

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.019

连接无源网络的LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略

朱 博¹, 徐攀腾¹, 崔远卓², 娄伟涛², 辛业春²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司广州局, 广州 510663; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: LCC-FHMMC型混合直流输电系统可以完全解决逆变侧换相失败问题,在向无源网络供电领域具有广阔的应用前景。建立了双端混合直流输电系统的数学模型,在分析送端交流故障机理和无源网络工作特性的基础上提出一种基于桥臂电压控制的故障穿越控制策略。通过让负荷主动参与调节换流站不平衡功率,快速恢复直流功率传输的同时有效避免切负荷,同时实现受端换流站和负荷的故障穿越。依靠全桥子模块拓扑能够输出负电平的特点扩大逆变侧直流电压的调节范围,避免子模块电容过度放电导致的换流站闭锁,有效减小了故障清除后直流冲击电流。设计了不同严重程度交流故障下相关参数的选取原则,后基于电磁暂态仿真软件搭建双端混合直流输电系统的仿真模型验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 混合直流输电系统; 无源网络; 故障穿越; 感应电动机

AC Fault Ride-through Control Strategy for LCC-FHMMC Hybrid HVDC System with Passive Network

ZHU Bo¹, XU Panteng¹, CUI Yuanzhuo², LOU Weitao², XIN Yechun²

(1. Guangzhou Bureau of EHV Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electric Power Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012, China)

Abstract: LCC-FHMMC hybrid HVDC system can completely solve the problem of commutation failure at inverter side, and has broad application prospects in the field of power supply to passive network. The mathematical model of double ended hybrid DC transmission system is set up and, on the basis of the analysis of the fault mechanism at the sending end and the characteristics of the passive network, a kind of fault ride-through control strategy based on the bridge arm voltage control is proposed. By allowing the load to actively participate in regulating the unbalanced power of the converter station, the load switching can be avoided at the time of quickly restoring the DC power transmission. Meanwhile, the fault ride-through of the receiving converter station and the load can be achieved. The regulation range of DC voltage at the inverter side is expanded by way of relying on the characteristic that the full bridge submodule topology can output negative level, the blocking of converter station caused by excessive discharge of submodule capacitor is avoided, which effectively reduces the DC impulse current after fault clearance. The selection principle of relevant parameters under different severity of AC fault is designed, and then the simulation model of double ended hybrid DC transmission system is set up based on electromagnetic transient simulation software to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: hybrid HVDC transmission system; passive network; fault ride-through; induction motor

0 引言

基于电网换相型换流器(line commutated

converter, LCC)的高压直流输电(line commutated converter-high voltage direct current, LCC-HVDC)技术具有输送容量大、输送距离远、经济性好等优点^[1-14],

收稿日期:2023-10-11; 修回日期:2023-12-19

基金项目:国家自然科学基金重点支持项目(U2066208)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U2066208).

但不能独立地向无源网络供电^[15]。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电(modular multilevel converter-high voltage direct current, MMC-HVDC)可以快速灵活的调节无功功率,在新能源并网及向无源网络供电领域具有广阔的应用前景^[16-22]。对传统高压直流输电系统的逆变侧进行柔性化改造形成的混合直流输电系统可以综合利用LCC和MMC的优势^[23-24],且完全解决了逆变侧换相失败问题,在中国南方电网乌东德多端混合直流工程中已经得到了应用^[25-26]。

由半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)和全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)组成的混合型MMC(full half bridge modular multilevel converter, FHMMC)能够实现逆变侧直流电压和交流电压的解耦控制^[27-28],在保证受端电能质量的同时扩大逆变侧直流电压的调节范围,且能够实现直流侧故障自清除功能^[29]。文[30]提出全桥与半桥子模块混合构成的混合型MMC,并给出两种类型子模块数目优化配置方法,在具备直流感地故障穿越能力的同时,有效降低建设成本。文[31]分析了混合型MMC的直流电压运行范围与桥臂FBSM占比的关系,指出在低直流电压下运行时,为使桥臂两种子模块电容电压能够平衡,FBSM的占比应约为75%,所需FBSM较多,成本高,损耗大。

向无源网络供电的混合直流输电系统发生送端交流故障时,会引起直流传输功率跌落甚至中断,严重时可能导致换流站闭锁,影响无源网络运行的稳定性。基于此,文[32]提出一种最大调制比控制策略,在调制比范围内降低逆变侧直流电压恢复直流功率传输,但只能适用于轻微故障时的情形。文[33]提出一种基于桥臂电压控制的混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略,采用同步调控桥臂电压交直流分量的方法降低逆变侧直流电压,但由于采用半桥型MMC。所能处理的故障范围仍然有限;文[34]针对向无源网络供电的情形,在分析送端交流故障系统响应特性的基础上,提出了一种送端交流故障穿越附加控制策略,但未考虑负荷的响应特性。

为了扩大逆变侧直流电压的调节范围,使其能适用于不同严重程度的交流故障,在分析送端交流故障特性的基础上提出一种基于桥臂电压控制的故障穿越控制策略。利用全桥子模块拓扑能够输出负电平的特点实现对逆变侧直流电压和交流电压的解耦控制,在保证无源网络电能质量的同时尽快恢复直流功率传输。同时考虑了无源网络的放电特性,通过让负荷主动参与调节换流站不平衡功

率,有效避免切负荷和换流站闭锁,同时实现换流站和无源网络的故障穿越。最后,搭建双端混合直流输电系统的仿真模型验证了所提控制策略的有效性。

1 混合直流输电系统的拓扑结构和子模块配置比例

1.1 拓扑结构

整流侧采用LCC,逆变侧采用FHMMC的混合直流输电系统利用MMC的四象限运行能力,在向无源网络供电领域具有广阔的应用前景^[35-36],其具体的拓扑结构见图1。图1中: Z_s 为送端交流系统的戴维南等值阻抗; T_1 、 T_2 为换流变压器;受端无源网络由表征静态特性的恒阻抗负荷 Z_L 和表征动态特性的感应电动机(induction motors, IM)构成。

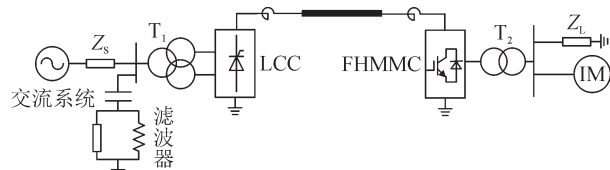


图1 混合直流输电系统的拓扑结构

Fig. 1 Topology of hybrid HVDC system

1.2 混合型MMC子模块配置比例

混合型MMC的拓扑结构见图2。图2中: L_0 为桥臂等值电感; L_{dc} 为直流侧限流电感; U_{dci} 为逆变侧直流电压; $u_{vj}(j=a, b, c)$ 为三相交流出口电压; $i_{vj}(j=a, b, c)$ 和 $i_{vj}(j=a, b, c)$ 分别为上桥臂和下桥臂电流。半桥子模块和全桥子模块具体的拓扑结构如图2中所示, U_{sm} 为单个子模块输出电压。

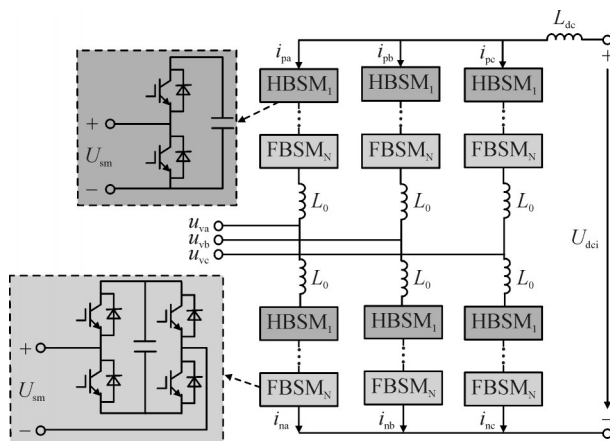


图2 混合型MMC的拓扑结构

Fig. 2 Topology of hybrid MMC

混合型MMC稳态运行时,在a相回路中列写基尔霍夫电压方程为

$$\begin{cases} u_{pa} = \frac{1}{2} U_{dci} - u_{va} - L_0 \frac{di_{pa}}{dt} \\ u_{na} = \frac{1}{2} U_{dci} + u_{va} - L_0 \frac{di_{na}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, u_{pa} 和 u_{na} 分别表示上、下桥臂电压。系统稳态运行时的调制比 m 可以定义为

$$m = \frac{U_m}{U_{dci}/2} \quad (2)$$

U_m 为三相交流电压幅值。忽略桥臂电抗器上产生的压降, 混合型 MMC 上下桥臂输出电压需满足

$$\frac{1}{2}U_{dci}(1-m) \leq (u_{pa}, u_{na}) \leq \frac{1}{2}U_{dci}(1+m) \quad (3)$$

设每个桥臂由 H 个半桥子模块和 F 个全桥子模块串联构成, 则每相桥臂输出电压的最大值和最小值可以表示为

$$\begin{cases} (u_{pa}, u_{na})_{\max} = (H+F)U_{sm} \\ (u_{pa}, u_{na})_{\min} = -FU_{sm} \end{cases} \quad (4)$$

综合式(3)、(4)可知混合型 MMC 半桥子模块和全桥子模块的配置比例应满足如下关系

$$\begin{cases} (H+F)U_{sm} \geq \frac{1}{2}U_{dci}(1+m) \\ -FU_{sm} \leq \frac{1}{2}U_{dci}(1-m) \end{cases} \quad (5)$$

文中 MMC 每相桥臂半桥子模块和全桥子模块配置比例取 1:1。

2 送端交流故障特性分析

2.1 直流控制系统响应特性

LCC-FHMMC 混合直流输电系统为了保证向无源网络的可靠供电, 逆变侧 MMC 有功功率控制回路采用定频率控制, 无功功率控制回路采用定交流电压控制, 以此来保证无源网络的稳定运行。由于逆变侧 MMC 只有两个控制自由度, 整流侧 LCC 必须采用定直流电压控制, 为系统直流功率传输提供稳定的直流电压。

混合直流输电系统稳定运行时, 整流侧 LCC 交流母线电压与直流出口电压满足如下关系

$$U_{dcr} = K \left(1.35U_1 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_d \right) \quad (6)$$

式(6)中: U_{dcr} 为整流站直流出口电压; K 表示每极中 6 脉动换流阀个数, 在文中 K 取 2; U_1 为整流侧换流变压器阀侧空载线电压有效值; α 表示整流器的触发角; X_r 为整流器单相等效换相电抗; I_d 为直流电流。由式(6)可知, 发生送端交流故障后, 整流侧交流母线电压的跌落会导致直流出口电压的降低, LCC 首先通过调节触发角 α 维持直流电压的稳定, 当触发角降低至允许的最小值 5° 时, 便失去了对直流电压的调节能力。直流电压的继续跌落将会导致整流侧直流电压低于逆变侧直流电压, 由于晶闸管器件具有单向导电性, 直流电流将迅速衰减为

零, 直流功率传输中断。功率中断期间, 无源网络仍在不断汲取功率, 导致 MMC 子模块电容向无源网络放电, 以维持功率平衡, 子模块电容电压和直流电压也会相应降低。

MMC 子模块电容向受端无源网络放电过程中, 由于直流电压的不断跌落, 电流的逐渐减小, MMC 实际的放电时间常数较大。因此, 子模块电容放电导致逆变侧直流电压的降低需要一定的时间, 在此期间内仍然会导致整流侧直流电压低于逆变侧直流电压, 直流传输功率依然为零。当子模块电容不断放电引起逆变侧直流电压跌落至其小于整流侧直流电压时, 直流电流从零开始逐渐增大, 恢复功率传输。

假设送端交流故障期间, LCC 和 FHMMC 均不发生闭锁, 故障切除后, 由于触发角的调控存在延时, 送端直流电压会立刻恢复至较高水平。子模块电容的持续放电使逆变侧直流电压远低于整流侧直流电压, 受电容时间常数的影响, 子模块电容电压的恢复需要一个充电过程, 故障期间直流电压跌落越大, 故障清除后, 逆变侧直流电压恢复至稳定运行值的时间越长。因此, 送端交流故障清除后的短时间内, 整流侧直流电压远高于逆变侧直流电压的情况会产生较大的直流冲击电流, 严重危害电气设备的安全运行。

2.2 无源网络特性分析

LCC-FHMMC 混合直流输电系统向无源网络供电时, 感应电动机所占比重较高, 文中采用具有静态特性的恒阻抗负荷和表征动态特性的感应电动机负荷并联模拟受端无源网络, 其等值电路见图 3。

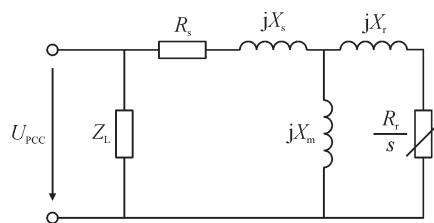


图 3 无源网络等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit of passive networks

图 3 中: U_{PCC} 为逆变侧交流母线电压; $Z_L = R_L + jX_L$ 为恒阻抗负荷; R_s 、 X_s 为感应电动机定子绕组等效电阻和电抗; X_m 为励磁电抗; R_r 、 X_r 为转子绕组等效电阻和电抗; s 为转差率。由等值电路图可以计算出恒阻抗负荷吸收的有功功率为

$$P_L = \frac{U_{PCC}^2}{R_L^2 + X_L^2} R_L \quad (7)$$

由于感应电动机励磁电抗数值较大, 其励磁支路可以近似为开路, 可以得到感应电动机吸收有功

功率为

$$P_{\text{IM}} = \frac{U_{\text{PCC}}^2}{(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (X_s + X_r)^2} (R_s + \frac{R_r}{s}) \quad (8)$$

分析式(7)、(8)可知,恒阻抗负荷和感应电动机吸收有功功率的大小与交流母线电压数值强相关。

由式(7)可知,恒阻抗负荷吸收的有功功率和无功功率随着交流母线电压的跌落而减小。根据式(8)可以得到感应电动机功率—电压特性曲线见图4,其中, U_{th} 为感应电动机临界工作电压。当交流母线电压大于感应电动机临界工作电压时,感应电动机吸收的有功功率受交流母线电压影响较小;当交流母线电压跌落至临界工作电压以下时,感应电动机吸收的有功功率急剧降低,严重时将会导致感应电动机停转。

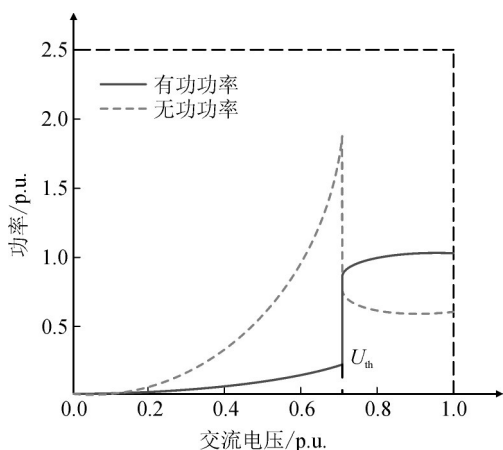


图4 感应电动机功率—电压特性曲线

Fig. 4 Power-voltage characteristic curve of induction motor

3 送端交流故障穿越控制策略

LCC-FHMMC混合直流输电系统发生送端交流故障,整流侧直流电压低于逆变侧直流电压的现象会造成直流传输功率跌落甚至中断。利用全桥子模块拓扑能够输出负电平的特点可以在保证受端交流电压稳定的前提下,实现对逆变侧直流电压的灵活调节。文中每相桥臂半桥子模块和全桥子模块配置比例为1:1,逆变侧直流电压的调节范围为 $-0.1 \sim 1$ p.u.^[37]。送端交流故障期间,由于无源网络仍在不断汲取功率,此时,受端换流站输入有功功率小于输出有功功率,造成受端无源网络的频率波动,导致子模块电容向无源网络放电。为同时实现直流系统和无源网络的故障穿越,需要依靠负荷主动参与调节换流站不平衡功率,通过降低桥臂电压的交流分量减小无源网络吸收的功率,保证受端无

源网络的稳定运行^[38]。

3.1 负荷主动参与调节的故障穿越控制策略

混合型MMC正常运行时,某相上桥臂输出电压可以表示为式(9)

$$u_p = \frac{U_{\text{dcIN}}}{2} - m \frac{U_{\text{dcIN}}}{2} \cos(\omega t + \theta) \quad (9)$$

式(9)中, U_{dcIN} 为逆变侧直流电压额定值。为了尽快恢复直流功率传输,需要依靠全桥子模块拓扑能够输出负电平的特点对逆变侧直流电压进行调整。此外,为了尽可能维持直流系统的功率传输能力,逆变侧直流电压的调整值应该跟随整流侧直流电压的跌落值。为使逆变侧直流电压的调整值与整流侧直流电压的跌落值相匹配,送端交流故障后,MMC直流电压应该设置为

$$U_{\text{dei}} = 2 \left(\frac{1.35 U_{\text{Lm}} \cos \alpha}{k} - \frac{3}{\pi} X_r I_d \right) - I_d R_{\text{line}} \quad (10)$$

式(10)中: U_{Lm} 为故障后送端交流母线电压幅值; k 为换流变压器变比; R_{line} 为直流输电线路电阻,触发角 α 取 5° ; I_d 取稳态运行值,以此来计算逆变侧直流电压的调整值。整流侧通过检测交流母线电压跌落后的幅值,按照式(10)计算出逆变侧混合型MMC需要调整的直流电压值,再以站间通信的方式发送至受端。通过控制部分全桥子模块输出负电平实现对逆变侧直流电压的调节,恢复直流功率传输。

混合直流输电系统发生送端交流故障后,受端无源网络仍在不断地汲取功率,导致MMC子模块电容向受端交流系统放电。直流功率传输中断期间,为依靠MMC子模块电容储能向受端无源网络提供支撑,延长子模块电容放电时间,可以使负荷调节参与直流输电系统的故障穿越过程。MMC采用降低桥臂电压交流分量的方法主动降低逆变侧交流出口电压,可以减少负荷吸收的有功功率,保证换流站不会因闭锁而退出运行,且负荷可以持续运行不必切除,同时实现了直流输电系统和受端无源网络的故障穿越。为了保证受端无源网络良好的电能质量,可以使逆变侧直流电压与交流出口电压采用相同的调节幅度,则调整后混合型MMC某相上桥臂电压可以表示为式(11)

$$u_p = m_{\text{dc}} \left[\frac{U_{\text{dcIN}}}{2} - m \frac{U_{\text{dcIN}}}{2} \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (11)$$

式(11)中, $m_{\text{dc}} = U_{\text{dei}}/U_{\text{dcIN}}$ 为直流调制比,稳态运行时,其数值为1, m 为系统稳态运行时的调制比,其具体示意图见图5。

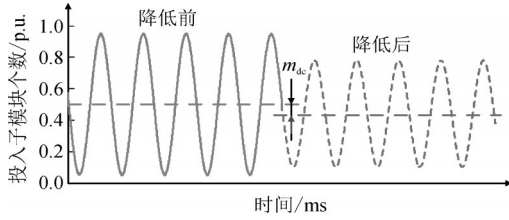


图5 同时降低交直流分量前后上桥臂参考电压

Fig. 5 Reduce simultaneously the AC and DC components the reference voltage of the upper bridge arm before and after

采用同步调控桥臂电压交直流分量的方法,可以使MMC和无源网络同时参与调节,有效避免切负荷和换流站闭锁,同时实现直流输电系统和无源网络的故障穿越。

3.2 降低桥臂电压直流分量的故障穿越控制策略

由2.2节分析可知,无源网络吸收的功率与交流母线电压强相关。采用同步调控MMC桥臂电压交直流分量的方法实现直流系统和无源网络故障穿越的同时,会降低换流母线电压,影响无源网络吸收的有功功率和无功功率。其中,恒阻抗负荷吸收的功率会随着交流母线电压的降低而降低,当交流母线电压低于感应电动机的临界工作电压 U_{th} 时,感应电动机吸收的有功功率会迅速降低,甚至造成感应电动机停转。相对于静态特性的恒阻抗负荷,感应电动机的工作特性对交流母线电压的变化更为敏感。因此,为保证无源网络的正常工作,受端交流母线电压不能过低。令 $h = U_{th}/U_{pcc}$, 其中, U_{pcc} 为混合直流输电系统稳态运行时逆变侧换流母线电压。LCC检测送端交流母线电压后计算出逆变侧直

流电压的调整值,若受端混合型MMC接收后计算出直流电压调制比满足式(12)条件

$$m_{dc} < \eta \quad (12)$$

此时,应当在3.1节的基础上,通过控制投入一定数目的全桥子模块个数,继续调整逆变侧直流电压。降低桥臂电压直流分量后某相上桥臂电压 U_p 为

$$U_p = \frac{1}{2} m_{dc} U_{dcIN} - \frac{1}{2} m \eta U_{dcIN} \cos(\omega t + \theta) \quad (13)$$

送端发生严重交流故障时,在保证无源网络可靠工作的前提下,采用式(13)扩大逆变侧直流电压的调节范围,仍然可以实现直流输电系统的故障穿越。

3.3 故障穿越控制系统设计

综上所述,设计了向无源网络供电的LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流故障穿越控制系统结构见图6。LCC通过检测交流母线电压跌落后的幅值计算出逆变侧直流电压的调整值,采取站间通信的方式发送至受端,再计算出混合型MMC直流电压的调制比。若 $m_{dc} > h$,则可以采取同步调整桥臂电压交直流分量的方法让负荷主动参与调节换流站不平衡功率;若 $m_{dc} < h$,则可以在保证无源网络正常工作的前提下继续扩大逆变侧直流电压的调节范围。LCC-FHMMC混合直流输电系统利用全桥子模块拓扑可以输出负电平的特点可以实现逆变侧直流电压和交流电压的解耦控制,在保证电能质量的前提下扩大逆变侧直流电压的调节范围。这种控制方式在故障清除后可以使逆变侧直流电压快速恢复,有效避免逆变侧直流电压过低导致的直流冲击电流,保证电气设备的安全稳定运行。

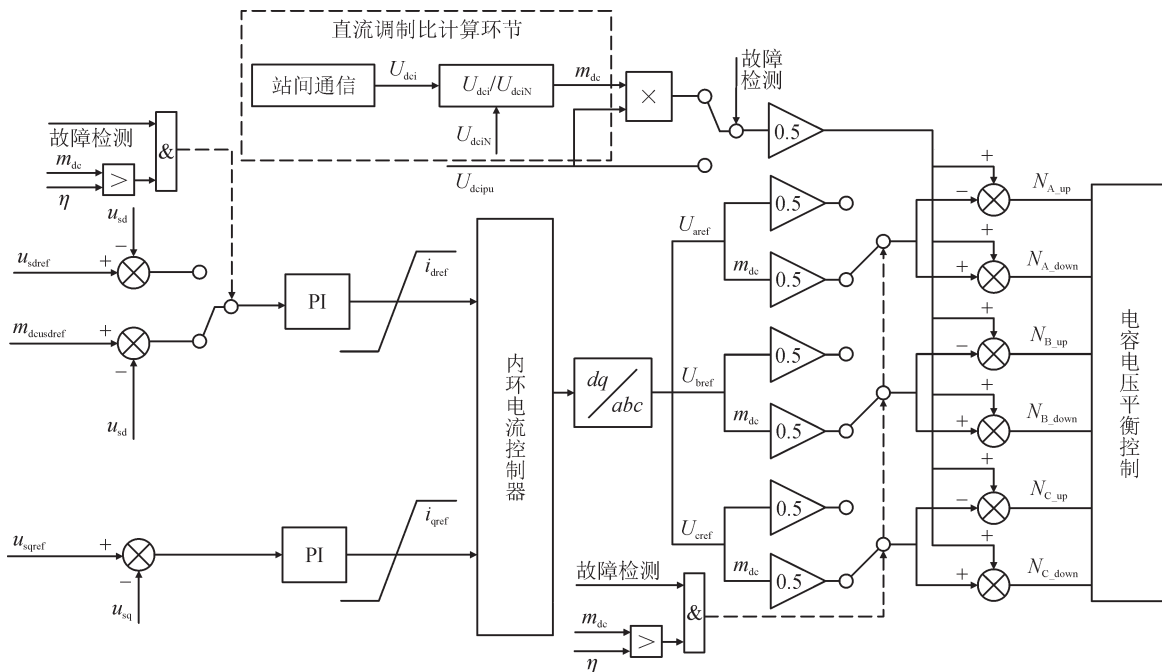


图6 故障穿越控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of fault ride-through control system

4 仿真分析

为了验证所提故障穿越控制策略的有效性,基于MATLAB/Simulink电磁暂态仿真软件搭建了如图1所示双端LCC-FHMMC混合直流输电系统的仿真模型,系统主要参数见表1。表1中,混合型MMC每个桥臂子模块总数为80,半桥子模块和全桥子模块配置比例为1:1。

表1 LCC-FHMMC系统主要参数

Table 1 Main parameters of LCC-FHMMC system

参数	数值
整流侧交流母线电压/kV	345
逆变侧交流母线电压/kV	230
额定直流电压/kV	320
额定有功功率/MW	500
整流侧换流变压器变比/kV	310/105/105
逆变侧换流变压器变比/kV	230/166
直流线路电阻/W	3
恒阻抗负荷/W	6 000
感应电动机/MVA	240+j70

控制方式1:LCC-FHMMC混合直流输电系统发生送端交流故障后,MMC的控制方式不变;

控制方式2:检测到送端交流故障后,逆变侧MMC采取文中所设计的故障穿越控制策略。

4.1 负荷主动参与调节的故障穿越控制策略仿真分析

LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流母线电压跌落较小时,可以采用负荷主动参与调节的故障穿越控制策略。送端换流站通过故障检测环节测量交流母线电压跌落后的幅值,再根据式(10)计算出逆变侧直流电压需要调整的数值,然后以站间通信的方式发送至受端,受端混合型MMC接收该信号后计算出直流调制比。首先对送端交流母线电压跌落至0.825时的情形进行仿真,MMC计算出直流调制比 $m_{dc}=0.832$,感应电动机临界工作电压 U_{th} 为0.72,所有电气参数均以标么值形式给出。由于直流调制比 m_{dc} 大于 h ,因此可以共同调节桥臂电压的交直流分量实现混合直流输电系统的故障穿越。在3 s时设置故障,经过20 ms的延时,受端MMC的控制方式进行切换,3.1 s时故障清除,其具体的仿真结果见图7。

图7为混合直流输电系统发生送端交流故障时交流母线电压跌落至0.825时的仿真结果。送端交流母线电压跌落导致整流侧直流出口电压低于逆变侧直流电压,引起直流功率传输跌落甚至中断。

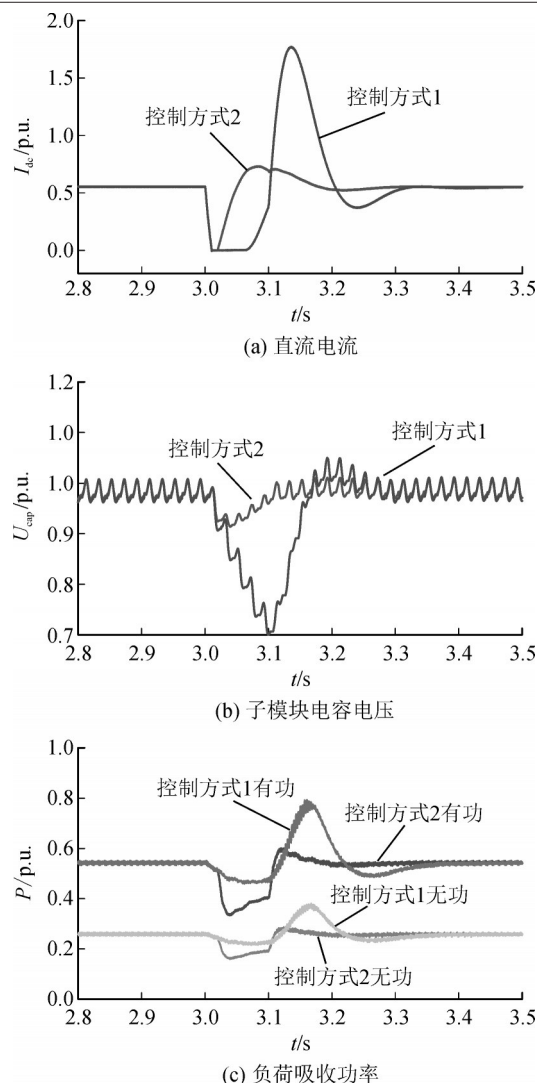


图7 负荷主动参与调节的仿真对比图

Fig. 7 Simulation comparison chart of active load regulation

采用同步调控桥臂电压交直流分量的故障穿越控制策略,让负荷主动参与调节换流站不平衡功率,通过降低桥臂电压的交流分量主动减少负荷吸收的功率,可以有效避免切负荷,保证无源网络的稳定运行。如图7(b)所示,采用所设计的故障穿越控制策略,可以有效减少子模块电容向无源网络放电,在保证子模块电容电压稳定的同时避免换流站闭锁。无源网络吸收的功率仿真图见图7(c),相对于控制方式1,采用控制方式2虽然降低了无源网络吸收的功率,但确实恢复了直流功率传输,有效避免了切负荷,且能够避免故障切除后引起的功率振荡,同时实现了受端换流站和无源网络的故障穿越。

4.2 仅降低桥臂电压直流分量的故障穿越控制策略仿真分析

采用同步调控桥臂电压交直流分量的方法在实现混合直流输电系统故障穿越的同时会降低无

源网络吸收的功率。由于受端无源网络的主要设备是感应电动机,当受端交流母线电压降至感应电动机临界工作电压以下时,便会导致感应电动机停转。因此,为了保证无源网络的正常工作,受端交流母线电压不能过低。当整流侧交流母线电压跌落至0.624时,受端混合型MMC计算此时的直流调制比为0.616,故应该在同步调控桥臂电压交直流分量的基础上进一步投入适当的全桥子模块个数,调节逆变侧直流电压恢复直流功率传输,此时,MMC交流电压参考值设置为感应电动机临界工作电压0.72。仍然在3 s时设置故障,经过20 ms的延时,混合型MMC切换控制方式,经过0.1 s后故障清除,系统恢复正常运行,具体的仿真结果见图8。

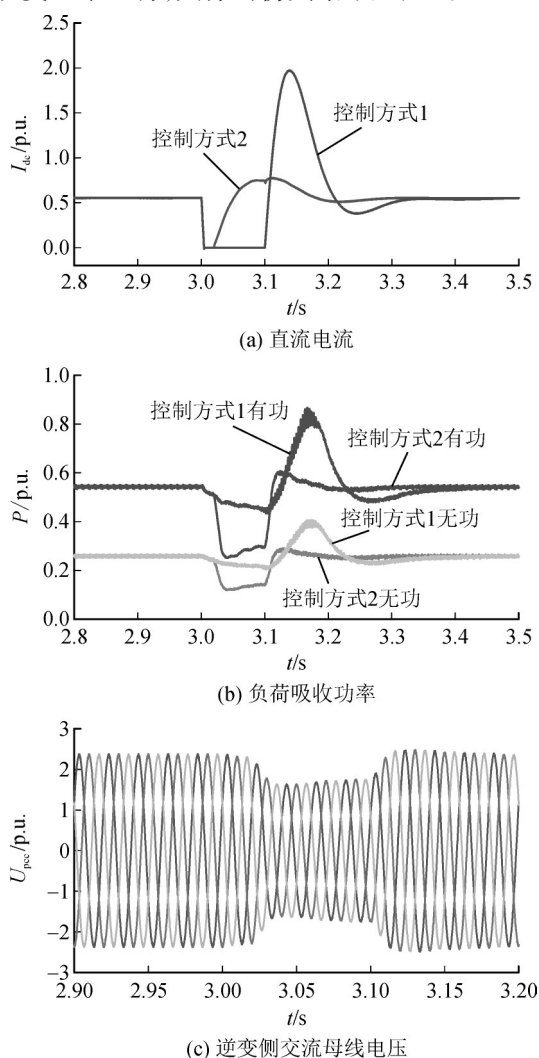


图8 仅降低桥臂电压直流分量的仿真对比图

Fig. 8 Simulation comparison diagram of only reducing DC component of bridge arm voltage

送端发生严重交流故障时,受端混合型MMC计算出此时的直流调制比小于 h ,为保证无源网络的正常工作,逆变侧交流母线电压不能过低。为了尽快恢复直流功率传输,必须投入更多的全桥子模

块个数降低逆变侧直流电压,避免换流站闭锁。直流电流的仿真对比图见图8(a),当送端交流母线电压跌落较大时,直流电流会以阶跃形式衰减为零,采用控制方式2,可以快速恢复直流功率传输,且有效抑制了故障切除后的直流冲击电流。无源网络吸收功率对比图见图8(b),采用控制方式2在故障切除后能够有效避免直流系统对受端无源网络带来的功率冲击。逆变侧交流母线电压图见图8(c)。由图8(c)可知,逆变侧采用混合型MMC利用全桥子模块拓扑能够输出负电平的特点,扩大了逆变侧直流电压的调节范围,且能够在保证受端电能质量的同时适用于不同严重程度的交流故障。

两种不同控制方式下整流侧和逆变侧直流电压的仿真对比图见图9。由图9(a)可知,发生送端交流故障后若混合型MMC不切换控制方式,由于无源网络仍在不断的汲取功率,MMC子模块电容向受端系统放电,造成直流电压降低。故障切除后,在整流侧触发角调节作用下,LCC的直流电压能够快速恢复至稳定值。由于子模块电容的不断放电引起逆变侧直流电压大幅度降低,受电容时间常数的影响,逆变侧直流电压的恢复需要一定的时间。因此,故障切除后送端直流电压远大于逆变侧直流电压的现象将会产生较大的直流冲击电流,危害换流站设备的安全稳定运行。采用文中所设计的故障穿越控制策略,通过投入一定数目的全桥子模块,依靠其能够输出负电平的特点对逆变侧直流电压进行调节,实现快速恢复直流功率传输的同时避免子模块电容过度放电。由图9(b)可知,故障清除后,整流侧直流电压和逆变侧直流电压都能够快速恢复,其数值相差不大,有效减小了直流冲击电流,保证了直流系统的安全稳定运行。

5 结论

文中通过建立LCC-FHMMC双端混合直流输电系统的数学模型,在分析送端交流故障特性的基础上,提出了一种基于桥臂电压控制的混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略,并进行了仿真验证,得出结论如下:

1)依靠全桥子模块拓扑可以输出负电平的特点实现逆变侧直流电压和交流电压的解耦控制,扩大了逆变侧直流电压的调节范围,适用于不同严重程度的交流故障;

2)通过降低桥臂电压的交流分量让负荷主动参与调节换流站不平衡功率,能够有效避免无源网络切负荷,同时实现了换流站和无源网络的故障穿越;

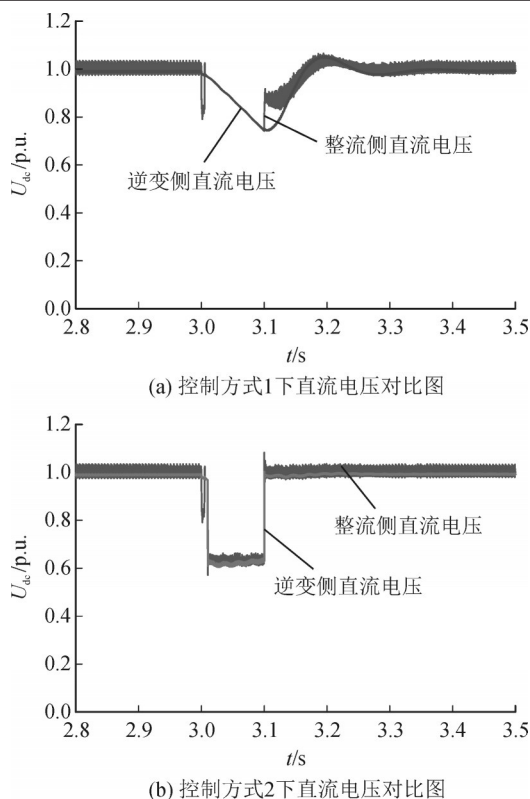


图9 不同控制方式下直流电压仿真对比图

Fig. 9 Simulation comparison chart of DC voltage under different control modes

3)采用所设计的故障穿越控制策略可以在故障清除后快速恢复逆变侧直流电压,有效减小了直流冲击电流,保证了电气设备安全稳定运行。

参考文献:

[1] 王永平,赵文强,杨建明,等.混合直流输电技术及发展分析[J].电力系统自动化,2017,41(7):156-167.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.

[2] 苗作华,王梦婷,汤阳,等.基于优化蚁群算法的输电线路规划研究[J].智慧电力,2022,50(11):84-89.
MIAO Zuohua, WANG Mengting, TANG Yang, et al. Transmission line path planning based on optimal ant colony algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 84-89.

[3] 戴锋,刘贞瑶,陈轩,等.考虑输电线路档距及弧垂影响的故障精准定位[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):97-104.
DAI Feng, LIU Zhenyao, CHEN Xuan, et al. Accurate fault location considering the influence of transmission line span and sag[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 97-104.

[4] 朱海勇,吴小丹,王宇,等.风电机组经低频输电系统并网的故障穿越协调控制[J].供用电,2022,39(11):

11-17.

ZHU Haiyong, WU Xiaodan, WANG Yu, et al. A coordinated fault ride-through control for wind turbine through LFTS [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 11-17.

[5] 陶然,张涛,冉华军,等.计及可用输电能力的风电并网系统中STATCOM的双层优化配置[J].智慧电力,2022,50(12):86-93.

TAO Ran, ZHANG Tao, RAN Huajun, et al. Bi-level optimal configuration of STATCOM in wind power grid-connected system considering available transfer capacity [J]. Smart Power, 2022, 50(12): 86-93.

[6] 林圣,兰菲燕,刘健,等.高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J].电力科学与技术学报,2022,37(6):3-16.

LIN Sheng, LAN Feiyan, LIU Jian, et al. Overview of transient overvoltage mechanism and suppression strategies of high voltage direct current transmission grid [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 3-16.

[7] 汪惟源,窦飞,蔡晖,等.柔性输电技术在江苏跨江输电通道的应用研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(2):141-146.

WANG Weiyuan, DOU Fei, CAI Hui, et al. Research on application of flexible AC/DC transmission technologies in Yangtze-river-crossing transmission channels of Jiangsu province [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2): 141-146.

[8] 梁利辉,赵志刚,闫敏,等.榆横—潍坊1000 kV特高压交流输电线路检修接地方案研究[J].电瓷避雷器,2022(1):36-43.

LIANG Lihui, ZHAO Zhigang, YAN Min, et al. Research on grounding scheme of 1000 kV UHV AC transmission line in Yuheng-Weifang during maintenance [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 36-43.

[9] 廖名洋,张文,袁海,等.基于多脉冲注入法的高压直流输电接地极线路故障测距[J].电网与清洁能源,2022,38(9):98-104.

LIAO Mingyang, ZHANG Wen, YUAN Hai, et al. A fault location method for HVDC grounding pole line using multi-pulse injection method [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(9): 98-104.

[10] 俞翔,鲁江,董云龙,等.适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):174-180.

YU Xiang, LU Jiang, DONG Yunlong, et al. A steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 174-180.

[11] 汤广福,王高勇,贺之渊,等.张北500 kV直流电网关键技术及设备研究[J].高电压技术,2018,44(7):2097-2106.

- TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [12] 王子文, 张英敏, 李保宏, 等. 柔性直流电网潮流转移特性及安全运行影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 103-113.
- WANG Ziwen, ZHANG Yingmin, LI Baohong, et al. Analysis of power flow transfer characteristics and influence on the safety operation of a flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 103-113.
- [13] 肖亮, 王国腾, 徐雨哲, 等. LCC-MMC混合多端直流输电系统的潮流计算和机电暂态建模方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2578-2586.
- XIAO Liang, WANG Guoteng, XU Yuzhe, et al. Methods for power flow calculation and electro-mechanical transient modeling of LCC-MMC hybrid multi-terminal HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2578-2586.
- [14] 王彤彤, 文俊, 靳海强, 等. LCC-MMC混合直流输电系统直流回路谐振特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 1-7.
- WANG Tongtong, WEN Jun, JIN Haiqiang, et al. Research on the resonance characteristics of the DC loop of the LCC-MMC hybrid DC transmission system[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(3): 1-7.
- [15] YANG R, XIANG W, LIN W, et al. Hybrid ultra-HVDC system with LCC and cascaded hybrid MMC[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16(3): 1112-1116.
- [16] 许烽, 徐政. 基于LCC和FHMMC的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
- XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [17] 齐方方, 王海云, 常鹏. 含风电的混合直流输电并网系统暂态特性分析[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 201-206.
- QI Fangfang, WANG Haiyun, CHANG Peng. Analysis on transient characteristics of hybrid DC transmission connected-grid system with wind power[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 201-206.
- [18] 陈凌云, 程改红, 邵冲, 等. LCC-MMC型三端混合直流输电系统控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 146-152.
- CHEN Lingyun, CHENG Gaihong, SHAO Chong, et al. Research on control strategy for a 3-terminal LCC-MMC HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 146-152.
- [19] LIU Yan, CHEN Zhe. A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio in a hybrid multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1568-1581.
- [20] 徐政, 张哲任, 徐文哲. LCC-MMC串联混合型直流输电拓扑在大规模纯新能源发电基地送出中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 119-126.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, XU Wenzhe. Research on application of LCC-MMC series hybrid HVDC topology for large scale clean energy base integration[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(3): 119-126.
- [21] 李彬, 杜丁香, 王兴国, 等. 基于平均绝对误差的海上风电经柔直送出系统交流海缆纵联保护[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 122-129.
- LI Bin, DU Dingxiang, WANG Xingguo, et al. AC submarine cable pilot protection for offshore wind power through MMC-HVDC system based on mean absolute error[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 122-129.
- [22] 杨张斌, 李钢, 王仙荣, 等. 应用于海上风电柔性直流输电系统的灵活调压策略[J]. 供用电, 2022, 39(9): 76-82.
- YANG Zhangbin, LI Gang, WANG Xianrong, et al. Flexible voltage regulation strategy for offshore wind farm with VSC-HVDC[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 76-82.
- [23] 时伯年, 洪潮, 孙刚, 等. 交流不对称故障下的LCC-MMC混合直流系统输送功率提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 73-78.
- SHI Bainian, HONG Chao, SUN Gang, et al. Research on power transmission enhancement strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under AC symmetric fault[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 73-78.
- [24] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型LCC-MMC混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.
- YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.
- [25] 陈博怡, 李兴源, 胡永银, 等. 混合直流输电控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 118-123.
- CHEN Boyi, LI Xingyuan, HU Yongyin, et al. Research of control strategies for hybrid HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 118-123.
- [26] 黄伟煌, 李明, 郭铸, 等. 基于小干扰稳定性的多端混合高压直流输电系统控制参数分析与优化方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2941-2949.
- HUANG Weihuang, LI Ming, GUO Zhu, et al. Control parameter analysis and optimization method of multi-terminal hybrid HVDC transmission system based on small signal stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2941-2949.

- 2941-2949.
- [27] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes and applications of modular multi level converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [28] 邓帅荣, 周念成, 王月月, 等. 基于混合型MMC全桥子模块比例的直流侧故障隔离电压研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3250-3257.
- DENG Shuirong, ZHOU Niancheng, WANG Yueyue, et al. Research on DC fault isolation voltage based on proportions of full bridge sub-modules of hybrid MMC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3250-3257.
- [29] 石璐, 李嘉龙, 赵成勇, 等. 双半桥与并联全桥子模块混合MMC均压与直流故障控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6411-6419.
- SHI Lu, LI Jialong, ZHAO Chengyong, et al. Research on control method of voltage balance and DC fault clearance of hybrid MMC composed of D-HBSM and P-FBSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6411-6419.
- [30] 朱明琳, 杭丽君, 李国杰. 基于不对称双子模块的混合MMC及其直流故障自清除能力[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 66-71.
- ZHU Minglin, HANG Lijun, LI Guojie. Hybrid MMC based on asymmetrical double commutated cells and its DC fault clearance capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 66-71.
- [31] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式MMC及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
- LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.
- [32] 刘志超, 时伯年, 刘斌, 等. 基于最大调制比的LCC-MMC混合直流交流侧故障控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 125-130.
- LIU Zhichao, SHI Bainian, LIU Bin, et al. Control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC transmission under AC system fault based on maximum modulation index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 125-130.
- [33] 李国庆, 姜伟涛, 辛业春, 等. LCC-MMC型混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2586-2595.
- LI Guoqing, LOU Weitao, XIN Yechun, et al. AC fault ride-through control strategy for sending end of LCC-MMC hybrid DC transmission system[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2586-2595.
- [34] 许烽, 宣晓华, 陆翌, 等. 向无源网络供电的LCC-MMC混合直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 129-135.
- XU Feng, XUAN Xiaohua, LU Yi, et al. Control strategies for LCC-MMC hybrid DC system connected to passive networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 129-135.
- [35] 薛英林, 葛风雷, 赵峥, 等. LCC-C-MMC混合高压直流系统直流低电压穿越控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 85-96.
- XUE Yinglin, GE Fenglei, ZHAO Zheng, et al. DC low-voltage ride-through control strategy of LCC-C-MMC hybrid HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 85-96.
- [36] 蔡宜君, 文明浩, 陈玉, 等. LCC-MMC混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 1-8.
- CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under rectifier side fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 1-8.
- [37] XIANG Wang, LIN Weixing, XU Lie, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [38] 杨晓楠, 陈红坤, 石晶, 等. 模块化多电平换流器启停控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 156-162.
- YANG Xiaonan, CHEN Hongkun, SHI Jing, et al. Start/shutdown control strategy of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 156-162.
- 朱博(1986—), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电(E-mail: zhubo@ehv.csg.cn)。
- 徐攀腾(1981—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电。
- 崔远卓(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多馈入直流输电系统(通信作者)(E-mail: 1214016144@qq.com)。
- 姜伟涛(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电技术。
- 辛业春(1982—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为柔性直流输电技术、输变电设备运行状态在线检测与诊断技术。