第 49 卷 第 1 期：1-18 高电压技术 Vol.49, No.1: 1-18
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220631

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

郝治国，谢　凡，张雨宁，杨松浩，叶冬萌，梁天宇
（西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049）

摘　要：为适应远距离、大容量的输电场景，远海风电直流汇集送出系统应时而生，其发展呈现出新特征、新趋势，给其直流线路继电保护带来严峻挑战。为此，首先明确了远海风电直流汇集送出系统的组网方式，并阐述了新型系统中直流线路继电保护的特殊性。其次，针对故障分析方法、故障识别原理、故障隔离策略等关键问题，对研究成果进行归纳与总结，厘清现有方法在新型系统中的适用范围。最后，展望了上述关键问题的技术发展趋势，为远海风电直流汇集送出系统的直流线路继电保护技术研究提供支撑与参考。

关键词：海上风电；直流汇集；直流送出；边界特性；继电保护；故障隔离

Status and Prospects of Relay Protection Technology for DC Lines in Distant Offshore Wind DC Collection and Transmission System

HAO Zhiguo, XIE Fan, ZHANG Yuning, YANG Songhao, YE Dongmeng, LIANG Tianyu
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to adapt to long-distance and large-capacity transmission scenarios, a system of distant offshore wind DC collection and transmission is proposed, and its development presents new features and trends, bringing serious challenges to its relay protection for DC lines. Firstly, the network configuration of distant offshore wind DC collection and transmission system is clarified, and the special characteristics of relay protection for DC lines in the new system are explained. Secondly, the research results are classified and summarized with regard to the key issues of fault analysis methods, fault identification principles, and fault isolation strategies, and the application scope of existing methods in the new system are clarified. Finally, the technical development trend of the above key issues is foreseen so as to provide support and reference for the research on the relay protection technology for DC lines in the distant offshore wind DC collection and transmission system.

Key words: offshore wind; DC collection; DC transmission; boundary characteristic; relay protection; fault isolation

0　引言

面对日益严峻的能源危机和气候变化，习近平总书记在七十五届联大郑重提出我国“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的战略目标，明确了可再生能源发电是未来重点发展的方向[1]。

风能是目前技术最成熟、应用最广泛的可再生能源，风电有望成为我国支柱能源产业。“三北”地区的陆上风电呈现出“源荷反向分布”特点，受风能随机性、间歇性制约而无法远距离传输，故发展严重受限[2-3]。相比而言，东部沿海地区的海上风电能够就近消纳，且具有风能质量高、单机容量大、不占用土地资源等优点[4]，发展前景广阔。

国家能源局发布数据显示，2021 年全国海上风电新增装机 1690 万 kW，累计装机 2639 万 kW，大幅度超预期发展。2020 年，国务院发布《新时代的中国能源发展》白皮书，指出“十四五”期间将积极稳妥发展海上风电[5]。目前，我国海上风电以离岸距离小于 50 km 的近海工程为主，但站址日趋紧张，因此正逐步向远海风电发展[6]。全球风能理事会发布的《全球风能报告 2022》显示，海上风电装机于 2021 年新增 2110 万 kW，累计达 5700 万 kW，工程离岸距离平均超 60 km，最远达 220 km。据统计和预测，未来 4 年，全球海上风电新增装机有望

基金资助项目：国家自然科学基金 (52007143)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52007143).

突破 9000 万 kW，且远海风电将成为发展的主战场，有助于建设新型电力系统[7]。

远海风电具有输电容量大、离岸距离远、海上平台建设和维护成本高、机组容量大且间距远等特点，对其送出和汇集的方式提出了全新技术要求。近年来，远海风电的送出呈现出“由交流送出到直流送出”的发展趋势[8]，汇集呈现出“由交流汇集到直流汇集”[9]、“由集中式换流到分布式换流”[10]和“由简单双端拓扑到复杂多端拓扑”的发展趋势。伴随上述发展趋势，直流汇集送出系统应时而生，有望成为远海风电输送的主要形式[11]。

远海风电直流汇集送出系统为新兴研究领域，缺乏实际工程案例和专业数据支持，存在诸多关键问题亟待解决，直流线路继电保护是其一[10]。直流线路故障概率高，因系统的“低惯量”特点，故障发展和蔓延速度极快。为减小影响范围，避免损失大量功率并冲击岸上电网，必须快速识别、隔离故障[12]。然而，新型系统直流线路继电保护面临如下严峻挑战：1）分布式换流环节形成多边界场景，导致故障特征及传播机理复杂；2）边界元件缺失导致故障识别依赖的边界特性弱化，传统保护原理适应性欠佳；3）复杂多端拓扑导致故障识别及隔离困难，面向双端系统的方案无法直接应用。

在远海风电直流汇集送出系统领域，已有较多学者做出了卓有成效的研究工作，集中于拓扑结构设计、稳态运行控制等方面，而在继电保护领域鲜有涉及，有待深入探索[13]。本文针对故障分析方法、故障识别原理、故障隔离策略等关键问题的研究现状进行总结，并展望未来发展趋势，以期为远海风电直流汇集送出系统的直流线路继电保护技术研究提供参考。

1 组网方式

1.1 送出方式

根据风场容量及离岸距离，送出可采用高压交流(high voltage alternating current，HVAC)和高压直流(high voltage direct current，HVDC)等 2 种技术[14]。

1.1.1 高压交流送出

HVAC 送出可采用工频交流或低频交流(low frequency alternating current, LFAC)等 2 种方案。工频交流方案结构简单，建设成本低廉，但因电缆充电电流限制，故只适用于小规模近海风电场送出，如东海大桥海上风电示范工程和英国 London Array 工程[15]。低频交流方案通过降低输电频率，缩短了电气距离，进而可提升输电容量，并降低电缆损耗[16]；然而，频率降低将显著增加变压器的体积，且配备的交–交变频器技术尚不成熟，设备造价高昂。由此，基于低频交流输电的海上风电送出系统尚处于理论研究阶段[17]。

1.1.2 高压直流送出

HVDC 送出将交流电能转换为直流电能后进行传输，使得建设及运行的平均成本在远距离输电场景下显著降低，在大规模远海风电场送出时更具技术和经济优势[18]。

相比于传统直流输电(line commutated converter-based high voltage direct current，LCC-HVDC)，柔性直流输电(voltage source converter-based high voltage direct current，VSC-HVDC)突破了换相失败、无功补偿等固有瓶颈，更适合应用于远海风电送出场景[19-21]。现有海上风电直流送出工程均采用 VSC-HVDC 技术，且以模块化多电平换流器(modular multi-level converter，MMC)为主，如江苏如东海上风电示范工程、德国 HelWin 工程和 DolWin 工程[22-23]。

考虑到远海风电直流送出系统的单向功率传输特点，有学者提出以二极管不控整流单元(diode rectifier unit，DRU)替代整流侧 VSC 换流器，该方案能够显著降低换流设备造价[24-25]。为了避免换相失败，逆变侧仍采用 VSC，二者构成混合直流送出方式[26]。然而，由于二极管为不控型器件，所构成的换流站不具备控制维度，因而要求将风机改造为构网型风机，以稳定风场的汇集电压[27]。

1.2 汇集方式

与送出方式相似，海上风电的汇集方式可分为交流汇集和直流汇集[28]。

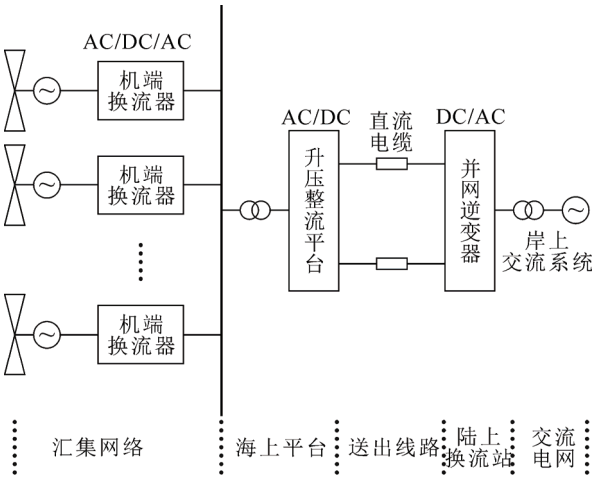
1.2.1 交流汇集

汇集过程如图 1(a)所示，机端换流器输出交流电，经电缆汇集至海上升压整流平台，该方式广泛应用于近海工程[29]。而在大规模远海风场中，机组容量大且间距远，交流电缆损耗将随之显著增加[30]。

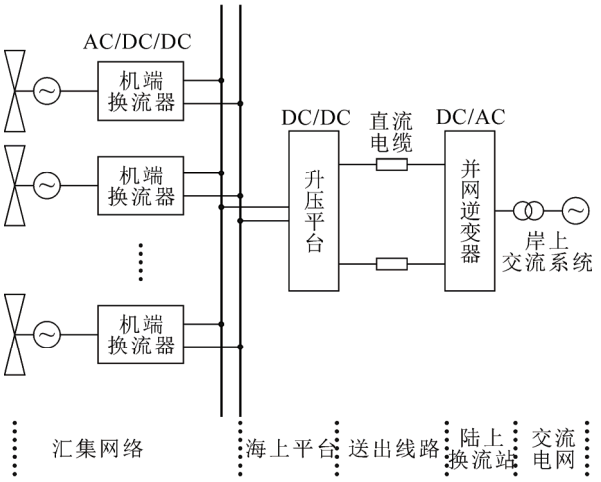
1.2.2 直流汇集

1）直流变压器升压结构

为解决交流汇集的问题，学者提出以直流汇集替代交流汇集，如图 1(b)所示，机端换流器输出直流电，经其中的分布式直流变压器抬升至中压，再由直流电缆并联汇集至海上升压平台，后经集中式



(a) 交流汇集



(b) 直流汇集(直流变压器升压结构)

图 1　远海风电汇集方式

Fig.1　Collection method of distant offshore wind

直流变压器抬升至高压[31]。基于直流变压器升压结构的直流汇集能够适应远海风电机组容量大且间距远的特点，并降低风电场内部的汇集损耗。然而，该结构需配备大容量海上升压平台，存在建设及安装成本昂贵，运行损耗高且不易维护等问题[32]。

2）串联升压结构

针对直流变压器升压结构存在的问题，有学者提出了串联升压结构，如图 2(a)所示，机端换流器输出直流电，经其中的分布式直流变压器抬升至中压，再由直流电缆进行串联汇集，以抬升至高压[33]。

串联升压结构在单机因故障退出时，将形成较大串联电压波动[34-35]。为解决该问题，并扩展风场的规模和容量，进一步衍生出串–并联结构、并–串联结构和矩阵结构[36]。串–并联结构如图 2(b)所示，同一迎风面风机串联汇集构成机群，多个机群并联后送出，各机群汇集线路独立，故障后仅需隔离故障线路所连机群[37]；并–串联结构如图 2(c)所示，同一迎风面风机并联汇集构成机群，多个机群串联后送出，各机群汇集线路共享，故障后将造成全场停运[38]；矩阵结构如图 2(d)所示，基于大量汇集线路和开关设备构成风电机组矩阵，故障隔离范围最小，但结构和控制复杂度过高，建设经济性不佳[39]。

对比直流变压器升压结构，串联升压结构能够省去海上升压平台，降低运行损耗和维护难度，显著提高系统的经济性和可靠性[40-41]。然而，上述结构中，离地远端风机将承受送出线路的极电压，对分布式变压器网侧绕组耐压绝缘要求过高，难以兼顾性能的安全可靠性和造价的经济性[42-43]。

1.3　远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护的特殊性

远海风电直流汇集送出系统涵盖直流变压器升压结构和串联升压结构，均无实际工程案例，其直流线路继电保护研究也暂为空白，应借鉴陆上风电并网系统、柔性直流系统的相关成果。然而，与现有系统相比，远海风电直流汇集送出系统在拓扑结构、关键设备、运行控制、继电保护等方面存在差异，其直流线路继电保护研究应关注以下特殊性。

1.3.1　故障分析

对远海风电直流汇集送出系统进行直流线路故障分析时，应兼顾汇集、送出两部分。其中，前者为复杂多端拓扑，行波折、反射更频繁，故障演化和传播机理更复杂。同时，2 种汇集结构中，直流变压器升压结构的拓扑简单，其故障分析复杂度相较于串联升压结构更低。

远海风电直流汇集送出系统采用全直流电缆结构，其行波波速、色散常数等与陆上高压系统常采用的架空线差异显著，将影响故障过程。另外，新型系统为全直流系统，暂态特性完全受换流器控制，而分布式换流器的广泛装设将使其故障过程区别于仅采用集中式换流器的陆上系统。

1.3.2　故障识别

远海风电直流汇集送出系统海上平台的建设、运维成本较高，为节省平台面积(针对直流变压器升压结构)或避免平台建设(针对串联升压结构)，仅将平波电抗器、直流滤波器等安装于陆上。然而，柔性直流系统直流线路保护原理多依赖上述边界设备的高频衰减特性，基于不同频段电气量在边界设备两侧的能量差异实现故障识别。由此，新型系统的故障识别原理需适应于弱边界场景。

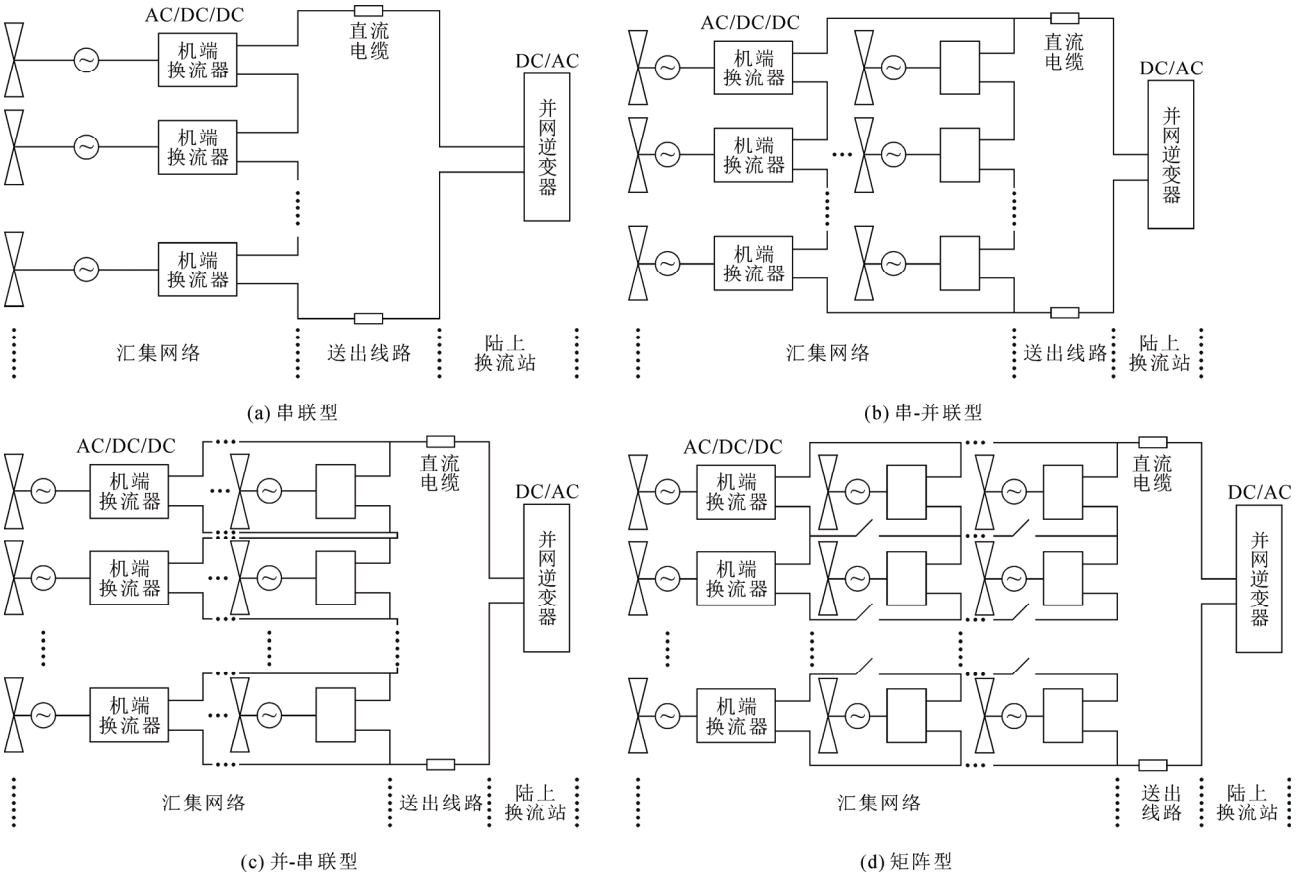


图 2 直流汇集(串联升压结构)

Fig.2 DC Collection based on series-connected structure

相比于陆上系统，远海风电直流汇集送出系统涵盖多类保护对象，直流线路的故障识别不仅需区分汇集、送出两部分，还应与风电机组、岸上交流系统以及机端换流器、直流变压器、并网逆变器等多类换流器实现协调配合，兼顾速动性与选择性。

1.3.3 故障隔离

陆上直流系统多采用直流断路器实现选择性开断，以隔离故障，保证健全部分的电能传输。对于远海风电直流汇集送出系统，无论采用直流变压器升压结构还是串联升压结构，均不具备海上装设大容量直流断路器的条件，需采取其他故障隔离技术。新型系统所涵盖换流器的数量、类型众多，其控制维度显著增加，有助于基于换流器控制完成故障限流和故障隔离，实现控制保护协同作用。另外，可采用故障自清除型 MMC、双有源桥(dual active bridge, DAB)型直流变压器等，基于上述设备的故障电流阻隔能力实现故障隔离。

2 故障分析方法

作为继电保护的前提和基础，远海风电直流汇集送出系统的故障特征分析暂为空白，可借鉴陆上直流系统的研究成果[44]。然而，与现有系统相比，远海风电直流汇集送出系统含有全电缆结构和分布式换流器，线路边界众多，故障过程更为复杂，需要研究多边界场景下的故障特征和传播机理。现有分析方法可概括为以下 3 类。

2.1 数值仿真

柔性直流系统故障分析多利用 EMTDC、RTDS 等数值仿真平台，对给定条件下的直流线路故障进行仿真计算，以得到故障电气量变化曲线，进而提取和分析故障特征。

采用数值仿真方法进行故障分析，能够实现故障电气量变化特性的直观刻画。文献[45]分析了直流线路故障时的系统运行特性，基于仿真结果概述了各个故障阶段的电压、电流变化特征和系统动态行为。文献[46]针对直流线路的单极接地故障，基于数值仿真获取电流、电压变化趋势，与电容放电阶段、交流电流馈入阶段的理想电气量特征相印证。

然而，数值仿真仅能基于反复试验的研究模式，通过设定不同的自变量进行穷举计算。文献[47]结合故障反行波的数值特征识别故障线路，并通过

改变故障参数，进行多次仿真以验证分析结果，但缺乏严格的数学推导过程。

数值方法在实现多故障工况的精细刻画时，无法避免计算量和数据量过于庞大的问题。文献[48]在仿真系统中分别建立等效参数相同的 HVAC 和 HVDC 输电系统，对比单线接地短路、线间短路和单线开路等 3 种故障下的大量仿真波形，以分析高压直流输电系统的可行性。文献[49]针对直流断路器切除故障时产生的高幅值暂态过电压问题，基于仿真系统精细地刻画电压响应波形，并定性分析其特征，进而提出无扰动传递控制方法，以帮助系统快速实现故障恢复。

同时，基于数值仿真所确定的故障特征变化边界、保护动作阈值等，均存在较强的经验性和片面性。文献[50-51]基于线路边界元件的固有特性，分析了区内、区外故障时的暂态能量特征并实现故障快速识别，但特征量变化边界仍是基于仿真结果确定。文献[52]通过搭建某±500 kV 高压直流输电工程的模型，基于数值仿真分析不同过渡电阻对单极接地保护可靠性的影响，得出过渡电阻导致行波保护和微分欠压保护拒动的取值范围，以及过渡电阻导致上述保护无法识别线路故障的取值范围。

此外，受制于计算机的存储容量和计算速度，此类方法难以兼顾准确度与效率。文献[53]通过比较基于 MMC 换流器的真双极、伪双极直流输电系统拓扑，模拟了换流站阀侧接地故障，基于数值仿真结果分析了 2 类双极系统故障特征的异同，但效率较低。文献[54]对于四端直流输电系统，基于仿真波形分别提取来自交流电源和直流电容的故障电流贡献分量，分析各个阶段的贡献主体，从而还原故障过程。另外，对不同线路长度下的电缆故障情况进行了仿真，指出故障电流贡献时间与线路长度呈现微弱的正相关，但精确程度有限。

综合现有成果可见，研究故障电气量的变化特性时，采用数值仿真方法可以实现直观地刻画。然而，该类方法仅能基于反复试验的研究模式，通过设定不同的自变量进行穷举计算，无法避免计算量和数据量过于庞大的问题。由此，在确定保护特征量变化边界、选取保护动作阈值、评估和优化保护性能等方面存在较强的经验性和片面性[55]。此外，由于计算机存储容量和计算速度的限制，故障仿真的准确度与效率之间存在矛盾[56]。

2.2　集中参数模型解析计算

相比于数值仿真，解析计算可获得明确的数学表达式，能够深入地分析故障电气量和保护特征量的结构组分、变化规律、参数灵敏性等，并得出各种因素的影响机理和特性，具有更高的分析效率和可信程度[57]。目前所采用的解析思路主要为：以集中参数模型等效输电线路，列写等效故障回路的微分方程，求解电压、电流等特征量的时频域表达式。

基于集中参数模型的解析计算方法能够实现高效、简洁的故障分析，分析效率和可信程度高于数值仿真。文献[58]针对柔性直流系统，分别建立故障后电容放电、二极管续流、交流侧电流馈入 3 个阶段的等效电路模型，推导出直流线路的电流解析式，并基于直流输电系统数值仿真结果对理论模型进行验证。文献[59]以模块化组合式直流变压器为例，分别在高压、低压直流母线故障下列写故障回路方程，用于求解直流变压器对故障的响应结果。

然而，采用集中参数模型等效长距离输电线路时，将忽略行波的传播过程。文献[60]针对长距离架空线双极 MMC-HVDC 系统，分别建立经小电阻、大电阻接地短路时的等效电路模型，推导了故障电流的解析计算式，但却忽略了沿线分布的输电线路参数。文献[61]指出由于架空线路分布电容和 MMC 换流器子模块等效电容数量级相差巨大，因此可忽略分布电容，将长距离架空线路等效为 RL 串联模型，以求解暂态电压的解析式，进而识别区内、外故障，但未考虑长距离输电线路的行波过程。

上述等效、近似不可避免地会引入故障特征分析的误差，进而对保护阈值的整定造成显著影响。文献[62]针对柔性直流电网，分析 MMC-HVDC 系统在换流站闭锁前和闭锁后的极间故障电流通路，推导出 MMC 桥臂电路和直流线路的短路电流近似表达式，为后续提出基于 RL 并联限流的故障定位方法及基于电流变化率的故障识别方法提供了理论基础，但难以避免集中参数模型等效时产生的误差。文献[63]针对海上风电直流汇集送出拓扑，分别建立在直流汇集线路发生短路和断线故障时的集中参数等效模型，基于拉氏变换求解暂态故障电压、电流的时域表达式，以构造保护原理，但解析误差将进一步影响保护阈值。

综上所述，集中参数模型能够实现故障的解析计算，有效解决数值仿真存在的问题。然而，长距离输电线路的本质为分布参数元件，集中参数模型

的简化忽略了故障行波的传播过程，所引起的故障特征分析误差将对保护配置和阈值整定造成影响。

2.3 分布参数模型解析计算

故障行波蕴含着丰富的故障信息，如方向、位置、类型等，可在故障后数毫秒内实现提取，对其进行解析表达是故障分析的必然方向[64]。

文献[65]构建了如图 3 所示的无畸变传输线模型。图 3 中：R_0、G_0、L_0、C_0 分别为单位长度传输线的电阻、电导、电感、电容；dx 为无穷小长度元；$i(x,t)$、$u(x,t)$ 分别为位置 x 在 t 时刻的电流、电压。在分析直流线路行波折、反射规律的基础上，推导了基于上述模型的直流线路行波表达式，实现了考虑频变参数和控制系统的直流故障时域解析。

不同于基于集中参数模型的解析思路，此类方法从故障点初始行波出发，结合线路传播特性和边界折、反射特性，建立全线的行波解析解。文献[66]以同塔双回线路为研究对象，对各回、各极的行波进行解耦解析计算，并考虑到线路的几何配置和均匀换位问题。文献[44]利用行波折、反射系数推导出直流海缆铠装层电压的时域表达式，基于铠装层电压行波波头的快速大幅上升特征构造故障判据。

对故障行波进行解析，有助于推演故障电气量的传播过程，构建保护测量结果与初始行波的关联关系。文献[67]研究并推导了无畸变传输线在单、双极运行方式下的行波解析解，分析了在故障点、线路的传播特性，并总结了末端元件及过渡电阻对解析解的影响。文献[68]基于极模变换的思想，将高压直流电网转换成由模域参数构成的网络架构，忽略高压输电线路上的电阻，分别得到线模、地模的阻抗矩阵，分析单极接地故障的模域行波特征，再基于反变换得到极域的行波特征。

然而，面对新型系统分布式换流器构成的多边界场景，精确的解析计算将因行波折、反射频繁而难以开展。文献[69]考虑到双极直流系统的正、负极线路电磁耦合，采用线模量详细推导了行波的折、反射系数，并基于网格法刻画了传播过程，但在系统端数增加时，行波传播过程的分析难度显著提升。

综上所述，基于分布参数模型的解析计算能够精确分析故障特征，并推演传播过程。然而，对于含有全电缆结构和分布式换流器的远海风电直流汇集送出系统，线路边界众多，故障行波将在短时间内发生多次折、反射，使得电流、电压等电气量的解析计算异常困难。

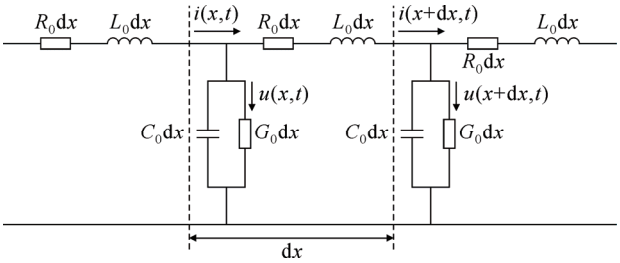


图 3 输电线路分布参数模型

Fig.3 Distributed parameter model of transmission line

3 故障识别原理

故障识别是继电保护的关键环节，其本质是识别是否发生故障，并判断故障发生的区域。送出线路电压等级高，传输容量大且距离长，需配置速动性强的单端量保护和可靠性高的纵联保护；汇集线路电压等级低，传输容量小且距离短，仅需纵联保护。目前，缺乏针对远海风电直流汇集送出系统的线路保护原理研究，由于其拓扑结构、运行原理与多端直流系统存在相似之处，应对相关研究成果进行适应性分析，进而指出新型保护原理的研究思路。现有研究成果可概括为以下 4 类[70]。

3.1 基于频域特征的识别原理

基于频域特征的识别原理依赖于直流滤波器、平波电抗器等线路边界对高频信号的滤除或衰减作用，如图 4 所示。图 4 中：CLR 表示平波电抗器，R 表示电压测点，M、N 表示直流线路两端母线，F 表示故障点，U_F 表示故障电压。此类原理多采用快速 Fourier 变换、小波变换、经验模态分解等方法，分析提取不同频段的能量分布，进而基于高、低频段能量的含量差异构成判据。

直流线路边界元件，如平波电抗器、直流滤波器等，对故障高频电气量的滤除或衰减作用是此类原理的物理基础。文献[71]基于线路边界的高频衰减特性，详细分析故障后在平波电抗器两侧形成的功率差异，以此快速识别区内、外故障，无需两端通信。文献[72]基于线路边界直流滤波器的幅频特性，在 2 种特定频率下分别计算直流线路电压、电流的乘积，并将其比值作为识别整流侧或逆变侧发生区内、外故障的依据。

基于频域特征的故障识别原理多采用时频分析方法，如下述文献采用的小波变换、经验模态分解、数学形态学等[73]。文献[74]利用离散小波变换(discrete wavelet transform，DWT)，在计算故障电流高频分量的基础上，对双端电气量进行互相关分

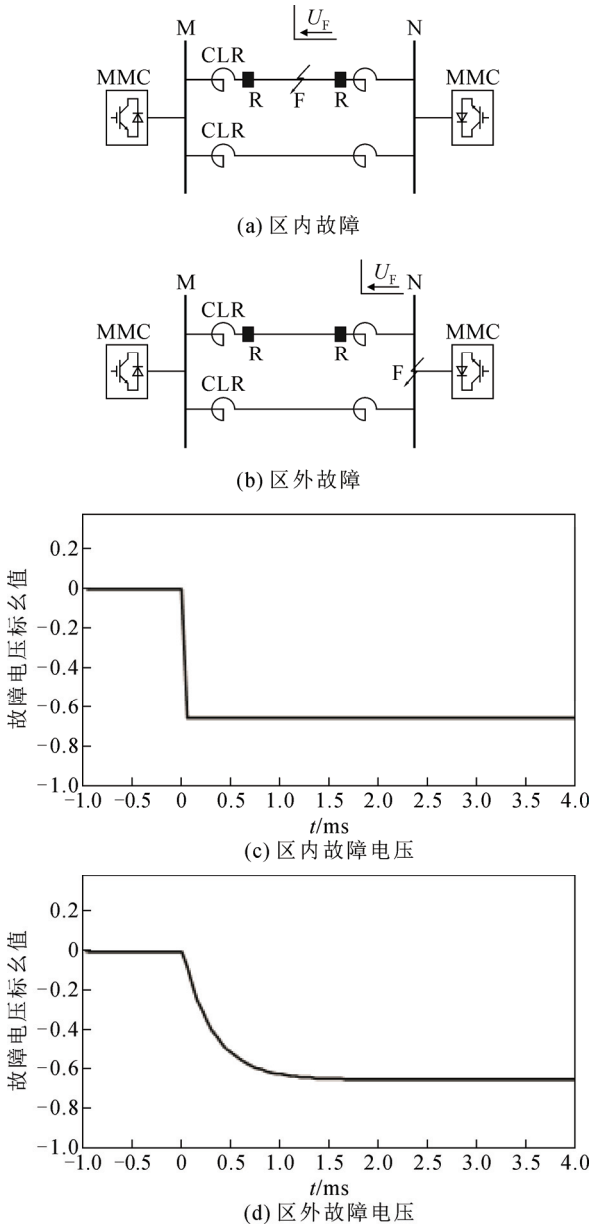


图 4　线路边界高频衰减特性

Fig.4　High frequency attenuation characteristics of line boundary

析，基于互相关函数的离散度判别故障区域和类型，形成了故障识别算法。文献[75]利用经验模态分解识别电容器电压的变化趋势，选择特定本征模态分量的积分值作为识别故障区域的标准，但整定依据存在经验性。文献[76]针对多端柔性直流系统，通过分析直流线路故障后电压行波的传播特性，利用能够同时检测信号突变时刻和突变极性的数学形态学滤波器，实现故障区域的识别。

此类方法基于边界元件两侧不同频段的能量差异实现故障识别，然而，远海风电直流汇集送出系统在海上缺失边界元件，将导致方法的适用性问题。文献[77]提出了基于 DWT 的保护方法，利用不同频率信号传播特性的差异，仅分解和提取必要的高频小波系数构成小波能量系数，与预设的阈值对比，进而实现故障的判别，但对线路边界具有强依赖性。

此外，故障识别所采用的时频分析方法对计算力、采样率要求较高，将增加硬件成本。文献[78]对比了连续小波变换(continuous wavelet transform，CWT)和 DWT 等小波变换方式，指出 CWT 由于计算耗时过多而不具备故障识别的可行性。文献[79]指出小波变换的方法适合刻画信号的陡度，但存在信号采样时间窗较短，频域分辨率过低，难以基于频谱差异区分故障和雷电干扰等问题。

同时，高频噪声对基于频域特征的识别方法干扰较强，现有方法需提升相应耐受能力，或增加辅助滤波环节。文献[80]提出利用小波时间熵的方法快速检测故障，分析对比了接地故障、雷击和噪声等工况下不同频带分量的小波时间熵分布特征，给出了用于区别故障和雷击、噪声的判据。文献[81]将经验模态分解与保护安装处的信息熵结合，将直流电流固有模态能量熵作为区分交、直流侧故障的依据，并与基于电流突变量的保护启动判据及基于滑动平均滤波的故障类型识别判据一同构成完整的保护方案。

现有方法在参数选择方面存在一定的经验性，如小波变换中的小波基、分解层数等，实际应用时需要增强可解释性。文献[82]提出了新型平稳小波变换(stationary wavelet transform，SWT)算法，克服了 DWT 各小波基尺度不同的缺点，使信号在重构时更加稳定。进而利用模极大值点表征信号突变点，以进行故障判别。

综上所述，基于频域特征的原理依赖线路边界对高频信号的滤除或衰减作用，能够有效实现区内、区外故障的辨识。然而，对于远海风电直流汇集送出系统，为减少平台建设和设备投资成本，平波电抗器等设备仅安装于陆上逆变站。因此，在汇集线路之间及汇集线路和送出线路之间，均无集中容性、感性元件作为高频边界。另外，原理采用的时频分析算法普遍对计算力和采样频率要求较高，且需增强对高频噪声干扰的耐受能力、参数选择的可解释性。

3.2　基于时域特征的识别原理

基于时域特征的识别原理多采用微分、积分等简单方法计算线路故障电气量的时域数值特征(如

变化率、变化量、比值、积分等)，或采用相关性分析等方法提取电气量的时域波形特征。

上述的时域数值特征、时域波形特征已广泛应用于现有故障识别原理。文献[83]在短时间窗内，比较了输电线路两端前行波中线模电流分量的突变幅度，总结出扰动与故障的特征差异，用以区分二者。文献[84]为避免保护在直流侧外部故障时误动和内部高阻故障时拒动，提出了基于平波电抗器两侧瞬态电压比值的单端量保护原理和纵联保护原理，算法简洁明了。文献[85]基于线路内部故障波形尖锐的特点，以故障电压波形的突变点到首个极值点的过渡时间为特征值，将其作为辨识直流线路区内、外故障的依据。

此类方法基于的时域特征物理意义明确，计算方法简洁，在可解释性和硬件需求等方面具有优势。文献[86]针对多端直流系统，利用电压、电流的变化量来识别故障，并采用方向极性的符号差异来定位故障在汇集网络中的具体区域。文献[87]针对纵联电流差动保护，基于沿线分布的电容电流补偿差动电流，并在电流量的基础上增加了电压微分信号，使区内故障时的差动电流幅值更为显著。文献[88]基于发生直流线路故障、换流器故障和直流母线故障时的暂态等效电路，总结出线路差分电流的极性差异，以构成故障选线的算法逻辑。

然而，上述时域特征实为不同频段能量分布差异在时域内的映射，识别原理同样依赖于边界元件，因此在远海风电直流汇集送出系统中应用时，将存在适用性问题。文献[89]的研究表明，不同保护区域发生故障后，线路边界处电流与电压的比值具有明显差异，将此特征作为依据可有效区分区内、外故障和暂态干扰。文献[90]分析了区内、外故障在特定时间窗内的行波构成，以正、反向行波的幅值比作为故障特征，进而构造行波方向纵联保护，但此方法对线路边界具有强依赖性。

综上所述，基于时域特征的原理物理意义明确，保护算法简洁。然而，其本质为利用区内、外故障的频段能量差异在时域的映射特征，因此同样依赖线路边界的高频滤除或衰减特性。

3.3 基于人工智能算法的识别原理

基于人工智能算法的识别原理采用新兴的智能算法，基于海量样本进行训练，进而构造模型实现故障识别。

神经网络、遗传算法、支持向量机等算法已在直流线路故障识别中得到应用。文献[91]指出人工神经网络的训练算法能更好地处理包含高频能量、低频能量的非线性模型，进而实现多端直流输电系统的区内、区外故障识别。文献[92]提出一种基于支持向量机的单端量保护方法，利用小波多分辨率分析求得故障电流在各频段的能量分布，构成特征输入向量，进而基于预先训练的模型识别故障。

此类方法能够适用于复杂非线性系统，无需阈值的整定、校验过程。文献[93]通过创建不同类型故障的场景，对人工神经网络进行训练，以降低故障保护中定位错误的概率，同时还利用多层前馈网络和误差反向传播的思想提高故障识别的准确性。

然而，基于人工智能算法的识别原理通常依赖于数值仿真，以获取海量数据作为训练样本，进而构造模型，其识别效果取决于样本的数量和质量。文献[94]采用人工神经网络算法，基于暂态交、直流电压数据进行训练，所得神经网络可有效识别直流线路、换流站和交流系统发生的不同类型故障。

此外，故障识别模型的训练结果缺乏可解释性和泛化能力，在实际应用之前仍需加强其工程实践性。文献[95]将采集到的三相故障电压、电流信号通过 Park 变换得到 d、q 轴电压、电流分量，作为故障推理机的输入参数，进而识别故障类型。文献[96]基于遗传模糊系统(genetic fuzzy system，GFS)实现模糊控制器的优化设计，将由小波变换算得的原始变量的线性组合作为 GFS 的输入参量，将各故障工况对应的故障距离作为 GFS 的期望输出，进行系统模型的训练。

综上所述，基于人工智能算法的原理无需复杂的阈值整定过程，但与其他类型原理相比，其需要依赖数值仿真提供海量训练样本，且可解释性和泛化能力有待提高，因而工程实践性不佳，尚处于科学研究阶段。

3.4 基于线路边界特性的识别原理

基于线路边界特性的识别原理关注故障行波在线路边界发生的折、反射过程，提取故障行波的方向、极性、时延和距离等故障特征。如图 5 所示，故障行波的折、反射过程发生于波阻抗不连续的线路边界，与其是否具有高频滤除或衰减特性无关。图 5 中：P、M、N、Q 表示直流线路各端母线，F 表示故障点，TW_1 和 TW_2 表示向直流线路两端传播的故障行波。

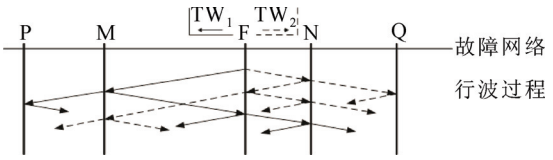


图 5　线路边界折反射特性

Fig.5　Refraction and reflection characteristics of line boundary

此类方法不受平波电抗器、直流滤波器等强线路边界的存在性制约，仅关注在波阻抗不连续点发生的行波折、反射过程。文献[97]系统地总结了行波特性，指出线路电气量可用前、反行波描述，二者包含完整的故障信息。文献[98]详细分析了电流行波和电压行波的传播特征，利用二者构造瞬时功率，并基于瞬时功率提出纵联保护原理，能有效识别故障和干扰。文献[99]分析了故障行波沿线传播时的衰减特性，利用不同故障位置衰减程度不一致的特点构造未失真因子，进而提出纵联保护原理，基于线路两端未失真因子的比值识别区内、外故障。

故障行波蕴含丰富的故障信息，其方向、极性、时延、距离等已在现有直流线路故障识别原理中得到应用。文献[100-101]指出，发生内部故障时，直流线路电流故障分量和母线电流故障分量方向相同，可采用余弦距离表征当前信号与预存参考信号的相似性，进而以该特征量构造直流线路保护方案。文献[102]通过分析故障附加电路指出，当直流线路发生区内故障时，两端电流故障分量极性相同，发生区外故障时则极性相反，可据此识别故障区域并判别故障极。

然而，现有成果多为基于双端信息的纵联保护，存在通讯时延大、数据同步性要求高等问题，不能作为直流线路的主保护。文献[103]研究了故障附加网络的电流极性和电压极性，基于整流侧和逆变侧的瞬时功率构造直流差动功率，依据内部故障时差动功率骤增的特点识别故障。文献[104]将边界电流信号进行有效数字化处理，采用双端电流信号构造并修正了电流距离的定义，并基于区内、区外故障时电流距离的数值差异提出针对 MMC-HVDC 的新型保护原理。

综上所述，基于线路边界特性的原理不依赖高频边界，适用于仅由波阻抗不连续点形成的弱边界特性场景。对于远海风电直流汇集送出系统，在汇集线路之间及汇集线路和送出线路之间，各连接点和故障点均为波阻抗不连续点，将对故障行波进行折、反射。然而，现有成果主要针对双端直流系统，且多用于构造纵联保护，鲜有单端量保护原理及适用于多端直流系统的保护原理。

4　故障隔离策略

故障隔离是继电保护的最终环节，远海风电直流汇集送出系统故障发展迅速，且多为永久性故障，短时间难以清除和恢复。为减小故障的影响范围，系统应具备快速隔离故障的能力。新型系统的本质为多端直流系统，故障隔离主要有 4 种技术方案：1）“交流断路器+直流隔离开关”方案，2）“直流断路器”方案，3）“故障自清除型 MMC+直流隔离开关”方案，4）“MMC 限流控制+直流隔离开关”方案。

4.1　“交流断路器+直流隔离开关”方案

此方案中，直流线路故障发生时，需闭锁换流器，基于交流断路器开断故障电流，再利用直流隔离开关实现故障隔离。

根据上述流程，基于“交流断路器+直流隔离开关”方案的故障隔离策略应用如下：文献[105]为对称双极海上风电直流汇集送出系统制定了故障隔离策略，基于故障极的交流断路器切除岸上交流系统对直流侧故障点的馈流通路，并配合直流开关隔离故障极，确保健全极的功率传输和故障穿越。

对于远海风电直流汇集送出系统，故障发展、蔓延速度快，故障隔离快速性需求高，交流断路器的开断速度难以满足。文献[106]提出基于交流断路器的“握手法”故障隔离策略，即在直流侧故障发生后，开断所有交流断路器，再基于直流隔离开关隔离故障区域和健全区域，最后闭合交流断路器，恢复健全区域与交流系统的连接，但全过程耗时长。

另外，针对伪双极系统进行故障隔离时，由于全部换流器闭锁，且交、直流系统的联系被切除，因此功率传输将完全中断。文献[107]从直流电网保护的选择性角度，分析了交流断路器应用于故障隔离的可行性，指出该方案投资成本低，但是不能实现保护的完全选择性，将对系统造成冲击。

综上所述，远海风电直流汇集送出系统阻尼较小，直流故障将在数毫秒内蔓延和发展，而交流断路器的可靠分闸通常需要 10 ms 以上，难以满足故障隔离的快速性要求。另外，对于伪双极系统，因交流断路器将切除交、直流侧联系，且需换流器闭锁，因而将中断海上风电系统的全部功率传输。

4.2 “直流断路器”方案

此方案中，换流器采用 VSC 或半桥型 MMC。以后者为例，如图 6(a)所示，即使换流器闭锁，交流侧仍将通过续流二极管持续向直流侧馈入故障电流。由此，直流线路故障发生时，需基于直流断路器开断故障电流，以实现故障隔离。图 6 中：T_i (i=1，2，3，4，5)为绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)，D_j (j=1，2，…，7)为反并联二极管，C 为子模块电容，u_{SM}、i_{SM} 分别为子模块端口电压、电流，u_C、i_C 分别为子模块电容电压、电流。

现有文献分析了交、直流断路器的特点，并比较了多类直流断路器的性能。文献[108]详细对比了采用交流断路器和直流断路器的故障隔离方案。分析表明，前者易于实现，但动作速度无法满足要求，且会导致直流系统停运；后者可实现故障的快速精准隔离，是最为理想的选择。文献[109]指出，多种直流断路器中，机械式运行损耗小，建设成本低，但动作速度不理想；固态式完全采用电力电子开关，可显著提高动作速度，但损耗和成本居高不下；混合式兼具二者优势，为现阶段重点研究对象，其结构如图 7 所示。

在此方案中，闭锁换流器不能实现故障电流的阻隔，必须依靠直流断路器的可靠开断，才能保证故障隔离的快速性。文献[110]介绍了机械式直流断路器的工作原理，并配合直流线路的纵联电流差动保护实现故障隔离。文献[111]采用具备主动控制功能的高压直流断路器，利用其能够维持或终止分闸操作的特点，在不延长故障清除时间的前提下提高了故障隔离的安全性。

基于直流断路器进行故障隔离，健全线路无需开断，实现了保护的选择性，保证了功率的持续传输。文献[112]基于半桥 MMC、直流断路器提出了适用于工程应用的直流架空线路故障隔离措施和故障恢复策略，该方案可降低直流线路故障对交流系统稳定性、安全性的影响。

然而，大容量高压直流断路器的制造仍面临瓶颈，技术尚不成熟，且成本居高不下。文献[113]提出了单向电流阻断式直流断路器，线路两端的断路器均只有单向 IGBT 阻断故障电流，两端断路器可以协同配合，以隔离电缆的区内故障。与双向式直流断路器对比，新型断路器具有经济成本低和运行损耗小等优势。

为降低直流断路器的容量需求，已有文献提出

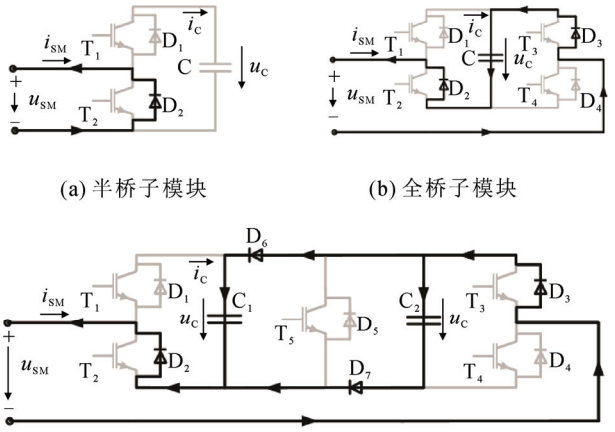


图 6 MMC 子模块拓扑

Fig.6 Topologies of MMC submodules

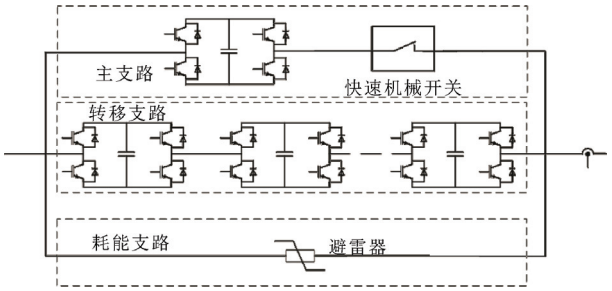


图 7 混合式直流断路器结构

Fig.7 Structure of hybrid DC circuit breaker

故障限流与故障隔离协同作用的思想。文献[114]提出了基于限流器和直流断路器协调的故障隔离方法，并设计了二者的时序控制方案。通过限流器对故障蔓延速度和发展程度的限制，可降低对直流断路器的开断容量及动作速度要求，进而提高经济性。文献[115]提出混合式限流器与直流断路器相配合的故障隔离方案，通过限制电流梯度以使设备免受大幅瞬态电流的影响，为断路器争取了更多动作时间，适用于换流器件较为脆弱的柔性直流系统。

综上所述，此类方案中，若换流器件耐受应力满足要求，则换流器无需闭锁，即可实现系统健全部分的功率传输不间断，能够保证保护的选择性。然而，大容量高压直流断路器的技术尚不成熟，还有待向轻型化、低成本、实用化等目标发展。

4.3 “故障自清除型 MMC+直流隔离开关”方案

此方案中，MMC 采用全桥型、箝位型等具备故障自清除能力的子模块拓扑。如图 6(b)和图 6(c)所示，当直流线路发生故障时，需闭锁换流器，二极管续流阶段能投入电容反电势以强迫故障电流衰

减至零，再基于直流隔离开关实现故障隔离。

现有文献分析了基于直流断路器、基于 MMC 等 2 种故障隔离方案的特点，并比较了多类故障自清除型 MMC 的性能。文献[116]提出 2 种故障隔离的思路，除了研究大容量高压直流断路器外，还可以研制具备故障清除能力的换流器。在分析单晶闸管旁路子模块、双晶闸管旁路子模块缺陷的基础上，提出了一种利用冗余子模块的新型拓扑，以保证故障电流的衰减速度满足系统快速恢复的要求。文献[117]对半桥子模块进行改造，提出了 3 种可阻断故障电流的子模块拓扑结构，阐述了各自的工作原理，并在故障恢复可靠性、制造成本等方面，同半桥型子模块进行比较。

通过改造 MMC 拓扑实现故障隔离，无需装设直流断路器，但此类 MMC 器件数量多，运行损耗大，同样面临降低成本的技术难题。文献[118-119]为降低因配备大量直流断路器而产生的高额建设及运行成本，提出在多端直流系统中采用部分全桥子模块和直流隔离开关以替代直流断路器。研究表明，该替代性策略充分发挥了换流器的故障电流限制作用，并降低了直流断路器的性能需求和数量需求，具有借鉴意义。文献[120]指出，研制具有故障自清除能力的 MMC，有助于解决直流故障期间，故障电流经反并联二极管持续馈入的问题。此外，该文详细分析了 2 类子模块阻隔故障电流的机理，指出其在器件数量、运行损耗等方面亟待优化。

为应对上述问题，已有文献开始探寻子模块混联、增加旁路结构等解决思路。文献[121-122]分别提出新型箝位型子模块和新型自阻型子模块，并将其与半桥子模块组合构成混联结构，以进一步降低设备成本，并增强 MMC 的故障隔离能力。文献[123]提出在半桥型 MMC 的基础上增加旁路 LCC 结构，利用其输出反向电压的能力，极大程度抑制了直流故障电流，且同时具备故障隔离速度快、附加成本低、功率损耗小等优势。

另外，故障清除要求 MMC 闭锁，以投入反电势并衰减故障电流，因而应用于伪双极系统时，此方案将造成功率传输完全中断。文献[124]针对大容量架空线路直流输电系统，提出采用箝位双子模块构造 MMC 换流器的方案，并设计 3 个层次的控制结构以控制子模块之间的功率分配，但将其应用于伪双极系统时，将导致全系统停运。

综上所述，此类方案中，通过改造换流器子模块拓扑，能够实现故障电流开断，无需配备直流断路器。然而，此类 MMC 造价和损耗较高，且应用于伪双极系统时，故障后换流器闭锁，将造成全部功率传输中断，会对岸上交流系统造成较大冲击。

4.4　“MMC 限流控制+直流隔离开关”方案

此方案中，故障期间需切换 MMC 换流器控制方式，将限制故障电流作为控制目标，再基于直流隔离开关实现故障隔离。

在故障隔离期间，MMC 控制系统切换至限流模式，致力于衰减直流电流。文献[125]采用全桥子模块和半桥子模块构造混合型 MMC，并基于直流电压偏差控制提出快速故障限流策略，以抑制故障电流。文献[126]针对换流器控制方式设置了常规工作模式和故障电流限制模式，在检测到系统发生故障后，即切换换流器控制方式，直至将故障电流限制到极低水平，再基于隔离开关进行开断。

MMC 的可控性在此方案中得到了充分发挥，是控保协同思想的体现。在故障隔离期间，无需闭锁换流器，无需配备直流断路器，且 MMC 控制系统响应速度快，兼顾了经济性与快速性。文献[127]基于全桥型 MMC 实现故障后的主动限流控制，避免了故障电流快速上升，并配合直流隔离开关隔离健全区域和故障区域。在主动限流过程中，换流器无需闭锁，避免了系统的功率传输中断，有利于故障后的快速恢复。文献[128]对比了不同故障隔离策略，指出通过增加限流电抗器等辅助设备，并配合 MMC 限流控制策略，能够进一步加速故障电流的衰减速度，有利于提升故障隔离的快速性。

综上所述，上述方案充分发挥了换流器的高度可控性，且换流器无需闭锁，仅需直流隔离开关即能实现故障隔离，兼顾了故障隔离的快速性和经济性等需求。

5　关键技术展望

5.1　组网方式

直流传输在远距离、大容量输电场景下更具技术和经济优势，是远海风电送出的优选方案。为了进一步降低系统的建设及维护成本，基于 DRU 的直流送出方式将持续受到业界关注。然而，二极管存在单向导电性，系统启动初期，功率无法由岸上交流电网输送至海上风电场。同时，二极管为不控型器件，DRU 的应用将弱化送出系统的控制能力，使其无法稳定汇集电压。此外，DRU 的源特性与

VSC、MMC 存在显著差异，将影响系统故障后的暂态过程。因此，未来应聚焦于海上风电场低成本黑启动技术、构网型风电机组研制技术、DRU 型混合直流系统控保技术等关键领域，在保留 DRU 送出方案经济性优势的前提下，解决该方案引起的技术问题。

面对大规模远海风电场中，机组容量大且间距远的发展趋势，直流汇集将作为有效应对方案。其与常规海上风电交流汇集方案的区别主要为：1）采用直流端口型风机；2）风机出口采用分布式直流变压器升压。未来应聚焦于直流端口型风机和小容量直流变压器的研制技术和控保技术，避免因汇集方案的改变而新增显著的建设投资和运维费用，并实现设备保护与线路保护的协调配合。

针对采用直流变压器升压结构的直流汇集方案，还应重点关注大容量、高变比直流变压器的研制技术，实现高效率、低成本、轻型化，以降低海上直流升压平台的造价。采用串联升压结构的直流汇集方案无需建设海上升压平台，但应重点关注串联拓扑优化设计技术，以解决远端风机绕组对地绝缘要求过高引起的经济性、安全性问题，并解决单机因故障退出运行而导致同串电压波动，进而引起的保护可靠性问题。

5.2 故障分析

故障分析是继电保护技术的前提和基础，同现有系统相比，远海风电直流汇集送出系统含有全电缆结构和分布式换流器，构成了多边界场景，故障过程更为复杂。

数值仿真能够直观地刻画故障电气量的变化趋势，目前，针对大规模直流系统的数值仿真受制于计算机存储容量和计算速度。未来应聚焦于兼顾高精确性和高效率的电磁暂态建模与仿真技术，在保留关键特性的前提下，针对含有大量换流环节的远海风电直流系统进行合理等值和简化，从而为故障解析提供辅助验证工具。

解析计算能深入分析故障电气量的变化特性、影响因素的作用机理和规律，具有更高的分析效率和可信程度。目前，针对包含多边界场景的远海风电直流系统，采用集中参数模型引起的分析误差将对保护配置和阈值整定造成影响，而采用分布参数模型则因故障行波频繁折、反射而难以精确解析计算。未来应聚焦于换流设备和直流电缆的简化建模技术，兼顾模型的精确性和解析的高效性，为汇集、送出线路分别建立与传输距离相符的故障解析模型。同时，还应聚焦于多边界场景下的故障解析技术，以分析故障电气量的结构组分、传播机理和保护特征量的变化规律、参数灵敏性，从而量化保护阈值的整定原则。

5.3 故障识别

故障识别是继电保护的关键环节，其本质是识别是否发生故障，并判断故障区域。对于远海风电直流汇集送出系统的送出线路，应配备速动性强的单端量保护和可靠性高的纵联保护。由于送出线路与汇集网络之间缺乏集中容性、感性元件作为高频边界，因此现有基于时、频域特征的故障识别原理适应性欠佳，未来应重点关注适用于弱边界特性的故障识别原理研究。对于汇集网络，应配备纵联保护，因其拓扑的复杂性导致故障识别困难，未来还应重点关注适用于复杂多端拓扑的故障识别原理研究。

人工智能算法适用于复杂非线性系统，远海风电直流汇集送出系统包含大量换流设备，系统的复杂度和非线性程度显著提升，基于人工智能算法的原理有望解决故障识别面临的问题。未来应着力于增强此类原理的可解释性和泛化能力，优化模型训练过程，提升方法的工程实践性。

远海风电直流汇集送出系统的故障识别方案涉及多类保护对象、多种保护原理，涵盖直流线路保护、风电机组保护、多类换流器保护、交流系统保护等。应聚焦于故障识别方案的优化设计技术，协调保护对象，实现保护原理之间的时间延迟和阈值整定配合。

系统中的多类换流设备具有高度可控性，应聚焦于换流器控制系统与故障识别方案之间的控保协同技术，充分发挥电力电子设备在故障电流限制、故障特征识别、故障测距定位等方面的主观能动性。

5.4 故障隔离

故障隔离是继电保护的最终环节，远海风电直流汇集送出系统故障发展、蔓延迅速，为减小故障的影响范围，远海风电直流汇集送出系统应具备快速隔离故障的能力。

直流断路器是构成多端直流系统的关键设备，相应故障隔离方案可在基于不同换流原理的直流系统中应用，但目前设备研制技术尚不成熟，造价和体积有待降低和减小，未来应聚焦于轻型化、低成本、实用型的直流断路器研制技术，并关注开关设

备的布局方案与复杂拓扑的解耦技术。

基于故障自清除型 MMC 的方案仅依靠换流设备即可清除故障电流，无需装设直流断路器等辅助设备。但其建设成本、运行损耗均远高于常规换流设备，且控制系统复杂度显著提高，未来应聚焦于高功率密度、高可靠性、低成本的新型换流设备研制技术和控制技术。

基于换流器限流控制的隔离方案充分发挥了换流器的高度可控性，在故障电流清除阶段无需闭锁直流系统，且适用于多类 MMC，具有发展前景。目前鲜有相关研究，未来应聚焦于多换流器的限流控制协调技术，确立故障情况下系统级与设备级控制的关键约束条件，并讨论故障限流对故障识别可靠性的影响程度。

基于故障限流器等辅助设备的限流技术有助于故障电流抑制，为故障识别争取时间，并加速故障隔离过程。超导型故障限流器具有稳态损耗小，限流速度快等优势，有望在远海风电直流汇集送出系统中得到应用。目前已有广泛研究，未来应聚焦于低成本高温超导技术。

6　结论

规模化远海风电直流汇集送出是未来新型电力系统发展的重要方向。然而，能够适用于直流汇集送出系统的直流线路继电保护技术依然是制约远海风电发展的主要瓶颈。为保障远海风电直流汇集送出系统安全稳定运行，需要在明确组网方式的前提下，研究包括故障的精准分析、可靠识别、快速隔离在内的新型原理与方法。经过对上述领域的研究现状与趋势进行分析，得到如下结论：

1）直流传输在远距离、大容量输电场景下更具技术和经济优势，是远海风电汇集和送出的优选方案。目前，直流汇集送出系统仍缺乏实际工程案例和专业数据支持，尚处于理论研究阶段。未来研究应聚焦于海上风场低成本黑启动技术、关键设备研制技术和控保技术、拓扑优化设计技术等。

2）故障分析是继电保护的前提和基础，远海风电直流汇集送出系统中，分布式换流环节导致故障特征及传播机理复杂，采用数值仿真或解析计算均无法兼顾故障分析的高效性和精确性。未来研究应聚焦于高效电磁暂态建模与仿真技术、面向多边界场景的故障解析技术等。

3）故障识别是继电保护的关键环节，远海风电直流汇集送出系统中，边界元件缺失导致线路边界特性弱化，多端拓扑导致区域识别困难，现有基于时频域特征、人工智能算法的直流线路保护原理适用性欠佳。未来研究应聚焦于适应弱边界特性的故障识别技术、适应复杂多端拓扑的故障识别技术及换流器控制系统与故障识别方案的协同技术等。

4）故障隔离是继电保护的最终环节，远海风电直流汇集送出系统中，复杂多端拓扑导致故障隔离及换流器暂态控制困难，现有基于交流断路器、直流断路器、故障自清除型换流器的方案难以兼顾故障隔离的快速性、经济性和选择性。未来研究应聚焦于开关设备、故障自清除型换流设备、辅助限流设备的研制技术及控保技术，以及多换流器的控制协同技术等。

参考文献　References

[1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报，2020(28)：5-7.
XI Jinping. Statement at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2020(28): 5-7.

[2] 陈国平，梁志峰，董　昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：369-378.
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-378.

[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.

[4] 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 off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.

[5] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报，2020-12-22(010).
State Council Information Office of the People's Republic of China. China's energy development in the new era[N]. People's Daily, 2020-12-22(010).

[6] 李佳朋，李宇骏，袁枭添，等. 远海风能集中接入的多端直流系统直流故障分析与故障检测方法[J]. 电力自动化设备，2020，40(12)：119-126.
LI Jiapeng, LI Yujun, YUAN Xiaotian, et al. DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 119-126.

[7] Global Wind Energy Council. Global wind report 2022[R]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council, 2022.

[8] 唐洪良，周荣亮，孙　磊. 海上风电并网的关键技术与最新进展[J]. 机电工程，2014，31(7)：928-932.
TANG Hongliang, ZHOU Rongliang, SUN Lei. Latest development

and key technologies of offshore wind power for grid integration[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 928-932.

[9] PAN E S, YUE B, LI X, et al. Integration technology and practice for long-distance offshore wind power in China[J]. Energy Conversion and Economics, 2020, 1(1): 4-19.

[10] MUSASA K, NWULU N I. A novel concept for offshore wind-power plant with DC collection system based on radial-connected converter topology[J]. IEEE Access, 2018, 6: 67217-67222.

[11] HENRY S, DENIS A M, PANCIATICI P. Feasibility study of off-shore HVDC grids[C]//Proceedings of IEEE PES General Meeting. Minneapolis, USA: IEEE, 2010: 1-5.

[12] 郭高朋，姚良忠，温家良，等. 基于半控整流器的直流侧串联海上风电并网系统[J]. 中国电机工程学报，2015，35(15)：3843-3850.
GUO Gaopeng, YAO Liangzhong, WEN Jialiang, et al. Offshore wind farm grid connected system based on DC side series of semi-controlled rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3843-3850.

[13] 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.

[14] 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.

[15] LIU S Q, WANG X F, NING L H, et al. Integrating offshore wind power via fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1253-1261.

[16] 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.

[17] 王　鑫，王海云，王维庆. 大规模海上风电场电力输送方式研究[J]. 电测与仪表，2020，57(22)：55-62.
WANG Xin, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Research on power transmission mode of large-scale offshore wind farms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22): 55-62.

[18] BU S Q, DU W, WANG H F, et al. Investigation on economic and reliable operation of meshed MTDC/AC grid as impacted by offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3901-3911.

[19] 张哲任，唐英杰，傅春翔. 面向海上平台轻型化的跟网型中频远海风电场直流送出方案[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：139-148.
ZHANG Zheren, TANG Yingjie, FU Chunxiang. HVDC transmission scheme of grid-following medium-frequency distant offshore wind farm for offshore platform miniaturization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 139-148.

[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.

[21] 蔡　旭，杨仁炘，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.

[22] 于永生，冯延晖，江红鑫，等. 海上风电经 VSC-MTDC 并网研究[J]. 高压电器，2015，51(10)：24-33.
YU Yongsheng, FENG Yanhui, JIANG Hongxin, et al. Research on offshore wind farm integration via VSC-MTDC[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 24-33.

[23] 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.

[24] LI R, YU L J, XU L, et al. Coordinated control of parallel DR-HVDC and MMC-HVDC systems for offshore wind energy transmission[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2572-2582.

[25] CHANG Y R, CAI X. Hybrid topology of a diode-rectifier-based HVDC system for offshore wind farms[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 2116-2128.

[26] 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.

[27] LI R, YU L J, XU L. Offshore AC fault protection of diode rectifier unit-based HVDC system for wind energy transmission[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5289-5299.

[28] MUSASA K, NWULU N I, GITAU M N, et al. Review on DC collection grids for offshore wind farms with high-voltage DC transmission system[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(15): 2104-2115.

[29] JOVCIC D, TAHERBANEH M, TAISNE J P, et al. Offshore DC grids as an interconnection of radial systems: protection and control aspects[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 903-910.

[30] HOLTSMARK N, BAHIRAT H J, MOLINAS M, et al. An all-DC offshore wind farm with series-connected turbines: an alternative to the classical parallel AC model?[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2420-2428.

[31] BAHMANI M A, THIRINGER T, RABIEI A, et al. Comparative study of a multi-MW high-power density DC transformer with an optimized high-frequency magnetics in all-DC offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 857-866.

[32] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2308-2318.

[33] 李政轩，宋　强，曾　嵘，等. 海上风电中频汇集和分布式串联直流输电系统[J]. 中国电机工程学报，2021，41(22)：7608-7620.
LI Zhengxuan, SONG Qiang, ZENG Rong, et al. A novel HVDC system integrating offshore wind farms using series-connected distributed MMCs and medium-frequency AC collection network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7608-7620.

[34] RONG F, WU G P, LI X, et al. ALL-DC offshore wind farm with series-connected wind turbines to overcome unequal wind speeds[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1370-1381.

[35] GUO G P, SONG Q, ZHAO B, et al. Series-connected-based offshore wind farms with full-bridge modular multilevel converter as grid- and generator-side converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2798-2809.

[36] BAHIRAT H J, MORK B A. Operation of DC series-parallel connect-

ed offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 596-603.

[37] 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.

[38] 李　响，韩民晓，许　东. 直流串并联海上风电机组控制策略[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(3)：46-52.
LI Xiang, HAN Minxiao, XU Dong. Control strategy of DC parallel-series offshore wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 46-52.

[39] LI Y J, XU Z, NGAN H W, et al. A novel topology design for integration of offshore wind farm via high-voltage DC transmission[J]. Electric Power Components and Systems, 2015, 43(8/10): 1100-1112.

[40] 蔡　旭，施　刚，迟永宁，等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2036-2048.
CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036-2048.

[41] GUAN M Y. A series-connected offshore wind farm based on modular dual-active-bridge(DAB) isolated DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1422-1431.

[42] 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.

[43] VEILLEUX E, LEHN P W. Interconnection of direct-drive wind turbines using a series-connected DC grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 139-147.

[44] NIAKI S H A, HOSSEINI S M, ABDOOS A A. Fault detection of HVDC cable in multi-terminal offshore wind farms using transient sheath voltage[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(13): 1707-1713.

[45] XING L H, YANG D, ZHANG D D, et al. Fault transient simulation analysis for HVDC transmission lines[C]// Proceedings of the 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Changsha, China: IEEE, 2015: 312-317.

[46] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Multi-terminal DC wind farm collection and transmission system internal fault analysis[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Bari, Italy: IEEE, 2010: 2437-2442.

[47] RAJIMOL S, CHANDRABOSE K N. Fault analysis and traveling waves based protection in bipolar 500 kV HVDC system[C]// Proceedings of 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies. Kerala, India: IEEE, 2017: 478-485.

[48] RAHMAN M, RABBI F, ISLAM K, et al. HVDC over HVAC power transmission system: fault current analysis and effect comparison[C]// Proceedings of 2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2014: 1-6.

[49] CHANG B, CWIKOWSKI O, BARNES M, et al. Multi-terminal VSC-HVDC pole-to-pole fault analysis and fault recovery study[C]// Proceedings of the 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK: IET, 2015: 1-8.

[50] 李　斌，何佳伟，李　晔，等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.

[51] HUANG Q, ZOU G B, ZHANG S, et al. A pilot protection scheme of DC lines for multi-terminal HVDC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1957-1966.

[52] ZHANG S, LI Y L. Simulation and analysis of HVDC line protection under the single pole to ground fault with high transition resistance[C]//Proceedings of the 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Weihai, China: IEEE, 2011: 926-929.

[53] CHEN J K, LI B H, DONG B, et al. Simulation and analysis of fault characteristics of the MMC-HVDC system under bipolar connection mode[C]// Proceedings of 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Xi'an, China: IEEE, 2016: 2534-2538.

[54] NADEEM M H, TAI N L, ZHENG X D, et al. Multi-terminal HVDC fault current analysis during line to ground fault[C]// Proceedings of 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Auckland, New Zealand: IEEE, 2017: 1-5.

[55] 黄　强，邹贵彬，高　磊，等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术，2018，42(9)：2830-2840.
HUANG Qiang, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Review on DC transmission line protection technologies of HB-MMC based DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2830-2840.

[56] 徐　敏，蔡泽祥，李晓华，等. 考虑频变参数和直流控制的直流输电系统线路故障解析[J]. 电力系统自动化，2015，39(11)：37-44.
XU Min, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of line faults on HVDC transmission system considering frequency-dependent parameters and HVDC control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 37-44.

[57] 梁　益，蔡泽祥，田得良，等. 直流线路行波保护解析整定方法[J]. 电网技术，2017，41(1)：298-304.
LIANG Yi, CAI Zexiang, TIAN Deliang, et al. Analytical method for travelling wave protection setting of HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 298-304.

[58] XIN G M, WANG P R, WEI X R, et al. Short-circuit fault characteristics analysis for the overhead line in MMC-HVDC power grid[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Power System Technology. Guangzhou, China: IEEE, 2018: 2941-2947.

[59] 郑　眉，陈　骞，宋远见，等. 模块化组合式直流变压器的单极接地故障特性和恢复策略研究[J]. 高压电器，2021，57(9)：50-57.
ZHENG Mei, CHEN Qian, SONG Yuanjian, et al. Research on single-pole ground fault characteristics and recovery strategy of MCT[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 50-57.

[60] 郭晓茜，崔　翔，齐　磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报，2017，37(8)：2177-2184.
GUO Xiaoqian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2177-2184.

[61] YANG S Z, XIANG W, LI R, et al. An improved DC fault protection algorithm for MMC HVDC grids based on modal-domain analysis[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4086-4099.

[62] 康保林，高　亮，屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究[J]. 电测与仪表，2020，57(13)：130-136.
KANG Baolin, GAO Liang, QU Zicheng. Research on DC faults

analysis and protection scheme of DC power grid based on MMC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 130-136.

[63] GUO H, LAM S. Fault analysis and protection of a series-DC collection and transmission system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5417-5428.

[64] 李泽文，唐 迪，夏翊翔，等. 输电线路故障行波保护综述[J]. 电力工程技术，2020，39(5)：49-58.
LI Zewen, TANG Di, XIA Yixiang, et al. A summary of fault traveling wave protection for transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 49-58.

[65] 汤兰西，董新洲，施慎行，等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术，2018，42(10)：3176-3186.
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3176-3186.

[66] MA Y J, LI H F, WANG G, et al. Fault analysis and traveling-wave-based protection scheme for double-circuit LCC-HVDC transmission lines with shared towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1479-1488.

[67] 李爱民，蔡泽祥，李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报，2010，30(25)：94-100.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.

[68] HE Z, HU J B, LIN L, et al. Pole-to-Ground fault analysis for MMC-HVDC grid[C]// Proceedings of the 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Busan, Korea (South): IEEE, 2019: 2984-4989.

[69] LAN T, LI Y H, DUAN X Z. High fault-resistance tolerable traveling wave protection for multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 943-956.

[70] 杨赛昭，向 往，文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述[J]. 中国电机工程学报，2019，39(22)：6600-6616.
YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. Review of DC Fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6616.

[71] LI S L, CHEN W, YIN X G, et al. A novel integrated protection for VSC-HVDC transmission line based on current limiting reactor power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 226-233.

[72] 戴志辉，赵中秋，王兴国，等. 基于直流滤波器多频率单端电气量的高压直流线路保护[J/OL]. 高电压技术，2022：1-13[2022-08-11]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20211799.
DAI Zhihui, ZHAO Zhongqiu, WANG Xingguo, et al. HVDC line protection based on DC filter multifrequency single-end electric parameters[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-13[2022-08-11]. https: //doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20211799.

[73] 董新洲，汤兰西，施慎行，等. 柔性直流输电网线路保护配置方案[J]. 电网技术，2018，42(6)：1752-1759.
DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759.

[74] 张腾跃，韩昆仑，陈锋元，等. 基于行波高频分量互相关函数离散度的高压直流线路双端保护方法[J/OL]. 高电压技术，2022：1-9[2022-08-11]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20211986.
ZHANG Tengyue, HAN Kunlun, CHEN Fengyuan, et al. Two terminal protection method for HVDC transmission lines based on high-frequency cross-correlation function dispersion of traveling wave[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-9[2022-08-11]. https: //doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20211986.

[75] KAPOOR G, YADAV A, JAIN G, et al. Protection of series capacitor compensated wind park connected transmission line using HHT[C]//Proceedings of 2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control. Mathura, India: IEEE, 2020: 8-13.

[76] 余修勇，肖立业. 基于数学形态学的多端柔性直流系统故障测距方案[J]. 电力自动化设备，2020，40(1)：93-100.
YU Xiuyong, XIAO Liye. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on mathematical morphology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 93-100.

[77] TORRES-OLGUIN R E, HØIDALEN H K. Travelling waves-based fault detection method in multi-terminal HVDC grids connecting offshore wind farms[C] // Proceedings of the 13th International Conference on Development in Power System Protection. Edinburgh, UK: IET, 2016: 1-7.

[78] MITRA B, CHOWDHURY B, MANJREKAR M. Fault analysis and hybrid protection scheme for multi-terminal HVDC using Wavelet transform[C] // Proceedings of 2016 North American Power Symposium. Denver, USA: IEEE, 2016: 1-6.

[79] TANG L X, DONG X Z, WANG B, et al. Protection configuration and scheme for the transmission line of VSC-HVDC grid[C]//Proceedings of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, USA: IEEE, 2018: 1-5.

[80] 王 帅，毕天姝，贾 科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术，2016，40(7)：2179-2185.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.

[81] 宁连营，邰能灵，郑晓冬，等. 基于单端暂态电流的 MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(17)：5010-5017.
NING Lianying, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5017.

[82] JIANG L, CHEN Q, WANG L, et al. Novel protection method for VSC-HVDC transmission lines[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2142-2146.

[83] TANG L X, DONG X Z, SHI S X, et al. Analysis of the characteristics of fault-induced travelling waves in MMC-HVDC grid[J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(15): 1349-1353.

[84] LIU J, TAI N L, FAN C J. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1483-1494.

[85] HUANG Q, ZOU G B, XU C H, et al. Fast single-end line protection method for the meshed multi-terminal HVDC grid[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 1602-1606.

[86] MAX L, THIRINGER T, CARLSON O. Fault handling for a wind farm with an internal DC collection grid[J]. Wind Energy, 2012, 15(2): 259-273.

[87] MUHAMMAD M G, HAFEZ D M, ABD-ELAZIZ A M. Novel HVDC transmission line protection scheme based on current differential[C] // Proceedings of the 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference. Cairo, Egypt: IEEE, 2018: 361-366.

[88] CAO R B, LI G Y, LI Y, et al. Multi-terminal hybrid UHVDC line protection scheme[C] // Proceedings of the 8th Renewable Power Generation Conference. Shanghai, China: IET, 2019: 1-6.

[89] ELGEZIRY M, ELSADD M, ELKALASHY N, et al. Non-pilot protection scheme for multi-terminal VSC-HVDC transmission systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(16): 3033-3042.

[90] 刘　树，杨林刚，刘　斌，等. 海上风电柔性直流送出线路的纵联保护方法[J]. 电力系统及其自动化学报，2021，33(3)：81-88.
LIU Shu, YANG Lingang, LIU Bin, et al. Pilot protection method for VSC-HVDC outgoing line from offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 81-88.

[91] ABU-ELANIEN A E B. An artificial neural network based technique for protection of HVDC grids[C]// Proceedings of 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia. Bangkok, Thailand: IEEE, 2019: 1004-1009.

[92] 和敬涵，罗易萍，罗国敏，等. 基于小波多分辨分析和支持向量机的柔性直流系统单端保护方案[J]. 电网技术，2018，42(12)：4022-4030.
HE Jinghan, LUO Yiping, LUO Guomin, et al. A single-ended protection algorithm based on wavelet multi-resolution analysis and support vector machine for flexible DC systems[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4022-4030.

[93] MITRA B, CHOWDHURY B, MANJREKAR M. HVDC transmission for access to off-shore renewable energy: a review of technology and fault detection techniques[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(13): 1563-1571.

[94] MERLIN V L, DOS SANTOS R C, LE BLOND S, et al. Efficient and robust ANN-based method for an improved protection of VSC-HVDC systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(13): 1555-1562.

[95] PAILY B, KUMARAVEL S, BASU M, et al. Fault analysis of VSC HVDC systems using fuzzy logic[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems. Kozhikode, India: IEEE, 2015: 1-5.

[96] BERTHO R, LACERDA V A, MONARO R M, et al. Selective non-unit protection technique for multiterminal VSC-HVDC Grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2106-2114.

[97] 董新洲，雷傲宇，汤兰西，等. 行波特性分析及行波差动保护技术挑战与展望[J]. 电力系统自动化，2018，42(19)：184-191.
DONG Xinzhou, LEI Aoyu, TANG Lanxi, et al. Analysis of traveling wave characteristics and challenges and prospects of traveling wave differential protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 184-191.

[98] WANG D, YU D C, YANG H S, et al. Novel travelling wave directional pilot protection for VSC-HVDC transmission line[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(9): 1705-1713.

[99] 张大海，武传健，和敬涵，等. 基于未失真因子的 LCC-MMC 混合直流输电线路保护方案[J]. 高电压技术，2022，48(1)：166-177.
ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, et al. Protection scheme for transmission lines of LCC-MMC hybrid HVDC system based on undistorted factor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 166-181.

[100] FARSHAD M. Ultra-high-speed non-unit non-differential protection scheme for buses of MMC-HVDC grids[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(9): 1541-1549.

[101] FARSHAD M. A pilot protection scheme for transmission lines of half-bridge MMC-HVDC grids using cosine distance criterion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1089-1096.

[102] 高淑萍，胡振宇，张保会，等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(13)：13-20.
GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 13-20.

[103] NING L Y, ZHENG X D, TAI N L, et al. A novel pilot protection scheme for MMC-HVDC transmission lines[C]// Proceedings of 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Cincinnati, USA: IEEE, 2017: 105-110.

[104] LV C, TAI N L, ZHENG X D. Protection principle for MMC-HVDC DC lines based on boundary signals[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 961-965.

[105] DENG F J, CHEN Z. Operation and control of a DC-Grid offshore wind farm under DC transmission system faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1356-1363.

[106] ASHOURI M, BAK C L, DA SILVA F F. A review of the protection algorithms for multi-terminal VCD-HVDC grids[C]// Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology. Lyon, France: IEEE, 2018: 1673-1678.

[107] DAVE J, ERGUN H, VAN HERTEM D. Incorporating DC grid protection, frequency stability and reliability into offshore DC grid planning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2772-2781.

[108] 李　斌，何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(1)：87-95.
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.

[109] ANSARI J A, LIU C R, KHAN S A. MMC based MTDC grids: a detailed review on issues and challenges for operation, control and protection schemes[J]. IEEE Access, 2020, 8: 168154-168165.

[110] 郭　铸，刘　涛，陈　名，等. 南澳多端柔性直流工程线路故障隔离策略[J]. 南方电网技术，2018，12(2)：41-46.
GUO Zhu, LIU Tao, CHEN Ming, et al. Isolation strategy for line fault of Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 41-46.

[111] PEREZ-MOLINA M J, LARRUSKAIN D M, LOPEZ P E, et al. A comparison of non-unit and unit protection algorithms for HVDC grids[C]// Proceedings of 2019 AEIT HVDC International Conference. Florence, Italy: IEEE, 2019: 1-6.

[112] 张　群，赵　倩，郝俊芳，等. 基于直流断路器的柔性直流电网架空线路故障隔离策略研究[J]. 高压电器，2020，56(3)：17-22.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, HAO Junfang, et al. Study on fault isolation strategy of overhead transmission line based on DC circuit breaker in flexible DC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 17-22.

[113] MOKHBERDORAN A, AZAD S P, VAN HERTEM D, et al. Protection of HVDC grids using unidirectional DC circuit breakers and fast local protection algorithm[C]// Proceedings of the 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Manchester, UK: IET, 2017: 1-6.

[114] 陈　磊，何慧雯，王　磊，等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(19)：119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[115] MARVIK J I, D'ARCO S, SUUL J A. Communication-less fault detection in radial multi-terminal offshore HVDC grids[C]// Proceedings of the 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, UK: IET, 2015: 1-8.

[116] SHEN F, HU Y, WANG X R, et al. A DC fault protection scheme for

half-bridge sub-module based MMC-HVDC[C]// Proceedings of 2017 China International Electrical and Energy Conference. Beijing, China: IEEE, 2017: 564-570.

[117] LI B, LIU H J, WEN W J, et al. DC faults ride-through and fast recovery of MVDC system based on improved HB-MMC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 3056-3066.

[118] PARKER M A, HOLLIDAY D, FINNEY S J. DC protection for a multi-terminal HVDC network including offshore wind power, featuring a reduced DC circuit breaker count[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(17): 4511-4515.

[119] SHI L, ADAM G P, LI R, et al. Enhanced control of offshore wind farms connected to MTDC network using partially selective DC fault protection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 2926-2935.

[120] ZHANG L, ZOU Y T, YU J C, et al. Modeling, control, and protection of modular multilevel converter-based multi-terminal HVDC systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 340-352.

[121] 孙 栩，朱 晋，刘文龙，等. 一种具有故障隔离能力的MMC-HVDC换流站子模块拓扑研究[J]. 电力自动化设备，2017，37(3)：120-125.
SUN Xu, ZHU Jin, LIU Wenlong, et al. Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 120-125.

[122] 向 往，林卫星，文劲宇，等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：5171-5179.
XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5179.

[123] LIAO J Q, ZHOU N C, WANG Q G, et al. A bypass LCC-Based DC fault isolation scheme for bipolar MMC-HVDC[J]. IEEE Access, 2019, 7: 118218-118228.

[124] XUE Y L, XU Z. On the bipolar MMC-HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission: configuration, control, and DC fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2420-2429.

[125] 文泓铸，谭建成. 基于模块化多电平换流器的直流系统故障隔离技术综述[J]. 电气开关，2019，57(4)：5-8，13.
WEN Hongzhu, TAN Jiancheng. Review of the DC fault isolation technique in MMC-HVDC system[J]. Electric Switchgear, 2019, 57(4): 5-8, 13.

[126] SUBRAMANIAM K, ILLINDALA M S. High impedance fault detection and isolation in DC microgrids[C]// Proceedings of the 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Calgary, Canada: IEEE, 2019: 1-8.

[127] 郑 涛，吴 琼，吕文轩，等. 基于主动限流控制的直流配电网保护及故障隔离方案[J]. 电力系统自动化，2020，44(5)：114-121.
ZHENG Tao, WU Qiong, LÜ Wenxuan, et al. Protection and fault isolation scheme based on active current-limiting control for DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 114-121.

[128] ZHANG S, LI H C, LI H J, et al. Control of DC grid for fault current limiting and system fast recovery[C]// Proceedings of the 2020 2nd International Conference on Information Technology and Computer Application. Guangzhou, China: IEEE, 2020: 326-329.



郝治国
1976—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力变压器新型保护与安全运行、交直流电网继电保护原理与技术、新能源电力系统保护与控制
E-mail: zhghao@mail.xjtu.edu.cn

HAO Zhiguo
Ph.D., Professor



谢 凡(通信作者)
1995—，男，博士生
研究方向为多端直流系统继电保护
E-mail: xiefan_ee@stu.xjtu.edu.cn

XIE Fan
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期 2022-04-30 在线出版日期 2022-10-20 编辑 何秋萍