

海上风电高压柔直送出多端系统故障穿越特性及关键技术综述

刘晨阳, 高甜甜, 王广宁, 周治基

(直流系统工程装备研究中心(大连海事大学), 大连 116026)

摘要: 随着海上风电的快速发展, 高压柔性直流输电技术(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)已成为大规模海上电能送出的有效途径。然而, 该技术也对柔性直流电网稳定性和故障穿越能力提出了更高要求。该文聚焦于大规模多端海上风电柔直输电系统, 揭示了故障扰动在风电场、换流站及柔直系统中的传播机制, 系统梳理了海上风电送出系统实现低/高电压故障穿越的最新研究进展。对结合控制优化与硬件保护配置的多维度协调技术进行了综述, 该技术可有效增强风电系统的故障穿越能力, 提高系统的稳定性, 并通过对典型海上风电 VSC-HVDC 工程案例的讨论验证了多维度协调技术的优越性。最后, 针对 VSC-HVDC 故障穿越技术的未来研究, 需重点突破: 构建全域非线性动态模型以深度解析故障行为机制, 从而为故障传播路径量化分析与穿越策略优化奠定严格数学基础; 同时研发高性能故障穿越硬件设备, 聚焦解决极端工况下的工程瓶颈, 提高系统故障穿越能力。

关键词: VSC-HVDC; 海上风电; 故障穿越; 风电机组; 控制优化

Review of Fault Ride-through Strategies and Key Technologies for Offshore Wind Power Multi-terminal VSC-HVDC Transmission Systems

LIU Chenyang, GAO Tiantian, WANG Guangning, ZHOU Zhiji

(HVDC System Engineering and Power Equipment Development Center(Dalian Maritime University), Dalian 116026, China)

Abstract: With the rapid development of offshore wind power, VSC-HVDC has become an effective way for large-scale offshore power delivery. However, this technology also puts forward higher requirements on DC network stability and fault ride-through capability. This paper focuses on large-scale multi-terminal offshore wind power flexible transmission system, reveals the propagation mechanism of fault disturbances in wind farms, converter stations and flexible systems, and systematically combs through the latest research progresses of offshore wind power delivery system to achieve low-/high-voltage fault ride-through. It is reviewed that the multidimensional coordination technique combining control optimization and hardware protection configuration can effectively enhance the fault ride-through capability of the wind power system and improve the stability of the system, and the superiority of the multidimensional coordination technique is verified through the discussion of typical offshore wind power VSC-HVDC engineering cases. Finally, for the future research of VSC-HVDC fault ride-through technology, it is necessary to focus on following breakthroughs: constructing a full-domain nonlinear dynamic model to deeply analyze the fault behavior mechanism, thus laying a rigorous mathematical foundation for the quantitative analysis of fault propagation paths and optimization of ride-through strategy; simultaneously, developing high-performance fault ride-through hardware equipment, focusing on the solution of engineering bottlenecks under extreme working conditions, and improving the system fault ride-through capability.

Key words: VSC-HVDC; offshore wind; fault ride-through; wind turbines; control optimization

0 引言

近年来, 全球能源转型以及“碳中和”目标的

加速推进, 致使海上风电成为可再生能源领域的重要增长点^[1]。相较于陆上风电, 海上风电具备风速稳定、开发规模大等优势, 成为未来新能源发展的主要方向。由于海上风电场通常距离陆地电网较远, 传统交流输电在传输效率和稳定性方面面临诸多问题, 而高压柔性直流输电(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)因其能够提

基金资助项目: 辽宁省科学计划项目(2023JH1/10400075); 中央高校基本科研业务费专项资金(3132024106)。

Project supported by Science and Technology Project of Liaoning Province(2023JH1/10400075), Fundamental Research Funds for the Central Universities(3132024106).

供高效的能量传输、支持无源系统启动、实现孤岛供电等优点,逐渐成为海上风电并网的主流方案^[2-4]。但海上风电在长距离输电、海域资源占用等方面存在瓶颈,导致系统运行维护成本高、故障恢复难度大;同时风电机组的随机波动性对 VSC-HVDC 潮流控制和电压故障穿越能力提出了更高要求^[5-7]。

在全球范围内,多个海上风电高压柔直工程成功投运,如德国 Borwin 系列海上风电柔直工程、英国 Dogger Bank 海上风电项目、中国如东 ± 420 kV 海上风电以及广东阳江风电工程等^[8-11],这些项目为大规模风电场的远距离输电提供了技术支持。这些工程的实施不仅验证了海上风电柔直并网的可行性,也揭示了海上风电柔直运行的关键挑战,特别是在故障穿越能力与系统稳定性方面。多端柔性直流输电系统(voltage source converter based multi terminal DC, VSC-MTDC)复杂拓扑结构决定了其在故障情况下的动态响应特性更为复杂,局部故障可能引发连锁反应,导致设备过载、跳闸甚至系统级失稳^[12-13]。针对这些挑战,部分研究者通过分布式协同控制和算法优化,提升系统的动态响应能力与故障穿越性能^[14],为解决多换流站协同运行问题提供了新思路;部分研究者通过模拟同步机惯量与阻尼特性,增强海上风电机组的稳定性,实现更优的电网动态支撑^[15-16],能够为故障抑制提供新思路;此外,电压反馈限流控制和直流断路器快速动作也对提升系统整体抗扰能力起到关键作用^[17]。

本文聚焦于海上风电 VSC-MTDC 的故障穿越问题,系统综述了目前研究进展和关键技术挑战,具体包括:(1)阐明风电机组与 VSC-HVDC 的动态耦合机理,探讨机组与系统间的动态交互行为;(2)阐述 VSC-MTDC 的故障能量传播路径与电压失稳机制,揭示系统层面的问题特性;(3)综述了分层式故障穿越技术体系,提出适用于多端系统的解决方向,结合工程案例,对多场景故障穿越性能进行对比。本文旨在为未来高稳定性、高可靠性的海上风电柔直输电系统提供理论支撑和工程实践参考。

1 海上与陆上风电 VSC-MTDC 系统对比综述

1.1 系统拓扑与控制策略差异性

1.1.1 系统拓扑方面

传统陆上或近海风电系统通常采用混合高压传统直流输电系统(line commutated converter-high

voltage DC, LCC -HVDC)或高压交流输电系统(high voltage AC, HVAC),其拓扑结构如图 1 所示。HVAC 系统中,海上风电场通过高压交流海缆接入陆上主网,当一侧发生严重故障时,故障会沿着交流输电线路迅速传递到另一侧,对整个海上风电送出系统产生较为显著的影响。LCC-HVDC 系统具有输电容量大、过载能力强^[18]等优点,然而 LCC 换流阀不具备主动关断能力,导致 LCC-HVDC 系统在接入弱交流电网时稳定性差,在逆变侧交流系统故障期间容易发生换相失败^[19-20]。海上风电 VSC-HVDC 系统则采用全控器件(insulate gate bipolar transistor, IGBT)构成模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC),能够克服换相失败风险,适用于弱电网或无源系统场景,独立调节有功和无功功率,在面对海上环境复杂性和技术适应性问题时具有显著的优势。

VSC-MTDC 拓扑结构大致可分为辐射状、环型和网状。陆上风电多采用辐射状或链式结构,通过集电线汇集电能至升压站并入交流电网。为了提高海上风电送出系统的可靠性,海上风电一般采用环型或网状拓扑结构^[21-22],3 种简化后的拓扑结构如图 2 所示。辐射状拓扑(L_2 - L_1 / L_3 线路)的电流单向流动,从主换流站(换流站 2)向各个子站单向连接。当线路 L_2 故障后,其他子站由主换流站通过 L_1 和 L_3 正常输电,但主换流站故障时会导致全网瘫痪;环状拓扑(L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_1 线路)允许电流双向流动,需有一个换流站作为主站,其有功功率目标设置为维持直流侧电压恒定,各站可独立调节功率。当某节点(如线路 L_2)发生故障时,可通过环网重构形成辐射状网络,剩余线路 L_1 - L_3 - L_4 形成辐射状结构维持供电;网状拓扑(L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5 线路)中各个子站控制能力都比较强,网状拓扑在换流站之间存在多条非闭合的交叉线路,多路径供电使单点故障几乎不影响系统整体运行,但需要更加精准的故障定位。

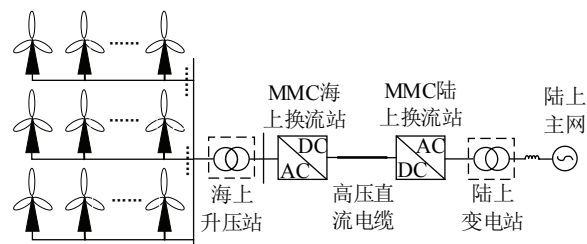


图1 采用交流汇集海上风电柔性直流送出系统拓扑结构

Fig.1 Topology of VSC-HVDC delivery system for offshore wind power using AC aggregation

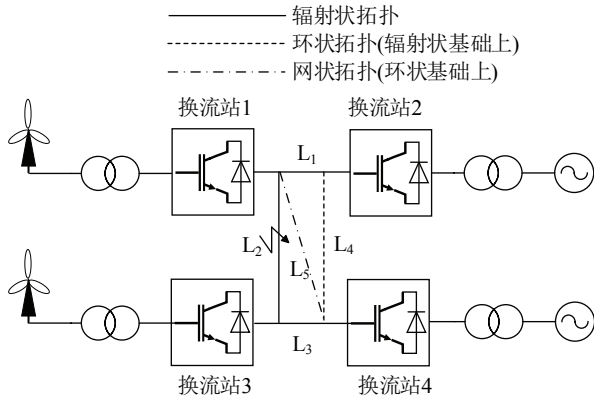


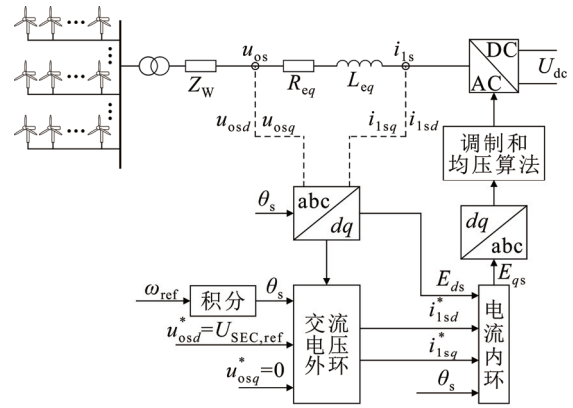
图2 VSC-MTDC 输电系统3种简化拓扑

Fig.2 Three simplified topologies for VSC-MTDC transmission system

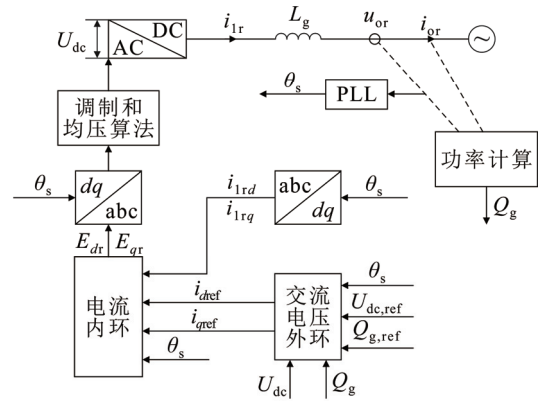
如 L_2 线路故障时, 电能可通过 L_1 - L_5 - L_4 - L_3 实现迂回传输, 体现其多路径供电能力。目前已投运的海上 VSC-HVDC 案例, 在拓扑结构选择上, 通常采用具有高可靠性的环形拓扑; 在 MMC 换流器配置方面, 多选用技术成熟度较高的半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)作为基本换流单元。本文主要以半桥子模块 MMC 对称双极接线的 VSC-HVDC 系统为研究对象展开全面综述。

1.1.2 控制策略方面

海上风电场作为无源网络, 需要海上换流站提供稳定的同步交流电源, 因此海上送端 VSC 换流站采用定交流电压和频率的控制策略(V/F 控制), 如图 3(a)所示。陆上受端 VSC 换流站控制器如图 3(b)所示, 承担定直流侧电压控制并调节与交流电网的无功交换。此时, VSC-HVDC 无法对海上风电场的输出功率进行控制^[23], 需要 VSC-HVDC 本身要具备更强的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)和高电压穿越能力(high voltage ride through, HVRT)。图 3 中, ω_{ref} 为送端换流器所控公共连接点交流电压的频率给定值, 通常为工频; θ_s 为 ω_{ref} 积分所得的相位; $U_{SEC,ref}$ 为送端公共连接点交流电压幅值给定值; u_{os} 为送端公共连接点交流电压; u_{osd} 、 u_{osd}^* 、 u_{osq} 和 u_{osq}^* 分别为 u_{os} 的 d 、 q 轴分量及其给定值; i_{is} 为送端换流器交流电流; i_{isd} 、 i_{isd}^* 、 i_{isq} 和 i_{isq}^* 分别为 i_{is} 的 d 、 q 轴分量及其给定值; E_{ds} 和 E_{qs} 分别为送端换流器输出交流电压的 d 、 q 轴分量; U_{dc} 和 $U_{dc,ref}$ 分别为直流母线电压及其给定值; Q_g 和 $Q_{g,ref}$ 分别为受端换流器输出无功功率及其给定



(a) 送端VSC换流器控制框图



(b) 受端VSC换流器控制框图

图3 VSC-MTDC 控制策略

Fig.3 Control strategy for VSC-MTDC

值; u_{or} 和 i_{or} 分别为受端换流器并网点电压及电流; θ_r 为锁相环测得的电网相位; i_{lr} 为受端换流器输出的交流电流; i_{lrd} 、 i_{lrd}^* 、 i_{lrq} 和 i_{lrq}^* 分别为 i_{lr} 的 d 、 q 轴分量及其给定值; E_{dr} 和 E_{qr} 分别为受端换流器输出交流电压的 d 、 q 轴分量。

蔡旭等学者指出, 在海上风电场多端柔性直流输电系统中, 瞬时性故障多发生于岸上电网, 此时受端换流站交流侧故障的故障穿越策略取决于协调控制方式^[24]。在主从控制模式下, 若故障发生在从站且送出能力不足, 则主站承担功率缺口, 超出承受能力时需协调其他从站分担, 若仍不足则耗能设备动作完成故障穿越; 若故障发生在主站且无法维持平衡, 则需切换其他从站为主站, 或依赖耗能设备辅助。而在下垂控制模式下, 故障站点转为定功率模式, 功率缺口自动由其他受端换流站分担, 超出承受能力时仍需耗能设备动作。本文以主从控制模式下送端 VSC 换流站采用 V/F 控制、受端主站采用定直流电压/无功功率控制展开全面综述。

1.2 海上风电送出系统关键设备差异

海上风电柔直送出系统^[25]主要包括风电机组、

海上升压站、送端/受端 VSC 换流站、海缆、接地装置及连接变压器等设备。海上风电机组与 VSC-HVDC 在故障时存在复杂的动态耦合与交互行为^[26-27]。故障瞬间, VSC-HVDC 直流电压剧烈波动, 波动会通过风电机组变流器影响其定子电压和电流, 进而对电机的电磁转矩和转速产生连锁反应; 而风电机组输出功率若因故障突变, 也会打破原本的功率平衡。在控制策略方面, 风电机组正常运行采用最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制策略, 故障时需切换至故障穿越模式, 并与 VSC-HVDC 的电压、功率控制协同, 避免失稳^[28]。动态交互可分为 3 个阶段: 故障初期, 风机限流保护、调整变流器控制参数等快速响应, 与 VSC-HVDC 同步触发保护机制抑制故障扩散; 故障持续期, 风机主动降功率或空载运行以维持可恢复状态, VSC-HVDC 则调整控制策略稳定直流电压并协调功率分配; 故障清除后, 风机平滑切换至 MPPT 模式, VSC-HVDC 同步切换控制模式以精准调节电压与功率, 最终实现系统快速回稳^[29]。

海上风电系统由于其特有的环境, 需要配备特殊的接地装置。海上升压站的高压侧电压等级一般为 220 kV, 低压侧则采用双绕组或双分裂变压器配合小电阻接地限制单相接地故障电流, 防止故障扩散^[30], 当一台变压器发生故障时, 可通过双母线切换的方式实现功率转移^[31-32]。而在陆上系统, 受限于空间资源, 需要协调多回交流线路与直流输电系统的协同优化, 提高电网的利用效率。

海上风电 VSC-HVDC 使用长距离直流电缆, 其电容效应导致故障时暂态电流更显著。姜崇学等^[33]指出, 电缆电容值在故障回路计算中的权重显著大于架空线。阀侧交流系统接地故障时, 电缆电容与桥臂电容形成充放电回路的电压差, 导致暂态故障电流激增; 电缆直流侧接地故障时, 分别形成直流故障和交流故障回路, 且直流故障源作用更为明显, 将会主导产生快速大电流, 而架空线电容较小, 其电容与桥臂电容的电压差效应不显著, 充电电流较小, 对故障特性影响有限。此外, 海上风能的波动性和随机性使得风电机组的投退具有较强的随机性, 导致断路器频繁开断, 容易引发集电网系统的高频暂态过电压等严重问题^[34-35]。这些差异要求海上风电特别关注设备特性对故障穿越策略的影响。

2 故障传播机制分析综述

2.1 海上风电送端交流侧故障分析

海上风电场送端交流侧故障主要发生在集电系统、送出线路及风机并网侧换流站。当送端交流系统发生故障时, 风电换流器呈受控电流源特性, 而对于柔直换流器来说, 其工作在向无源网络供电的模式, 呈受控电压源特性。送端换流器的交流端口会优先输出无功功率并进入限流模式, 以支撑电压恢复, 防止风机脱网^[36-37]。

送端系统发生三相接地短路故障后, 受端 VSC 换流站子模块电容通过直流系统放电, 送端 VSC 换流站桥臂中的子模块电容根据桥臂电流方向处于充放电状态^[38-39], 经送端系统交流线路、短路点以及受端系统阀侧接地点构成故障回路, 导致故障点电压骤降, 图 4 为送端系统发生故障时短路电流的流通方向。图 4 中, $u_{s\varphi}$ 为理想电网电压, $\varphi=a、b、c$; $u_{v\varphi}$ 和 $i_{v\varphi}$ 分别为陆上换流器并网点电压及电流; $u_{p\varphi}$ 和 $u_{n\varphi}$ 分别为换流器上、下桥臂电压; L_0 和 R_0 分别为桥臂电抗和电阻。此时海上 VSC 换流站会向故障点注入电流, 导致 VSC 输出电流的相位和幅值剧烈变化。此外, 由于故障点是交流电压最低点, 其他风电场电流会直接流向故障点, 而非直流系统^[40]。当送端交流系统发生对称故障时, 其柔直换流器侧的短路电流可表示为:

$$i_{r\varphi} = \frac{E_{r\varphi}(t) \cos(\omega t + \theta_{\varphi})}{Z_+} \quad (1)$$

式中: $i_{r\varphi}$ 为短路电流瞬时值; $E_{r\varphi}$ 为短路等效电动势; Z_+ 为系统正序阻抗; ω 为陆上换流器所控公共连接点交流电压的频率; θ_{φ} 为陆上换流器所控公共连接点交流电压的初相位。

对称短路故障时柔直换流器与风电场只提供相位几乎一致的正序电流, 此时网侧变流器会向系统注入一定的无功功率, 以支撑并网点电压的恢复; 当电压升高时, 网侧变流器的无功输出变为负值, 从电网吸收无功功率, 以抑制电压过冲问题。

交流不对称短路可分为单相短路、两相短路、两相接地 3 种类型^[41], 此时系统失去对称性, 电压、电流中除包含正序分量外, 还会引入负序和零序分量。由于 VSC 换流站通常采用 Y/Δ 变压器, 其阀侧不会产生零序电流, 但仍会受到负序电流的影响, 此时柔直换流器侧的短路电流可由式(2)表示。故障时各序电流相互叠加, 可能超出额定值范围, 导致

设备过压过流。同时, 风电场会向电网注入正序动态容性无功, 以支撑并网点电压恢复。然而, 这种补偿机制可能会抬升非故障相的对地电压, 进一步加剧电压应力, 甚至引发更严重的故障。

$$i_{r\varphi} = \frac{E_{r\varphi}(t)\cos(\omega^+t + \theta_{\varphi+})}{Z_{d+}} + \frac{E_{r\varphi}(t)\cos(\omega^-t + \theta_{\varphi-})}{Z_{d-}} \quad (2)$$

式中: Z_{d+} 为系统正序阻抗; Z_{d-} 为系统负序阻抗; ω^+ 为陆上换流器所控公共连接点交流电压的正序角频率; ω^- 为陆上换流器所控公共连接点交流电压的负序角频率; $\theta_{\varphi+}$ 为陆上换流器所控公共连接点交流电压的正序初相位; $\theta_{\varphi-}$ 为陆上换流器所控公共连接点交流电压的负序初相位。

王霄鹤等针对送端交流故障的过电压和短路电流机理展开分析, 指出当送端发生不对称故障时, 故障点的非故障相电压可升至额定值的 2 倍, 并呈现电压反向特性, 导致严重的线路过电压问题^[42]。而两相接地故障会产生零序电流, 此时非故障相电压较低, 可能导致海上交流电网电压难以维持, 引发系统失稳, 但不会出现严重的过电压问题。

尽管送端与受端存在一定解耦作用, 送端短路电流无法通过直流线路传递至受端电网, 但交流故障引起的海上风电出力波动会导致并网点功率变化, 进而引发电压波动。由于送端换流站无法自主调节有功功率, 风电机组的功率波动需陆上电网进行补偿。风电功率受阻将导致大规模功率缺额, 影响整个电网的稳定性^[42-43]。在设备层面, 电缆的显

著等效电容在故障时与上下桥臂电容通过接地形成电压差, 建立 2 个充放电回路, 致使桥臂电流骤增, 威胁设备绝缘。易扬等指出 MMC 提供的短路电流由正序、负序和零序电流叠加而成^[44]; 唐溢等学者则在文献^[37]的基础上得出了 MMC 提供的短路电流幅值受运行方式的影响较大、而相位受故障类型影响较大的结论^[45]。此外, 海上 VSC 换流站控制策略可能导致其持续从主电网吸收有功功率, 加剧系统有功缺额。故障穿越期间海上和陆上换流站持续提供无功支撑, 故障清除后可能导致系统无功功率盈余^[46], 引发风机端电压迅速上升, 产生暂态过电压风险, 甚至造成风机脱网和受端电压冲击。

2.2 陆上受端交流侧故障分析

陆上受端交流侧故障会影响陆上换流站的稳定性, 同时可能引发直流系统的功率失衡, 直接关系到整个系统的故障穿越能力, 图 5 为陆上交流网侧故障等效电路图。当受端电网发生故障, 并网点电压迅速跌落, VSC-HVDC 的功率传输能力下降。由于风电机组出力无法迅速调整, 多余有功功率无法传输至电网^[47], 进而累积在直流系统, 引发直流母线电压升高, 甚至可能触发过电压保护, 引发风机脱网。此外, 靠近换流站侧故障比靠近电网的故障更加严重。这是因为靠近换流站的短路故障会导致柔直送出线路的电流幅值剧增, 而电网侧故障由于换流站的 LVRT 控制作用, 输出的负序电流受限, 短路电流的增幅相对较小。

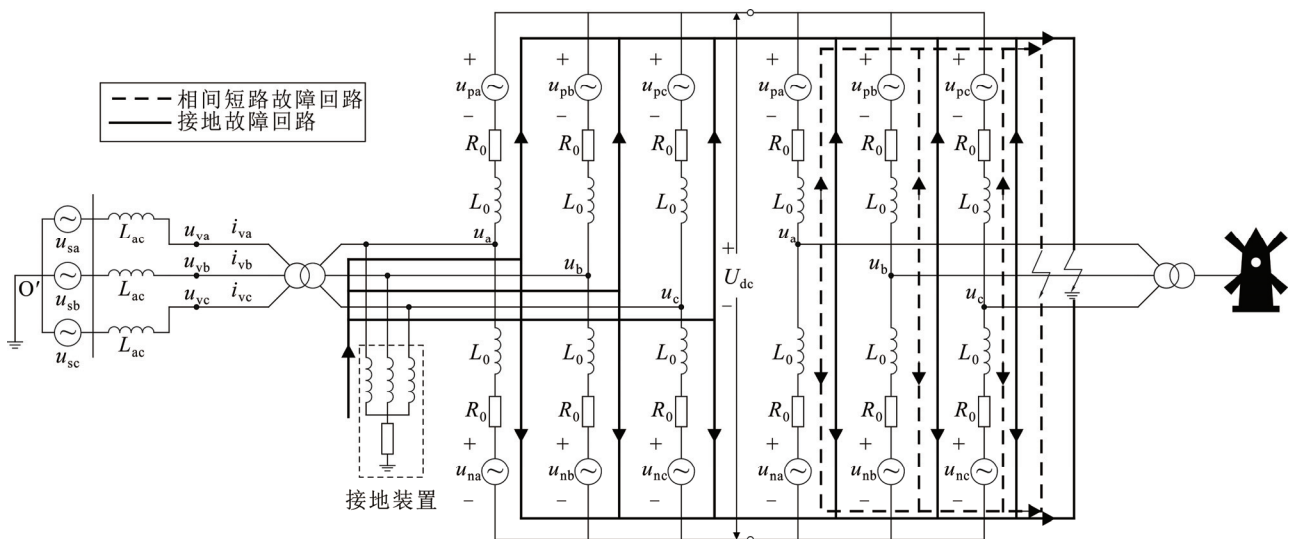


图 4 海上交流侧故障等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of AC side fault on offshore

当受端电网发生不对称短路故障时,换流站需要引入负序电流控制,以维持三相电流的平衡。由于Y/Δ变压器的负序阻抗远大于零序阻抗^[48],导致不对称接地故障下的电气量表现接近三相平衡状态,而逆变器直接输出的电流仍然是对称的。

综上所述,受端交流侧故障会影响陆上换流站的稳定性,并可能对整个柔直输电系统造成冲击。

2.3 海上风电直流侧故障分析

直流侧故障主要包括单极接地故障、双极短路故障和直流断线故障^[49],其中极间短路故障短路电流瞬间可达额定电流的上百倍,威胁系统整体稳定性,图6为直流侧故障的等效电路图。

当单极接地故障发生时(图6(b)),故障极VSC换流站会迅速闭锁,并切断相应的交流侧断路器,

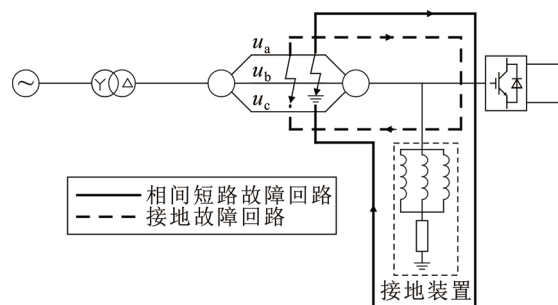


图5 陆上受端交流侧故障等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram of AC side fault on road

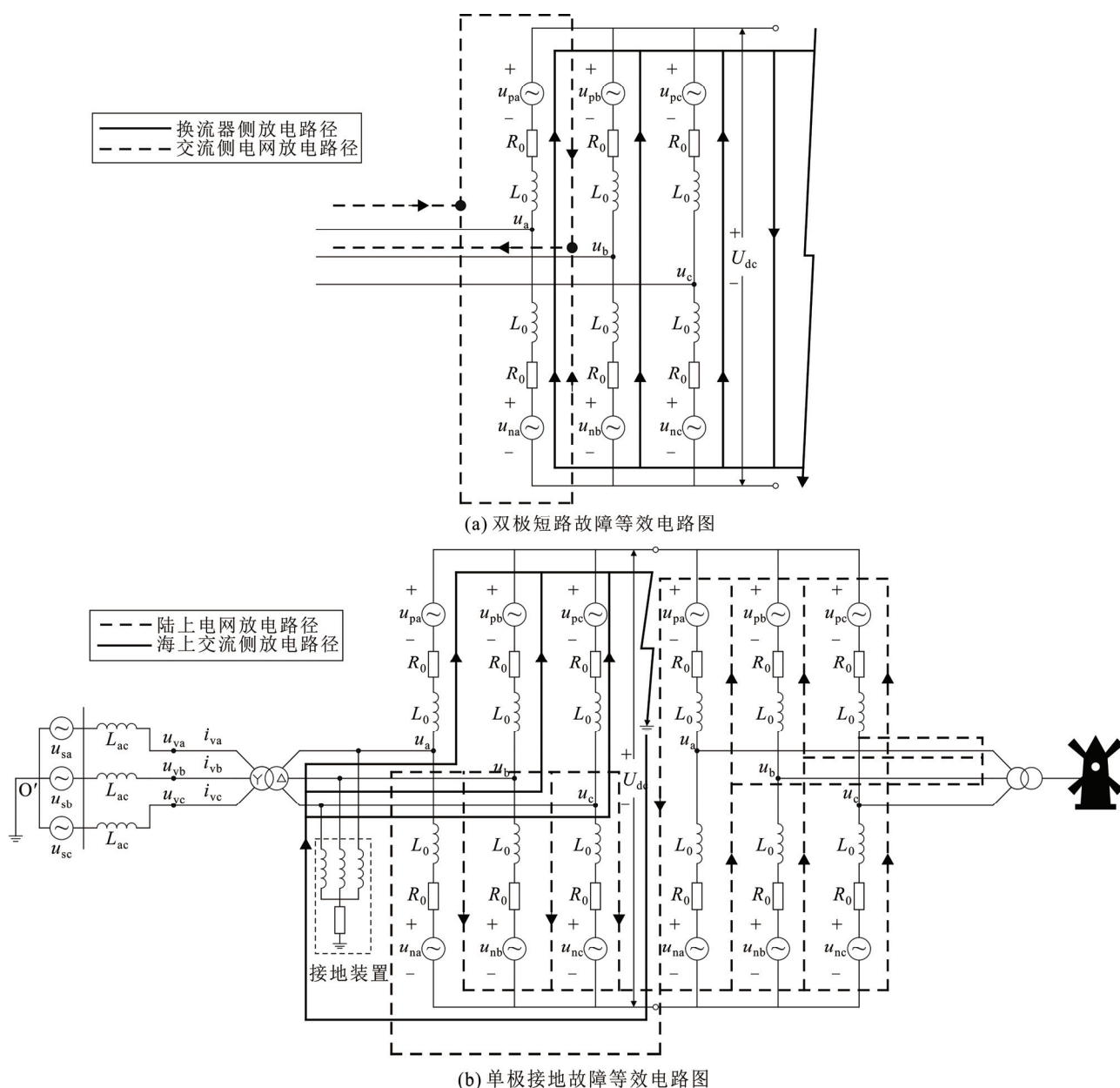


图6 直流侧双极短路与单极接地故障

Fig.6 Bipolar short circuit and unipolar earth fault of DC side

非故障极可维持一半的功率传输能力。然而, 接地点的存在会降低系统的直流电压, 导致换流站侧的等效电容快速放电, 引发暂态过电流^[50]。在双极运行模式下, 单极接地故障通常表现为振荡放电与二极管续流过程, 当负极发生单极接地故障时, 尽管故障极仍能导通电流, 但健全极的电压会跃升至正常值的 2 倍。此时, 长距离直流电缆的显著电容效应与桥臂电容分别形成直流故障回路和交流故障回路, 且直流故障回路作用更明显, 使得故障电流中直流分量占比大、上升速度快, 同时电缆分布参数还会引发电压振荡, 增加对故障暂态过程的复杂影响。为了维持功率传输, 可通过降压控制将直流电压降至 0.5 倍额定值^[51], 以降低健全极电压, 但这也可能会引发风电场并网点电压的跌落。

双极短路故障(图 6(a))是直流系统中最严重的故障类型, 会导致短路电流迅速上升, 母线电压骤降甚至归零^[52]。在双极短路故障发生后 VSC 换流站子模块电容及直流电缆等效电容首先向故障点放电, 故障电流会经换流阀二极管导通, 形成短路回路, 相较于单极短路故障, 双极短路故障导致正负两极电压均被箝位为 0, 桥臂电容通过双极短路点直接放电, 故障电流峰值可达单极短路故障的 2 倍以上, 对系统保护策略和设备耐受能力提出了更高要求。此时换流站因直流电压骤降, 向系统注入感性无功。如果此时风电场的送出功率大于单极直流系统的传输容量, 则需协调风电场降低输出功率。故障时两端 VSC 换流站均会快速闭锁, 送端换流站交流侧将等效为三相短路接地。在交流侧断路器切断故障期间, 风电机组进入低电压穿越模式。

3 海上风电 VSC-HVDC 故障穿越综述

目前国标 GB/T 19963.2—2024 对海上风电场的故障穿越技术要求做出了相关标准规定^[53]。总的来说, 当电网电压故障程度较轻时, 可通过改进风机变流器的控制策略实现不脱网运行; 当电网故障程度较重时, 可通过增加辅助的硬件耗能装置(如撬棒 Crowbar、斩波器 Chopper 等)与改进控制策略相结合的方式实现风电机组的故障穿越^[54]。

3.1 LVRT 策略

在海上风电系统中, LVRT 策略对于在电网发生电压跌落时确保系统稳定性至关重要。目前在海上风电 LVRT 方面, 主要采用 2 种方式来提高其故障穿越能力, 优化变流器的控制策略, 增加硬件保

护设施或者补偿设备^[55]。

3.1.1 优化变流器的控制策略

关于提升海上风电柔直送出系统 LVRT 能力的控制策略研究, 学者们多围绕变流器协同控制与功率调节展开, 主要包括单机优化控制、场群协调控制、多端协同控制 3 个层面, 分别从局部响应、集群调节和系统级协同角度增强故障穿越能力。

1) 单机优化控制策略。其核心是优化变流器在 LVRT 期间的功率调节能力, 确保快速响应电压跌落并维持稳定运行, 避免单机脱网。早期研究聚焦网侧变流器(grid-side converter, GSC)无功补偿, 黄肖琪等提出分段式转速控制与无功补偿协同策略, 动态调节机侧有功输入和网侧无功输出, 但该策略未解决不对称故障场景下的正负序分了解耦问题^[56]。针对这一局限, 贾波等开发基于瞬时对称分量法的控制体系, 在 10 ms 内完成故障分量分离, 并结合无功裕度均衡分配, 使风电机组在不对称跌落时实现功率解耦, 缩短了电压恢复时间^[57-58]。与此同时, 研究者们着力挖掘海上风电机组自身能量缓冲潜力。李国庆等设计了海上风电场精确减载控制, 根据电压变化率及偏差量主动降低风电场有功出力, 并引入桨距角控制, 使风电场与换流站内电容协同维持直流电压稳定, 提升系统 LVRT 能力^[59]。H Badihi 等改进了风力机控制器模型, 提出了一种独立变桨控制策略, 增强了桨距角调节的灵活性, 在 LVRT 期间可降低对风能的捕获^[60]。D. Wang 等人提出了基于自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)的 LVRT 策略, 通过扩张状态观测器实时补偿电网扰动, 降低直流电压波动, 但对控制器参数敏感性较高的问题仍有待解决^[61]。

2) 场群协调控制策略。其主要目标是优化风电场内多台风机的功率分配与协同响应, 提升集群稳定性。在降低海上风电场出力方面, 基础方案包括 3 类: (1)降压法, 如 W. Li 等学者通过降低交流电压至 0.7 倍额定值实现短时间内有功削减^[62], 但 M. Mohammadi 等学者指出电压低于 0.8 倍额定值可能触发低电压保护^[63]; (2)升频法, Sotirios I. Nanou 等设计虚拟惯量补偿算法, 模拟 0.5~2 Hz 频率扰动诱导减载, 虽无需通信但响应时间长达 150 ms^[64]; (3)快速通信法则依赖光缆传输减载指令, 当电网发生故障时, 通过快速通信线路将减载信号传输到风电场, 减少风电场机组的输出功率^[65-66]。为突破单一方案局限, 有学者提出协同控

制架构：李琦等将升频法与模块化卸荷电阻结合，在 2 MW 系统中实现 80%过剩功率耗散，硬件成本仅增加 5%^[67]；Erlach I 等开发动态降压系数模型，根据实时故障深度自适应调节降压幅度，相比固定系数方案过调率降低 40%^[68]；贾科等提出基于谐波注入的协调控制方法，在故障期间向离岸交流线路注入序列谐波，使风电变流器可协同限制注入电网的功率，无需进行额外通信即可实现多个变流器的协调 LVRT^[69]。在控制架构层面：洪敏等开发锁相环容错控制技术，通过重构双馈机组同步控制逻辑，使换流站在 20 ms 通信延迟下仍能精准调节海上交流系统电压相位，结合 MMC 换流器的定功率控制模式，将直流电压波动抑制在 $\pm 5\%$ 以内^[70]；Mahmoud M. Elgamasy 等则采用模糊逻辑控制器，根据陆上故障深度动态调整降压系数，在多种测试场景中保持高压直流电压偏差 $< 3\%$ ^[71]。

3) 多端协同控制策略。其主要目标是协调 VSC-HVDC 中多换流站与风电场的功率/电压控制，实现跨端 LVRT。李道洋等聚焦混合型 MMC 拓扑架构，全桥子模块占比 30%时，送端 VSC 换流站可切换至零直流电压模式，配合受端定子模块电压控制，在双极短路故障下 5 ms 内抑制故障电流^[72]。受端 VSC 换流站的控制方式对系统的 LVRT 也至关重要。赵平等针对陆上交流故障引发的直流过电压问题，提出了利用海上换流站 MMC 子模块电容吸收 40%~60%的盈余功率、抬升风电场频率以降低风电机组输出功率的协调控制策略^[73]。江守其等针对大规模风电孤岛接入的双极 MMC 柔直电网，对直流电流越限、直流电网过电压和非故障极过载的 3 种情况设计故障穿越协调控制策略，将过电压率降低至 15%以下，但该方案需改造换流站拓扑^[74]。J. Deng 等提出了一种增强型非线性下垂控制策略，能够在 VSC-HVDC 发生非对称故障时优化电压恢复过程，减少功率振荡，提高系统动态稳定性^[75]。

在弱电网条件下，跟网型变流器容易受低电流环带宽和高频锁相环(phase locked loop, PLL)带宽的影响而失稳，构网型变流器(grid-forming converter, GFM)成为一种重要的技术手段^[76]。研究表明，GFM 在 LVRT 期间可通过电压幅值控制提供额外的输出阻抗，提高系统在强电网和弱电网中的稳定性^[77-78]。其基本控制架构和等效电路图如图 7(a)所示，对变流器的输出电压幅值与相位进行控制，

确保并网点电能质量；图 7(b)为虚拟同步机控制(virtual synchronous generator, VSG)，通过模拟同步发电机的惯量与阻尼特性，对有功功率和无功功率进行控制，改善电网故障时的频率与电压支撑能力。图 7 中： P_g 和 $P_{g,ref}$ 分别为受端换流器输出无功功率及其给定值； U_{ref} 为换流器交流电压有效值的实测值和指令值； ω_{ref} 为 VSG 所控公共连接点交流电压的频率给定值； K_p 为有功-频率下垂系数； K_q 为无功-电压下垂系数； J_{vir} 为虚拟转动惯量； D_p 为虚拟阻尼系数。其中， J_{vir} 的大小显著影响动态调频性能^[79]，虚拟惯量可以延缓频率跌落和上升速率，为保护系统和一次调频争取时间。较小的 J_{vir} 会增大频率变化率，虽可加快频率恢复、避免后续扰动叠加，但可能扩大频率偏差；较大的 J_{vir} 能减小频率偏差幅值，却会延长系统恢复时间并加剧有功功率振荡，若在频率未达稳态时发生二次扰动，则调节可能恶化甚至因超调越过不稳定平衡点导致失稳。其物理本质在于利用直流电容电压与频率的动态耦合，在电网频率突变时快速释放或吸收能量，提供无通信的惯性支撑。相较之下，跟网型变流器缺乏惯性支撑能力，频率波动剧烈，且在弱电网中 PLL 易失锁导致控制失效。阻尼参数 D_p 则直接决定系统振荡特性，故障穿越时依赖阻尼特性加速功率振荡衰减，配合惯量控制实现快速稳态恢复。较小的 D_p 使系统处于欠阻尼状态，动态响应快但功率振荡幅度大、衰减慢，存在暂态失稳风险；较大的 D_p 可有效抑制振荡幅值并加速衰减，使频率变化更平缓，但会降低动态响应速度，延长稳态恢复时间，若在恢复期遭遇二次扰动可能因调节滞后加剧问题，而跟网型变流器本身缺乏主动阻尼机制，故障后振荡持续时间长且恢复依赖电网强度。

构网型换流站与多端海上风电系统的故障穿越协同机制主要分为 3 类。第 1 类是从设备层面出发，风电机组均采用跟网/构网混合模式控制的并网变流器，刘航等提出通过故障期间切入优化的虚拟阻抗设计，确保电压跌落期间 VSG 的安全稳定运行，但仅通过优化调整并网点逆变器控制算法实现故障电压穿越比较片面^[80]。杨晓宇给出了一种基于 VSG 技术的 LVRT 方案，主动参与海上风电系统的调压，从而增强 PMSG 风电机组的主动支撑能力^[81-82]。王德胜等人提出通过改进 VSG 有功环实现功率补偿，增加系统对外频率支撑，从而减小母线电压波动，而无功环通过主动调节向电网注入无功电流，

促进网端电压恢复^[83]。SHI Kai 等人结合比例-谐振控制和相角反馈跟踪技术, 实现了 GFM 在 LVRT 期间的模式切换和电压稳定^[84]。代鹏程等指出直流电压同步的 GFM 方案在切换时易引发电压暂态冲击, 通过矢量分析法确定平滑切换条件, 采用“平均值继承+延时切换”策略将切换信号延迟至电流指令扰动最小时刻, 可有效抑制高风速场景下的随机扰动与暂态冲击, 进一步提升切换性能^[85]。第 2 类是从系统层面跟网型和构网型风电机组的配置出发, 在多数跟网型发电单元运行的系统中加入部分构网型发电单元, 以形成系统级的配置混合。H. X. 等指出 GFM 在低频段呈现的“正电阻+电感”特性可有效抑制 GFL 因“负电阻+电容”特性引发的振荡, 基于此探究了系统所需要配置的构网型风机数量, 但没有考虑不同故障和电网强度下的构网型风机比例配置问题^[86]。罗澍忻等研究了跟网型/构网型直驱风电场的并网稳定性并提出了风场内配置构网型风机容量的计算原则, 但未考虑电缆连接线路对系统稳定性的影响, 且未验证所采用聚合方法和聚合模型的准确性^[87]。王奕宁等利用容量加权法和等功率损耗法对跟网型-构网型混合直驱风电场并网系统进行聚合^[88]。在聚合模型的基础上, 改变风电场内构网型风机所占比例, 探究了其临界等效短路比之间的关系。第 3 类则是从场站控制层面出发, 采用系统级分层控制, 以场站级 GFM 作为功率外环, 其输出功率指令通过通信控制场站内的风电机组, 以形成场站级的混合模式调度控制。崔学深等为解决远海风电场与陆上电网频率解耦问题, 提出基于匹配控制的 VSC-HVDC 双端对称联动调频, 实现了无通信的惯性与一次调频响应^[89]。X. L. 等则提出全构网型系统可最大化频率支撑效果, 风场惯性响应与 MMC 的有功功率增发形成合力, 提供更持久的有功支持^[90]。

3.1.2 增加硬件辅助设备

加装硬件保护电路是提升海上风电系统 LVRT 能力的关键技术方向, 其核心在于通过 Crowbar 电路快速投入旁路释能电阻, 限制转子过电流及变流器电压骤升, 避免机组脱网; 同时, 借助耗能装置 Chopper 电路实时消纳故障期间的不平衡功率, 确保低电压穿越过程中系统持续稳定运行。Chopper 电路主要为装设在风电场侧的 AC Chopper 和直流线路上的 DC Chopper, 如图 8 所示。

早期工程以 ABB 公司提出的集中式直流耗能

装置^[91]为代表, 该方案在德国 BorWin1、DolWin2 等工程中成功应用, 其核心结构由 IGBT 串联耗能电阻构成, 通过比例控制器根据直流电压偏差动态调节电阻投切时间^[92]。此类方案虽响应速度快、工程成熟度高, 但需按最大故障功率设计耗能装置, 导致设备体积庞大、投资成本高昂。为此, Xu B 等提出将集中式 DC Chopper 布置于陆上换流站直流侧, 在海上风电 LVRT 期间, 利用直流电压阈值触发控制, 降低了海上设备复杂度, 将直流电压上升率限制至更低的速率内^[91]。为进一步平衡成本与性能, 许多学者转向混合式拓扑研究。NENTWIG C 等融合分布式与集中式结构, 在 LVRT 过程中通过分级投切策略将功率控制精度提升至 $\pm 2\%$, 减少了开关损耗^[92]。张静等针对混合式 DC Chopper 的电容均压难题, 在 HBSM 子模块中增设辅助稳压支路, 降低电压波动^[93]。张浩等则提出了换流器集

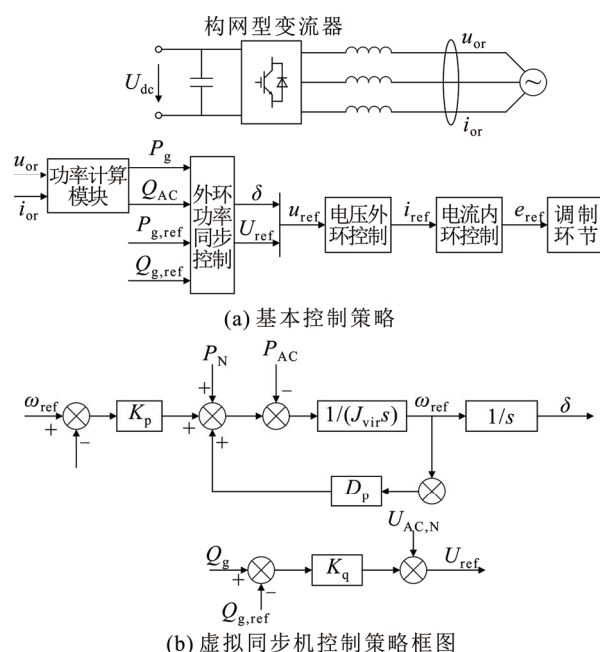


图 7 构网型逆变器拓扑结构及控制策略

Fig.7 Topology and control strategy of grid-forming inverter

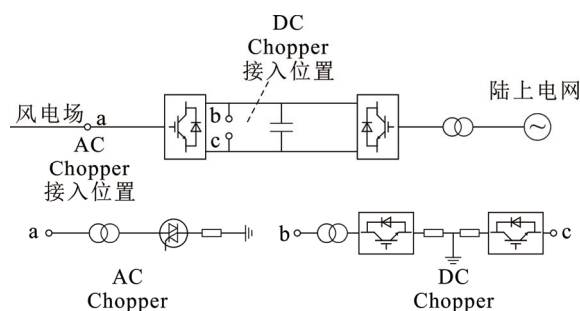


图 8 Chopper 电路接入示意图

Fig.8 Schematic diagram of Chopper accessed

成方案,在 MMC 子模块内部嵌入耗能支路,省去独立 DC Chopper 设备,系统成本降低 30%,但在 LVRT 期间子模块热应力问题仍制约其规模化应用^[94]。与此同时,桥臂级耗能技术通过 MMC 换流器桥臂电流反馈精准分配功率,在 LVRT 时将直流电压波动抑制在 $\pm 5\%$ 以内,但对子模块封装工艺提出更高要求^[95]。柔性泄能电阻概念的提出标志着硬件保护电路进入参数动态优化阶段^[96]。该方案基于 MMC-HVDC 系统安全边界分析,设计阻值可变的泄能电阻以提升系统稳定裕度,但工程中阻值切换精度与散热设计仍是瓶颈。

电网侧加装电压调节设备是提升海上风电系统 LVRT 能力的重要途径,其核心是通过快速注入无功功率,调节并网点电压形态,将电网侧的严重电压跌落转化为风机出口端的轻度跌落,从而降低对风电场 LVRT 能力的要求。早期研究聚焦于动态无功补偿装置,如静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)。纪蔚涛等指出, SVC 通过晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)调节并联阻抗,可在电压跌落时快速注入无功电流以实现 LVRT^[97-98]。雷邦军等进一步验证 SVC 能将三相不平衡故障转化为对称跌落,简化控制复杂度,降低 LVRT 实现难度,但其补偿能力受电压跌落深度限制,且响应速度较慢^[99]。相比之下, STATCOM 采用全控型器件实现无功动态调节,响应时间快,且输出无功电流与电网电压无关,在电压深度跌落时仍能维持 1.2 倍额定值的无功支撑,但高昂的成本与瞬时大电流冲击制约了其大规模应用^[100]。为缓解大电流冲击问题,张智勇等提出引入动态电压调节器(dynamic voltage restorer, DVR),通过串联注入受控电压抵消电网跌落,仅需补偿电压差额,能量需求较 STATCOM 减少 60%,但需配置储能单元提供短时能量缓冲,且控制算法复杂度显著增加^[101]。混合方案成为近年研究热点,王虹富提出 STATCOM 与串联动态制动电阻(series dynamic braking resistor, SDBR)协同控制,STATCOM 提供快速无功支撑,SDBR 通过耗能降低传输功率,2 者配合可将故障期间风机机端电压稳定在 0.85 倍额定值以上,同时减少 STATCOM 容量需求,但 SDBR 的电阻损耗与散热设计仍是工程难点^[102]。

随着储能技术的发展,基于储能设备的海上风电 LVRT 方案,正逐渐替代传统耗能电阻并成为新

一代研究热点。其核心思路是通过释放存储能量,补偿电网功率缺额,避免因功率突变导致电压进一步跌落。早期研究以超级电容储能(super capacitor energy storage system, SCESS)为主,刘诗涵提出将 Crowbar 耗能电阻替换为 SCESS,如图 9 所示^[103]。利用其毫秒级响应速度与高循环储能寿命吸收直流母线过电压能量,在避免电阻发热的同时将 LVRT 期间母线电压波动抑制在较小的范围内。在此基础上,王鹏等人设计了基于双向 DC-DC 变换器的 SCESS 控制架构,通过动态调节充放电功率实现机网侧功率平衡^[104]。杨玉坤等人进一步结合网侧 MMC 换流器的电流分配策略,在电网电压跌落期间向电网注入一定的动态无功,缩短电压恢复时间^[105]。然而, SCESS 的能量密度限制导致其难以应对长时间故障,为此薛易等人提出超级电容与锂电池混合储能系统,超级电容处理瞬态功率冲击,锂电池提供持续功率支撑,降低直流母线电压峰值,延长系统寿命,但尚未针对 LVRT 过程中不同时间尺度的功率需求优化控制策略^[106]。另一技术路线聚焦于超导磁储能(superconducting magnetic energy storage technology, SMES),吴俊玲等验证了 SMES 在 50 kA 级瞬时放电能力下的稳压效果,其无损特性使故障期间效率提升至 98%,远超传统 Chopper 方案,但现有研究未明确 SMES 在 LVRT 期间与变流器控制策略的协同机制,且超导材料的低温维护成本与工程化适配问题仍待解决^[107]。

3.2 HVRT 策略

海上风电 VSC-HVDC 的受端交流电网和直流线路中的故障过电压问题本质上都是功率不平衡导致的,可以通过对系统中的有功或无功功率进行调节,从而实现过电压的抑制。对于送端交流电网来说,其风电场侧与 VSC 换流站侧均体现为电力电子变流器与变压器串联的结构,无法通过功率调节实现过电压抑制。目前对于海上风电送出系统 HVRT 能力的研究相对较少,但基本也都是从 2 方面进行

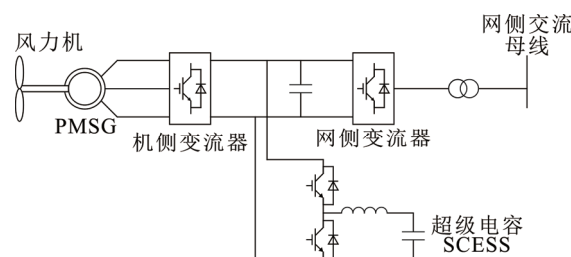


图9 SCESS接入示意图

Fig.9 Schematic diagram of SCESS access

改善: 优化控制策略与加装辅助设备。

3.2.1 优化控制策略

关于提升海上风电送出系统 HVRT 能力的控制策略研究, 同样从 3 个层面进行展开, 以增强高压故障穿越能力。

1) 单机优化控制策略。针对风机已有的控制器进行优化可以有效提高风电机组 HVRT 能力, 提升单台风机对过电压的耐受能力, 抑制直流母线过压。Liu C 等针对直流母线电压稳定性问题, 创新性提出电压切换控制策略, 通过调节故障期间母线电压, 减少背靠背变流器损耗, 然而该方法在不对称故障下存在功率分配不均的风险^[108]。沈可心等提出直驱风机的“类虚拟同步发电机”策略, 利用转子动能对直流母线电压提供惯性支撑, 引入惯性支撑系数量化评估风机惯性能力, 并通过前馈补偿抑制电压突变^[109]。秦垚等提出新型直流电压同步控制方法, 解决电网频率变化时直流电压失稳问题, 使同步频率精准映射电网频率变化, 误差 $<0.5\%$ 。这一阶段的控制策略虽提升了单机抗扰能力, 但未解决风电场与 VSC-HVDC 的交互问题, 无法解决多端海上风电系统功率失衡的问题^[110]。

2) 场群协调控制策略。随着研究深入, 学者开始探索风机与海上 VSC 换流站的联合控制, 通过协调风电场集群与柔直换流站, 抑制过电压引发的功率失衡。孙丽玲等突破了单一变流器优化思路, 建立机组柔性电压闭环模型, 通过正/负序无功电流的协同分配提升不对称故障穿越能力, 负序电流抑制率提高至 90% 以上, 其主要揭示了转子侧无功电流的动态耦合规律, 但该研究未考虑网侧变流器的功率支撑潜力^[111]。与此同时, 海上 VSC 换流站控制策略研究取得突破, H. Zhou 等开创性地利用 MMC 子模块电容的储能特性, 通过能量解耦控制吸收过剩功率, 子模块电容吸收功率可达额定功率的 120%, 首次实现零硬件成本的故障穿越, 但该方案完全牺牲了陆上换流站的无功支撑能力, 导致受端电网恢复速度受限^[112-113]。为弥补这一缺陷, 贾科等提出子模块电容与耗能电阻的混合控制架构, 增强了功率消纳能力, 将直流母线电压峰值波动降低 25%, 显著提升了系统高压穿越时的稳定性^[114]。

3) 多端协同控制策略。其主要目标为跨换流站协调功率/电压控制, 抑制多端系统过电压连锁反应。赵平等提出了预测式分级控制策略, 通过部分换流站的即时能量控制与剩余换流站的电压预测触

发机制, 实现了故障功率的动态分层消纳, 直流电压越限概率降低 80%, 特别在通信延迟时表现出优越的适应性^[115]。Silva B 等在此基础上引入多端直流电网的跨站协调机制, 通过 VSC-HVDC 与风机的联动控制抑制 HVRT 期间的直流电压上升, 但未解决涡轮机转子转速约束导致的调节受限问题^[116]。Moawwad A 等提出了 VSC-HVDC 重配置方案, 通过串联/并联拓扑切换在故障期间重构功率路径, 该策略在增强电网电压分布均匀性方面效果显著, 但需要复杂的开关阵列支持, 实施成本较高^[117]。J. Fu 等则采用 VSG 技术模拟同步发电机惯性特性, 既缓解了暂态过电压又增强了系统阻尼, 不过超级电容的循环寿命限制仍是产业化应用的瓶颈^[118-119]。

3.2.2 加装辅助设备

加装辅助设备在海上风电 LVRT 和 HVRT 中具有通用性, 但其应用具有差异化。在海上风电 HVRT 期间 DC Chopper 主要用于抑制过电压, 防止直流母线电压失控。Yan L 等提出在陆上换流站直流母线侧并联 DC Chopper 的方案, 通过直流电压阈值触发投切吸收故障多余能量, 但其简单的阈值控制未考虑多端系统功率动态分配问题^[120]。针对这一局限, Xu B 系统梳理了 DC Chopper 拓扑演变规律, 发现传统拓扑在双向功率消纳和子模块能量管理上存在瓶颈, 进而提出基于模块化多电平结构的新型 DC Chopper, 通过重构子模块充放电路径实现 HVRT 期间的能量动态均衡, 但分层投切策略需协调上百个子模块状态, 控制算法复杂度呈指数级增长, 如东工程实证中暴露出海上高盐雾环境下导致的 IGBT 驱动信号失稳问题, 实际工程适用性仍需验证^[121]。在多端系统协同层面, 直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)可通过快速开断故障电流路径, 与 DC Chopper、储能设备配合实现故障功率的精准切分与路径重构。当故障引发直流侧过电压时, 直流断路器可优先隔离非关键负载或冗余支路, 为 DC Chopper 和子模块电容争取能量吸收时间, 避免过电压扩散至核心设备^[122]。然而, 现有研究对 DCCB 在 HVRT 期间的分断时序与多设备协同控制策略仍缺乏系统性设计, 其开断过程中产生的暂态过电压与电磁干扰问题亟待解决。在无功补偿领域, 叶盛峰等突破单向控制思维, 建立 STATCOM 正/负序无功解耦模型, 在电网电压骤升至 1.3 倍额定值的极端过电压工况下实现容性无功精准吸收, 大大缩短过电压抑制时间^[123]。赵继超等

通过建立海上风电场无功特性图谱发现, 在 HVRT 初期电压处于 1.2 倍额定值以下区间时, SVG 性价比更有优势, 而 STATCOM 在严重故障时仍能保持 95% 的无功输出能力, 由此提出分级配置原则: SVG 承担基础无功调节, STATCOM 作为应急储备^[124]。杨航早期采用直流侧并联超级电容的方案, 通过与风机减载控制配合, 将子模块过电压限制在 1.15 倍额定值, 但外置储能系统使平台建设成本增加^[125]。Yunus AMS 探索了超导磁储能技术, 其响应速度和循环效率显著优于传统电池, 但液氮冷却系统导致维护成本激增, 且多次充放电后性能衰减问题突出^[126]。在过电流抑制与过电压防护方面, Jin 等进一步融合串联动态电阻, 提出“电阻分级激活”策略: 20% 过流时由动态电阻线性调节, 50% 过流时触发 Crowbar, 该方案可以有效地降低 IGBT 结温波动, 但海底电缆分布电容引发的谐振问题仍未解决^[127]。周威等通过建立断路器多重复燃模型, 进一步发现 HVRT 期间电缆电容与风机端口电容形成的 LC 回路会导致过电压增大 3~5 倍, 最终提出避雷器优化布置方案, 在电缆接头每 1 km 布置 1 组避雷器后, 过电压复现概率大大降低^[128]。

4 海上风电场故障穿越工程案例验证

对海上风电 VSC-HVDC 故障穿越研究已开展过相关工程案例验证。如针对陆上电网或直流侧发生故障时直流系统出现有功功率不平衡、导致直流过电压这一问题, DoIWin1 海上风电项目采用的解决方案是依靠大型直流斩波器, 缓冲陆上电网干扰, 耗散过剩功率, 并利用 STATCOM 模式提供无功支撑, 实现海上风电场与陆上电网的故障解耦。文献 [129] 对系统容量为 800 MW、直流母线电压为 ± 320 kV、海上交流输电线路额定电压为 155 kV、陆上交流输电线路额定电压为 400 kV 的 DoIWin1 海上风电项目, 陆上发生持续时间为 150 ms 三相接地故障时陆上 PCC 剩余电压约 5% 的故障进行了仿真, 结果如图 10 和图 11 所示, 其中基准功率为 800 MVA, 直流侧基准电压为 320 kV, 海上交流侧基准电压为 155 kV, 陆上交流侧基准电压为 400 kV。

从图 10 中可以看出, 故障瞬间, 陆上站 PCC 点电压骤降约额定值的 5%, 与故障设定一致, 持续 150 ms 故障期间, 故障清除后, 电压逐步恢复至正常水平; 直流侧电压因功率不平衡出现波动, 随着斩波开关脉冲触发, 直流斩波器投入工作, 通过

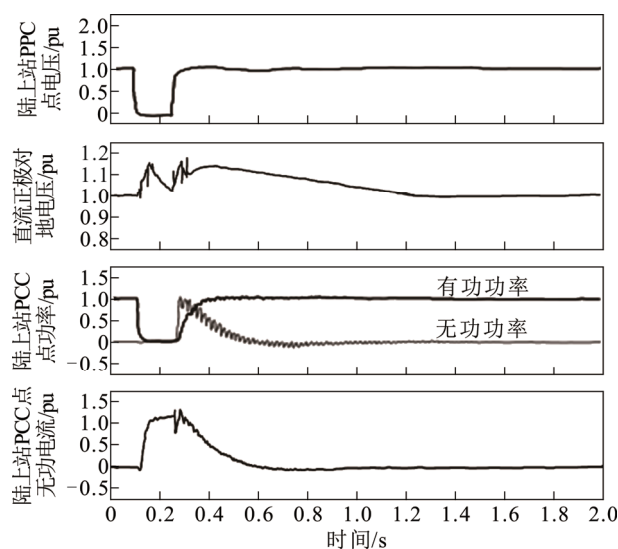


图 10 陆上网侧三相接地故障下陆上 VSC 侧电气应力

Fig.10 Electrical stresses on the onshore VSC side under three-phase ground faults on the onshore grid side

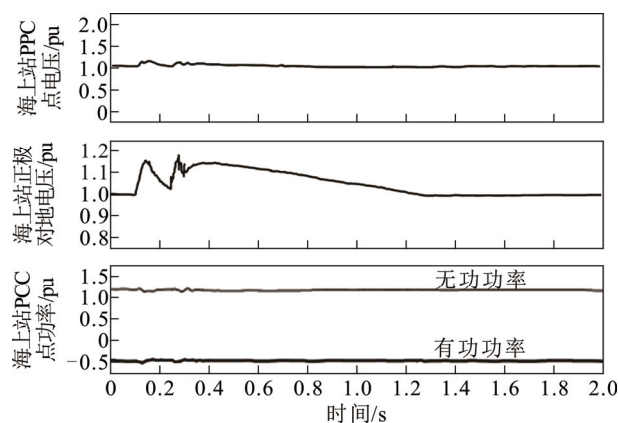


图 11 陆上三相接地故障下海上风电 VSC 侧电气应力

Fig.11 Electrical stresses on the offshore wind power VSC side under three-phase ground faults on the onshore grid side

耗散过剩功率使得陆上站 PCC 点电压逐渐趋于平稳, 避免了过电压风险, STATCOM 模式启动后, 无功功率快速响应, 通过注入无功电流支撑陆上电压。从图 11 中可以看出, 海上电压和功率几乎不受陆上故障扰动的影响, 仅在故障初期出现微小扰动, 随后迅速恢复稳定, 仿真验证了通过直流斩波器耗散功率和 STATCOM 无功支撑, 有效隔离了陆上故障对海上系统的影响。

如东海上风电柔直工程同样采用直流耗能装置实现故障穿越^[130], 然而, 传统降压法以直流电压抬升作为被动判据, 且下垂系数定性为线性常数, 使得不同故障下两侧功率难以精准快速匹配。此外, 传统方法投入的耗能容量通常按风电场额定容量设

计,增加了工程造价。基于此,贾科等提出功率精准匹配的海上风电 VSC-HVDC 电网侧故障穿越方法^[114]。以对称故障为例,分别设置电压跌落至 70%、50%和 30%的三相短路故障,取 $U_{dcmin}=0.8$ pu 表示直流母线最低允许电压,其中:系统容量为 1 200 MW,直流母线电压为 ± 320 kV,交流输电线路额定电压为 220 kV。为统一参数分析标准,基准功率为 1 200 MVA,直流侧基准电压为 320 kV,交流侧基准电压为 220 kV。由图 12 可知,故障越严重,GSMMC 控制直流电压越低,但始终高于最低值 0.8 pu,验证了耗能装置投入可靠性,且两侧功率匹配速度快、延时短;而由图 13 可知,传统降压法依赖直流电压上升被动动作,降压系数固定,导致故障期间直流电压维持高压,且级联动作的阶梯时延较长,VSC-HVDC 两侧功率匹配耗时较长。贾科等提出的方法有效降低了故障期间的直流电压,避免了 VSC-HVDC 高压运行时的积累损伤,同时大幅缩短了动作延时,实现精准安全可靠的故障穿越。

除了上述项目外,Sofia 工程项目考虑到长距离电缆易导致故障电流激增的问题,采用陆上换流站 STATCOM 模式切换与分布式耗能装置协同策略,实现了风场与故障电网的电气解耦,可以有效避免传统闭锁导致的整场脱网,保障英国弱电网下故障期间电压稳定,并减少风机频繁启停损耗^[131]。德国 DolWin5 工程项目基于双极 MMC 换流站,采用混合子模块,使换流站本身具备一定的故障自清除能力,通过混合直流断路器实现双极短路时闭锁故障极且非故障极维持 60%功率传输,结合陆上 ACCC 控制与直流斜率调节,实现故障清除后极短时间内系统恢复,显著提升德国北海高故障率海域的供电韧性^[132]。Dogger Bank 工程项目创新性地采用风机级超级电容储能与 MMC 子模块冗余控制,利用子模块电容能量解耦使故障期间直流电压稳定于 0.95 倍额定值以上,无需外置耗能装置,这种分布式架构避免了集中式 Chopper 的高成本,且风机可维持 100%电压跌穿能力^[133]。Baltic Link 2 项目规划采用 Bornholm 能源岛同步调相机与风场侧飞轮储能设计基于能源岛的多层级缓冲体系,依托 CIGRE 多端直流控制架构实现功率路径自动切换,支撑对高压穿越与频率稳定的双重需求。

5 研究展望

目前关于大规模海上风电 VSC-HVDC 故障穿

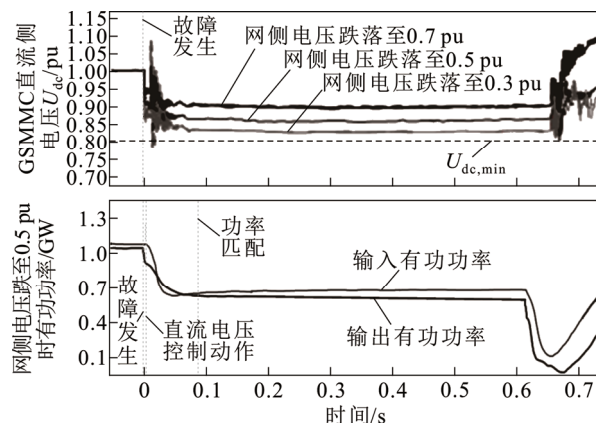


图 12 故障穿越过程中各电气量仿真波形

Fig.12 Simulation waveforms of various electrical quantities during FRT

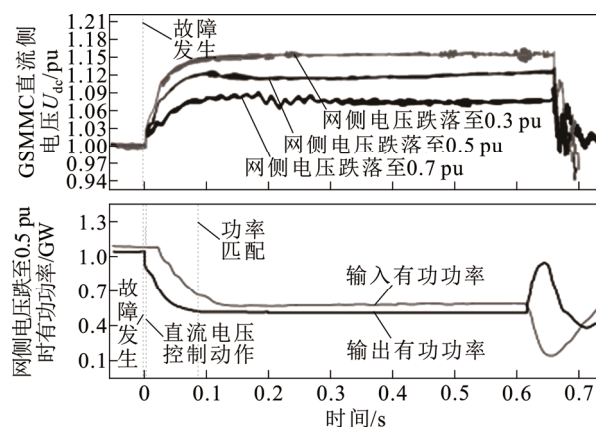


图 13 传统降压法在故障穿越过程中各电气量仿真波形

Fig.13 Simulation waveforms of various electrical quantities during FRT with the traditional voltage drop control

越特性已有系列相关报道,但仍有以下问题需要进一步开展深化研究:

1) 线性化模型在描述海上风电高压柔直送出多端系统的故障暂态过程时存在显著局限性,主要体现在 3 个方面:其一,机电耦合非线性特性的缺失。线性化模型通常假设风机运行在 MPPT 线性区间,忽略了叶片失速后气动特性的非线性突变可能引发的“气动-机械-电磁”耦合振荡。此外,线性化模型将 MMC 简化为平均电压源,未考虑子模块电容充放电过程的时空差异性,导致环流振荡风险被低估。其二,分布式参数简化带来的暂态分析偏差。集总参数的简化可能导致故障电流计算误差,既无法准确计算分布电容效应导致的故障电流峰值,又不能反映长电缆行波传播的时空滞后特性。其三,多端系统动态交互的降阶简化缺陷。线性化

模型假设变流器始终工作在稳定控制模式,既掩盖了故障期间跟/构网型模式切换的非线性暂态,又忽略了功率分配的饱和特性,导致控制策略设计存在潜在风险^[134]。因此,亟需突破传统线性化建模模式的局限,构建全域非线性动态模型。全面囊括风机叶片失速特性、机械损耗等非理想特性,精确考虑 MMC 子模块电容耦合效应,精准纳入海底电缆电阻、电感、电容沿电缆长度方向的分布特性,以实现故障场景下系统电磁暂态与机电暂态过程的高精度数值复现,为故障穿越控制策略的优化提供多维度、深层次的理论支撑与数据基础,助力深入剖析系统在故障条件下的行为机制。

2) 针对大规模混合海上风电场与 VSC-MVDC 交互特性,已开展多层次协调控制策略的研究,但仍需解决跨设备时空尺度功率分配及子模块能量均衡难题。在机组层,研发 VSG 与跟网型机组 Crowbar 电路的自适应协同机制,通过调节控制参数与运行模式,提升单机故障暂态功率均衡能力,但动态调节过程可能引发过大的冲击电流,威胁功率器件安全,其安全运行边界仍需明确;在风电场层,动态优化构网型变流器接入位置与参数,从整体层面解决不同类型机组功率分配不均问题,提升风电场的整体运行效率与稳定性;在系统层,考虑到通信延迟对故障穿越的影响,开发预测式分级控制策略,旨在实现多端系统故障功率时空协同高效消纳,这是后续研究的核心攻坚方向,对提升整个系统在故障状态下的韧性与可靠性具有重要意义。

3) 性能优良且稳定的硬件设备是海上风电高压柔直送出多端系统实现故障穿越的重要基础与关键支撑。潘生雄等指出现有 SMES 系统面临液氮冷却效率低(需维 4.2 K 低温)和磁体失超风险(高频充放电易引发超导带材温升 >77 K) 2 大瓶颈,导致年维护成本占设备投资 25%以上^[135]。针对这些问题,可以采用钇钡铜氧(YBCO)等高温超导材料替代传统铌钛合金,降低制冷需求,同时构建 SMES-超级电容混合储能架构,SMES 处理低频波动,超级电容应对高频冲击,显著延长设备寿命。盐雾沉积会使 IGBT 栅极驱动电阻增大,增大信号延迟,其次传统硅基 IGBT 通态损耗高,导致结温过高,易触发过热保护,使得传统 DC Chopper 在海上高盐雾环境中易出现 IGBT 驱动信号失稳的问题,可采用光纤驱动 SiC 器件协同设计,隔离电磁干扰与盐雾腐蚀,提升结温限值和开关频率。同时采用分布式

Chopper 架构,就近吸收故障能量,避免集中式 Chopper 的长电缆传输损耗。设计直流断路器与 DC Chopper 的动态协同分断策略,结合避雷器与超导磁储能系统的过电压联合抑制算法,实现故障响应速度与能量消纳效率的双重提升^[136-137]。

6 结论

本文系统综述了大规模海上风电柔直输电系统故障穿越方面关键技术等研究领域的进展情况。主要综述性内容总结如下:

1) 阐述了海上风电机组与 VSC-HVDC 在故障期间的动态耦合机理,阐明 VSC-MTDC 在不同故障场景下的能量传播路径与电压失稳机理。

2) 综述了“单机-场群-多端柔直”分层式故障穿越协调控制体系,明确了风机级快速响应保运行、场群级功率优化、柔直系统级全局协调的分层控制逻辑与功能定位。

3) 明确了硬件辅助设备在低/高电压穿越中的差异化作用,并论证了其与控制策略协同优化是实现高效可靠故障穿越的有效途径。

参考文献 References

- [1] 李志川,胡 鹏,马佳星,等.中国海上风电发展现状分析及展望[J].中国海上油气,2022,34(5):229-236.
LI Zhichuan, HU Peng, MA Jiaxing, et al. Analysis and prospect of offshore wind power development in China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 229-236.
- [2] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-474.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [3] 程 鹏,马 静,李 庆,等.风电机组电网友好型控制技术要点及展望[J].中国电机工程学报,2020,40(2):456-466.
CHENG Peng, MA Jing, LI Qing, et al. A review on grid-friendly control technologies for wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 456-466.
- [4] 张子扬,张 宁,杜尔顺,等.双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J].中国电机工程学报,2022,42(1):1-24.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-24.
- [5] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Comparison of methods for implementing virtual synchronous machine on inverters[J]. Renewable Energy & Power Quality Journal, 2012, 10(6): 734-739.
- [6] JIA L, MIURA Y, ISE T. Dynamic characteristics and stability comparisons between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[C]//Proceedings of 2014 International Power Electronics Conference. Hiroshima, Japan: IEEE, 2014:

- 1-6.
- [7] 蒋 原, 刘谨华, 陈明轩. 柔性直流输电的故障分析及保护策略综述[J]. 化工自动化及仪表, 2022, 49(6): 677-685.
JIANG Yuan, LIU Jinhua, CHEN Mingxuan. Overview of fault analysis and protection strategies for VSC-HVDC[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2022, 49(6): 677-685.
- [8] HUANG Z W, CHANG G W, LI I, et al. A study of voltage ride-through capability of an offshore wind farm during grid fault considering STATCOM enhancement[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference. Taipei, China: IEEE, 2021: 1-6.
- [9] VARLEY J. Aibel/ABB selected for Dogger Bank link: UK's first offshore wind project to employ HVDC transmission[R]. London, UK: Modern Power Systems, 2019: 39.
- [10] 黄克瑶. 捕海风 生绿电 耀湾区探访中国首个百万千瓦级海上风电场[J]. 中国三峡, 2023(3): 104-111.
HUANG Keyao. China's first million-kilowatt offshore wind farm[J]. China Three Gorges, 2023(3): 104-111.
- [11] 陈建均. 南鹏岛海上风电项目安全管理探究[J]. 中国电力企业管理, 2024(36): 34-35.
CHEN Jianjun. Exploration on safety management of Nanpeng Island offshore wind power project[J]. China Power Enterprise Management, 2024(36): 34-35.
- [12] 国网冀北电力公司. 12 项世界第一的张北柔性直流工程建成投运[J]. 云南电力技术, 2020, 48(4): 90.
State Grid Jibei Electric Power Company. Zhangbei flexible DC project with 12 world-firsts completed and put into operation[J]. Yunnan Electric Power, 2020, 48(4): 90.
- [13] 李 斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.
LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.
- [14] CHEN T, ZHANG S G, YUE W, et al. Coordinated power control strategy for the multi-terminal VSC-HVDC system[C]//Proceedings of the 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China: IET, 2016: 1-6.
- [15] 秦世耀, 齐 琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1333.
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333.
- [16] 杨 赟, 缪惠宇, 梅 飞, 等. 对称电压暂降情况下含无功补偿功能的虚拟同步发电机控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1): 53-59, 75.
YANG Yun, MIAO Huiyu, MEI Fei, et al. Virtual synchronous generator control strategy with reactive power compensation in symmetrical voltage sagging[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 53-59, 75.
- [17] 曹 炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [18] 唐英杰. 基于二极管不控整流单元的中远距离海上风电低成本送出系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
TANG Yingjie. DRU based low-cost mid- and long-distance offshore wind power transmission system[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2023.
- [19] 文 俊, 殷威扬, 温家良, 等. 高压直流输电系统换流器技术综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 16-24.
WEN Jun, YIN Weiyang, WEN Jialiang, et al. Review of converter technology for HVDC transmission systems[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 16-24.
- [20] OKBA M H, SAIED M H, MOSTAFA M Z, et al. High voltage direct current transmission-A Review, Part II-Converter technologies[C]//Proceedings of 2012 IEEE Energytech. Cleveland, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [21] ZACHIA O U, TOLEA A, LAZAROIU G, et al. Possibilities of connection for the offshore wind power plants: comparison between HVAC and HVDC-LCC[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Modern Power Systems. Cluj-Napoca, Romania: IEEE, 2017: 6-9.
- [22] 郝治国, 谢 凡, 张雨宁, 等. 远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护技术现状与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 1-18.
HAO Zhiguo, XIE Fan, ZHANG Yuning, et al. Status and prospects of relay protection technology for DC lines in distant offshore wind DC collection and transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 1-18.
- [23] 江 浩, 孙 瑜, 刘 辉, 等. 风电经柔性直流输电系统接入电网研究综述[J]. 华北电力技术, 2017(1): 1-7.
JIANG Hao, SUN Yu, LIU Hui, et al. Literature review of wind power integrated into power systems with HVDC-flexible[J]. North China Electric Power, 2017(1): 1-7.
- [24] 蔡 旭, 杨仁圻, 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.
- [25] CHAUDHURI N R, MAJUMDER R, CHAUDHURI B, et al. Modeling and stability analysis of MTDC grids for offshore wind farms: a case study on the North Sea benchmark system[C]//Proceedings of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, USA: IEEE, 2011: 259-268.
- [26] ARULAMPALAM A, RAMTHARAN G, CALIAO N, et al. Simulated onshore-fault ride through of offshore wind farms connected through VSC HVDC[J]. Wind Engineering, 2008, 32(2): 103-113.
- [27] BHUJBALE P, SAHARE R M. Fault ride-through capability enhancement of offshore wind farms connected via VSC-HVDC transmission[J]. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 2018, 5(2): 701-707.
- [28] TORRES-OLGUIN R E, ENDEGNANEW A G, D'ARCO S. Power-hardware-in-the-loop approach for emulating an offshore wind farm connected with a VSC-based HVDC[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2017: 1-6.
- [29] 张 振, 汤 翔, 毕书奇, 等. 超高压交流海上风电场升压站布置设计方法[J]. 电工技术, 2023(12): 88-91.
ZHANG Zhen, TANG Xiang, BI Shuqi, et al. Design method of booster station layout for ultra-high voltage AC offshore wind farm[J]. Electric Engineering, 2023(12): 88-91.
- [30] 王 帅, 任军辉, 姜彦涛, 等. ± 525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 11-17.
WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.

- [31] 卢毓欣, 赵晓斌, 李 岩, 等. 海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 25-31.
LU Yuxin, ZHAO Xiaobin, LI Yan, et al. Main electrical connection of VSC-HVDC converter stations for offshore wind farm integration[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 25-31.
- [32] 梅 念, 苑 宾, 乐 波, 等. 对称单极接线柔直系统联结变阀侧单相接地故障分析及保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 116-122.
MEI Nian, YUAN Bin, YUE Bo, et al. Analysis and protection of single-phase-to-ground fault on valve side of interface transformer in VSC-HVDC system with symmetrical monopolar configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 116-122.
- [33] 姜崇学, 李 钢, 张宝顺, 等. 长距离直流电缆对柔性直流系统故障影响分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 112-118.
JIANG Chongxue, LI Gang, ZHANG Baoshun, et al. Analysis of the influence of long-distance DC cable on the fault of flexible HVDC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 112-118.
- [34] 杨大业, 项祖涛, 罗煦之, 等. 永磁型风机海上风电送出系统甩负荷故障暂时过电压影响因素分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 111-118.
YANG Daye, XIANG Zutao, LUO Xuzhi, et al. Analysis on influence factors of temporary overvoltage of load rejection fault of offshore wind power transmission system of permanent magnet synchronous generator[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 111-118.
- [35] 王晟嘉. 海上风电场分闸暂态过电压研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
WANG Shengjia. Analysis of transient overvoltage of switching off operation in the off-shore wind farm[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2020.
- [36] ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. Cosine similarity based line protection for large-scale wind farms[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7): 5990-5999.
- [37] 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.
- [38] 宫一品. 海上风电经柔直送出系统送端交流故障分析及协调控制[D]. 济南: 山东大学, 2023.
GONG Yipin. Fault analysis of offshore AC system and coordination control at MMC-HVDC connected with offshore wind farm[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2023.
- [39] 尹 俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低穿控制的混合型风电场短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 99-110.
YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short-circuit current and fault analysis method of hybrid wind farm with low voltage ride-through control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 99-110.
- [40] 宋伟宏. 基于 MMC-HVDC 并网的海上风电柔直系统交流故障与小信号稳定分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
SONG Weihong. Research on AC fault and small signal stability of offshore wind power system based on MMC-HVDC[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [41] 王霄鹤, 杨林刚, 林 斌, 等. 海上风电柔直系统送端电网故障过电压机理分析及抑制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2688-2697.
WANG Xiaohu, YANG Lingang, LIN Bin, et al. Mechanism and restraining strategy of the sending-end grid overvoltage in offshore wind farm-flexible HVDC transmission system under grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2688-2697.
- [42] 范 鹏, 刘 飞, 王 建, 等. 大规模新能源接入系统暂态过电压研究综述[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 94-102.
FAN Peng, LIU Fei, WANG Jian, et al. Review on of research of transient overvoltage of large-scale new energy access to power system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 94-102.
- [43] 林 毅, 唐雨晨, 欧鉴贤, 等. 考虑送端影响的海上风电经柔直并网系统电压支撑强度量化分析[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4524-4533.
LIN Yi, TANG Yuchen, OU Jianxian, et al. Quantitative analysis on voltage support strength of offshore wind power grid-connected system via VSC-HVDC considering the influence of sending-side grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4524-4533.
- [44] 易 杨, 沈 豫, 林章岁. 柔性直流输电系统贡献交流短路电流的特性分析及计算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2150-2158.
YI Yang, SHEN Yu, LIN Zhangsui. Characteristics and analysis methods of AC short-circuit current contributed by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2150-2158.
- [45] 唐 溢, 李保宏, 曾 蕊, 等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 40-47.
TANG Yi, LI Baohong, ZENG Rui, et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 40-47.
- [46] 孙华东, 于 琳, 赵 兵. 基于暂态过电压约束的新能源并网系统电压支撑强度量化分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4207-4217.
SUN Huadong, YU Lin, ZHAO Bing. Quantitative analysis of system strength of renewable energy generation grid-connected system based on transient overvoltage constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4207-4217.
- [47] ZHANG H B, GRUSON F, RODRIGUEZ D M F, et al. Overvoltage limitation method of an offshore wind farm with DC series-parallel collection grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 204-213.
- [48] 陈 蕊. 新能源柔直送出系统故障特征及保护配置方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
CHEN Rui. Study on fault characteristics and protection configuration scheme of MMC-HVDC connected renewable power system[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2019.
- [49] 李伟杰. MMC-MTDC 系统直流线路短路故障特性分析与故障电流计算方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
LI Weijie. Fault characteristics analysis and fault current calculation method of DC lines in MMC-MTDC system[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [50] GOWAID I A, ADAM G P, MASSOUD A M, et al. Quasi two-level operation of modular multilevel converter for use in a high-power DC transformer with DC fault isolation capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 108-123.
- [51] 荣海媚. MMC-MTDC 系统故障定位与控制保护策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
RONG Haimei. MMC-MTDC system fault location and control protection strategy research[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2021.
- [52] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.

- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(1): 1-7.
- [53] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第2部分: 海上风电: GB/T 19963.2—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind power plant to power system-part 2: offshore wind power[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2024.
- [54] 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): 3758-3770.
- 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): 3758-3770.
- [55] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(2): 75-85.
- FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(2): 75-85.
- [56] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(7): 57-64.
- HUANG Xiaoqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 57-64.
- [57] KIM C, GUI Y H, CHUNG C C. A coordinated LVRT control for a PMSG wind turbine[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 8758-8763.
- [58] 贾波, 张辉. 直驱永磁同步风电系统低电压穿越控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2015, 27(2): 15-19.
- JIA Bo, ZHANG Hui. Low voltage ride through control strategy for direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2015, 27(2): 15-19.
- [59] 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 Ya'nan, 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.
- [60] BADIHI H, ZHANG Y M, PILLAY P, et al. Fault-tolerant individual pitch control for load mitigation in wind turbines with actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(1): 532-543.
- [61] WANG D, HOU M Q. Travelling wave propagation process analysis in hybrid star-connected multi-terminal LCC-MMC-HVDC transmission system[C]//*Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*. Xi'an, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [62] LI W X, ZHU M, CHAO P P, et al. Enhanced FRT and postfault recovery control for MMC-HVDC connected offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(2): 1606-1617.
- [63] MOHAMMADI M, AVENDANO-MORA M, BARNES M, et al. A study on fault ride-through of VSC-connected offshore wind farms[C]//*Proceedings of 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Vancouver, Canada: IEEE, 2013: 1-6.
- [64] NANOU S I, PAPATHANASSIOU S A. Grid code compatibility of VSC-HVDC connected offshore wind turbines employing power synchronization control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 5042-5050.
- [65] TZELEPIS D, ROUSIS A O, DYŚKO A, et al. Enhanced DC voltage control strategy for fault management of a VSC-HVDC connected offshore wind farm[C]//*Proceedings of the 5th IET International Conference on Renewable Power Generation*. London, UK: IET, 2016: 1-6.
- [66] RAMTHARAN G, ARULAMPALAM A, EKANAYAKE J B, et al. Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2009, 3(4): 426-438.
- [67] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. *电网技术*, 2014, 38(7): 1739-1745.
- LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [68] ERLICH I, FELTES C, SHEWAREGA F. Enhanced voltage drop control by VSC-HVDC systems for improving wind farm fault ride-through capability[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(1): 378-385.
- [69] JIA K, DONG X Z, WEN Z W, et al. Harmonic injection based fault ride-through control of MMC-HVDC connected offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1796-1806.
- [70] 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, 65.
- 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, 65.
- [71] ELGAMASY M M, IZZULARAB M A, ZHANG X P. Technical treating and riding-through symmetrical grid faults for MMC-HVDC connected offshore wind farms[C]//*Proceedings of 2022 23rd International Middle East Power Systems Conference*. Cairo, Egypt: IEEE, 2022: 1-6.
- [72] 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.
- [73] 赵平, 倪世杰, 黄宇昕, 等. 海上风电柔性直流系统与风电机组协调控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(8): 62-70.
- ZHAO Ping, NI Shijie, HUANG Yuxin, et al. Coordinated control strategy for flexible DC system and wind turbine for offshore wind power[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2023, 35(8): 62-70.
- [74] 江守其, 李国庆, 辛业春, 等. 提升柔性直流电网盈余功率消纳能力的协调控制策略[J]. *高电压技术*, 2021, 47(12): 4471-4482.
- JIANG Shouqi, LI Guoqing, XIN Yechun, et al. Coordinated control strategies to enhance the capability of surplus power consumption for DC grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(12): 4471-4482.
- [75] DENG J P, YAO L Z, CHENG F, et al. An enhanced voltage correction control strategy for asymmetrical fault ride-through of offshore wind power using MMC-HVDC[C]//*Proceedings of 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering*. Guangzhou, China: IEEE, 2023: 1-6.
- [76] FU X K, SUN J J, HUANG M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: a

- comparative study[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7832-7840.
- [77] WANG X F, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources-an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 115-134.
- [78] NGAMROO I, SURINKAEW T, MITANI Y. Intelligence-driven grid-forming converter control for islanding microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2025, 13(4): 1310-1322.
- [79] 骆颖杰. 基于虚拟同步发电机的惯量阻尼自适应控制策略[J]. 船电技术, 2025, 45(1): 56-61.
- LUO Yingjie. Adaptive control strategy of inertia damping based on virtual synchronous generator[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2025, 45(1): 56-61.
- [80] 刘航, 王跃, 刘永慧, 等. 基于定量设计虚拟阻抗的 VSG 低电压穿越策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 245-256.
- LIU Hang, WANG Yue, LIU Yonghui, et al. The LVRT strategy for VSG based on the quantitatively designed virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 245-256.
- [81] 杨晓宇. 基于虚拟同步发电机的永磁直驱风电机组主动支撑控制策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
- YANG Xiaoyu. Virtual synchronous generator based control strategy with pmsg for system active support[D]. Jilin, China: Northeast Electric Power University, 2019.
- [82] 周鹏, 张新燕, 邱强, 等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 71-78.
- ZHOU Peng, ZHANG Xinyan, DI Qiang, et al. Pre-synchronous grid-connection strategy of DFIG-based wind turbine with virtual synchronous generator control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 71-78.
- [83] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2164-2174.
- WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of pmsgs based on virtual synchronization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2164-2174.
- [84] SHI K, SONG W T, XU P F, et al. Low-voltage ride-through control strategy for a virtual synchronous generator based on smooth switching[J]. IEEE Access, 2018, 6: 2703-2711.
- [85] 代鹏程, 张兴, 谢震. 构网型全功率风电逆变器的平滑模式切换策略[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1589-1598.
- DAI Pengcheng, ZHANG Xing, XIE Zhen. Smooth mode switching strategy for grid-forming full-power wind turbine converters[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1589-1598.
- [86] XIN H H, LIU C X, CHEN X, et al. How many grid-forming converters do we need? A perspective from small signal stability and power grid strength[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 623-635.
- [87] 罗澍析, 韩应生, 余浩, 等. 构网型控制在提升高比例新能源并网系统振荡稳定性中的应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 39-48.
- LUO Shuxin, HAN Yingsheng, YU Hao, et al. Application of grid-forming control in improving the oscillation stability of power systems with high proportion renewable energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 39-48.
- [88] 王奕宁, 向往, 张浩博, 等. 构网型直驱风力发电机组比例优化配置分析[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 490-500.
- WANG Yining, XIANG Wang, ZHANG Haobo, et al. Analysis of optimal proportion configuration of grid forming direct drive wind turbine[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 490-500.
- [89] 崔学深, 张宾宾, 刘其辉, 等. 基于匹配控制的海上风电柔直送出系统联动调频控制策略与方法[J]. 现代电力, 2025, 42(3): 1-11.
- CUI Xueshen, ZHANG Binbin, LIU Qihui, et al. Interconnection frequency regulation control strategy and method for offshore wind farm and flexible direct transmission system based on matching control[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(3): 1-11.
- [90] XU L, LIU C, ZHANG J Y, et al. Grid-supporting characterization of MMC-HVDC system for offshore wind farm under different control modes: a comparative study[C]//Proceedings of 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2024: 1-6.
- [91] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97.
- XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97.
- [92] NENTWIG C, HAUBROCK J, RENNER R H, et al. Application of DC choppers in HVDC grids[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Energy Conference. Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 395-402.
- [93] 张静, 高冲, 许彬, 等. 海上风电直流并网工程用新型柔性直流耗能装置电气设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4081-4090.
- ZHANG Jing, GAO Chong, XU Bin, et al. Research on electrical design of novel flexible DC energy consuming device for offshore wind power DC grid connection project[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4081-4090.
- [94] 张浩, 王先为, 杨美娟, 等. 一种具有分布式直流耗能装置的风电柔性直流送出系统: 109873441A[P]. 2019-06-11.
- ZHANG Hao, WANG Xianwei, YANG Meijuan, et al. Wind power flexible direct current delivery system with distributed direct current energy consumption device: 109873441A[P]. 2019-06-11.
- [95] 江守其, 李国庆, 辛业春, 等. 大规模风电接入的柔性直流电网故障电流协同抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 125-134.
- JIANG Shouqi, LI Guoqing, XIN Yechun, et al. Coordinated suppression method for fault current of flexible DC power grid integrated with large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 125-134.
- [96] 蔡婷婷, 穆钢, 严干贵, 等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 166-173.
- CAI Tingting, MU Gang, YAN Gangui, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault-ride-through ability for offshore wind farms integrated to grid via MMC[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 166-173.
- [97] 纪蔚涛, 任永峰, 云平平, 等. 储能型直驱式风电场联合 STATCOM 的多模式无功协调控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5): 97-104.
- JI Weitao, REN Yongfeng, YUN Pingping, et al. Multi mode reactive power coordination control of storage-based direct-driven wind farm combined with STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 97-104.
- [98] 李启鹏. 新能源时代 SVC 在风电机组无功补偿中的应用[J]. 现代工业经济和信化, 2022, 12(12): 142-143, 146.
- LI Qipeng. Application of SVC in wind turbine reactive power compensation in the new energy era[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, 12(12): 142-143, 146.
- [99] 雷邦军, 费树岷, 翟军勇, 等. 静止无功补偿器(SVC)的一种新型非线性鲁棒自适应控制设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2013,

- 33(30): 65-70.
- LEI Bangjun, FEI Shumin, ZHAI Junyong, et al. A novel improved nonlinear robust adaptive control design method of SVC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(30): 65-70.
- [100] 徐江. STATCOM用于改善风电场并网点电压质量的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- XU Jiang. Research of improvement on wind farm integration point voltage quality by using STATCOM[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2014.
- [101] 张智勇. 动态电压恢复器的应用研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2007.
- ZHANG Zhiyong. Study on application of dynamic voltage restorer[D]. Tianjin, China: Tianjin University of Technology, 2007.
- [102] 王虹富. 并网风电场的有功功率补偿与稳定性控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- WANG Hongfu. Active power compensation and stability control for grid-connected wind farms[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2010.
- [103] 刘诗涵. 直驱永磁海上风电系统低电压穿越能力研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
- LIU Shihan. The research on low voltage ride through of direct drive permanent magnet offshore wind power system[D]. Changsha, China: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [104] 王鹏, 王略, 张健文, 等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(10): 1528-1537.
- WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1528-1537.
- [105] 杨玉坤, 许建中. 基于超级电容储能的大容量直驱风电机组低电压穿越策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(18): 106-116.
- YANG Yukun, XU Jianzhong. Low voltage ride-through strategy for high-capacity direct-drive wind turbines based on supercapacitor energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(18): 106-116.
- [106] 薛易, 陈元, 郭明良, 等. 混合储能系统直驱风电机组不对称故障穿越的控制策略[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2022, 32(1): 128-133.
- XUE Yi, CHEN Yuan, GUO Mingliang, et al. Control strategy of asymmetric fault ride-through of direct-drive wind turbines in hybrid energy storage systems[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2022, 32(1): 128-133.
- [107] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. *电工电能新技术*, 2004, 23(3): 59-63.
- WU Junling, WU Wei, ZHOU Shuangxi. Study on SMES unit for improving the stability of power system connected with wind farms[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2004, 23(3): 59-63.
- [108] LIU C J, HUANG X B, CHEN M, et al. Flexible control of DC-link voltage for doubly fed induction generator during grid voltage swell[C]//*Proceedings of 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta, USA: IEEE, 2010: 2234-2240.
- [109] 沈可心, 薛博文, 朱晓荣. 直流微网中直驱风机的类虚拟同步发电机惯性控制策略[J]. *高电压技术*, 2023, 49(6): 2526-2535.
- SHEN Kexin, XUE Bowen, ZHU Xiaorong. Inertia control strategy of direct-driven wind generation system in DC microgrid based on analogous virtual synchronous generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(6): 2526-2535.
- [110] 秦垚, 王略, 邓桢彦, 等. 自同步电压源永磁直驱风电机组的直流电压同步机制及其统一控制结构[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 31-41.
- QIN Yao, WANG Han, DENG Zhenyan, et al. Synchronization mechanism and unified control structure for PMSG-based WTGs by using the DC-link voltage to realize self-synchronous voltage source control[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 31-41.
- [111] 孙丽玲, 王艳娟. 基于改进控制策略与动态无功支撑相结合的高电压穿越方法研究[J]. *电机与控制应用*, 2018, 45(5): 35-41.
- SUN Liling, WANG Yanjuan. A high-voltage ride-through control method study based on improved control strategy and dynamic reactive power support[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(5): 35-41.
- [112] ZHOU H Y, YAO W, ZHOU M, et al. Active energy control for enhancing AC fault ride-through capability of MMC-HVDC connected with offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(3): 2705-2718.
- [113] ZHOU H Y, YAO W, SUN K Y, et al. Enhancing fault ride-through and voltage support capability for MMC-HVDC integrated offshore wind farms based on multi-mode matching[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(2): 1256-1268.
- [114] 贾科, 董学正, 毕天姝, 等. 功率精准匹配的海上风电柔直并网系统电网侧故障穿越方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(增刊1): 84-93.
- JIA Ke, DONG Xuezheng, BI Tianshu, et al. A grid side fault ride-through method based on precise matching power for offshore wind farms connected MMC-HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(Supplement1): 84-93.
- [115] 赵平, 贾浩森, 高亨孝, 等. 应对岸上故障的海上风电多端柔直系统协调控制策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(8): 85-95.
- ZHAO Ping, JIA Haosen, GAO Hengxiao, et al. Coordinated control strategy of modular multi-level converter-based multi-terminal direct current system for onshore wind power faults[J]. *Electric Power*, 2024, 57(8): 85-95.
- [116] SILVA B, MOREIRA C L, LEITE H, et al. Control strategies for AC fault ride through in multiterminal HVDC grids[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(1): 395-405.
- [117] MOAWWAD A, EL MOUSSI M S, XIAO W D. Advanced fault ride-through management scheme for VSC-HVDC connecting offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(6): 4923-4934.
- [118] DONG S H, WANG Y, LI H M. Coordinated control for active and reactive power of PMSG-based wind turbine to enhance the LVRT capability[C]//*Proceedings of 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems*. Sapporo, Japan: IEEE, 2012: 1-6.
- [119] FU J, YAN X, WANG D, et al. L/HVRT scheme of offshore permanent magnet synchronous wind turbine[C]//*Proceedings of the 18th International Conference on AC and DC Power Transmission*. Jinan, China: IET, 2022: 1-5.
- [120] YAN L, WEI S, CHI Y N, et al. Research on offshore wind farm VSC-HVDC transmission system fault ride through issue[C]//*Proceedings of 2014 International Conference on Power System Technology*. Chengdu, China: IEEE, 2014: 1-5.
- [121] XU B, GAO C, ZHANG J, et al. A novel DC chopper topology for VSC-based offshore wind farm connection[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(3): 3017-3027.
- [122] 刘晨阳, 王青龙, 柴卫强, 等. 应用于张北四端柔直工程±535 kV混合式直流断路器样机研制及试验研究[J]. *高电压技术*, 2020, 46(10): 3638-3646.
- LIU Chenyang, WANG Qinglong, CHAI Weiqiang, et al. Develop-

- ment and experimental research of ± 535 kV hybrid DC circuit breaker prototype applied in Zhangbei four-terminal VSC-HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3638-3646.
- [123] 叶盛峰, 王维庆, 王海云. 基于 STATCOM 风电机组高电压穿越技术[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 35-40.
YE Shengfeng, WANG Weiqing, WANG Haiyun. High voltage ride-through technology of wind generators based on STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 35-40.
- [124] 赵继超, 管永高, 甄宏宁. 海上风电汇集站无功装置配置方案及其性能研究[J]. 电工电气, 2018(2): 17-20.
ZHAO Jichao, GUAN Yonggao, ZHEN Hongning. Study on configuration scheme and performance of reactive power compensation device for offshore wind power gathering station[J]. Electrotechnics Electric, 2018(2): 17-20.
- [125] 杨航, 周羽生, 许振华, 等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 60-68.
YANG Hang, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Asymmetric fault ride-through of a direct-drive permanent magnet wind power system based on the control of energy storage and sequence components[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68.
- [126] YUNUS A M S, MASOUM M A S, ABU-SIADA A. Application of SMES to enhance the dynamic performance of DFIG during voltage sag and swell[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(4): 5702009.
- [127] YANG J, FLETCHER J E, REILLY J O. A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 422-432.
- [128] 周威, 周易龙, 马亚琦, 等. 风电场升压站防雷接地改造措施及仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 70-74, 79.
ZHOU Wei, ZHOU Yilong, MA Yaqi, et al. Grounding modification measures and simulation analysis in a wind farm booster station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(5): 70-74, 79.
- [129] ABDALRAHMAN A, ISABEGOVIĆ E. DolWin1-challenges of connecting offshore wind farms[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Energy Conference. Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 52-59.
- [130] 王波. 我国首个柔性直流海上风电项目首批机组并网[J]. 能源研究与信息, 2021, 37(4): 221.
WANG Bo. Grid connection of first units of China's first flexible DC offshore wind power project[J]. Energy Research and Information, 2021, 37(4): 221.
- [131] DENNETIÈRE S, RUDAN V, SMITH C, et al. Methodology of the SOFIA / dogger bank C interaction study[C]//Proceedings of the 22nd IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IET, 2025: 1-6.
- [132] Prysmian secures DolWin5 grid connection in Germany[J]. Cru Wire and Cable News Monthly Report, 2019, 2019: 12-15.
- [133] HAILESELAASSIE T M, UHLEN K, TANDE J O, et al. Connection scheme for north sea offshore wind integration to UK and Norway: power balancing and transient stability analysis[C]//Proceedings of 2011 IEEE Trondheim PowerTech. Trondheim, Norway: IEEE, 2011: 1-6.
- [134] 李小龙, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 直流汇集型风电系统阻抗建模与小干扰稳定性分析[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1632-1644.
LI Xiaolong, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Impedance modeling and small disturbance stability analysis of DC pooling wind power system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1632-1644.
- [135] 潘生雄, 赵霞, 罗映红, 等. 基于 SMES/BESS 混合储能抑制风电功率波动的控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 101-106.
PAN Shengxiong, ZHAO Xia, LUO Yinghong, et al. Control strategy for suppressing wind power fluctuation based on SMES/BESS hybrid energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 101-106.
- [136] 刘晨阳, 王青龙, 柴卫强, 等. ± 10 kV 直流配网用混合式中压直流断路器拓扑设计与试验[J]. 高电压技术, 2021, 47(11): 3881-3891.
LIU Chenyang, WANG Qinglong, CHAI Weiqiang, et al. Topology design and test of hybrid circuit breaker used in ± 10 kV MVDC distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3881-3891.
- [137] 刘晨阳, 胡四全, 韩坤, 等. ± 535 kV 混合式直流断路器分断条件下的电场分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2434-2443.
LIU Chenyang, HU Siqian, HAN Kun, et al. Electric-field analysis of ± 535 kV HVDC hybrid circuit breaker under turning off condition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2434-2443.



LIU Chenyang
Post-doctorate
Associate professor



GAO Tiantian
Corresponding author



WANG Guangning



ZHOU Zhiji

刘晨阳

1991—, 男, 博士(后), 副教授

主要从事非线性电导绝缘材料、直流断路器、直流输电换流阀、高压柔性直流输电、中压直流配网、船舶中压直流电力系统、高电压试验技术和换流阀电磁场仿真与测量等领域研究工作

E-mail: liucheyan@126.com

高甜甜(通信作者)

1999—, 女, 硕士生

主要从事海上风电柔性直流输电、直流输电换流阀等领域的研究工作

E-mail: g1526672898@163.com

王广宁

2001—, 男, 硕士生

研究方向为大功率 AC/DC 直流变换器、高压直流电源

E-mail: 1090468424@qq.com

周治基

2001—, 男, 硕士生

研究方向为大功率 DC/DC 直流变换器设备及控制

E-mail: zjj@dlmu.edu.cn

收稿日期 2025-04-18 修回日期 2025-07-21 编辑 程子丰