

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231247

基于 CET 变换器的串联型风电全直流系统研究

茹亚伦¹, 王海云¹, 李战龙², 宋国兵³

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100176; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 串联型汇集送出方案被认为是规模化远海风电全直流系统最可能实现的方案。为避免串联型直流风电机组因风电机组间耦合特性引起的过电压现象和风功率损失, 使系统实现高压直流送出和具备直流故障自清除能力, 提出了基于容性能量转移原理 DC/DC 变换器(capacitive energy transfer principle based DC/DC transformer, CET-DCT)的新型串联系统。该系统拓扑中海上升压站为 CET-DCT 结构, 并采用基于混合型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的直流风电机组和岸上换流站。以实现风电机组全工况下的最大功率点跟踪、穿越多种直流故障为目标, 设计了系统的控制与保护策略。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了传统串联系统和新型串联系统的仿真模型。对传统串联系统风电机组间功率不平衡工况的仿真, 验证了风电机组的过电压和风功率损失现象。对新型串联系统稳态工况和故障工况的仿真, 验证了新型串联系统的运行特性及所提策略的有效性。

关键词: 海上风电; 直流汇集和传输; 串联; 直流风电机组; 直流变压器

A series connected wind power full DC system based on a CET converter

RU Yalun¹, WANG Haiyun¹, LI Zhanlong², SONG Guobing³

(1. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Beijing Goldwind Science & Creation Wind Power Equipment Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

Abstract: The series-connected collection and transmission scheme is considered as the most feasible solution for large-scale offshore wind power full DC systems. To avoid overvoltage phenomena and wind power loss caused by the characteristics of series-connected DC wind turbines, to enable the system to achieve high-voltage DC transmission, and self-cleaning capability during DC faults, a novel series-connected system based on the capacitive energy transfer principle DC/DC transformer (CET-DCT) is proposed. The proposed system integrates CET-DCT into an offshore booster station and uses hybrid modular multilevel converters (MMC) for the DC wind turbines and the onshore converter station. To achieve maximum power point tracking under all operating conditions and crossing various DC faults, the control and protection strategies of the system are designed. Simulation models for both the conventional and the novel series-connected systems are developed using PSCAD/EMTDC. By simulating the unbalanced power condition between wind turbines in the traditional series-connected system, the overvoltage and wind power loss phenomena in wind turbines are validated. Using simulations for steady-state and fault conditions of the novel series-connected systems, the operational characteristics and the effectiveness of the proposed strategies in the novel systems are verified.

This work is supported by the National Key R & D Program of China (No. 2021YFB1507005).

Key words: offshore wind farm; DC collection and transmission; series connected; DC wind turbine; DC transformer

0 引言

海上风资源丰富、发电利用小时数高且不易受

地貌影响, 具有较大的开发潜力, 随着海上风电向集群化、规模化、远海化发展, 实现大容量风电功率的远距离传输和安全并网成为亟待解决的关键问题^[1-4]。当前海上风电普遍采用柔直送出^[5-8], 但远海风电规模大, 采用交流汇集带来的损耗不容忽略^[9-10], 为了

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507005)

进一步提高效率、减少电能变换环节,采用直流汇集-直流传输的全直流系统应时而生^[11-12]。

全直流系统可包括由直流风电机组构成的海上风电场、海上升压站、岸上换流站和直流海缆。根据电能汇集方式的不同和有无海上升压站可组合出多种形式。

典型的拓扑是并联汇集电能经海上升压站送出^[13],直流风电机组输出的低压直流在风电场内网汇集为中压直流,海上升压站将电压抬升至高压直流级别后经直流海缆送至岸上换流站。直流内网的汇集电压为 50 kV 左右,高压直流传输电压若采用 320 kV 电压等级,则需要海上升压站用大容量 DC/DC 变换器的变比达到 6 以上。若采用并联汇集后直接送出^[14],则需要构造能够直接输出高压直流的机端升压型直流风电机组,每台风电机组均装设高增益的 DC/DC 变换器,但是高增益的 DC/DC 变换器当前难以实现。因此,在远海场景中采用并联型系统存在困难。

与并联型汇集系统不同,串联型汇集系统将直流风电机组串联达到高压直流等级,然后通过直流海缆输送至岸上换流站^[15]。该方案结构简单、成本低、无需海上平台,且风电机组出口电压低,是解决远海全直流系统建设困难的切实方案^[16]。但串联汇集系统表现出强耦合特性,系统中各台风电机组相互影响,单台风电机组功率波动或退出运行时会造成系统中所有风电机组端口电压的波动^[17],为防止风电机组间功率差异过大时某台风电机组出现较高的过电压情况,需要对电压进行限幅,这又导致了风功率损失^[18]。并且风电机组直接与高压输电线路连接,以 320 kV 电压等级为例,串联阵列中第一台风电机组需要承受 320 kV 的直流偏置电压,限制了输送电压等级的提升^[19],这对机组绝缘提出了挑战。文献[20]提出了适用于串联风电机组的变速控制策略,在对出口电压进行限幅时降低了风功率损失。文献[21]改进了串联型拓扑,通过增加分流电路实现了避免风功率损失和过压现象,但控制复杂度大为提高。文献[22]要求岸上换流站参与限制风电机组电压,能够在限制过电压的同时保证所有风电机组的最大功率,但需要风电场与陆上换流站通信,在通信延迟和线缆损耗增加方面存在一定的局限性。文献[23]提出了基于直流集电器的全直流系统,将每台风电机组分别接到集电器的离散端口,由集电器实现电能汇集和电压抬升,能够降低风电机组间的耦合性,实现风电机组故障的控制和管理,但需要集成直流耗能装置和直流断路器。

目前对全直流系统的拓扑已有一定研究,但对

系统整体配置和设备优化选型的研究较少。在深远海场景中,对设备性能和整体设计的可靠性和灵活性要求较高^[24],同时需要考虑设备紧凑化、轻量化的需求^[25]。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)具有拓展性强、运行方式灵活和控制速度快等特点^[26-27],被认为是最适用于直流系统的拓扑。文献[13]给出了一种直流系统的整体配置方案,系统结构为并联型,风电场汇集电能通过海上升压站送出。方案中采用了基于低调制比 MMC 的风电机组^[28]和基于面对面 MMC^[29]的海上升压站,减少了电能变换环节并满足大容量的需求,但低调制比 MMC 需要特殊的控制方式并且损耗增大,大容量的面对面 MMC 换流器仍需等待中频变压器技术的突破。文献[30]指出并联型系统损耗巨大,可靠性和经济性很差,一般不考虑使用。文献[31]提出了一种新型直流风电机组,并以此组建了串联型风电系统,具有控制性能好、成本低的优势,但文中的新型直流风电机组采用 H 桥结构 DC/DC 变换器,输出两电平直流电压,需要各串联风电机组电压叠加才能输出平稳电压,无法构成高压大容量机组,难以应用于远海风电场。

在前文所提研究基础上,本文分析了串联系统的工作特性和风功率损失产生的机理。为解决上述问题,本文提出一种基于容性能量转移原理 DC/DC 变换器(capacitive energy transfer principle based DC/DC transformer, CET-DCT)^[32-35]的新型串联系统,采用 MMC 的半直驱直流风电机组配合 CET-DCT 实现风电场电压可变,给出了直流电压可变的控制策略,使系统始终能保证功率的全部送出,并给出了故障处理策略,最后在 PSCAD/EMTDC 平台仿真验证了系统的控制性能。

1 传统串联系统

图 1 为传统串联系统的拓扑结构,风电场中输出直流电压的风电机组直接串联实现电压等级的提高,电能由直流海缆输送到岸上换流站后逆变并网。

1.1 传统串联系统的运行特性

风电场的电压在岸上换流站控制保持不变,而串联风电机组的出口电压不单独控制。风电场由 m 台风电机组串联构成,设第 i 台风电机组 ($i = 1, 2, \dots, m$) 的直流出口电压、功率分别为 $U_{wt,i}$ 、 $P_{wt,i}$,串联风电场的电压、功率分别为 U_{wf} 、 P_{wf} ,风电场的电流为 I_{wf} ,根据基尔霍夫电流定律,传统串联系统的运行原理可用式(1)和式(2)解释。

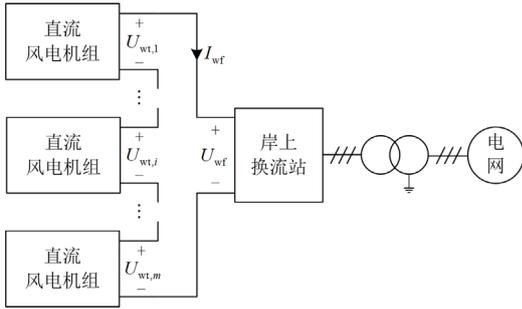


图 1 传统串联系统拓扑

Fig. 1 Topology of traditional series connected system

$$U_{wt,i} = \frac{P_{wt,i}}{P_{wf}} U_{wf} \quad (1)$$

$$I_{wf} = \frac{P_{wf}}{U_{wf}} = \frac{P_{wt,i}}{U_{wt,i}} \quad (2)$$

由式(1)可知, 风电机组出口电压由自身功率和风电场功率共同决定, 一台风电机组的工况发生变化时会影响到风电场中的所有风电机组, 即整个系统表现出强耦合特性。由式(2)可知, 当风电机组输出功率发生变化时, 会依次影响到风电机组电压和风电场电流, 而风电场电流的变化会进一步影响风电机组的出口电压, 直至系统到达一个新的平衡点, 动态特性如图 2 所示。

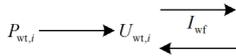


图 2 串联型海上直流风电场动态特性

Fig. 2 Dynamic behavior of series connected offshore DC wind farms

1.2 传统串联系统风功率损失的机理

风电机组间功率不平衡时, 功率较高的风电机组出口电压会超出其额定值 U_{wt}^* ; 当有风电机组退出运行时, 可视为其功率指令为 0, 此时剩余风电机组即便功率保持平衡也会运行在过电压状态。然而, 出于对系统安全性和绝缘耐压等成本的考虑, 风电机组出口电压不可能无限增大, 实际运行时会对风电机组承受的最高电压 U_{Limit} 进行限制。对于有 m 台风电机组的风电场而言, 风电机组的平均功率 P_{avg} 可表示为

$$P_{avg} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{wt,i} \quad (3)$$

风电机组的额定电压可表示为

$$U_{wt}^* = \frac{1}{m} U_{wf} \quad (4)$$

结合式(2), 风电机组的出口电压可表示为

$$U_{wt,i} = U_{wt}^* \frac{P_{wt,i}}{P_{avg}} \quad (5)$$

由式(5)可知, 风电机组间功率不平衡时, 输出功率大于 P_{avg} 的风电机组电压会超出 U_{wt}^* 进入过电压运行状态, 若其出口电压理论值大于 U_{Limit} , 则进入限幅模式使电压维持在 U_{Limit} 而不再升高。此时其余风电机组电压开始升高以达到 U_{wf} 来将功率送出, 由式(2)可知, 风电机组出口电压升高而功率未变, 则风电场电流减小, 进而导致运行在限幅模式的风电机组功率无法全部送出, 即产生了风功率损失。

2 基于 CET-DCT 的新型串联系统

2.1 CET-DCT 的拓扑及工作原理

CET-DCT 拓扑结构如图 3 所示, 包括三相完全相同且独立运行的电路, 每相由 1 个容性储能桥臂和 4 组换流阀 T_{j1} 、 T_{j2} 、 T_{j3} 、 T_{j4} ($j = a, b, c$) 构成, 每个储能桥臂由若干个半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)和 1 个桥臂电感 L_{CET} 串联而成, 每组换流阀由若干个晶闸管串联而成, 低压侧装设耗能电阻电路, 由开关 S_{br} 和电阻 R_f 构成, 可在直流输电线路发生短路等非稳态工况中消耗风电场输出的电能。图中: U_L 、 I_L 分别代表低压侧的电压和电流; U_H 、 I_H 分别代表高压侧的电压和电流; U_{pj} 、 I_{pj} 分别代表桥臂上的电压和电流。

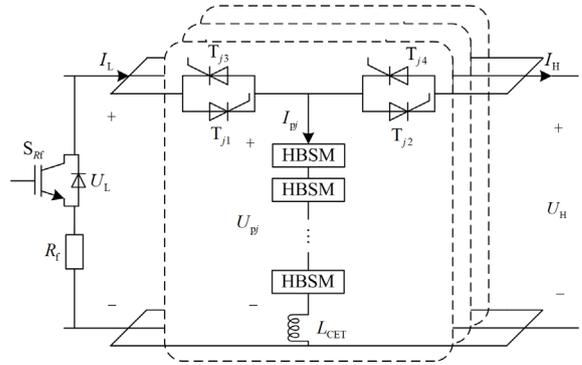


图 3 CET-DCT 拓扑

Fig. 3 Topology of CET-DCT

CET-DCT 无需交流变压器和滤波器, 通过控制换流阀的导通使桥臂交替连接到两侧进行充放电, 且换流阀可控制功率流动方向。CET-DCT 的电压来自于导通子模块电压的叠加, 因此若每个储能桥臂子模块数量为 N , 子模块电容额定电压为 U_{CCET} , 则 CET-DCT 电压增益范围为 $0 \sim N \times U_{CCET}$, 即具有宽范围变比。CET-DCT 的工作周期为 T_h , 工作频率

为 f_h ，通过提高工作频率，可降低子模块中电容器的容量，因此能够大幅减小海上换流站的体积。

CET-DCT 三相电路交替运行，依次相差 120° ，以 A 相为例阐述其工作原理，图 4 为功率由低压侧向高压侧传递时的工作波形。

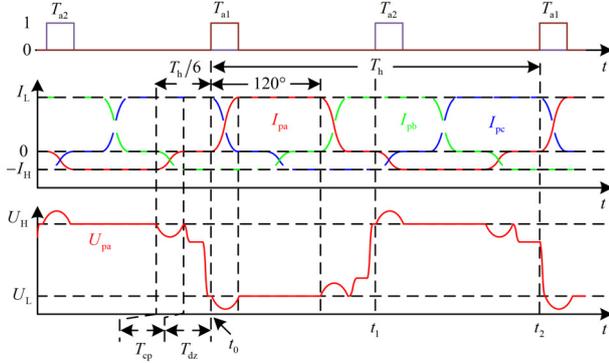


图 4 CET-DCT 的工作原理

Fig. 4 Working principle for CET-DCT

1) $[t_0 \sim t_1]$ 充电阶段。桥臂电压 U_{pa} 等于低压侧电压 U_L ，晶闸管 T_{a1} 收到触发信号零电压导通，桥臂电感 L_{CET} 产生幅值为 $-U_0$ 的驱动电压，桥臂电流 I_{pa} 正弦上升至 I_L ，实现恒压恒流充电。在导通 120° 电角度后，CET-DCT 开始换相，此时桥臂电感 L_{CET} 会产生幅值为 U_0 的驱动电压，桥臂电流 I_{pa} 正弦下降至 0，晶闸管 T_{a1} 承受幅值为 $U_L - U_H$ 的反向电压零电流关断。

2) $[t_1 \sim t_2]$ 放电阶段。功率由储能桥臂向高压侧传递，晶闸管 T_{a2} 导通，工作原理与充电过程相似，

不再详细描述。

此外，图 4 中 T_{cp} 为换流阶段，桥臂电流在 T_{cp} 时间内完成正弦上升/下降； T_{dz} 为过渡阶段，换流阀的晶闸管借此实现软开关。

2.2 基于 CET-DCT 的新型串联系统设计

基于以上分析，本文提出了基于 CET-DCT 的新型串联系统，拓扑结构如图 5 所示。系统的整体配置如下：基于 MMC 的直流风电机组(MMC based DC wind turbine, MMCWT)通过串联汇集电能和进行第一次升压，MMCWT 只需输出低压，因此风电机组 MMC 无需工作在低调制比模式。MMCWT 由半直驱永磁同步电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)驱动混合型 MMC 构成。采用半直驱 PMSG 是当前大功率机组的主流趋势，且更适应海上环境；混合型 MMC 中 HBSM 和全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)的占比为 1:1，使直流出口电压工作范围扩大到 $0 \sim 1$ p.u.，并且在具备了直流故障阻断能力的同时，IGBT 数量相比全桥型 MMC 减少了 25%。MMCWT 的结构如图 5 中所示，变压器根据风电机组 MMC 的额定调制比将电压提升到合适的等级，并将 PMSG 与高压汇集线路隔离，可降低风力发电机组的绝缘和耐压需求。MMCWT 直流侧装设隔离开关 S1、S2 和旁路开关 F，可保证机组因故障或检修等原因退出运行时串联风电场的能量流路径。CET-DCT 作为海上直流升压站主要设备，可降低风电场的电压等级和实现不同电压等级线路的连接，将风电场发出的电能通过高压输电线路的直流海缆送至岸上换流站逆变并网。

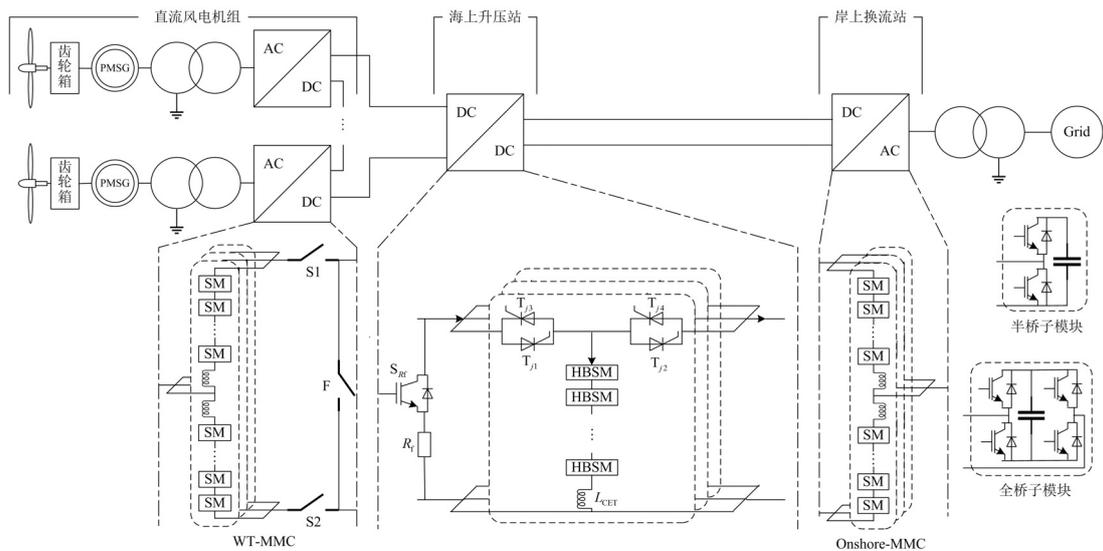


图 5 基于 CET-DCT 的新型串联系统拓扑

Fig. 5 Topology of CET-DCT based novel series connected system

该方案采用高度模块化的设计, 可靠性强、运行控制灵活性高且易于拓展。本文采用 CET-DCT 作为海上串联型风电全直流系统的关键环节, 与基于 MMCWT 的串联直流风电场的协同控制, 可极大降低风电机组间耦合特性的影响。风电场电压可变, 使得风电场的功率在风电机组间功率不平衡或有风电机组退出运行时仍可实现全部送出, 且 MMCWT 不会承受过电压; 系统能够实现故障隔离、动态切投和直流耗能运行以及高压直流送出, 对远海规模

化风电系统的应用具有重要意义。

3 新型串联系统的控制策略

3.1 CET-DCT 的控制策略

CET-DCT 运行时需要使其两侧功率保持平衡, 这是系统稳定运行的基础, CET-DCT 的控制框图如图 6 所示, 包括能量平衡控制、低压侧电流控制、桥臂电流控制和换流阀触发控制, 此处仍以 A 相为例介绍控制策略。

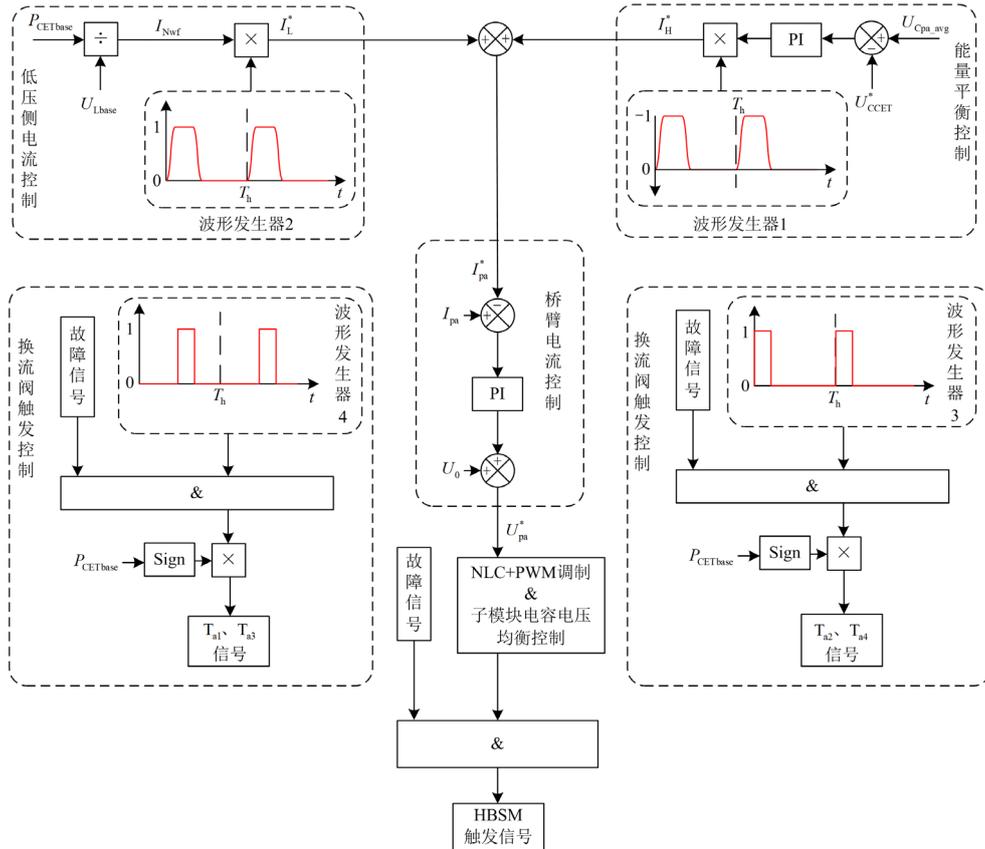


图 6 CET-DCT 的控制策略

Fig. 6 Control strategy for CET-DCT

能量平衡控制负责维持子模块电容的电压, 将采集后计算得到的桥臂子模块电容电压平均值 U_{Cpa_avg} 与子模块电容电压参考值 U_{CCET}^* 作差送入 PI 控制器, 并将 PI 控制器的输出通过波形发生器 1 控制成高压侧直流电流参考值 I_H^* 。

风电场侧额定电流的幅值 I_{Nwf} 如式(6)所示。

$$I_{Nwf} = \frac{P_{CETbase}}{U_{Lbase}} \quad (6)$$

式中, $P_{CETbase}$ 和 U_{Lbase} 分别为 CET 变换器的额定功率和额定低压侧电压。

通过波形发生器 2 将其控制为风电场侧额定电流参考值 I_{wf}^* 。

将 I_H^* 和 I_{wf}^* 叠加即可得到桥臂电流参考值 I_{pa}^* , 将采样得到的桥臂电流 I_{pa} 与 I_{pa}^* 作差, 通过 PI 控制器并叠加, 保证晶闸管可靠关断的桥臂电感电压 U_0 后, 得到桥臂电压调制波 U_{pa}^* , 进行调制和子模块均压。

通过波形发生器 3 和波形发生器 4 可对换流阀的晶闸管施加触发信号, 叠加 $\text{Sign}(P_{CETbase})$ 可判断能量流动方向, 从而正确地使晶闸管导通。

图 6 中故障信号在系统正常运行时为 1, 故障时置 0, 具体保护策略可见第 4 节。

控制策略中的能量平衡控制使 CET-DCT 两侧功率保持平衡, 确保系统能够稳定运行。为了达到风电场电压可变的目標, 若选择直接控制风电场电压, 则与文献[22]一样需要与风电场保持通信, 不具备任何优势。因此本文选择控制风电场侧电流, 通过与 MMCWT 的控制策略配合实现风电场电压可变, 且电流控制具有比电压控制更快的响应速度, 有利于提高系统性能。此时需要 MMCWT 控制自身出口电压, 具体策略将在下文展示。

3.2 CET-DCT 的调制策略

CET-DCT 波形不按正弦变化, 若采用最近电平调制(nearly level modulation, NLM)会在电压恒定阶段出现开关长时间不动作的情况, 导致电流畸变, 高低压转换的 T_{cp} 阶段又会出现电平跳变, 影响运行性能。文献[36]提出一种全电平调制策略(full level modulation, FLM), 令 MMC 桥臂中始终有 1 个子模块工作在脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)模式, 最终的调制信号为 NLM 波和 PWM 波叠加而成, 文献的仿真结果表明系统交流侧波形得到改善。

本文借鉴 FLM 原理, 将其应用到 CET-DCT 的调制中, 构成附加 PWM 控制的 NLM 调制策略。首先, 通过将桥臂电压调制波 U_{pj}^* 向下取整函数可以得到 NLM 调制需要投入的子模块数 N_{NLM} , 如式(7)所示。

$$N_{NLM} = \text{floor}\left(\frac{U_{pj}^*}{U_{CCET}^*}\right) \quad (7)$$

将桥臂电压调制波 U_{pj}^* 和 NLM 调制波的差值作为 PWM 调制波 U_{PWM} , 即

$$U_{PWM} = U_{pj}^* - N_{NLM} \times U_{CCET}^* \quad (8)$$

PWM 采用的三角载波幅值为 U_{CCET}^* , 将 U_{PWM} 与三角载波通过比较器后即可得到 PWM 调制需要投入的子模块数 N_{PWM} , 进而可以得到需要投入的子模块总数 N_{on} , 如式(9)所示。

$$N_{on} = N_{NLM} + N_{PWM} \quad (9)$$

最后通过基于排序的子模块投切逻辑进行子模块投切。此外, CET-DCT 电流波形在 T_{cp} 阶段和电压恒定阶段对开关频率的要求不同, 可在电压恒定时降低三角载波的频率来减少损耗。

3.3 MMC 的控制策略

本文中风电机组和岸上换流站均采用混合型 MMC 作为换流器, 但容量不同, 基本控制策略均采用基于 dq 坐标系的双闭环控制, 内环电流控制均

用于实现快速跟踪控制目标, 外环控制和调制策略则存在差异。

风电机组 MMC 采用如图 7 中所示的有功外环控制器, 与 CET-DCT 的控制策略配合能够在控制 MMC 输出有功的同时控制风电机组出口电压, 其余部分与传统 MMC 控制相同, 不再赘述。采用子模块电容均压控制^[37]维持风电机组 MMC 子模块电压稳定, 通过载波移相调制(carrier phase shifted-PWM, CPS-PWM)生成触发信号。风电机组 MMC 的完整控制框图如图 7 所示, 其中: P_{wt}^* 、 Q_{wt}^* 分别为风电机组 MMC 的有功指令和无功指令; I_{dwt}^* 和 I_{qwt}^* 分别为风电机组 MMC 控制器电流内环的参考指令; ωL_{wt} 为解耦项; E_{dwt} 、 E_{qwt} 分别为前馈项的 dq 轴分量。

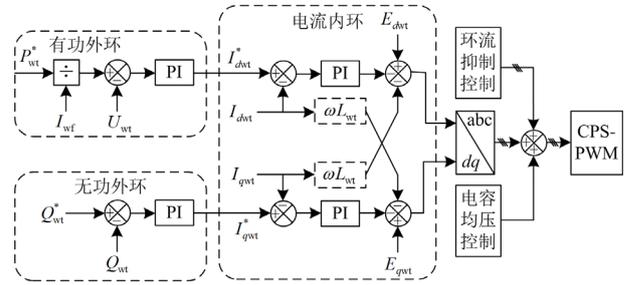


图 7 风电机组 MMC 的控制策略

Fig. 7 Control strategy for wind turbine MMC

岸上换流站 MMC 的控制框图如图 8 所示, 除了双闭环控制外还增加了独立的直流控制。其中, U_{Cavg6p} 为 6 个 MMC 桥臂子模块电容电压的平均值, U_H^* 为换流站直流侧电压指令。有功外环控制器为子模块电容电压控制, 无功外环控制器与传统策略并无区别。正常运行时, 直流电压控制的参考值 U_H^* 可直接给定; 当直流侧发生短路故障时, 直流控制模式切换为直流电流控制, 可实现无闭锁穿越故障。

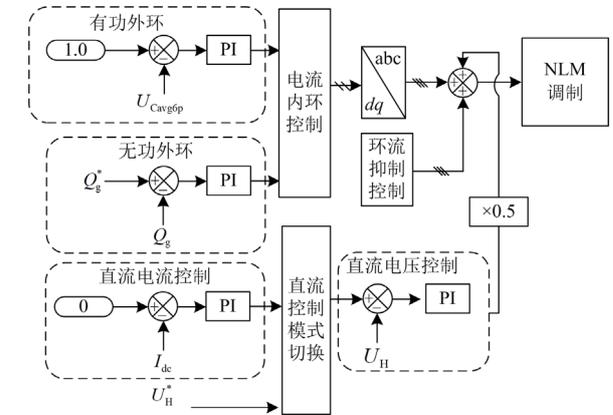


图 8 岸上 MMC 的控制策略

Fig. 8 Control strategy for wind onshore MMC

4 系统的故障处理策略

4.1 MMCWT 内部故障

当 MMCWT 因为自身的电气元件、电路或者控制系统出现问题时, 需要将 MMCWT 退出运行进行检修, 此时可通过装设的隔离开关 S1、S2 和旁路开关 F 进行切除, 操作逻辑如图 9 所示。

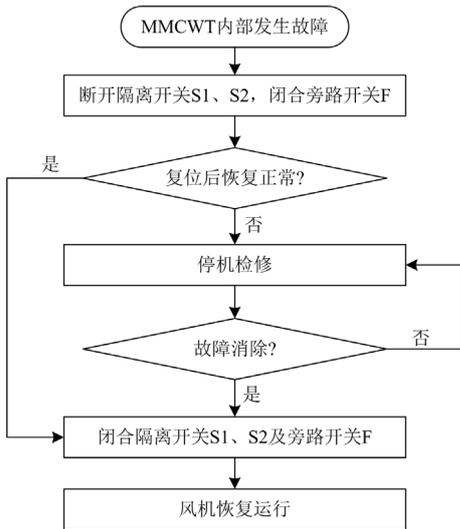


图 9 MMCWT 内部故障的操作逻辑

Fig. 9 Operational logic for internal fault of MMCWT

当第 i 台 MMCWT 故障时, 隔离开关 S1、S2 断开, 将故障源隔离, 同时闭合旁路开关 F, 为串联风电场提供能量流通过路, 此时 MMCWT 内部的功率器件均应闭锁。若 MMCWT 可通过复位重启, 则闭合隔离开关 S1、S2, 断开旁路开关 F; 否则, 需要对 MMCWT 进行检修, 恢复正常后可通过由直流侧吸收功率实现自启动。

4.2 直流输电线路短路

直流输电线路短路会危害系统中的换流设备, 可能造成严重的人身伤害和巨大的经济损失。本文采用的 CET-DCT 和 MMC 均具备直流故障自清除能力, 可保证设备在故障期间不被损坏。

当直流输电线路发生短路故障时, 故障电流在 CET-DCT 中的流通过路如图 10 所示。仍以 CET-DCT 的 A 相为例, 根据故障发生时 A 相的工作状态可分为两种情况: (1) 储能桥臂从低压侧吸收功率。此时储能桥臂和故障点没有连接, 如图 10(a)所示, 故无故障电流路径。在检测到故障后闭锁子模块和换流阀, 中断储能桥臂的充电过程, 并防止形成故障通路。(2) 储能桥臂向高压侧输出功率。此时储能桥臂与故障点有连接, 如图 10(b)所示, 检测到故障后闭锁子模块和换流阀, 故障电流可流经桥臂电感

L_{CET} 和子模块 IGBT 并联二极管 D2 形成通路, 当流经电感 L_{CET} 的故障电流衰减至零, 晶闸管即可关断, 进而阻断故障。在 CET-DCT 子模块闭锁的同时, 打开耗能电阻开关 S_{Rf} , 可消耗风电场送出的电能, 避免烧坏换流阀。

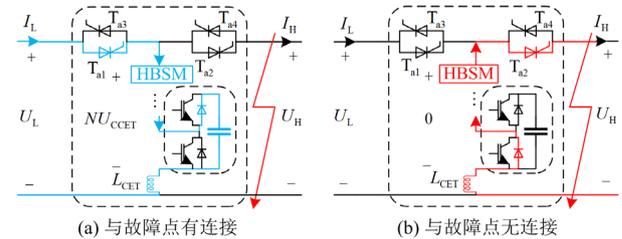


图 10 直流输电线路短路时 CET-DCT 等效电路图

Fig. 10 Equivalent circuit of CET-DCT during short-circuit fault of DC transmission line

岸上换流站 MMC 可通过主动控制实现无闭锁穿越直流短路故障。当检测到直流输电线路短路时, 岸上换流站 MMC 的直流控制切换至图 8 所示的直流电流控制模式, 将直流电流指令置 0, 阻止子模块电容向故障点放电, 将直流故障电流控制到 0 实现阻断。此过程中子模块电容电压控制一直处于工作状态, 对交流系统的无功补偿功能亦未失效。

5 仿真验证

为了验证前文提到的理论分析和所提方案的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 搭建如图 1 所示的传统串联系统模型和本文所提的新型串联系统模型, 两个模型中风电场均由 4 台参数相同的 MMCWT 构成, MMCWT 出口电压限幅为 1.05 p.u.。CET-DCT 的参数见表 1, 风电机组 MMC 和岸上换流站用 MMC 参数见表 2(模型线路损耗忽略不计)。

表 1 CET-DCT 仿真参数

Table 1 Simulation parameters of CET-DCT

参数	数值
额定功率/MW	40
额定低压侧电压/kV	80
额定高压侧电压/kV	240
CET-DCT 工作频率/Hz	250
桥臂电感值/mH	10
桥臂子模块数	132
子模块电容值/mF	1.01
额定子模块电容电压/kV	2
额定子模块电容电压波动/%	10
NLM 频率/kHz	10
PWM 频率(恒定输出/换流阶段)/kHz	20/40
耗能电阻/ Ω	160

表 2 MMC 仿真参数

Table 2 Simulation parameters of MMC

参数	风电机组	岸上 MMC	
	MMC	传统系统	新型系统
额定功率/MW	10	40	40
额定直流电压/kV	20	80	240
额定子模块电容电压/kV	1	1	4
额定子模块电容电压波动/%	10	10	10
桥臂子模块数	20	80	60
子模块电容值/mF	9.26	9.26	0.77
桥臂电感值/mH	4.8	19	172
载波频率/kHz	0.5	10	10

5.1 传统串联系统风功率损失

图 11 为传统串联系统的仿真波形图,自上而下依次是 MMCWT 输出功率 P_{wt} 和出口电压 U_{wt} 、风电场的功率 P_{wf} 、电压 U_{wf} 和电流 I_{wf} 。

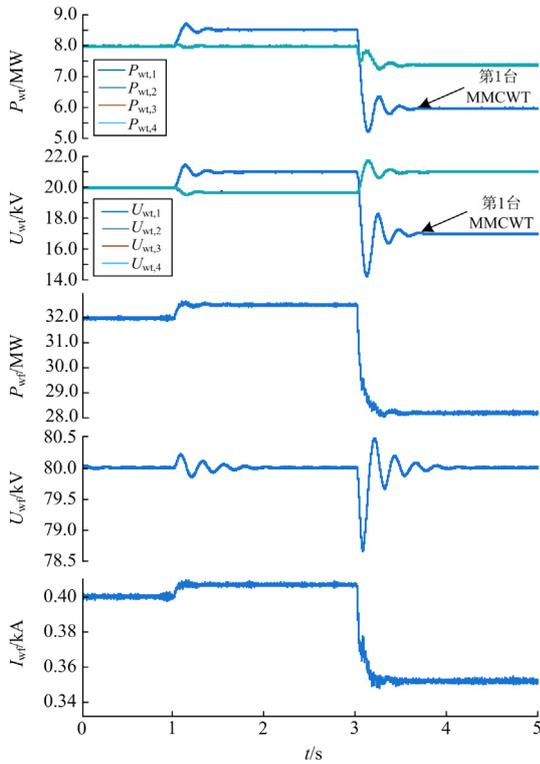


图 11 传统串联系统风功率损失时系统仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms of traditional series system when the output power of MMCWT is losing

初始时刻时 4 台 MMCWT 输出功率均衡且在稳态运行,均为 8 MW,第 1 台 MMCWT 在 1 s 时功率指令变为 10 MW,在 3 s 时其功率指令又变为 6 MW。根据式(1)、式(2),第 1 台 MMCWT 的出口电压在 1 s 后应升至 23.53 kV,在 3 s 后应降至 16 kV。其余 3 台 MMCWT 功率指令始终为 8 MW,

在 1 s 后出口电压降至 18.82 kV,在 3 s 后升至 21.33 kV。

由图 11 中仿真结果可知,风电场中第 1 台 MMCWT 在 1 s 后实际出口电压为 21 kV,实际输出功率为 8.5 MW,在 3 s 后实际出口电压为 17 kV,实际输出功率为 6 MW。其余 3 台 MMCWT 在 1 s 后电压降至 19.68 kV,在 3 s 后电压升至 21 kV,功率降至 7.4 MW。由于传统串联系统的运行特性,风电场在 1~3 s 损失了 1.5 MW 的有功,在 3~5 s 损失了 1.8 MW 的有功,系统未能实现全部有功的送出,且部分 MMCWT 会承受过电压。

5.2 新型串联系统 MMCWT 间输出功率均衡

新型串联系统的仿真波形如图 12 所示,自上而下依次是 MMCWT 输出功率 P_{wt} 和出口电压 U_{wt} 、CET-DCT 风电场侧功率 P_{CET} 以及高压侧的电压 U_{CET} 和电流 I_{CET} 。

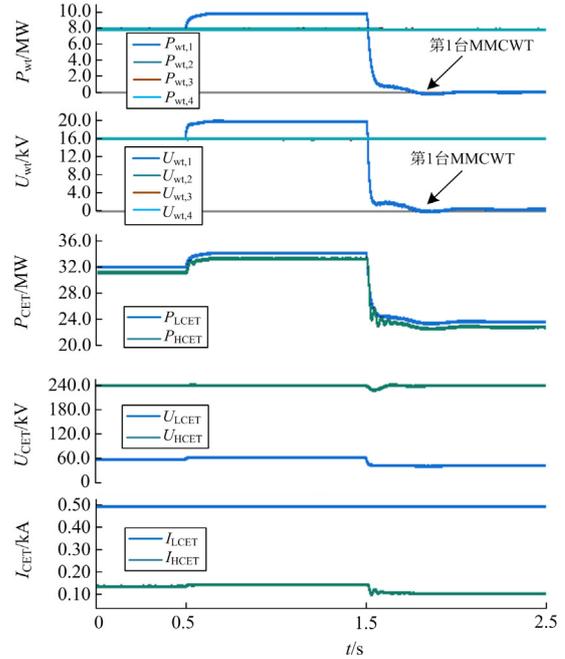


图 12 MMCWT 输出功率变化时系统仿真波形

Fig. 12 Simulation waveforms of the system when the output power of MMCWT is changed

在 0~0.5 s 期间 4 台 MMCWT 输出功率均衡,均为 8 MW。由图 12 可知系统在 MMCWT 输出功率均衡时运行良好,风电场功率可全部送出。

5.3 新型串联系统 MMCWT 间输出功率不均衡

在实际运行中,各台风电机组因风速和地理位置的不同等因素影响,可能会导致其输出功率存在差异。假设系统已处于 5.2 节中 0~0.5 s 的工况运行,第 1 台 MMCWT 在 0.5 s 时功率指令变为 10 MW,

在 1.5 s 时又降至 0。根据理论分析, 第 1 台 MMCWT 的出口电压在 0.5 s 后应升至 20 kV, 在 1.5 s 后应降至 0; 其余 3 台 MMCWT 输出功率始终为 8 MW, 出口电压始终为 16 kV。

由图 12 中仿真结果可知, 第 1 台 MMCWT 在 0.5 s 后输出功率升至 10 MW、出口电压相应地升至 20 kV, 在 1.5 s 后功率和电压则降至 0, 而其余 3 台 MMCWT 在此动态过程中输出功率和出口电压均保持不变。海上换流站的风电场侧电压以及高压侧电压分别在 CET-DCT 和换流站 MMC 的控制下基本保持稳定, 而风电场侧电压和高压侧电流则随着第 1 台 MMCWT 工况的变化随之改变, 在经过一个短暂的动态过程后到达新的稳态。本节仿真结果与理论分析吻合, 在 MMCWT 功率指令发生变化时, 风电场中全部 MMCWT 均可在本文所提策略的控制下调节出口电压, 实现全部功率的送出, 不会出现过压现象, 且高压侧电压不受影响, 系统能够始终保持稳定运行。

5.4 新型串联系统直流输电线路电压波动

图 13 给出了当高压直流输电线路电压在岸上换流站的控制下在 1 s 时由 240 kV 降低至 168 kV, 又在 2 s 时上升至 240 kV 过程中系统的动态特性, MMCWT 全程工作在额定工况。

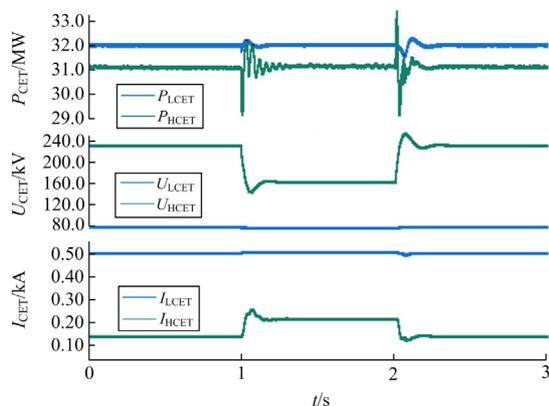


图 13 直流母线电压波动时系统波形

Fig. 13 Simulation waveforms of the system when the voltage of DC bus is changed

由图 13 仿真波形可知, 高压输电线路电压降低后, 由于接收到的功率未发生变化, 导致海上升压站高压侧电流 I_{HCET} 增大, 高压输电线路电压升高则会引起 I_{HCET} 减小。整个动态过程中, 系统中风电场侧波形基本维持不变, 系统能够保持稳定运行。

5.5 新型串联系统 MMCWT 内部故障

图 14 展示了当第 2 台 MMCWT 因故障被切除, 故障清除后又重新投入的系统相关波形。

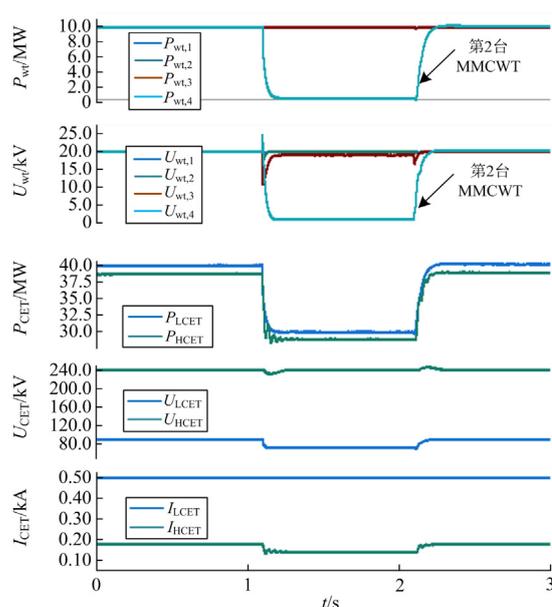


图 14 MMCWT 内部故障时系统仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms of the system of MMCWT internal fault

由图 14 波形可知: 系统初始时刻已处于额定工况运行, 4 台风电机组输出功率为 10 MW, 直流出口电压均为 20 kV。第 2 台风电机组在 1.1 s 时因发生故障被旁路开关切除, 风电机组 MMC 立即闭锁所有子模块, 第 2 台 MMCWT 的输出功率和电压降为 0, 因 1 台风电机组的切除, 使得 CET-DCT 低压侧和高压侧的功率相应降低了 10 MW, 风电场的电压也降低了 20 kV, 而 I_{LCET} 和 U_{HCET} 在控制下基本保持不变, I_{HCET} 因功率的减少而减小至 0.12 kA。在 2.1 s 时, 第 2 台风电机组的旁路开关动作, 子模块解锁, 使其重新投入, 系统经过一个暂态过程后恢复额定工况运行。其余 3 台风电机组在整个过程中, 只有故障风电机组切除和投入时出现了短暂的暂态过程, 其余时间能保持原稳态运行。

5.6 新型串联系统直流输电线路短路

图 15 展示了当直流输电线路短路时的系统相关波形, 自上而下依次是 CET-DCT 高压侧和换流站直流侧的功率、电压、电流以及 CET-DCT 和换流站 MMC 各自 A 相的子模块电容电压标么值。

系统初始时刻已处于额定工况运行, 在 1.1 s 时直流输电线路发生短路接地故障, 2.1 s 时恢复正常运行。CET-DCT 检测到故障后立即闭锁子模块和换流阀, 同时投入直流耗能电阻 R_f 消耗风电场输入的功率, CET-DCT 高压侧的功率、电压和电流降为 0; 岸上换流站控制器经过 3 ms 判断后切换至直流电流控制模式, 故障电流经约 0.19 s 被迅速抑制到 0,

功率和电压也因为短路降至 0。当故障清除后，CET-DCT 切除直流耗能电阻，解锁子模块，岸上换流站恢复到直流电压控制模式，经过一个暂态过程后系统重新正常运行。整个过程中 CET-DCT 和换流站 MMC 的子模块能够保持在额定值左右。恢复过程中暂态电流过大是因为解锁瞬间岸上换流站并未建立稳定的直流电压，CET-DCT 在解锁瞬间桥臂电流控制参考值与实际值偏差过大导致的，后续研究中会继续进行优化。

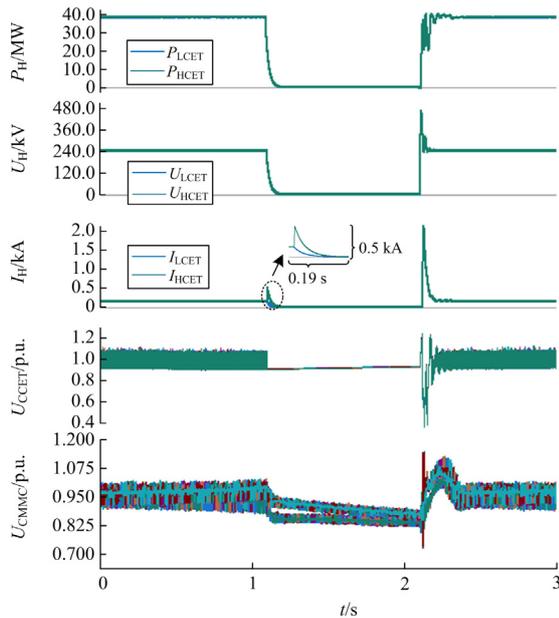


图 15 直流输电线路短路故障时系统仿真波形

Fig. 15 Simulation waveforms of the system during short-circuit fault of DC transmission line

6 结论

本文在分析传统串联系统的基础上，提出了一种基于 CET-DCT 的新型串联系统，并给出了系统的控制方案和故障处理策略。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了仿真模型进行验证，仿真结果表明：CET-DCT 具备宽范围变比，在系统的功率、电压发生变化时可维持系统的稳定运行，保证系统的可靠性；通过 CET-DCT 和风电机组 MMC 的协同控制使风电场电压可变，风电机组功率不平衡不会出现过压和风功率损失现象，系统始终能够完成最大功率送出；当发生 MMCWT 被切除、MMCWT 投入和直流短路故障时，系统能够安全度过故障期。

本文所提系统拓扑具备高度模块化设计，拓展性极佳，与传统串联系统相比，在保证系统稳定性的同时，控制更加灵活。CET-DCT 各相可独立运行，应用场景能够拓展至多端汇集的大容量海上风电基

地送出，且为我国西部荒漠大规模孤岛新能源基地电能的远距离送出提供了新思路。

参考文献

- [1] 黄玲玲, 王启国, 符杨, 等. 考虑电力系统静态稳定增强的海上多端直流系统规划优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 43-51.
HUANG Lingling, WANG Qiguo, FU Yang, et al. Planning and optimization of offshore multi-terminal DC system considering enhancement of power system static stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 43-51.
- [2] 秦少茜, 瞿晟珉, 宋明阳, 等. 考虑故障弃风影响的海上风电场集群 MTDC 系统规划[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 21-27.
QIN Shaoxi, QU Chengmin, SONG Mingyang, et al. Planning of MTDC system for offshore wind farm clusters considering wind power curtailment caused by failure[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 21-27.
- [3] 唐英杰, 张哲任, 徐政. 基于单向电流型 AAMC 的海上风电直流送出方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14): 129-139.
TANG Yingjie, ZHANG Zheren, XU Zheng. Offshore wind power DC transmission scheme based on unidirectional current alternate-arm multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 129-139.
- [4] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] YANG Bo, LIU Bingqiang, ZHOU Hongyu, et al. A critical survey of technologies of large offshore wind farm integration: summary, advances, and perspectives[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022,

- 7(2): 233-264.
- [8] 戴礼国, 杨浩, 陈力, 等. 基于深度强化学习的风电柔直并网系统次同步振荡抑制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(4): 1-7, 91.
DAI Ligu, YANG Hao, CHEN Li, et al. Subsynchronous oscillation suppression method for flexible direct grid-connected wind power system based on deep reinforcement learning[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 1-7, 91.
- [9] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [10] 葛维春, 张诗钜, 崔岱, 等. 海上风电送出与就地消纳技术差异综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 23-32.
GE Weichun, ZHANG Shitan, CUI Dai, et al. Summary of differences between offshore wind power transmission and local consumption technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 23-32.
- [11] 孙瑶, 樊艳芳, 卢俊龙, 等. 陆上风电直流汇集系统拓扑结构优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 142-152.
SUN Yao, FAN Yanfang, LU Junlong, et al. Optimal design method for topology of onshore wind power DC collection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 142-152.
- [12] 杜杰, 李子润, 李国杰. 海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 170-177.
DU Jie, LI Zirun, LI Guojie. Real-time simulation method for a DC/DC collection system in an offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 170-177.
- [13] 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.
- [14] 蔡旭, 杨仁焯, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [15] 江道灼, 谷泓杰, 尹瑞, 等. 海上直流风电场研究现状及发展前景[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2424-2431.
JIANG Daozhuo, GU Hongjie, YIN Rui, et al. Research status and developing prospect of offshore wind farm with pure DC systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2424-2431.
- [16] 何大清, 施刚, 彭思敏, 等. 基于直流串联的风电场运行特性分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 95-99.
HE Daqing, SHI Gang, PENG Simin, et al. Analysis on the operation characteristics of series connected DC based wind farm[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 95-99.
- [17] 何大清, 施刚, 吴国祥, 等. 直流串联型风电机组控制策略及仿真分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 100-104.
HE Daqing, SHI Gang, WU Guoxiang, et al. The control strategy of DC series-type wind turbines and its simulation[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 100-104.
- [18] 李翔宇, ABEYNAYAKE G, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.
LI Xiangyu, ABEYNAYAKE G, YAO Liangzhong, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116-126.
- [19] 李岩, 冯俊杰, 卢毓欣, 等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [20] 姚良忠, 施刚, 曹远志, 等. 海上直流风电场内网中串联直流风机的变速控制[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2410-2415.
YAO Liangzhong, SHI Gang, CAO Yuanzhi, et al. Variable speed control of series-connected DC wind turbines in the internal grid of offshore DC wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2410-2415.
- [21] 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.
- [22] ZHANG H, GRUSON F, FLOREZ D, 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.
- [23] 赵彪, 安峰, 屈鲁, 等. 多功能直流集电器概念及其全直流海上风电系统[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6169-6181.
ZHAO Biao, AN Feng, QU Lu, et al. Multi-function DC-collector concept and its all-DC offshore wind power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6169-6181.
- [24] 刘其辉, 樊双婕, 洪诚程, 等. 采用复合模块化结构的海上风电送出直流变换器[J]. 电力系统自动化, 2022,

- 46(24): 142-151.
LIU Qihui, FAN Shuangjie, HONG Chengcheng, et al. DC/DC converter for offshore wind power transmission using composite modular structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 142-151.
- [25] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [26] 方辉, 周敬森, 王皓正, 等. 基于谐波状态空间的 MMC 背靠背直流输电系统阻抗建模及稳定性分析[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 87-95.
FANG Hui, ZHOU Jingsen, WANG Haozheng, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC based back-to-back HVDC transmission system based on harmonic state space[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 87-95.
- [27] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于 MMC 的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 63-74.
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63-74.
- [28] 常怡然, 蔡旭. 多大型海上全直流风场中基于 MMC 的风力发电变流器及其控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3789-3798.
CHANG Yiran, CAI Xu. MMC based wind power converters for offshore DC wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3789-3798.
- [29] 郭灵瑜, 姚钢, 周荔丹. 全直流海上风电场高升压比 DC/DC 变换技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 158-169.
GUO Lingyu, YAO Gang, ZHOU Lidan. Research review on high step-up ratio DC/DC converter for off-shore DC wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 158-169.
- [30] 施刚, 王志冰, 曹远志, 等. 适用于高压直流传输的海上直流风电场内网拓扑的比较分析[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3059-3064.
SHI Gang, WANG Zhibing, CAO Yuanzhi, et al. Comparative analysis of internal grid topology of offshore DC wind farm suitable for HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3059-3064.
- [31] 王祥君, 李战龙, 王海云. 基于新型直流风电机组的串联型全直流发电系统设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 178-187.
WANG Xiangjun, LI Zhanlong, WANG Haiyun. Design and research of a series all-DC power generation system based on a new DC wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 178-187.
- [32] YANG J, HE Z Y, PANG H, et al. The hybrid-cascaded DC-DC converters suitable for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5358-5363.
- [33] LI B B, ZHAO X D, CHENG D, et al. Novel hybrid DC/DC converter topology for HVDC interconnections[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5131-5146.
- [34] LI B B, ZHAO X D, ZHANG S X, et al. A hybrid modular DC/DC converter for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3377-3389.
- [35] 李彬彬, 张书鑫, 赵晓东, 等. 基于容性能量转移原理的高压大容量 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1103-1114.
LI Binbin, ZHANG Shuxin, ZHAO Xiaodong, et al. Capacitive energy transfer principle based high-voltage high-power DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1103-1114.
- [36] 张桂红, 王琛, 张祥成, 等. 一种适用于直流配电网中半桥-全桥混合型 MMC 的全电平逼近调制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 75-83.
ZHANG Guihong, WANG Chen, ZHANG Xiangcheng, et al. A full-level modulation strategy for half bridge-full bridge hybrid MMC in DC distribution grids[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 75-83.
- [37] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.
ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.

收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2024-03-05

作者简介:

茹亚伦(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电全直流系统设计; E-mail: 903801309@qq.com

王海云(1973—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术; E-mail: 327028229@qq.com

李战龙(1978—), 男, 硕士, 研究方向为柔性直流输电技术、风电场系统。E-mail: lizhanlong@goldwind.com.cn

(编辑 周金梅)