



## 改进的二极管整流器在海上风电送出系统中的应用

平明丽 刘欣和 朱龙臻 牛 王先为

### Application of Improved Diode Rectifier in Offshore Wind Power Transmission System

PING Mingli, LIU Xinhe, ZHU Longzhen, NIU Chong, WANG Xianwei

#### 引用本文:

平明丽, 刘欣和, 朱龙臻, 等. 改进的二极管整流器在海上风电送出系统中的应用[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 173–181. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0216

PING Mingli, LIU Xinhe, ZHU Longzhen, et al. Application of Improved Diode Rectifier in Offshore Wind Power Transmission System[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(1): 173–181. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0216

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0216>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于统一潮流控制器和拓扑调整的海上风电功率控制策略

A Power Control Strategy of Offshore Wind Power Based on Unified Power Flow Controller and Topology Adjustment  
现代电力. 2023, 40(3): 285–294 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0326>

#### 海上风电集群与火电打捆外送系统低电压穿越特性

Low Voltage Ride Through Characteristics of Bundled Transmission System with Offshore Wind Power Cluster and Thermal Power  
现代电力. 2022, 39(6): 739–748 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0345>

#### 考虑海上风电接入与转动惯量约束的电源规划模型

A Model for Power Planning Considering Large Offshore Wind Power Integration and Rotational Inertia Constraints  
现代电力. 2023, 40(4): 448–456 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0375>

#### 快速矢量选择的三矢量PWM整流器模型预测低频控制

Fast Selection of Three-Vector PWM Rectifier based on Model Predictive Low Frequency Control  
现代电力. 2020, 37(3): 324–330 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0453>

#### 基于运行数据的海上风电场功率特性分析

Analysis on Power Characteristics of Offshore Wind Farm Based on Measured Operational Data  
现代电力. 2020, 37(5): 532–538 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0016>

#### 基于风电机组状态信息的海上风电场维护策略

An Offshore Wind Farm Maintenance Strategy Based on Wind Turbine Condition Information  
现代电力. 2022, 39(1): 26–35 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0004>

# 改进的二极管整流器在海上风电送出系统中的应用

平明丽, 刘欣和, 朱龙臻, 牛翀, 王先为

(西安许继电力电子技术有限公司, 陕西省 西安市 710075)

## Application of Improved Diode Rectifier in Offshore Wind Power Transmission System

PING Mingli, LIU Xinhe, ZHU Longzhen, NIU Chong, WANG Xianwei

(Xi'an Xuji Power Electronics Technology Corporation, Xi'an 710075, Shaanxi Province, China)

**摘要:** 降低海上风电送出系统成本是促进海上风电资源开发的关键。基于二极管整流送出的技术路线具有良好的经济性, 但存在风电场无法黑启动以及系统无法为风电场提供并网交流电压的问题。为了探索基于上述技术路线的更多可行性方法, 提出改进的二极管送出系统技术方案, 在配置辅助交流线路的基础上, 通过在海上端加装无功补偿器或陆上端的柔直逆变器直接参与系统协调配合, 可实现风电场的黑启动和稳态功率流向控制。对所提技术方案进行理论分析、系统方案设计和控制策略设计, 并在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下搭建海上风电送出系统模型, 仿真结果验证了所提 2 种方案能够满足海上风电的可靠送出。

**关键词:** 海上风电; 二极管整流器; 辅助交流线路; 无功补偿器; 功率控制

**Abstract:** Reducing the cost of offshore wind power sending system is key to promote the development of offshore wind power sources. The technical solution based on transmission by diode rectifier possesses good economy. However there are defects in the system such as the wind farm cannot be black-started and the transmission system cannot provide AC voltage for the grid-connection of wind farm. To explore more feasible approaches based on the above mentioned technical solution, a design of improved diode rectifier based transmission system was proposed. On the basis of configuring auxiliary AC line, by adding reactive power compensator at the offshore end or making the inverter on mainland side to directly participate in system coordination, the black-start and the steady state power flow direction control could be realized. The theoretical analysis, system scheme design and control strategy design for the

**基金项目:** 国家电网有限公司总部科技项目 (5200-202118077A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5200-202118077A-0-0-00)。

proposed technical scheme were carried out. In the simulation environment of PSCAD/EMTDC, a model of offshore wind power transmission system was constructed. Both methods were verified by simulation results and were proven to satisfy the reliable transmission of offshore wind power.

**Keywords:** offshore wind power; diode rectifier; auxiliary AC line; reactive power compensator; power control

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0216

## 0 引言

自 2020 年 9 月 22 日习近平主席在第 75 届联合国大会上宣布中国碳达峰、碳中和的目标以来, 大力发展清洁能源成为全社会的共识<sup>[1]</sup>。海上风力发电作为可再生清洁能源开发利用的重要方向之一, 具有风力平稳、风速高、发电效率高、单机装机容量大、占用空间小、不扰民以及靠近负荷中心等诸多优点, 成为能源绿色低碳转型的重要发展方向<sup>[2-3]</sup>。

我国具有丰富的海上风电资源, 目前制约海上风电发展的主要因素是系统成本较高, 尚无法实现平价上网。因此研究降低海上风电送出成本对于海上风电的发展具有重要意义<sup>[4-7]</sup>。

传统的海上风电送出系统主要有高压交流送出和基于模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 的柔性直流送出两类。高压交流输电技术是海上风电送出并网的常规方法, 这种送出方式下输电线路的成本会随着输电距离的增加而大幅增加。相对于高压交流送出, 柔性直流送出方式下换流站的建设费用高, 但线路的铺设费用较低。随着输电距离的增加, 直流送出的经济性优势也会逐渐增大<sup>[8]</sup>, 因此, 柔性直流送出

系统方案被较多地用在大容量远海岸风电开发中,我国首个远海风电工程——江苏如东海上风电柔性直流输电工程就是采用柔性直流送出方案<sup>[9]</sup>。

进一步降低海上直流送出系统成本的技术路线主要有2类:一类是针对海上风电柔性直流送出系统,通过取消升压站、柔直换流阀轻型化、降低海缆成本、降低控保成本等方案,综合降低系统成本<sup>[10-12]</sup>;另一类技术路线是通过研制新型低成本直流送出系统替代较为昂贵的柔直换流站。由于二极管整流器(diode rectifier, DR)具有导通损耗小、成本低、体积小、重量小和可靠性高等特点,近年来成为新型低成本海上风电直流送出技术的研究热点<sup>[13-16]</sup>。

二极管属于不可控器件,基于二极管整流器的海上风电直流送出系统,在实际应用中存在一些问题。首先,二极管整流器只能单向传输功率,不能为风电场黑启动提供功率。其次,二极管整流器无法建立交流电压,不能为传统风电场提供并网电压。并且,二极管整流器在进行功率传输时,无法为风电场提供无功功率,还需从系统中吸收一定的无功功率。为了解决上述问题,文献<sup>[17-18]</sup>提出可将DR与MMC进行串、并联,形成混合送出方案,该系统方案中海上风电平台上需放置DR和MMC,随着电压等级的提高,MMC子模块数量大幅增加,导致海上平台体积和重量增加,建设成本相应提高。对此,文献<sup>[19-20]</sup>提出一种由DR和高变比MMC辅助变换器组成的混合型换流器,可减少MMC中子模块个数,但引入的高压直流电容会增加系统的体积和重量。针对DR无法建立交流电压的问题,文献<sup>[21-23]</sup>研究了构网型风机与DR配合的送出系统,由构网型风机建立交流电压,可稳定送出海上风电。但目前基于构网型风机的大规模风电送出尚无成熟的解决方案。文献<sup>[24]</sup>提出另一种解决方案,即在风电送出系统中引入一条小功率的交流辅助线路,为风电场的启动提供能量支撑,同时为风电机组并网提供稳定的交流电压,目前对这种方案研究的文献并不多,其拓扑结构和控制策略都有待进一步研究。

鉴于基于二极管整流器的海上风电直流送出系统存在的固有缺陷以及系统仍存在优化空间,本文以带辅助交流线路的二极管海上风电直流送出系统为研究对象,针对系统中潮流方向不受控

问题,提出2种解决方案,研究并设计不同方案下的控制策略;最后,在PSCAD/EMTDC仿真环境下搭建海上风电送出系统模型进行仿真,结果验证了所提方案 and 对应运行控制策略的有效性。

## 1 系统方案分析和设计

### 1.1 系统功率流向分析

带辅助交流线路的二极管整流器海上风电直流送出系统的基本结构如图1所示。系统中存在2种可能的有功功率流通过程:功率通路1是风电场功率经由二极管整流器从直流线路送出;功率通路2是风电场功率经辅助交流线路送出。

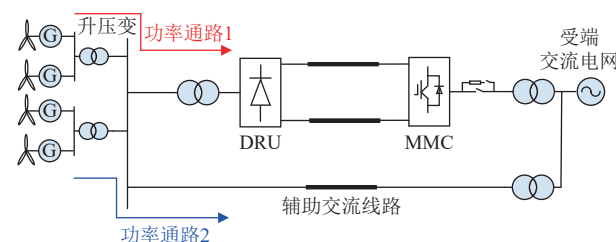


图1 带辅助交流线路的二极管整流器海上风电送出系统  
Fig. 1 DR equipped offshore wind farm transmission system with auxiliary AC line

从降低系统成本的角度考虑,辅助交流线路的设计容量一般不大,风电场输出的有功功率应主要经二极管整流器从直流线路送出,因此系统需具备功率流向控制能力,限制功率经辅助交流线路送出。

### 1.2 二极管整流单元功率分析

由于二极管整流单元(diode rectifier unit, DRU)不具备控制能力,其直流电压表达式与电网换相换流器(line commutated converter, LCC)在触发角为 $0^\circ$ 时的表达式一致,如式(1)所示。

$$U_{dc\_DR} = N \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_1 - N \frac{3}{\pi} X_{r1} I_{dc\_DR} \quad (1)$$

式中: $N$ 表示DRU中6脉动二极管整流器的并联个数; $U_{dc\_DR}$ 表示DRU直流电压; $I_{dc\_DR}$ 表示DRU直流电流; $U_1$ 表示换流变压器阀侧绕组空载线电压有效值; $X_{r1}$ 表示换流变压器等值换相电抗。

DRU直流电流的计算公式为

$$I_{dc\_DR} = \frac{U_{dc\_DR} - U_{dc\_MMC}}{Z_{dc}} \quad (2)$$

式中: $U_{dc\_MMC}$ 表示受端MMC的直流端口电压;

$Z_{dc}$  表示直流电缆的等效阻抗。

结合式 (1) 和式 (2)，可得 DRU 传输的有功功率  $P_{DR}$  计算公式，如式 (3) 所示。

$$P_{DR} = U_{dc\_DR} * I_{dc\_DR} = \frac{\left(N \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_1 Z_{dc} + N \frac{3}{\pi} X_{r1} U_{dc\_MMC}\right) \left(N \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_1 - U_{dc\_MMC}\right)}{\left(Z_{dc} + N \frac{3}{\pi} X_{r1}\right)^2} \quad (3)$$

分析式 (3) 可知，在系统主回路参数确定后，DRU 有功功率  $P_{DR}$  主要受 DRU 交流侧电压有效值  $U_1$  和受 MMC 直流电压  $U_{dc\_MMC}$  影响。三者之间的关系如图 2 所示。

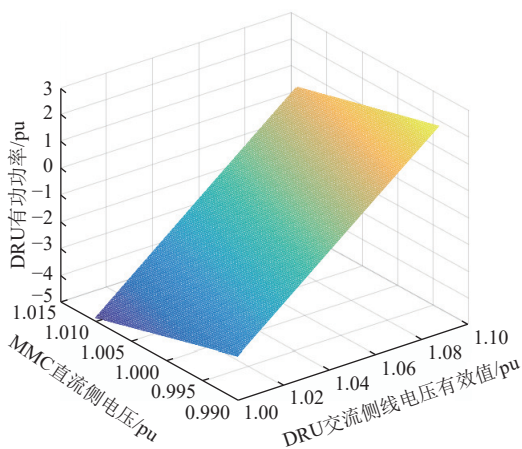


图 2 DRU 有功功率  $P_{DR}$  与  $U_1$  和  $U_{dc\_MMC}$  关系  
Fig. 2 Relationship of active power  $P_{DR}$  with  $U_1$  and  $U_{dc\_MMC}$

从图 2 中可以看出，DRU 有功功率  $P_{DR}$  与  $U_1$  呈现正比例关系， $P_{DR}$  与  $U_{dc\_MMC}$  呈现反比例关系。因此，对于不可控 DRU，可通过调节其交流侧电压幅值或直流电压幅值，可使系统具备功率流向控制能力。基于此原理提出了以下 2 种具体系统方案。

### 1.3 系统方案设计

由上述分析可知，基于二极管整流器的海上风电直流送出系统通过调节 DRU 交流侧电压幅值或直流电压幅值，可使系统具备功率流向控制能力。基于此原理提出了以下 2 种具体系统方案。

第 1 种方案是在海上端风机并网点处并联静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM)，如图 3 所示，通过控制并网点交流电压幅值实现功率流向控制。在风电场输出功率过程中，STATCOM 通过增大无功功率输出以抬高风机并网点电压幅值，使二极管整流器导通，并传输风电场功率。在系统稳定运行时，STATCOM

也可为风电场和二极管整流器提供无功支撑。同时，STATCOM 的容量配置与辅助交流电网的强弱程度和系统无功支撑需求有关。

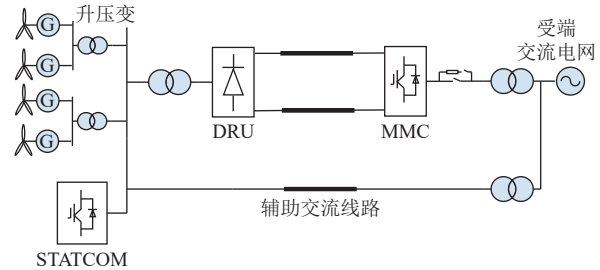


图 3 海上端配置 STATCOM 的送出方案的拓扑结构  
Fig. 3 Topological structure of the transmission scheme configuring STATCOM at offshore end

第 2 种方案是以带辅助交流线路的送出系统基本结构为基础，通过陆上端 MMC 调节直流电压幅值，实现 DRU 功率控制，系统结构与图 1 一致。系统中海上端 DRU 工作在不可控整流状态，陆上端 MMC 控制系统直流电压。在风电场输出功率过程中，受端 MMC 通过控制降低直流电压使二极管整流器导通并传输功率，可使风电场功率都经二极管整流器由直流线路输出。

下面将分别对上述提出的 2 种具体系统方案进行控制策略设计和可行性验证。

## 2 海上端配置 STATCOM 方案

### 2.1 系统运行分析与控制策略设计

控制策略设计基本原理为通过 STATCOM 调节海上交流电压幅值，实现风电场经二极管阀送出功率的可控性。

在系统启动输出功率的过程中，首先解锁逆变侧 MMC，并将直流电压控制到额定值。随后，在风电场输出功率过程中，检测流入辅助系统的有功功率  $P_{aux}$ ，随着  $P_{aux}$  的增大，STATCOM 在控制器的作用下逐渐增大无功功率输出，抬高风机并网点交流电压幅值，使风电场输出功率都经二极管阀由直流线路送出，STATCOM 的控制策略如图 4 所示。

图 4 中： $P_{aux}$  为流入辅助系统的有功功率； $Q^*$  为 STATCOM 无功功率初始指令值； $Q_{ref}$  为经过调节后的无功功率实际参考值； $Q_{fab}$  为无功功率反馈值； $I_q^*$  和  $I_q$  分别为电流内环  $q$  轴分量的指令值和反馈值； $U_{Cref}$  为子模块电压指令值， $U_C$

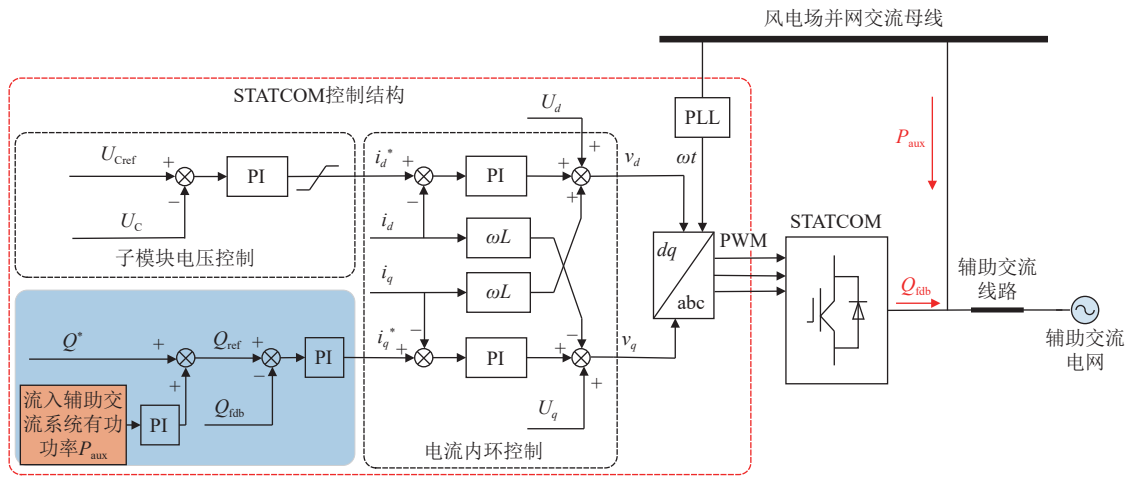


图4 STATCOM控制策略

Fig. 4 Control strategy of STATCOM

为子模块电压反馈值； $i_d^*$ 和 $i_d$ 分别为电流内环 $d$ 轴分量的指令值和反馈值。

STATCOM通过控制向辅助交流电网中注入无功电流来调节并网点电压幅值，而辅助交流电网有强弱之分，短路比(short circuit ratio, SCR)是衡量交流系统强弱的重要指标，SCR越大，交流电网越强，系统越稳定；反之，系统越不稳定。一般认为， $SCR > 3$ 时为强系统； $SCR \in [2, 3]$ 时为弱系统； $SCR < 2$ 时为极弱系统<sup>[25-26]</sup>。

下文具体分析STATCOM调节并网点交流电压的能力与辅助交流电网强度的关系。

由于交流电网中的阻性阻抗远小于感性阻抗，可假设辅助交流电网的阻抗为纯感性。辅助交流电网的等效电路和其电压电流矢量关系如图5所示。图中： $U_{pcc}$ 表示风电场并网点线电压； $L_{eq}$ 表示辅助电网总等效电感； $U_s$ 表示辅助交流电网线电压； $\Delta U_{Line}$ 表示并网点线电压幅值的抬升量； $I_q$ 表示STATCOM为了抬升并网点电压幅值，向辅助交流电网注入的无功电流。

并网点电压抬升量与无功电流的关系为

$$\frac{\Delta U_{Line}}{\sqrt{3}} = \Delta U_{Phase} = I_q \cdot \omega L_{eq} \quad (4)$$

式中： $\Delta U_{Phase}$ 表示并网点相电压幅值抬升量。

为了抬升电压，STATCOM需输出的无功功率可以表示为

$$\Delta Q = \sqrt{3} U_{pcc} I_q = U_{pcc} \frac{\Delta U_{Line}}{\omega L_{eq}} = (U_s + \Delta U_{Line}) \frac{\Delta U_{Line}}{\omega L_{eq}} \quad (5)$$

系统中辅助交流系统的短路比 $S_{CR}$ 等于系统

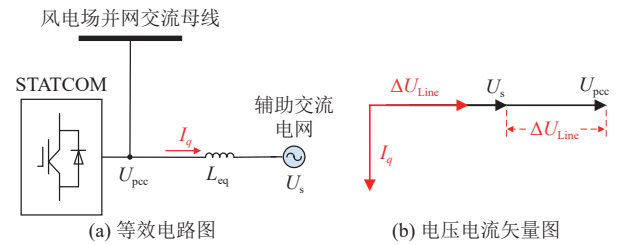


图5 辅助交流电网等效电路图和电压电流矢量图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of auxiliary AC grid and its voltage and current vectorgraph

短路容量 $S_{short}$ 与额定容量 $S$ 之比，关系如式(6)所示。

$$S_{CR} = \frac{S_{short}}{S} = \frac{U_s^2 / \omega L_{eq}}{S} \quad (6)$$

由式(6)可得辅助交流电网总阻抗与短路比的关系，如式(7)所示。

$$\omega L_{eq} = \frac{U_s^2}{S_{CR} \cdot S} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)中，可得STATCOM为了抬升并网点交流电压幅值，其输出无功功率与辅助交流系统短路比 $S_{CR}$ 之间的关系，如式(8)所示。

$$\Delta Q = (U_s + \Delta U_{Line}) \frac{\Delta U_{Line}}{U_s^2} \cdot S \cdot S_{CR} \quad (8)$$

## 2.2 仿真分析

为了验证所提通过STATCOM调节并网点交流电压以控制系统功率流向策略的有效性，基于PSCAD/EMTDC仿真环境搭建了如图3所示的系统仿真模型，系统主要参数如表1所示。

仿真系统中功率正方向定义如图6所示。图

中： $P_{WF}$ 、 $Q_{WF}$  表示风电场输出的有功功率、无功功率； $P_{Diode}$ 、 $Q_{Diode}$  表示流入二极管阀的有功功率、无功功率。STATCOM 和辅助交流线路组成辅助交流系统，其中  $P_{aux}$ 、 $Q_{aux}$  表示流入辅助交流系统的有功功率、无功功率； $P_{STA}$ 、 $Q_{STA}$  表示流入 STATCOM 的有功功率、无功功率； $P_{Grid}$ 、 $Q_{Grid}$  表示流入辅助交流电网的有功功率、无功功率。

由于 STATCOM 的交流电压调节能力与辅助交流电网的强弱程度有关，因此本节对辅助交流电网分别为强电网 ( $S_{CR}=3.93$ )、极弱电网 ( $S_{CR}=1.65$ ) 时的启动升功率过程进行仿真。

### 2.2.1 强辅助交流电网 SCR=3.93

本节对系统启动升功率的过程进行仿真。在 0~2 s 期间，陆上端 MMC 将系统直流电压控制为额定值，且风电场解锁完成；在 2~3 s 期间，风电场有功功率从 0 MW 斜坡升至 800 MW，仿真结果如图 7 所示。

从图 7(c) 和图 7(e) 可以看出，在 2s 时刻，风电场开始输出功率，初期风电场有功功率经辅助交流系统送出。随着流入辅助交流系统的有功功率

表 1 海上风电送出系统主要参数  
Table 1 Main parameters of offshore wind power transmission system

系统组成	参数	数值
受端陆上站 MMC	额定有功功率/MW	800
	额定无功功率/Mvar	240
	额定直流电压/kV	500
	额定网侧交流电压/kV	525
二极管整流器	额定有功功率/MW	800
	额定网侧交流电压/kV	260
风电场	额定有功功率/MW	800
	并网电压/kV	230

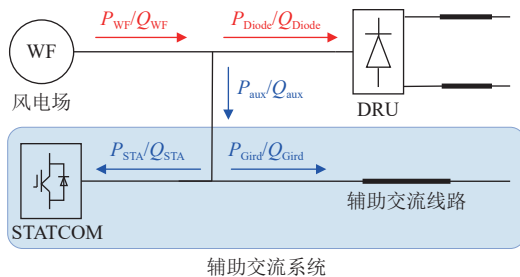


图 6 仿真系统中功率正方向定义说明图

Fig. 6 Explanatory drawing of the definition of power positive direction in simulation system

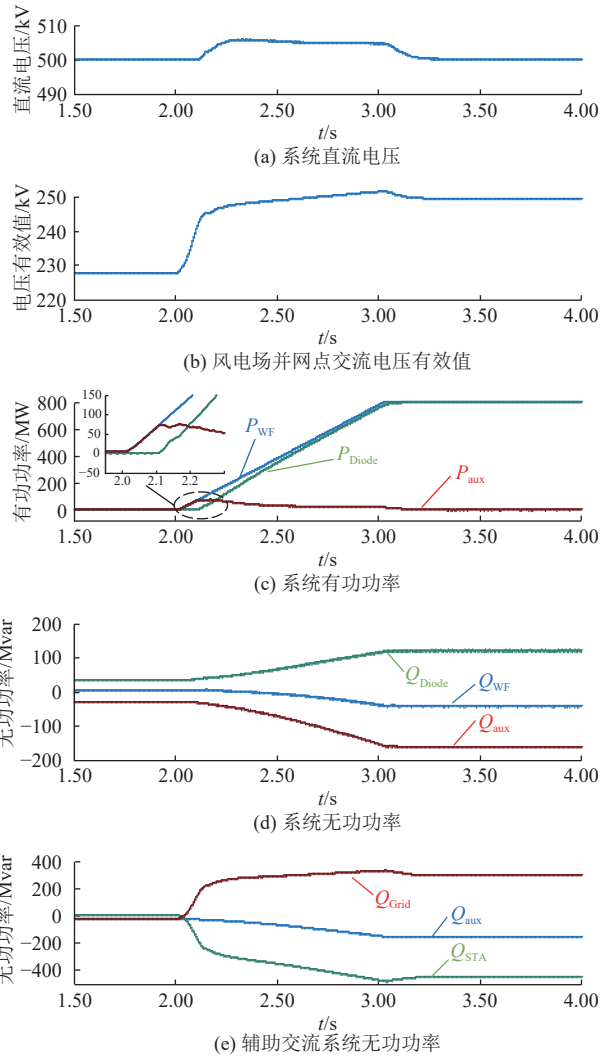


图 7 海上端配置 STATCOM 且辅助交流电网为强电网时的仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of STATCOM configured at offshore end and the auxiliary AC grid is a strong one

率逐渐增加，STATCOM 增大输出的无功功率，以抬升并网点交流电压幅值。如图 7(b) 和图 7(c) 所示，在 STATCOM 作用下，并网点电压升高后，流入二极管阀的有功功率从 0 开始增加，流入辅助交流系统的有功功率逐渐转移至二极管阀。进入稳态之后，并网点电压有效值升至 249.5 kV，风电场的有功功率 800 MW 全部流经二极管阀由直流线路送出，流入辅助交流系统的有功功率降至 0。

对于辅助交流系统而言，如图 7(e) 所示，启动升功率过程中 STATCOM 输出的 290.0 Mvar 无功功率 ( $Q_{Grid}$ ) 流入辅助交流电网，用于抬升并网点电压，将并网点电压有效值抬升至 249.5 kV，

仿真结果与根据式(8)计算出的结果 289.2 Mvar 接近。

### 2.2.2 极弱辅助交流电网 $S_{CR}=1.65$

系统启动升功率的时序与接强辅助交流电网时一致, 仿真结果如图 8 所示。

从图 8(c) 和图 8(e) 可以看出, 在风电场输出功率初期, 风电场有功功率都由辅助交流系统送出。STATCOM 根据流入辅助交流系统中的功率信号, 增大输出的无功功率以抬升并网点交流电压。如图 8(b) 和图 8(c) 所示, 当 STATCOM 控制抬升并网点电压后, 流入二极管阀的有功功率从零开始增加, 流入辅助交流系统的有功功率逐渐转移至二极管阀。进入稳态后, 并网点电压有效

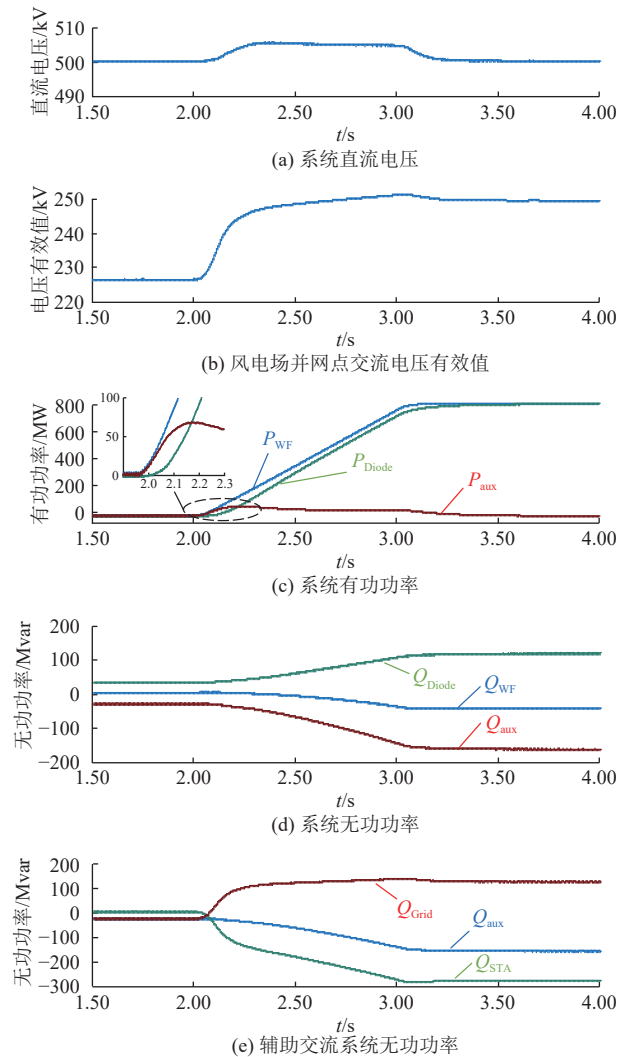


图 8 海上端配置 STATCOM 且辅助交流电网极弱时的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of STATCOM configured at offshore end and the auxiliary AC grid is extremely weak

值升至 249.5kV, 风电场的有功功率全部流经二极管阀由直流线路送出, 流入辅助交流系统的有功功率降至 0。

对于辅助交流系统而言, 如图 8(e) 所示, 在系统启动升功率过程中, STATCOM 输出的 122.0 Mvar 无功功率 ( $Q_{Grid}$ ) 流入辅助交流电网, 用于抬升并网点电压, 将并网点电压有效值抬升至 249.5 kV, 仿真结果与根据式(8)计算出的结果 121.4 Mvar 接近。

根据以上对仿真结果的分析可知, 文中所提海上端配置 STATCOM 的系统方案及控制策略能实现风电场平稳启动, 并控制风电场输出功率全部经二极管整流器由直流线路送出。并且可得出结论: 相同容量配置下, STATCOM 在接弱辅助电网时对并网点交流电压的调节能力比接强辅助电网时的调节能力强, 仿真结果与理论计算结果相符。

## 3 陆上端 MMC 调节直流电压方案

### 3.1 控制策略

控制策略设计基本原理为通过陆上端 MMC 调节直流侧电压幅值实现风电场功率的可控性。

对于陆上端 MMC 调节直流电压方案, 在系统启动输出功率过程中, 先解锁陆上端 MMC 换流站, 并运行在定系统直流电压控制模式, 风电场解锁前保持系统直流电压高于风电场稳定输出功率时的直流电压, 保证风电场输出功率时功率流向可控。当风电机组解锁完成并逐渐增加输出功率时, 通过降低 MMC 直流电压来控制风电场功率经二极管阀由直流线路送出。整个启动升功率过程, MMC 直流电压参考值随风电场输出功率的变化而动态调节, 其控制策略如图 9 所示。

图 9 中  $U_{dc}^*$  为 MMC 直流电压初始指令值, 该初始值要大于稳态运行时的值, 以保证在风机输出功率前二极管阀处于反向截止状态;  $U_{dc\_ref}$  为经过调节后直流电压实际参考值;  $U_{dc\_fdb}$  为直流电压反馈值;  $Q_{mmc}^*$  和  $Q_{mmc}$  分别为 MMC 无功功率指令值和反馈值;  $I_{d\_ref}$  和  $I_{q\_ref}$  分别为电流内环  $d$  和  $q$  轴分量的指令值。

### 3.2 仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC 仿真环境搭建了如图 1 所示的系统仿真模型, 系统主要参数如前文中的

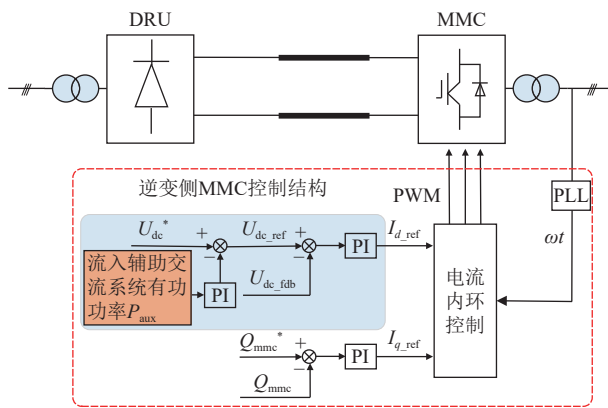


图 9 陆上端 MMC 控制策略

Fig. 9 Control strategy of MMC at land end

表 1 所示。

对系统启动升功率的过程进行仿真。在 2s 前陆上站 MMC 完成解锁并将直流电压控制为额定值，风电场由辅助交流电网提供启动功率也完成解锁；在 2~3s 期间，风电场有功功率从 0MW 斜坡升至 800MW。仿真结果如图 10 所示。

在风电场输出功率前，如图 10(c) 所示，流入二极管整流器和辅助交流系统的有功功率均为 0。当风电场开始输出有功功率时，初期风电场功率经由辅助交流系统送出，随着流入辅助系统有功功率的增加，受端站 MMC 控制直流电压逐渐降低。由图 10(a) 和图 10(c) 可见，随着系统直流电压的降低，流入二极管阀的有功功率从 0 开始增加，流入辅助交流系统的有功功率逐渐转移至二极管整流器。进入稳态后，直流电压降至 429.2kV，风电场的有功功率全部流经二极管整流器由直流线路送出，流入辅助交流系统的有功功率降至 0。

如图 10(b) 和图 10(d) 所示，在系统输出功率过程中，风电场和二极管阀所需的无功功率都由辅助交流电网提供，会导致并网点交流电压幅值降低。为了维持并网点电压的稳定，在后续研究中可在并网点配置无功支撑装置。

根据对以上仿真结果的分析可知，本章所提出的陆上端 MMC 调节直流电压方案及其控制策略能使风电场平稳启动，实现风电场全部有功功率稳定地经二极管阀由直流线路送出。

## 4 结论

1) 在海上端配置 STATCOM 方案(方案 1)中，

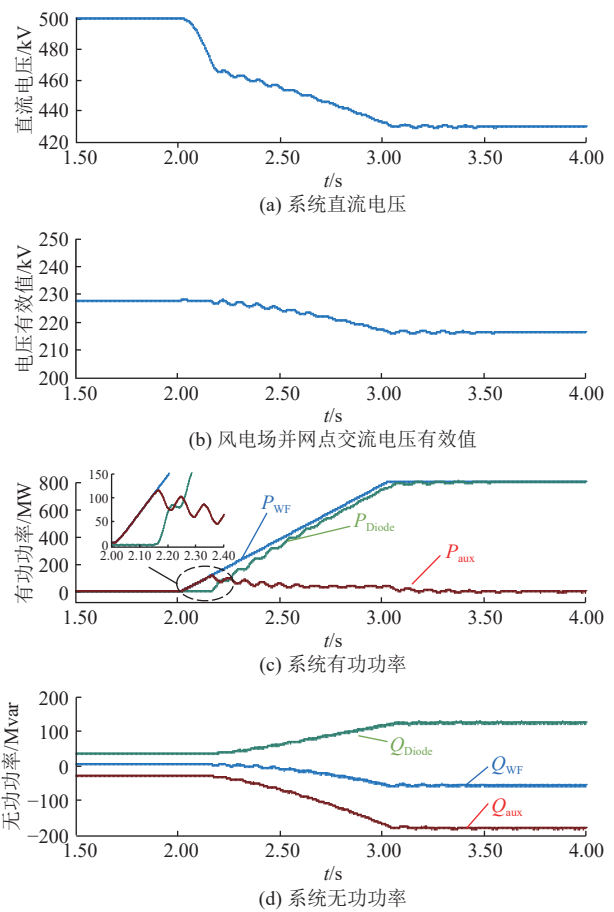


图 10 陆上端 MMC 控制潮流的仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of the control power flow of MMC at land end

通过 STATCOM 往辅助交流电网中注入无功电流达到调节并网点交流电压幅值的目的，实现了风电场经 DRU 送出功率的可控性。其中，STATCOM 对并网点交流电压的调节能力与辅助交流电网的强弱有关，对接弱辅助电网时的电压调节能力比对接强辅助电网时的调节能力强。

2) 陆上端 MMC 调节直流电压方案(方案 2)中，在风电场输出功率前将 MMC 直流电压控制为高于 DRU 不控整流的电压值，在风电场开始输出功率后，逐渐降低 MMC 直流电压，实现了风电场经 DRU 送出功率的可控性。

3) 方案 1 中 STATCOM 既能控制系统功率流向，也能为风电场和二极管阀提供无功功率支撑。方案 2 中，由陆上端 MMC 通过控制直流电压降低以保证风电场功率经由 DR 送出，而 MMC 直流电压的降低会降低系统的功率输送能力。此外，为了保持风电场并网点电压的稳定，仍需在



海上并网配置无功补偿装置。因此,方案2的实用性相对较低。

## 参考文献

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.  
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15(in Chinese).
- [2] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.  
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, *et al.* An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771(in Chinese).
- [3] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149-159.  
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, *et al.* Offshore wind power supports China's energy transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149-159(in Chinese).
- [4] 唐巍, 郭雨桐, 闫姝, 等. 多场景海上风电场关键设备技术经济性分析[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 178-184,216.  
TANG Wei, GUO Yutong, YAN Shu, *et al.* Techno-economic analysis of key equipment for offshore wind farms with multiple scenarios[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 178-184,216(in Chinese).
- [5] 蔡旭, 杨仁焯, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.  
CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, *et al.* Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22(in Chinese).
- [6] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 8-17.  
SHI Zhiyong, WANG Caixia, LI Qionghui. Key issues of China's offshore wind power development in the “14th Five-Year Plan” [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 8-17(in Chinese).
- [7] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 1-9.  
HUANG Bibin, ZHANG Yunzhou, WANG Caixia. New energy development and issues in China during the 14th Five-Year Plan[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 1-9(in Chinese).
- [8] 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): 5459-5466.  
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, *et al.* Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466(in Chinese).
- [9] 三峡集团最新5个海上风电项目招标公告[EB/OL]. (2019-07-15)[2022-06-10]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190715/992654.shtml>.  
The latest bidding announcement of five offshore wind power projects of China Three Gorges Corporation [EB/OL]. (2019-07-15)[2022-06-10]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190715/992654.shtml>.
- [10] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.  
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, *et al.* Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71(in Chinese).
- [11] 张占奎, 石文辉, 屈姬贤, 等. 大规模海上风电并网送出策略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 182-190.  
ZHANG Zhankui, SHI Wenhui, QU Jixian, *et al.* Grid connection and transmission scheme of large-scale offshore wind power[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 182-190(in Chinese).
- [12] 许建中, 李钰, 陆锋, 等. 降低MMC子模块电容电压纹波幅值的方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 571-584,654.  
XU Jianzhong, LI Yu, LU Feng, *et al.* A review of suppression methods for sub-module capacitor voltage ripple amplitudes in Modular Multilevel Converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 571-584,654(in Chinese).
- [13] BLASCO-GIMENEZ Ramon, ANO-VILLALBA Salvador, RODRIGUEZ-DDERLEE Johel, *et al.* Diode-based HVDC link for the connection of large offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2): 615-626.
- [14] FLATEN Ida, BERGNA-DIAZ Gilbert, SANCHEZ Santiago, *et al.* Control of HVDC systems based on diode rectifier for offshore wind farm applications[J]. Energy Procedia, 2017, 137: 406-413.
- [15] 夏嘉航, 王晨欣, 展瑞琦, 等. 基于电流源换流器的混合型海上风电直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 129-138.  
XIA Jiahang, WANG Chenxin, ZHAN Ruiqi, *et al.* Hybrid DC transmission system for offshore wind power based on current source converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 129-138(in Chinese).
- [16] 王佳旭. 基于二极管整流器的海上风电并网研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

- [17] 程帆, 姚良忠, 谢立军, 等. 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[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(02): 117-124.  
CHENG Fan, YAO Liangzhong, XIE Lijun, *et al.* Start-up and coordinated control strategies for offshore wind power transmitted by DR-MMC parallel hybrid HVDC system[J]. Journal Global Energy Interconnection, 2020, 3(02): 117-124(in Chinese).
- [18] 孟沛彧, 向往, 邸世民, 等. 大规模海上风电多电压等级混合级联直流送出系统[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 120-128.  
MENG Peiyu, XIANG Wang, DI Shimin, *et al.* Hybrid cascaded HVDC transmission system with multiple voltage levels for large-scale offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 120-128(in Chinese).
- [19] 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, 5939.  
CHANG Yiran, CAI Xu. Cost-effective hybrid HVDC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5821-5828, 5939(in Chinese).
- [20] 方梓熙, 蔡旭, 史先强, 等. 混合型海上风电直流换流器的拓扑优化与控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8546-8560.  
FANG Zixi, CAI Xu, SHI Xianqiang, *et al.* Topology optimization and control of the hybrid DC converter for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8546-8560(in Chinese).
- [21] 唐英杰, 张哲任, 徐政. 基于二极管不控整流单元的远海风电低频交流送出方案[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 44-54, 168.  
TANG Yingjie, ZHANG Zheren, XU Zheng. Diode rectifier unit based LFAC transmission for offshore wind farm integration[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 44-54, 168(in Chinese).
- [22] 张哲任, 金砚秋, 徐政. 两种基于构网型风机和二极管整流单元的海上风电送出方案[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2098-2107.  
ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, XU Zheng. Two offshore wind farm integration schemes based on grid forming wind turbines and diode rectifier unit[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2098-2107(in Chinese).
- [23] 肖晃庆, 黄小威, 李岩, 等. 适用于二极管不控整流送出的海上风电机组无功功率同步控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3820-3828.  
XIAO Huangqing, HUANG Xiaowei, LI Yan, *et al.* Reactive power-synchronization control for offshore wind turbines connected to diode rectifier[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3820-3828(in Chinese).
- [24] PRIGNITZ Cord, ECKEL Hans-Gunter, ACHENBACH Sven, *et al.* FixReF: A control strategy for offshore wind farms with different wind turbine types and diode rectifier HVDC transmission[C]// 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2016.
- [25] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.  
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8(in Chinese).
- [26] 郭小江, 郭剑波, 王成山. 考虑直流输电系统外特性影响的多直流馈入短路比实用计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2143-2151.  
GUO Xiaojiang, GUO Jianbo, WANG Chengshan. Practical calculation method for multi-infeed short circuit ratio influenced by characteristics of external characteristics of DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2143-2151(in Chinese).

收稿日期: 2022-06-17

作者简介:

平明丽(1992), 女, 硕士, 工程师, 通信作者, 研究方向为柔性直流输电及海上风电送出, E-mail: ml1232011@163.com;

刘欣和(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电及海上风电送出, E-mail: xinhelu\_1092@163.com;

朱龙臻(1994), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电系统建模与仿真, E-mail: 18501631761@163.com;

牛翀(1991), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电系统建模与仿真, E-mail: niuchong45@163.com;

王先为(1985), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电和海上风电送出, E-mail: wangxianwei2013@163.com。