DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.218 中图分类号：TM722 文献标志码：A

海上风电直流送出用混合型直流耗能装置及调制策略

李 峰[1]，彭 穗[1]，王彦峰[1]，余 浩[1]，任子俊[2]，
曲小慧[2](中国电源学会会员)
(1.广东电网有限责任公司电网规划研究中心，广州 510180；2.东南大学电气工程学院，
南京 210096)

摘要：海上风力发电柔性直流送出系统中，陆端大幅卸荷或出现交流系统故障时将产生系统盈余功率，致使直流传输电压快速上升。直流耗能装置能够快速耗散盈余功率，是保证系统故障平稳穿越及可靠性运行的关键技术方案。为了解决系统盈余功率较大时耗能阀调制电压出现负值的问题，提出了一种基于半桥和全桥子模块的混合式直流耗能装置及其调制策略，利用全桥子模块负压输出的能力能够扩大系统盈余功率匹配范围，加快直流传输母线电压的恢复速度。通过理论分析验证了所提耗能装置及调制策略的有效性，在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台上搭建了海上风力发电柔性直流送出系统的仿真模型，仿真验证了不同系统盈余功率工况下所提直流耗能装置及调制策略的可行性。

关键词：海上风电；柔性直流输电系统；盈余功率；直流耗能装置；调制策略

Hybrid DC Energy-consuming Device for Offshore Wind Power DC Transmission System and Its Modulation Strategy

LI Feng[1], PENG Sui[1], WANG Yanfeng[1], YU Hao[1], REN Zijun[2], QU Xiaohui[2], *Member*, *CPSS*
(1. Grid Planning and Research Center, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510180, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In a flexible DC transmission system for offshore wind power generation, surplus power will be generated in the system when the land end is greatly unloaded or the AC system fails, resulting in a rapid increase in the DC transmission voltage. A DC energy-consuming device can quickly dissipate the surplus power, which is a key technical solution to ensuring smooth fault ride-through and reliable operation of the system. However, the modulation voltage of the energy-consuming valve will become negative when the surplus power is large. To solve this problem, a hybrid DC energy-consuming device based on half-bridge and full-bridge sub-modules and its modulation strategy are proposed in this paper. By using the negative-voltage output capability of the full-bridge sub-module, the matching range of the surplus power can be expanded, and the recovery speed of DC voltage can be speeded up. The effectiveness of the proposed energy-consuming device and its modulation strategy is verified through theoretical analysis. Besides, a simulation model of the offshore wind power flexible DC transmission system was built on a PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation platform, and the feasibility of the proposed DC energy-consuming device and corresponding modulation strategy was verified under conditions of different values of surplus power.

Keywords: Offshore wind power; flexible DC transmission system; surplus power; DC energy-consuming device; modulation strategy

收稿日期：2023-04-03；**修回日期**：2023-05-24；**录用日期**：2023-07-11；**网络首发日期**：2023-07-28
基金项目：南方电网有限公司科技项目(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 037700KK 52220013; National Natural Science Foundation of China under the grant 52077038

随着能源危机和环境污染等问题的加重，寻找绿色环保、长期可持续的新型能源来代替传统的化石能源成为这个时代的一大课题。为促进传统能源结构的转型，近年来我国连续颁布相关政策大力支持海上风电的开发利用[1-2]。考虑到生态保护和可用地开发等限制因素，海上风电逐渐呈现由近海、小规模到远海、大规模的发展趋势[3]。远海风力发电不仅要对平台设计进行研究，还需要重点关注电能向陆上用户端的传输方式，基于模块化多电平换流器 MMC(modular multilevel converter)的柔性直流输电技术因其能够适应长距离输电，无换相失败，可同时独立调节有功和无功功率，以及适合构成多端直流系统[4]，因而在海上风电送出系统中得到了广泛应用[5-8]。

在海上风力发电柔性直流送出系统中，当陆上受电端大幅卸荷或陆端交流电网发生接地故障时，陆端换流站交流侧电压跌落，有功功率传输大幅降低。由于海上风机调节周期较长，系统无法直接进入低功率运行状态，产生的系统盈余功率在直流侧积累，使得直流母线电压升高[9]。如果不及时采取相应措施，将会导致柔性直流输电系统无法正常运行，进而有可能引发风电机组大面积脱网，甚至造成整个直流输电系统故障，由此使得柔性直流输电系统可利用率大幅降低[10]。为实现海上风电柔性直流输电系统在受电端故障下的平稳穿越，该系统需要具备灵活可控的盈余功率消纳能力，因此耗能装置必不可少。工程常用的耗能装置有交流耗能装置和直流耗能装置 2 种类型，对于海上风电柔性直流并网系统来说，海上平台存在建设困难、不易维护、建设成本高等限制，因此一般采用能够安装在陆端的直流耗能装置方案。考虑到场地布置等因素，海上风电柔性直流送出系统的直流耗能装置通常接在陆端直流正、负极之间[11]。直流耗能装置通常通过调制耗能阀的开关动作来控制耗能功率，从而有效平衡系统功率并维持直流母线电压稳定。

直流耗能装置主要包含耗能阀和耗能电阻两部分，其中耗能阀由大量功率器件构成。根据耗能电阻与功率器件的配置方式，可将直流耗能装置分为集中式、分布式与混合式 3 种主要形式[12-14]。集中式直流耗能装置的耗能阀由大量功率器件直接串联构成，并与集中式电阻串接，通过 PWM 控制功率器件开通和关断，当功率器件开通时集中式耗能电阻消耗系统盈余功率。集中式直流耗能装置的技术方案虽成本较低、结构简单，但需解决大量串联的功率器件统一开关和电压均衡及在投切过程中功率冲击较大的问题。分布式直流耗能装置的耗能电阻分布于各子模块中，通过对子模块的投切状态进行调制实现耗能功率平滑连续的调节，从而能够有效减小系统功率波动，但采用分布式电阻需要给每个子模块配置单独的冷却系统，将会提高设备体积与成本。混合式直流耗能装置兼顾了集中式与分布式的优点，其耗能阀由子模块构成且同时配置集中式耗能电阻，耗能阀子模块通常为半桥子模块。

在系统盈余功率较大区间，基于半桥子模块的混合式直流耗能装置会出现子模块调制电压为负的情况，导致直流耗能装置高耗能功率区间不适用。为此，本文提出一种耗能阀基于半桥和全桥子模块构成的混合式直流耗能装置及其调制策略，通过加入可负压输出的全桥子模块，能够提高系统消纳盈余功率的能力，避免出现半桥子模块调制电压为负的情况，在系统盈余功率较大的情况下，有效调节耗能功率与盈余功率匹配，同时保障直流电压的稳定。通过理论和仿真分析验证所提装置及其调制策略的有效性。

1　海上风电柔直送出系统结构和参数

1.1　海上风电柔直送出系统拓扑结构

本文所研究的海上风电柔性直流送出系统典型拓扑如图 1 所示。系统主要包含了海上风力发电场、海上联结变压器、海上换流站、长距离直流输电线、直流耗能装置、陆上换流站、陆上联结变压器、陆上交流电网等。

海上风电柔性直流送出系统的输电过程为：

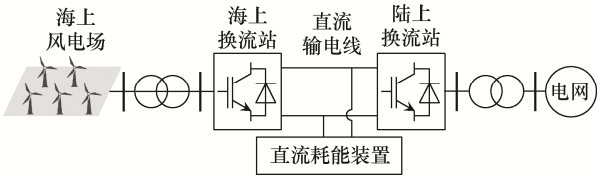


图 1 海上风电柔性直流送出系统典型拓扑

Fig. 1 Typical topology of offshore wind power flexible DC transmission system

风机侧发出的690 V低电压首先经内部升压单元升至 66 kV 并进行输出，然后通过海上联结变压器升压至 345 kV。多个风电场群的能量在海上换流站进行交流汇集，经过模块化多电平换流站整流之后再采用高压直流的形式送出，其中海上换流站直流出口侧电压为直流 640 kV。

为了满足海上风力发电柔性直流送出的要求，换流站的电能变换过程通过 MMC 实现。MMC 具有波形质量高、制造难度低、故障处理能力强等优点，目前已成为高压柔性直流输电换流器的主要拓扑结构，适用于远海风电柔性直流送出系统。本文所研究的海上风电柔性输电送出系统的海陆两端换流站均采用 MMC 拓扑结构。

1.2 海上风电柔直送出系统参数设计

本文所研究的海上风电柔性直流送出系统的主要设计参数见表 1。

表 1 海上风电柔性直流送出系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of offshore wind power flexible DC transmission system

参数	海端数值	陆端数值
换流站额定容量 S_N/MW	1 500	1 500
直流输电电压 U_{dc}/kV	640	640
交流额定频率 f_0/Hz	50	50
有功功率 P/MW	1 000	1 000
无功功率 Q/Mvar	200	329

根据表 1 给定的海上风电柔性直流送出系统的主要参数对系统各部件进行参数设计，其中包括联结变压器参数计算、换流站内 MMC 参数设计等。

1.2.1 交流电压设计

根据表 1 可知本文所研究的海上风电直流送出系统的 U_{dc} 为 640 kV，交流电压 U_N 的表达式为

$$U_N=\lambda\frac{U_{dc}}{2} \tag{1}$$

其中，λ 的取值主要受海上联结变压器漏抗的影响，本文取 λ=1.078，由此可得

$$U_N=1.078\times\frac{640\text{ kV}}{2}=345\text{ kV} \tag{2}$$

根据海上交流系统电压以及陆上电网电压要求，海上和陆上换流站所连接的变压器变比分别采用 66 kV/345 kV 和 525 kV/345 kV。另外，为满足海上换流站的站内用电，其联结变压器还需要设计第三绕组提供 66 kV 的交流电压。

1.2.2 换流站 MMC 子模块数量设计

直流传输母线电压和开关器件耐压是换流站 MMC 桥臂子模块数量设计的主要参考依据，需要满足不等式

$$NU_{CN}>U_{dc} \tag{3}$$

式中：N 为 MMC 单个桥臂串联子模块的数量；U_{CN} 为子模块电容电压额定值，也可看作开关器件的电压定额。如果采用的功率器件额定电压为 2 105 V，由此可以计算出 MMC 单个桥臂子模块数量至少为 304 个。根据系统需求，本文设计半桥子模块数量占比为 60%，全桥子模块数量占比为 40%。

1.2.3 子模块电容参数设计

MMC 电容器是柔性直流送出系统的重要组件，为柔性直流输电系统提供直流电压支撑，决定直流侧的电压波动范围。作为核心部件之一，电容参数是决定海上换流站体积重量、建设成本的重要因素，因此电容参数设计的合理性将直接影响系统的经济性与运行的安全稳定性。不计及 MMC 换流器损耗，根据其交直流输入、输出电压关系可得

$$m=\frac{\sqrt{2}U_{aN}}{U_{dc}/2}=\frac{\sqrt{2}\times(345\text{ kV}/\sqrt{3})}{640\text{ kV}/2}\approx0.88 \tag{4}$$

式中：m 为 MMC 换流器的额定电压调制比；U_{aN} 为换流器单相交流相电压幅值。

电容电压的波动可用波动率 ε 来表示，即有

$$\varepsilon=\frac{1}{3}\frac{S_v}{mN\omega C_0U_{CN}^2}\left[1-\left(\frac{m\cos\varphi}{2}\right)^2\right]^{3/2} \tag{5}$$

式中：ω 为电网角频率；C_0 为子模块电容；S_v 和 φ

分别为系统视在功率和功率因数角，二者表示为

$$S_{\mathrm{v}}=\sqrt{P_{\mathrm{v}}^2+Q_{\mathrm{v}}^2}\approx 1\,020\ \mathrm{MV\cdot A} \tag{6}$$

$$\cos\varphi=\frac{P_{\mathrm{v}}}{S_{\mathrm{v}}}\approx 0.981 \tag{7}$$

为保证 MMC 换流器正常稳定运行，一般设计 $\varepsilon\leqslant 10\%$，从而可以得到子模块电容 C_0 为

$$C_0=\frac{1}{3}\frac{S_{\mathrm{v}}}{mN\omega\varepsilon U_{\mathrm{CN}}^2}\left[1-\left(\frac{m\cos\varphi}{2}\right)^2\right]^{3/2}\approx 6.7\ \mathrm{mF} \tag{8}$$

1.2.4　桥臂电抗器参数设计

作为 MMC 换流器的重要组成部分，桥臂电抗器能够起到抑制输出电流谐波、限制暂态和故障电流的作用，其电感的选取对于 MMC 的运行特性至关重要。当电感和电容串联电路在串联谐振角频率下，电感的电抗等于电容的容抗。因此，可以得到相单元串联谐振角频率 ω_{res} 为

$$\omega_{\mathrm{res}}=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{N}{L_0C_0}} \tag{9}$$

为满足经济性和安全性的需求，选择 ω_{res} 在电网额定角频率 ω_0 附近较为合理，从而可以得到桥臂电抗 L_0，即

$$L_0=\frac{N}{4\omega_0^2C_0}=\frac{304}{4\times 314^2\times 0.008}\ \mathrm{H}\approx 96.4\ \mathrm{mH} \tag{10}$$

根据上述计算，海上风电柔性直流送出系统相关组件的主要参数见表 2。

表 2　MMC 换流站主要参数

Tab. 2 Main parameters of MMC converter station

参数	海端数值	陆端数值
网侧线电压(有效值)/kV	66	525
阀侧线电压(有效值)/kV	345	345
桥臂子模块数量	304	304
子模块电容/mF	8	8
桥臂电感/mH	100	100

2　混合式直流耗能装置工作原理

2.1　直流耗能装置拓扑结构

本文所提混合式直流耗能装置拓扑结构如图 2 所示。直流耗能装置主要由耗能阀和耗能电阻 2 个部分构成，其中耗能阀由若干个半桥子模块和若干个全桥子模块混合构成，耗能电阻集中布置。

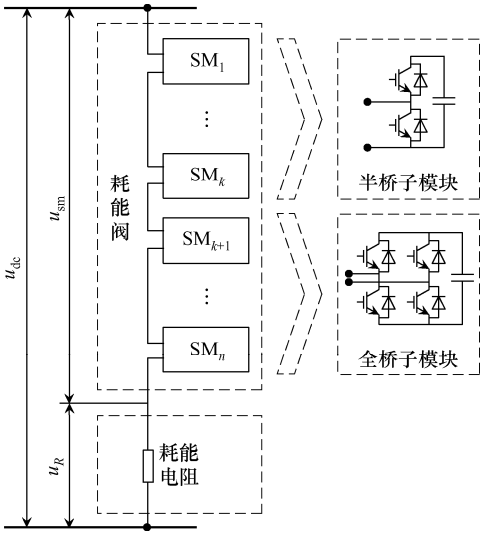


图 2　混合式直流耗能装置拓扑结构

Fig. 2 Topology of hybrid DC energy-consuming device

本文所提出的直流耗能装置是在传统基于半桥子模块混合式直流耗能装置拓扑结构上的改进拓扑。利用若干个全桥子模块替换了耗能阀中一定数量的半桥子模块，半桥子模块与全桥子模块相互串联构成耗能阀。该种直流耗能装置充分利用了全桥子模块负压输出的能力，在系统盈余功率过大的工况下能够更大限度地调整耗能电阻端电压，提升耗能电阻耗散功率，从而实现耗能功率与较大盈余功率的匹配。全桥子模块与半桥子模块的数量与系统盈余功率大小有关，当耗能阀中全桥子模块全部投入时，耗能电阻的耗能功率能够与系统最大盈余功率匹配。首先根据直流电压等级计算出全桥和半桥子模块的总数，再根据系统最大盈余功率计算出全桥子模块的数量，可表示为

$$\begin{cases} N_{\mathrm{sm}}=N_{\mathrm{FB}}+N_{\mathrm{HB}}=\dfrac{U_{\mathrm{dcN}}}{U_{\mathrm{CN}}} \\ N_{\mathrm{FB}}=\dfrac{\sqrt{P_{\mathrm{extra,max}}/R}-U_{\mathrm{dcN}}}{U_{\mathrm{CN}}} \end{cases} \tag{11}$$

式中：N_{sm} 为耗能阀子模块总数量；N_{FB} 为全桥子模块总数量；N_{HB} 为半桥子模块总数量；U_{dcN} 为直

流传输线额定电压；U_{CN}为子模块电容额定电压；$P_{\mathrm{extra,max}}$为系统所能承受的最大盈余功率，也即直流耗能装置的最大耗能功率；R为耗能电阻。

耗能电阻R阻值的选择与系统盈余功率大小以及子模块电容额定电压有关。耗能电阻最小耗能功率可以表示为

$$P_{R,\min}=\frac{U_{\mathrm{CN}}^2}{R} \tag{12}$$

式中，$P_{R,\min}$为耗能电阻的最小耗能功率。耗能电阻的最小耗能功率需要满足系统需求，同理，其最大耗能功率也要能够满足系统功率的匹配。另外，耗能电阻的大小还会影响耗能功率的阶跃变化幅度，当耗能电阻两端分压从U_{CN}变化到$2U_{\mathrm{CN}}$时，耗能功率的阶跃变化量不能过大，避免直流电压发生震荡，同时过大的功率变化容易对系统产生一定的冲击。

2.2 系统功率平衡原理

当海上风电柔性直流送出系统出现盈余功率时，直流传输母线电压随之升高。为了平衡系统盈余功率，维持直流传输母线电压的稳定，需要接入直流耗能装置。通过调节耗能阀中子模块投入、投出数量改变耗能阀分压，使施加在耗能电阻两端的电压发生变化，从而控制耗能装置的耗散功率与系统盈余功率相平衡。

当系统盈余功率为0时，直流耗能装置不工作，耗能电阻分压为0，耗能功率为0。当系统盈余功率较大、耗能阀需要负压输出时，耗能阀中半桥子模块全部投出，并根据具体功率大小计算出需要进行负压输出的全桥子模块数量。此时施加在耗能电阻两端的电压大于直流传输母线额定电压。在直流电压稳定不变的情况下，系统电压平衡关系为

$$\begin{cases}u_{\mathrm{dc}}=u_{\mathrm{sm}}+u_R=U_{\mathrm{dcN}}\\ u_{\mathrm{sm}}=n_{\mathrm{FB}}(-U_{\mathrm{CN}})<0\\ u_R=u_{\mathrm{dc}}+\left|u_{\mathrm{sm}}\right|>u_{\mathrm{dc}}\end{cases} \tag{13}$$

式中：u_{dc}为直流传输母线电压；u_{sm}为耗能阀控制分压；u_R为耗能电阻分压；n_{FB}为全桥子模块投入数量。则系统功率平衡关系为

$$P_{\mathrm{extra}}=P_R=\frac{(u_{\mathrm{dc}}-u_{\mathrm{sm}})^2}{R}=\frac{(u_{\mathrm{dc}}+n_{\mathrm{FB}}U_{\mathrm{CN}})^2}{R} \tag{14}$$

式中：P_{extra}为系统盈余功率；P_R为耗能功率。

当系统盈余功率较小时，耗能阀控制分压为正值，通过相应调制策略控制耗能阀中子模块投入、投出状态，调节耗能功率大小来匹配系统盈余功率，从而使得系统功率平衡，保持直流传输母线电压稳定。系统电压平衡关系为

$$u_{\mathrm{dc}}=u_{\mathrm{sm}}+u_R=U_{\mathrm{dcN}} \tag{15}$$

系统功率平衡关系为

$$P_{\mathrm{extra}}=P_R=\frac{u_R^2}{R}=\frac{(u_{\mathrm{dc}}-u_{\mathrm{sm}})^2}{R} \tag{16}$$

2.3 直流耗能装置调制策略

当陆端出现大幅卸荷或单相交流短路等故障时，系统将产生一定的盈余功率。根据盈余功率的大小，调整耗能阀中半桥/全桥子模块投入、投出数量来调节耗能阀分压u_{sm}大小，使得集中耗能电阻两端电压u_R发生相应的变化，从而动态控制耗能功率的大小以匹配系统盈余功率，进一步维持了直流传输母线电压u_{dc}的稳定。

耗能阀调制电压u_{sm}包含直流分量和交流分量，可表示为

$$u_{\mathrm{sm}}=U_{\mathrm{smdc}}+\sqrt{2}U_{\mathrm{smac}}\sin(\omega t) \tag{17}$$

式中，U_{smdc}、U_{smac}分别为耗能阀调制电压u_{sm}的直流分量、交流分量。

U_{smdc}的调制系数可以用k表示，则有

$$U_{\mathrm{smdc}}=kU_{\mathrm{dcN}} \tag{18}$$

根据耗能阀中半桥/全桥子模块数量关系，可以得到k的取值范围为：$-0.4<k<1.0$。

根据叠加定理，将耗能支路分解为直流和交流2个部分等效电路[15]，如图3所示。

图3中：I_{dc}为耗能支路直流电流分量平均值；I_{ac}为耗能支路的交流电流分量有效值。I_{dc}和I_{ac}的计算公式为

$$\begin{cases}I_{\mathrm{dc}}=\dfrac{(1-k)U_{\mathrm{dcN}}}{R}\\ I_{\mathrm{ac}}=-\dfrac{U_{\mathrm{smac}}}{R}\end{cases} \tag{19}$$

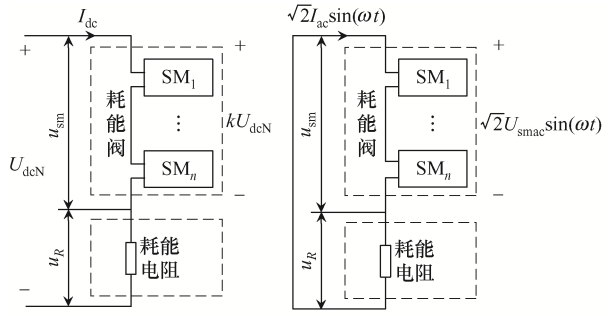


图 3　混合式直流耗能装置的交、直流等效电路

Fig. 3 AC/DC equivalent circuit of hybrid DC energy-consuming device

根据一个周期内子模块电容功率平衡原理，可以得到

$$P_{sm}=U_{smdc}I_{dc}+U_{smac}I_{ac}=0 \tag{20}$$

由式(18)~式(20)可得

$$U_{smac}=\sqrt{k(1-k)}U_{dcN} \tag{21}$$

为了在规定周期 t_s 内保证直流电压稳定，直流耗能装置耗能功率需要与系统盈余功率保持平衡，即在限制时间内耗能功率做功等于系统盈余功率做功，表示为

$$\int_0^{t_s}P_R\mathrm{d}t=\int_0^{t_s}P_{extra}\mathrm{d}t \tag{22}$$

可得

$$I_{dc}^2R+I_{ac}^2R=hP_{extra,max}=h\frac{(1.4U_{dcN})^2}{R} \tag{23}$$

式中：h 为系统盈余功率系数，0<h<0.7。此时对应的 k=1.4。

由式(19)、(21)、(23)可得

$$k=1-1.4h \tag{24}$$

由式(17)、(18)、(21)、(24)可得直流耗能装置耗能阀调制电压 u_{sm} 与系统盈余功率系数 h 的关系为

$$u_{sm}=\left[k+\sqrt{2k(1-k)}\sin(\omega t)\right]U_{dcN}=\left[1-1.4h+\sqrt{2.8h(1-1.4h)}\sin(\omega t)\right]U_{dcN} \tag{25}$$

当 h 从小到大变化，即系统盈余功率从 0 至 $P_{extra,max}$ 变化时，直流耗能装置耗能阀调制电压 u_{sm} 的波形如图 4 所示，其中基准电压为 U_{dcN}。

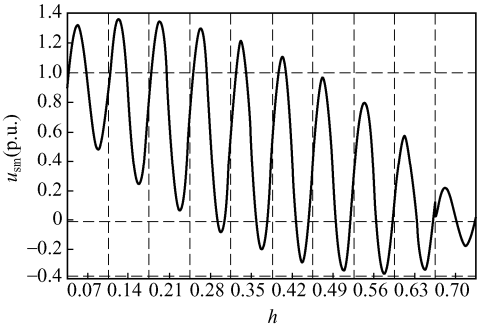


图 4　耗能阀调制电压波形

Fig. 4 Modulation voltage waveform of energy-consuming valve

由图 4 可以看出，在整个盈余功率变化区间，考虑了交流分量之后，耗能阀调制电压呈正弦规律变化。当盈余功率系数 h=0.28 时，调制电压出现负值的情况；在 h=0.56 时，调制电压出现负极大值，该负极大值的绝对值小于 0.4。本文在耗能阀中串联比例为 40%的可负压输出的全桥子模块时，有 $-0.4<k<1.0$，因此当调制电压为负极大值时，通过投入全部全桥子模块并控制其输出为负压模式便可以满足耗能阀调制电压的需求。

3　仿真分析

根据海上风电柔性直流送出系统的原理性分析以及相关参数设计，为了更好地验证所提拓扑和调制策略的有效性，本文基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建了相关模型进行仿真分析。由于实际系统中耗能阀子模块可达数百个，系统模型过于庞大，需要算力较强的计算机，考虑实际情况，在不影响验证结果的前提下，本文在仿真验证时对模型进行了一定的简化。相关仿真参数设置见表 3。

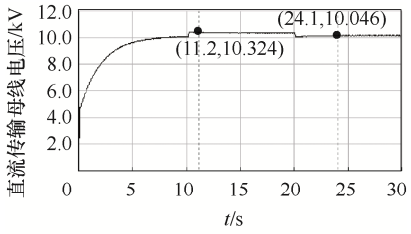
仿真中设置海上风电柔性直流送出系统额定有功功率为 1 000 kW。当系统盈余功率为 50 kW 时，系统工作状态如图 5 所示。图 5(a)为直流传输母线电压变化曲线，图 5(b)为直流耗能装置耗能阀分压变化曲线。仿真第 10 s 时系统出现 50 kW 的盈余功率；10~20 s 没有采取任何措施，此时直流

传输母线电压上升至 10.32 kV；第 20 s 时直流耗能装置开始工作，直流母线电压很快恢复至额定值 10 kV。在直流耗能装置运行期间耗能阀分压为 9 kV。

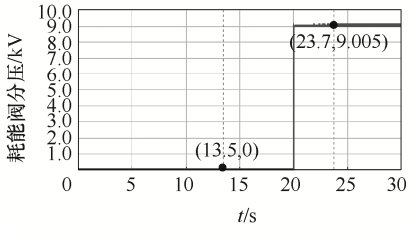
表 3 仿真系统参数

Tab. 3 Parameters of simulation system

参数	数值
直流传输母线电压/kV	10
系统额定有功功率/kW	1 000
半桥子模块数量/个	6
全桥子模块数量/个	4
子模块电容/mF	8
桥臂电感/mH	100
耗能电阻/kΩ	0.4



(a) 直流传输母线电压变化曲线

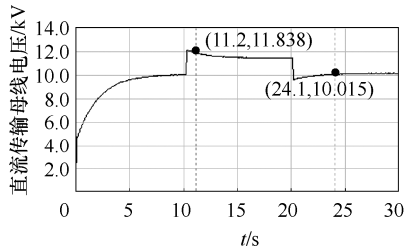


(b) 耗能阀分压变化曲线

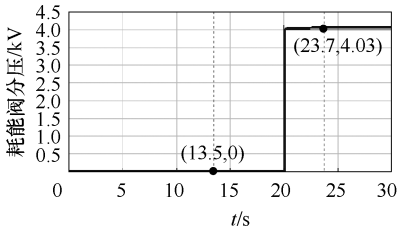
图 5 盈余功率为 50 kW 时系统工作状态

Fig. 5 Working state of system when surplus power is 50 kW

当系统盈余功率为 250 kW 时，系统工作状态如图 6 所示，图 6(a)为直流传输母线电压变化曲线，图 6(b)为直流耗能装置耗能阀分压变化曲线。仿真



(a) 直流传输母线电压变化曲线



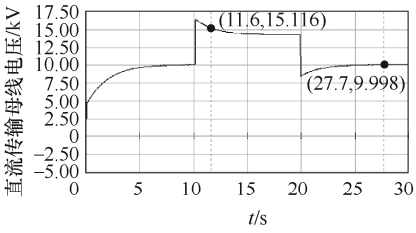
(b) 耗能阀分压变化曲线

图 6 盈余功率为 250 kW 时系统工作状态

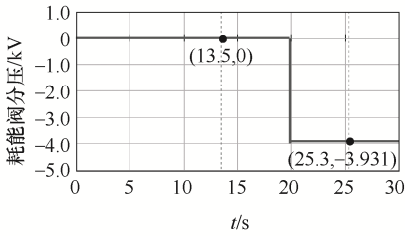
Fig. 6 Working state of system when surplus power is 250 kW

第 10 s 时系统出现 250 kW 的盈余功率；第 10~20 s 没有采取任何措施，此时直流传输母线电压上升至 11.84 kV；第 20 s 时直流耗能装置开始工作，直流母线电压很快恢复至额定值 10 kV。在直流耗能装置运行期间，耗能阀分压为 4 kV。

当系统盈余功率为 500 kW 时，系统工作状态如图 7 所示。图 7(a)为直流传输母线电压变化曲线，图 7(b)为直流耗能装置耗能阀分压变化曲线。仿真第 10 s 时系统出现 500 kW 的盈余功率；第 10~20 s 没有采取任何措施，此时直流传输母线电压上升至 15.11 kV；第 20 s 时直流耗能装置开始工作，直流母线电压很快恢复至额定值 10 kV。在直流耗能装置运行期间，耗能阀分压为−4 kV。



(a) 直流传输母线电压变化曲线



(b) 耗能阀分压变化曲线

图 7 盈余功率为 500 kW 时系统工作状态

Fig. 7 Working state of system when surplus power is 500 kW

仿真结果表明，陆端突卸负荷或者发生故障时，系统会出现盈余功率，直流传输母线电压迅速上升。投入直流耗能装置后，通过调节耗能阀分压，调整耗能功率与系统盈余功率匹配，使得盈余功率通过直流耗能装置耗散，直流传输母线电压很快恢复至稳态值。在系统盈余功率较大的工况下，耗能阀调制电压 u_{sm} 为负值，此时通过控制耗能阀中全桥子模块负压输出，提高耗能电压耗能功率，从而能够平衡较大的系统盈余功率。

4　结语

本文针对海上风力发电柔性直流送出系统故障情况下产生盈余功率，进而造成直流传输母线电压升高的问题，提出一种基于半桥和全桥子模块的混合式直流耗能装置及其调制策略。通过理论分析验证了所提装置及控制策略的有效性，进一步对海上风电柔性直流送出系统相关参数进行设计。通过 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台在系统盈余功率为 50、250、500 kW 这 3 种不同工况下进行仿真分析，仿真结果较好地验证了本文所提耗能装置拓扑及调制策略的有效性。

参考文献：

[1] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
Xu Zheng, Xue Yinglin, Zhang Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062. (in Chinese)

[2] 郭文花, 沈顺群, 刘凯. 用于 DR-HVDC 系统连接的海上风电场电网形成控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 179-188.
Guo Wenhua, Shen Shunqun, Liu Kai. Offshore wind farm grid-formation control method for connection of DR-HVDC system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 179-188. (in Chinese)

[3] Wu Sihang, Qi Lei, He Zhiguo, et al. A voltage-boosting submodules based modular multilevel converter with temporary energy storage ability for fault ride through of offshore wind VSC-HVDC system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2172-2183.

[4] 薛云涛, 任百群, 谢剑翔, 等. 柔性直流输电系统接入非理想电网的改进 DSOGI 同步方案[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 200-208.
Xue Yuntao, Ren Baiqun, Xie Jianxiang, et al. Improved DSOGI synchronization scheme for flexible DC Transmission system connected to non-ideal power grid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 200-208. (in Chinese)

[5] 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.
Yand 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)

[6] 何梨梨, 帅智康, 单佳佳. MMC 的多载波调制策略对比分析[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 56-64.
He Lili, Shuai Zhikang, Shan Jiajia. Contrastive analysis of multi-carrier modulation strategy for modular multilevel converter [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(5): 56-64. (in Chinese)

[7] Freytes J, Akkari S, Rault P, et al. Dynamic analysis of MMC-based MTDC grids: use of MMC energy to improve voltage behavior [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 137-148.

[8] 刘欣, 袁易, 王利桐, 等. 柔性直流输电系统三端口混合参数建模及其稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 4968-4984.
Liu Xin, Yuan Yi, Wang Litong, et al. Three-port hybrid parameter modeling and stability analysis of MMC-HVDC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 4968-4984. (in Chinese)

[9] Haidar A M A, Muttaqi K M, Hagh M T. A coordinated control approach for DC link and rotor crowbars to improve fault ride-through of DFIG-based wind turbine

[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 4073-4086.

[10] Shabestary M M, Mohamed Y A I. Analytical expressions for multiobjective optimization of converter- based DG operation under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 7284-7296.

[11] 蔡婷婷, 穆钢, 严干贵, 等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 166-173.
Cai Tingting, Mu Gang, Yan Gangui, 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 Technology, 2020, 44(1): 166-173. (in Chinese)

[12] Kirakosyan A, El Moursi M S, Khadkikar V. Fault ride through and grid support topology for the VSC-HVDC connected offshore wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1592-1604.

[13] 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): 4081-4091.
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): 4081-4091. (in Chinese)

[14] 卢毓欣, 赵晓斌, 李岩, 等. 海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 25-31.
Lu Yuxin, Zhao Xiaobin, Li Yan, et al. Main electrical connection of VSC-HVDC converter stations for offshore wind farm integration [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 25-31. (in Chinese)

[15] 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. (in Chinese)



李峰

作者简介：

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。

彭穗(1992—)，男，博士研究生，工程师。研究方向：海上风电输电技术、交直流混联电网分析。E-mail：pengsui@gd.csg.cn。

王彦峰(1978—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：海上风电输电技术、新能源并网。E-mail：wangyanfeng@gd.csg.cn。

余浩(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：海上风电输电技术、新能源并网。E-mail：yuhao@gd.csg.cn。

任子俊(1996—)，男，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：陈国珍)