

# 基于超级电容储能型MMC的大规模风电直流送出系统故障穿越策略

苏浩天<sup>1</sup>, 王嘉骥<sup>1</sup>, 许建中<sup>1</sup>, 何棒棒<sup>1</sup>, 鲁翔<sup>2</sup>, 彭茂兰<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广州 510663)

**摘要:** 针对基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的大规模风电直流送出系统在受端交流电压跌落时出现的直流电压升高问题, 提出了一种基于超级电容储能型MMC的故障穿越策略。该策略利用超级电容储能系统吸收故障期间的盈余功率, 稳定直流侧电压, 同时通过合理设计受端MMC的有功和无功电流分配原则, 优先为受端交流电网提供无功功率支撑。故障结束后, 超级电容储能系统将存储的能量释放回电网, 提高了风电利用效率。还提出了超级电容储能系统的参数设计方法, 包括双向Buck/Boost变换器滤波电感、超级电容的串并联数量和稳态运行时的电压参考值等。通过在PSCAD/EMTDC平台搭建仿真模型验证了所提策略能有效抑制直流侧过电压, 提升系统故障穿越能力。此外, 仿真结果还验证了与基于直流卸荷电路的故障穿越策略相比, 所提方案在直流电压稳定情况和能量利用效率方面具有优势。

**关键词:** 故障穿越; 超级电容储能; 无功功率补偿; 柔性直流输电; 卸荷电路

## Fault Ride-Through Strategy for Large-Scale Wind Power Transmission System Based on MMC-SESS

SU Haotian<sup>1</sup>, WANG Jiaji<sup>1</sup>, XU Jianzhong<sup>1</sup>, HE Bangbang<sup>1</sup>, LU Xiang<sup>2</sup>, PENG Maolan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. EHV Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** To address the issue of DC voltage rise in large-scale wind power DC transmission systems based on modular multilevel converters (MMC) during AC voltage dips at the receiving end, a fault ride-through strategy utilizing supercapacitor energy storage MMC is proposed. The strategy involves utilizing the supercapacitor energy storage system to absorb surplus power during faults, thereby stabilizing the DC bus voltage, while optimizing the active and reactive current distribution of the receiving-end MMC to prioritize reactive power support for the AC grid. After the fault, the stored energy in the supercapacitor is released back into the grid, improving the utilization efficiency of wind power. Additionally, a parameter design method is presented for the supercapacitor energy storage system, including the filter inductance of the bidirectional Buck/Boost converter, the series and parallel numbers of supercapacitors, and the voltage reference value during steady-state operation. Simulation results in PSCAD/EMTDC demonstrate that the proposed strategy effectively suppresses overvoltage on the DC side and enhances the system's fault ride-through capability. In addition, the simulation results also verify that the proposed scheme has advantages in terms of DC voltage stability and energy utilization efficiency compared with the fault ride-through strategy based on DC unloading circuit.

**Key words:** fault ride-through; supercapacitor energy storage; reactive power compensation; voltage source converter based high voltage direct current; unloading circuit

## 0 引言

随着大容量风力发电技术的快速发展,采用模块化多电平换流器的高压直流输电系统(modular multilevel converter-high voltage direct current, MMC-HVDC)在风电高效送出与利用、增强电网稳定性等方面展现出显著优势,已成为高压直流输电技术的优选方案<sup>[1-2]</sup>。

对于大规模风电直流送出系统,当其发生受端交流短路故障时,受端换流站的功率送出能力会下降。而风电场持续向送出系统注入功率,导致系统直流侧盈余功率堆积,从而引起系统直流过电压。在严重情况下,这可能会导致换流站闭锁,对电力系统的可靠性产生影响<sup>[3]</sup>。此外,在故障期间,系统受端换流站的有功电流会在定直流电压控制的作用下增加,以抑制直流电压的上升。然而,由于功率器件所能承受的最大电流应力存在限制,受端换流站的有功电流无法无限制地增加,从而难以维持直流电压的稳定<sup>[4]</sup>。

为提升大规模风电直流送出系统的故障穿越能力,一般可采用两种方法:一是采用风电场降载控制策略以降低风电场输出功率,二是利用卸荷电路耗散系统盈余功率<sup>[5-8]</sup>。近年来,国内外学者基于风电场降载控制策略开展了诸多研究:文献[9]采用了基于快速通信的风电场降载控制策略,但其对通信系统的要求较高;文献[10]采用了对风电场降压或升频的策略,但该策略会导致换流站闭锁与风电场脱网<sup>[11]</sup>;文献[12]则采用提高风机转子转速的策略,但该策略难以快速降载。因此,基于风电场降载控制的故障穿越策略存在响应时间长、效果有限等缺陷<sup>[13]</sup>。而基于直流卸荷电路的故障穿越策略能够满足大多数受端交流故障穿越的需求,但需要较多的全控型电力电子器件,拓扑复杂,此外还需建设散热设备以满足卸荷电阻的散热需求,综合成本高昂<sup>[14]</sup>,且由于耗能电阻将风电场送出能量转换为热能进行耗散,进而造成能源浪费。

随着储能技术的不断进步,利用储能系统解决柔直输电系统在故障穿越过程中出现的不平衡功率问题,储能型MMC因其强大的外送能力以及灵活的储能容量调节等显著优势,在直流输电系统中的应用呈现出显著的增长趋势<sup>[15-16]</sup>。然而,当前基于储能型MMC的故障穿越策略研究多集中于中低压

场景下的低电压穿越问题<sup>[17-21]</sup>;在高压直流输电系统中,针对交流故障穿越场景下储能型MMC的应用研究较少<sup>[22]</sup>。文献[23]提出了一种基于高压直挂式超级电容储能型MMC的受端交流故障穿越策略,但高压直挂式集中式储能方案需要大规模的储能单元进行串并联连接,这不仅增加了系统的构建难度,还提高了储能系统的控制难度。相比之下,分布式储能型MMC具有高度模块化、易于扩展容量等优势,能够有效避免大量储能单体的串并联问题并降低了控制的复杂度<sup>[24]</sup>。

在大规模风电直流送出系统中,由于故障持续时间较短且对功率调节需求较高<sup>[24]</sup>,锂离子电池因功率密度低、循环寿命有限等特性,难以满足系统故障穿越场景中频繁充放电及高功率冲击的需求。而超级电容则因其具备快速响应、大功率输出、长循环寿命等显著优势,能够有效应对短时大功率充放电及负荷波动,能够有效帮助电网实现功率平抑和调频,维持电网运行中的瞬时功率平衡,显著提升电网的消纳能力并降低弃风现象<sup>[25]</sup>。

为增强大规模风电直流送出系统在受端交流故障期间的穿越能力,本文提出一种基于分布式超级电容储能型MMC(MMC-supercapacitor energy storage system, MMC-SESS)的故障穿越策略。在故障期间,合理设计受端MMC的有功和无功电流分配原则,为受端电网提供无功支持,同时限制有功电流增加以防止电流越限;通过投入超级电容储能系统(supercapacitor energy storage system, SESS)应对故障期间的高功率冲击,吸收直流侧盈余功率,稳定直流侧电压,并在故障结束后将存储的功率回送电网,提升风电利用效率;提出SESS参数设计方法,满足故障穿越期间储能容量和功率需求;提出基于无功优先和储能协同的双层控制架构,设计SESS参数设计方法以适应短时高功率冲击。最终,通过在PSCAD/EMTDC平台搭建仿真模型验证了所提策略的有效性,并对所提策略与基于直流卸荷电路的故障穿越策略在抑制直流过电压、提升能量利用效率与系统故障穿越能力方面进行对比。

## 1 大规模风电直流送出系统结构及故障机理分析

### 1.1 大规模风电直流送出系统结构

大规模风电经双极MMC-SESS送出系统的结

构如图 1 所示。其中, 风力发电机组采用无齿轮箱、结构简单且故障率较低的永磁直驱风力发电机组。送端双极 MMC 采用主从极电压-频率控制策略<sup>[26]</sup>, 从而实现均衡分配风电场输入双极 MMC 的有功和无功功率。

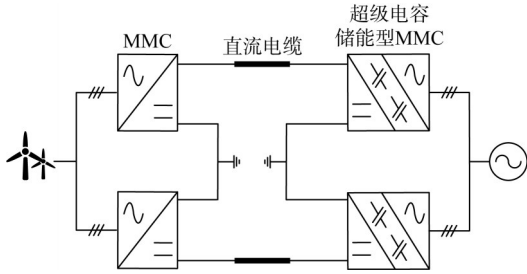


图 1 大规模风电经双极 MMC-SESS 送出系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large-scale wind power delivery system via bipolar MMC-SESS

MMC-SESS 采用分布式储能方式, SESS 经非隔离型双向 Buck/Boost 变换器与受端 MMC 子模块电容连接<sup>[27]</sup>, 如图 2 所示, 该拓扑使储能单元高度模块化, 可以通过增加子模块的方式进行扩容, 还可留出足够的系统冗余。

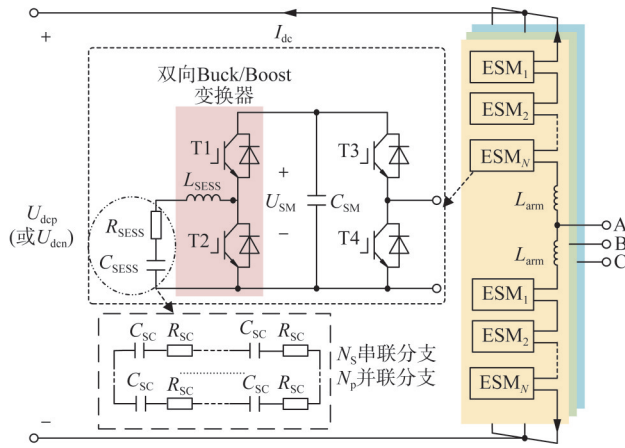


图 2 MMC-SESS 拓扑结构

Fig. 2 Topology of MMC-SESS

由于单个超级电容的额定电压只能达到 3 V 左右, 因此工程实际中的 SESS 均由多个超级电容串并联构成。设定单个超级电容容值和串联等效电阻分别为  $C_{sc}$  和  $R_{sc}$ , 若 SESS 中并联的超级电容串联分支数为  $N_p$ , 各分支中串联的超级电容数量为  $N_s$ , 则 SESS 的等效电容  $C_{SESS}$  为  $N_p C_{sc} / N_s$ 。通过合理配置  $N_s$  和  $N_p$  满足系统的储能容量和功率需求。此外, 可控的模块化结构确保 SESS 的顺利投切, 并通过调

整每个 SESS 的充放电功率大小, 实现其荷电状态 (state of charge, SOC) 均衡。

## 1.2 大规模风电直流送出系统故障机理分析

### 1.2.1 受端换流站采用传统 MMC

当系统故障导致受端交流电压急剧下降时, 受端 MMC 的输电能力降低, 而风电场向系统持续注入功率, 使得盈余功率在直流侧堆积, 进而引发直流侧过电压。若忽略换流站与线路损耗, 盈余功率与直流侧电压之间存在明确的数学关系。

$$\begin{cases} \Delta P_{dc} = P_w - P_g = \frac{1}{2} C_{eq} \frac{dU_{dcp}^2}{dt} + \frac{1}{2} C_{eq} \frac{dU_{dcn}^2}{dt} \\ P_g = \frac{3}{2} U_g I_g \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta P_{dc}$  为不平衡功率;  $P_w$  为风电场输出有功功率;  $P_g$  为受端交流有功功率;  $C_{eq}$  为 MMC 直流侧等效电容;  $U_{dcp}$  和  $U_{dcn}$  分别为正、负极直流侧电压;  $U_g$  为受端交流电压幅值;  $I_g$  为受端 MMC 的输出电流幅值。

在最近电平逼近调制策略的作用下, 直流侧电压由  $N$  个子模块电容电压构成。假设故障期间风电场出力恒定, 进一步可以推导出盈余功率与直流侧电压的数学关系。

$$\begin{cases} \Delta P_{dcp} t_{fault} = \frac{C_{eq}}{2} (U_{dcp}(t_{fault})^2 - U_{dcp}(0)^2) \\ \Delta P_{dcn} t_{fault} = \frac{C_{eq}}{2} (U_{dcn}(t_{fault})^2 - U_{dcn}(0)^2) \\ C_{eq} = \frac{3C_{SM}}{N} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_{dcp}$  和  $\Delta P_{dcn}$  分别为正负极不平衡盈余功率;  $t_{fault}$  为故障持续时间;  $C_{SM}$  为 MMC 子模块电容容值。

在系统稳态运行状态下, 风电场输出的有功功率与受端 MMC 输出的有功功率保持平衡, 即  $P_w = P_g$ 。然而, 当受端交流故障导致电压急剧跌落时, 受端 MMC 因功率器件限流, 其输出的有功功率显著降低。与此同时, 风电场的输出功率却无法及时相应减少, 尽管 MMC 自身能够通过子模块电容升压吸收部分盈余功率, 但仍难以完全吸收盈余功率, 从而导致  $P_w > P_g$ , 使得受端 MMC 直流侧出现有功功率堆积, 进而引发受端直流侧电压快速上升。由于 MMC 直流侧电压由子模块电容电压决定, 因此故障期间, 子模块电容电压会急剧攀升, 导致过电压现象, 进而损坏系统器件, 并可能引发换流

站的闭锁保护动作。因此,为保障系统的稳定运行,关键在于采取有效的措施解决直流侧的盈余功率问题,从而维持直流侧电压的稳定,确保系统的安全可靠运行。

### 1.2.2 受端换流站采用 MMC-SESS

除受端换流站由 MMC 替换为 MMC-SESS 外,其余工况均与 1.2.1 节一致。

故障期间,假设各 SESS 的能量平均分配,则盈余功率与受端直流侧电压的数学关系为:

$$\Delta P_{dc} = P_w - P_g = \frac{1}{2} C_{eq} \frac{d(U_{dcp}^2 + U_{dcn}^2)}{dt} + 6NC_{SESS} \frac{dU_{SESS}^2}{dt} \quad (3)$$

式中  $U_{SESS}$  为 SESS 电压。

进一步得到盈余功率与受端直流侧电压和 SESS 电压的关系。

$$\begin{cases} \Delta P_{dcp} t_{fault} = \frac{C_{eq}}{2} (U_{dcp}(t_{fault})^2 - U_{dcp}(0)^2) + \\ \quad 3NC_{SESS} (U_{SESS}(t_{fault})^2 - U_{SESS}(0)^2) \\ \Delta P_{dcn} t_{fault} = \frac{C_{eq}}{2} (U_{dcn}(t_{fault})^2 - U_{dcn}(0)^2) + \\ \quad 3NC_{SESS} (U_{SESS}(t_{fault})^2 - U_{SESS}(0)^2) \end{cases} \quad (4)$$

结合式(3)~(4)可知,当受端 MMC 替换为 MMC-SESS 时,故障期间原本因受端 MMC 限流而无法送出的盈余功率可由 SESS 吸收,从而有效避免了盈余功率在直流侧的堆积,进而防止了直流过电压的发生。同时,由于 SESS 的存在,系统能够在故障期间灵活调整子模块电容与 SESS 之间的能量流动,不仅有助于维持系统的稳定运行,还能降低 MMC 子模块电容容值的要求。通过 SESS 在保障系统稳定运行方面发挥的关键作用,确保了直流侧电压的稳定,从而提高了系统的可靠性和效率。

## 2 故障穿越控制策略设计

本文针对图 1 所示系统受端交流故障引发的直流侧盈余功率问题,提出了一种基于受端 MMC-SESS 的故障穿越策略。由于受端双极 MMC-SESS 的控制策略完全相同,为避免重复并确保论述的清晰性和逻辑性,下文仅对其中一极进行详细分析,且不再通过下标对正负极进行区分。

在系统正常运行时,MMC 和 SESS 处于稳态控制状态,以确保在系统故障发生时能够迅速做出响应;当系统发生受端交流故障时,MMC 和 SESS 的控制策略调整为本文所提故障穿越策略。通过这种

协同调整,SESS 和 MMC 能够在故障期间有效配合,维持系统的稳定运行。故障结束后,SESS 将根据其电压状态和系统需求,逐步释放故障期间吸收的能量,而 MMC 则恢复为稳态控制策略。

本文的故障穿越策略设计重点在于实现 MMC 与 SESS 的高效协同动作,确保系统在故障发生、持续以及恢复的各个阶段都能保持稳定运行。本节将分别介绍受端 MMC 与 SESS 的具体控制策略,并详细阐述其不同运行阶段的控制模式。

### 2.1 受端 MMC 控制策略

受端 MMC 在故障期间采用无功功率优先策略,该策略在故障期间能够迅速向电网提供无功功率,以支撑电网电压的恢复。由于 MMC 最大允许电流的限制,无功电流的参考值需依据式(5)进行精确设定,以确保在不超过电流限制的前提下,最大化地提供无功功率支持。

$$I_{gqref} = \begin{cases} 0, U_g^* \geq 0.9 \text{ p.u.} \\ 1.2(0.9 - U_g^*)I_N, U_g^* < 0.9 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $U_g^*$  为受端交流电压标幺值,电压跌落程度通过比较受端电压幅值与额定电压幅值确定;  $I_N$  为受端 MMC 的交流额定电流。

在此基础上,为有效避免受端 MMC 出现过流现象,需对有功电流进行精确控制,相应的有功电流参考值  $I_{gdref}$  由式(6)进行设定。

$$I_{gdref}^2 \leq (1.08I_N)^2 - I_{gqref}^2 \quad (6)$$

式中 1.08 为本文设定的受端 MMC 允许通过的最大额定电流倍数。

将式(6)代入式(5)可得:

$$\begin{aligned} I_{gdref} &\leq \sqrt{(1.08I_N)^2 - I_{gqref}^2} \\ &\leq \sqrt{1.08^2 - 1.2^2(0.9 - U_g^*)^2} I_N \end{aligned} \quad (7)$$

受端 MMC 的控制策略如图 3 所示,结合式(5)~(7)可知:当受端交流电压标幺值降至 0.9 以下时,受端 MMC 将采用无功优先策略。在此策略下,受端 MMC 不仅能够为受端交流提供无功功率,以支撑电压恢复,同时还会对有功电流进行严格限制,从而有效防止受端 MMC 出现过流现象。而当受端交流电压标幺值高于 0.9 时,受端 MMC 则会切换至定直流电压与定无功功率的控制方式。图 3 中,  $U_{dcref}$  为直流侧电压的额定值,  $Q_{gref}$  和  $Q_{gac}$  分别为受端 MMC 无功功率的参考值和实际值。通过控制模式的切换,受端 MMC 能够在不同的电压条件下,

精准地调节无功电流和有功电流。

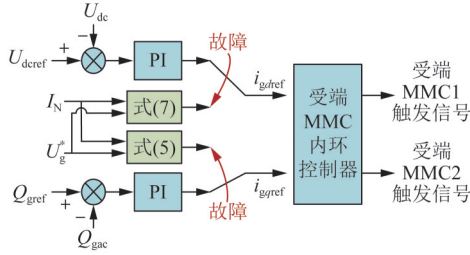


图 3 受端 MMC 控制策略

Fig. 3 Control strategy of the MMC at the receiving end power grid

## 2.2 受端 MMC 控制策略

本文提出的故障穿越策略中, SESS 的控制模式切换基于直流侧电压的实时监测结果实现: 当受端 MMC 的直流侧电压超过最大允许工作电压  $U_{dcmax}$  (本文设定为 1.1 倍  $U_{dcref}$ ) 时, SESS 切换至 Buck 模式, 吸收盈余功率; 而当直流侧电压低于最小允许工作电压  $U_{dcmin}$  (本文设定为 0.9 倍  $U_{dcref}$ ) 时, SESS 切换至 Boost 模式, 释放能量。这一切换机制与受端 MMC 的无功优先控制策略协同作用, 确保在故障期间直流侧电压的稳定性和系统的整体稳定性。此外, 本文所提策略还可将 SESS 在系统故障期间存储的能量回送电网, 从而提升风电的利用效率。

本文所提受端 SESS 控制策略如图 4 所示, 共包含 3 种控制模式。其中,  $N$  为受端 MMC 子模块数量;  $P_{SESSref}$  为采用 SOC 均衡策略时 SESS 的功率参考值,  $P_{SESS}$  为 SESS 的实际功率;  $U_{SESSref}$  为 SESS 的电压参考值;  $I_{SESSref}$  为 SESS 控制的内环电流参考值。

在系统故障期间, SESS 控制模式如下: 若  $U_{dc} \geq U_{dcmax}$ , SESS 运行于模式 1, 双向 Buck/Boost 变换

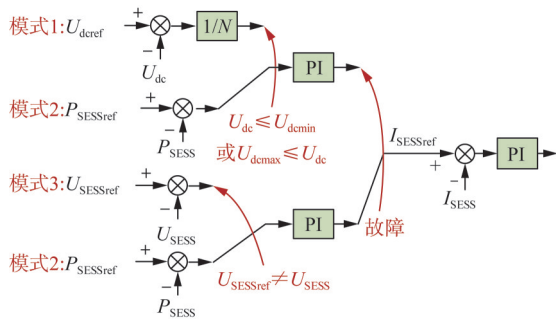


图 4 受端 SESS 控制框图

Fig. 4 Block diagram of the SESS control module at receiving end power grid

器切换至直流电压双闭环控制方式, 维持直流侧电压的稳定; 若  $U_{dcmin} \leq U_{dc} \leq U_{dcmax}$ , SESS 运行于模式 2, 该模式采用文献[28]提出的基于离散时域预测功率模型的 SOC 均衡策略, 以实现高效的能量管理和 SESS 的荷电状态均衡。

为确保系统在稳态运行期间, SESS 拥有充足的可吞吐容量, 以满足下一次功率平抑的需求, 需确定稳态时 SESS 的 SOC 实际值  $S_{OC-SESS}$ , 计算方法由式(8)明确给出。

$$S_{OC-SESS} = \frac{U_{SESS} - U_{SESSmin}}{U_{SESSmax} - U_{SESSmin}} \quad (8)$$

式中  $U_{SESSmax}$  和  $U_{SESSmin}$  分别为 SESS 电压的最大值和最小值。通过式(8)可以清晰地看出,  $S_{OC-SESS}$  与  $U_{SESS}$  存在直接的对应关系, 即  $S_{OC-SESS}$  能够通过  $U_{SESS}$  进行准确表示。

当故障清除, 且  $U_{dcmin} \leq U_{dc} \leq U_{dcmax}$  后, SESS 控制模式如下: 若  $U_{SESS} \neq U_{SESSref}$  时, SESS 将运行于模式 3, 在此模式下 SESS 与受端 MMC 进行能量交换, 以调整  $U_{SESS} = U_{SESSref}$ , 从而使得 SESS 为下一次功率平抑留出充足裕量; 当  $U_{SESS} = U_{SESSref}$  时, SESS 运行于模式 2, 维持各 SESS 间的 SOC 均衡。

这种基于双向 Buck/Boost 变换器的 SESS 灵活控制策略, 通过精确的模式切换, 不仅能够有效吸收和释放能量, 还能为直流控制模式提供必要的支撑。在故障期间, SESS 通过吸收盈余功率避免了直流侧过电压的发生。在故障清除后, SESS 通过释放能量, 帮助恢复直流侧电压的稳定, 进一步增强了系统的故障穿越能力。这种协同作用使得 SESS 与直流控制模式相互补充, 提高了系统的整体性能和可靠性。此外, 还调节了 MMC 与 SESS 间的功率流动关系, 确保系统的稳定运行和能量的高效利用。

## 3 储能系统参数设计

故障穿越不仅依赖于合理的控制策略设计, 还需要通过合理的储能系统参数设计来确保其有效性<sup>[29]</sup>。储能系统的设计参数直接影响到其在故障期间的功率吸收能力和能量存储容量, 进而影响大规模风电直流送出系统在故障穿越过程中的稳定性与可靠性<sup>[30]</sup>。因此, 在提出基于 MMC-SESS 的故障穿越控制策略后, 需进一步对 SESS 的参数设计进行详细研究。本节将重点探讨 SESS 的参数设计方

法, 包括双向 Buck/Boost 变换器的滤波电感设计、超级电容的串并联数量配置以及稳态运行时的电压参考值设定等, 以确保 SESS 能够在故障期间有效吸收盈余功率并维持直流侧电压稳定, 从而为故障穿越策略的有效实现提供基础。

### 3.1 双向 Buck/Boost 变换器滤波电感参数设计

双向 Buck/Boost 变换器的滤波电感设计是确保 SESS 在充放电过程中电流平稳过渡的关键。滤波电感的主要作用是限制电流的快速变化, 从而减少电流纹波, 提高系统的动态响应性能。根据电感设计的基本原则, 滤波电感  $L_{\text{SESS}}$  可按照式(9)设计<sup>[31]</sup>。

$$L_{\text{SESS}} = \frac{(U_{\text{SM}} - U_{\text{SESS}})U_{\text{SESS}}}{\Delta I_{\text{SESS}} U_{\text{SM}} f} \quad (9)$$

式中:  $U_{\text{SM}}$  为受端 MMC 子模块电容电压;  $\Delta I_{\text{SESS}}$  为 SESS 充放电过程中  $L_{\text{SESS}}$  电流的最大变化量;  $f$  为开关频率。该公式通过考虑子模块电压和电流变化量确保滤波电感能够有效抑制电流纹波, 维持系统的稳定运行。

### 3.2 SESS 参数设计

如图 2 所示, 在单个 SESS 中, 超级电容的并联分支数量为  $N_p$ , 且各分支中串联的超级电容数量为  $N_s$ 。在进行参数设计时, 需确定  $N_p$  和  $N_s$  的值。此外, 依据第 2.1.2 节的分析, 还需明确 SESS 在稳态运行时的参考电压  $U_{\text{SESSref}}$ , 确保系统具备充足的储能裕量, 以应对各种运行工况。

#### 1) 串联数量 $N_s$

超级电容的串联数量  $N_s$  决定了 SESS 的额定电压。为防止超级电容出现过充或过放现象, 需确保 SESS 的电压在允许工作范围内。本文设定单个超级电容的最大工作电压  $U_{\text{SCmax}}$  等于其额定电压  $U_{\text{SCN}}$ , 最小工作电压  $U_{\text{SCmin}}$  设定为  $U_{\text{SCN}}$  的 30%。考虑到双向 Buck/Boost 变换器的占空比限制, SESS 的最大工作电压  $U_{\text{SESSmax}}$  设定为 0.8 倍的  $U_{\text{dcref}}/N$ , 最小工作电压  $U_{\text{SESSmin}}$  则为 0.24 倍的  $U_{\text{dcref}}/N$ 。因此, SESS 中单个分支串联的超级电容数  $N_s$  可通过式(10)进行计算。

$$N_s = \left\lceil \frac{U_{\text{SESSmax}}}{U_{\text{SCN}}} \right\rceil \quad (10)$$

式中  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。式(10)通过合理选择  $N_s$  可以优化 SESS 的电压范围, 提高系统的能量利用率, 避免超级电容过压或欠压。

#### 2) 并联分支数 $N_p$

并联分支数  $N_p$  决定了 SESS 的功率和容量。从功率角度来看, SESS 需具备在最恶劣故障工况下吸收全部盈余功率的能力, 即能够吸收风电场的额定功率  $P_{\text{wN}}$ 。因此, SESS 中超级电容的并联分支数量  $N_p$  应满足:

$$N_p \geq \left\lceil \frac{P_{\text{wN}}}{2 \times 6N \times N_s \times P_{\text{SCN}}} \right\rceil \quad (11)$$

式中  $P_{\text{SCN}}$  为单个超级电容的额定功率。

从容量角度来看, SESS 的可吸收容量应不小于系统在故障期间所产生的最大盈余能量。假设盈余能量被 SESS 平均吸收, 则 SESS 所吸收的最大盈余能量  $W_{\text{SESSmax}}$  可表示为:

$$W_{\text{SESSmax}} = P_{\text{wN}} t_{\text{fault}} \quad (12)$$

因此, 从容量约束出发, 并联的超级电容分支数量  $N_p$  应满足:

$$N_p \geq \left\lceil \frac{P_{\text{wN}}}{2 \times 6N \times N_s \times P_{\text{SCN}}} \right\rceil \quad (13)$$

式中  $W_{\text{SCmax}}$  为单个超级电容的最大容量, 可由式(14)计算得到。

$$W_{\text{SCmax}} = \frac{1}{2} C_{\text{SC}} (U_{\text{SCmax}}^2 - U_{\text{SCmin}}^2) \quad (14)$$

综合功率和容量约束,  $N_p$  应取值为:

$$N_p = \max \left\{ \left\lceil \frac{P_{\text{wN}}}{12NN_s P_{\text{SCN}}} \right\rceil, \left\lceil \frac{W_{\text{SESSmax}}}{12NN_s W_{\text{SCmax}}} \right\rceil \right\} \quad (15)$$

通过合理选择  $N_p$  可以优化 SESS 的功率和能量特性, 提高系统的整体性能。

#### 3) 稳态运行时的 $U_{\text{SESSref}}$

在本文中, 为确保 SESS 的高效利用, 设定 SESS 的可吞吐容量保持一致, 即 SESS 的最大可吸收能量  $W_{\text{SESSab}}$  应与最大可释放能量  $W_{\text{SESSre}}$  相等。基于此设定, 可以进一步确定 SESS 在稳态运行时的参考电压  $U_{\text{SESSref}}$ 。其中,  $W_{\text{SESSab}}$  和  $W_{\text{SESSre}}$  可以由式(16)计算得到。

$$\begin{cases} W_{\text{SESSab}} = \frac{1}{2} C_{\text{SESS}} (U_{\text{SESSmax}}^2 - U_{\text{SESSref}}^2) \\ W_{\text{SESSre}} = \frac{1}{2} C_{\text{SESS}} (U_{\text{SESSref}}^2 - U_{\text{SESSmin}}^2) \end{cases} \quad (16)$$

式中  $U_{\text{SESSref}}$  为  $W_{\text{SESSab}} = W_{\text{SESSre}}$  时 SESS 的电压。

通过计算式(16), 可求得  $U_{\text{SESSref}} \approx 0.59 \text{ kV}$ , 故本文将 SESS 在稳态时的电压参考值  $U_{\text{SESSref}}$  设定为 0.59 kV, 确保 SESS 在稳态运行时具备足够的储能裕量, 以满足下一次功率平抑需求。

通过上述参数设计方法 SESS 能够在故障期间

有效吸收盈余功率,维持直流侧电压稳定,并在故障结束后释放能量,提升风电利用效率,同时确保系统在稳态运行时具备足够的储能裕量以满足下一次功率平抑的需求。这些设计不仅优化了SESS的性能,还提高了系统的可靠性和风电的利用效率。

#### 4 仿真验证

为验证本文所提出的大规模风电直流送出系统故障穿越策略的可行性,在PSCAD/EMTDC平台中搭建了图1所示系统的仿真模型。该模型中,系统双端MMC和直流电缆的各项参数均参照如东风电场的实际工程参数进行设置。

对于储能的容量限制,本文将受端SESS的容量设置为考虑受端电网发生三相接地故障,故障持续500 ms且保护装置拒动导致故障时间再延长500 ms(共计1 s)的极端工况下,盈余功率可由SESS全部吸收;对于储能的功率限制为不低于风电场额定功率。基于上述限制,系统详细的参数设置如表1所示。

表 1 系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the system

| 系统参数名称/单位                      | 数值        |
|--------------------------------|-----------|
| 风电场额定功率/MW                     | 1 100     |
| 风电场额定电压/kV                     | 35/230    |
| 电网额定电压/kV                      | 525       |
| 直流侧额定电压/kV                     | $\pm 400$ |
| MMC-SESS子模块数量                  | 400       |
| MMC-SESS子模块电容容值/ $\mu\text{F}$ | 9 000     |
| SESS中SC串联数量                    | 267       |
| SESS中SC并联数量                    | 1         |
| SESS等值容值/F                     | 1. 873    |
| Buck/Boost变换器电感/mH             | 2. 078    |
| SESS等值内阻/ $\Omega$             | 0. 187    |
| 直流侧平波电抗器/mH                    | 100       |
| 受端交流母线短路比                      | 10        |
| 受端交流母线等值电阻/ $\Omega$           | 2. 381    |
| 受端交流母线等值电感/H                   | 0. 072    |

##### 4.1 基于MMC-SESS的故障穿越策略仿真

由于三相交流短路故障造成的直流侧电压越限最严重,因此本文以受端交流三相接地故障工况为例进行仿真验证,故障设置在3 s发生,持续时间为0.1 s。为充分验证本文所提基于MMC-SESS的

故障穿越策略的有效性,本节对投入基于MMC限流策略与投入本文所提故障穿越策略进行仿真对比,仿真结果如图5所示。图中,下标“p”和“n”分别表示MMC正、负极,下标“1”和“2”则分别表示仅投入基于MMC限流策略与投入本文所提基于MMC-SESS的故障穿越策略的仿真波形。

图5(a)展示了受端交流电压在故障发生和恢复过程中的变化情况,图5(c)—5(d)则分别展示了受端MMC输出的无功功率和有功功率。在无功功率优先控制策略的作用下,本文所提策略能够使受端MMC在故障期间输出更多的无功功率,小幅提升了故障期间受端交流电压,同时有效限制有功功率的增加,避免了因过流导致的设备损坏。这一特性不仅增强了系统的电压支撑能力,还提高了系统的整体稳定性。

图5(b)展示了受端MMC直流侧电压的变化情况。与仅采用MMC限流策略相比,本文所提基于MMC-SESS的故障穿越策略能够在故障期间有效维持直流侧电压稳定在最大允许工作电压附近,避免了直流过电压的发生。这表明SESS在故障期间能够快速吸收盈余功率,显著提升了系统的电压稳定性。

图5(c)和图5(e)展示了故障结束后SESS与受端MMC之间的功率交换情况。与仅采用MMC限流策略相比,本文所提策略能够在故障结束后将SESS中存储的能量平稳地释放回电网,维持直流侧电压的稳定,并将SESS的电压精准维持在 $U_{\text{SESSref}}$ (0.59 kV)。这一过程不仅优化了系统的功率分配,还显著提高了风电的利用效率。

##### 4.2 基于直流卸荷电路的故障穿越策略仿真

为全面对比本文所提故障穿越策略与传统的基于直流卸荷电路的故障穿越策略的优劣,本文在PSCAD/EMTDC平台中进行了仿真验证,仿真工况与4.1节完全一致。两种策略下的MMC控制策略保持一致,仅在故障期间的能量处理方式上存在差异,仿真结果如图6所示。图中,下标“p”和“n”分别表示MMC正、负极,下标“2”和“3”分别表示投入本文所提故障穿越策略与投入基于直流卸荷电路的故障穿越策略的仿真波形。

图6(a)展示了分别采用两种故障穿越策略时,无功功率优先策略对于受端交流电压的作用对比,结果表明,无功功率优先策略在两种控制策略的作

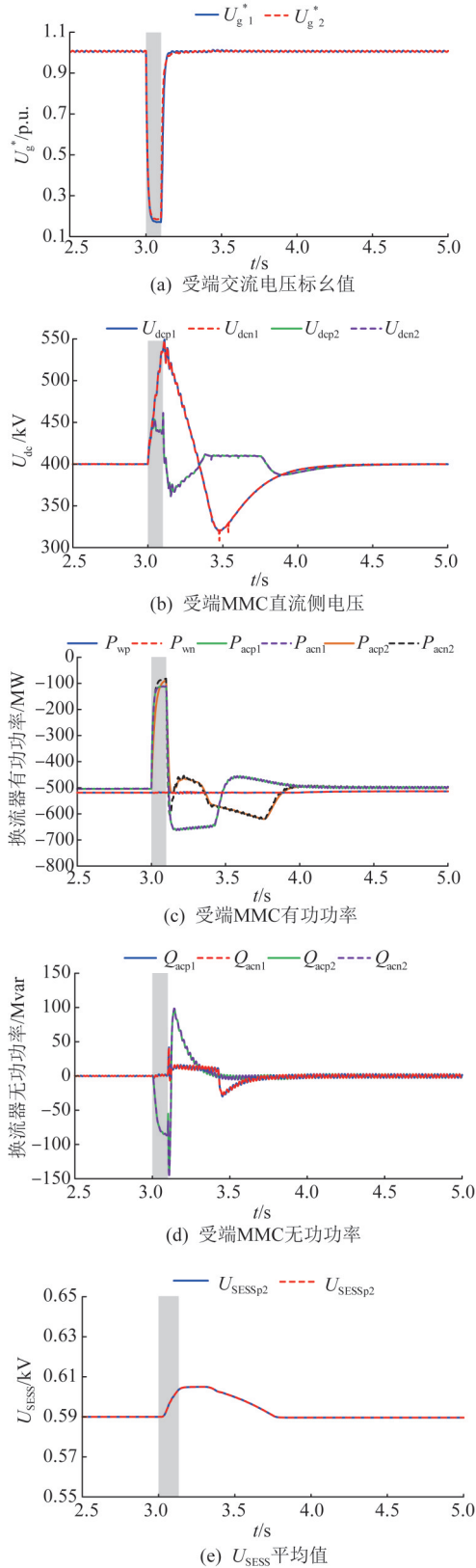


图5 基于MMC-SESS的故障穿越策略仿真结果

Fig. 5 Simulation results of fault ride-through strategy based on MMC-SESS

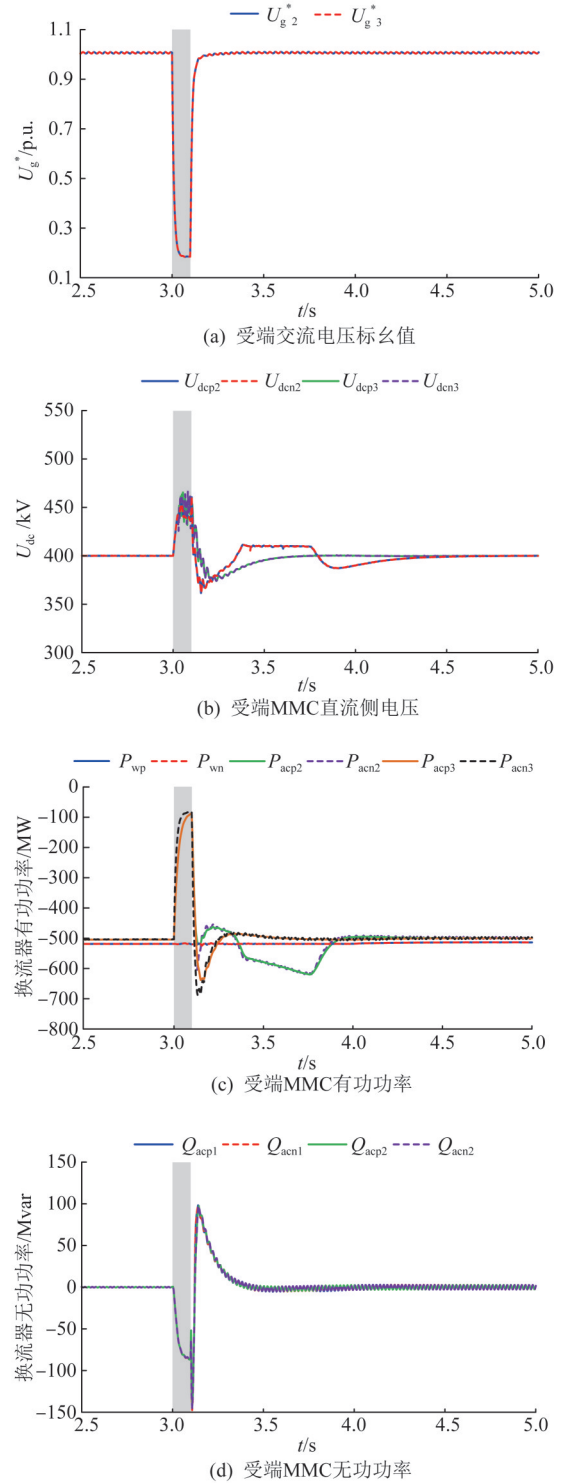


图6 基于直流卸荷电路故障穿越策略的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of fault ride-through strategy based on DC unloading circuit

用下效果一致，均可以提升故障期间受端交流电压。

图6(b)展示了受端MMC直流侧电压的变化情

况。与投入本文所提故障穿越策略相比,采用基于直流卸荷电路的故障穿越策略时,受端MMC直流侧电压在故障期间虽然能够维持在限值附近,但电压波动较为明显。相比之下,基于MMC-SESS的策略能够更稳定地维持直流电压在最大工作电压附近,电压波动显著减小。这表明SESS在故障期间的动态响应能力优于直流卸荷电路,能够更有效地抑制直流过电压。

图6(c)—6(d)分别展示了受端MMC输出的无功功率和有功功率。两种策略均采用了无功功率优先控制策略,在故障期间能够输出更多的无功功率,同时有效限制有功功率的增加,避免了因过流导致的设备损坏。这表明两种策略在无功功率支撑和有功功率限制方面均能有效保障系统的稳定性。然而,基于MMC-SESS的策略在能量管理方面更具优势,能够将盈余功率存储并后续释放,而直流卸荷电路则直接将盈余功率耗散为热能,造成能量浪费。

## 5 结论

针对大规模风电直流送出系统的受端交流电压跌落故障,本文提出了一种基于受端MMC-SESS的故障穿越策略,并进行了仿真验证。主要工作和结论如下。

1)在所提故障穿越控制策略中,系统盈余功率由SESS吸收,通过SESS控制模式的切换,在保障直流侧电压稳定的同时,故障结束后可将故障期间吸收的盈余能量回送电网,提升了风电利用效率。

2)采用面向受端MMC的无功优先控制策略,为受端电网故障期间提供无功功率的同时,限制有功功率,避免受端MMC过流。

3)提出基于3种控制模式的受端SESS控制策略,实现故障期间功率吸收的同时,维持SESS在稳态期间的 $U_{\text{SESS}}$ 以保证SESS在后续的功率平抑时有充足的储能容量,并从国标规定故障切除时间、电压、功率和容量等角度合理设计了SESS的参数。

4)通过对比基于MMC-SESS的故障穿越策略与基于直流卸荷电路的故障穿越策略在直流电压稳定情况、能量利用效率等方面,验证了基于MMC-SESS的故障穿越策略的优越性。

本文为大规模风电直流送出系统受端交流故障穿越、直流电压稳定及风电利用效率提升等方面提

供了一种新思路,具有一定的工程实际应用前景。

## 参考文献

- [1] 王一凡,赵成勇.混合型风电场经MMC-HVDC送出系统的振荡模式分析[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):18-26.  
WANG Yifan, ZHAO Chengyong. Analysis of oscillation modes of a hybrid-based wind farm transmitted through MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 18-26.
- [2] 孙银锋,刘宇晗,郭宇航,等.基于分散式储能的风电柔直并网直流故障穿越协调控制[J].工程科学与技术,2023,55(1):35-47.  
SUN Yinfeng, LIU Yuhang, GUO Yuhang, et al. DC fault ride through coordinated control of wind power flexible direct grid connection based on decentralized energy storage[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 35-47.
- [3] 李文津,汤广福,康勇.含动态直流泄能电阻的MMC-HVDC提高风电场低电压穿越能力研究[J].电网技术,2014,38(5):1127-1135.  
LI Wenjin, TANG Guangfu, KANG Yong. Improving low voltage ride through capability of wind farm grid-connected via dynamic chopper controlled breaking resistor based MMC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1127-1135.
- [4] 欧阳金鑫,陈纪宇,李昂,等.兼顾直流电压安全与无功支撑的柔性直流输电故障穿越控制[J].电工技术学报,2024,39(19):6129-6144.  
OUYANG Jinxin, CHEN Jiyu, LI Ang, et al. Fault ride-through control method for VSC-HVDC balancing between DC voltage security and reactive power support[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6129-6144.
- [5] 陈豪君,王星华,刘升伟,等.一种转子串联可变电阻与卸荷电路配合的低电压穿越方法[J].可再生能源,2020,38(7):933-939.  
CHEN Haojun, WANG Xinghua, LIU Shengwei, et al. An improved low voltage ride-through scheme of combination of rotor series variable resistance and DC-chopper circuit[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(7): 933-939.
- [6] 孟永庆,王健,李磊,等.考虑风机转速限制及卸荷电路优化的永磁同步电机新型低电压穿越协调控制策略[J].中国电机工程学报,2015,35(24):6283-6292.  
MENG Yongqing, WANG Jian, LI Lei, et al. New low voltage ride-through coordinated control schemes of permanent magnet synchronous generator considering rotor speed limit and DC discharging circuit optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6283-6292.
- [7] 凌禹,蔡旭,汪宁渤.定子撬棒和直流侧卸荷电路协调的故障穿越技术[J].中国电力,2013,46(12):90-94.  
LING Yu, CAI Xu, WANG Ningbo. Combination of stator crowbar and DC-link discharge resistor for fault ride-through (FRT) of DFIG[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 90-94.
- [8] 鲁华永,袁越.基于智能卸荷电路的双馈风电机组故障穿越控制[J].可再生能源,2024,42(3):378-387.  
LU Huayong, YUAN Yue. Fault ride-through control of doubly-fed induction generator based on smart chopper circuit[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(3): 378-387.
- [9] ERLICH I, FELTE 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.
- [10] FELTES C, WREDE H, KOCH F W, et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-Based HVDC transmission [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1537 – 1546.
- [11] 厉璇, 宋强, 刘文华, 等. 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 31 – 36, 125.  
LI Xuan, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Impact of fault ride-through methods on wind power generators in a VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 31 – 36, 125.
- [12] 董旭, 张峻樑, 王枫, 等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 48 – 55.  
DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVDC overhead lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48 – 55.
- [13] 毛永恒, 高丙团, 胡正阳, 等. 计及双馈机组直流卸荷的风电场紧急降功率控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 70 – 83.  
MAO Yongheng, GAO Bingtuan, HU Zhengyang, et al. Emergency power reduction control strategy of wind farm considering DC chopper of doubly-fed induction generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 70 – 83.
- [14] 张浩博, 向往, 周猛, 等. 海上风电柔直并网系统主动能量控制与交流耗能装置协同策略 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4319 – 4330.  
ZHANG Haobo, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Cooperative strategy of active energy control and AC energy dissipation device in offshore wind power MMC-HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4319 – 4330.
- [15] XU Y, ZHANG Z, WANG G, et al. Modular multilevel converter with embedded energy storage for bidirectional fault isolation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 105 – 115.
- [16] MA Y, XIAO J, LIN H, et al. A novel battery integration method of modular multilevel converter with battery energy storage system for capacitor voltage ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12250 – 12261.
- [17] 孙伟, 王玉生, 张文艳, 等. 基于构网型储能的海上风电柔直并网系统电网侧故障穿越协调控制策略 [J]. 电网技术, 2025, 49(12): 5049 – 5058.  
SUN Wei, WANG Yusheng, ZHANG Wenyan, et al. Coordinated grid side fault ride-through control strategy for offshore wind farms connected MMC-HVDC based on grid forming energy storage [J]. Power System Technology, 2025, 49(12): 5049 – 5058.
- [18] 李娟, 王鹏, 李方媛, 等. 超级电容储能的双馈风机低电压穿越能力研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(1): 180 – 187.  
LI Juan, WANG Peng, LI Fangyuan, et al. Research on low voltage ride through capability of double-fed fan based on super capacitor energy storage [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 180 – 187.
- [19] 王雨欣, 王思怡, 杨黎晖, 等. 超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略 [J]. 高压电器, 2023, 59(4): 177 – 185.  
WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 177 – 185.
- [20] 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.
- [21] 李建林, 邹菲, 游洪源, 等. 构网型储能变流器自适应低电压穿越控制策略 [J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2724 – 2737.  
LI Jianlin, ZOU Fei, YOU Honghao, et al. Research on adaptive low-voltage ride-through control strategy of grid-forming energy storage converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(9): 2724 – 2737.
- [22] 刘子豪. 风电场经储能型 MMC-HVDC 并网的交流故障穿越策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [23] 张芳, 黄河, 梁修功. 基于超级电容储能的风电经柔性直流并网系统交流故障穿越策略 [J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 37 – 44, 66.  
ZHANG Fang, HUANG He, LIANG Xiugong. AC fault ride-through strategy for wind power via flexible DC grid-connected system based on supercapacitor energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 37 – 44, 66.
- [24] 马文忠, 孙伟, 王玉生, 等. 基于 MMC 的分布式储能系统及其快速 SOC 均衡控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 1 – 11.  
MA Wenzhong, SUN Wei, WANG Yusheng, et al. Distributed energy storage system based on MMC and rapid SOC balancing control strategy [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 1 – 11.
- [25] 杨浩, 宋贞寒, 施啸寒, 等. 计及风电场涉网功率平抑与 AGC 考核的混合储能容量优化配置 [J/OL]. 电工技术学报, 1 – 16 [2025 – 04 – 08]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-DGJS20250403007.htm>  
YANG Hao, SONG Zhenhan, SHI Xiaohan, et al. Considering the grid-related power stabilization of wind farms and the optimal allocation of hybrid energy storage capacity assessed by AGC [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1 – 16 [2025 – 04 – 08]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-DGJS20250403007.htm>
- [26] 彭发喜, 黄伟煌, 李岩, 等. 海上风电经双极柔直系统送出功率平衡控制策略 [J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 31 – 36.  
PENG Faxi, HUANG Weihuang, LI Yan, et al. Power balance control strategy of offshore wind farm interconnection via bipolar MMC-HVDC system [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 31 – 36.
- [27] WU Y, GAO C, LIU X, et al. A power router based on modular multilevel converter integrating ultracapacitor energy storage system [C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), August 11 – 14, 2017, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE, 2017: 1 – 6.

- [28] 汪晋安, 许建中. 分布式储能型 MMC 电池荷电状态均衡优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 44 – 50.  
WANG Jin'an, XU Jianzhong. SOC balancing optimal control strategy amongst batteries in MMC-DES [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 44 – 50.
- [29] 方朝雄, 唐雨晨, 林毅, 等. 构网型 MMC 低电压故障内电势重构穿越控制策略[J]. 电力建设. 2025, 46(4): 29 – 37.  
FANG Chaoxiong, TANG Yuchen, LIN Yi, et al. Control strategy for potential vector remolding fault ride-through in grid-forming MMC [J]. Electric Power Construction. 2025, 46(4): 29 – 37.
- [30] 曾庆彬, 梁伟强, 黄焯辉, 等. 计及光荷场景差异的储能优化配置[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11): 141 – 149.  
ZENG Qingbin, LIANG Weiqiang, HUANG Zhuohui, et al. Optimal configuration of energy storage considering scenario differences in photovoltaic load [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(11): 141 – 149.
- [31] 李磊, 陶骏, 朱明星, 等. 基于超级电容储能型 MMC 的控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 15 – 22.  
LI Lei, TAO Jun, ZHU Mingxing, et al. Control strategy for MMC based on super-capacitor energy storage [J]. Electric Power, 2020, 53(11): 15 – 22.

收稿日期: 2025-04-02; 网络首发日期: 2025-08-20

作者简介:

苏浩天(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电与储能技术, 120232201347@ncepu.edu.cn;

王嘉骥(2001), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电与储能技术, wangjiayi2001@ncepu.edu.cn;

许建中(1987), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为新型电力系统电磁暂态建模和仿真技术, xujianzhong@ncepu.edu.cn。

#### (上接第 46 页 Continued from Page 46)

- LI Yujun, HUA Fenglin, LU Yiyuan, et al. Large disturbance stability criterion for a VSC with phase-locked loop based on a Lyapunov function [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 46 – 54.
- [25] 武颖, 徐永海, 王莹鑫, 等. 基于混合势函数法的并网型直流微电网大扰动稳定性分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 44 – 55.  
WU Ying, XU Yonghai, WANG Yingxin, et al. Large disturbance stability analysis of grid-connected DC microgrid based on mixed potential function thory [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(1): 44 – 55.
- [26] 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.
- [27] 李永达. 大干扰下风电并网系统动态降阶方法及适用性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [28] 李善寿, 王浩, 叶伟, 等. 抑制 DAB 变换器回流功率的双重移相调制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 14 – 23.  
LI Shanshou, WANG Hao, YE Wei, et al. Dual phase shift modulation strategy for suppressing backflow power in DAB converters [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 14 – 23.
- [29] 孟祥齐, 贾燕冰, 任春光, 等. 直流微电网 DAB 变换器和直流固态变压器的非线性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 180 – 189.  
MENG Xiangqi, JIA Yanbing, REN Chunguang, et al. Nonlinear control strategies for DC microgrid DAB converters and DC solid-state transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 180 – 189.

收稿日期: 2024-11-08; 网络首发日期: 2025-03-24

作者简介:

徐洋(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统稳定性分析, 1761406070@qq.com;

李凤婷(1965), 女, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为交直流混联系统稳定与控制, xjft2009@sina.com;

刘江山(1997), 博士研究生, 研究方向为交直流混联系统稳定控制, xjdxljs@stu.xju.edu.cn。