

# 海上风电柔性直流系统设计及工程应用

文卫兵, 赵峥\*, 李明, 田园园, 薛英林, 卢亚军, 徐莹  
(国网经济技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

## Design and Engineering Application of Offshore Wind Power VSC-HVDC System

WEN Weibing, ZHAO Zheng\*, LI Ming, TIAN Yuanyuan, XUE Yinglin, LU Yajun, XU Ying  
(State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

**Abstract:** In this paper, for China's first offshore wind power VSC-HVDC transmission project – Jiangsu Rudong project, in-depth research has been carried out in terms of system topology construction, overvoltage and insulation coordination, system power surplus problem and AC fault ride-through technology, and control and protection technology. A lightweight and compact offshore wind power VSC-HVDC system topology scheme is constructed, and the start-up loop and grounding loop of the offshore converter station are canceled. The typical paradigm of the insulation coordination scheme of the station is proposed. The typical topology of the centralized, distributed, and hybrid DC side active power dynamic balance device are proposed, and the AC side fault ride-through problem of the onshore converter station is solved. The overall control scheme of the project is proposed. A protection scheme is developed, and an active resonance suppression method based on the proportional resonance control of the voltage feedforward link is studied, which significantly reduces the oscillation risk of the project. Through the engineering operation, the effectiveness of the technology proposed in this paper has been fully verified.

**Keywords:** offshore wind power; VSC-HVDC; main circuit design; control and protection

**摘要:** 针对中国第一个海上风电柔性直流送出工程——江苏如东工程, 从系统拓扑方案构建、过电压与绝缘配合、系统功率盈余问题与交流故障穿越技术以及控制保护技术等方面开展了深入研究, 构建了轻型紧凑化的海上风电柔性直流系统拓扑方案, 取消了海上换流站的启动回路与接地回路等; 提出了海陆换流站的避雷器配置方案与参考电压的选取原则, 形成了海陆换流站的绝缘配合方案的典型范式; 提出了集中式、分布式、混合式直流侧有功功率动态平衡装置的

典型拓扑方式, 解决了陆上换流站交流侧故障穿越难题; 提出了工程的整体控制保护方案, 并研究了一种基于电压前馈环节比例谐振控制的有源谐振抑制方法, 显著降低了工程的振荡风险。通过工程实际运行, 全面验证了所提技术的有效性。

**关键词:** 海上风电; 柔性直流; 主回路设计; 控制保护

## 0 引言

中国海上风资源储量约750 GW, 截至2021年底, 海上风电累计装机容量约26 GW, 占全世界海上风电装机容量的一半左右。目前, 中国已核准的海上风电项目以离岸距离小于50 km、装机容量200 MW~400 MW的近海项目为主, 但受生态环境保护、交通航道占用等因素影响, 近海风电资源日趋紧张。相比之下, 远海具有更广阔的海域资源与更庞大的风能储量, 开发潜力巨大。与近海相比, 远海环境更加恶劣, 对风机基础、海底电缆、海上平台集成等技术提出了更严苛的要求。即便如此, 海上风电场的开发逐步走向远海是必然趋势已成为业界共识<sup>[1-3]</sup>。随着远海风电并网技术的不断进步以及对风能资源高效利用的需求日益增长, 远海风电将成为未来海上风电发展的主战场。

在远海风电发展方面, 欧洲走在了世界前列<sup>[4]</sup>。纵观全球, 以英国、德国为代表的欧洲国家正在加快布局推动远海风电发展。2018年, 欧洲在建海上风电场平均离岸距离33 km, 最远离岸距离103 km; 2019年, 欧洲在建海上风电场平均离岸距离59 km, 目前已开标项目的最远离岸距离达220 km。世界上首个着床式深远海风电场和首个漂浮式深远海风电场也分别在苏格兰和挪威建成运行。近年来, 中国远海风电发展也

基金项目: 国家电网公司科技项目 (5100-202258276A-2-0-XG)。

Science and Technology Foundation of SGCC (5100-202258276A-2-0-XG).

已逐渐起步, 统一优化配置远海海域资源连片开发、探索推动GW级远海风电集中送出已成为引导中国海上风电高质量发展的新路径, 预计未来中国海上风电平均离岸距离将超过100 km, 到2050年中国远海风电装机规模有望达到40 GW。

然而, 如何实现远海风电清洁能源大容量、远距离跨海输送和安全可靠并网, 是电力行业亟待解决的关键技术难题。高压交流输电技术成熟、结构简单, 但受海缆电容效应限制, 长距离交流电缆充电功率过大会引起电压升高等问题, 不能满足大容量、远距离海上风电输送的需求; 柔性直流输电具有直流电缆无充电功率限制、可有效降低风电间歇性对电网稳定性的影响、可为海上风电场提供稳定的并网电压、系统运行方式调控灵活等优点<sup>[5-10]</sup>, 针对深远海、大容量风电送出具有显著优势<sup>[11-15]</sup>, 是解决远海风电并网消纳的有效手段和理想方案<sup>[16-19]</sup>, 未来大规模远海风电经柔性直流馈入交流电网将变得非常普遍<sup>[20-21]</sup>。

国内针对海上风电柔性直流开展过一些探索性的研究。文献[22]详细介绍了海岛多端柔性直流的系统设计方法, 提出了系统主接线方案和详细的设备参数, 但该设计未考虑海上平台轻型化、紧凑化设计需求, 在主接线设计与绝缘配合设计方面未做进一步针对海上平台条件的深化研究。文献[23]针对海上风电长距离直流输电系统, 研究并设计了海上风电场柔性直流输电变流器, 但未针对柔直并入大规模风电场后可能发生的振荡风险采取相应的优化控制措施。文献[24]针对海上风电柔直并网系统参与调频控制进行了综述, 从海上风电场、柔性直流系统及二者协调控制等3个层面对现有频率支撑控制策略进行阐述, 分析了不同层面控制策略的原理、优缺点和发展趋势等, 指出海上风电柔直并网系统参与主动频率支撑应协调海上风电场和柔性直流系统, 但实际情况中柔直海上

换流站一般采用定交流电压和定交流频率控制方式, 柔直系统参与风电场交流系统或受端接入电网调频等能力十分有限。

本文依托中国第一个海上风电柔性直流送出工程——江苏如东±400 kV柔性直流工程, 开展海上风电柔性直流工程系统拓扑方案、过电压与绝缘配合、系统功率盈余问题与交流故障穿越技术以及控制保护技术等研究, 并经实际工程检验, 验证了所提技术方案的有效性。

## 1 江苏如东海上风电柔性直流系统拓扑方案

江苏如东±400 kV柔性直流工程新建2座换流站, 通过约99 km海缆和9 km陆缆实现远海风电电能送出, 传输容量达1100 MW, 已于2021年12月投运。江苏如东H6、H8、H10海上风电场装机容量分别为400 MW、300 MW、400 MW, 各风电场分别通过两回220 kV交流海缆汇集于海上换流站; 陆上换流站通过一回交流线路馈入500 kV交流电网。

主回路设计方面, 海上平台空间、承重严重受限, 其紧凑化轻型化设计要求与高电压大容量系统特性矛盾尖锐。海上换流站环境条件恶劣、运行维护困难, 对系统的可靠性提出了极高的要求。

### 1.1 主接线方案

江苏如东柔性直流工程采用对称单极柔性直流接线方案, 陆上换流站采用单相双绕组型式联接变压器, 配置桥臂电抗器和限流电抗器, 在联接变压器阀侧配置启动回路和接地回路, 为解决受端交流侧故障导致的功率盈余问题<sup>[25-26]</sup>, 在直流出口配置有功功率动态平衡装置。工程概况如图1所示, 为最大限度降低海上平台的重量, 海上换流站采用了轻型化主接线

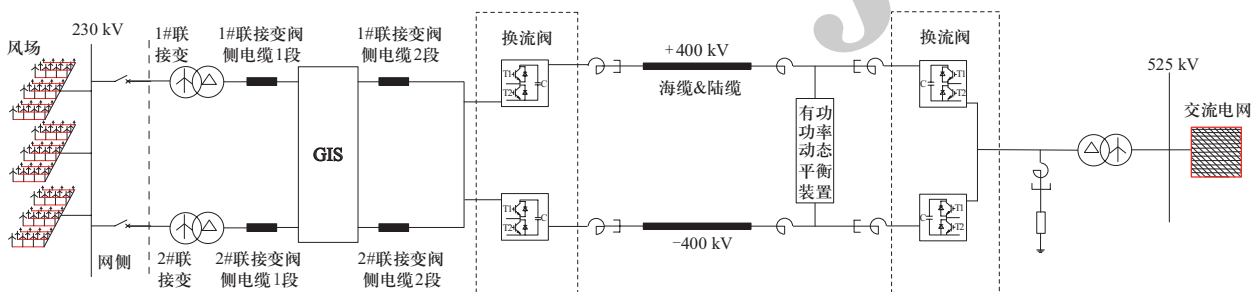


图1 江苏如东海上风电柔直工程概况

Fig. 1 Overview of Jiangsu Rudong offshore wind power VSC-HVDC project

设计方案, 采用2台三相双绕组型式联接变压器并联, 配置一定的冗余容量, 不配置备用联接变压器; 仅配置桥臂电抗器, 因为工程设备均为户内设备, 且采用直流海缆传输方式, 取消了用于防雷的限流电抗器, 相应的限流作用通过快速保护来实现; 不配置启动回路、接地回路和有功功率动态平衡装置。

## 1.2 接地方案配置

通常的柔性直流接地方案包括通过双极中心母线接地(对称双极结构)、联接变压器阀侧中性点通过高阻接地、直流极线通过电容接地、直流极线通过电阻接地以及联接变压器阀侧通过大电抗接地等<sup>[27]</sup>。本工程仅在陆上换流站配置接地回路, 采用联接变压器阀侧通过大电抗接地, 并在电抗器星型中性点串联大电阻。

## 1.3 主回路设计

为保证工程的高可靠性, 提出了高设计裕度、低运行损耗、冗余供电/通信的换流阀设计方案。尤其对于海上换流站, IGBT子模块稳态运行电压低、子模块冗余数量多、电容参数配置高。根据目前IGBT器件的研发水平, 选取4.5 kV/2 kA IGBT。同时, 考虑子模块电容和IGBT耐受电压, 推荐子模块平均工作电压和子模块个数如表1所示。

表1 子模块平均工作电压和子模块个数

Table 1 Average working voltage of sub-module and the number of sub-module

参数	陆上换流站	海上换流站
子模块平均工作电压/kV	2.0	2.0
单个桥臂子模块个数	400	400
冗余度	8%	8%

在柔性直流输电系统中, 电容器是实现交直流能量交换的最关键元件。电容器容值大时, 一个周期内交流系统注入换流器的功率和直流流出的功率远小于电容器的储能, 系统电压波动就很小。但是, 电容器容值越大其造价与体积越大, 且换流器的响应特性会变慢。此外, 电容器容值越大, 对设备的绝缘水平和暂态电流要求就越高。推荐的子模块电容器的容值和电压波动率如表2所示。

海上换流站采用2台三相双绕组联接变压器并联运行, 一台故障情况下, 另一台能够长期传输工程大

表2 子模块电容器参数及其电容电压波动率

Table 2 Sub-module capacitor parameters and the capacitor voltage fluctuation rate

参数	陆上换流站	海上换流站
子模块电容器/mF	9	9
电容电压波动率	0.07	0.07
等容量放电时间常数/ms	39.3	39.3

部分容量; 采用三相双绕组、油浸式、无调压型式, 单台额定容量850 MVA, 短路阻抗为17%。陆上换流站采用3台单相双绕组联接变压器设计方案, 设置一台备用; 采用单相双绕组、油浸式、有载调压型式, 单台额定容量410 MVA, 短路阻抗为14%。在正常运行时, 对称单极接线型式采用的联接变压器阀侧没有直流偏置电压, 可采用与普通交流变压器类似的结构, 设备制造相对容易。

桥臂电抗器是模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑中必不可少的主回路元件, 主要用于抑制三相之间的环流、减小换流器内部或外部故障时的电流上升率和短路电流峰值。本工程陆上换流站和海上换流站采用单相干式空心桥臂电抗器, 电感值按133 mH设计。受运输条件限制, 桥臂电抗器采用两台串联叠装方案。

综合短路电流抑制和设备造价等因素, 本工程陆上换流站按正负极各配置50 mH直流限流电抗器设计。

为了最大限度地降低接地电抗器在正常运行情况下的无功消耗, 接地电抗器宜选择较大电感值设计方案。

启动电阻的选取主要有三条原则: ①限制启动时的充电电流, 为了保证换流器等一次设备的安全, 阀侧充电电流一般不超过额定电流的50%; ②控制充电时间, 降低启动过程中换流阀子模块电容电压发散风险; ③限制故障时短路电流。本工程启动电阻能量主要考虑“陆上换流站MMC+DC chopper+海缆+海上换流站MMC”的联合充电工况, 通过仿真计算, 选取启动电阻的阻值为6000  $\Omega$ , 启动电阻的能量为63 MJ。

## 1.4 柔性直流的功率运行区间

功率运行区间表示柔性直流换流器可以发出的有功和无功范围, 海上换流站2台联接变压器运行时的功率运行区间如图2所示。海上换流站单台联接变压器运行时的功率运行区间如图3所示。陆上换流站功率运行区间如图4所示。

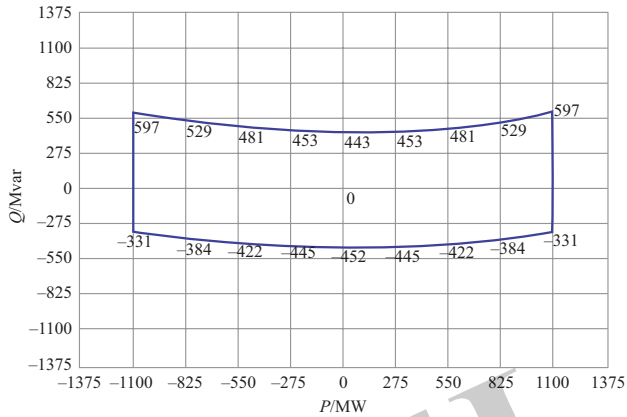


图2 海上换流站2台联接变压器运行时功率运行区间

Fig. 2 Power operation range of two connected transformers of offshore converter station

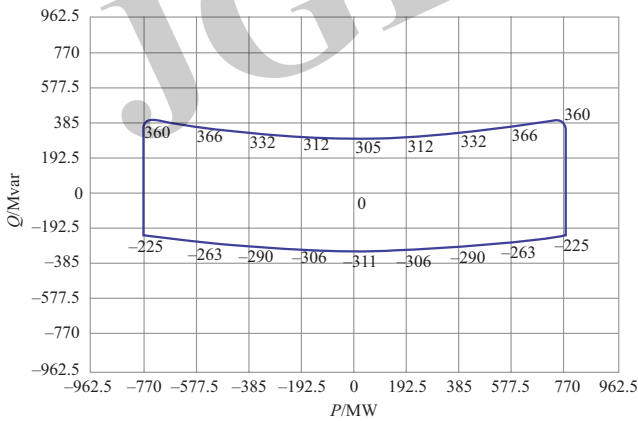


图3 海上换流站单台联接变压器运行时功率运行区间

Fig. 3 Power operation range of single-connection transformer of offshore converter station

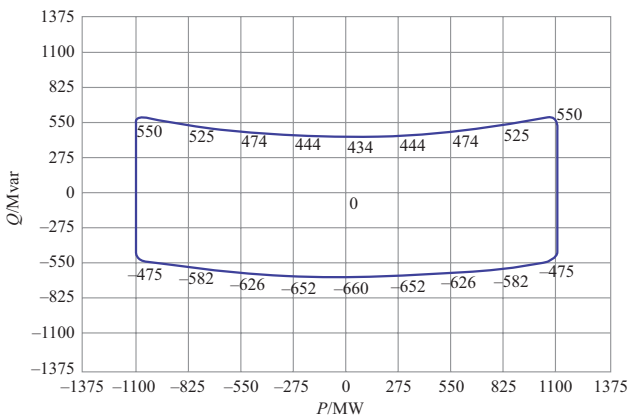


图4 陆上换流站功率运行区间

Fig. 4 Power operation range of onshore converter station

## 2 过电压与绝缘配合

对称单极柔性直流系统在单极接地等故障下的暂态过电压非常高<sup>[28]</sup>, 将对设备安全造成严重威胁, 海

上平台的尺寸和重量将大幅增加, 世界首个 $\pm 400$  kV海缆的研发也面临巨大挑战。如何在保证系统安全的前提下最大程度降低系统的绝缘水平是绝缘配合面临的重大难题。

### 2.1 避雷器方案配置与参数选择

本工程直流系统避雷器的配置方案如图5所示, 配置包括: 直流线路避雷器DL、限流电抗器阀侧避雷器DB、桥臂电抗阀侧避雷器LV、联接变阀侧避雷器AV、接地电抗器中性点避雷器Vn和网侧交流母线避雷器A, 分别就近保护其相连设备。根据对称单极系统的稳态和暂态运行特点, 并综合考虑工程运行可靠性和投资经济性, 选取了合理的避雷器参考电压, 进一步通过过电压仿真计算确定了系统整体的绝缘水平, 避雷器主要参数如表3所示。

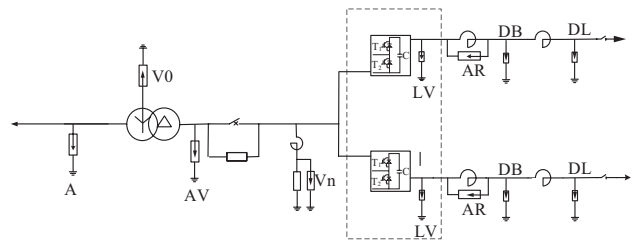


图5 江苏如东工程避雷器配置方案

Fig. 5 Arrester configuration scheme of Jiangsu Rudong project

表3 海上和陆上换流站的避雷器主要参数

Table 3 Main parameters of arresters for offshore and onshore converter stations

避雷器	持续运行电压峰值 (CCOV) /kV	操作冲击保护水平 (SIPL) / (kV/kA)	雷电冲击保护水平 (LIPL) / (kV/kA)
A (500 kV)	318 (rms)	852/2	960/10
A (220 kV)	159 (rms)	452/2	532/10
AV	284 (rms)	1021/1	1048/2
LV	518	1065/3	1048/2
DB (陆上)	404	1021/1	1048/2
DL	404	1021/4	1048/2
Vn	8	215/2	218/2

### 2.2 操作过电压仿真验证

根据工程实际设备参数和控制保护策略, 搭建了PSCAD仿真模型, 仿真遍历得到了AV、LV、DB/DL等避雷器的决定性操作过电压工况, 分别如图6—图8所示。从图中可以看出, AV避雷器的最大电流为0.16 kA、

残压为1000 kV, LV避雷器的最大电流为1.3 kA、残压为1030 kV, DL避雷器的最大电流为1.8 kA、残压为1010 kV, 均小于表3所给的设计值, 验证了设计方案的合理性。

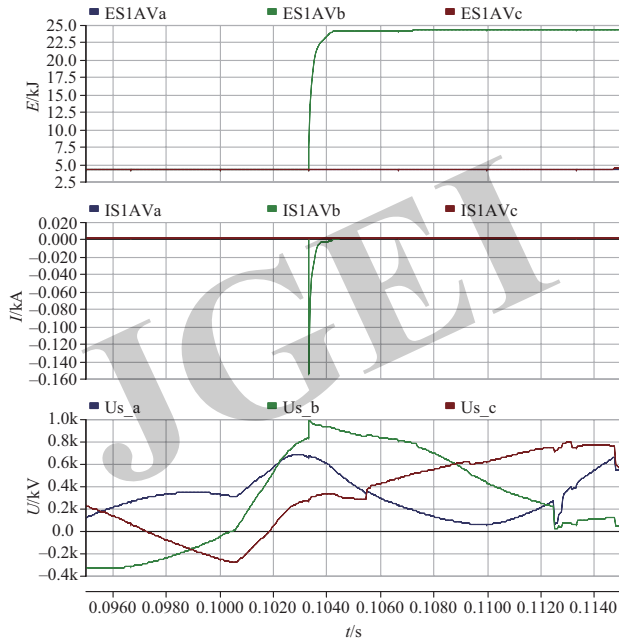


图 6 AV避雷器的能量、配合电流和过电压仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of energy, cooperating current and overvoltage of AV arrester

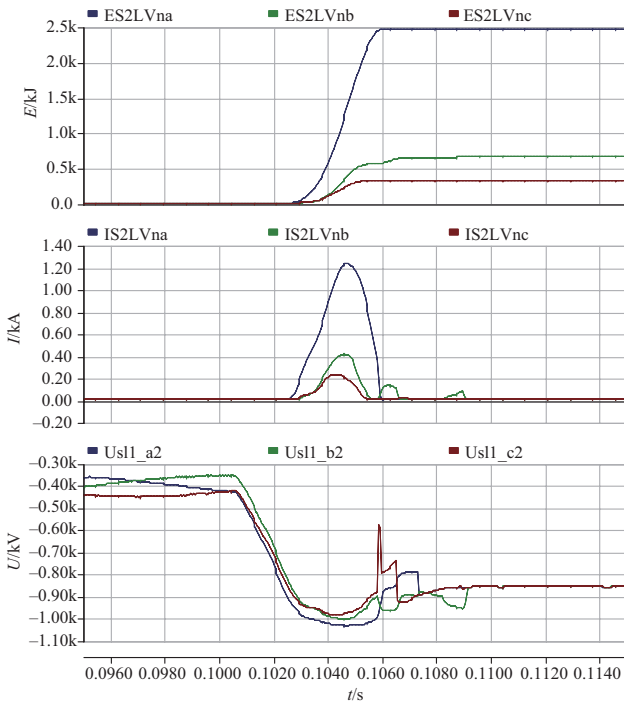


图 7 LV避雷器的能量、配合电流和过电压仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of energy, cooperating current and overvoltage LV arrester

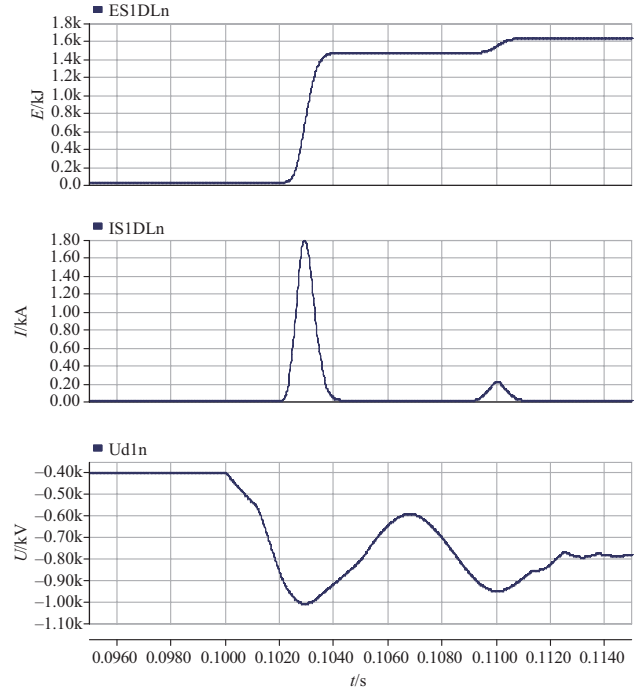


图 8 DL避雷器的能量、配合电流和过电压仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of energy, cooperating current and overvoltage DL arrester

### 3 系统功率盈余问题与交流故障穿越技术

本工程的海上换流站直接接入大规模孤岛风电场, 正常运行时风电场产生的功率经柔直通道全部送至陆上换流站交流系统, 即风电场能量与柔直输送能量维持实时平衡。如果由于某种原因导致受端换流器闭锁或受端功率输送受限, 此时风机有序切除需要数百ms甚至s级的响应时间, 风电场馈入送端换流器的有功功率不会速降, 从而导致柔直系统的功率盈余, 进而引起直流电压升高, 需要柔直输电系统自身具备平衡盈余功率的功能, 否则会导致直流系统过压闭锁和风机脱网。通过在陆上换流站正负极间配置有功功率动态平衡装置实现了该工程的故障穿越。

直流侧有功功率动态平衡装置包含集中式、分布式和混合式3种<sup>[29-33]</sup>: 集中式设计IGBT阀均压难度大, 控制性能一般, 但研制成本低; 分布式设计均压相对简单, 系统控制性能好, 但研制成本高; 混合式结构的特点居于前两者之间。3种拓扑结构分别如图9—图11所示。综合考虑装置的设计性能与经济性, 该工程选取了集中式设计方案, 为满足在满功率运行条件下功率平衡, 耗能电阻的阻值按照不大于564 Ω设计。

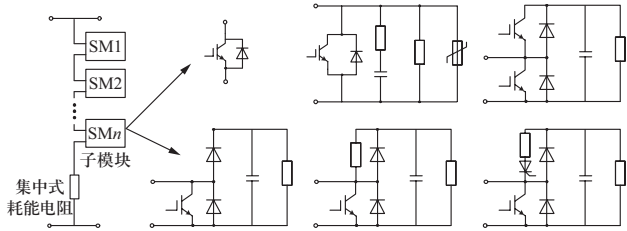


图9 集中式有功功率动态平衡装置典型拓扑结构图  
Fig. 9 Typical topology diagram of centralized active power dynamic balance device

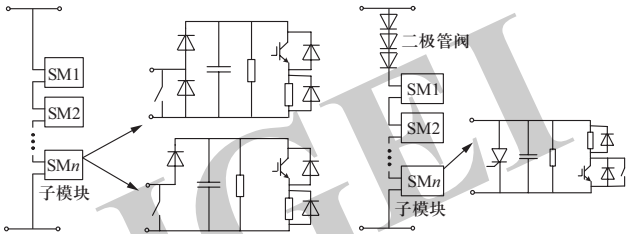


图10 分布式有功功率动态平衡装置典型拓扑结构图  
Fig. 10 Typical topology diagram of distributed active power dynamic balance device

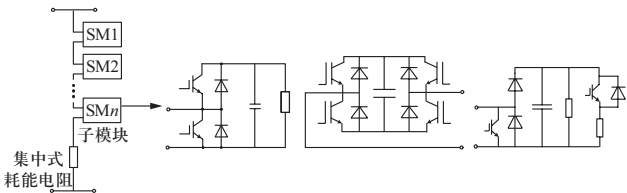


图11 混合式有功功率动态平衡装置典型拓扑结构图  
Fig. 11 Typical topology diagram of hybrid active power dynamic balance device

### 4 控制保护技术

本研究提出适用于孤岛海上风电经柔性直流送出的控制保护系统架构，包括基本控制策略、充电和启动策略以及换流站的保护配置方案等。

#### 4.1 基本控制策略

陆上换流站采用定直流电压和定无功功率控制，海上换流站采用定交流电压和定交流频率控制，分别如图12、图13所示。

#### 4.2 充电和启动策略

本工程系统启动时，先连接陆上换流站和交流系统，换流器充电完成后，由陆上换流站以定直流电压解锁建立直流电压，然后海上换流站解锁建立起风电场侧的交流电压，最后合上柔直风电场侧交流断路器，风电场启动并开始输送功率。充电与启动策略如图14所示。

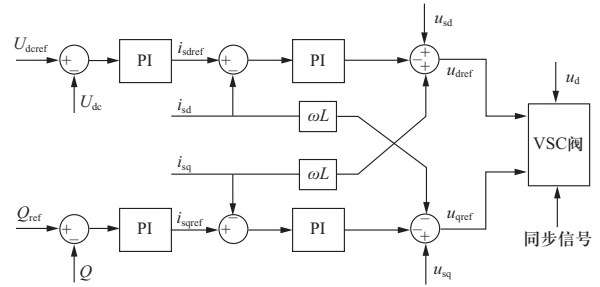


图12 陆上换流站定直流电压和定无功功率控制框图  
Fig. 12 Block diagram of constant DC voltage and constant reactive power control of onshore converter station

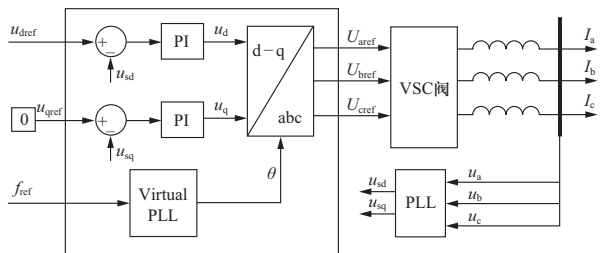


图13 海上换流站定交流电压和定交流频率控制框图  
Fig. 13 Block diagram of constant AC voltage and constant AC frequency control of offshore converter station

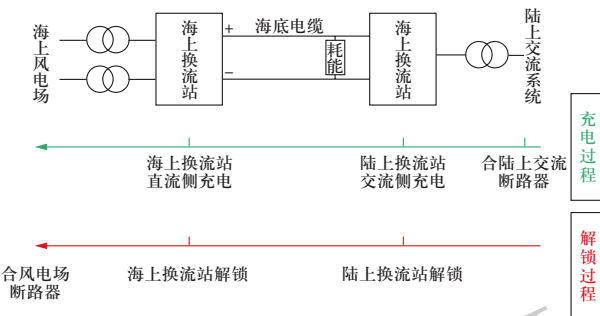


图14 江苏如东工程充电与启动策略框图  
Fig. 14 The charging and starting strategy block diagram of Jiangsu Rudong project

#### 4.3 保护配置方案

保护系统采用三重化配置，保证在任何运行工况下其所保护的每一设备或区域都能得到正确保护。按保护区域可分为联接变保护区、交流连接保护区、换流器保护区、直流极保护区、线路保护区。

宽频振荡具有过电压幅值高、发散速度快、对设备危害大的特点。工程设计提出一种基于电压前馈环节比例谐振（PR）控制的有源谐振抑制方法，传递函数如式（1）所示。

$$G = K_1 + \frac{2K_2\zeta\omega_0 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中:  $w_0$ 为中心频率;  $\zeta$ 为阻尼比;  $K_1$ 、 $K_2$ 为比例谐振参数。

该控制策略可显著降低柔直系统高频段负阻尼, 使得柔直(ZMMC)与投空变下的系统(ZT)之间在各频段的相位差小于 $180^\circ$ 或幅值不相交, 有效降低了工程的振荡风险, 如图15所示。

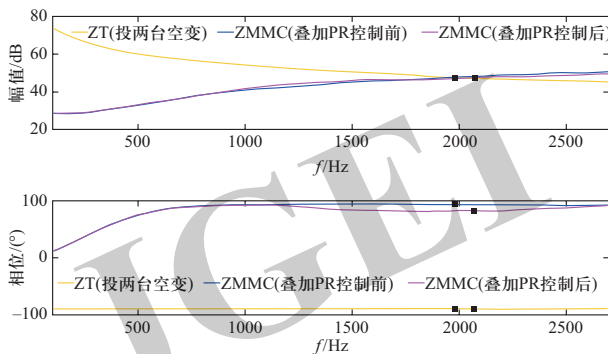


图 15 叠加PR控制策略前后的阻抗交互特性对比

Fig. 15 Comparison of impedance interaction characteristics before and after superimposing PR control strategies

## 5 结论

本文从系统拓扑方案构建、过电压与绝缘配合、系统功率盈余问题与交流故障穿越技术以及控制保护技术等方面开展了深入研究, 提出了中国第一个海上风电柔性直流工程——江苏如东工程的系统设计方案。

1) 构建了轻型紧凑化的海上风电柔性直流系统拓扑方案。取消了海上换流站的启动回路、接地回路等; 海上联接变压器采用2台并联方案, 不配置备用联接变压器, 当一台联接变发生故障后, 另一台联接变可以传输大部分功率, 大大提高了系统的运行可靠性; 提出了联接变压器、IGBT换流阀、桥臂电抗器、限流电抗器的主要设计原则和典型设计参数。

2) 提出了海陆换流站的避雷器配置方案与参考电压的选取原则, 通过仿真计算获得了各位置避雷器的决定性操作过电压水平, 形成了海陆换流站绝缘配合方案的典型范式。

3) 针对柔性直流孤岛接入新能源的功率盈余问题, 提出了集中式、分布式、混合式直流侧有功功率动态平衡装置的典型拓扑方式, 分析了不同拓扑方式的优缺点; 提出了有功功率动态平衡装置的电阻选取方法和设计参数。

4) 提出了陆上换流站采用定直流电压和无功功率、海上换流站采用定交流电压和交流频率的基本控

制方式; 确定了保护的区域划分原则; 提出了一种基于电压前馈环节比例谐振控制的有源谐振抑制方法, 显著降低了系统的振荡风险。

2021年12月, 江苏如东海上风电柔性直流工程正式投入运行, 全面验证了本文所提技术方案的有效性。

## 参考文献

- [1] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138-145.  
WANG Xiuli, ZHAO Boyang, HUANG Minghuang, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 138-145(in Chinese).
- [2] 李贤育, 姚良忠, 程帆, 等. 海上风电多类型直流送出系统拓扑经济性分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 476-485.  
LI Xianyu, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. Economic analysis of multi-type DC system topologies for offshore wind power transmission[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 476-485(in Chinese).
- [3] 黄明煌, 王秀丽, 刘沈全, 等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 167-174.  
HUANG Minghuang, WANG Xiuli, LIU Shenquan, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 167-174(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 郭贤珊, 刘泽洪, 李云丰, 等. 柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 19-29.  
GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 19-29(in Chinese).
- [6] 李云丰, 贺之渊, 庞辉, 等. 柔性直流输电系统高频稳定性分析及抑制策略(一): 稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5842-5856.  
LI Yunfeng, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. High frequency stability analysis and suppression strategy of MMC-HVDC

- systems(part I): stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5842-5856(in Chinese).
- [7] HE J H, CHEN K A, LI Meng, et al. Active injection protection scheme for flexible HVDC grids based on amplitude of input impedance[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 532-542.
- [8] 吴通华, 戴魏, 李新东, 等. 基于数值拉普拉斯逆变换的MMC-HVDC故障电流计算[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 40-49.  
WU Tonghua, DAI Wei, LI Xindong, et al. Calculation of fault current in MMC-HVDC based on numerical inverse Laplace transform[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 40-49(in Chinese).
- [9] 吴林林, 赵伟, 徐曼, 等. 考虑风电机组故障穿越特性的电压反复波动机理分析与抑制[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 290-297.  
WU Linlin, ZHAO Wei, XU Man, et al. Mechanism analysis and suppression of repeated voltage fluctuation considering fault ride through characteristics of the wind turbine[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 290-297(in Chinese).
- [10] 刘启建, 杨美娟, 行登江, 等. 风电场经柔性直流孤岛送出的交流故障联合穿越策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 132-141.  
LIU Qijian, YANG Meijuan, XING Dengjiang, et al. Coordinated AC fault ride through strategy for wind farm connected to VSC-HVDC system by island[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 132-141(in Chinese).
- [11] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.  
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32(in Chinese).
- [12] KUMAR K A, PRATHYUSHA C H. Improve performance on AC fault ride through in multiterminal HVDC grids[J]. International Journal of Advanced Technology and Innovation Research, 2015, 7(7): 1194-1202.
- [13] 李道洋, 姚为正, 吴金龙, 等. 应用于海上风电场柔性直流接入系统的直流故障穿越协同控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 47-54.  
LI Daoyang, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Coordinated DC fault ride-through control strategy for offshore wind farm interconnection with flexible HVDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 47-54(in Chinese).
- [14] 洪敏, 辛焕海, 徐晨博, 等. 海上风电场与柔性直流输电系统的新型协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 53-58.  
HONG Min, XIN Huanhai, XU Chenbo, et al. Coordinated control strategy of offshore wind farms and VSC-based HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 53-58(in Chinese).
- [15] 李国庆, 徐亚男, 江守其, 等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 111-119.  
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 111-119(in Chinese).
- [16] 赵峥, 田园园, 薛英林, 等. 混合式制动电阻变换器的电磁暂态仿真等效建模[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 111-116.  
ZHAO Zheng, TIAN Yuanyuan, XUE Yinglin, et al. Equivalent modeling of electromagnetic transient simulation for hybrid braking resistance converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 111-116(in Chinese).
- [17] 薛英林, 赵峥, 葛风雷, 等. 故障子模块切除后MMC运行特性分析和直流电流波动抑制[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1336-1344.  
XUE Yinglin, ZHAO Zheng, GE Fenglei, et al. Operation characteristic analysis and DC ripple current suppressing for the modular multilevel converter after bypassing faulty sub-modules[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1336-1344(in Chinese).
- [18] 刘涛, 李婧靓, 李明, 等. 南方电网鲁西背靠背直流异步联网工程控制保护系统设计方案[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 18-22.  
LIU Tao, LI Jingjing, LI Ming, et al. Control and protection system design of Luxi back-to-back asynchronous interconnection HVDC project of China southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 18-22(in Chinese).
- [19] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 157-164.  
GUO Xianshan, LIU Bin, MEI Hongming, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 157-164(in Chinese).
- [20] 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).



- [21] 宋怡, 林晨韵, 梁高琪, 等. 基于电力现货市场仿真的海上风电接入对广东省电力行业碳减排影响评估[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 363-373.  
SONG Yi, LIN Chenyun, LIANG Gaoqi, et al. Assessing the impacts of large-scale offshore wind power integration on carbon emission reduction in Guangdong Province based on electricity spot market simulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 363-373(in Chinese).
- [22] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.  
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496(in Chinese).
- [23] 李响, 王志新, 刘文晋. 海上风电柔性直流输电变频器的研究与开发[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 10-14.  
LI Xiang, WANG Zhixin, LIU Wenjin. Flexible direct current transmission converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 10-14(in Chinese).
- [24] 姚伟, 熊永新, 姚雅涵, 等. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3397-3413.  
YAO Wei, XIONG Yongxin, YAO Yahan, et al. Review of voltage source converter-based high voltage direct current integrated offshore wind farm on providing frequency support control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3397-3413(in Chinese).
- [25] 郭贤珊, 梅念, 李探, 等. 张北柔性直流电网盈余功率问题的机理分析及控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 157-164.  
GUO Xianshan, MEI Nian, LI Tan, et al. Study on solution for power surplus in Zhangbei VSC-based DC grid mechanism analysis and control method[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 157-164(in Chinese).
- [26] CHAUDHARY S K, TEODORESCU R, RODRIGUEZ P, et al. Chopper controlled resistors in VSC-HVDC transmission for WPP with full-scale converters[C]//2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy. Valencia, Spain. IEEE: 1-8.
- [27] 梅念, 陈东, 吴方劼, 等. 基于MMC的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1247-1253.  
MEI Nian, CHEN Dong, WU Fangjie, et al. Study on grounding methods for MMC-based VSC-HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1247-1253(in Chinese).
- [28] 袁艺嘉, 孔明, 孙宝宝, 等. 海上换流站直流侧暂态过压应力抑制策略有效性分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 602-614.  
YUAN Yijia, KONG Ming, SUN Baobao, et al. Analysis on the effectiveness of suppression strategies for transient overvoltage stress on the DC side of offshore converter station[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 602-614(in Chinese).
- [29] MANEIRO J, TENNAKON S, BARKER C, et al. Energy diverting converter topologies for HVDC transmission systems[C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, France. IEEE: 1-10.
- [30] 詹长江, 王宇, 陈松林. 一种链式耗能装置及其控制方法: CN109617108A[P]. 2019-04-12.
- [31] 迈克·多马希克, 英戈·尤勒, 赫伯特·甘巴科, 等. 具有分布式制动电阻的变换器: CN102132484A[P]. 2011-07-20.
- [32] 谢晔源, 姜田贵, 李海英. 一种直流耗能装置以及控制方法: CN109546638A[P]. 2019-03-29.
- [33] BIRKEL A, SCHÖN A, BAKRAN M M. Analysis and semiconductor based comparison of energy diverting converter topologies for HVDC transmission systems[C]//2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). Geneva, Switzerland. IEEE: 1-10.

收稿日期: 2022-11-09; 修回日期: 2022-12-02。

#### 作者简介:

文卫兵(1965), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电与柔性直流输电设计。

赵峥(1986), 男, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电与柔性直流输电成套设计。通信作者, E-mail: zhaozheng@chinasperi.sgcc.com.cn。

文卫兵

李明(1979), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电与柔性直流输电成套设计。

(责任编辑 李锡)