DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.203 **中图分类号**：TM722 **文献标志码**：A

基于新型子模块的直流耗能装置及复合投切控制策略

彭 穗[1]，李 峰[1]，李作红[1]，潘柯言[2](中国电源学会学生会员)，
任子俊[2](中国电源学会学生会员)，曲小慧[2](中国电源学会会员)
(1.广东电网公司电网规划研究中心，广州 510000；2.东南大学电气工程学院，南京 210096)

摘要：海上风电柔性直流送出系统受端发生短路缺相故障时会产生盈余功率，从而导致直流母线电压升高，增设直流耗能装置是解决该问题的有效方法之一。为减小直流耗能装置的体积和成本，提出1种基于新型子模块拓扑的直流耗能装置及相应的复合投切控制策略。该控制策略通过复合阶段投切和循环投切2种控制策略，有效利用各自的优点，能够大幅减小盈余功率阶跃对系统造成的功率冲击，简化子模块拓扑结构，同时解决子模块运行不平衡和散热不均匀的问题。同时，给出直流耗能装置中各电气元件的参数设计方法，并搭建了直流耗能装置的仿真模型。仿真结果验证了所提新型直流耗能装置拓扑结构及循环和阶段复合投切控制策略的有效性与可行性。

关键词：海上风电；柔性直流输电；直流耗能装置；新型子模块；复合投切控制

DC Energy-consuming Device and Its Hybrid Switching Control Strategy Based on Novel Submodule

PENG Sui[1], LI Feng[1], LI Zuohong[1], PAN Keyan[2], *Student Member*, *CPSS*,
REN Zijun[2], *Student Member*, *CPSS*, QU Xiaohui[2], *Member*, *CPSS*
(1. Grid Planning and Research Center, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510000, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The short-circuit and phase failure of a DC flexible offshore wind power transmission system at the receiving end will generate excess power, leading to an incremental voltage of DC bus. One of the effective methods to solve this issue is adding DC energy-consuming devices. To reduce the volume and cost of DC energy-consuming devices, a DC energy-consuming device based on a novel submodule and the corresponding hybrid switching control strategy are proposed. The proposed control strategy combines the advantages of step switching control and cyclic switching control schemes, which can effectively reduce the power impact on the system caused by the step change in excess power and simplify the topology of the new submodule. Meanwhile, the problems of operation imbalance and unequal heat dissipation among submodules can be solved. A design method for the parameters of electrical components in the DC energy-consuming device is also given, and a simulation model of the proposed DC energy-consuming device is built. Simulation results verify the effectiveness and feasibility of the topology of the proposed novel DC energy-consuming device and its hybrid switching control strategy.

Keywords: Offshore wind power; flexible DC power transmission; DC energy-consuming device; novel submodule; hybrid switching control

收稿日期：2023-09-12；**修回日期**：2023-11-21；**录用日期**：2024-01-01；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：南方电网有限公司科技资助项目(037700KK52220013)；国家自然科学基金资助项目(52077038)
This work is supported by the Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. under the grant 037700KK52220013; National Natural Science Foundation of China under the grant 52077038

由于柔性直流输电技术能够独立调节有功功率和无功功率，实现向无源网络送电，且采用全控

器件和 PWM 技术，控制上灵活多变，因此，目前大规模、分布式、远距离海上风电的输送主要利用柔性直流输电技术[1-3]。

当受端换流站发生短路缺相故障时，系统向电网传输的功率减少，而发电系统不能快速做出反应，从而导致系统功率产生不平衡，多余的功率在直流母线上累积，从而造成直流电压升高。过高的母线电压会威胁系统稳定性[4-5]，严重时可造成系统大面积瘫痪。在直流母线侧增设直流耗能装置是解决上述问题的有效方案之一[6]。当直流母线电压升高时，启动直流耗能装置消耗盈余功率使直流母线电压降低，进而维护系统整体的稳定性。目前常见的 3 种直流耗能装置拓扑：集中式、分布式和混合式。集中式采用耗能阀子模块 SM (submodule) 串式开关与集中式耗散电阻串联的结构，通过改变投切子模块数目调节耗散电阻上的电压来改变耗散功率，工作结构简单，但需通过控制策略来维持子模块电容能量平衡[7-8]；分布式直流耗能装置将集中电阻拆分并安装在子模块中，通过控制投入到系统内的电阻数来控制消耗功率的多少，具有较好的电气特性，但各个子模块需要单独的冷却装置，成本高[9-11]；混合式直流耗能装置将上述 2 种结构进行整合，使用模块化设计来控制母线电压，同时采用集中式电阻消耗大部分盈余功率，子模块中的耗能电阻消耗剩余的功率，其综合了集中式和分布式的优点，具有更好的电气特性和拓展性。

混合型直流耗能装置子模块的典型拓扑结构主要以电力电子开关与电容的连接方式进行分类，不同子模块拓扑相对应的控制策略也有所差异。当子模块拓扑中的电容与电力电子开关串联时，副开关可采用半控型器件晶闸管代替 IGBT 控制电容放电，能够节约成本。文献[12-13]均采用串联拓扑结构，文献[12]结合了集中式耗能电阻散热和分布式模块软开关控制的优势，解决了拓扑中功率器件异步通断造成的子模块电压持续攀升的可控放电难题，但所采用的控制方式较为复杂；文献[13]为了实现故障穿越过程中子模块电容电压的准确控制，采用阶段投切策略来降低故障穿越期间的直流电压尖峰，能够解决子模块电容电压均衡问题，但没有考虑子模块耗能电阻的热管理。当子模块电容与电力电子开关并联时，主、副电力电子开关均使用 IGBT 全控型器件，控制相对简单。文献[14-15]采用并联所示的拓扑结构，在控制策略上，固定每次循环周期子模块的轮换个数并根据功率指令的不同设定子模块投入时间，大幅减少了逻辑判断和程序运行时间[14]，同时优化了子模块的热管理[15]，但在子模块拓扑结构上仍有改进的空间。

综上所述，目前混合式直流耗能装置依然存在结构和控制逻辑复杂、建设成本高的问题。本文在已有研究基础上提出 1 种基于新型子模块拓扑的混合型直流耗能装置及相应的复合投切控制策略。该控制策略通过复合阶段投切和循环投切 2 种控制策略，有效利用各自的优点，能够大幅减小盈余功率阶跃对系统造成的功率冲击，简化子模块拓扑结构，同时解决子模块运行不平衡和散热不均匀的问题。最后，搭建仿真平台验证了所提新型直流耗能装置的有效性及控制策略的可行性。

1 基于新型子模块的直流耗能装置基本原理

1.1 基于新型子模块的直流耗能装置拓扑结构

本文以海上风电送出系统为例对直流耗能装置进行结构分析，其结构如图 1 所示。直流耗能装置装设在直流母线两端，由集中耗能电阻 R_{m} 与 N 个耗能阀 SM 组成。图中：U_{dc} 为直流母线电压；U_{v} 为 SM 承受电压；U_{m} 为集中耗能电阻上的电压；I_{m} 为集中耗能电阻和 SM 上的电流。

由图 1 可见，新型耗能阀子模块拓扑结构包含主开关 S_1、辅助开关 S_2、直流电容 C、子模块耗能电阻 R 和快速恢复二极管 D_1。新型子模块拓扑与传统电容与电力电子开关串联拓扑相比，减少了与电容并联的电阻及子模块耗能电阻并联的二极管。传统串联拓扑中电容两端并联的电阻主要作用是防止电容充电时电压变化率过大所产生的浪涌电流。图 1 中新型拓扑子模块所构成的直流耗能装置

在控制上采用了子模块阶段投切的控制策略，能够有效避免产生过大的电压变化率，因此所提的新型子模块拓扑中可将电容 C 两端并联电阻省去。另外，在所提新型子模块直流耗能装置拓扑结构和复合控制策略的基础上，省去了子模块电阻 R 两端并联的二极管，亦不影响任意工况下直流耗能装置有效运行。下面将具体分析新型子模块的每个工作状态。

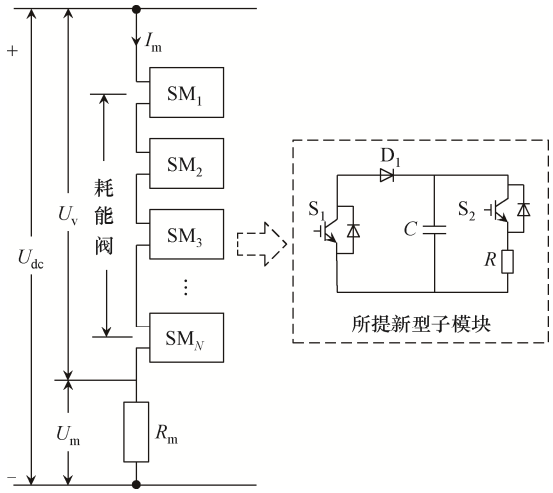
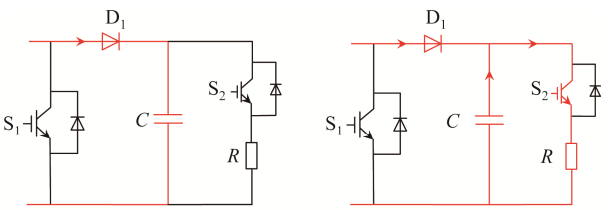


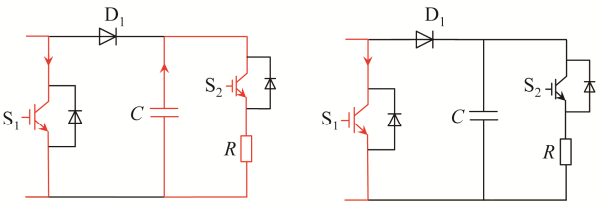
图 1　基于新型子模块的直流耗能装置

Fig. 1 DC energy-consuming device based on novel submodule

根据主、副开关的通断状态组合，该子模块共有 4 种工作状态。正常运行时，S_1、S_2 均断开，直流母线电压 U_{dc} 由所有的子模块电容支撑，每个子模块的额定工作电压 $U_{CN}=\dfrac{U_{dc}}{N}$，当故障发生，盈余功率产生，子模块电容开始充电，如图 2(a)所示；当子模块电容电压达到设定的动作电压时，S_2 根据设定的滞环控制进行通断切换，将电容电压降低，稳定在额定电压附近，如图 2(b)所示；当 S_1 接通时，子模块处于切出状态，若此时电容电压仍高于动作电压，则 S_2 接通电容放电，如图 2(c)所示；在 S_1 接通时，电容电压在动作电压范围内，则 S_2 保持断开状态，如图 2(d)所示。



(a) 子模块投入充电状态　　(b) 子模块投入放电状态



(c) 子模块切出放电状态　　(d) 子模块切出状态

图 2　子模块不同运行状态

Fig. 2 Different operating states of submodule

1.2　运行原理分析

对于双极性输电线路，整个耗能装置采用对称结构，而对于单极运行的直流线路相当于半个桥臂运行，为了简化分析过程，仅分析半桥臂的耗能装置结构，根据实际运行情况进行拓展即可。

首先定义耗能系数 h 为盈余功率 P_e 与直流系统输送的额定功率 P_N 之比 $(0\leqslant h\leqslant 1)$。当故障发生后，需要切出原本均压的子模块电容，将切出子模块两端电压转移到集中耗能电阻上，消耗盈余功率。若所有子模块切出，直流电压 U_{dc} 全部加在集中耗能电阻 R_m 上，耗能装置消耗的功率为 P_N，可表示为

$$P_N=\frac{U_{dc}^2}{R_m} \tag{1}$$

由此可以求得集中耗能电阻的参数，根据直流耗能装置收到的功率指令不同，实际吸收的盈余功率为

$$P_e=U_{dc}I_m=U_{dc}\frac{U_m}{R_m}=U_{dc}\frac{N_{out}U_{CN}}{R_m}=hP_N \tag{2}$$

式中，N_{out} 为切出的子模块的数量。

联立式(1)和式(2)可以求出需要切出的子模块数量为

$$N_{out}=\frac{U_{dc}h}{U_{CN}}=Nh \tag{3}$$

通过上述分析推断出，可以通过控制投入、切出子模块的数量来改变集中耗能电阻上的电压，进而实现对耗能功率的控制。

2 基于新型子模块的直流耗能装置复合控制策略

故障发生产生系统盈余功率后，直流耗能装置投入运行。为降低系统盈余功率阶跃变化对系统造成的功率冲击，本文在直流耗能装置子模块投入和切出时采用阶段投切的控制策略；同时，为解决子模块投入后运行不平衡和散热不均匀的问题，在耗能装置子模块阶段投切控制策略的基础上增加了循环投切的控制策略。所提出的复合投切控制策略，有效地利用了阶段投切和循环投切各自的优点，有利于提高直流耗能装置的性能。

2.1 子模块阶段投切策略

直流耗能装置子模块在投切过程中会引起集中耗能电阻上电压的突变，为了减小功率冲击和维护系统稳定性，本文采用了阶段投切的控制策略。故障发生后，经计算得出每个循环需要切出的子模块数量 N_{out}，将 N_{out} 均分为 k 组，每组 a 个子模块，在接收到动作命令后每间隔 ΔT 切出 1 组子模块。每切出 1 组子模块，集中电阻上的电压就会上升 $\dfrac{N_{\text{out}}U_{\text{CN}}}{k}$，直至 k 组全部切出，集中耗能电阻的两端电压 $U_{\text{m}}=N_{\text{out}}U_{\text{CN}}$，子模块阶梯切出过程中，集中耗能电阻两端电压随时间(时间以动作信号到来为基准)变化的示意图如图 3 所示。

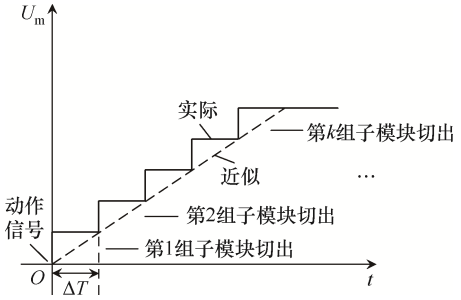


图 3 采用阶段投切的耗能电阻电压

Fig. 3 Voltage of energy dissipation resistor under step switching control

由于实际中子模块数量较多，阶段投切过程中耗能电阻端电压阶跃变化幅度大，因此为了简化分析过程，将 U_{m} 的变化过程近似看作 1 条直线，则 U_{m} 随时间变化的表达式为

$$U_{\text{m}}(t)=\frac{N_{\text{out}}U_{\text{CN}}}{k\Delta T}t \tag{4}$$

式中：t 为动作信号到来后所经过的时间 $(0\leqslant t\leqslant k\Delta T)$。

则集中电阻上的电流 I_{m} 可表示为

$$I_{\text{m}}(t)=\frac{U_{\text{m}}}{R_{\text{m}}}=\frac{N_{\text{out}}U_{\text{CN}}}{k\Delta TR_{\text{m}}}t \tag{5}$$

可以看出，在集中耗能电阻投入过程中，电压和电流随时间变化呈现出一次线性函数的关系。根据式(5)可以得出集中耗能电阻在投入过程中电流变化率为

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{k\Delta T}\cdot\frac{N_{\text{out}}U_{\text{CN}}}{R_{\text{m}}} \tag{6}$$

同理可得，在故障消除后，集中耗能电阻切出过程中电流变化率为

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{k\Delta T}\cdot\frac{N_{\text{out}}U_{\text{CN}}}{R_{\text{m}}} \tag{7}$$

由式(6)和式(7)可知，延长阶段投切控制的时长可以减小集中耗能电阻上的电流变化率，减小系统盈余功率阶跃变化对系统造成功率冲击的影响。

2.2 子模块循环投切控制策略

由于当子模块处于投入状态时为了维持电容电压平衡，副开关处于不停通断循环过程中，会在子模块耗能电阻 R 上产生较大的损耗，如果采用固定投切策略会导致部分子模块投入时间远大于其他子模块。同样，该部分子模块的耗能电阻也会产生更多功耗，产热量大，对于整个系统的平衡及散热装置的设立均会产生影响。因此，需要采用一定的控制策略平衡各子模块的工作状态，在本文中采用 1 种循环投切策略，每隔固定时间 T_{e} 切换子模块运行状态：将耗能阀里的子模块编号 1~N，在某次循环时子模块 i 至子模块 j 处于投入(切出)状态，则下次投入(切出)的子模块为 $i+1$ 至 $j+1$ $(1\leqslant i,j\leqslant N)$；若 $j=N$，则下次投切时投切的子模块编号为 1、$i+1$~N，以此类推，1 个工作周期 $T_{\text{N}}=NT_{\text{e}}$。假定 1 个耗能阀中包括 10 个子模块，其在 d=0.2 时的具体运行状态如图 4 所示，其中灰

色表示子模块投入，黑色表示子模块切出。

由图 4 可见，每个子模块投入工作时间基本保持相等，使得整个系统更加平衡，避免了部分子模块投入时间过长，导致部分子模块运行损耗大，以及各个子模块之间形成较大的电压不平衡。同时，在 1 个周期内，每个子模块平均投切 1 次，平衡了不同子模块的主开关损耗。

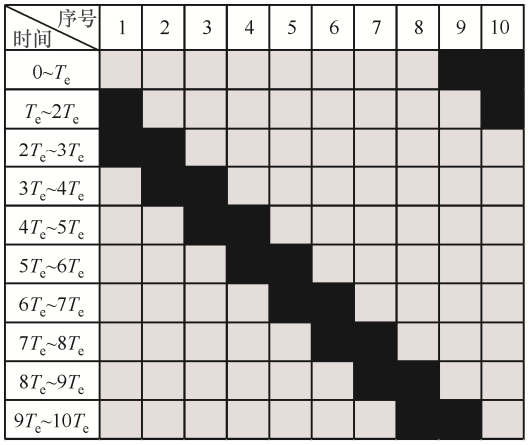


图 4　*d*=0.2 时子模块投切状态

Fig. 4 Switching status of submodule (d=0.2)

为了使子模块维持电压平衡，子模块内还应采用滞环控制的方法控制副开关的通断，使得子模块电容电压维持在设定值附近。子模块电压控制策略流程如图 5 所示，实时监控每个子模块的电容电压 U_C，并与电容电压最大阈值 U_t 和最小阈值 U_l 作比较，根据比较结果生成 S_2 的开关命令。

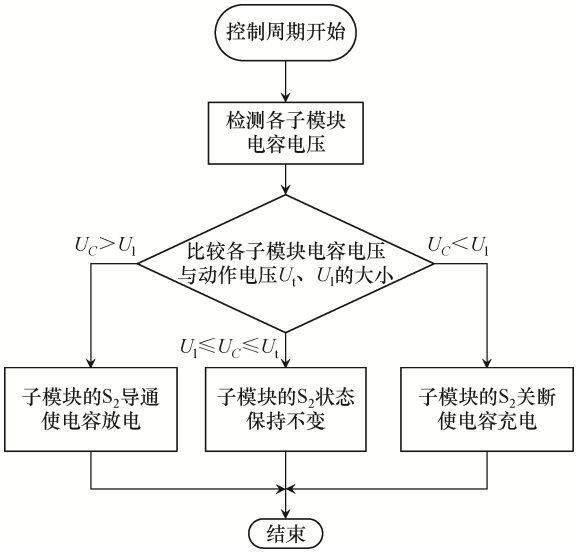


图 5　电容电压控制策略流程

Fig. 5 Flow chart of control strategy for capacitor voltage

2.3 直流耗能装置的复合控制策略

当系统发生故障产生盈余功率时，直流耗能装置动作，根据系统盈余功率大小计算子模块投切数量。采用阶段投切的控制策略分组分时投入或切出耗能阀子模块，直到子模块投切数量满足需求，降低了较大的瞬时盈余功率冲击对系统造成的影响。同时，考虑耗能阀子模块投入期间运行不平衡问题，在子模块阶段投切过程中通过采用循环投切的控制策略，周期性地将备用状态的子模块循环替换投入一定时间的子模块，从而实现耗能阀子模块电压和散热方面的均衡。2 种控制策略有机结合，实现直流耗能装置的优化运行。

3　电路参数设计

3.1 集中耗能电阻

集中耗能电阻需要满足在系统发生最严重事故时将所有的盈余功率消耗掉，此时 $h=1$，即 $P_e=P_N$，由式(1)可得，此时所有子模块切出，直流电压直接加在集中耗能电阻上，可得集中电阻的设计应满足

$$R_m=\frac{U_{dc}^2}{P_N} \tag{8}$$

3.2 子模块耗能电阻

为了保障子模块耗能支路实现稳定电容电压的功能，需要电容电压能够在 U_l~U_t 内波动，所以必须满足 S_2 导通时，R 上的电压最小值 $U_{R_{min}}$ 应低于 U_l，根据电路分压原理可得

$$U_{R_{min}}=U_{dc}\frac{R}{RN_{on}+R_m}\leqslant U_l \tag{9}$$

式中，N_{on} 为子模块投入的数量。

当电容电压达到上限设定值后关断时会有最大的冲击电流，如果电阻值过小则装置中将产生很大的冲击电流，因此子模块耗能电阻的设计应尽量大，即 N_{on}=0，综上所述，子模块耗能电阻应为

$$R=\frac{R_mU_l}{U_{dc}} \tag{10}$$

3.3 子模块电容

子模块电压的稳定是由直流电容的充放电过

程实现的，如果电容较小，则由于充电时间过短会导致副开关开关次数过多，进而产生更多的开关损耗；但是如果电容设置过高不仅会造成电容体积增大、成本提高，同时充放电过程过长也可能造成子模块在投入过程中不能进行较完整的充放电过程，稳压功能实现不理想。因此子模块直流电容的设计应该综合考虑成本、辅助开关损耗及直流电容稳压效果等因素。

当子模块处于投入状态时，电容电压小于 U_{l} 时开始充电，当电容处于充电状态时，流过电容的电流与流过集中耗能电阻的电流 I_{m} 相等，近似可以认为恒定，因此电容充电的时间 t_{c} 为

$$t_{\mathrm{c}}=\frac{(U_{\mathrm{t}}-U_{\mathrm{l}})C}{I_{\mathrm{m}}}=\frac{(U_{\mathrm{t}}-U_{\mathrm{l}})C}{hI_{\mathrm{N}}} \tag{11}$$

当电容电压大于 U_{t} 时，副开关闭合，电容经子模块耗能电阻 R 放电，此时的等效电路如图 6 所示。图中：U_C 为子模块电容电压；I_C 为子模块电容电流；I_R 为子模块耗能电阻上的电流。

集中电阻上流过的电流为

$$I_{\mathrm{m}}(t)=\frac{U_{\mathrm{dc}}-U_C(t)}{R_{\mathrm{m}}}=I_R(t)+I_C(t)=\frac{U_C(t)}{N_{\mathrm{on}}R}+\frac{C}{N_{\mathrm{on}}}\cdot\frac{\mathrm{d}U_C(t)}{\mathrm{d}t} \tag{12}$$

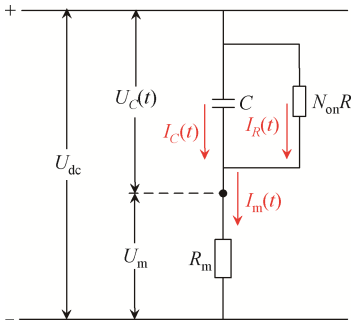


图 6 电容放电过程中等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit during capacitor discharging process

解微分方程可得 $U_C(t)$，进而可以求解出子模块稳压支路电容电压从 U_{t} 降至 U_{l} 所需要的放电时间 t_{d}。

根据前文对于循环投切控制原理的介绍，设副开关与主开关的开关频率之比为 α，则子模块投入期间副开关应动作 α 次，即 1 个工作周期时间 T_{N} 为电容充放电时间的 α 倍，再根据 t_{c}、t_{d} 的表达式可得电容 C 与 h 的关系式为

$$C(h)=\frac{(1-h)T_{\mathrm{N}}}{\alpha}\Bigg/\left\{\frac{U_{\mathrm{t}}-U_{\mathrm{l}}}{hI_{\mathrm{N}}}-\frac{R_{\mathrm{m}}R}{N_{\mathrm{on}}R+R_{\mathrm{m}}}\cdot\ln\left[\left(U_{\mathrm{l}}-U_{\mathrm{dc}}\frac{R}{R_{\mathrm{m}}+N_{\mathrm{on}}R}\right)\Bigg/\left(U_{\mathrm{t}}-U_{\mathrm{dc}}\frac{R}{R_{\mathrm{m}}+N_{\mathrm{on}}R}\right)\right]\right\} \tag{13}$$

为保证电容能满足所有的故障情况，则需要找到上述函数的极值，令 $\frac{\mathrm{d}C(h)}{\mathrm{d}h}=0$，得到电容最大时对应的耗能系数，再代入式(13)中，即可得电容大小。一般情况下，子模块电容电压的波动范围不应超过±10%，因此在本文中也采用相应的标准，即 U_{t}=1.1U_{CN}、U_{l}=0.9U_{CN}。

4 仿真验证

本文基于 Simulink 搭建仿真模型，以验证本文所提直流耗能装置子模块及其控制策略的有效性。仿真选择建立较小系统，采用小容量系统可以减少子模块数量、简化各个参数，大限度增加仿真速度，有利于原理性与可行性的研究。仿真中所构建电力系统的直流母线电压为 20 kV，根据 IGBT 功率器件选型确定子模块电容额定工作电压为 2 kV，由此可以计算出直流耗能装置子模块数量 N=10。另外根据式(8)、式(10)和式(13)，可得直流耗能装置的主要参数见表 1。

表 1 直流耗能装置主要参数

Tab. 1 Main parameters of DC energy-consuming device

参数	数值
子模块数量 N	10
子模块电容额定工作电压 U_{CN}/kV	2
集中耗能电阻 R_{m}/Ω	50
子模块耗能电阻 R/Ω	4.75
子模块电容 C/mF	3
工作周期 T_{N}/s	0.1

本次仿真在 0.1 s 时模拟故障发生，将负载电阻由 100 Ω 增加至 500 Ω，此时负载电流减少至额定电流的 20%，等效为传递到受端交流侧功率减少，耗能系数 h=0.8，根据上述运行设计原理计算切出子模块的数量，直流耗能装置开始工作，直至 0.6 s 时故障排除，恢复正常状态。1.0 s 内的系统直流母线电压和集中耗能电阻上的电压如图 7 所示。

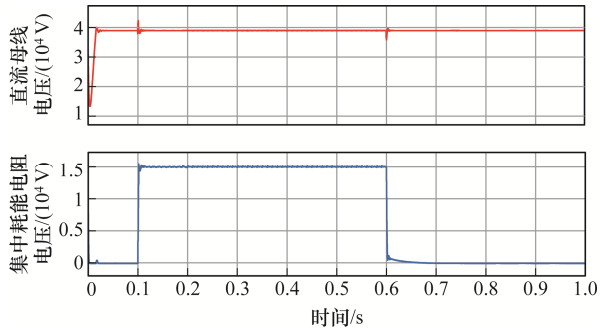


图 7　直流母线电压和集中耗能电阻电压波形

Fig. 7 Voltage waveforms of DC bus and concentrated energy dissipation resistor

由图 7 可见，直流电压 U_{dc} 在 0.1、0.6 s 处产生了较大波动，是因为这 2 处分别为直流耗能装置启动和关闭的时间点，由于系统整体结构发生变化，导致电压源模块产生一定波动，但也迅速恢复平衡。在故障期间，切出部分的子模块电压转移到集中耗能电阻上，该电压稳定在 16 kV 附近，消耗盈余功率。根据电流的变化产生控制子模块主开关的 PWM 波形，本系统中耗能装置由 10 个子模块组成，根据控制策略仅需将产生的 PWM 波依次递增 T_N/10 的延迟，再分别用于对各子模块的控制，即可实现循环投切控制。子模块主开关电压电流、直流电容电压和子模块耗能电阻电流如图 8 所示。

图 9 为阶段投切控制结果，由于本次需要切出子模块数量为 8 个，在故障开始和结束时将 8 个子模块分为 4 组，每隔 0.5 ms 投切 1 组，以达到降低集中耗能电阻上电压变化率的作用。

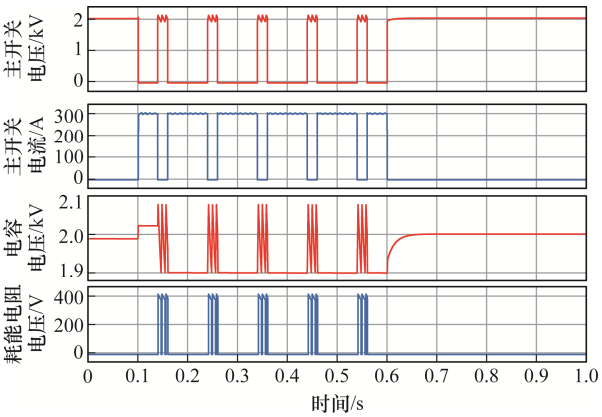
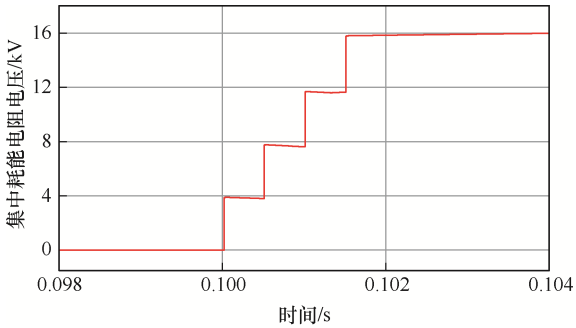
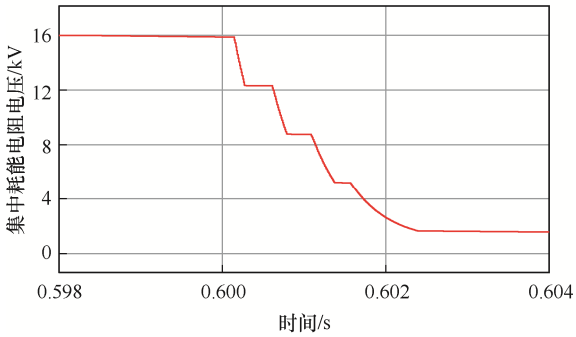


图 8　子模块电流、电压波形

Fig. 8 Current and voltage waveforms of submodule



(a) 阶段上升



(b) 阶段下降

图 9　阶段投切控制下集中耗能电阻电压波形

Fig. 9 Voltage waveforms of concentrated energy dissipation resistor under step switching control

5　结语

为了降低海上风电柔性直流送出系统中陆端直流耗能装置体积、质量与建设成本，本文提出了 1 种新型混合型直流耗能装置子模块拓扑结构及对应的循环、阶段复合投切控制策略。该策略能够解决子模块电容均压、各子模块耗能电阻散

热不均和盈余功率阶跃变化对系统造成功率冲击等问题，并通过 Simulink 仿真模拟验证了所提直流耗能装置子模块拓扑结构及控制策略的可行性与有效性。

参考文献：

[1] 饶宏, 周月宾, 陈煜坤, 等. 高压大容量柔性直流换流阀关键设计和发展趋势[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 1-14.
Rao Hong, Zhou Yuebin, Chen Yukun, et al. Key design and development trend of high-voltage large-capacity VSC valves for HVDC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 1-14. (in Chinese)

[2] Tavakoli S D, Prieto-Araujo E, Gomis-Bellmunt O. AC fault ride through in MMC-based HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2775-2786.

[3] 侯玉超, 郭祺, 涂春鸣, 等. 面向输出性能优化的高低频混合型模块化多电平变换器及其调控策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4467-4479.
Hou Yuchao, Guo Qi, Tu Chunming. A high and low frequency hybrid modular multilevel converter for output performance optimization and its control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4467-4479. (in Chinese)

[4] 刘伯文, 王毅, 张振, 等. 子模块故障下桥臂复用型MMC特性分析及容错控制策略[J/OL]. 电源学报, 1-12. (2025-09-16)[2026-01-19]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250915.1845.008.
Liu Bowen, Wang Yi, Zhang Zhen, et al. Analysis of characteristics and fault-tolerant control strategy of the arm-multiplexing MMC under sub-module fault [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12. (2025-09-16)[2026-01-19]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250915.1845.008. (in Chinese)

[5] 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. (in Chinese)

[6] 付艳, 周晓风, 戴国安, 等. 海上风电直流耗能装置和保护配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 178-186.
Fu Yan, Zhou Xiaofeng, Dai Guoan, et al. Research on coordination strategy for an offshore wind power DC chopper device and protection [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 178-186. (in Chinese)

[7] Cao Shuai, Xiang Wang, Lu Xiaojun, et al. Energy dissipation of MMC-HVDC based onshore wind power integration system with FB-DBS and DCCB [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(2): 222-230.

[8] 常非, 王一, 王一振, 等. 基于模块化多电平变换器的高压直流输电故障特性与控制保护[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2428-2434.
Chang Fei, Wang Yi, Wang Yizhen, et al. Faults feature analysis and control protection strategies of modular multilevel converter based high voltage direct current [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2428-2434. (in Chinese)

[9] 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.

[10] 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. (in Chinese)

[11] 杨仁炘, 王霄鹤, 陈晴, 等. 机组协同−分布卸荷的风电场−柔直并网系统故障穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 103-111.
Yang Renxin, Wang Xiaohe, Chen Qing, et al. Fault ride-through method of flexible HVDC transmission system for wind farm integration based on coordination of wind turbines and distributed braking resistors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 103-111. (in Chinese)

[12] 谢晔源, 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. (in Chinese)

[13] 姚宏洋, 谢晔源, 方太勋, 等. 子模块可控放电集中式直流耗能装置及其控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2896-2904.
Yao Hongyang, Xie Yeyuan, Fang Taixun, et al. Concentrated DC energy braking device with discharge controllable sub-module topology and its control [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2896-2904. (in Chinese)

[14] 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. (in Chinese)

[15] 张静, 高冲, 许彬, 等. 海上风电直流并网工程用新型柔性直流耗能装置电气设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4081-4090.
Zhang Jing, Gao Chong, Xu Bin, et al. Research on electrical design of novel flexible DC energy consuming device for offshore wind power DC grid connection project [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4081-4090. (in Chinese)



彭穗

作者简介：

彭穗(1992—)，男，博士，工程师。研究方向：海上风电规划，柔性直流输电技术。E-mail：pengsui@gd.csg.cn。

李峰(1980—)，男，博士，高级工程师。研究方向：海上风电输电技术。E-mail：lifeng@gd.csg.cn。

李作红(1983—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源输电规划，先进输电技术。E-mail：lizuohong@gd.csg.cn。

潘柯言(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：柔性直流输电。E-mail：220232947@seu.edu.cn。

任子俊(1996—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：柔性直流输电。E-mail：renzijun@seu.edu.cn。

曲小慧(1981—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：直流输配电技术，无线电能传输技术。E-mail：xhqu@seu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)