量/MVA	600	阀侧电压/kV	79
直流侧电抗/mH	200	变压器漏抗/pu	0.05
直驱型海上风电场			
单机容量/MW	4	台数/台	200

### 4.1 启动过程

启动阶段功率特性和电压电流特性分别如图7和图8所示。

仿真结果表明，岸上MMC建立直流电压后，海

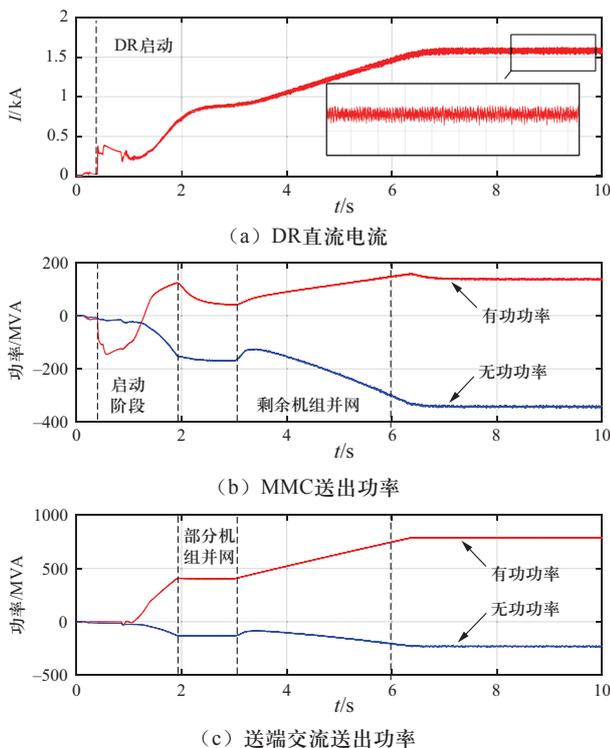


图7 混合送出系统直流电流及功率输出

Fig. 7 Waveform of DC current and power output of hybrid transmission system

上MMC站运行在无源模式，建立风电场交流电压，DR开始送出少量功率，部分风电机组开始并网送出功率；输出功率稳定后，剩余部分机组并网启动送出功率。海上MMC调整电压参考幅值如图8(c)所示，紫色实线为交流母线电压有效值，由63.4 kV缓慢上升至65 kV，从而实现DR和MMC之间的功率分配。

图中DR的直流侧电流、交流侧电流和送端直流电压均存在一定纹波和畸变，这是由DR的运行特性所导致。DR换流器换相过程带来的直流侧纹波电流和电压主要成分为特征次谐波，该成分幅值过大会导致换流器运行损耗增大，并威胁系统安全稳定运行。通过配置直流侧滤波器可滤除直流谐波电压，增大直流侧平波电抗器可减小直流谐波电流。但对于海上DR平台，其直流侧平波电抗数值的选择需要考虑安装空间的限制。

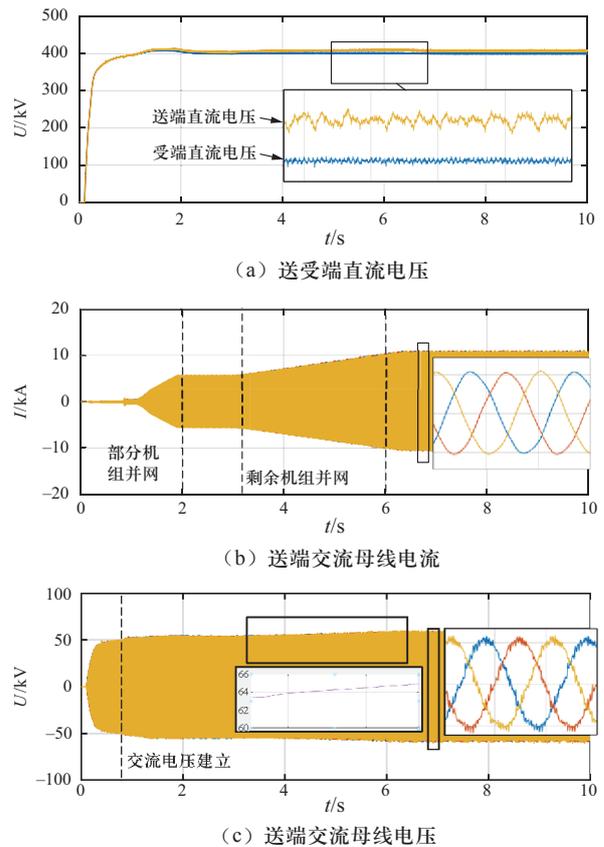


图8 混合送出系统启动仿真结果

Fig. 8 Simulated dynamic behavior of hybrid transmission system

### 4.2 风速变化

8 s~20 s之间，以2 s为时间节点，给出了风速变化下的运行结果如图9和图10所示。本文控制策略可以有效调整直流电流改变送出功率。在风速处于区间

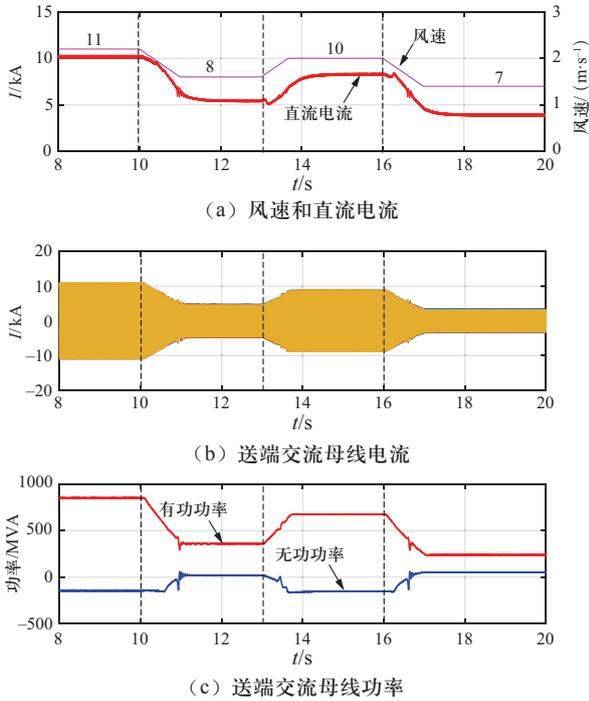


图9 混合送出系统风速变化仿真结果

Fig. 9 Simulation results of wind speed variation of hybrid transmission system

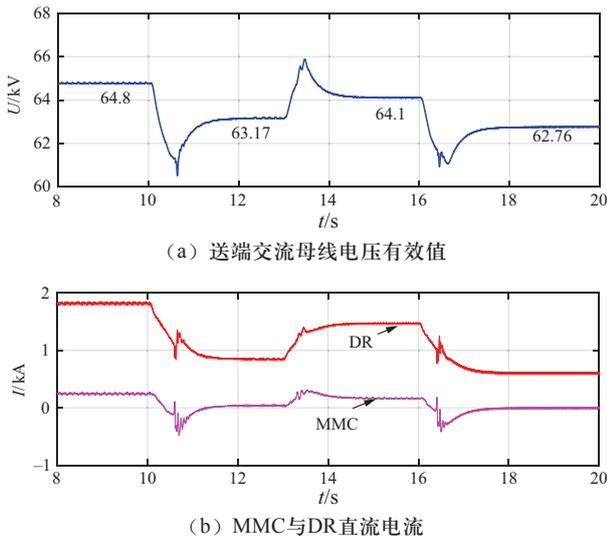


图10 混合送出系统送端交流母线电压及直流电流结果

Fig. 10 Waveform of AC bus voltage and DC current at the sending end of hybrid transmission system

变化时，直流并网点交换无功功率处于较小范围内，表明所需支撑电压大部分由柔直换流器提供。

图10表明，在风速变化过程中，MMC通过控制策略实践风功率送出情况下交流侧母线电压的调整，从而实现了DR和MMC之间有功功率的协调分配。图10(b)也反映出，有功功率主要由DR送出，MMC仅承担少量有功输出。

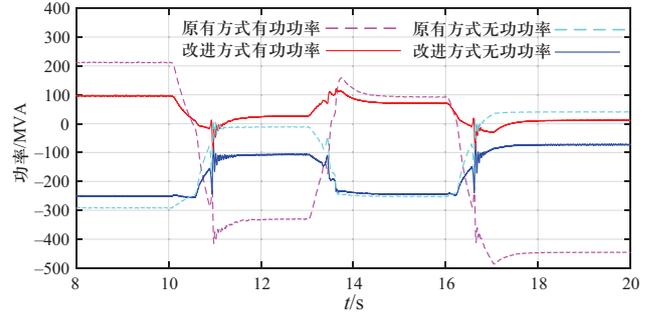


图11 原有无源策略与本文策略仿真结果对比

Fig. 11 Simulation results comparison between original V/F and proposed control strategy

为了对比本文所述策略的效果，比较了交流电压为额定电压时的无源V/F控制方式与本文方式下，柔直换流器MMC输出有功及无功功率。即对比策略的下垂系数 $K_{vac}$ 为零，交流电压参考值 $U_d^*$ 恒定的情况，具体结果如图11所示。

图11表明，在不采取控制策略改进的情况下，风电功率处于较低水平时会出现MMC向风电场侧倒送功率的情况。当风电输出功率处于极低水平时，输送有功功率甚至可能超出MMC运行范围，如图11中17 s之后的情况。采用本文策略后，送端MMC有功功率输出处于较低水平，未出现倒送功率的情况。同时在风电输送功率变化时，MMC功率运行变化范围相对较小，证明了策略的有效性和优越性。

### 5 结论

本文结合DR和MMC各自优点，研究了海上风电经DR-MMC并联混合直流送出系统的启动和协调控制策略。研究表明，该系统可实现在风电机组控制策略不变、机组间无通信和无需额外附加启动设备条件下的系统启动，并具备运行灵活、成本低的优势。同时，本文对该系统运行中存在的并联送出系统有功功率倒送现象进行了机理分析，并提出了基于有功电压下垂的无源控制策略；策略实现了送端DR和MMC间有功功率的合理分配，避免了风速骤降导致的功率倒送情况，提高了系统运行的经济性；最后利用构建的混合直流系统模型验证了策略的有效性。仿真分析验证了本文所提出的系统启动及协调控制策略的有效性。

### 参考文献

[1] YARAMASU V, WU B, SEN P C, et al. High-power wind

- energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(5): 740-788.
- [2] BARNES M, VAN HERTEM D, TEEUWSEN S P, et al. HVDC systems in smart grids[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11): 2082-2098.
- [3] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [4] 杜晓磊, 蔡巍, 张静岚, 等. 柔直电网孤岛运行方式下换流阀闭锁时交流耗能装置投切仿真研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 179-185.  
DU Xiaolei, CAI Wei, ZHANG Jinglan, et al. Simulation study on switching on energy dissipation device during unipolar blocking under isolated island operation in VSC-HVDC power grid[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 179-185 (in Chinese).
- [5] 李翔宇, Gayan Abeynayake, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.  
LI Xiangyu, ABEYNAYAKE G, YAO Liangzhong, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116-126(in Chinese).
- [6] 蔡旭, 陈根, 周党生, 等. 海上风电变流器研究现状与展望[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 102-115.  
CAI Xu, CHEN Gen, ZHOU Dangsheng, et al. Review and prospect on key technologies for offshore wind power converters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 102-115 (in Chinese).
- [7] HUNGSASUTRA S, MATHUR R M. Unit connected operator with diode valve rectifier scheme[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 538-543.
- [8] IVAN A A, RUBEN P G, BLASCO-GIMENEZ R, et al. Control strategy of a HVDC-diode rectifier connected type-4 off-shore wind farm[C]//2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), November 1-4, 2015. Taipei, Taiwan, China.
- [9] XIE L J, YAO L Z, LI Y, et al. Frequency regulation participation of offshore wind farm integrated by diode-rectifier HVDC system[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 977-981.
- [10] MACHIDA T, ISHIKAWA I, OKADA E, et al. Control and protection of HVDC systems with diode valve converter[J]. Electrical Engineering in Japan, 1978, 98(1): 62-70.
- [11] 常怡然, 蔡旭. 低成本混合型海上风场直流换流器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5821-5828.  
CHANG Yiran, CAI Xu. Cost-effective hybrid HVDC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5821-5828(in Chinese).
- [12] BLASCO-GIMENEZ R, AÑÓ-VILLALBA S, RODRÍGUEZ-D'ERLÉE J, et al. Diode based HVDC link for the connection of large off-shore wind farms with self start capability[C]// European Conference on Power Electronics & Applications. IEEE, 2011.
- [13] NGUYEN T H, LEE D C, KIM C K. A series-connected topology of a diode rectifier and a voltage-source converter for an HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1579-1584.
- [14] LI R, YU L J, XU L. Offshore AC fault protection of diode rectifier unit-based HVDC system for wind energy transmission[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5289-5299.
- [15] SEMAN S, ZUROWSKI R, TARATORIS C. Interconnection of advanced type 4 WTGs with diode rectifier based HVDC solution and weak grids[C]//14<sup>th</sup> Wind Integration Workshop, Brussels, October 2015.
- [16] PRIGNITZ C, ECKEL H G, ACHENBACH S. A fault handling current control strategy for offshore wind turbines in interconnected offshore wind farms with different types of HVDC transmission[C]//2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), April 17-20, 2017. Florianopolis, Brazil.
- [17] YU L J, LI R, XU L. Distributed PLL-based control of offshore wind turbines connected with diode-rectifier-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1328-1336.
- [18] CHENG Fan, YAO Liangzhong, JI Ke, et al. Enhanced diode-rectifier HVDC for offshore wind power transmission[C]// 4th IEEE Workshop on Electronic Grid (eGrid 2019). IEEE, 2019.

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-03-03。



程帆

#### 作者简介:

程帆(1992), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源直流送出系统运行保护与控制, E-mail: chengfan5566@163.com。

姚良忠(1961), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电与并网、直流电网技术。通信作者, E-mail: yaoliangzhong@whu.edu.cn。

(责任编辑 张宇)