

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231625

柔性直流电网故障电流复合抑制策略

刘宇昂¹, 戴志辉¹, 杨明玉¹, 李铁成²

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 柔性直流电网在直流侧发生短路故障后, 故障电流迅速达到较大峰值, 严重时甚至会危及整个系统电气设备的安全运行。为了在故障发生后的短时间内限制故障电流影响, 提出一种不利用附加装置的电流抑制策略。首先, 分析了直流电网结构与故障初期电流上升规律。然后, 根据所得规律提出一种包含两个环节的电流复合抑制策略, 给出电流抑制参数选取的原则, 并分析了抑制策略下短路电流的发展规律。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台搭建四端柔性直流电网模型进行仿真验证。结果表明, 所提电流抑制策略可以有效减小直流线路过流倍数, 降低换流器闭锁的概率, 且故障切除后恢复阶段电流平衡度更好。

关键词: 模块化多电平换流器; 直流电网; 电流抑制策略; 直流故障

Composite fault-current suppression strategy for flexible DC grids

LIU Yu'ang¹, DAI Zhihui¹, YANG Mingyu¹, LI Tiecheng²

(1. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: After a short-circuit fault occurs on the DC side of a flexible DC grid, the fault current quickly reaches a large peak, which can endanger the safe operation of the electrical equipment throughout the system. To limit the influence of fault currents within a short period after the fault, a current-suppression strategy without using additional devices is proposed. First, the structure of the DC grid and the law of rising of the current during the initial fault stage are analyzed. Then, based on the obtained law, a composite current suppression strategy including two links is proposed, the principle of selecting current-suppression parameters is given, and the development law of short-circuit current with the suppression strategy is analyzed. Finally, a four-terminal flexible DC grid model is built on the PSCAD/EMTDC platform for simulation verification. The results show that the proposed current suppression strategy can effectively decrease the overcurrent multiple of the DC line, reduce the probability of converter blocking, and achieve better current balance in the recovery phase after fault removal.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877084).

Key words: modular multilevel converter; DC power grid; fault current suppression strategy; DC fault

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, 被认为是解决可再生能源消纳问题的有效技术手段之一, 其在新能源并网^[1-4]、大容量远距离电能输送以及新兴城市直流配电网等领域均有着广泛的应用前景^[5-6]。然而, 柔性直流电网具有阻尼低、惯性小的特征, 直流系统一旦发生故障, 短路电流将以极快的速度传

播, 在几毫秒内就会对整个直流电网造成严重损坏^[7-9]。半桥型 MMC 在柔性直流电网中有着广泛的应用, 由于其不能通过闭锁隔离故障线路, 现有工程中往往采用直流断路器(direct current circuit breaker, DCCB)进行故障线路的隔离。然而现有直流断路器技术尚不成熟, 满足要求的直流断路器成本十分昂贵^[10-12]。以张北±500 kV 工程为例, 该工程所需 DCCB 总成本约占换流阀总成本的三分之二, 降低了直流电网的经济性, 制约了直流电网的发展, 为此引入合适的短路电流抑制措施是十分必要的。

现有直流限流措施主要可分为实体型限流措

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

施与控制型限流措施两种。实体型限流措施包括改进换流器拓扑结构、使用具有限流特性的断路器及加装限流装置等措施。

文献[13]在半桥 MMC 基础上提出一种基于半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)与改进型 HBSM 的混合型半桥 MMC, 将故障后桥臂电流换流至转移支路, 实现了故障电流的转移与阻断; 文献[14]提出一种具备限流能力、通态损耗低, 主限流电路采用晶闸管器件的多端口直流断路器结构; 文献[15]针对饱和铁芯型超导限流器在柔性直流输电中的应用进行了研究, 指出其对柔直系统短路电流峰值有很强的限制效果, 但对稳态短路电流几乎无用。然而, 以上措施均会进一步增加直流电网的投资, 工程实用效果不佳。同时在直流电网中安装过大的限流器件会给系统引入诸多问题, 如降低系统响应速度会带来系统稳定性问题等^[16-17]。

与实体型限流措施相比, 控制型限流措施因其不需要额外的经济成本, 只需通过改变系统的控制策略即可实现, 具有切换速度快、灵活性高等诸多优势。目前, 国内外学者已就该问题展开相关研究。文献[18]研究了限流电抗器在控制系统中的映射关系, 采用故障后增加虚拟电抗来实现故障电流的有效抑制; 文献[19]将文献[18]的方法推广至 MMC 型直流变压器, 仿真结果肯定了该方法的有效性; 文献[20]提出了在故障期间旁路所有子模块的思路, 可以有效抑制故障电流, 但无法实现故障初期限制电流且会延缓系统恢复; 文献[21]给出了一种紧急控制策略, 通过检测电压信号实现模式切换, 使电压指令值与 MMC 相连的直流线路最低电压保持一致, 然而采用保护动作信号作为切换信号, 一定程度上限制了电流抑制效果; 为此, 文献[22]在此基础上加入了一段电流自适应限流措施, 可以在故障初期的限流; 文献[23]分析了降低桥臂电压交直流分量对抑制短路电流的积极作用, 并引入虚拟电阻实现了自适应限流; 文献[24]提出了一种适应于辐射状柔直多端电网的主动限流方法, 根据比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制器计算与直流电流相关的桥臂电压参考值附加分量, 可实现限流目的, 但限流结果不理想且 PID 参数整定复杂。文献[25]对故障后桥臂电压进行调制, 并将其分解为直流分量与交流分量进行分别抑制。仿真分析指出只限制直流分量时, 交流出口特性变化不大; 同时限制交直流分量时, 限流效果更好, 但会影响交流出口电压特性, 可能导致桥臂电流过流。

基于上述分析, 本文提出一种适用于柔性直流电网的复合电流抑制策略。以故障后的直流电流量

作为参考设计主要电流抑制策略, 同时通过参考值置零环节减少交直流功率交换。针对前文策略无法实现自适应限流, 限流参数未给出明确选取原则等问题, 本文仅利用直流电流作为参考量, 并给出了准确的参数选择原则, 故障初期就可以快速实现电流抑制。最后, 在建立的四端柔直电网中对所提策略的有效性进行验证。

1 半桥型 MMC 结构及故障电流分析

1.1 MMC 换流站及直流电网构成

以四端环状柔性直流电网为例, 其典型的拓扑结构单线图如图 1 所示。4 个换流器均采用对称双极 MMC 结构, 其中 MMC 子模块为半桥型子模块, 直流输电线路两端均配置有限流电抗器 L 以限制故障电流的上升速度。图中: $P_1 \sim P_8$ 为线路两端的量测点; Line1—Line4 为直流架空输电线路。

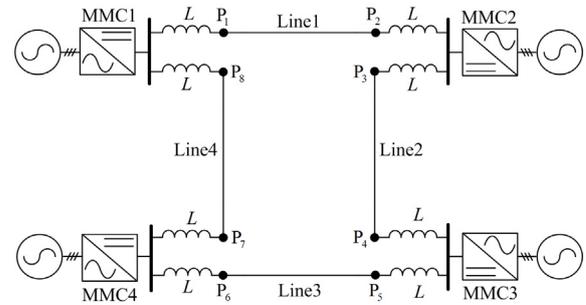


图 1 柔性直流电网典型拓扑

Fig. 1 Typical topology of flexible DC grid

目前, 半桥型 MMC 在柔性直流输电项目中应用广泛, MMC 换流站的拓扑结构和半桥型 MMC 结构如图 2 所示, 换流站通过架空线路与直流电网相连。换流站中各相均包含上、下两个桥臂, 每个桥臂中包含 N 个子模块。图 2 中: R_0 为桥臂等效损耗电阻; L_0 为桥臂电感; L_{ac} 为交流侧等效电感。

1.2 MMC 直流短路故障电流分析

为方便后续计算, 作如下假设: (1) 网侧三相电压和电流均为正弦波且对称; (2) 在直流故障发生前, 系统处于正常工作状态, 直流电压、直流电流值分别为 U_0 、 I_0 ; (3) 换流站 3 个桥臂的等效桥臂电阻、电感参数相等; (4) 主电路中开关均为理想元件, 不计其压降与损耗。

MMC 直流侧故障过程可以分为直流电容放电、续流二极管自然换向导通和二极管同时导通 3 个阶段^[26]。

故障初期, 故障电流以电容放电电流为主, 以换流器出口发生短路故障为例, 其放电过程中等效回路如图 3 所示。

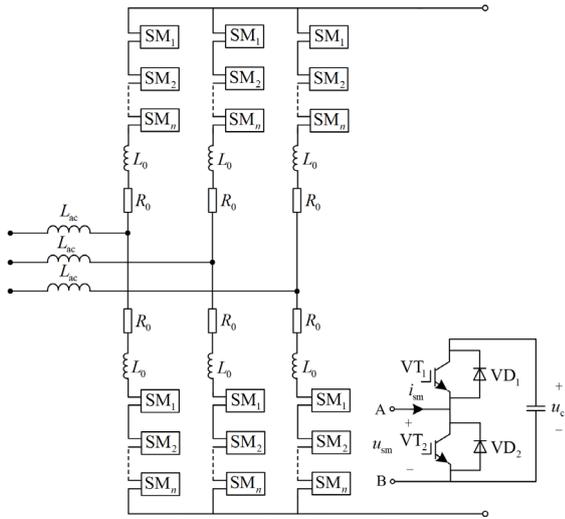


图2 MMC换流站结构

Fig. 2 Structure of MMC converter station

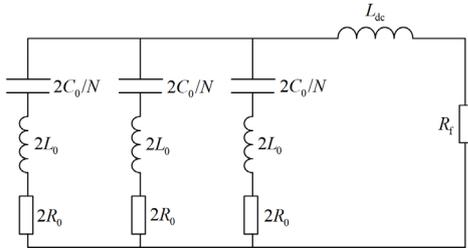


图3 电容放电等效回路

Fig. 3 Equivalent circuit for capacitors discharge

对上述故障回路中的电路参数进行集中简化,可以得到如图4所示的放电简化回路。

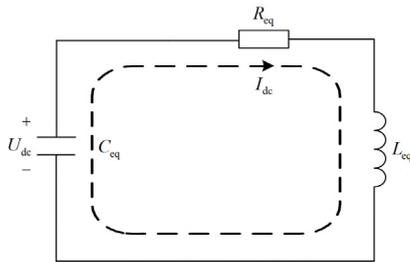


图4 电容放电简化回路

Fig. 4 Simplified circuit of capacitors discharge

经RLC等效后,等效电路中的参数大小如式(1)所示。

$$\begin{cases} R_{eq} = 2R_0/3 + R_f \\ L_{eq} = 2L_0/3 + L_{dc} \\ C_{eq} = 6C_0/N \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 分别为图4中的等效电阻、等效电感和等效电容值; L_{dc} 代表限流电抗器值; C_0 为

子模块电容值; R_f 为过渡电阻。

对于图4所示简化放电回路,由电路相关知识可以列出如式(2)所示方程。

$$\begin{cases} U_{dc} = I_{dc}R_{eq} + L_{eq} \frac{dI_{dc}}{dt} \\ I_{dc} = -C_{eq} \frac{dU_{dc}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为换流器直流出口电压; I_{dc} 为故障情况下的直流电流。

由式(2)可求得故障后直流电流如式(3)所示。

$$I_{dc}(t) = I_0 e^{-t/\tau} \left(\cos \omega t - \frac{1}{\omega \tau} \sin \omega t \right) + \frac{U_0}{\omega L_{eq}} e^{-t/\tau} \sin \omega t \quad (3)$$

式中: $\tau = 2L_{eq}/R_{eq}$; $\omega = \sqrt{\frac{4L_{eq}}{C_{eq}} - R_{eq}^2} / 2L_{eq}$ 。

鉴于故障后几毫秒内子模块电容电压一般在额定值附近小幅波动,可近似认为电容电压保持不变。将图4中的等效电容 C_{eq} 简化为一个恒定电压源 U_{dc} , 其电压值大小为故障前稳态电压 U_0 。上述故障等效回路可以简化为一个RL一阶电路,故障电流经简化计算如式(4)所示。

$$I_{dc}(t) = \left(I_0 - \frac{U_{dc}}{R_{eq}} \right) e^{-2t/\tau} + \frac{U_{dc}}{R_{eq}} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可以得出:故障后电流大小主要与故障时刻电流初始值 I_0 和换流器等效电压 U_{dc} 有关。其中, I_0 与系统故障前运行状态相关,不便于控制;相反, U_{dc} 可以通过在故障后改变子模块投入比例进行控制。故本文考虑通过在故障期间改变桥臂子模块投入数量作为抑制故障电流的主要策略。

2 故障电流抑制策略

由上文分析可知,切除子模块可以有效抑制故障电流。但同时子模块的切除也会使交流侧电压跌落,导致桥臂电流交流分量增加^[27]。为此,本文增设了基于直流电流的自适应抑制环节与基于功率交换的辅助抑制环节,具体策略如下。

2.1 基于直流电流的自适应抑制环节

柔性直流电网直流侧发生短路后,故障电流迅速增大,电流抑制策略应能快速有效地抑制故障电流,即兼顾快速性和有效性。为了实现更好的电流抑制效果,本文提出两段式故障电流抑制策略,通过改变子模块投入比例 K 来实现电流抑制。两段式抑制策略分别基于电流变化率与电流幅值,其表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} K_1 = 1 - k_a \frac{dI_{dc}}{dt} \\ K_2 = k_b \frac{I_{dcN}}{I_{dc} - I_0 + |I_0|} \end{cases} \quad K_1, K_2 \in [0, 1] \quad (5)$$

式中： K_1 、 K_2 分别对应一、二阶段子模块的投入比例； I_{dcN} 为直流电流的额定值； k_a 、 k_b 分别为一、二阶段的限流参数。

第一阶段为基于电流变化率的抑制环节，其原理为将直流电流 I_{dc} 经过微分环节得到电流变化率 dI_{dc}/dt ，再由 1 减去该电流变化率乘以系数 k_a 得到变化量，并经过 $[0, 1]$ 的限幅环节后，得到第一阶段投入比例 K_1 。

在正常运行条件下，直流电流始终维持在一个恒定值附近，电流波动很小，一阶段投入比例 K_1 保持在 1 附近。故障情况下，直流电流快速上升，一阶段投入比例 K_1 值减小，子模块投入数量减少，故障电流受到抑制。

第二阶段为基于电流幅值的抑制环节，经一阶段作用后，故障电流会受到初步抑制，但电流变化量仍会进一步增大，采用直流电流额定值除以实时值作为二阶段投入比例 K_2 。

故障发生后，当初始电流与故障电流方向相反时，直流电流幅值会先下降后上升，但两侧换流器的电流变化量始终是正值。为保证投入比例 K_2 始终小于 1，改用实时电流减去初始电流再加上初始电流的绝对值作为分母。此时， K_2 可保证值始终小于 1。

基于直流电流的自适应抑制环节实现过程如图 5 所示。鉴于第二段抑制环节影响较大，采用线路保护信号作为切换标志，即只在故障线路两端的换流器中投入该环节。

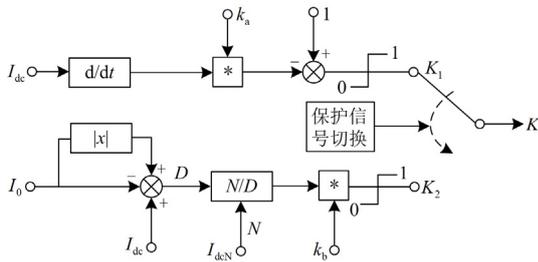


图 5 基于直流电流的自适应限流控制器

Fig. 5 Adaptive current limiting controller based on DC current

2.2 基于功率交换的辅助抑制环节

故障后由于 2.1 节中抑制环节的投入，换流器子模块投入数量减少，在减小直流侧换流器出口电压的同时，也减小了交流侧电压值，一定程度上会

导致交流侧电流的增大，进而造成桥臂电流应力增大，可能导致换流器提前闭锁。为此，考虑故障后将 d 轴参考电流短时置零。在一定程度上减少交流侧功率馈入对直流侧的影响，进而减小故障后的交流电流，实现桥臂电流的抑制，有效避免桥臂过流现象的出现。

基于上述考虑，本文提出的复合抑制策略同时采用 2.1 节基于直流电流的自适应抑制环节和 2.2 节基于功率交换的辅助抑制环节来实现故障后电流的抑制。其中 2.1 节措施主要用于直流侧电流抑制，2.2 节措施则通过减小交流侧功率馈入，进而减小桥臂电流过应力，保证整个电流抑制策略正常运行。

3 抑制策略下电流计算与参数选择

3.1 抑制策略下的故障电流计算

定功率控制是 MMC 常见的控制方式之一，以此为例，加入基于功率交换抑制环节的 MMC 部分控制结构，如图 6 所示。

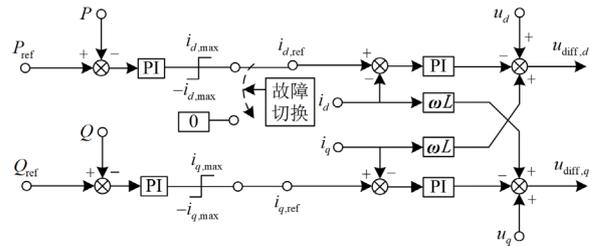


图 6 计及抑制环节的 MMC 控制结构

Fig. 6 MMC control structure with current suppression measures

图 6 中： P 和 P_{ref} 分别为有功功率及参考值； Q 和 Q_{ref} 分别为无功功率及参考值； $i_{d,ref}$ 、 $i_{q,ref}$ 分别为阀侧交流电流的 d 轴与 q 轴分量参考值； i_d 、 i_q 分别为阀侧交流电流的 d 、 q 轴分量； ω 为谐振角频率； u_d 、 u_q 分别为阀侧交流电压的 d 、 q 轴分量； $u_{diff,d}$ 、 $u_{diff,q}$ 分别为桥臂差模电压的 d 、 q 轴分量。

在交流侧电网三相电压平衡状态下，阀侧交流电压 q 轴分量 $u_q(t)$ 为零，交流系统向直流系统注入的有功功率 P 表示为

$$P = \frac{3}{2} u_d(t) i_d(t) \quad (6)$$

由图 6 可知，正常运行条件下，外环控制环节根据设定的有功功率参考值输出内环电流 d 轴分量参考值，内环控制环节则通过调节 MMC 桥臂差模电压 $u_{diff,d}(t)$ 、 $u_{diff,q}(t)$ 使其输出 $i_d(t)$ 与 $i_{d,ref}(t)$ 保持一致。

本辅助抑制环节在故障后将 d 轴电流参考值置零, 借助于换流器较快的控制速度, 系统内环控制器输出的 d 轴电流减小。由式(6)可知, 交流系统注入的有功功率也会随之减少。 I_{ac} 表示交流电流基频分量的峰值, 表达式如式(7)所示。

$$I_{ac} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U} \quad (7)$$

式中: U 为 MMC 阀侧基波相电压幅值; P 、 Q 分别为交流系统注入的有功功率与无功功率。换流器桥臂电流峰值由直流分量、交流分量构成, $I_{arm,max}$ 表示桥臂电流峰值, 具体如式(8)所示。

$$I_{arm,max} = \frac{1}{3}I_{dc} + \frac{1}{2}I_{ac} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)可知, 基于功率交换的抑制环节在降低有功功率交换的情况下, 也可以降低阀侧交流电流幅值与桥臂电流峰值。

针对直流侧故障电流的计算, 式(4)给出了故障条件下电流近似计算的公式。为进一步分析抑制策略加入后的直流电流变化规律, 本文将从抑制策略启动后展开分析。

对于本文所提基于直流电流的抑制策略而言, 一、二阶段的换流器等效电压 U_{dc} 分别变为原来的 K_1 、 K_2 倍, 将故障初始条件代入, 即可得到抑制策略下的故障电流值。

第一段抑制策略投入后, 将图 4 中电压源幅值替换为原来的 K_1 倍, 解得直流故障电流如式(9)所示。

$$I_{dc}(t) = \left(I_0 - \frac{U_0}{R_{eq}} \right) e^{-\frac{R_{eq}}{L_{eq} + k_a U_0} t} + \frac{U_0}{R_{eq}} \quad (9)$$

故障抑制策略切换至第二段时, 将切换时刻的边界条件与式(5)中的 K_2 表达式代入式(4)中, 计算即可得到第二阶段下的直流电流值。

3.2 电流抑制策略的参数选择

基于直流电流的抑制策略共包含 2 个参数的选择, 即 k_a 和 k_b 。其中 k_a 为第一段基于电流变化率的抑制参数, 选择时应考虑在有较好电流抑制效果的同时避免正常运行情况下的大幅波动。对式(4)进行一阶泰勒展开并求导, 同时考虑到金属性故障时 R_{eq} 远小于 L_{eq} , 经简化可得电流变化率如式(10)所示。

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{U_{dc}}{L_{eq}} \quad (10)$$

将式(10)中的 U_{dc} 替换为 $K_1 U_{dc}$, 并代入 K_1 表达式, 加入第一阶段抑制环节的电流变化率如式(11)所示。

$$\frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{U_{dc}}{L_{eq} + k_a U_{dc}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5)中的 K_1 表达式, 可得 k_a 表示为

$$k_a = \frac{1 - K_1}{K_1} \frac{L_{eq}}{U_{dc}} \quad (12)$$

第二阶段 K_2 值由式(5)中 $K_2 = k_b \frac{I_{dcN}}{I_{dc} - I_0 + |I_0|}$

计算可得, K_2 为前一项固定系数 k_b 与后一项电流幅值相关量 $\frac{I_{dcN}}{I_{dc} - I_0 + |I_0|}$ 的乘积, 后者在 2.1 节分析

中可保证故障期间始终小于 1, 且随故障发展逐渐减小, 实现电流的自适应抑制; k_b 只需要根据对于直流电流峰值的要求选择即可, 其取值范围为 [0,1]。

4 仿真验证

为验证所提电流抑制策略在直流电网中的适用性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的 ± 500 kV 柔性直流电网的仿真模型, 系统参数按照张北柔直电网示范工程设置, 直流输电线路采用依频模型(frequency dependent model, FDM), 4 条线路 Line1、Line2、Line3、Line4 的长度分别为 184.4、101、131.1、78.3 km, 限流电抗器电感值为 150 mH。系统稳定运行后, $t = 2$ s 时刻, 架空线 Line1 靠近 MMC1 侧线路长度为 10 km 处发生正极金属性接地故障。故障发生后, 基于电流变化率的第一段抑制环节率先投入, 初步限制故障电流, 基于功率交换的抑制环节也随之投入运行。线路保护检测到故障后, MMC1 与 MMC2 换流器的控制策略由第一段抑制环节切换至第二段抑制环节, 进一步限制故障电流发展; DCCB 切除故障后, 所有电流抑制环节退出, 系统恢复正常运行。目前, 直流电网主保护动作时限在 3 ms 内, 本文取故障后 3 ms 作为抑制环节的切换依据。仿真中, 第一段抑制环节参数 K_1 取 0.62, 对应 k_a 为 0.266, 第二段抑制环节对应参数 k_b 取 0.3。由于故障发生在 MMC1 出口附近, 故下文主要针对 MMC1 侧故障电流进行分析研究。

4.1 直流线路电流仿真分析

故障后不同方法下直流线路电流变化情况如图 7 所示。其中, 方法一为文献[25]所用策略, 故障后所有换流器的子模块投入数将降为原来的 0.43; 方法二为文献[22]所用策略, 包含电流自适应环节与电压自适应环节两段式抑制策略。由图 7 可以看出, 正常运行情况下, 直流线路 Line1 的稳态电流在 1.34 kA 附近。故障发生后, 如不采取任何

措施，线路电流在 6 ms 内迅速增加，峰值可达 13.64 kA。采取方法一后，电流下降至 7.69 kA，与不采取措施相比，下降了 48.3%；采取方法二后，电流下降至 7.23 kA，下降了 52.1%；采用本文所提方法后，直流线路电流下降为 6.62 kA，下降了 57.1%。

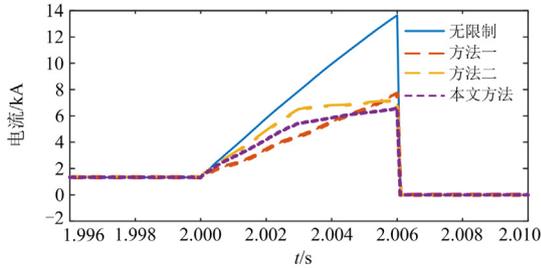


图 7 不同方法对直流线路电流的影响

Fig. 7 Influence of different methods on DC line current

对比线路电流限制结果可以发现，所提方法明显优于其他方法。对比方法一，其未实现自适应抑制；对比同为两段式的方法二，本文所提方法在参数选择上更优，且线路电流抑制效果更好。

4.2 直流母线电流仿真分析

图 8 为不同方法下直流母线电流的变化情况。正常运行情况下，MMC1 直流母线电流的稳态值在 1.48 kA 附近。故障发生后，如不采取任何措施，母线电流在 6 ms 内迅速增加，峰值达到 11.86 kA。采取方法一后，该电流下降至 6.78 kA，与不采取措施相比，下降了 49.0%；采取方法二后，电流下降至 4.32 kA，下降了 72.7%；采用本文方法后，直流母线电流下降为 4.28 kA，下降了 73.1%。相比方法一与方法二，本文方法的直流母线电流抑制效果上更优，对比效果接近的方法二，故障切除后母线电流波动更小。

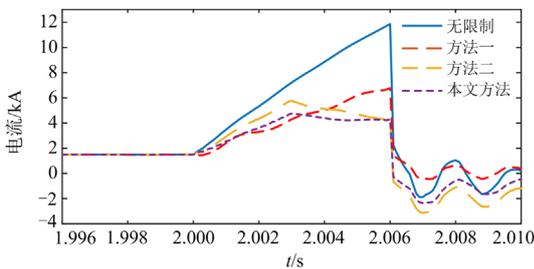


图 8 不同方法对直流母线电流的影响

Fig. 8 Influence of different methods on DC bus current

4.3 交流电流仿真分析

电流抑制策略投入后， K 值减小，持续降低了直流侧电压，交流侧电压也随之降低，带动交流电流增加。图 9 为不同方法下阀侧交流电流变化情况，

I_a 、 I_b 、 I_c 分别对应 A 相、B 相与 C 相电流。为叙述方便，以下提到的交流电流最大值均指某时刻对应的绝对值。如图 9(a)所示，不采取任何措施下，交流侧电流幅值与故障前相比基本不变；采取方法一后，故障期间交流电流最大值增加至 4.99 kA；采取方法二后，交流电流最大值增加至 7.09 kA；本文所提方法交流电流最大值增加至 6.93 kA。随着故障线路被切除、电流抑制策略退出后，对比方法一，本文方法在恢复期间交流电流畸变程度更小；对比方法二，所提方法电流峰值更小，畸变程度也更小。

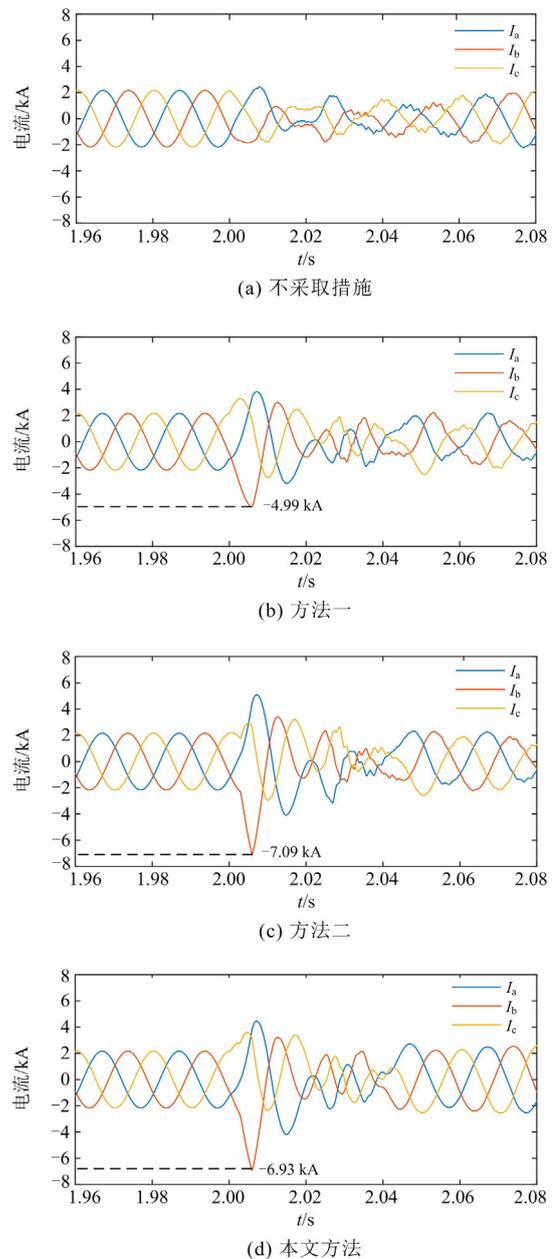


图 9 不同方法下阀侧交流电流对比

Fig. 9 Comparison of AC current on valve side under different methods

4.4 桥臂电流仿真分析

图 10 为不同方法下的换流器桥臂电流变化情况。图中, I_{Ba} 、 I_{Bb} 、 I_{Bc} 、 I_{Ta} 、 I_{Tb} 、 I_{Tc} 分别对应下桥臂 A 相、B 相、C 相与上桥臂 A 相、B 相、C 相电流值。换流器桥臂电流由交流侧和直流侧电流分量共同构成, 若不加入电流抑制策略, 桥臂电流的增量主要来自于直流侧的故障电流; 而加入主动电流抑制策略后, 桥臂电流的增量则来自于直流侧和交流侧的故障电流, 桥臂电流变化更为复杂。由图 10 对比可知, 不采取任何措施下时桥臂电流最

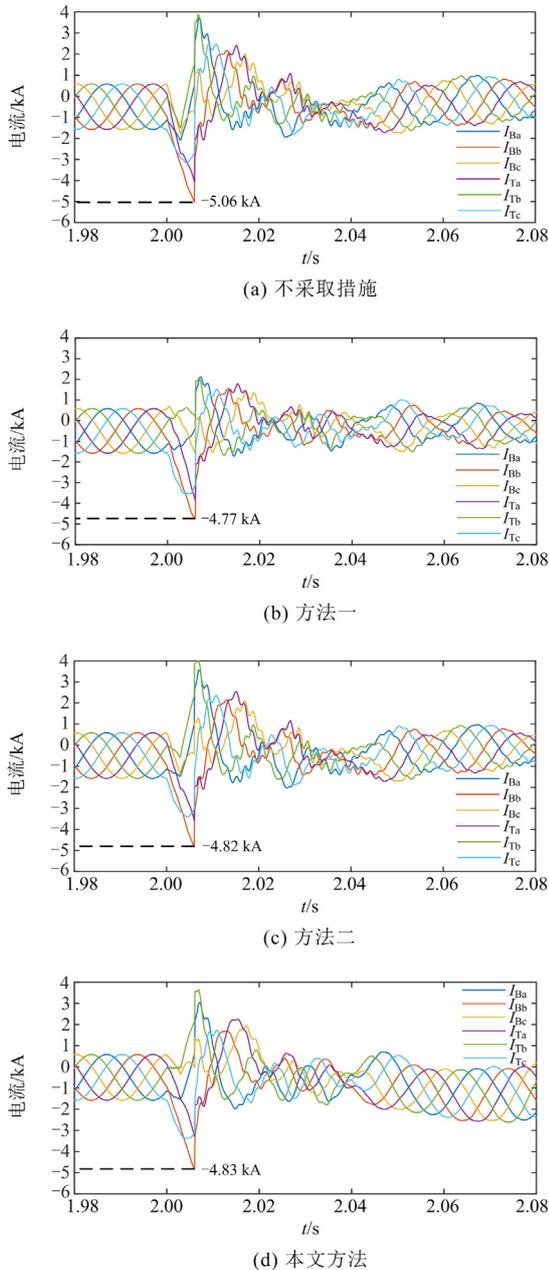


图 10 不同方法下的桥臂电流对比

Fig. 10 Comparison of bridge arm current under different methods

大值为 5.06 kA; 采取方法一后, 桥臂电流最大值为 4.77 kA; 采取方法二后, 桥臂电流最大值为 4.82 kA; 采取本文方法后, 桥臂电流最大值为 4.83 kA。相比不采取限制策略的结果, 桥臂电流峰值均有减小, 可有效避免桥臂电流过流。所提方法在实现更好的直流电流抑制效果的同时, 桥臂电流峰值较小、电流畸变程度更小。

4.5 总结分析

对比上述 4 类电流分析结果, 可以发现, 相比其他两种方法, 本文所提策略在直流线路及母线电流抑制效果上明显优于其他方法。同时, 阀侧交流电流与桥臂电流最大值虽不如一段式的方法一, 但与同为两段限流策略的方法二相差不大。综上所述, 所提方法在实现更好的直流电流抑制效果的前提下, 故障切除后恢复期间交流电流畸变更小, 具有明显的优越性。

5 结论

针对柔性直流电网线路发生短路故障后故障电流迅速增大的特征, 提出一种适用于半桥型 MMC 直流侧故障电流抑制的复合控制策略。仿真分析表明:

1) 所提策略可有效限制直流故障电流峰值, 同时避免了阀侧交流电流及桥臂电流过流, 且故障恢复期间电流平衡度更好。

2) 在故障期间, 基于直流电流的自适应抑制环节可根据电流变化特点实时调整, 改变投入的子模块数量。两段式的抑制环节可兼顾故障后的快速启动及对关键换流器电流的抑制。辅助抑制环节通过故障后将 d 轴电流参考值短时置零, 能够减少功率馈入, 降低桥臂电流峰值, 避免桥臂过应力现象的发生。

3) 复合电流抑制策略有效降低了 DCCB 对直流故障开断电流的技术要求, 该策略包含了两个限流参数, 可以根据工程实际需要进行自行调整, 具有一定的灵活性。

参考文献

- [1] 杜永安, 杜丽艳, 徐岩. 光伏发电接入柔直互联区域调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 1-9.
DU Yongan, DU Liyan, XU Yan. Frequency regulation for PV generation connected to an interconnection area by VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 1-9.
- [2] 周登波, 宋述波, 周勇, 等. 基于桶排序和电压离散度阈值的 MMC 子模块电压均衡算法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(9): 105-111.
ZHOU Dengbo, SONG Shubo, ZHOU Yong, et al. A

- voltage balancing algorithm for MMC submodules based on bucket sorting and voltage dispersion threshold[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(9): 105-111.
- [3] 随顺科, 任铁强, 邹强, 等. 连接风电系统的柔性直流电网 MMC 在线投入分析与验证[J]. *供用电*, 2022, 39(11): 26-31.
SUI Shunke, REN Tieqiang, ZOU Qiang, et al. Analysis and verification of MMC online entry into a flexible DC grid connected to wind power system[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(11): 26-31.
- [4] 邓超平, 晁武杰, 戴立宇, 等. 基于 MMC-BESS 和 MMC-MVDC 的柔性直流互联系统运行控制[J]. *供用电*, 2023, 40(7): 41-47.
DENG Chaoping, CHAO Wujie, DAI Liyu, et al. Operation control of flexible DC interconnection system based on MMC-BESS and MMC-MVDC[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(7): 41-47.
- [5] 戴志辉, 石旭. 基于测量阻抗电阻分量符号的“网孔型”柔直电网线路纵联保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 106-115.
DAI Zhihui, SHI Xu. Line pilot protection of a mesh DC grid based on the sign of the resistance component in measured impedance[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 106-115.
- [6] 曹帅, 刘东, 赵成功. 适用于风电经柔性直流并网系统的柔性耗能装置及控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(23): 51-62.
CAO Shuai, LIU Dong, ZHAO Chengong. A flexible energy dissipation device with control strategy for an HVDC wind power integration system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(23): 51-62.
- [7] 戴志辉, 刘自强, 刘雪燕, 等. 基于首行波曲率的柔性直流输电线路单端量保护[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(9): 1831-1841.
DAI Zhihui, LIU Ziqiang, LIU Xueyan, et al. Single-ended protection for flexible DC transmission line based on curvature of initial traveling wave[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1831-1841.
- [8] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(18): 31-42.
GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(18): 31-42.
- [9] 戴志辉, 秦昊宇, 李杭泽, 等. 基于反射系数和模型匹配的柔性直流电网单端量线路保护[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(11): 101-109.
DAI Zhihui, QIN Haoyu, LI Hangze, et al. Single-end line protection based on reflection coefficient and model matching in flexible DC power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(11): 101-109.
- [10] 陶彩霞, 王文博, 李泰国, 等. 基于电容换流的限流型混合式直流断路器[J]. *电网技术*, 2023, 47(12): 5138-5146.
TAO Caixia, WANG Wenbo, LI Taiguo, et al. Current limiting hybrid DC circuit breaker based on capacitor commutation[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12): 5138-5146.
- [11] 王秀环, 周军川, 靳祖磊, 等. 直流电网用直流断路器短时电流试验方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(3): 8-15.
WANG Xiuhuan, ZHOU Junchuan, JIN Zulei, et al. Research on the short-time current test method of DC circuit breaker used in DC grids[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(3): 8-15.
- [12] 田小健, 丁璨, 聂太平, 等. 一种含卸能电阻的直流断路器的参数设计及性能分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(6): 48-55.
TIAN Xiaojian, DING Can, NIE Taiping, et al. Parameter design and performance analysis of a DC circuit breaker with discharge resistance[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(6): 48-55.
- [13] 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.
- [14] 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.
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.
- [15] 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(增刊 2): 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.
- [16] 贺之渊, 陆晶晶, 刘天琪, 等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术及展望[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.
- [17] 戴志辉, 滕正伟, 邱宏逸, 等. 饱和铁芯型故障限流器对输电线路故障特征及保护的影响与对策[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(4): 1-13.
DAI Zhihui, TENG Zhengwei, QIU Hongyi, et al. Influence and countermeasures of saturated iron-core superconductive fault current limiter on fault characteristics and protection of transmission line[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(4): 1-13.
- [18] 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.
- [19] 丁然, 梅军, 管州, 等. 适用于 MMC 型直流变压器的直流故障主动限流控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 131-138.
DING Ran, MEI Jun, GUAN Zhou, et al. Active current limiting control method for DC fault of MMC based DC transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 131-138.
- [20] WANG Sheng, LI Chuanyue, ADEUYI O D, et al. Coordination of MMCs with hybrid DC circuit breakers for HVDC grid protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 11-22.
- [21] 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): 3527-3536.
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): 3527-3536.
- [22] 倪斌业, 向往, 周猛, 等. 半桥 MMC 型柔性直流电网自适应限流控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5609-5620.
NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive-current-limiting control of VSC-HVDC grid based on half-bridge MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5609-5620.
- [23] LACERDA V A, MONARO R M, PENA-ALZOL R, et al. Control-based fault current limiter for modular multilevel voltage-source converters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118.
- [24] LI Rui, XU Lie, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-361.
- [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] 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.
- [27] 唐欣, 潘一彬, 岳雨霏, 等. MMC 直流侧故障有源限流策略[J/OL]. 电网技术: 1-10[2023-12-07]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2393.
TANG Xin, PAN Yibin, YUE Yufei, et al. Active damping current-limiting strategy for DC faults of modular multilevel converters[J/OL]. Power System Technology: 1-10[2023-12-07]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2393.

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-02-22

作者简介:

刘宇昂(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流电网控制与保护; E-mail: liuyuanghai@163.com

戴志辉(1980—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统控制与保护。E-mail: daihuadian@163.com

(编辑 许威)