

海上风电孤岛经 VSC-HVDC 并网系统的故障穿越策略

刘福锁^{1,3}, 丁芮², 王玉^{1,3}, 成硕², 王琦², 黄锡芳^{1,3}

(1. 电网运行风险防御技术与装备全国重点实验室(国电南瑞科技股份有限公司),
江苏 南京 211106; 2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023;
3. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106)

摘要:为解决海上风电经柔性直流送出系统在受端电网发生短路故障时,因盈余功率引发的直流侧过电压问题,提出一种基于盈余功率分配的耗能装置与海上风电场降压控制协调配合的联合故障穿越策略。首先,分析功率不平衡造成柔直系统直流过电压的机理,提取造成直流过电压的主要影响因素。其次,构建柔直系统输入功率、输出功率关系模型,对无措施下的系统盈余功率进行分配,并基于此对耗能装置的电阻阻值进行优化。然后,在此基础上提出了一种耗能电阻设计策略与海上风电孤岛降压运行相配合的故障穿越策略,并就耗能装置的技术性进行分析,最后,在PSCAD/EMTDC上验证了所提控制策略的有效性。仿真结果表明,所提控制策略可以解决受端电网发生短路故障造成柔直系统直流过电压的问题,避免了因短时故障造成海上风电柔直并网系统脱网的风险。

关键词:海上风电;柔性直流输电;故障穿越;耗能装置;孤岛控制;盈余功率

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26046

Fault Ride-through Strategy for Offshore Wind Power Islanding via VSC-HVDC Grid-connected System

LIU Fusuo^{1,3}, DING Rui², WANG Yu^{1,3}, CHENG Shuo², WANG Qi², HUANG Xifang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Technology and Equipment for Defense Against Power System Operational Risks (Nari Technology Co., Ltd.), Nanjing 211106, Jiangsu, China; 2. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. Nanrui Group Limited (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: In order to solve the DC over-voltage problem caused by surplus power when short circuit fault occurs in the recipient grid of offshore wind power via voltage source converter high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) delivery system, a joint fault ride-through strategy based on surplus power allocation of dissipation devices and offshore wind farm voltage reduction control was proposed. Firstly, the mechanism of DC over-voltage of the VSC-HVDC system caused by power imbalance was analyzed, and the main influencing factors of DC over-voltage were extracted. Secondly, the input power and output power relationship model of the VSC-HVDC system was constructed to allocate the surplus power of the system without measures and optimize the resistor resistance of the energy dissipation device based on it. Then, the fault ride-through strategy was proposed based on the design strategy of energy dissipation resistor in conjunction with the voltage reduction operation of the offshore wind island and the technicality of the energy dissipation device was analyzed. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy was verified on PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the proposed control strategy can solve the problem of DC overvoltage in the VSC-HVDC system caused by short-circuit faults at the receiving end of the grid, avoiding the risk of offshore wind power being disconnected from the grid via the VSC-

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB2402700);智能电网保护和运行控制国家重点实验室资助项目(SGNER0000KJJS2302146)

作者简介:刘福锁(1981—),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析及控制技术,

Email: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

通讯作者:王琦(1975—),女,博士,教授,主要研究方向为新能源发电及并网, Email: wangqi@njnu.edu.cn

HVDC grid-connected system due to short-time faults.

Key words: offshore wind power; voltage source converter high voltage direct current transmission (VSC-HVDC); fault ride-through; dissipation device; island control; surplus power

随着以新能源为主体的新型电力系统建设,新能源迎来了巨大的发展机遇^[1-5]。以风电、光伏为代表的新能源主要分布在远离负荷中心的远海及西部地区^[6],柔性直流输电(voltage source converter high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)因其灵活可调成为新能源输电的重要选择^[7],基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔直系统因更有利于远距离高压直流输电而备受关注^[8-11]。国内如东海上风电场孤岛经柔直并网于 2021 年成功投运。

海上风电经柔直并网时,受限于海上风电孤岛经柔直送出系统的控制及系统直流隔离的特性,当陆上交流电网发生短路故障时,柔直系统受端换流站功率输出受阻,而送端换流站不能及时响应受端电网故障,降低有功功率输入,引起柔直送受两端换流站功率不平衡,使得柔直系统功率盈余,最终导致直流电压过高,引发系统闭锁,造成电网大额功率缺失。目前,关于海上风电经柔直外送的功率不平衡造成直流过电压的解决方法主要分为 3 类:控制策略与耗能装置、新能源减载^[12]、改变柔直并网点结构配合^[13]。文献[12]采用基于通信的方法,实现了新能源侧的快速减载。但是当通信出现延迟的时候,对故障穿越影响较大。文献[13]提出了将受端的并网结构进行了设计,通过电网侧变压器的串并联两种方式的切换进行故障穿越,降低受端不对称故障对风电场及柔直的影响,以确保风电功率的安全疏散,然而这种配置方案依赖于电网中的并联和串联补偿机制,会导致系统的不稳定,并且加剧系统的复杂性。因此在工程上一般都配备耗能电阻以达到消耗盈余功率的目的,如国内如东工程。

目前,耗能电阻可以分为直流耗能电阻和交流耗能电阻^[14],若采用交流耗能电阻来实现故障穿越,在故障切除后,系统恢复时间较长,波动较大,容易造成系统不稳定。耗能电阻依据电阻的布置方式不同,又可分为:集中式^[15]、分布式^[16]和混合式^[17]。集中式电阻的设计会导致电压变化速率和电流变化速率偏大,会导致系统在暂态过程

中的性能微差;而分布式对子模块内部的集成电阻和水冷系统有着较高的功率需求,则会导致子模块的体积增大且成本激增;混合式是将集中式拓扑和分布式拓扑结合而成的,理论上兼具了二者优点,虽然混合式耗能装置避免了在子模块中加装水冷系统的需求,但仍然无法避免集中式和分布式其它的缺点。

考虑到耗能电阻的固有问题,需要与控制策略协调配合,以解决故障穿越问题。文献[18]提出了耗能装置的基本拓扑和控制策略,并通过 120 kV 直流耗能样机进行了耗能实验验证。文献[19]提出了一种新的能量转移指标,并设计了风电场主动切换功率和耗能电阻的协调策略来实现交流故障穿越,文章未考虑通信延迟对功率切换的影响。文献[20]提出了将耗能电阻置于子模块内部,并通过控制策略来控制投入电阻的个数,使其消耗盈余功率,继而实现故障穿越。文章提到的耗能装置的拓扑结构需要大量的半导体和电容器,导致设计尺寸偏大,成本增高。文献[21]提出了基于半桥子模块的混合式直流耗能装置正弦调制补偿策略,使柔性直流系统能够平稳穿越故障。文章提出的补偿策略在限制功率器件数量上有一定的限制,但是增加了系统的控制复杂程度。文献[22]提出了由制动控制器控制的制动电阻构成的变换器,从而实现故障穿越。然而制动控制器的激活时间过长,导致无法可靠地消耗盈余功率。文献[23]提出将模块化耗能电阻和降压法相结合的故障穿越方法。然而文章提出的模块化耗能电路需要大量的电子元件,造成成本过高,并且文章提出的耗能电阻和降压法相结合进行故障穿越时,造成柔直的直流侧电压波动性较大。

综上,为充分发挥柔直系统自身故障穿越能力,本文以典型的海上风电经柔直并网系统为研究对象,当受端电网发生故障时,由于柔直系统的直流隔离作用,送端无法感受受端的功率变化,受端单一故障在数十毫秒内即可引起柔直系统大量的短时功率盈余,从而造成直流过电压。本文首先介绍了系统的结构及控制策略,分析了功率不平衡造成直流过电压的机理和主要影响

因素。论证了系统运行的安全功率存在,进一步提出了一种能量等面积法,基于此优化了耗能装置的耗能电阻阻值设置策略。同时本文提出了一种陆上耗能装置的拓扑设计,可以减少海上风电场的建设成本;另一方面,利用耗能装置与降压法配合,降低了海上风电场对耗能的需求。最后在如东风电场的仿真模型上验证了所提策略的可行性。

1 海上风电经柔直送出系统结构

海上风电经 VSC-HVDC 送出系统拓扑结构如图 1 所示。海上风电采用交流汇集、直流并网的方式将新能源发电传输到陆上大电网中。整个系统可以分为两个部分,分别是新能源场站的交流汇集部分和柔性直流并网部分。

海上风电场主要由几十个,甚至数百个风电机组组成,并经交流汇集到海上交流升压站。其中风电机组主要由 3 个部分构成,分别是风力机、永磁同步发电机以及背靠背的换流站。风机采用背靠背的全功率变流器,该变流器由电机侧换

流站(source side converter station,SSCS)和交流网侧换流站(converging network side converter station,CNSCS)组成,每个换流站均采用两电平换流器。SSCS采用定有功功率控制和定无功功率控制,CNSCS采用了定直流电压控制和定无功功率控制,同时在风机网侧换流站采用无功优先的低电压穿越策略。直流线路上安装了 4 个直流大电容稳压,整个风电场的额定出力为整个系统的额定功率。

柔性直流输电系统采用的是模块化多电平换流站结构的高压直流输电(MMC-HVDC),其主要由两个换流站组成,分别为送端换流站(sending converter station,SCS)和受端换流站(receiver converter station,RCS)。每个换流站由数百个半桥子模块串联组成,每个子模块包含两个可关断的 IGBT、两个二极管和一个电容,其拓扑如图 1 所示。为了维持新能源侧汇集电网的电压频率稳定,SCS 采用孤岛控制,即 V/f 控制方式,RCS 采用定直流电压和定无功功率控制。V/f 控制属于直接控制,受端控制属于 PQ 解耦控制。

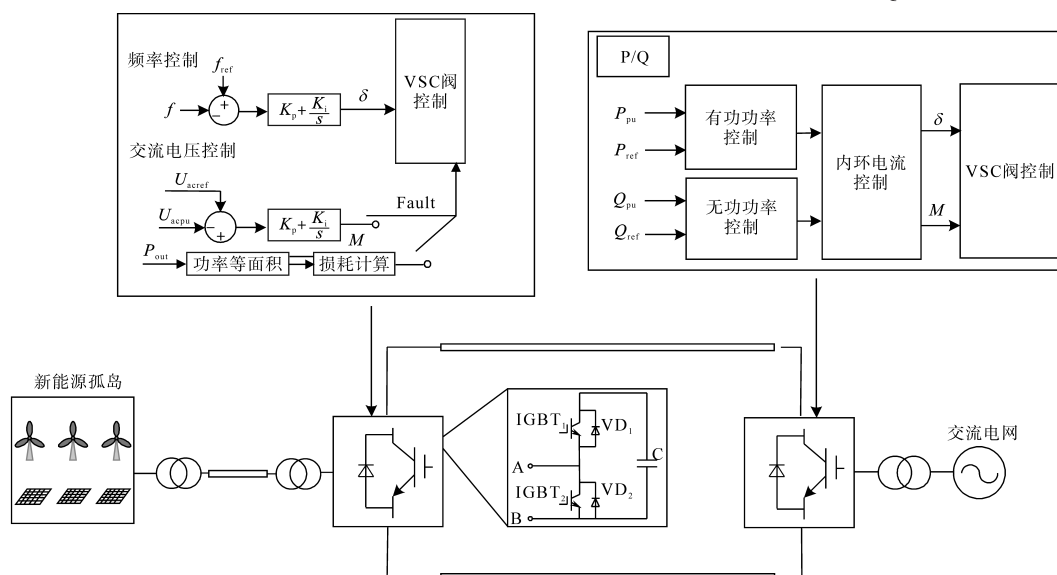


图 1 海上风力发电集成 MMC-HVDC 的拓扑结构

Fig.1 Topology of integrated MMC-HVDC for offshore wind power generation

2 柔直系统直流过电压分析及影响因素分析

2.1 柔直系统直流过电压分析

柔直并网点在 0 时刻发生短路故障后,故障在 t_f 时刻被切除,柔直系统立即将送出功率恢复到额定值,也就是说,在 t_f 时刻,柔直系统的输入功率和输出功率达到了平衡状态。在三相金属

性短路故障期间,柔直系统的充电功率与新能源送入柔直系统之间存在着一定的关系,可以表达为下式:

$$E_{\text{charge}} = E_{\text{VSC}}(t_f) - E_{\text{VSC0}} \quad (1)$$

式中: E_{charge} 为柔直系统的充电能量; $E_{\text{VSC}}(t)$ 为 t 时刻柔直系统中子模块及线路等效电容所储存的能量; E_{VSC0} 为故障发生 0 时刻系统中两个换流站储存的总能量; t_f 为故障切除时刻。

直流电压表达式可表示为

$$[M_{\text{ifD}}(P_{\text{in}}) - M_{\text{ifD}}(P_{\text{out}})]t_{\text{fD}} = \frac{6C_{\text{SM}}}{N} [V_{\text{dc}}^2(t_{\text{f}}) - V_{\text{dcN}}^2]$$

$$\Rightarrow V_{\text{dc}}(t_{\text{f}}) = \sqrt{\frac{N[M_{\text{ifD}}(P_{\text{in}}) - M_{\text{ifD}}(P_{\text{out}})]t_{\text{fD}}}{6C_{\text{SM}}} + V_{\text{dcN}}^2} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{ifD}}(a)$ 为 a 在 $0 \sim t_{\text{fD}}$ 时刻的平均值; P_{in} 为系统输入功率; P_{out} 为系统输出功率; C_{SM} 为子模块电容值; N 为单个桥臂的子模块数; $V_{\text{dc}}(t)$ 为 t 时刻柔直系统直流电压; V_{dcN} 为柔直系统额定直流电压; t_{fD} 为故障持续的时间。

由式(2)可得,受端电网发生短路故障期间,直流电压的上升程度与系统参数(例如子模块电容值 C_{SM} 、稳态运行电压 V_{dc0})、故障期间的电气量(包括单个桥臂的子模块数 N 、系统输入功率 P_{in} 、输出功率 P_{out})以及故障持续时间 t_{fD} 之间存在相关性,即直流电压的上升幅度在受端电网短路故障期间受到系统参数和电气量的影响,同时也与故障持续的时间有关。

2.2 直流过电压的影响因素分析

基于 2.1 节的分析,为了预防受端发生短路故障时柔直侧发生直流过电压,可以通过采取适当的措施来防止其发生,包括调整柔直系统参数和控制故障期间的电气量两个方面。

在改变柔直系统参数中,根据式(2)可以得到,子模块电容值 C_{SM} 与 t_{f} 时刻的直流电压 V_{dc} 呈现负相关关系,而 t_{f} 时刻的直流电压值 V_{dc} 与 V_{dcN} 、故障期间单个桥臂投入的子模块数 N 呈正相关关系。因此,为了防止直流过电压的发生,可以通过增加子模块电容值来实现;而且在稳态运行时通过降低电压来降低 V_{dc} 的上升程度,不过这会造成一定系统冗余,会增加运行成本。另外,通过减少故障期间单个桥臂投入的子模块数 N 也可以降低 V_{dcN} 的电压值。

若从控制柔直系统故障期间电气量来看,令 $P_{\Delta} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$,则式(2)可表示为

$$V_{\text{dc}}(t_{\text{f}}) = \sqrt{\frac{nP_{\Delta}t_{\text{f}}}{6C_{\text{SM}}} + V_{\text{dc0}}^2} \quad (3)$$

式中: n 为运行时直流侧投入的子模块个数; V_{dc0} 为稳态运行时的直流电压。

则可知,当通过增加 P_{out} 、减少 P_{in} 来降低 P_{Δ} ,以避免直流过电压。

3 基于能量等面积法的盈余功率分配

根据上一节的分析,在柔直系统中,直流侧投切的模块数保持不变时,直流过电压水平取决于输出功率变化量 P_{Δ} 。当发生某一故障,即输出功率保持常数时,我们需要满足条件 $P_{\Delta} = P_{\text{e}}$ 和输入功率 $P_{\text{in}} = P_{\text{s}}$,以确保在故障持续的最大时间 t_3 内,直流电压始终满足 $U_{\text{dc}}(t) \leq kU_{\text{dcN}}$,其中 k 为耐压系数; P_{e} 为介于维持在系统稳定运行时的运行功率 P_0 与输出功率 P_{out} 之间的常数; P_{s} 为安全功率。假设故障发生在初始时刻 t_0 ,并在 t_3 时刻解除。

图 2 展示了针对不同情况下的输出功率 P_{out} 的对应输入功率 P_{in} ,其中 P_{II} 为未采取任何措施时的输入功率水平, P_{III} 为系统在稳态下可以承受的最大输入功率,而 P_{I} 为采取措施降低故障期间输入功率的情况,以确保系统能够安全运行。

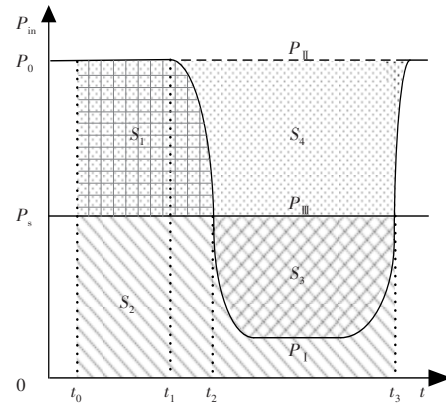


图 2 并网点故障下不同 P_{in} 曲线特性

Fig.2 Characteristics of different P_{in} curves under parallel network point failure

以 P_{I} 功率曲线为尺度,将 P_{out} 看做零轴,即假设 P_{out} 与 x 轴重合,则 P_{in} 可以分为 3 种情况,如图 2 所示,可为 3 个时段。

①初始时段($t_0 \sim t_2$):在故障发生后的初始时刻 t_0 开始,系统迅速检测到故障并进行相应处理。在这个时段内,输入功率 P_{in} 开始下降,并逐渐稳定在一个较低的水平,以避免进一步对系统造成损害。

②稳态时段($t_2 \sim t_3$):在稳态时段,系统成功降低了输入功率 P_{in} ,并保持在相对稳定的水平。通过采取适当的控制措施,系统能够在故障期间保持稳定运行,以保证电网的安全和可靠性。

③恢复时段(t_3 以后):一旦故障得到解决,系统开始逐步恢复到正常运行状态。在这个时段内,输入功率 P_{in} 逐渐恢复到正常水平,以满足电

网负荷需求,并确保系统的稳定性和可靠性。

图2中在 t_0-t_3 时段内, $P_{in}, P_{out}, P_s, P_0$ 及时间轴将该区域分为4个部分,分别为 $S_1 \sim S_4$ 。 S_1 代表了故障期间柔直系统中充电的能量,在这个时间段,输入功率 P_{in} 较高,导致柔直系统开始接收电能并储存为电势能,形成了故障期间柔直系统充电的能量。 S_3 和 S_4 表示通过一定措施降低柔直系统充电的能量,在这个时间段中,系统采取了特定的措施来减少输入功率 P_{in} ,以限制柔直系统的充电速率和充电能量,从而降低故障期间柔直系统的充电能量。功率与时间围成的面积表示能量,如下两式所示:

$$S_1 + S_2 = \int_{t_0}^{t_1} (P_{in} - P_{out}) dt \quad (4)$$

$$S_3 + S_4 = \int_{t_1}^{t_3} (P_0 - P_{in}) dt \quad (5)$$

式中: S_1+S_2 为故障期间柔直系统中充电的能量; S_3+S_4 为通过一定的措施降低柔直系统充电的能量。

根据上述等面积法则,得到在故障暂态过程中的整个过程中系统输入平均功率应当小于安全功率 P_s ,即故障响应后的最大安全运行功率为 P_1 ,确保在受端交流故障期间的直流过电压水平维持在系统设计的耐压值之下。此外,在图2中 P_1 与 P_{in} 包围的面积,当采用降压控制时,其表明在断路器断开前海上风电场孤岛需承受消耗的最大能量值 E 。

4 协调穿越策略

4.1 耗能装置的设计

在受端电网发生短路故障后,交流断路器断开前,柔直系统可以承受部分盈余功率,其余部分盈余功率可由耗能装置吸收。为降低海上风电场建设成本,选择在陆上受端换流站设计耗能装置,对耗能装置的拓扑设计结构示意图如图3所示,并搭建如图4所示的耗能电阻响应策略。该拓扑结构包括6个耗能支路。3个耗能支路的一端共同连接到柔直直流侧的正极,另一端分别连接到三相交流线路上。其余3个支路的一端共同连接到柔直直流侧的负极,另一端分别连接到三相交流线路上。耗能电阻的等效电阻取值考虑柔性直流输电系统本身的故障穿越能力。

本文提出的耗能装置分为3个步骤运行,首先当检测到受端电网发生短路故障时,记此时时

刻为 t_1 ,直流电压为 U_{dc1} 。投入与故障相相连接的耗能支路,降低柔性直流输电系统两端的功率不平衡程度;其次,当直流电压达到安全电压值 U_{dc2} ($U_{dc2} > U_{dc1}$),记此时时刻为 t_2 ,投入全部耗能电阻;最后,检测到故障清除,有功功率输出恢复,切除耗能电阻,记此时时刻为 t_3 。

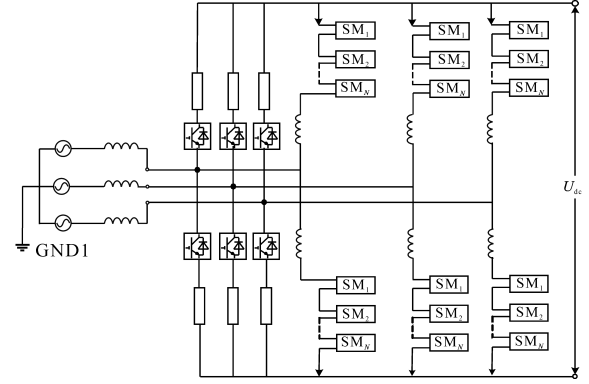


图3 耗能装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of energy-consuming devices

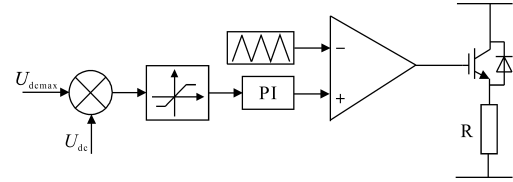


图4 耗能电阻控制策略

Fig.4 Energy-consuming resistance control strategy

与目前大多数耗能电阻相比,本文提出耗能装置的两端在故障期间将会产生一个压差,而随着故障程度的增加,压差就会变大,从而使得耗能电阻能耗散更多的盈余功率。耗能支路采用全控型电力电子器件与耗能电阻串联。

为防止直流过电压,故障期间,耗能装置吸收的平均盈余功率应为

$$R_{Rave} = P_{in} - P_s \quad (6)$$

$$P_s = \frac{1}{2} C_{eq} U_{dc}^2 (k^2 - 1) \quad (7)$$

当受端电网发生短路故障时,柔直系统一般根据直流电压上升到某一定值来检测故障。而为实现耗能电阻故障期间吸收的功率大于故障期间除系统吸收的功率外的盈余功率,则耗能装置的吸收功率 P_R 的计算公式为

$$P_R = P_{in} - P_1 \quad (8)$$

式中: P_1 为故障后的最大运行功率。

由于柔直系统具有快速调节的能力,忽略在调节过程中的功率变化,根据图2所示能量面积可以得到 P_1 的表达式:

$$P_1 = \frac{P_s t_f - P_0(t_2 - t_0)}{t_3 - t_2} \quad (9)$$

耗能装置的等效阻值为

$$R_s = \frac{3U_{dcq}^2}{P_R} \quad (10)$$

其中, U_{dcq} 取 $\frac{U_{dcmax} + U_{dc0}}{2}$ 。

4.2 降压控制策略

根据功率等面积法,其中重要的是量化表示 P_s 。在电力系统中,故障穿越主要取决于交流断路器的开端。现有断路器响应时间为 $t=100$ ms,即最大故障时间 t_f 。在此期间柔直系统的最大充电容量 ΔE_{vsc} 和安全功率 P_s 通过下式可得:

$$\Delta E_{vsc} = 6NC_{sm}(K_c^2 - 1)U_c^2 + \frac{1}{2}C_{Line}(K_{dc}^2 - 1)U_{dc}^2 \quad (11)$$

$$P_s = \frac{\Delta E_{vsc}}{t_f} + P_{out} \quad (12)$$

式中: K_c 为子模块电容耐压值; K_{dc} 为系统直流电压耐压值。

由于柔直系统具有快速调节的能力,忽略在调节过程中的功率变化,根据图 2 所示能量面积可以得到式(9)中 P_1 的表达式。

将式(12)代入式(9)可以得到在故障期间,柔直系统交流电压控制参考值。其控制框图如图 1 中交流电压控制环所示。

4.3 协调故障穿越策略

为充分利用柔直系统故障穿越资源,减少能量损耗,同时防止直流过电压,本文提出了耗能电阻与海上风电降压协调控制的故障穿越策略,见图 4。该方法考虑前文所述的对柔直系统盈余功率分配的方法,对耗能装置进行设计,并基于耗能装置与海上风电孤岛降压控制协调的故障穿越策略,可解决受端交流故障造成的短时直流过电压的问题。

图 5 所示控制逻辑包括以下 3 个阶段:

1) 耗能装置响应阶段:当故障发生后,柔直直流电压快上升到 U_{dc1} ,投入故障相对应的耗能电阻,直流电压缓慢上升。在此期间,当检测到故障切除,直接进入恢复阶段。

2) 风电场降压配合阶段:当直流电压上升至 U_{dc2} ,即达到柔直系统直流耐压值。耗能装置全部投入,同时,柔直孤岛控制系统切换控制,降低风电场交流电压至 V_{ac1} 。

3) 恢复阶段:当检测到故障清除,迅速切除耗能电阻,同时风电场交流电压以 K 速率提升至额定值。 K 取值保证满足风电场暂态故障穿越的国家标准规定的有功功率恢复速率。

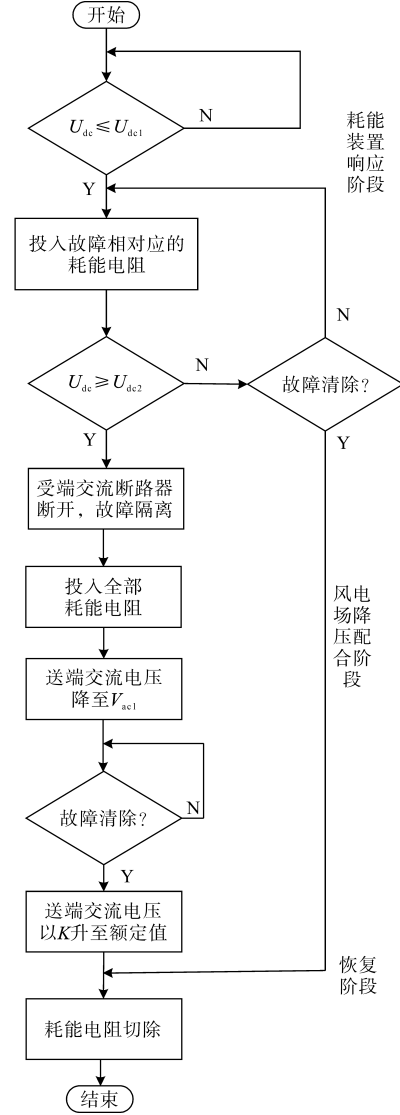


Fig.5 Coordinated control strategy

4.4 仿真验证

为验证交流故障下所提耗能电阻优化控制策略及其与风电场降压控制协调方法的性能,本文在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建了如图 1 所示的海上风电柔直并网系统仿真模型。为提高柔直系统的故障穿越能力,在本文策略中引入了直流电流控制回路中的直流调制比,将控制维度增加至 3 维度,可实现子模块电容电压的解耦控制^[24],并将直流电压的耐压值设置为 1.1(标幺值),子模块电容电压的耐压值设置为 1.3(标幺值)。

4.4.1 耗能装置设计策略验证

在陆上换流站出口设置三相接地故障,故障时刻为6 s,故障持续时间为80 ms。由于故障时间短,交流断路器不会断开,通过调节故障程度,使交流电压跌落至0(标么值)左右。根据盈余功率消耗需求,在此期间,仅需耗能电阻投入。三相故障仿真结果如图6所示。图6a~图6e分别为受端电网交流电压、送端电网交流电压、送受端有功功率、直流电压及子模块电容电压。

由图6a~图6f可知,在发生短路故障后,受端电网交流电压骤降到0(标么值),送端电网交流电压发生波动,受端电网的直流电压与子模块电容电压快速上升,系统检测到故障信号,投入耗能电阻,直流电压上升速度放缓,耗能装置投入时间如图6f所示。在故障切除时,直流电压上升到1.08(标么值),子模块电容电压上升到1.24(标么值),满足系统安全运行。单个耗能电阻的消耗能量约为8.8 MJ,耗能电阻总消耗能量为52.8 MJ,与等面积法中 P_0 与 P_s 围成的面积相符。

4.4.2 协调控制策略验证

在陆上换流站出口设置三相接地故障,故障时刻为6 s,故障持续时间为200 ms。假设断路器此时发生拒动,在故障期间的100 ms内,根据盈余功率消耗需求,在此期间,耗能电阻投入。在0.1 s时,送端换流站检测到故障未切除,降低送端换流站交流电压至0.9(标么值)以下,迫使风机进入低穿,风电场输出功率降低。三相故障仿真的结果如图7所示。图7a~图7e分别为受端电网交流电压、送端电网交流电压、送受端有功功率、直流电压及子模块电容电压。

由图7a~图7b可知,在发生交流故障时,受端交流电压和送端交流电压迅速变化,由图7c~图7f可知在发生交流故障后,直流电压与子模块电容电压快速上升,系统检测到故障信号,投入耗能电阻,直流电压上升速度放缓。在故障持续100 ms时,直流电压上升到1.095(标么值)左右,子模块电容电压上升到1.3(标么值)。送端换流站未检测到故障切除,电压环切换控制使风电场电网电压降低,柔直交流电压降低至0.5(标么值),满足式(9)的电压控制要求,风电场输出功率降低,子模块电容电压维持在1.3(标么值)。在故障期间,子模块电容电压与直流电压都维持在安全电压之下。

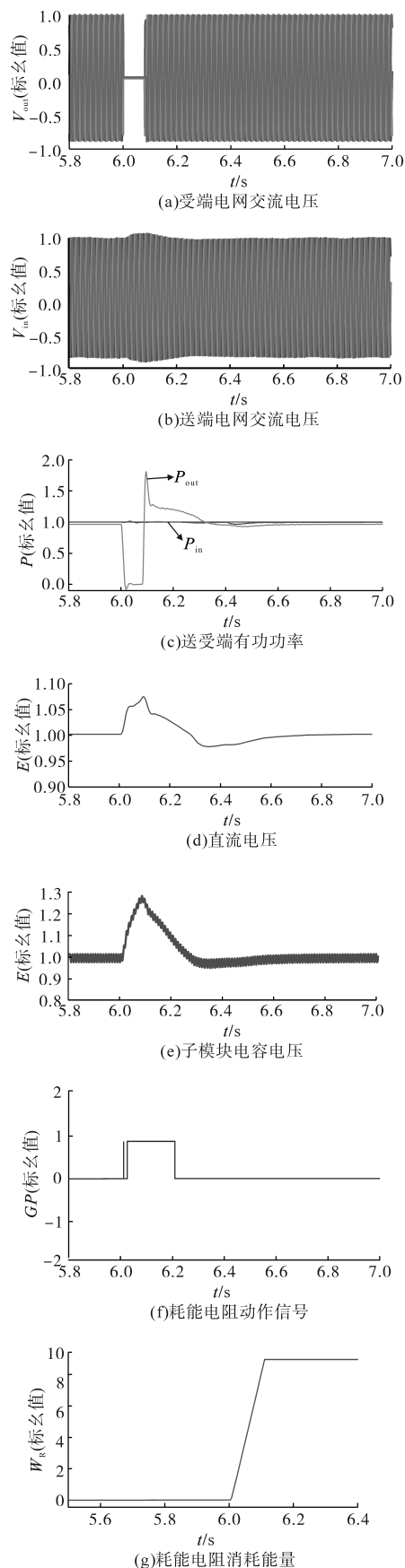


图6 交流电压跌落至0(标么值)的三相接地短路故障仿真结果

Fig.6 Simulation results of three-phase grounded short-circuit fault with AC voltage dropping to 0 p.u.

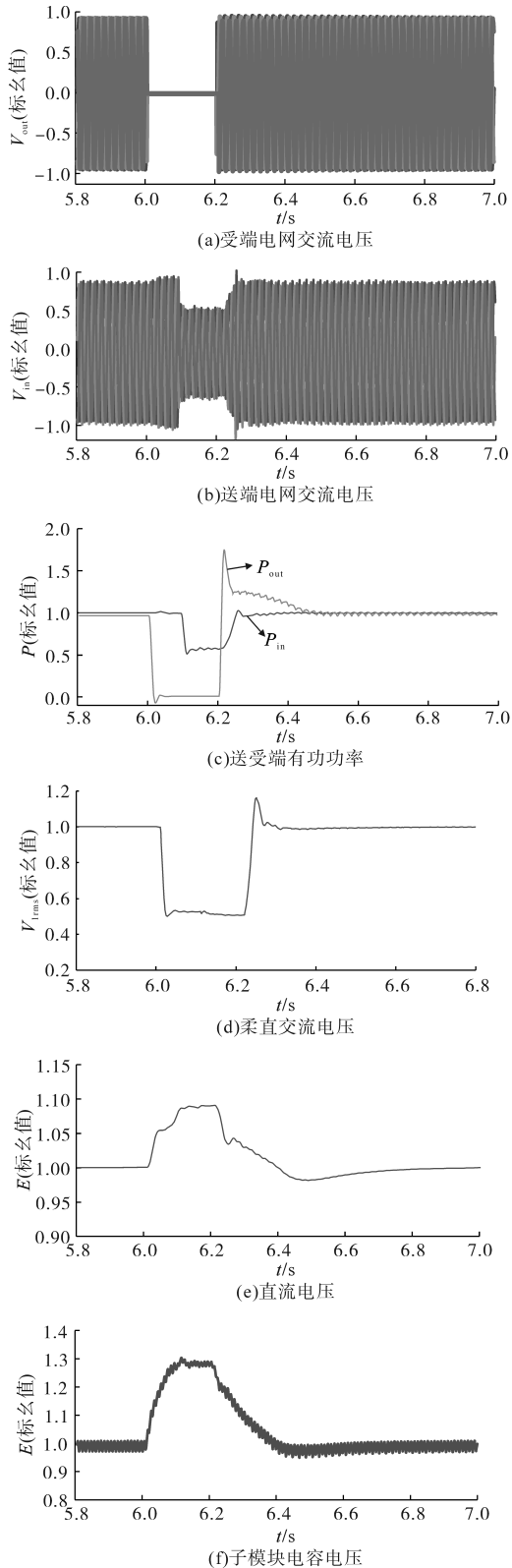


图7 200 ms受端三相接地短路故障仿真结果

Fig.7 200 ms simulation results of three-phase grounded short-circuit fault at the receiving end

5 耗能装置方案对比

目前,耗能装置在已经建成和在建的海上柔

直输电工程均有采用,但是在投切方法、控制策略以及耗能的实际效果上存在较大的差异。文献[25]提出的耗能装置布置在风场侧换流站交流入口处,如图8所示,包含了晶闸管、变压器、电阻。本节将对两个方案的仿真结果进行对比。

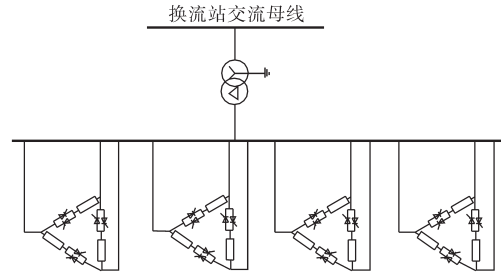


图8 交流耗能装置拓扑

Fig.8 AC energy-consuming device topology

在陆上换流站出口设置三相接地故障,故障时刻为6 s,故障持续时间为80 ms。由于故障时间短,交流断路器不会断开,根据盈余功率消耗需求,在此期间,仅需交流耗能电阻投入。三相故障仿真对比结果如图9所示,图中Ⅰ表示本文提出的耗能装置,Ⅱ表示文献[25]提出的耗能装置。图9a~图9c分别为受端电网交流电压、送受端有功功率、直流电压。

由图9可知,当受端发生三相短路故障时,受端交流电网电压迅速下降至0(标么值),并且柔直系统受端换流站功率输出受阻,而送端换流站不能及时响应受端电网故障,降低有功功率输入,引起柔直送受两端换流站功率不平衡,使得柔直系统功率盈余,从而使得直流电压迅速上升。当系统检测到故障信号,迅速投入耗能电阻,直流电压上升速度放缓,但是其直流电压已上升近1.25(标么值),已经远超了本文设置的直流电压耐压值,其送受端功率在6.6 s后才恢复正常,而本文所提出的耗能电阻优化装置在故障切除时,直流电压才达到1.08(标么值),送受端功率在6.57 s时就已恢复正常。

在陆上换流站出口设置单相接地故障,故障时刻为6 s,故障持续时间为80 ms。由于故障时间短,交流断路器不会断开,根据盈余功率消耗需求,在此期间,仅需交流耗能电阻投入。单相故障仿真结果如图10所示,图中Ⅰ表示本文提出的耗能装置,Ⅱ表示文献[25]提出的耗能装置。图10a~图10c分别为受端电网交流电压、送受端有功功率、直流电压。

由图10可知,当受端发生单相短路故障时,

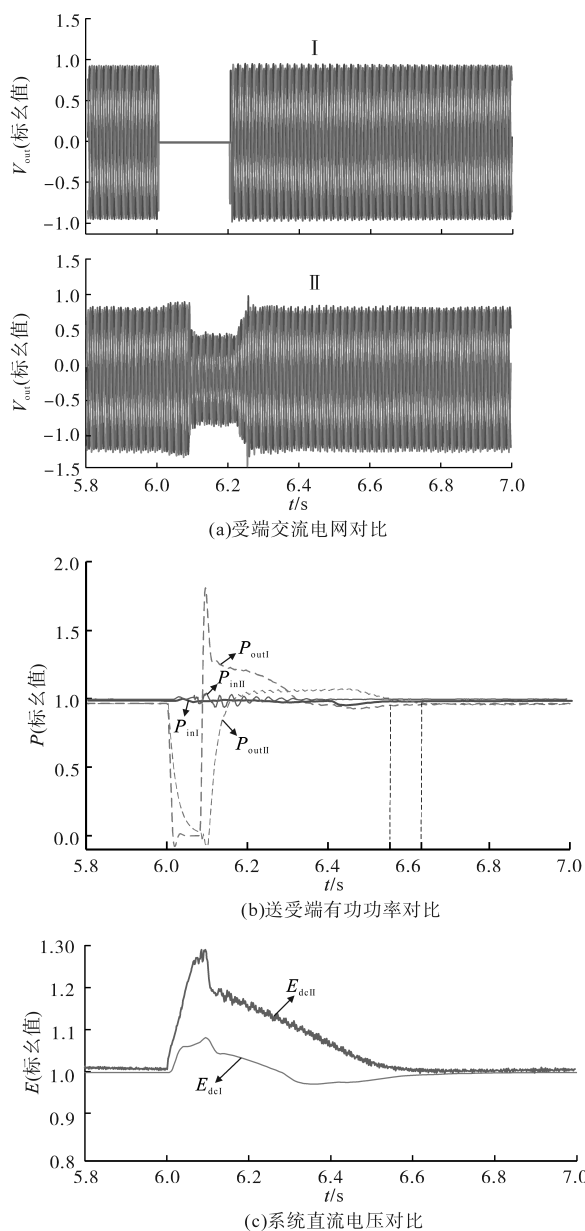


图9 所提耗能装置与交流耗能装置三相故障仿真对比图

Fig.9 Comparison of three-phase fault simulation between the proposed energy-consuming device and the AC energy-consuming device

受端交流电网A相电压迅速下降至0(标么值),并且柔直系统受端换流站功率输出受阻,而送端换流站不能及时响应受端电网故障,降低有功功率输入,引起柔直送受两端换流站功率不平衡,使得柔直系统功率盈余,从而使得直流电压迅速上升,当系统检测到故障信号,迅速投入耗能电阻,直流电压上升速度放缓,但是其直流电压已上升近1.13(标么值),已超过直流电压耐压值;其送受端功率在6.43 s后才恢复正常,而本文所提出的耗能电阻优化装置在故障切除时,直流电压并未达到直流耐压值,送受端功率在6.2 s之前

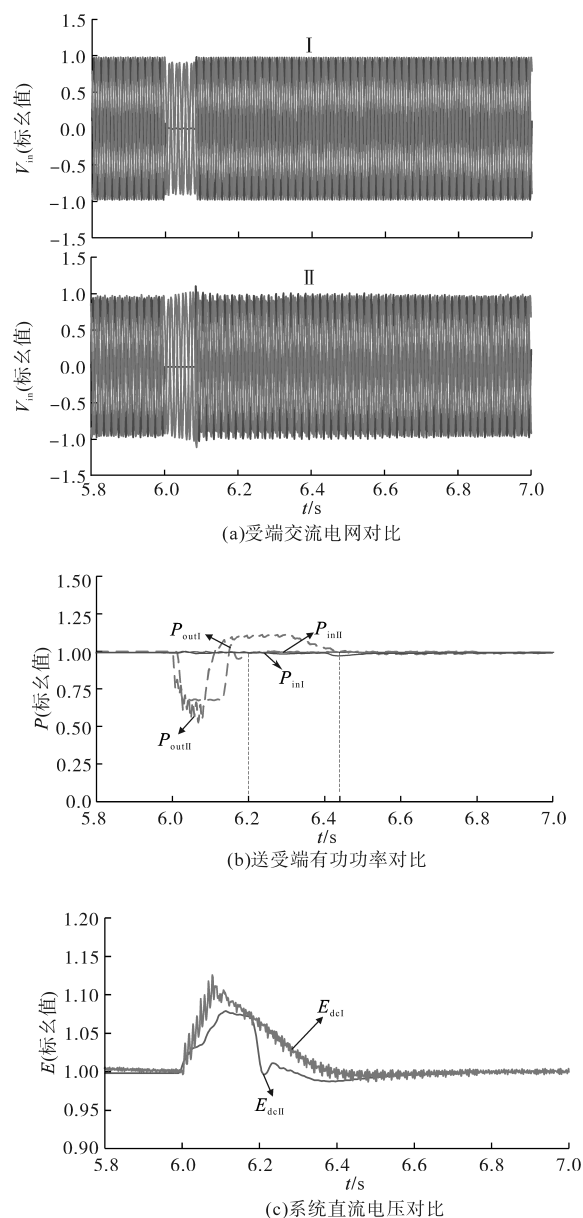


图10 所提耗能装置与交流耗能装置单相故障仿真对比图

Fig.10 Comparison of single-phase fault simulation between the proposed energy-consuming device and the AC energy-consuming device

就已恢复正常。

由图10可知,当受端发生单相短路故障时,受端交流电网A相电压迅速下降至0(标么值),并且柔直系统受端换流站功率输出受阻,而送端换流站不能及时响应受端电网故障,降低有功功率输入,引起柔直送受两端换流站功率不平衡,使得柔直系统功率盈余,从而使得直流电压迅速上升,当系统检测到故障信号,迅速投入耗能电阻,直流电压上升速度放缓,但是其直流电压已上升近1.13(标么值),已超过直流电压耐压值;

其送受端功率在 6.43 s 后才恢复正常,而本文所提出的耗能电阻优化装置在故障切除时,直流电压并未达到直流耐压值,送受端功率在 6.2 s 之前就已恢复正常。

就文献[25]装置而言,高压直流大容量系统需要将交流侧的 220 kV 及以上电压降低到 110 kV 或以下。为了实现这一降压操作,必须在晶闸管阀和交流母线之间引入降压变压器。然而,这样的变压器及其相关设备,如断路器,会导致海上平台的尺寸明显增加。这种增加不仅给平台的设计和安装带来了挑战,还极大地增加了平台建设、运输和安装的风险。此外,降压变压器需要长期运行,会产生额外的能量损耗。同时还带来了一系列的问题和挑战,包括平台尺寸增加、设计复杂性增加、投资成本增加、风险增加以及能量损耗。

6 结论

本文所提出的控制策略,一方面可以减轻海上电力设备的建设要求,降低深远海风电经柔直并网耗能装置的建设成本。另一方面,利用降压法与耗能装置配合,解决了故障期间降压深度不确定的问题,本文所做工作总结如下:

1) 针对海上风电经柔直送出系统陆上换流站出口处短路故障造成直流过电压问题,本文提出了一种基于盈余功率分配的能量等面积法。基于能量等面积法,设计了耗能装置的耗能电阻阻值。并且为减轻海上风电场的建设成本,本文提出了一种陆上耗能装置的拓扑设计。

2) 在此基础上,提出了海上风电降压控制与耗能装置配合的协调控制策略,解决了受端故障造成的直流过电压的问题,避免了因短时故障造成海上风电柔直并网系统脱网的风险。

总体而言,本文中所提的控制策略对于海上风电经柔直并网系统实现故障穿越具有一定的优越性,能够为系统安全稳定运行提供一定的保障,但也存在一定的不足:

1) 本文所提能量法分配未考虑换流站和直流线路损耗,如何将系统控制的系统损耗考虑进去,优化策略实现是一个待解决的技术难题;

2) 本文仅考虑端对端的并网方式,所提控制方法在多端柔直及直流组网场景下的适应性仍有待验证。

参考文献

- [1] 高剑,朱童,杜程茂,等.用于多交流系统耦合下 MMC-HVDC 稳定性分析的模块化阻抗建模方法[J]. 电工电能新技术,2023,42(7):48-58.
GAO Jian, ZHU Tong, DU Chengmao, et al. Modular impedance modeling method for stability analysis of multi-AC system coupled MMC-HVDC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(7): 48-58.
- [2] 郝为瀚,谭威,黄阳,等.基于无源阻尼的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 电工电能新技术,2023,42(3):23-31.
HAO Weihang, TAN Wei, HUANG Yang, et al. High-frequency oscillation suppression strategy of MMC-HVDC based on passive damping method[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 23-31.
- [3] 张钦智,王宾,李琰,等.风电场经柔性直流输电系统故障穿越协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(10):131-138.
ZHANG Qinzhi, WANG Bin, LI Yan, et al. Research on fault crossing coordination control of a wind farm via a flexible direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 131-138.
- [4] 宋平岗,杨长槐,龙日起,等.考虑功率裕度的 MMC-MTDC 改进下垂平坦控制策略[J]. 电工电能新技术,2021,40(6):22-31.
SONG Pinggang, YANG Changlan, LONG Riqi, et al. MMC-MTDC improved droop flat control strategy considering power margin[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(6): 22-31.
- [5] ZOU C, RAO H, XU S, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10157-10168.
- [6] 张天翼,王海风.风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(16):177-187.
ZHANG Tianyi, WANG Haifeng. Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 177-187.
- [7] WANG Y Z, WEN W J, WANG C S, et al. Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC-HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 169-176.
- [8] 刘增训,游沛羽,周勤勇.适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述[J]. 电力工程技术,2020,39(5):59-70.
LIU Zengxun, YOU Peiyu, ZHOU Qinyong, et al. Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 59-70.

- [9] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1460-1475.
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1460-1475.
- [10] 蔡旭,杨仁圻,周剑桥,等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [11] 叶敏芝,喻哲扬,徐政. 欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 66-75.
YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng. Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 66-75.
- [12] NANOU S, PAPATHANASSIOU S. Evaluation of a communication-based fault ride-through scheme for offshore wind farms connected through high-voltage DC links based on voltage source converter[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(8): 882-891.
- [13] AHMED M, SHAWKY M M E, WEIDONG X. Advanced fault ride-through management scheme for VSC-HVDC connecting offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4923-4934.
- [14] 刘欣和,李道洋,吴庆范,等. 基于半桥子模块的直流卸荷装置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 50-57.
LIU Xinhe, LI Daoyang, WU Qingfan, et al. Energy dissipation device based on half-bridge sub-modules[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 50-57.
- [15] 谢峰源,姚宏洋,李海英,等. 用于 VSC-HVDC 系统的模块化直串式直流耗能装置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 117-123.
XIE Yeyuan, YAO Hongyang, LI Haiying, et al. Modular series-connection DC energy braking device for VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 117-123.
- [16] MANEIRO J, TENNAKOON S, BARKER C, et al. Energy diverting converter topologies for HVDC transmission systems [C]//2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 2013: 1-10.
- [17] 许彬,高冲,张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 88-97, 400.
XU Bin, GAO Chong, ZHANG Jing. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 88-97, 400.
- [18] 杨悦民,许超群,刘宇畅,等. 基于 IGBT 复合模块直串接集中电阻的 400 kV 直流耗能装置原理与研制[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1510-1517.
YANG Yuemin, XU Chaoqun, LIU Yuchang, et al. Principle and development of 400 kV DC energy dissipation device based on IGBT composite module directly connected to concentrated resistance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1510-1517.
- [19] 曹帅,向往,左文平,等. 风电经柔性直流电网外送系统的交流故障诊断与穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1295-1306, 1537.
CAO Shuai, XIANG Wang, ZUO Wenping, et al. AC fault diagnosis and ride-through control strategy for the wind power delivery system via HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1295-1306, 1537.
- [20] HUSSENNETHER V, RITTIGER J, BARTH A, et al. Projects BorWin2 and HelWin1-large scale multilevel voltage-sourced converter technology for bundling of offshore wind power[J]. Water and Energy International, 2013, 70(11): 66-67.
- [21] 田园园,赵峥,薛英林. 基于半桥子模块的混合式直流耗能装置正弦调制补偿策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4278-4286.
TIAN Yuanyuan, ZHAO Zheng, XUE Yinglin. Sinusoidal modulation compensation strategy of hybrid DC chopper based on half-bridge submodules[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4278-4286.
- [22] MIKE D, INGRO E, HERBERT G, et al. Converter with distributed brake resistances: US, US8610384[P]. 2013-12-17.
- [23] 李琦,宋强,刘文华,等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [24] 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.
- [25] 梅念,周杨,李探,等. 张北柔性直流电网盈余功率问题的耗能方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1991-1999.
MEI Nian, ZHOU Yang, LI Tan, et al. Energy consumption method for power surplus in Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1991-1999.

收稿日期: 2024-07-10

修改稿日期: 2024-09-26