

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201244

# 海上风电直流耗能装置和保护配合策略研究

付艳, 周晓风, 戴国安, 崔晨, 李传西, 黄金海, 康建爽, 孙巍峰

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 首先对基于直流耗能装置的交流故障穿越方案进行了理论分析。根据适合海上风电工程的直流耗能装置的拓扑结构, 对该直流耗能装置的工作模式、投退策略进行了分析研究。其次研究了带直流耗能装置的大型海上风电直流保护的分区和范围。确定了直流保护动作策略, 重点研究了各个直流保护区的保护配置策略。然后研究了直流耗能装置的投退对直流保护功能的影响。重点研究了直流过电压保护与直流耗能投入电压值的配合策略, 直流耗能装置的保护功能设计。最后对上述策略进行了仿真试验验证。

**关键词:** 直流耗能装置; 投退策略; 保护配置策略; 配合策略

## Research on coordination strategy for an offshore wind power DC chopper device and protection

FU Yan, ZHOU Xiaofeng, DAI Guo'an, CUI Chen, LI Chuanxi, HUANG Jinhai, KANG Jianshuang, SUN Weifeng

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** First, this paper analyzes the AC fault ride-through scheme based on the DC chopper device. Given the topological structure of a DC chopper device suitable for offshore wind power projects, its working mode and switching strategy are analyzed. Secondly, the scope and zoning of large-scale offshore wind power DC protection with a DC chopper are studied. The DC protection action strategy is determined, and each DC protection zone is focused on the protection configuration strategy. Then the influence of the switching on and off of the DC chopper on the DC protection function is studied. The focus is on the coordination strategy of DC overvoltage protection setting and the input voltage value of the chopper, and its protection function design. Finally, the above strategy is verified by simulation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** DC chopper; switching strategy; protection configuration strategy; coordination strategy

## 0 引言

基于远海风电场经模块化多电平换流器型高压直流 (Modular Multilevel Converter High Voltage Directcurrent, MMC-HVDC) 联网的技术优势, 自德国 BorWin2 工程后的大多数海上风电直流送出工程都采用 MMC 拓扑<sup>[1-3]</sup>。我国在柔性直流工程建设、运行方面已有一定经验, 但尚无海上柔直工程建设经验。大规模海上风电会对系统的稳定性带来诸多挑战, 尤其是在故障工况下如何确保风电场及主电网的稳定性, 提高风电场经 MMC-HVDC 联网系统的故障穿越能力<sup>[4-10]</sup>, 如何对保护进行合理分区,

各区域保护的合理配置及动作时限配合等问题都是目前亟待解决的技术问题和主要研究方向<sup>[8-11]</sup>。

## 1 直流耗能装置的投退策略研究

### 1.1 海上风电直流耗能装置方案分析

在故障工况下如何确保风电场及主电网的稳定性, 提高风电场经 MMC-HVDC 联网系统的故障穿越能力, 理论上有两种方法可解决此问题: 一种是向风机发送指令使其迅速降低输出功率, 另一种是使用耗能电阻来耗散盈余功率<sup>[12-16]</sup>。第 1 种方法存在诸多问题, 而基于直流耗能电阻的交流故障穿越策略技术优势比较明显, 其原理简单, 动作迅速, 设备数量少, 总体设备投资和占地都大大减小, 耗能性能良好, 尤其是直流耗能装置可以布置在陆上换流站, 由此海上平台可节省大量宝贵空间, 且交

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助 (2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助 (52094017000W)

流故障穿越期间对风电场影响较小<sup>[17-19]</sup>。采用直流耗能装置(DC Chopper)的海上风电直流送出典型拓

扑<sup>[20-24]</sup>如图 1 所示。

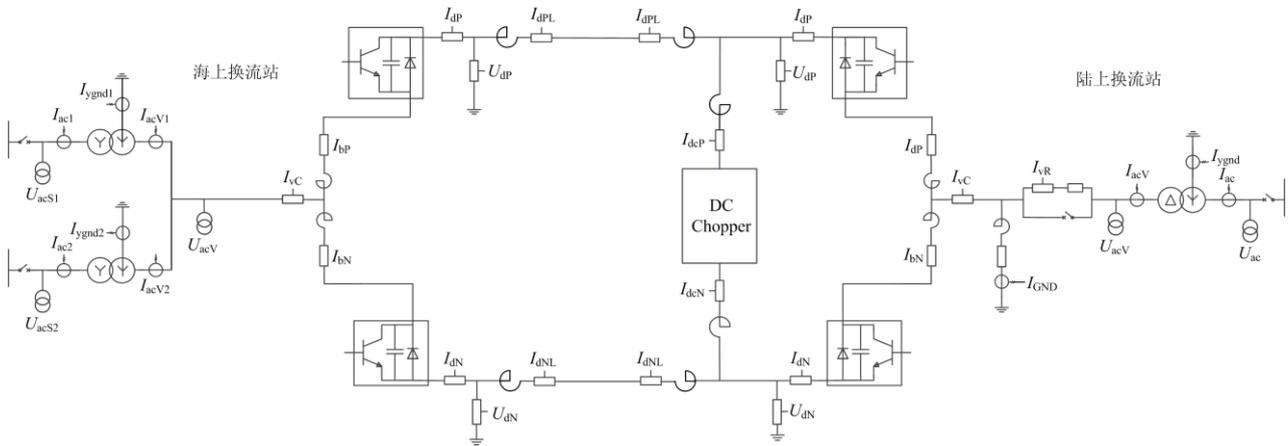


图 1 海上风电直流送出工程电气主接线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of main electrical wiring of offshore wind power DC transmission project

通常直流侧耗能装置靠近受端换流站来减小对风电场影响,并在直流耗能支路配置限流电抗器,限流电抗器可以平滑直流侧耗能装置的冲击。当陆上交流电网发生故障时,交流电压骤降,从而降低了陆上换流站的电力传输能力,考虑到海上风电场自身降低功率的速度太慢,会造成海上风电送出的功率盈余,进而导致直流系统快速过电压,所以需要在风电场功率下降之前,通过耗能装置泻放盈余功率,实现交流故障穿越。

根据电容器的动态方程可得

$$C_{eq} u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_{wf} - P_{gs} \quad (1)$$

式中:  $P_{wf}$  为风电场输出功率;  $P_{gs}$  为向主电网输送的功率;  $C_{eq}$  为两端换流站所有子模块等效电容。在故障情况下,海上换流站向直流系统输入功率  $P_{wf}$  不变,由于电网电压的跌落,陆上换流站传输到电网交流系统功率  $P_{gs}$  降低,造成不平衡功率在直流系统累积,从而引起直流系统出现直流过电压,如果直流电压超过其限定值就会引起直流系统的保护装置动作,使换流站退出运行,从而引起海上风电场的脱网运行。

因此为了实现海上风电陆上交流电网的故障穿越,主要问题是维持系统传输功率的平衡,使直流电压保持稳定。如果直流电压得不到合理的控制,则系统将无法继续运行,待故障消失后也不具备快速恢复的能力,所以,在故障情况下,利用直流耗能装置将直流电压控制在合理范围内,才能实现陆上交流电网的故障穿越,而且直流电压也是直流耗能装置最直接的控制输入信号。

## 1.2 直流耗能装置的拓扑结构和投退策略研究

基于半桥式子模块串联的集中式直流耗能装置(DC Chopper)的拓扑结构简化示意图如图 2 所示。

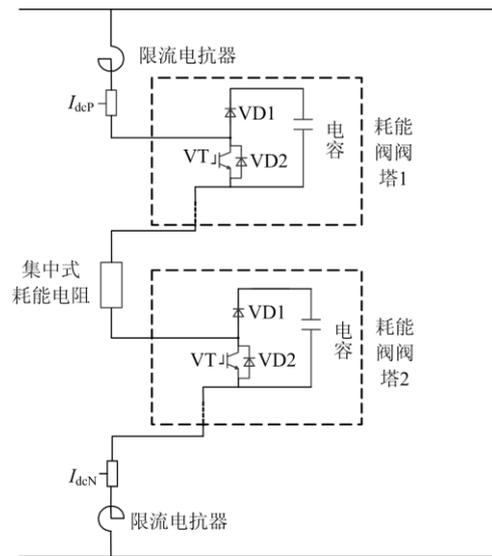


图 2 DC Chopper 的拓扑结构简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of the DC Chopper topology

该 DC Chopper 共有两种工作模式,分压模式和耗能模式。

分压模式下给 VT 加关断信号,当陆上交流侧断路器闭合后,交流线电压对直流海缆充电建立起直流电压,同时直流电压通过 VD1 向 DC Chopper 子模块电容器充电。子模块电容器被接入主电路,由于子模块承担所有直流线路电压,耗能电阻两端电压近似为零,流经的电流近似为零。当海上风电直

流送出系统正常运行时, DC Chopper 处于分压模式, 此时装置不需要进行盈余功率泻放。

耗能模式下给所有子模块的 VT 加开通信号, 耗能电阻两端电压为当前时刻的直流线路电压, 盈余功率可以通过 DC Chopper 消耗掉。因此, 只需要通过控制子模块中 VT 的开通和关断信号, 就可以决定 DC Chopper 的工作模式。

因此直流耗能装置的投退策略为: 当检测到直流线路电压超过投入阈值  $U_{dc,max}$  后, 给所有子模块的 VT 加开通信号投入直流耗能电阻, 消耗盈余的功率, DC Chopper 工作在耗能模式; 当检测到直流线路电压低于退出阈值  $U_{dc,min}$  后给所有子模块的 VT 加关断信号退出直流耗能电阻, 此时, DC Chopper 工作在分压模式。

如果仅以直流电压瞬时值的比较结果直接作为耗能电阻投入退出的判断依据, 则由于故障期间直流电压在投退阈值上下波动, 将造成耗能电阻的频繁投切, 而且耗能电阻的投切会直接给直流侧带来较大的功率冲击, 故可通过增加动作延时时间, 也可设置导通持续时间  $T_s$  以利于系统稳定运行。

当陆上交流电网发生故障, 风机输出有功功率可以为运行区间内任意值, 同时不同类型的故障导致的陆上交流系统电压跌落程度也不同, 因此需要在耗能电阻上消耗的有功功率也不尽相同, 所以, 耗能电阻的投入时间占整个故障持续时间也不相同。若导通持续时间设置较短, 会造成耗能电阻的多次投退, 若导通持续时间设置较长, 轻微故障时耗能电阻的长时间投入会导致直流电压低于允许值。因此, 本文通过增加动作延时时间, 来防止耗能电阻的频繁投切。

## 2 海上风电直流送出保护策略研究

### 2.1 直流保护分区及保护配置策略

保护配置需要考虑到一次系统的运行方式及其可能出现的故障, 从而进行统一的合理的安排, 保护范围内所有的设备均应得到保护。保护区域的划分需确保对所有相关的直流设备进行保护, 相邻保护区域之间重叠, 不存在死区<sup>[25-26]</sup>。

海上风电直流送出保护范围为联接变至直流线路及对站的全部区域, 海上换流站和陆上换流站均可分为以下 5 个保护区域: 联接变保护区、阀侧交流连接线保护区、换流器保护区、直流极保护区、直流线路保护区, 陆上换流站的 DC Chopper 保护属于直流极保护区。由于直流耗能装置在陆上换流站极保护区范围内, 且直流耗能装置的投入和退出都将对原直流极保护区的保护功能产生一定的影

响, 所以本文没有给直流耗能装置划分独立的保护区, 而是将直流耗能装置的保护归于陆上换流站极保护区。

联接变保护区一般由联接变保护单独实现, 保护设计比较成熟<sup>[27]</sup>, 本文不再做详细研究。阀侧交流连接线保护区、换流器保护区、直流极保护区(陆上换流站包含 DC Chopper 保护)、直流线路保护区集成在直流保护装置中实现, 其中, 海上换流站和陆上换流站的阀侧交流连接线保护区、换流器保护区、直流线路保护区的保护配置和保护原理均相同, 而陆上换流站极保护区包含 DC Chopper 保护, 本文仅以陆上换流站保护配置为例进行详细说明。陆上换流站保护分区、测点、保护功能配置示意图如图 3 所示。

### 2.2 直流耗能装置的保护功能设计

直流耗能装置的保护除自身的本体保护以外, 还需配置 DC Chopper 差动保护、DC Chopper 过流保护、DC Chopper 耗能电阻过负荷保护来防止直流耗能装置支路发生故障对直流设备和系统稳定造成的影响。

#### 1) DC Chopper 过流保护

本保护主要防止 DC Chopper 支路发生接地、分压模块短路等故障对直流设备造成的影响。保护功能检测流入、流出直流耗能装置的电流, 如果电流超过定值, 经过设定的时间延时后, 则表明发生了故障, 保护动作。

本保护将流入( $I_{dcP}$ )、流出直流耗能装置的电流( $I_{dcN}$ )作为动作判据:

$$\text{Max}(I_{dcP}, I_{dcN}) > I_{set} \quad (2)$$

保护动作顺序: 闭锁, 跳交流断路器, 启动断路器失灵保护, 锁定交流断路器。DC Chopper 过流保护需要考虑与耗能阀结温、耗能阀的过流能力配合。

#### 2) DC Chopper 耗能电阻过负荷保护

本保护是防止耗能电阻在投入过程中电阻过热造成损坏。保护利用电阻的反时限特性曲线, 通过对电阻上功率消耗与其热时间常数进行积分(积分值代表了电阻的热特性), 来模拟电阻的温升。保护用通过直流耗能电阻支路的电流作为判据。

$$I_R = \text{Max}(I_{dcP}, I_{dcN}) \quad (3)$$

电阻通过电流和运行时间计算公式为

$$t = \tau \times \ln \frac{I_R^2}{I_R^2 - I_\infty^2} \quad (4)$$

式中:  $\tau$  为电阻散热时间常数;  $I_\infty$  为电阻持续通流能力;  $I_R$  为流过电阻的电流。

本保护需考虑与耗能电阻的热耐受能力配合。



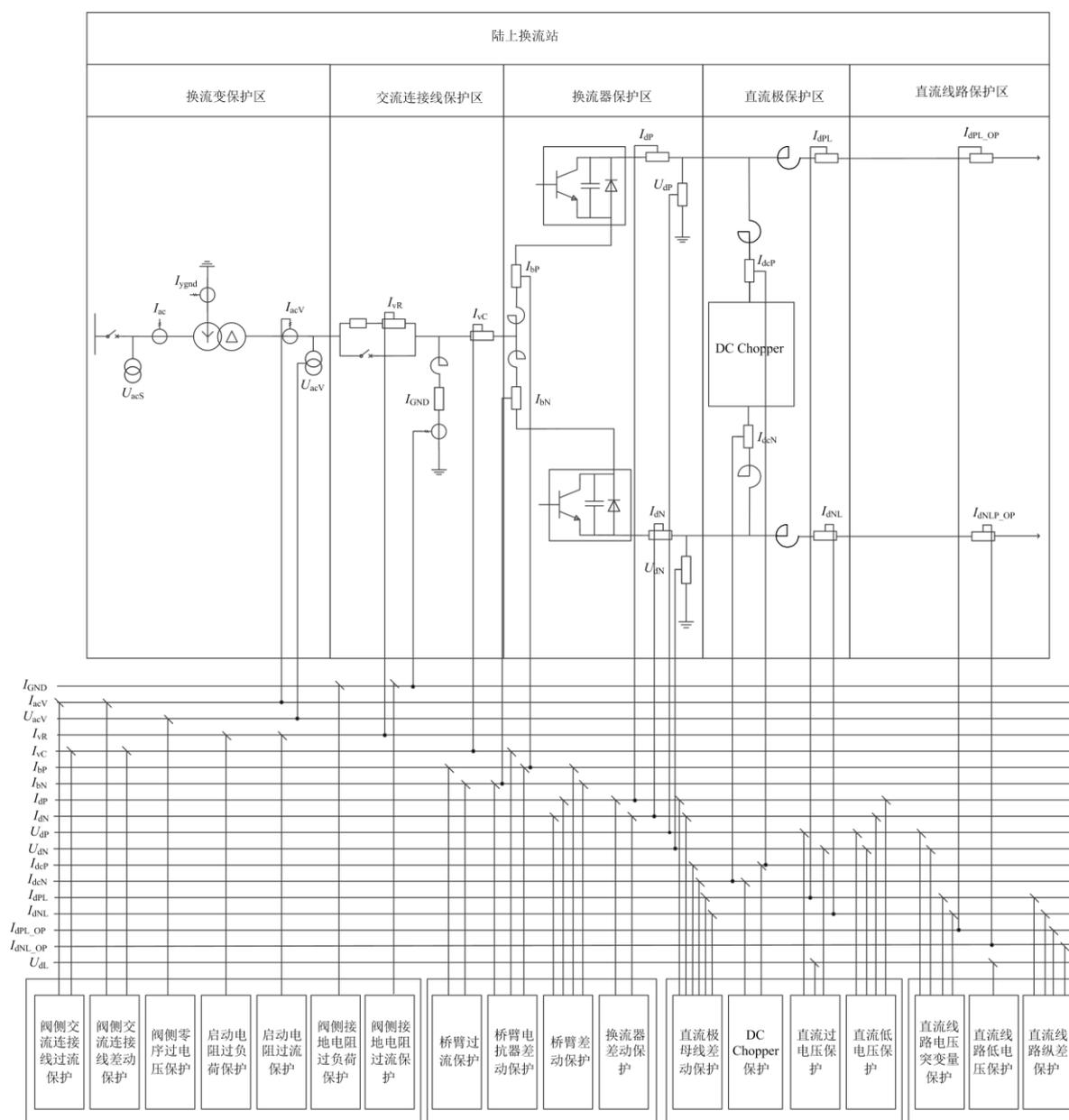


图 3 保护分区、测点、保护功能配置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of protection zone, measuring point, protection function configuration

保护判据为

$$I_R^2 > I_{\_set} \quad (5)$$

保护动作顺序: 报警, 闭锁, 跳交流断路器, 启动断路器失灵保护, 锁定交流断路器。

### 3) DC Chopper 差动保护

本保护主要是避免直流耗能装置发生接地故障对直流设备和系统稳定造成影响。保护功能检测流入、流出直流耗能装置的电流, 如果电流的差值超过定值, 经过设定的时间延时后, 则表明发生了故障, 保护动作。

DC Chopper 差动保护判据为

$$|I_{dcP} - I_{dcN}| > \text{Max}(I_{\_set}, k \cdot I_{res}) \quad (6)$$

式中, 制动电流  $I_{res} = |I_{dcP} + I_{dcN}|/2$ 。DC Chopper 差动保护采用分段比率制动可以实现区内故障保护灵敏度高, 区外故障可靠不误动。

## 3 直流保护功能和直流耗能装置的配合策略研究

直流耗能装置在陆上换流站极保护区范围内, 直流耗能装置的投入和退出主要对原直流极保护区

的保护功能产生一定的影响, 陆上换流站极保护区主要配置了直流过电压保护、直流低电压保护、直流极母线差动保护、直流耗能装置的保护。本文主要研究直流耗能装置与直流极保护的配合策略。

### 3.1 直流耗能装置与直流极母线差动保护的配合策略

直流极母线差动保护主要是避免直流母线、限流电抗器、直流耗能装置等设备发生接地故障对直流设备和系统稳定造成影响。保护功能检测直流母线正( $I_{dP}$ )、负极线电流( $I_{dN}$ ), 直流线路正( $I_{dPL}$ )、负极线电流( $I_{dNL}$ )和流入( $I_{dcP}$ )、流出直流耗能装置的电流( $I_{dcN}$ ), 如果电流的差值超过定值, 经过设定的时间延时后, 则表明发生了故障, 保护动作。

直流极母线差动保护判据为

$$|I_{dPL} - I_{dP} - I_{dcP}| > \text{Max}(I_{set}, k \cdot I_{res}) \quad (7)$$

式中, 制动电流  $I_{res} = \text{Max}(|I_{dP}|, |I_{dPL}|, |I_{dcP}|)$ 。

$$|I_{dNL} - I_{dN} - I_{dcN}| > \text{Max}(I_{set}, k \cdot I_{res}) \quad (8)$$

式中, 制动电流  $I_{res} = \text{Max}(|I_{dN}|, |I_{dNL}|, |I_{dcN}|)$ 。

直流极母线差动保护采用分段比率制动可以实现区内故障保护灵敏度高, 区外故障可靠不误动。直流耗能装置有分压模式和耗能模式两种运行状态。在分压模式下, 由分压模块承担所有直流线路电压, 耗能电阻两端电压近似为零, 流经的电流也近似为零。在耗能模式下, 分压模块全部被切除, 耗能电阻两端电压为当前时刻的直流线路电压, 流经直流耗能装置的电流也由零迅速增加为泻放电流。为保证系统的稳定运行, 需改变原直流极母线差动保护的配合策略防止保护误动造成系统的停运。

### 3.2 直流耗能装置与直流电压保护的配合策略

直流过电压保护不仅需要考虑与一次设备的耐受能力配合, 还需要考虑与直流耗能电阻投退电压值的配合技术。当陆上换流站交流侧发生故障时, 交流电网电压跌落, 降低了陆上换流站的电力传输能力, 导致有功功率无法送出或者只能部分送出到陆上交流电网, 而此时风电场自身降低功率的速度太慢, 仍然继续向直流系统输送功率, 会造成海上风电送出的功率盈余, 盈余有功功率使直流输电线路的电压升高, 危害柔性直流换流阀等设备的安全。因此, 需要在直流电压达到直流过电压保护定值之前及时投入直流耗能电阻, 通过耗能电阻泻放盈余功率, 来降低直流电压值, 实现交流故障穿越。同时, 直流耗能电阻的退出电压值也需要与直流过电压保护定值配合, 故障期间, 直流耗能装置需要把直流电压稳定在一定的电压范围内, 当直流耗能电阻退出时, 也不会使直流电压迅速上升导致直流过电压保护动作, 造成整个系统的停运。本文

取  $U_{dcmax} = 1.2 \text{ p.u.}$  (直流过电压保护快速段动作定值为  $1.25 \text{ p.u.}$ ), 动作延时  $4 \text{ ms}$ (直流过电压保护快速段动作延时为  $20 \text{ ms}$ )。

直流低电压保护不仅需要考虑与一次设备耐受能力的配合, 当直流耗能电阻投入以后, 势必会造成直流电压的下降, 直流耗能装置需要在直流电压达到直流低电压保护定值之前就退出耗能模式。

因直流耗能电阻只需要消耗盈余功率来降低直流电压防止直流过电压保护动作, 故直流耗能电阻不需要将直流电压降低至  $1 \text{ p.u.}$  以下, 本文取  $U_{dcmin} = 1.05 \text{ p.u.}$ , 动作延时  $6 \text{ ms}$ 。

根据上文的分析研究和大量仿真试验结果修正, 如图 4 所示, 设计直流耗能装置的投退策略为 1) 当直流电压在  $4 \text{ ms}$  内持续大于  $U_{dcmax}$  ( $1.2 \text{ p.u.}$ ) 时, 给耗能阀子模块发送 ENP 信号解锁 VT, 直流耗能装置由分压模式转入耗能模式, 直流耗能电阻投入。2) 当直流电压在  $6 \text{ ms}$  内持续小于  $U_{dcmin}$  ( $1.05 \text{ p.u.}$ ) 时, 给耗能阀子模块发送 DP 信号闭锁 VT, 直流耗能装置由耗能模式转入分压模式, 直流耗能电阻退出。

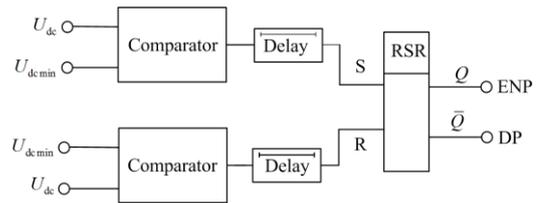


图 4 直流耗能装置的控制逻辑图

Fig. 4 Control logic diagram of DC chopper

## 4 海上风电仿真试验研究

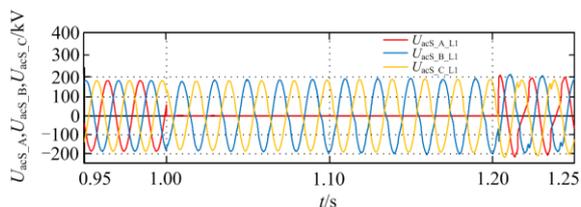
为了准确地研究陆上交流电网的故障特性, 并验证本文提出的直流耗能装置的投退策略, 按照图 1 大型海上风电直流送出典型拓扑结构在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型进行分析研究和验证<sup>[28]</sup>。模型参数设计如下: 额定直流电压为  $\pm 320 \text{ kV}$ , 额定输送功率为  $1000 \text{ MW}$ , 直流海缆长度为  $200 \text{ km}$ , 两侧换流器接入交流系统额定运行电压均为  $220 \text{ kV}$ , 两侧换流器接入交流系统额定频率均为  $50 \text{ Hz}$ , 耗能电阻阻值为  $590 \Omega$ 。

### 4.1 陆上换流站网侧交流系统单相接地故障仿真

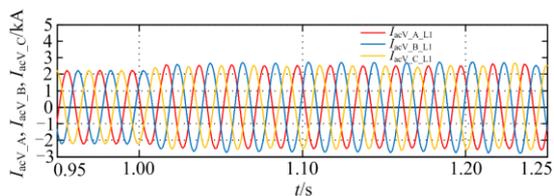
故障前, 系统正常运行, 风电场送出功率与直流输电系统的输送功率均为  $1 \text{ p.u.}$ , 当  $t=1 \text{ s}$  时电网侧靠近换流站处发生单相接地故障, 故障持续时间为  $200 \text{ ms}$ , 图 5 中分别显示了陆上换流站的交流母线电压( $U_{acS\_A/B/C\_L1}$ )、阀侧交流母线三相电流( $I_{acV\_A/B/C\_L1}$ )、海上换流站的交流母线电压

( $U_{acS\_A/B/C\_H2}$ )、阀侧交流母线三相电流( $I_{acV\_A/B/C\_H2}$ )、直流电压( $U_{dc}$ )、换流器母线功率( $P_{1\_L1/H2}$ ), 直流耗能装置消耗的功率( $P_{Chopper}$ ), 直流耗能电阻的投入退出执行信息。

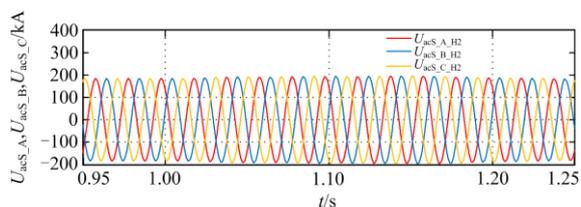
陆上换流站交流电网 A 相接地故障后, A 相交流电压跌落至 0, 其余两相电压由相电压变为线电压, 交流电流在故障中有一定程度的增大, 但是在交流母线过流保护定值以下, 有功功率输出减少, 直流电压上升, 故障发生 155 ms 以后达到直流耗能电阻投入定值, 延时 4 ms 直流耗能电阻投入, 消耗盈余的功率, 直流电压开始下降。故障发生 220 ms 以后到达直流耗能电阻退出定值, 延时 6 ms 直流耗能电阻退出。故障发生 200 ms 以后陆上换流站交流电网故障清除, 系统逐渐恢复正常运行。海上换流站在故障发生后, 交流电压、交流电流、额定输出功率几乎不受影响, 直流电压变化与陆上换流站类似。在陆上换流站交流电网单相接地故障 200 ms 期间, 直流耗能电阻共投入 1 次, 投入 67 ms, 即可实现此次交流故障穿越。



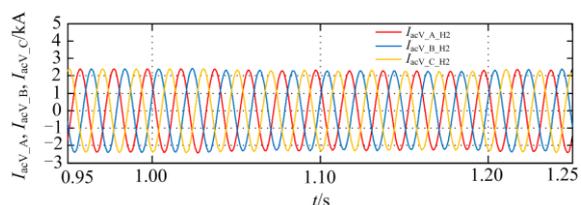
(a) 陆上换流站交流母线电压波形图



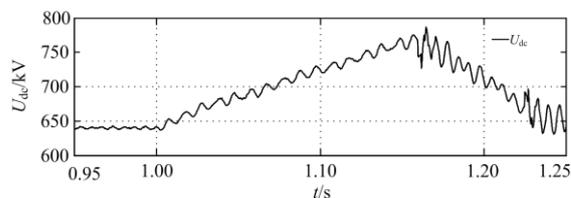
(b) 陆上换流站阀侧交流母线电流波形图



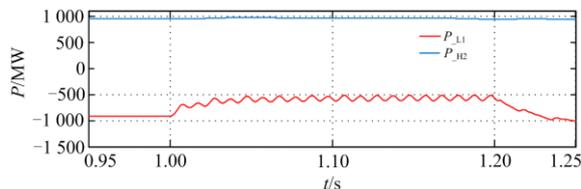
(c) 海上换流站交流母线电压波形图



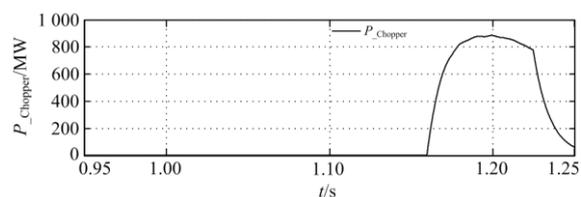
(d) 海上换流站阀侧交流母线电流波形图



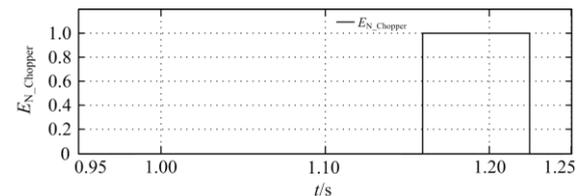
(e) 直流电压波形图



(f) 两站直流功率波形图



(g) 直流耗能装置消耗的功率波形图



(h) 直流耗能电阻的投入退出动作信息

图 5 陆上换流站网侧交流系统单相接地故障录波波形

Fig. 5 Waveform of single-phase to ground fault in AC system of land-side converter station

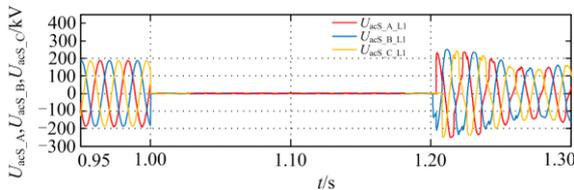
从仿真结果及分析可以得出结论: 直流耗能装置的投退策略可满足要求, 在电网侧交流系统单相接地持续故障 200 ms 期间, 系统通过投入退出直流耗能电阻一次就可以有效地抑制直流过电压, 实现电网侧交流系统故障穿越。

#### 4.2 陆上换流站网侧交流系统三相短路接地故障仿真

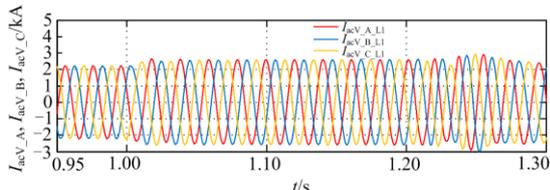
故障前, 系统正常运行, 风电场送出功率与直流输电系统的输送功率均为 1 p.u., 当  $t=1$  s 时电网侧靠近换流站处发生三相短路接地故障, 故障持续时间为 200 ms, 图 6 中分别显示了陆上换流站的交流母线电压( $U_{acS\_A/B/C\_L1}$ )、阀侧交流母线三相电流( $I_{acV\_A/B/C\_L1}$ )、海上换流站的交流母线电压( $U_{acS\_A/B/C\_H2}$ )、阀侧交流母线三相电流( $I_{acV\_A/B/C\_H2}$ )、直流电压( $U_{dc}$ )、换流器母线功率( $P_{1\_L1/H2}$ ), 直流耗能装置消耗的功率( $P_{Chopper}$ ), 直流耗能电阻的投入退出执行信息。

陆上换流站交流电网三相短路接地故障后, A、B、C 三相交流电压跌落至 0, 交流电流在故障中有

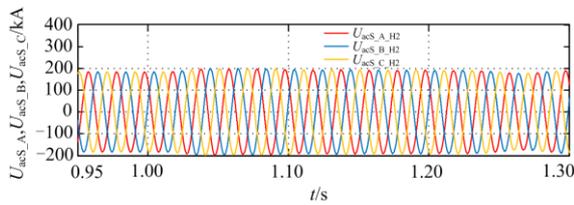
一定程度的增大，但是在交流母线过流保护定值以下，有功功率输出迅速减少到 0，直流电压上升，故障发生 60 ms 以后达到直流耗能电阻投入定值，延时 4 ms 直流耗能电阻投入，消耗盈余的功率，直流电压开始缓慢下降。由于直流耗能电阻的额定功率与风电场发出的额定功率相同，所以直流电压下降虽然很缓慢，但故障期间依然可以把直流电压限制在直流过电压保护定值以下，实现故障穿越。故障消失后，直流电压迅速下降到达直流耗能电阻退出定值，延时 6 ms 直流耗能电阻退出，系统逐渐恢复正常运行。海上换流站在故障发生后，交流电压、交流电流、额定输出功率几乎不受影响，直流电压变化与陆上换流站类似。在陆上换流站交流电网三相短路接地故障 200 ms 期间，直流耗能电阻投入一次，投入 196 ms，即可实现此次交流故障穿越。



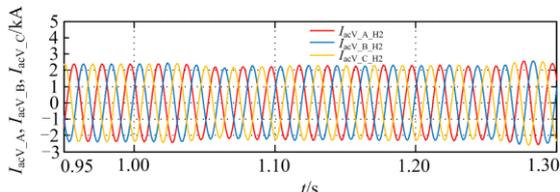
(a) 陆上换流站交流母线电压波形图



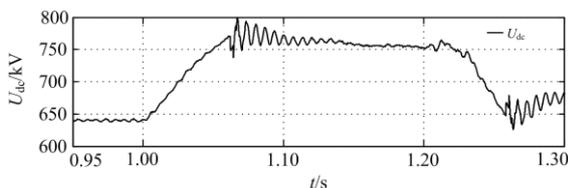
(b) 陆上换流站阀侧交流母线电流波形图



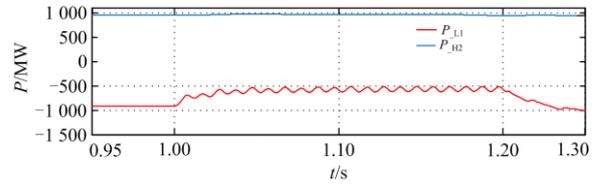
(c) 海上换流站交流母线电压波形图



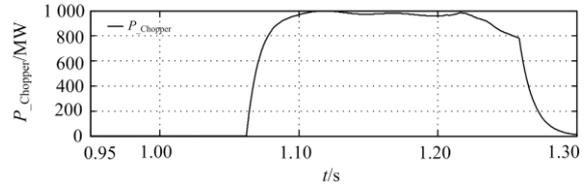
(d) 海上换流站阀侧交流母线电流波形图



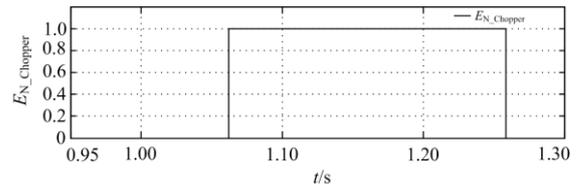
(e) 直流电压波形图



(f) 两站直流功率波形图



(g) 直流耗能装置消耗的功率波形图



(h) 直流耗能电阻的投入退出动作信息

图 6 陆上换流站网侧交流系统三相短路接地故障录波波形  
Fig. 6 Waveform of three-phase short to ground fault in AC system of land-side converter station

从本文仿真结果以及分析可以得出结论：直流耗能装置的投退策略可满足要求，在电网侧交流系统故障工况下投入 DC Chopper 来抑制过电压，即便对于最严重的三相短路接地故障也是有效的，故障消失后系统能够快速恢复到故障前状态，这也说明采用 DC Chopper 是解决此类问题的可靠方案。

### 5 总结

本文研究了电网侧交流系统故障时系统的盈余能量对直流电压的影响，提出了采用基于直流耗能装置来实现电网侧交流故障穿越的方案。提出了适合大型海上风电送出工程的直流耗能装置的拓扑结构，并对该直流耗能装置的工作模式、投退策略进行了分析研究。研究了带直流耗能装置的大型海上风电直流保护的分区和范围，将陆上换流站的直流耗能装置的保护归为直流极保护区，重点研究了各个直流保护区的保护功能配置，直流耗能装置和直流保护的配合策略，并通过 PSCAD 仿真试验进行验证。

### 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] 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): 55-70.
- 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): 55-70.
- [3] SUN Li, LIU Hongbo, BIAN Di. Influence factors of stability on offshore HVDC transmission systems[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 93(S1): 561-571.
- [4] NIKOOBAKHT A, AGHAEI J, NIKNAM T, et al. Towards robust OPF solution strategy for the future AC/DC grids: case of VSC-HVDC-connected offshore wind farms[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(6): 691-701.
- [5] 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.
- [6] SANG Yiyang, YANG Bo, SHU Hongchun, et al. Fault ride-through capability enhancement of Type-4 WECS in offshore wind farm via nonlinear adaptive control of VSC-HVDC[J]. *Processes*, 2019, 7(8).
- [7] NTARE R, ABBASY N H, YOUSSEF K H M. Low voltage ride through control capability of a large grid connected PV system combining dc chopper and current limiting techniques[J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2019, 7(1): 62-79.
- [8] 余浩, 肖彭瑶, 林勇, 等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 30-38.
- YU Hao, XIAO Pengyao, LIN Yong, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 30-38.
- [9] 潘旭东, 黄豫, 唐金锐, 等. 新能源发电发展的影响因素分析及前景展望[J]. *智慧电力*, 2019, 47(11): 41-47.
- PAN Xudong, HUANG Yu, TANG Jinrui, et al. Influencing factors and prospects for development of renewable energy power generation[J]. *Smart Power*, 2019, 47(11): 41-47.
- [10] XIE Lijun, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. Coordinate control strategy for stability operation of offshore wind farm integrated with diode-rectifier HVDC[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(3): 205-216.
- [11] NOURELDEEN O, HAMDAN I. Design of robust intelligent protection technique for large-scale grid-connected wind farm[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 169-182. DOI: 10.1186/s41601-018-0090-4.
- [12] TANG Liangyi, WU Bin, Venkata Y, et al. Novel DC/DC choppers with circuit breaker functionality for HVDC transmission lines[J]. *Electric Power Systems Research*, 2014, 116: 106-116.
- [13] JALILIAN A, NADERI S B, NEGNEVITSKY M, et al. Controllable DC-link fault current limiter augmentation with DC chopper to improve fault ride-through of DFIG[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, 11(2): 313-324.
- [14] SAJADI A, STREZOSKI L, CLARK K, et al. Transmission system protection screening for integration of offshore wind power plants[J]. *Renewable Energy*, 2018, 125(9): 225-233.
- [15] 王国英, 贾一凡, 邓娜, 等. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越方案[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(2): 146-154.
- WANG Guoying, JIA Yifan, DENG Na, et al. Grid side fault ride through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(2): 146-154.
- [16] 曹帅, 向往, 林卫星, 等. 含风电的真双极混合型 MMC-MTDC 系统故障穿越及能量耗散控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 39-48.
- CAO Shuai, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 39-48.
- [17] 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.
- [18] XU Chaoqun, ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, et al. A novel DC chopper with MOV-based modular solid-state switch and concentrated dissipation resistor for  $\pm 400$  kV/1100 MW offshore wind VSC-HVDC system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(5): 4483-4488.
- [19] RAMET M, OUTRAM J, CHENG L, et al. Application of dynamic braking systems in off-shore connected VSC

- HVDC[C] // 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017), February 14-16, 2017, Manchester, UK: 1-4.
- [20] 傅春翔, 汪天呈, 酃洪柯, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.
- FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault-ride-through ability for offshore wind farms integrated to grid via MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.
- [21] WU J, ZHANG S, XU D. Modeling and control of multi-terminal HVDC with offshore wind farm integration and DC chopper based protection strategies[C] // 13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017), February 14-16, 2017, Manchester, UK: 1013-1018.
- [22] NENTWIG C, HAUBROCK J, RENNER R H, et al. Application of DC choppers in HVDC grids[C] // 2016 IEEE International Energy Conference, April 4-8, 2016, Leuven, Belgium: 1-5.
- [23] 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.
- [24] 吕杰, 杨维稼, 黄玮, 等. 66 kV 交流接入海上换流站方案的技术经济性[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 72-79.
- LÜ Jie, YANG Weijia, HUANG Wei, et al. Techno-economic of 66 kV AC connection solution for offshore wind power[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 72-79.
- [25] 田培涛, 范雪峰, 曹森, 等. 海上风电柔性直流送出紧凑型控制保护系统设计方案[J]. 湖北电力, 2020, 44(1): 11-19.
- TIAN Peitao, FAN Xuefeng, CAO Sen, et al. Design scheme of flexible DC feed-out compact control and protection system for offshore wind power[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(1): 11-19.
- [26] 李勃, 张孝军, 徐宇新, 等. 基于本地信息的有限选择性直流微电网保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(1): 48-55.
- LI Bo, ZHANG Xiaojun, XU Yuxin, et al. Protection scheme with limited selectivity for DC microgrid based on local measurements[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 48-55.
- [27] 陈海龙, 李宝伟, 邓茂军, 等. 柔性直流输电联接变三重化保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 173-179.
- CHEN Hailong, LI Baowei, DENG Maojun, et al. Research on triple protection scheme of VSC-HVDC connected transformer[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 173-179.
- [28] 陈鹤林, 徐政, 唐庚, 等. 海上风电场 MMC-HVDC 并网系统暂态行为分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 112-118.
- CHEN Helin, XU Zheng, TANG Geng, et al. Transient behavior analysis of offshore wind farm integration system with MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 112-118.

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2021-02-17

作者简介:

付艳(1987—), 女, 硕士研究生, 工程师, 长期从事柔性直流输电控制保护研究; E-mail: fuyan1213@163.com

周晓风(1988—), 男, 工程师, 长期从事高压直流输电控制保护研究;

戴国安(1973—), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电控制保护研究。

(编辑 周金梅)