

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.025

## 半桥型 MMC 直流侧故障限流组合控制策略

魏兴杰, 张英敏, 刘坤, 李保宏

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流电网在直流短路故障时电流峰值较高且上升速度极快,严重时会造成 MMC 闭锁从而导致系统大面积停运。为在短时间内限制故障电流对系统的影响,文中提出一种对半桥型 MMC 适用的故障限流组合控制策略,利用 MMC 自身的高度可控性,无须外加限流装置,即可达到故障限流效果,并降低对直流断路器的技术需求。首先,文中阐述了限流组合控制策略中 2 种不同的限流环节及其基本原理。其次,分别分析 2 种限流环节对直流故障电流、交流电流以及桥臂电流的影响,推导限流组合控制下的直流故障电流计算式。最后,在 PSCAD/EMTDC 平台搭建半桥型 MMC 四端直流电网模型进行仿真分析,结果表明所述限流组合控制策略能够有效限制直流故障电流,减小故障点近端换流器的功率和电压波动,降低交流电流和桥臂电流的过流峰值。

**关键词:**半桥型模块化多电平换流器(MMC);直流电网;直流故障;故障电流计算;限流环节;组合控制

**中图分类号:**TM721

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2023)01-0209-09

### 0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术具有有功和无功独立控制、不存在换相失败风险以及向弱交流系统和无源负荷供电等优势,在能源汇集和区域互联等方面具有较好的发展前景<sup>[1-3]</sup>。针对我国能源分布不均等问题,采用架空线路构建柔性直流电网进行大容量、远距离输电是今后的趋势<sup>[4]</sup>,但相较于电缆线路,架空线路的故障率更高<sup>[5]</sup>。此外,直流系统低阻尼、低惯性的特点使得线路发生短路故障后迅速产生极高的故障电流<sup>[6]</sup>,将严重影响设备和运行安全。

目前工程中实际使用的换流器主要采用不具备故障阻断能力的半桥型子模块,通过与高压直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)配合,及时隔离直流侧故障,但开断大容量的 DCCB 制造困难且成本较高,限制了高压大容量直流电网的发展<sup>[7-8]</sup>。因此,研究合适的限流方法尤为重要。现有限流研究一般分为 2 种,一是在线路中附加限流设备<sup>[9-11]</sup>或使用具备限流能力的 DCCB<sup>[12-14]</sup>,通过增大故障回路的电阻或电感限流;二是改进换流器拓扑,使用具备限流能力的子模块<sup>[15-18]</sup>。以上措施在抑制故障电流方面均能实现较好的效果,但附加或改进设备以及制定相应的协调控制策略也进一步增大了系统的复杂性,不利于系统稳定,工程化

收稿日期:2022-08-17;修回日期:2022-10-26

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5100-202199274-A-0-0-00);中央引导地方科技发展专项项目(2021ZYD0042)

应用较困难<sup>[19]</sup>。实际上,由于柔性直流电网系统控制周期极短,约为 100  $\mu\text{s}$ ,具有极高的可控性,所以能从系统控制方面达到限流目的<sup>[20]</sup>。

文献[21]提出了一种采用虚拟阻抗的 MMC 交直流侧故障过电流抑制策略,通过调整换流器有功输出,有效限制了直流侧故障对桥臂电流的冲击。然而直流侧故障后,子模块电容放电占据主导因素<sup>[22]</sup>,附加的虚拟阻抗对线路的限流效果有限。文献[23]提出了一种故障后减少子模块投入个数的限流控制策略,其线路过电流限制效果较好,但缺少对故障端换流器桥臂电流及阀侧交流电流的分析。文献[24]在两端 MMC 系统中提出了一种限流控制策略,通过将桥臂电压参考值置零,实现旁路所有子模块限流效果,但此方法切断了交直流侧的功率联系,在多端直流电网的可应用性较小。文献[25]提出了一种基于桥臂电压控制的主动限流方法,通过降低桥臂电压直流分量或交直流分量实现子模块的旁路控制,能保证阀侧交流特性和更好的限流效果,但降低交直流分量时交流电流和桥臂电流仍有较高峰值。

基于此,文中提出一种适用于半桥型 MMC 直流电网的限流组合控制策略。首先,通过换流站外环控制,限制故障后交流侧馈入的有功功率,降低桥臂电流和交流电流峰值。其次,通过换流站的阀级控制,改变故障后换流器投入子模块的数量,旁路的子模块数目根据故障后的直流电压变化量自适应改变,从而进一步降低直流故障电流。最后,通过仿真验证文中策略限流的有效性。此策略无须在线路中附加限流装置,并能降低 DCCB 的开断

电流,大大减少了系统的建设成本,加强了半桥型 MMC 对于故障过电流的抑制能力。

## 1 半桥型 MMC 限流组合控制

### 1.1 半桥型 MMC 拓扑

半桥型 MMC 的拓扑如图 1 所示,子模块为不具备故障阻断能力的半桥型子模块。其中,每相有上、下 2 个桥臂,每个桥臂均包含  $N$  个子模块,  $L_{arm}$  为桥臂电感;  $u_{sm}$  为子模块电压;  $C_0$  为子模块电容;  $u_c$  为子模块电容电压;  $VT_1$ 、 $VT_2$  为绝缘栅双极型晶体管。子模块有 3 种工作状态:闭锁( $VT_1$  与  $VT_2$  均关断)、投入( $VT_1$  开通,  $VT_2$  关断)以及切除( $VT_1$  关断,  $VT_2$  开通)。正常运行时,保证每相投入子模块总数为  $N$ ,从而输出稳定的直流电压  $U_{dc}$ 。

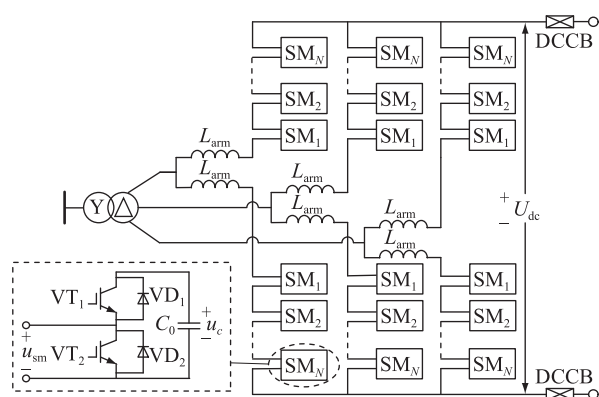


图 1 MMC 拓扑

Fig.1 Topology of MMC

### 1.2 直流侧故障限流组合控制

基于半桥型 MMC 的限流控制策略包括 2 个限流环节,即外环控制指令预设限流和直流电压变化自适应限流。对 2 个限流环节改进,可起到明显降低半桥型 MMC 直流侧故障电流水平的作用。

#### 1.2.1 外环控制指令预设限流原理

外环控制指令预设限流控制器如图 2 所示。其中,  $P$ 、 $P_{ref}$  分别为瞬时有功功率和瞬时有功功率参考值;  $U_{dcref}$  为直流电压参考值;  $i_{sdmax}$ 、 $i_{sdref}$  分别为阀侧交流电流  $d$  轴分量最大值和参考值。

故障发生后,由于系统功率和电压的波动使得外环比例积分 (proportional integral, PI) 控制器极易饱和,影响了控制器可控裕度。通过在外环 PI 控制器内预设清零指令 (CLR),故障后将 PI 控制器清零,使得外环功率控制的输出  $i_{sdref}$  清零,减少交流侧向换流器的功率注入,从而降低故障电流水平。

#### 1.2.2 基于直流电压变化的自适应限流原理

基于直流电压变化的自适应限流控制器如图 3 所示。直流侧故障发生后,直流电压  $U_{dc}$  跌落。将

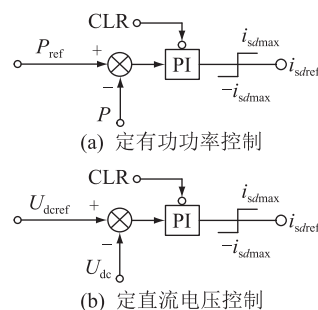


图 2 外环控制指令预设限流控制器

Fig.2 Current limiting controller by predetermining the outer loop control instructions

$U_{dc}$  除以该换流器出口的稳态直流电压  $U_{ss}$ ,得到直流电压的相对变化系数  $K_{u_{flt}}$ ,再由上限约束 1.0 减去  $K_{u_{flt}}$  得到表示故障后换流器出口直流电压变化量的相对变化系数  $K_{c_{flt}}$ ,也就是暂态情况下须投入的子模块的修正系数。采用限流环节后 MMC 出口直流电压如式 (1) 所示。

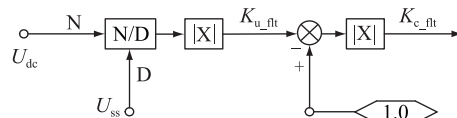


图 3 基于直流电压变化的自适应限流控制器

Fig.3 Self-adaption current limiting controller based on DC voltage variation

$$U_{dc} = K_{c_{flt}} N u_c \quad (1)$$

由图 3 控制器结构可得直流电压相对变化系数  $K_{u_{flt}}$  与子模块修正系数  $K_{c_{flt}}$  的关系为:

$$1 = K_{c_{flt}} + K_{u_{flt}} \quad (2)$$

由式 (1) 和式 (2) 可得,随着限流控制的运行,  $K_{c_{flt}}$  与  $K_{u_{flt}}$  会逐渐趋于一致,即投入子模块数限制于正常情况下的一半,避免了子模块的过度切除对系统性能的影响,保证了一定的故障穿越能力。故障后,通过换流站阀级控制改变子模块投入数目,使得所有处于投入状态的子模块电压之和自适应于换流器出口直流电压的波动,进一步限制故障电流水平。

#### 1.2.3 限流组合控制原理

综合以上两部分控制措施,文中所述基于半桥型 MMC 的限流组合控制策略原理如图 4 所示。其中,  $u_{com}$ 、 $u_{diff}$  分别为桥臂共模电压和差模电压;  $U_{c_N}$  为子模块额定电压;  $round(\cdot)$  为取整函数;  $N_p$ 、 $N_n$  分别为上、下桥臂子模块数。根据故障后系统直流电压和电流的变化特点,设置直流电压  $U_{dc}$  的下限阈值  $U_{min}$  和直流电流变化率  $di/dt$  的上限阈值  $\zeta$ 。系统正常运行时,对直流电压和电流进行实时采样。故障发生时,  $di/dt$  和  $U_{dc}$  满足式 (3),启动限流控制

策略。由于控制系统周期短,响应速度快,故后续分析忽略控制响应时间。

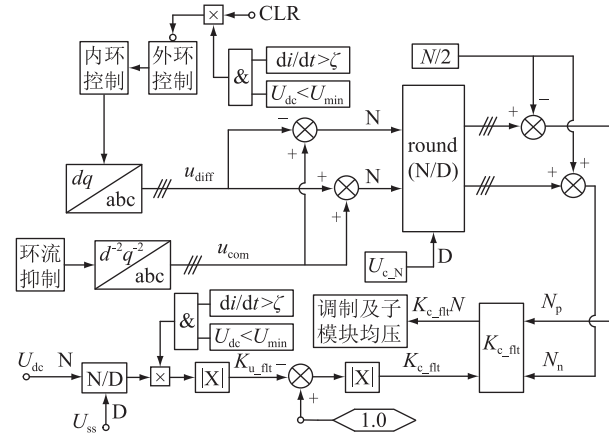


图4 组合限流控制策略原理

Fig.4 Schematic diagram of current limiting combined control strategy

$$\begin{cases} di/dt > \zeta \\ U_{dc} < U_{min} \end{cases} \quad (3)$$

此外,柔直电网直流侧的短路电流主要由故障点两侧的近端换流器提供<sup>[26]</sup>,对于远端换流器可不进行限流控制,从而避免额外的控制措施对系统产生影响<sup>[23]</sup>。

## 2 计及限流环节的故障特性分析

### 2.1 外环控制指令预设限流环节故障特性

发生直流侧短路故障后,子模块电容的放电电流为主要的故障电流,但实际上换流站的控制系统也会对故障电流产生影响<sup>[27]</sup>。另外,不论换流器是否闭锁,交流系统都会持续向换流器馈入有功功率,其路径通过线路流向故障点,馈入功率值较稳态运行时更大,进一步增大了故障电流。

计及限流环节的 MMC 控制结构如图 5 所示。其中, $Q$ 、 $Q_{ref}$ 分别为无功功率和无功功率参考值; $U_{ac}$ 、 $U_{acref}$ 分别为交流电压和交流电压参考值; $i_{sqmax}$ 为阀侧交流电流  $q$  轴分量最大值; $i_{sqref}$ 为阀侧交流电流  $q$  轴分量参考值; $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 分别为阀侧交流电流的  $d$ 、 $q$  轴分量; $\omega$ 为谐振角频率; $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 分别为阀侧交流电压的  $d$ 、 $q$  轴分量; $u_{diffd}$ 、 $u_{diffq}$ 分别为桥臂差模电压的  $d$ 、 $q$  轴分量。

交流侧三相电网电压平衡状态下,阀侧交流电压  $q$  轴分量  $u_{sq}(t)$  为零,则交流系统向直流侧输入的有功功率  $P_s(t)$  为:

$$P_s(t) = \frac{3}{2} u_{sd}(t) i_{sd}(t) \quad (4)$$

由图 5 可知,外环控制器根据设定的系统运行

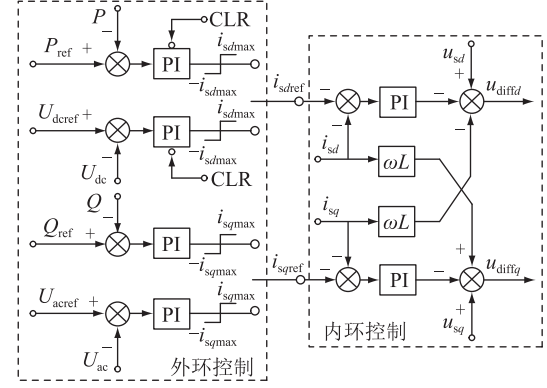


图5 计及限流环节的 MMC 控制结构

Fig.5 MMC control structure considering current limiting measures

功率或电压水平输出参考值  $i_{sdrref}(t)$ ,内环控制器通过调节 MMC 桥臂差模电压  $u_{diffd}(t)$  和  $u_{diffq}(t)$  使其输出  $i_{sd}(t)$  跟踪  $i_{sdrref}(t)$  以保持一致。在本环节对 PI 控制器清零后,其输出参考值  $i_{sdrref}(t)$  随之清零,凭借较短的控制周期,系统内环控制器输出  $i_{sd}(t)$  也会减小,由式(4)可知,交流系统输入的有功功率  $P_s(t)$  亦会随之减少。

MMC 交流侧输出相电流基波幅值为:

$$I_{s_m} = \frac{2\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}}{3U_{s_m}} \quad (5)$$

式中: $U_{s_m}$ 为 MMC 阀侧基波相电压幅值; $Q_s$ 为交流系统注入的无功功率。换流器桥臂电流峰值可表示为:

$$i_{rj\_max} = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{I_{s_m}}{2} \quad (6)$$

式中: $I_{dc}$ 为直流线路电流; $r$ 为上、下桥臂; $j$ 为 a、b、c 三相。 $P_s$ 减小后,由式(5)和式(6)可知,外环控制指令预设能够降低  $I_{s_m}$  及  $i_{rj\_max}$ 。

### 2.2 基于直流电压变化的限流环节故障特性

双极短路故障是基于半桥型 MMC 直流电网最严重的直流侧故障类型,文中对此类故障进行分析。故障等效模型如图 6(a)所示,其中, $R_v$ 为换流器三相桥臂等效电阻; $L_v$ 为三相桥臂等效电感, $L_v = 2L_{arm}/3$ ; $R_{dc}$ 、 $L_{dc}$ 分别为直流线路的电阻与电感; $R_{sum}$ 、 $L_{sum}$ 分别为短路等效电阻和等效电感; $C_{eq}$ 为三相等效电容, $C_{eq} = 3C_{sp}$ ,其单相等效电容值  $C_{sp}$ 可根据电容储能能量守恒原则由式(7)计算得到。

$$\frac{1}{2} C_{sp} (Nu_{sm})^2 = 2N \times \frac{1}{2} C_0 u_{sm}^2 \quad (7)$$

图 6(a)中还包含一个并联于等效电容两端的受控电流源,用来反映来自交流侧的有功输入及换流器控制环节的作用<sup>[28]</sup>。受控电流源的输出  $i_s(t)$  如式(8)所示。

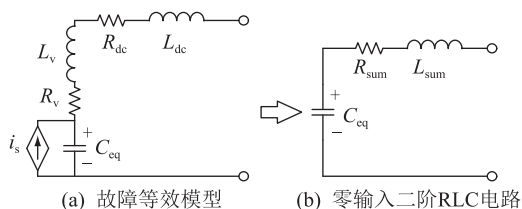


图6 直流侧短路故障等效模型

Fig.6 Equivalent model of DC side short circuit fault

$$i_s(t) = \frac{P_s(t)}{u_c(t)} \quad (8)$$

式中： $u_c(t)$ 为换流器上/下桥臂处于投入状态的子模块电容电压值之和。

根据2.1节分析可知,采用外环控制指令预设的方式能够减少来自交流侧的功率馈入,故文中忽略 $i_s(t)$ 的影响,单独分析采用基于直流电压变化的限流环节后的故障特性。故障模型如图6(b)所示,等效为零输入二阶RLC电路,其中各参数表示为:

$$\begin{cases} R_{sum} = R_v + R_{dc} \\ L_{sum} = 2L_{arm}/3 + L_{dc} \\ C_{eq} = 6C_0/N \end{cases} \quad (9)$$

由于直流系统的弱阻尼特性,电路中短路等效电阻 $R_{sum} < 2\sqrt{L_{sum}/C_{eq}}$ ,由电路原理可求得故障线路直流电流 $i(t)$ 为:

$$i(t) = e^{-\delta t} \left( \frac{U_0}{\omega L_{sum}} \sin(\omega t) - \frac{I_0 \delta}{\omega} \sin(\omega t) + I_0 \cos(\omega t) \right) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \delta = R_{sum} / (2L_{sum}) \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{L_{sum} C_{eq}} - \left( \frac{R_{sum}}{2L_{sum}} \right)^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $U_0$ 、 $I_0$ 分别为故障发生时刻直流电压和电流的初始值。

由式(10)分析可得,短路电流主要由3个衰减部分组成,在前1/4个衰减周期内,第一和第三部分主要形成电流的正向上升阶段,第二部分则为反向,限制电流上升。对于由系统参数决定的不同衰减部分的系数,第一部分的系数 $U_0/(\omega L_{sum})$ 明显大于剩余两部分的系数,因此可将第一部分视为短路电流主要部分。经过基于直流电压变化的限流环节后,系统通过子模块投入修正系数 $K_{c_{nt}}$ 调节故障后的子模块投入量,一方面降低了直流电压 $U_0$ ,另一方面增大了等效电容 $C_{eq}$ ,进而减小了谐振角频率 $\omega$ ,使得 $U_0/(\omega L_{sum})$ 缩小。因此,此环节在抑制故障电流上升方面有较好的效果。

综上,文中的限流组合控制策略流程如图7所示。

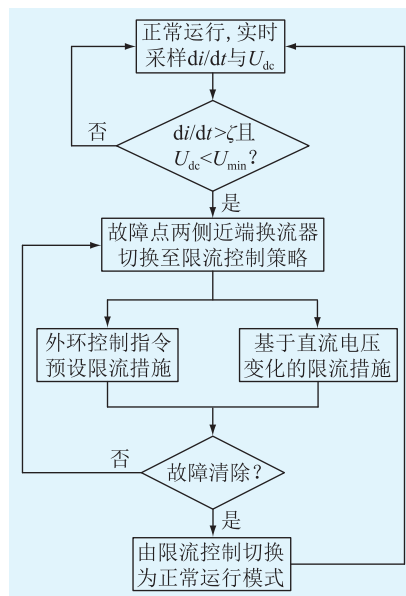


图7 组合限流控制策略流程

Fig.7 Flow chart of current limiting combined control strategy

### 3 仿真分析

为分析验证文中所述限流控制策略的效果,在PSCAD/EMTDC平台中搭建如图8所示使用半桥子模块的四端MMC直流电网模型,各换流器的主要参数以及直流电网的主要参数如表1所示。

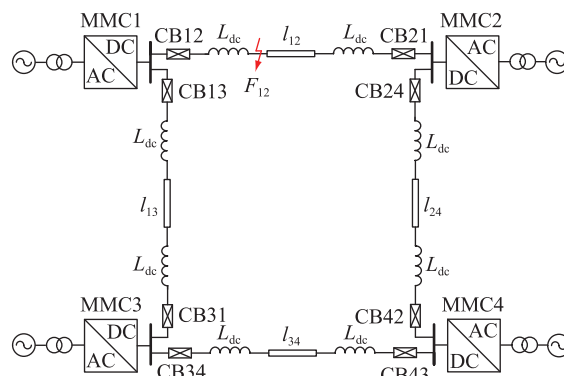


图8 四端直流电网

Fig.8 Four-terminal DC grid

系统采用主从控制策略,其中MMC4采用定直流电压控制,其余换流站采用定有功功率控制。直流电网正常运行时,MMC1和MMC3工作于整流状态,功率流入直流电网;MMC2和MMC4工作于逆变状态,功率流出直流电网。系统稳定运行后,在1.5s时刻,MMC1出口( $F_{12}$ )处发生金属性双极短路故障,检测到故障发生后,故障点两侧近端换流器MMC1和MMC2切换至限流控制策略,使远端换流器MMC3和MMC4保持正常运行。设置故障持续时间为6ms,之后故障切除,系统切换至正常运行

表 1 换流器及直流电网参数

参数	MMC1	MMC2	MMC3	MMC4
额定直流电压/kV	500	500	500	500
额定有功功率/MW	600	800	800	600
子模块电容/ $\mu\text{F}$	15 000	10 000	15 000	15 000
桥臂电感/mH	100	100	50	50
子模块导通电阻/ $\text{m}\Omega$	1.361	1.361	0.908	1.361
桥臂子模块数目	250	250	250	250
平抗电感/mH	150	150	150	150
交流电压/kV	290	290	290	290
控制周期/ $\mu\text{s}$	100	100	100	100
线路长度/km	200	200	200	200
线路电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.029 2	0.029 2	0.029 2	0.029 2
线路电感/ $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.82	0.82	0.82	0.82

模式恢复运行。

### 3.1 直流母线电流仿真分析

故障前后 MMC1 和 MMC2 出口直流电流动态特性对比如图 9 所示。方法 A 为仅采取减投子模块的方法,故障后使所有换流器的投入子模块数降至原来的  $km$  倍( $k$  为缩小比例; $m$  为系统调制比),其值与文献[25]中降低桥臂电流交直流分量的措施一致,即  $km = 0.43$ 。由图 9 可以看到,MMC1、MMC2 直流母线电流的稳定初始值分别为 1.148 8 kA 和 -1.630 9 kA。未采取限流措施的情况下,故障后 6 ms 内 MMC1 与 MMC2 的直流母线电流迅速上升,分别达到 8.63 kA 和 2.24 kA;采用方法 A 后,直流母线电流在故障后 6 ms 时刻分别下降至 4.89 kA 和 0.32 kA,以稳定初始值为基准,计算得出分别下降了 49.9% 和 49.6%;采用文中限流控制策略后,直流母线电流在故障后 6 ms 时刻分别下降至 4.55 kA 和 -0.34 kA,下降了 54.5% 和 66.7%。可见,2 种方法均能实现较好的限流效果,且文中限流控制策略在抑制直流母线电流方面效果更优。

### 3.2 直流线路电流仿真分析

图 10 为不同限流方法对直流线路的限流效果对比,即对线路上 DCCB 开断指标的影响,CB12、CB21 直流线路电流的稳定初始值分别为 1.350 9 kA、-1.351 0 kA。可以看到,未采取限流措施时,流经 CB12 和 CB21 的电流在故障后 6 ms 时刻分别上升至 9.50 kA 和 2.83 kA,由于故障点离 MMC1 较近,因此 CB12 处的电流更大。采用方法 A 后,直流母线电流在故障后 6 ms 时刻分别下降至 5.38 kA 和 0.73 kA,下降了 50.6% 和 50.2%;采用文中限流控制策略后,直流母线电流在故障后 6 ms 时刻分别下降至 6.33 kA 和 1.12 kA,下降了 38.9% 和 40.9%。由

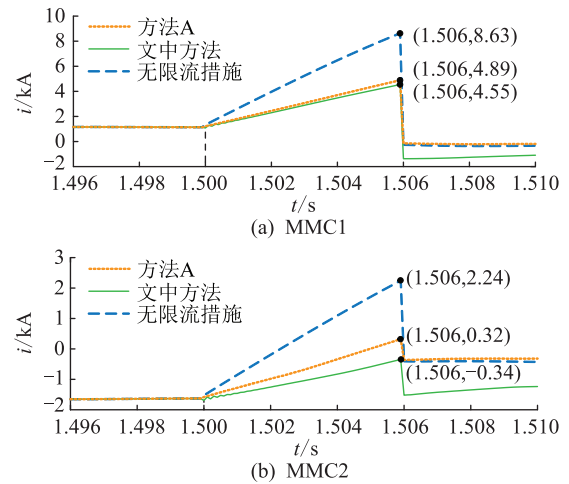


图 9 MMC1 与 MMC2 直流母线电流

Fig.9 DC bus currents of MMC1 and MMC2

于方法 A 在四端换流站均实施限流控制,因而限流效果较文中方法略优,但这加大了系统的运行成本。

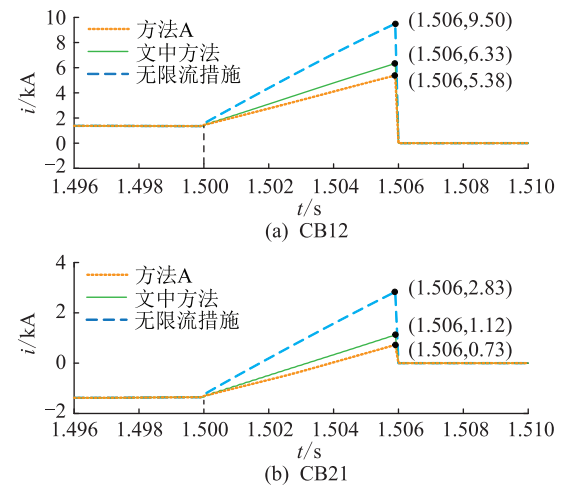


图 10 不同限流方法对直流线路电流的影响

Fig.10 Influence of different current limiting methods on DC line current

### 3.3 交流系统有功功率仿真分析

图 11 为不同限流方法故障前后交流系统的有功功率特性。可以看到,文中方法相比于方法 A 明显限制了短路故障后交流系统的有功功率馈入,减弱了实施限流控制策略后的系统功率波动,并且保证了一定的功率传输能力。对于故障点两侧近端换流站,其交流系统功率  $P_{AC1}$  和  $P_{AC2}$  的峰值分别由 875.68 MW 和 -76.16 MW 降低至 733.02 MW 和 -439.80 MW,以稳定初始值 600 MW、-800 MW 为基准,计算得出分别降低了 51.7% 和 50.2%,验证了文中 2.1 节的分析。

图 12 为故障前后各换流站交流系统的有功功率。可以看到,切换限流控制策略的近端换流站 MMC1 和 MMC2 功率波动略微变大,但由于有外环

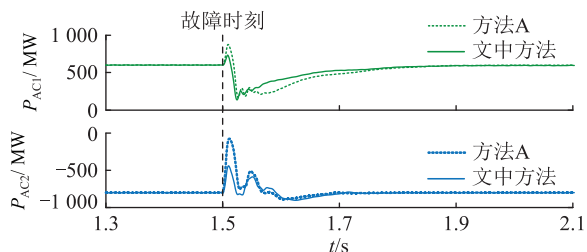


图 11 故障前后交流系统有功功率对比  
Fig.11 Comparison of active power of AC system before and after fault

控制指令预设限流环节的作用,其变化不明显,而远端换流站 MMC3 和 MMC4 的功率波动基本无变化。比较图 12(a)和图 12(b)可以看到,文中限流控制策略对于故障切除后的系统功率恢复影响不大,不论是否切换限流控制,功率恢复时间都基本相同。

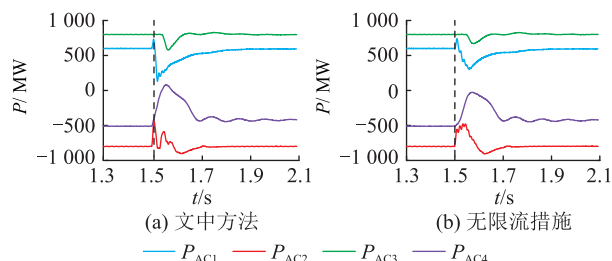


图 12 故障前后各换流站交流系统有功功率  
Fig.12 AC system active power of each converter station before and after fault

### 3.4 阀测交流电流仿真分析

图 13 为故障前后不同限流措施下 MMC1 的阀侧交流电流。由图 13(a)可知,未采取限流措施时,故障发生后交流电流增大,正、负峰值分别达到 3.49 kA 和 -2.76 kA。由 3.1 节和 3.2 节分析得到,方法 A 中所有换流站减投子模块至原来的 0.43 倍后,由于相应换流器上/下桥臂电压的降低以及交流侧注入功率的增加,故障情况下的交流电流增量变大,正、负峰值分别达到 4.78 kA 和 -5.59 kA。由图 13 (b)可知,采用文中限流控制策略后,由于减少了交流有功功率馈入,交流电流正、负峰值减小,分别为 3.12 kA 和 -3.77 kA,相比方法 A,正、负峰值分别下降了 34.7%和 32.6%,故障后交流电流最大值与无限流措施情况下的相比相差不大,限制了减投子模块导致的交流电流的增加。

### 3.5 桥臂电流仿真分析

图 14 为故障前后不同限流措施下的 MMC1 各相上/下桥臂电流,其中,  $I_{pa}$ 、 $I_{pb}$ 、 $I_{pc}$  分别为 a、b、c 三相上桥臂电流;  $I_{na}$ 、 $I_{nb}$ 、 $I_{nc}$  分别为 a、b、c 三相下桥臂电流。

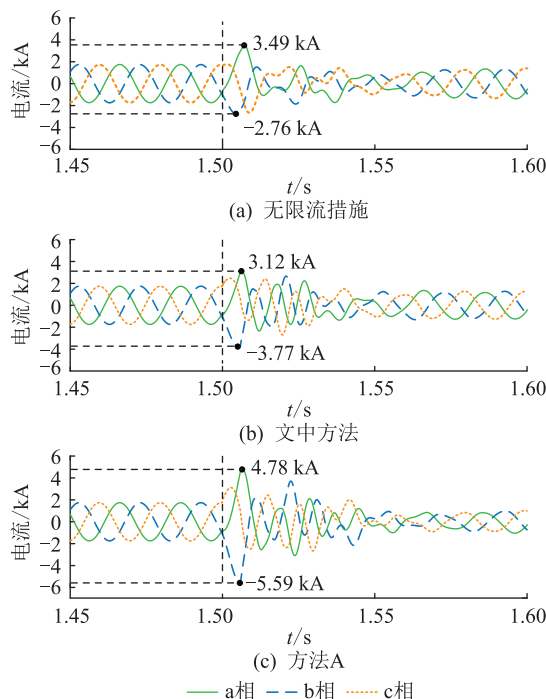


图 13 故障前后 MMC1 交流电流  
Fig.13 AC currents of MMC1 before and after fault

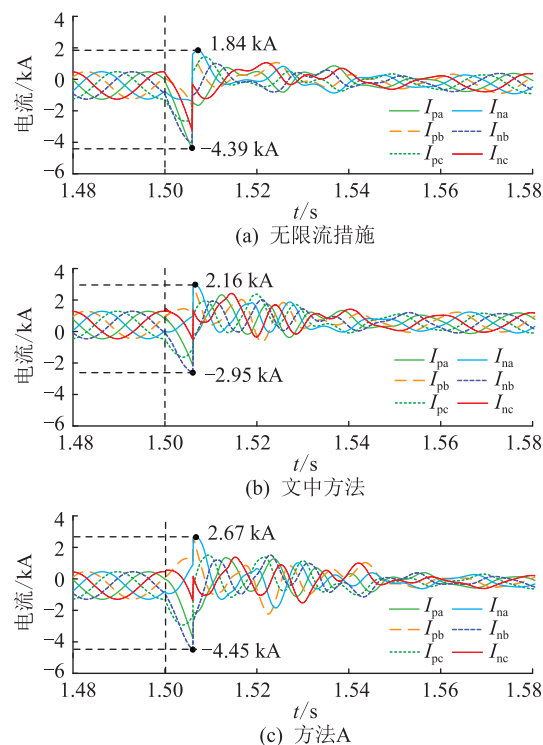


图 14 故障前后 MMC1 桥臂电流  
Fig.14 Bridge arm current of MMC1 before and after fault

由图 14(a)可知,未采取限流措施时,故障后的桥臂电流迅速升高,正、负峰值分别达到 1.84 kA 和 -4.39 kA。此外,桥臂电流包含直流电流分量和交流电流分量,而前者在故障后的增量远大于后者,因此其变化特性与直流电流相似。由图 14(c)可

知,采用方法 A 后,桥臂电流正、负峰值略有升高,分别达到 2.67 kA 和 -4.45 kA。虽然减投子模块减小了直流电流增量,但由图 11 分析可知,方法 A 增加了故障后的馈入功率,使得交流电流增量变大,因而桥臂电流峰值不会出现明显下降。由图 14(b) 可知,采用文中限流控制策略后,桥臂电流正、负峰值分别减小至 2.16 kA 和 -2.95 kA,相比方法 A 和无限流措施,最大峰值分别降低了 33.7% 和 32.8%,有效减小了子模块内电力电子器件的应力。

### 3.6 换流器出口直流电压仿真分析

图 15 为故障前后 MMC1 出口直流电压动态特性对比。可以看到,采用文中限流控制策略时,由于直流电压随着修正系数  $K_{c_{\text{fit}}}$  自适应调节,因而在故障后出现了 2~3 ms 的振荡,之后电压稳定在正常运行时的一半位置,验证了文中 2.1 节的分析,限制了子模块的过度减投,保证了一定的出口电压。故障切除后直流电压出现波动,电压值略升高,相较于方法 A,文中限流控制策略限制了故障后的有功功率馈入,使得直流过电压降低了约 5%,效果略优。

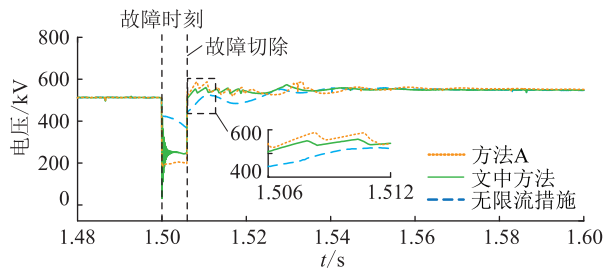


图 15 故障前后 MMC1 直流电压

Fig.15 DC voltage of MMC1 before and after fault

## 4 结论

文中提出一种适用于半桥型 MMC 直流电网的限流组合控制策略,利用柔性直流电网的高可控性,通过 2 个限流环节的分别作用,实现了直流侧故障的限流,并得出以下结论:

(1) 基于直流电压变化的自适应限流环节能够在故障后实时更新子模块修正系数  $K_{c_{\text{fit}}}$ ,调节子模块投入数量,从而大幅降低直流故障电流水平,同时避免子模块过度切除对系统造成的不利影响。

(2) 通过在系统外环控制器中预设清零指令,能够减少故障后交流系统馈入的功率,从而降低功率波动以及交流电流和桥臂电流的过流峰值,减小对换流器内电力电子器件的技术需求。

(3) 相比于仅减投子模块的限流措施,文中所提限流控制策略能够降低故障切除后的电压波动,

同时也能保证较好的直流电流、交流电流和桥臂电流的限流效果。

### 参考文献:

- [1] 刘振兴. 柔性直流输电技术的发展和應用研究[J]. 机电信息, 2018(15):14-15, 18.  
LIU Zhenxing. Research on the development and application of flexible HVDC transmission technology [J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(15):14-15, 18.
- [2] 夏成军, 刘志江, 杜兆斌. 基于变目标控制的 MMC-HVDC 控制策略[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3):7-13, 54.  
XIA Chengjun, LIU Zhijiang, DU Zhaobin. MMC-HVDC control strategy based on variable target control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3):7-13, 54.
- [3] 郝晓弘, 黄伟, 裴婷婷, 等. 基于模块化多电平换流器的高压直流系统直流侧故障限流技术研究[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(1):23-34.  
HAO Xiaohong, HUANG Wei, PEI Tingting, et al. Research on current limiting technology of DC-side fault of high voltage direct current system based on modular multilevel converter [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1):23-34.
- [4] 张和阳. 模块化多电平换流器在柔性直流输电技术中的应用[J]. 中阿科技论坛, 2021(9):104-107.  
Zhang Heyang. Application of modular multilevel converter in flexible DC transmission technology [J]. China Arab Science and Technology Forum, 2021(9):104-107.
- [5] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7):48-56.  
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7):48-56.
- [6] 杨景刚, 肖小龙, 刘瑞煌, 等. 光伏中压直流汇集系统双极短路特性分析及连锁过电压抑制[J]. 高电压技术, 2021, 47(1):205-213.  
YANG Jinggang, XIAO Xiaolong, LIU Ruihuang, et al. Characteristic analysis and chain overvoltage suppression for bipolar short circuit in photovoltaic MVDC collection and integration system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1):205-213.
- [7] 田洪江, 张英敏, 李俊松, 等. 共转移支路式混合直流断路器拓扑[J]. 高电压技术, 2020, 46(8):2714-2722.  
TIAN Hongjiang, ZHANG Yingmin, LI Junsong, et al. Topology of hybrid DC circuit breaker with common transfer branch [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8):2714-2722.
- [8] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21):175-186.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21):175-186.
- [9] 韩乃峥, 贾秀芳, 赵西贝, 等. 一种新型混合式直流故障限流

- 器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1647-1658, 1861.
- HAN Naizheng, JIA Xiufang, ZHAO Xibei, et al. A novel hybrid DC fault current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1647-1658, 1861.
- [10] 谭翔宇, 任丽, 唐跃进, 等. 饱和铁芯型超导限流器在柔直系统中的限流特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S2): 556-561.
- TAN Xiangyu, REN Li, TANG Yuejin, et al. Study on the current-limiting characteristics of saturated iron core superconducting fault current limiter in MMC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 556-561.
- [11] 许建中, 武董一, 俞永杰, 等. 电流换相 H 桥型混合式直流故障限流器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 235-242.
- XU Jianzhong, WU Dongyi, YU Yongjie, et al. A current-commutation-based H-bridge type hybrid fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 235-242.
- [12] 韩乃峥, 樊强, 贾秀芳, 等. 一种具备限流能力的多端口直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5172-5181, 5298.
- HAN Naizheng, FAN Qiang, JIA Xiufang, et al. A multi-port DC circuit breaker with current limiting capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5172-5181, 5298.
- [13] 王金健, 王志新. 一种具有限流能力的新型混合式高压直流断路器拓扑[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 143-149.
- WANG Jinjian, WANG Zhixin. A novel hybrid high-voltage DC circuit breaker topology with current limiting capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 143-149.
- [14] XU J Z, FENG M K, ZHAO C Y. Modular reciprocating HVDC circuit breaker with current-limiting and bi-directional series-parallel branch switching capability[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(4): 778-786.
- [15] 李国庆, 宋禛子, 王国友. 具有直流故障阻断能力的 MMC 不对称型全桥子模块拓扑[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 12-20.
- LI Guoqing, SONG Zhenzi, WANG Guoyou. Asymmetric full bridge sub-module topology of MMC with DC fault blocking capability[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 12-20.
- [16] 王琛, 谭开东, 王毅, 等. 具备直流故障清除和自均压能力的 MMC 移位全桥子模块拓扑[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 151-160.
- WANG Chen, TAN Kaidong, WANG Yi, et al. Topology of MMC oblique-connection full-bridge sub-module with capability of DC fault clearing and voltage self-balancing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 151-160.
- [17] 杨晓峰, 李泽杰, 薛尧, 等. 增强型柔性逆阻模块化多电平换流器的故障阻断特性分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2549-2557.
- YANG Xiaofeng, LI Zejie, XUE Yao, et al. Fault blocking performance analysis of enhanced flexible reverse blocking multi-level modular converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2549-2557.
- [18] 李国庆, 杨勇, 辛业春, 等. 一种具有故障阻断能力的改进混合型半桥 MMC[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 166-173.
- LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, et al. Modified hybrid half bridge MMC with fault blocking capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 166-173.
- [19] 贺之澜, 陆晶晶, 刘天琪, 等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 173-183.
- HE Zhiyuan, LU Jingjing, LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 173-183.
- [20] 赵成勇, 宋冰倩, 许建中. 柔性直流电网故障电流主动控制典型方案综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 3-13.
- ZHAO Chengyong, SONG Bingqian, XU Jianzhong. Overview on typical schemes for active control of fault current in flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 3-13.
- [21] 张帆, 许建中, 苑宾, 等. 基于虚拟阻抗的 MMC 交、直流侧故障过电流抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2103-2113.
- ZHANG Fan, XU Jianzhong, YUAN Bin, et al. Over current suppression control for AC and DC faults of modular multilevel converters based on virtual impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2103-2113.
- [22] LI C Y, ZHAO C Y, XU J Z, et al. A pole-to-pole short-circuit fault current calculation method for DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4943-4953.
- [23] 倪斌业, 向往, 周猛, 等. 柔性直流电网紧急限流控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3527-3537.
- NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on the emergency current-limiting control in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3527-3537.
- [24] CWIKOWSKI O, WICKRAMASINGHE H R, KONSTANTINOU G, et al. Modular multilevel converter DC fault protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 291-300.
- [25] 李国庆, 杨勇, 辛业春, 等. 基于桥臂电压控制的 MMC 直流短路主动限流方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 144-152.
- LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, et al. Active current-limiting method of MMC to handle DC short-circuit based on bridge arm voltage control[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 144-152.
- [26] 汤兰西, 董新洲. MMC 直流输电线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 490-498, 646.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498,



646.

- [27] LANGWASSER M, DE CARNE G, LISERRE M, et al. Fault current estimation in multi-terminal HVDC grids considering MMC control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3):2179-2189.
- [28] GAO S L, YE H, LIU Y T. Accurate and efficient estimation of short-circuit current for MTDC grids considering MMC control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1541-1552.

作者简介:



魏兴杰

魏兴杰(1996),男,硕士,研究方向为柔性直流输电(E-mail:695591959@qq.com);

张英敏(1974),女,博士,教授,研究方向为高压直流输电;

刘坤(1996),男,硕士,研究方向为柔性直流输电。

## Combined control strategy of half-bridge MMC DC side fault current limiting

WEI Xingjie, ZHANG Yingmin, LIU Kun, LI Baohong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The flexible direct current (DC) grid based on modular multilevel converter (MMC) has a high current peak value and a very fast rising speed during a DC short-circuit fault. In order to limit the impact of fault current on the system in a short period of time, a fault current-limiting combined control strategy suitable for half-bridge MMC was proposed. By using the high controllability of MMC itself, the fault limit can be achieved without external current limiting device, and it can reduce the technical requirements for DC circuit breakers. Firstly, two different current-limiting links and their basic principles in the current-limiting control strategy are explained. Secondly, the influences of the two current-limiting links on the DC fault current, AC current and bridge arm current are analyzed respectively, and the calculation formula of DC fault current under current-limiting control is deduced. Finally, a half-bridge MMC four-terminal DC grid model is built on the PSCAD/EMTDC platform for simulation analysis. The results show that the current limiting combined control strategy can effectively limit the DC fault current and reduce the power and voltage fluctuations of the near-end converter at the fault point. It can also reduce the peak value of AC current and bridge arm current.

**Keywords:** half-bridge modular multilevel converter (MMC); direct current (DC) grid; DC fault; fault current calculation; current-limiting link; combined control

(编辑 陆海霞)