

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.006

## 基于半桥子模块的直流卸荷装置

刘欣和<sup>1</sup>, 李道洋<sup>1</sup>, 吴庆范<sup>1</sup>, 范雪峰<sup>1</sup>, 王大江<sup>2</sup>, 李强<sup>2</sup>

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**海上风电柔性直流(柔直)送出系统所接入的陆上交流电网发生故障后,风电场持续输出的盈余功率会造成直流过电压。解决盈余功率最有效的手段是采用卸荷装置对盈余功率进行泄放。文中针对功率器件直接串联的集中式直流卸荷装置投退功率冲击大、器件同时开断难以及分布式直流卸荷装置成本高的问题,提出基于半桥子模块的集中式直流卸荷装置方案,并研究所提拓扑的参数设计方法与控制策略。该方案可以克服大规模功率器件直接串联的技术困难和风险,还可以通过子模块逐步投切降低电阻电压变化率,从而降低功率泄放对直流系统的冲击以及卸荷电阻的制造难度。与分布式直流卸荷装置相比,文中方案仅采用集中式电阻而省去了子模块中的泄放支路,大幅降低设备成本。在PSCAD平台进行海上风电柔直送出系统故障穿越仿真,结果表明所提集中式直流卸荷装置拓扑及控制方案具有良好的性能。

**关键词:**海上风电;柔性直流(柔直)送出;直流卸荷装置;故障穿越;海上换流站;半桥子模块

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)05-0050-08

### 0 引言

以光伏和风电为代表的清洁能源发电是减少能源生产环节碳排放的重要技术手段之一。随着近海风能项目的逐步开发,具备开发条件的近海场址逐渐减少。相比于近海海域,深远海风能资源更加丰富,敏感性因素更少,更能充分发挥海上风电的规模效应、集群效应,因此,深远海将成为我国下一阶段风电开发的重点<sup>[1-6]</sup>。

目前海上风电送出的并网方式主要分为高压交流和高压直流两大类,其中高压直流送出均采用柔性直流(柔直)方式<sup>[7-10]</sup>。高压交流送出系统结构简单且技术成熟,是海上风电送出并网的常规方法,但是电缆的电容问题和成本问题制约了交流送出在大容量、远距离海上风电中的应用。相对于高压交流,直流送出方式下换流站建设费用高,但线路铺设费用较低,随着输电距离的增加,直流送出的经济性优势会逐渐增大,在大容量远海岸风电送出应用中更具优势<sup>[11-15]</sup>。目前,基于电压源技术的柔直送出方式已成功应用于欧洲多条商业运行大规模远海岸风电并网工程,我国江苏如东首个远海岸风电工程也是采用柔直送出方案。

对于海上风电柔直送出系统,海上换流站一般运行在孤岛方式,柔直换流站负责控制交流电压,

收稿日期:2022-03-24;修回日期:2022-06-20

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“远海风电直流友好接入交流电网关键技术研究”(5200-202118077A-0-0-00)

不直接控制风电场功率,流入换流站的功率由风电场的输出功率决定<sup>[16-21]</sup>。当陆上交流电网或换流站发生故障时,风电场仍持续输出功率,短时间内直流系统输入功率大于输出功率,这些盈余功率将造成直流电压迅速升高,危害系统安全。

解决盈余功率最有效的手段是采用卸荷装置对盈余功率进行泄放。国内外已有诸多关于卸荷装置的应用。欧洲 BorWin1、DolWin1 和 DolWin2 等已投运的海上风电场接入的柔直输电系统中,直流卸荷装置采用大量功率器件直接串联后再串联卸荷电阻的集中式方案<sup>[22]</sup>,通过对功率器件阀段的开断控制功率泄放。该方案对功率器件开关一致性要求很高<sup>[23]</sup>,且装置投退时功率冲击较大。针对该问题,有研究在直流侧增加并联滤波电容<sup>[24-25]</sup>,从而降低投退功率冲击,实现功率平滑泄放,但直流电容会增加成本,且仍须克服大规模功率器件串联时直接开断的技术难点。将卸荷电阻分散布置在子模块中的分布式直流卸荷装置<sup>[26]</sup>,可通过控制电阻投入个数实现功率泄放和盈余功率平衡,但方案成本较高。调节集中式卸荷电阻两侧电压也是实现功率泄放与盈余功率匹配,从而降低泄放过程直流电压波动的方法,但泄放电流会对回路中尚处于投入状态的子模块充电,进而导致子模块过压。文献[27]在子模块中额外设置泄放支路用于处理模块吸能问题,通过对集中式与分布式电阻的混合控制实现功率平滑泄放,但该方案下集中式电阻功率须按照额定功率配置,另外还要在子模块内部配置

系统额定功率 1/4 的泄放支路,方案成本较高。

基于以上分析,文中提出基于半桥子模块的集中式直流卸荷装置方案,采用半桥子模块串联组成的阀组替代功率器件直接串联阀段,降低直接开断对直流系统的功率冲击,克服大规模功率器件直接串联的技术难题,成本也优于分布式直流卸荷装置方案。文中给出了所提方案的拓扑结构、控制策略和参数设计方法,并通过 PSCAD 进行仿真验证。

## 1 海上风电柔直送出系统拓扑与卸荷装置需求分析

### 1.1 海上风电柔直送出系统拓扑

典型的海上风电柔直送出系统如图 1 所示。系统主要包括风电场、海上升压与汇集系统、海上换流站、直流输电线路、陆上换流站、交流电网。

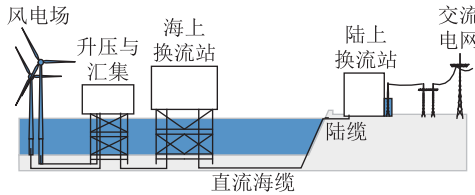


图 1 海上风电柔直送出系统

Fig.1 Offshore wind power transmission via voltage source converter-based high voltage direct current system

系统运行时,海上换流站负责提供风电场的交流电压,一般工作在定交流电压控制模式,同时需要具备抑制风电场侧振荡的能力。陆上换流站负责稳定直流电压,一般工作在定直流电压控制模式,同时配置交流侧电网无功补偿等附加控制功能。

### 1.2 卸荷装置需求分析

目前尚无海上风电柔直送出系统陆上交流电网故障穿越的相关技术标准,但从提高系统发电效率和保障系统安全稳定运行方面出发,整个海上风电系统应具备陆上交流电网故障穿越能力。陆上交流电网故障会降低陆上换流站的功率送出控制能力,为了避免风电场持续送出盈余功率而导致直流系统过电压,应通过卸荷装置对盈余功率进行泄放。GB/T 19963—2011 中陆上风电场低电压穿越曲线见图 2,曲线之上要求风电机组不脱网连续运行,曲线之下风电机组可以从电网切除。

将交流电网故障过程分解为 2 个阶段,一是电压跌落后的持续过程,二是电压恢复过程。额定工况下故障期间风电场送出的能量为:

$$Q_1 = P_s T_F \quad (1)$$

式中: $P_s$ 为风电场额定功率; $T_F$ 为故障持续时间。由图 2 可知, $T_F$ 为 2 s。

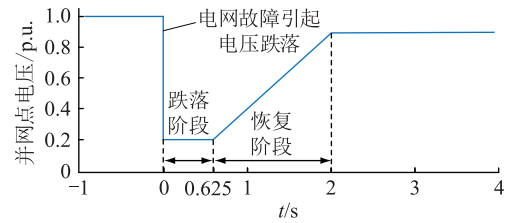


图 2 陆上风电场低电压穿越曲线

Fig.2 Low-voltage ride-through curve of onshore wind farms

理想情况下,交流电网故障期间陆上换流站的功率输出能力和交流电压幅值成正比,故障期间陆上换流站送出的能量为:

$$Q_2 = U_1 T_1 P_s + \frac{U_1 + U_2}{2} T_2 P_s \quad (2)$$

式中: $U_1$ 为第一阶段的电压标么值; $U_2$ 为第二阶段末尾的电压标么值; $T_1, T_2$ 分别为第一阶段、第二阶段的持续时间。由图 2 可知, $U_1, U_2$ 分别为 0.2 p.u., 0.9 p.u.; $T_1, T_2$ 分别为 0.625 s, 1.375 s。

盈余能量为:

$$Q_s = Q_1 - Q_2 = T_r P_s \quad (3)$$

式中: $T_r$ 为装置需要具备的最小额定功率运行投入时间。将图 2 参数代入可求得  $T_r \geq 1.12$  s。在工程中还应结合实际要求考虑一定的泄放能量设计裕量,建议  $T_r$  设置为 1.5 s。

卸荷装置包括安装在交流侧的交流卸荷装置和安装在直流侧的直流卸荷装置,如图 3 所示。

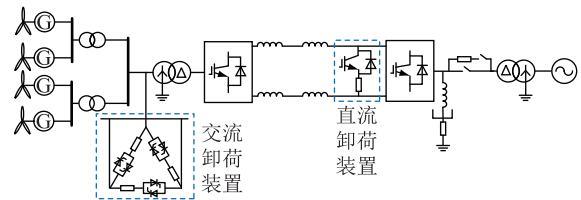


图 3 卸荷装置类型与安装位置示意

Fig.3 Schematic diagram of energy dissipation device types and installation locations

交流卸荷装置主要安装在送端交流侧,从源头对盈余功率进行泄放。直流卸荷装置安装在直流线路上,对送端注入的盈余功率进行泄放。对于海上风电系统,采用交流卸荷装置需要占用宝贵的海上平台资源,因此更适合采用安装在陆上受端柔直换流站直流侧的直流卸荷装置。以下针对直流卸荷装置进行研究与设计。

## 2 卸荷装置方案设计

### 2.1 拓扑结构

功率器件直接串联是最具有经济优势的集中

式直流卸荷拓扑方案,如图4所示。大规模功率器件串联组成开关阀段,并与卸荷电阻串联,当直流电压过高时导通开关阀段,通过电阻进行功率泄放,当直流电压恢复后断开阀段。应用在海上新风电直流送出场景时,直流电压较高,需要大量功率器件串联,存在大规模器件串联控制、驱动电源取能、功率器件均压和技术可靠性等技术难点。除此之外,开关阀段直接开断后直流电压将直接加载在电阻上,较高的电压变化率也增加了电阻制造的难度。另一方面,阶跃变化的泄放功率对直流系统造成了较大冲击,直流电压波动剧烈,突变的电流在直流平波电抗器和桥臂电抗器上也会感应出尖峰电压,影响直流系统的稳定。

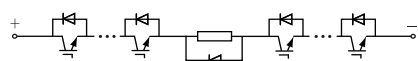


图4 功率器件直接串联拓扑

Fig.4 Topology of power device direct series

针对上述技术难点和不足,文中提出一种可行的改进措施,将功率器件串联阀段替换为半桥子模块串联组成的开关阀组。基于半桥子模块的集中式直流卸荷装置拓扑如图5所示。

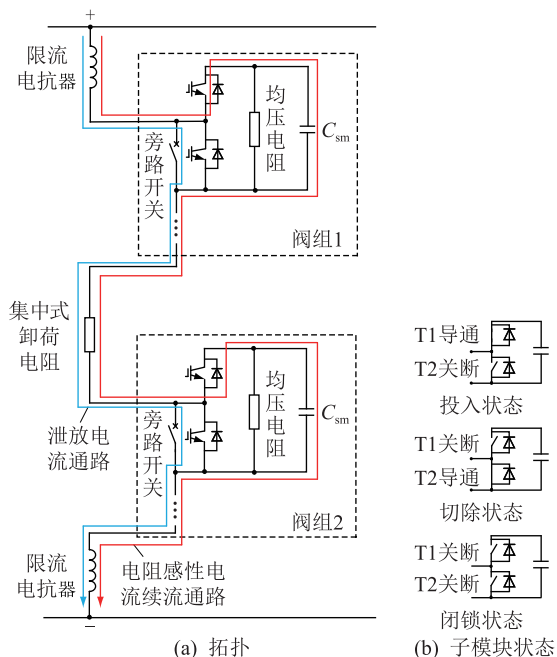


图5 基于半桥子模块的集中式直流卸荷装置拓扑

Fig.5 Topology of centralized direct current energy dissipation device based on half-bridge sub-modules

卸荷装置中的子模块为半桥结构,子模块随着上下2个开关器件的不同组合呈现3种状态:(1)上管T1导通下管T2关断,此时桥臂电流必流经模块子电容 $C_{sm}$ ,子模块输出电压为电容电压,该状态为投入状态;(2)T1关断T2导通,此时桥臂电流不

再流经 $C_{sm}$ ,子模块输出电压为0,该状态为切除状态;(3)T1和T2均关断,该状态称为闭锁状态。

正常运行时由子模块分担直流电压,需要功率泄放时将所有子模块切除。改进后的方案具有以下优势:(1)克服了大规模功率器件串联控制的技术难度和风险;(2)可实现子模块逐步投切,降低了电阻电压变化率,降低了泄放功率突变对直流系统的冲击和卸荷电阻的制造难度;(3)子模块中的电容可吸收装置关断后卸荷电阻上的感性电流,从而省去为电阻配置高压反并联续流二极管。装置泄放阶段和泄放结束关断瞬间的电流通路示意分别如图5中蓝色和红色电流通路所示。

## 2.2 控制策略

系统正常运行时,卸荷装置处于待机状态,卸荷阀中半桥子模块闭锁,卸荷阀承担全部直流电压,卸荷电阻两侧电压近似为零。在此期间装置为了维持子模块电压稳定,须对子模块执行均压操作,通过对子模块电压进行排序,动态切除电压较高的子模块,此操作类似于模块化多电平换流器在完成主动充电策略后等待解锁前的状态<sup>[28]</sup>。

陆上换流站发生交流电网故障时,盈余功率导致系统直流电压升高,超过设定值后将触发卸荷装置工作。为了避免在系统正常运行时误触发卸荷装置,触发卸荷装置的动作电压 $U_{set1}$ 应高于直流电压 $U_{dc}$ 正常波动范围。综合考虑海缆的过电压承受能力,建议 $U_{set1}$ 设置为额定直流电压的1.1~1.2倍。

卸荷装置触发后,将切除所有半桥子模块,直流电压全部施加在卸荷电阻上,对盈余功率进行泄放。此后直流电压随着功率泄放而降低,当直流电压低于退出动作值后装置将暂时停止功率泄放,电压升高后再重新投入电阻,从而将直流电压控制在一定范围内。卸荷装置投切电压设计见图6, $U_{set2}$ , $U_{set3}$ 分别为触发状态下装置再次投入的动作电压和暂时退出的动作电压。建议 $U_{set2}$ , $U_{set3}$ 分别设置为额定直流电压的1.05~1.07倍和1.01~1.03倍。

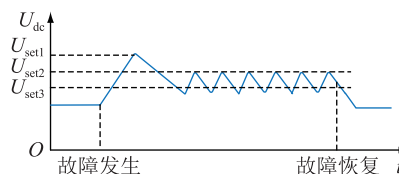


图6 卸荷装置投切电压设计

Fig.6 Switching voltage design of energy dissipation device

为了降低电阻投退时的电压变化率和功率冲击,装置投退切换过程中子模块均采用斜坡化控制策略,按照既定斜率逐个切除或投入子模块。子模

块斜坡投退过程中,电流会对尚未被切除的子模块电容充电。为了避免装置反复投退时子模块吸收能量导致电压越限,设计装置在暂时性停止卸荷时,子模块 T1 导通 T2 关断,使所有子模块进入投入状态,子模块将多余的电能释放回直流系统。一般情况下,卸荷装置总电容较小,小于直流系统等效电容的 5%,因此释放卸荷装置子模块电容吸收的能量不会对直流系统造成影响。

在故障恢复后或装置投入时间达到电阻设定的允许上限后,需要退出泄放功率状态并等待电阻冷却,完成冷却后方可再次使用。卸荷装置控制逻辑如图 7 所示。

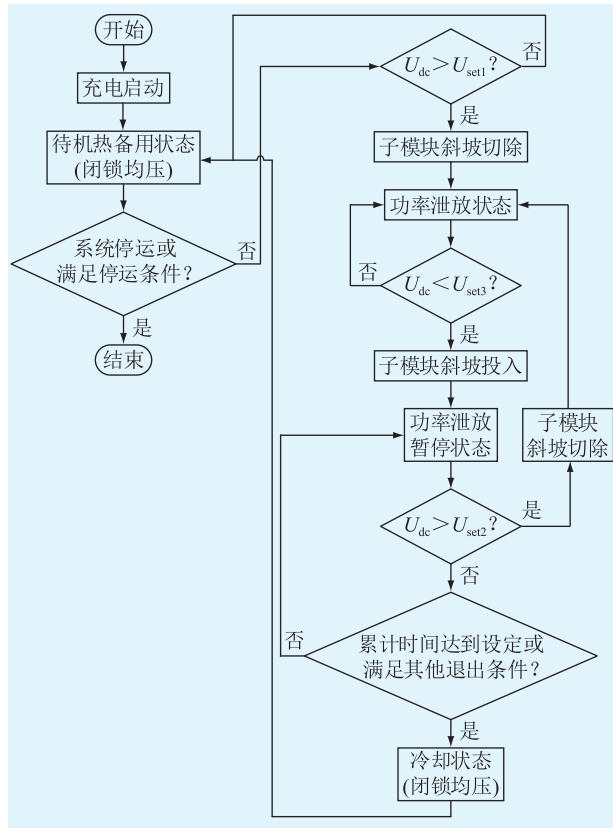


图 7 卸荷装置控制逻辑

Fig.7 Control logic of energy dissipation device

### 2.3 主要参数设计

以 1 000 MW/±400 kV 典型海上风电柔直送出场景为对象,对半桥子模块直流卸荷装置主要参数进行设计。

#### 2.3.1 集中式卸荷电阻设计

额定直流电压 800 kV 对应额定泄放功率  $P$  为 1 000 MW,计算得到集中式卸荷电阻为:

$$R = U_{av}^2 / P \quad (4)$$

式中: $U_{av}$  为卸荷电阻投运平均电压。 $U_{av}$  按照额定直流电压 800 kV 的 1.03 倍考虑,计算得到  $R$  为 679  $\Omega$ ,取 680  $\Omega$ 。

电阻能量耐受为:

$$Q_r = PT_r K \quad (5)$$

式中: $K$  为能量裕量系数,考虑一倍裕量,即取 2; $T_r$  取 1.5 s。计算得到  $Q_r$  为 3 000 MJ。

#### 2.3.2 开关器件选型与子模块个数设计

开关器件选型主要考虑电流水平。待机时装置仅需要维持自身损耗,电流小。在卸荷模式下,泄放电流需要流过子模块中的 T2,电流峰值为:

$$I_{peak} = U_{dc,peak} / R \quad (6)$$

式中: $U_{dc,peak}$  为卸荷装置投退期间直流电压峰值。

$U_{dc,peak}$  按照额定直流电压的 1.12 倍考虑,计算得到  $I_{peak}$  为 1 318 A。根据电流情况,子模块的功率器件可以选择 3 300 V/1 500 A 的焊接型功率器件或 4 500 V/2 000 A 的压接型绝缘栅双极晶体管 (insulated-gate bipolar transistor, IGBT)。以采用 4 500 V/2 000 A 的 IGBT 为例,可进一步设计模块的工作电压为 2 000 V,回路中投入的子模块个数为 400 个,考虑 8% 的冗余,子模块总个数为 432 个。

#### 2.3.3 电容设计

子模块中的电容设计主要应考虑维持电压且防止斜坡投切过程电压过充。在维持模块电压方面,待机状态下子模块均匀分担总直流电压,对电容无特殊要求。进入卸荷状态所有子模块被切除后,由电容上的储能维持模块自身的损耗。按照最长持续运行时间 1.5 s 的技术要求,卸荷装置中每个子模块需要在 1.5 s 内将电压维持在正常工作范围。记单个子模块在其额定直流电压  $u_1$  附近的稳态损耗 (包括驱动板、取能电源损耗和均压电阻损耗) 为  $P_{loss}$ ,最低正常工作电压为  $u_2$ ,最长持续运行时间为  $T$ ,则需要满足的损耗关系为:

$$\frac{C_{sm} u_1^2}{2} - \frac{C_{sm} u_2^2}{2} \geq P_{loss} T \quad (7)$$

整理后得到:

$$C_{sm} \geq \frac{2P_{loss} T}{u_1^2 - u_2^2} \quad (8)$$

在防止斜坡投切过程电压过充方面,设计子模块全切除转全投入的方法,可以在一次投退两次斜坡吸能后对电容进行一次放电。因此主要考虑单次斜坡过程的电压抬升。子模块投入个数与泄放电流关系如图 8 所示。

在一个斜坡变化过程中,泄放电流  $I(t)$  为:

$$I(t) = I_0 - \frac{I_0}{T_d} t \quad (9)$$

式中: $I_0$  为泄放电流稳态值; $T_d$  为单次斜坡时间。

在斜坡投退过程中,装置对子模块进行实时均

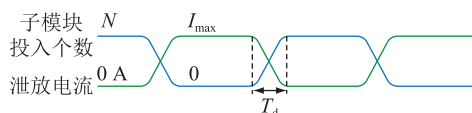


图8 子模块投入个数与泄放电流关系

Fig.8 The relationship between the number of sub-modules input and the discharge current

压,每个子模块瞬时平均投入时间  $p(t)$  为:

$$p(t) = t/T_d \quad (10)$$

单次斜坡过程中,子模块电容电压变化量  $\Delta u$  和泄放电流关系为:

$$\int_0^{T_d} I(t)p(t) dt = C_{sm}\Delta u \quad (11)$$

由式(9)一式(11)可得:

$$C_{sm} = \frac{I_0 T_d}{6\Delta u} \quad (12)$$

使用 4 500 V/2 000 A 的 IGBT,可设置子模块的  $u_1$  为 2 000 V,  $u_2$  为 1 300 V,可承受正常工作电压最高为 3 000 V。而由运行原理可知,装置一次投退会有两次斜坡吸能和一次放电,取  $\Delta u$  为 300 V,  $T_d$  为 2.5 ms,  $I_0$  为 1 400 A,代入式(12),计算得到  $C_{sm}$  为 1.94 mF,取 2 mF。

将文中方案与文献[23]中分布式卸荷装置方案进行对比,结果如表 1 所示。可见,文中方案具有一定的经济优势。

表 1 卸荷装置方案经济性对比

Table 1 Economic comparison of energy dissipation device schemes

参数	文中方案	文献[20]方案
子模块个数	432(含 32 个冗余)	432(含 32 个冗余)
子模块内器件	4 500 V/2 000 A IGBT 2 个, 电容 2 mF	4 500 V/2 000 A IGBT 2 个, 电容 1.5 mF, 二极管 1 个
子模块额定电压/kV	2	2
卸荷电阻	800 kV/680 Ω/ 1 000 MW/ 3 000 MJ 1 个	2 kV/1.6 Ω/2.5 MW/ 7.5 MJ 432 个
电阻安装位置	室外	室内(集成在子模块中)
冷却方式	自然风冷	水冷
占地	室内 11 m×26 m×13 m (耗能阀+限流电抗器), 室外 23 m×6 m×15 m (卸荷电阻)	室内 16 m×9 m×13 m (耗能阀+限流电抗器)
成本估算/万元	5 100	7 600

### 3 仿真实验

为了验证文中所提拓扑和控制策略的有效性,

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建 1 000 MW/±400 kV 海上风电柔直送出系统与半桥子模块集中式直流卸荷装置的仿真模型,直流卸荷装置安装在陆上换流阀直流侧,并在卸荷支路中串联 10 mH 电感模拟电阻寄生电感,卸荷装置的其他主要参数与控制策略如前文所述。

故障发生前,海上柔直换流站工作在定交流电压控制模式下,陆上换流站工作在定直流电压控制模式下。风电场满发功率状态下,在 1.6 s 时刻陆上交流线路发生三相短路故障,陆上换流站失去功率输出能力,风电场注入的盈余功率使直流电压快速升高。故障约 30 ms 后,在 1.63 s 时刻直流电压超过了设定值 1.12 p.u.,文中卸荷装置投入对盈余功率进行泄放,故障穿越过程仿真结果如图 9 所示。采用功率器件直接串联卸荷装置的故障穿越过程仿真结果如图 10 所示。

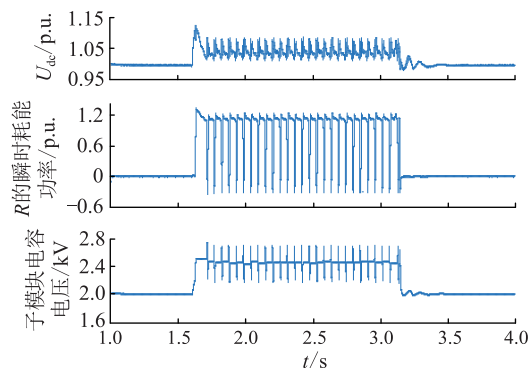


图 9 文中卸荷装置投入时的故障穿越过程仿真

Fig.9 Simulation of fault ride-through process when proposed energy dissipation device is put into operation

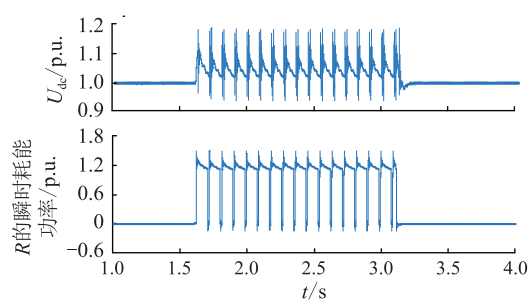


图 10 功率器件直接串联卸荷装置投入时的故障穿越过程仿真

Fig.10 Simulation of fault ride-through process when energy dissipation device based on power device direct series is put into operation

对比图 9、图 10 可知,文中卸荷装置通过子模块斜坡投切,降低了电阻投退过程对直流系统的功率冲击,直流电压波动范围由 20% 减小到 10% 以下。故障穿越期间,文中卸荷装置随着直流电压的变化斜坡投退,将直流电压控制在 1.02~1.08 p.u.,

子模块电容电压在每次斜坡过程中升高约 300 V, 与设计一致, 装置投退过程对系统的冲击也远小于功率器件直接串联方案。海上风电场在故障期间的运行情况如图 11 所示, 故障穿越期间风电场运行平稳且发出少量无功, 系统成功实现了交流电网故障穿越。

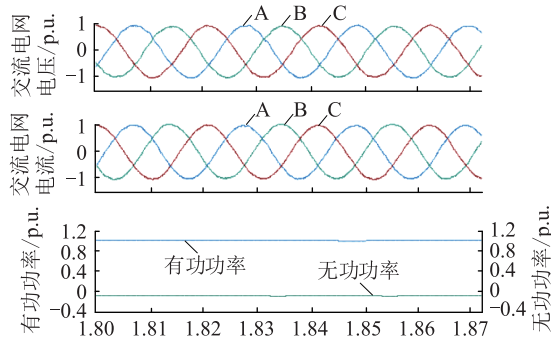


图 11 故障穿越期间海上风电场运行情况

Fig.11 Operation of offshore wind farm during fault ride-through process

风电场 50% 功率运行时, 故障穿越过程如图 12 所示。文中卸荷装置投入后直流系统的瞬时不平衡功率始终为 50%, 卸荷装置的投切动作最为频繁。仿真结果表明, 在风电场 50% 功率运行时, 直流电压波动与子模块电容电压波动均符合设计目标, 风电场故障穿越过程平顺。

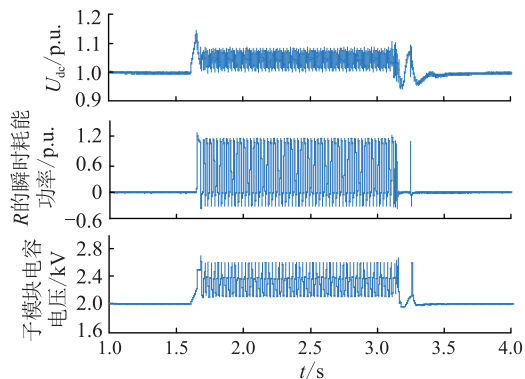


图 12 风电场 50% 功率运行时故障穿越过程仿真

Fig.12 Simulation of fault ride-through process when wind farm is running at 50% power

## 4 结语

文中提出一种基于半桥子模块的集中式直流卸荷装置, 以典型海上风电柔直送出系统为例, 对卸荷装置进行了设计和仿真, 仿真结果验证了基于半桥子模块的集中式直流卸荷装置应对海上风电柔直送出系统陆上交流电网故障的有效性。相比于功率器件直接串联的技术路线, 半桥子模块的集中式拓扑可以克服大规模功率器件串联带来的技

术难度和风险, 还可以实现子模块逐步投切, 降低电阻电压变化率, 从而降低泄放功率突变对直流系统的冲击以及卸荷电阻的制造难度, 具有较高的工程实用价值。

## 参考文献:

- [1] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.  
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [2] 黄碧斌, 张运洲, 王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 1-9.  
HUANG Bibin, ZHANG Yunzhou, WANG Caixia. New energy development and issues in China during the 14th Five-year Plan[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 1-9.
- [3] 杨光亚. 欧洲海上风电工程实践回顾及未来技术展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 23-32.  
YANG Guangya. Review on engineering practices and future technology prospects of European off shore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 23-32.
- [4] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 8-17.  
SHI Zhiyong, WANG Caixia, LI Qionghui. Key issues of China's offshore wind power development in the "14th Five-year Plan"[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 8-17.
- [5] JIA H, QIN S, WANG R, et al. Ship collision impact on the structural load of an offshore wind turbine[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 44-51.
- [6] XIE L J, YAO L Z, CHENG F, 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.
- [7] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138-145.  
WANG Xiuli, ZHAO Boyang, HUANG Minghuang, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 138-145.
- [8] 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.
- [9] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.  
SUN Ruijuan, LIANG Jun, WANG Kewen, et al. Overview of offshore wind power collection system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 105-115.

- [10] 李贤育,姚良忠,程帆,等.海上风电多类型直流送出系统拓扑经济性分析[J].全球能源互联网,2021,4(5):476-485.  
LI Xianyu, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. Economic analysis of multi-type DC system topologies for offshore wind power transmission[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5):476-485.
- [11] 王鑫,王海云,王维庆.大规模海上风电场电力输送方式研究[J].电测与仪表,2020,57(22):55-62.  
WANG Xin, WANG Haiyun, WANG Weiqing. Research on power transmission mode of large-scale offshore wind farms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(22):55-62.
- [12] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等.柔性直流输电发展现状及应用前景[J].南方电网技术,2022,16(3):1-7.  
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3):1-7.
- [13] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.  
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7):55-71.
- [14] 徐进,韦古强,金逸,等.江苏如东海上风电场并网方式及经济性分析[J].高电压技术,2017,43(1):74-81.  
XU Jin, WEI Guqiang, JIN Yi, et al. Economic analysis on integration topology of Rudong offshore wind farm in Jiangsu province[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1):74-81.
- [15] 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.  
LYU 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.
- [16] 李国庆,徐亚男,江守其,等.海上风电经柔性直联系统受端交流故障穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):111-119.  
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):111-119.
- [17] 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.
- [18] 吕敬,蔡旭,张占奎,等.海上风电场经MMC-HVDC并网的阻抗建模及稳定性分析[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3771-3781.  
LYU Jing, CAI Xu, ZHANG Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14):3771-3781.
- [19] 刘欣和,张浩,李道洋,等.柔性直流电网协调控制策略[J].南方电网技术,2017,11(9):1-7.  
LIU Xinhe, ZHANG Hao, LI Daoyang, et al. Coordinated control strategy for VSC-HVDC power grid[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9):1-7.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ABDALRAHMAN A, ISABEGOVIĆ E. DolWin1-challenges of connecting offshore wind farms[C]//2016 IEEE International Energy Conference. Leuven, Belgium. IEEE, 2016:1-10.
- [23] 庞辉,周万迪,邓卫华,等.IGBT串联均衡控制方法及其高压直流装备应用可行性研究[J].中国电机工程学报,2021,41(1):299-307,419.  
PANG Hui, ZHOU Wandu, DENG Weihua, et al. Study on control of series connected IGBT and application feasibility for high power electronics equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1):299-307, 419.
- [24] XU C Q, ZHANG X Y, YU Z Q, et al. A novel DC chopper with MOV-based modular solid-state switch and concentrated dissipation resistor for  $\pm 400$  kV/100 MW offshore wind VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5):4483-4488.
- [25] 杨悦民,许超群,刘宇畅,等.基于IGCT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 IGCT composite module directly connected to concentrated resistance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4):1510-1517.
- [26] 谢晔源,曹冬明,王宇,等.一种模块化直流耗能装置及控制方法:CN109742767A[P].2019-05-10.  
XIE Yeyuan, CAO Dongming, WANG Yu, et al. Modular DC energy consumption device and control method: CN109742767A[P]. 2019-05-10.
- [27] 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.

- [28] 阎发友, 汤广福, 孔明. 基于模块化多电平换流器的直流电网预充电控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5147-5154.

YAN Fayou, TANG Guangfu, KONG Ming. Pre-charging control strategy for MMC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5147-5154.

作者简介:



刘欣和

刘欣和(1985),男,硕士,高级工程师,从事柔性直流输电与海上风电送出系统工作(E-mail: xinheliu\_1092@163.com);

李道洋(1989),男,硕士,高级工程师,从事柔性输电与海上风电送出系统的运行与控制工作;

吴庆范(1982),男,硕士,高级工程师,从事柔性直流输电工作。

## Energy dissipation device based on half-bridge sub-modules

LIU Xinhe<sup>1</sup>, LI Daoyang<sup>1</sup>, WU Qingfan<sup>1</sup>, FAN Xuefeng<sup>1</sup>, WANG Dajiang<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>2</sup>

(1. XJ Group Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** When the onshore accurate current (AC) grid connected to the offshore wind power voltage source converter-based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission system fails, the surplus power continuously output by the wind farm causes DC overvoltage. The most effective way to solve the surplus power is to use the energy dissipation device to discharge the surplus power. A centralized DC energy dissipation device scheme based on half-bridge sub-modules is proposed to solve the problems of large switching power shock when power devices directly connected in series, difficulty in switching devices at the same time and high cost of distributed DC energy dissipation device. The parameter design method and control strategy of the proposed topology are studied. The solution can overcome the technical difficulties and risks of direct series connection of large-scale power devices, and can gradually reduce the resistance voltage change rate by switching sub-modules, thereby reducing the impact of power discharge on the DC system and the difficulty of manufacturing unloading resistors. Compared with the distributed DC energy dissipation device, the proposed scheme only uses the centralized resistance and omits the bleeder branch in the sub-modules, which greatly reduces the equipment cost. The fault ride-through simulation of the offshore wind power VSC-HVDC transmission system is carried out on the PSCAD platform. And the results show that the proposed centralized DC energy dissipation device topology and control scheme have good performance.

**Keywords:** offshore wind power; voltage source converter-based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission; direct current (DC) energy dissipation device; fault ride-through; offshore converter station; half-bridge sub-module

(编辑 吴楠)