

基于 MMC 的光伏直流升压并网系统故障分析及限流控制策略

陈新岗^{1,2}, 张金京¹, 马志鹏¹, 曾慧敏¹, 贾勇^{1,2}

(1. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054)

摘要: 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的光伏直流升压并网系统为大容量并网提供了更多的可能。而光伏升压系统直流侧发生故障时暂态过程复杂, 故障电流上升迅速且峰值过高。针对此问题, 首先对系统直流侧双极短路故障时的直流升压变换器与 MMC 换流站进行了故障过程分析, 并通过故障回路分别计算出了可靠闭锁下流经短路点的故障电流。然后针对 MMC 换流站的故障电流, 依据其控制原理, 提出基于电压变化的主动限流控制策略。该控制通过引入电压变化量动态改变桥臂参考电压, 从而限制故障电流。最后通过 PSCAD 仿真模型验证了故障分析结果与限流效果, 经检验, 该控制策略可以有效减小断路器的开断电流以及桥臂过流峰值。

关键词: 光伏; 双极短路; 直流变换器; MMC; 限流控制

MMC-based fault analysis and current-limiting control strategy for a photovoltaic DC boost grid-connected system

CHEN Xingang^{1,2}, ZHANG Jinjing¹, MA Zhipeng¹, ZENG Huimin¹, JIA Yong^{1,2}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Chongqing Engineering Research Center of Energy Internet, Chongqing 400054, China)

Abstract: A modular multilevel converter (MMC)-based PV DC boost grid-connection system provides more possibilities for large-capacity grid-connection. However, the transient process of the DC side fault of a PV boosting system is complicated, and the fault current rises rapidly and the peak value is too high. To address this problem, first, the fault process of a DC boost converter and MMC converter station in the case of a bipolar short-circuit fault on the DC side of the system is analyzed, and the fault current flowing through the short-circuit point under reliable blocking is calculated through the fault circuit. Then for the fault current of the MMC converter station, based on its control principle, an active current limiting control strategy based on voltage variation is proposed, one which dynamically changes the reference voltage of the bridge arm by introducing voltage variation to limit the fault current. Finally, the fault analysis results and current limiting effect are verified by a PSCAD simulation model, and it is verified that the control strategy can effectively reduce the opening current of the circuit breaker and the peak overcurrent of the bridge arm.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2020jcyj-msxmX0349).

Key words: photovoltaic; bipolar short circuit; DC converter; MMC; current limiting control

0 引言

以太阳能为代表的可再生能源在我国能源结构

中占据了举足轻重的地位^[1-4]。基于柔性直流输电的直流并网技术具有损耗低、传输效率高、无电压越限、结构易扩展等优势^[5-7], 是未来新能源大规模接入系统的趋势所在。

大功率、高变比的 DC/DC 变换器是大型光伏高压并网的关键^[8-12]; 而模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)作为并网逆变

基金项目: 重庆市自然科学基金项目资助(cstc2020jcyj-msxmX0349); 重庆理工大学研究生教育高质量发展行动计划资助(gz1cx20233092)

器更能提高系统的可靠性与传输效率^[13-14]。这类换流器的使用，系统中将含有大量储能元件，不论直流侧还是交流侧发生故障时，在故障瞬间皆会储能元件造成不同程度的过电压与过电流^[15-18]。其开关器件 IGBT 过流能力一般为额定电流的两倍左右，如果不加以限制，故障发生数毫秒内便会超其限值，IGBT 将无法可靠闭锁^[19-21]。直流电抗器可以有效地限制故障电流，但受到成本和稳定性的影响，直流输电线路不适合安装较大的限流电抗^[22]。因此，有必要对过电流抑制开展研究。

文献[23]基于传统的阀控过流保护，提出故障穿越策略以及对保护定值进行了优化，有效提高了阀控的灵敏性，但对光伏并网来说还需要考虑分析光伏和直流升压系统的特性。文献[24]提出将光伏模块短路的过电压有源抑制方法，有效解决了变换器闭锁后光伏阵列输出的消纳问题，但对过流问题仍未解决。文献[25]在光伏汇集系统采用基于 Buck-Boost 的开关电容拓扑，可以有效减小故障电流、提高运行特性，但该方法需要配置额外电路，潜在地增加了系统的故障风险。文献[26]提出减小桥臂的交直流电压分量以抑制故障电流的上升，有效减小了电流且不影响系统恢复，但该方法需要根据系统的具体情况进行参数设计。文献[27-28]提出了基于虚拟阻抗的过流抑制策略，将实际电路中的电抗器特性映射到控制器，对交直流侧电流都有很好的抑制作用，但虚拟阻抗的取值过大会影响系统稳定运行，其限流效果相对不足。

本文基于所搭建的光伏直流升压并网系统，首先对其直流送出线路双极短路故障进行暂态分析，讨论其故障电流发生的机理；其次针对换流站的故障电流，提出一种基于电压变化的限流控制策略，在不增加额外设备的同时，减小桥臂故障电流对阀控和直流设备的保护压力；最后通过 PSCAD 仿真验证所述故障分析与限流策略的有效性。

1 光伏直流升压并网系统

1.1 光伏直流升压并网系统拓扑结构

光伏直流升压并网系统如图 1 所示，系统主要由光伏阵列、DC/DC 变换模块以及模块化多电平换流器组成。光伏发电单元通过组串式结构发出直流电，经高功率、大变比的直流升压变换器升压。直流故障发生后，换流器中的电力电子开关将通过闭锁来阻断故障电流，以防止自身过流。

1.2 光伏直流升压并网系统控制策略

系统整体控制对象主要分为 DC/DC 模块与

MMC 换流站两部分。其中 DC/DC 升压模块采用 IPOS 连接的有源钳位隔离升压全桥变换器 (BFBIC)，如图 2 所示。BFBIC 拓扑结构中， L_{boost} 为升压电感， S_1-S_4 为开关管，T 为隔离变压器， D_1-D_4 为整流二极管； C_{in} 为储能电容， C_0 为输出侧电容； S_0 与 C_c 构成钳位电路，可以有效减小开关变化时的电压尖峰问题、提高升压质量^[29]。

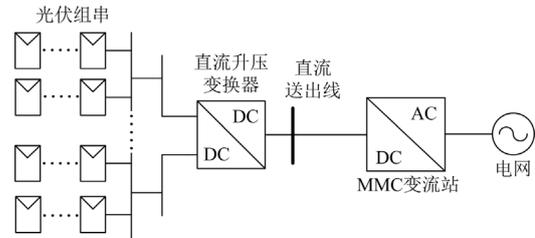


图 1 光伏直流升压并网系统

Fig. 1 Photovoltaic DC boost grid-connected system

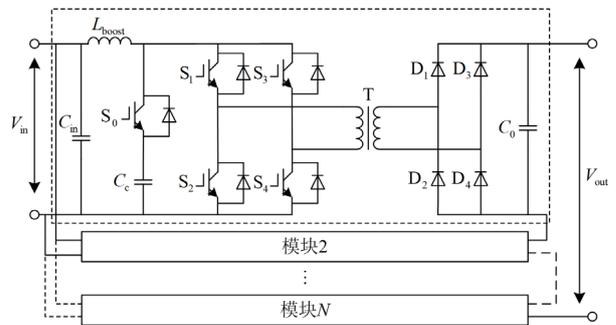


图 2 直流升压变换器结构图

Fig. 2 Structure diagram of DC boost converter

针对光伏系统的特点，升压变换器主要为 MPPT 控制策略，光伏阵列通过 MPPT 得到最大功率工作点，生成控制开关管 S_1-S_4 的 PWM 信号。如图 3 所示， U_{pv} 与 I_{pv} 为光伏阵列的电压与电流， U_{mppt} 为最大功率工作电压。

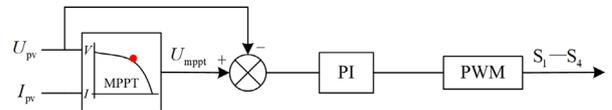


图 3 直流升压变换器控制结构图

Fig. 3 Structure diagram of DC boost converter control

MMC 换流站采用半桥型子模块，拓扑结构如图 4 所示，换流站内其变压器阀侧与网侧采用 Y_n/D 联结。当交流侧故障时，该联结方法保证了阀侧设备不受零序电流的干扰。图中，MMC 有上下 6 个桥臂，每个桥臂含有 n 个子模块，子模块结构如图 4 中的左下部分所示， i_a 、 i_b 、 i_c 为交流侧输出电流。

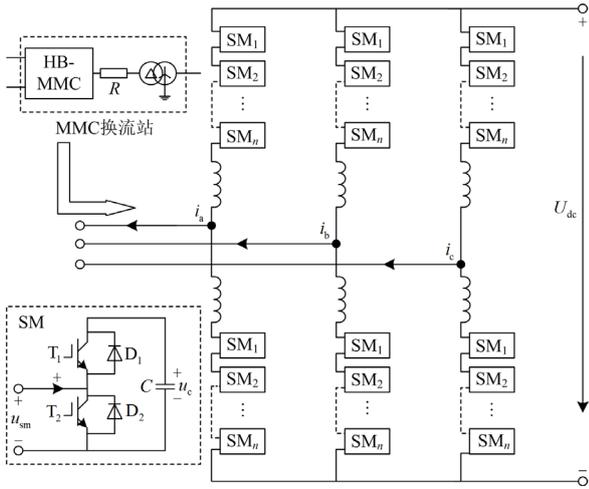


图 4 MMC 换流站结构框图

Fig. 4 Block diagram of MMC converter station structure

换流站的并网控制策略按功能可分为系统级控制、站级控制与阀级控制, 如图 5 所示。并网系统中换流站主要采用定电压与定无功控制, 系统级提供相应的控制参考值。外环控制将参考值与实值经过 PI 调节得到 dq 轴的参考电流, 最后经过内环解耦可得 MMC 期望的交流电压波形; 阀级控制的调制采用最近电平逼近调制, 为保证投入子模块电容电压均衡, 加入均压排序控制与调制方法进行配合。

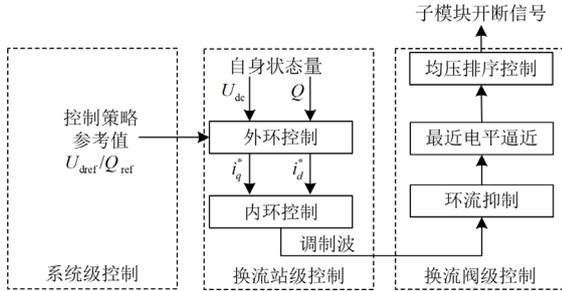


图 5 换流站并网控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of grid-connected control strategy of converter station

2 双极短路故障过程分析

系统正常运行时, MMC 站级定电压控制会将直流输电线路电压始终保持在额定值; 线路发生单极接地故障时, 故障级的对地电压将会迅速下降, 非故障级电压则会上升至 2 倍额定电压, 其极间电压仍保持一致, 不会发生严重的过电流^[30-31]。当线路发生极间短路故障时, 直流送出线的极间电压迅速下降, 故障电流将会上升至额定电流的数十倍^[32]。因此, 本文针对光伏电站送出线路的极间短路故障进行分析。

2.1 直流变换器故障过程分析

图 6 为直流变换器故障等效回路图。

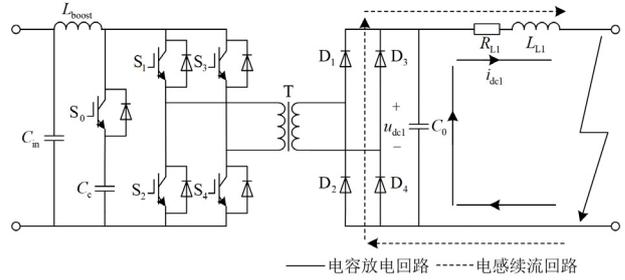


图 6 直流变换器故障等效回路

Fig. 6 DC converter fault equivalent circuit

直流变换器正常运行时, 它的工作状态可以分为两种模式: 其一是整流桥交替导通, 电感 L_{boost} 的能量通过整流桥向电容充电; 其二是开关器件处于同时导通的工作周期, 此时电源对电感充电, 仅电容向外送电。当故障发生时, 存储在电感 L_{boost} 上的能量将会向电容 C_0 充电。在变换器闭锁前, 还存在光伏侧向故障点馈入电流的情况, 但会受到电感 L_{boost} 的阻碍, 且闭锁时间极短, 其值要远远小于电容放电电流。结合以上变换器特性可以说明在发生故障时, 其故障电流主要为电容放电电流。

根据故障回路图可知, 电容 C_0 的放电回路方程为

$$\begin{cases} u_{dc1} = L_{L1} \frac{di_{dc1}}{dt} + R_{L1} i_{dc1} \\ i_{dc1} = C_0 \cdot \frac{du_{dc1}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{dc1} 为变换器高压侧电压; i_{dc1} 为电容放电电流; R_{L1} 、 L_{L1} 分别为线路电阻与电感。

假设故障发生时, 直流电压与电流为 U_0 、 I_0 。因为直流线路的等值电阻远小于线路电抗值, 则忽略不计。由此可得直流变换器的故障电流为

$$i_{dc1} = U_0 \sqrt{\frac{C_0}{L_{L1}}} \sin(\omega t) + I_0 \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中, ω 为振荡角频率, $\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{L1}C_0} - \left(\frac{R_{L1}}{2L_{L1}}\right)^2} \approx$

$$\sqrt{\frac{1}{L_{L1}C_0}}$$

2.2 MMC 故障过程分析

MMC 故障等效回路如图 7 所示, 其中 R_{L2} 和 L_{L2} 为线路阻抗。

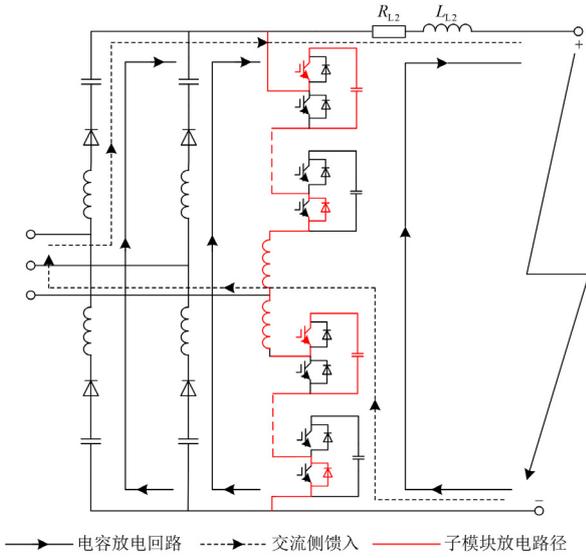


图 7 MMC 故障等效回路

Fig. 7 MMC fault equivalent circuit

以闭锁为界限，其故障电流闭锁前主要为电容放电电流和交流电源的馈入电流，具有上升速度快的特点。当过流保护识别到故障，换流器即会进行闭锁时，子模块电容则不再放电，此时故障电流主要来自交流电源；当交流断路器动作，则交流馈入回路断开时，故障电流将以某一时间常数衰减。

对闭锁前的故障进行分析，此阶段交流侧提供的短路电流主要为电抗器续流，交流侧与换流器不会出现过流，而线路会因电容放电出现过流。依据图 7 所示的模块放电路径，可以简化电容放电电路，如图 8 所示。其中 C_{mmc} 、 L_{mmc} 、 R_{mmc} 分别为 MMC 变换器的桥臂电容、电感与电阻； N 为运行时投入的子模块数量； u_{dc2} 为换流器直流侧电压。

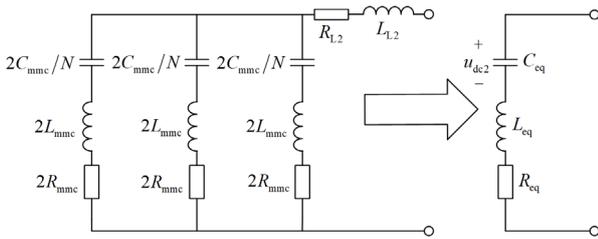


图 8 电容放电等效电路

Fig. 8 Capacitive discharge equivalent circuit

将电路进行等效后可以得到

$$\begin{cases} C_{eq} = 3 \cdot \frac{2C_{mmc}}{N} = \frac{6C_{mmc}}{N} \\ L_{eq} = \frac{2L_{mmc}}{3} + L_{L2} \\ R_{eq} = \frac{2R_{mmc}}{3} + R_{L2} \end{cases} \quad (3)$$

由此可以得到回路方程：

$$\begin{cases} u_{dc2} = L_{eq} \frac{di_{dc2}}{dt} + R_{eq} i_{dc2} \\ i_{dc2} = C_{eq} \frac{du_{dc2}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

直流线路一般为低阻尼运行状态，则 $R < 2\sqrt{L/R}$ ，所以可以求得故障电流，如式(5)所示。

$$i_{dc2} = e^{\alpha t} \left[\left(\frac{U_0}{wL_{eq}} - \frac{\alpha I_0}{w} \right) \sin(wt) + I_0 \cos(wt) \right] \quad (5)$$

式中： α 为衰减系数， $\alpha = R_{eq} / 2L_{eq}$ ； w 为振荡角

频率， $w = \sqrt{\frac{1}{L_{eq} C_{eq}} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \right)^2}$ 。

由式(5)分析可以得到：故障电流随时间呈振荡衰减变化，在系统参数一定的情况下，电流幅值主要受初始电压、电流以及振荡角频率的影响，随着初始电压、电流的减小以及振荡角频率的增大，故障电流随之减小。

3 限流控制策略

3.1 基于电压变化的限流控制

由 2.2 节分析可知，在故障发生时，通过减少阀侧投切的子模块数量、降低故障初始电压 U_0 与等效电容 C_{eq} ，可有效抑制故障电流。

由 MMC 的工作原理可知，正常运行状态下，上下桥臂的参考电压分别为

$$\begin{cases} u_{pj}^* = \frac{U_{dc}}{2} + u_{vj}^* \\ u_{nj}^* = \frac{U_{dc}}{2} - u_{vj}^* \end{cases} \quad (6)$$

式中： u_{pj}^* 、 u_{nj}^* 分别为上下桥臂电压； $j = a, b, c$ ； U_{dc} 为直流侧电压； u_{vj}^* 为 MMC 交流电压幅值。

本文提出限流系数 K_M ，将上下桥臂参考电压按 K_M 倍比例缩小以限制故障电流。直流侧故障时，直流电压将会发生跌落，利用电压变化构成限流系数 K_M ，根据电压跌落情况动态改变桥臂参考电压， K_M 定义为

$$K_M = 1 - \frac{U_{ref} - U_{dc}}{U_{ref}} \quad (7)$$

式中， U_{ref} 为直流参考电压。当电压未发生跌落时，限流系数 K_M 稳定为 1，不会影响换流器的正常运行。随着限流控制的启动，电压跌落越大则换流器限流系数 K_M 将越大，限流效果越明显。图 9 为基

流特性以及限流控制策略,在 PSCAD 搭建了如图 1 所示的光伏直流升压并网系统,其中包含 30 个光伏发电单元,每个光伏发电单元额定容量为 1 MW,将以汇集的形式通过 MMC 并网。直流变换器采用 MPPT 控制,MMC 换流器采用双闭环解耦控制。表 1 为直流变换器的相关参数,表 2 为 MMC 换流站的相关参数。

表 1 直流变换器仿真参数

Table 1 DC converter simulation parameters

参数	取值
Boost 电感/mH	2
输出滤波电容/ μ F	50
钳位电容/ μ F	20
BFBIC 模块数量/个	4
变压器变比	1:10
采样频率/kHz	10

表 2 MMC 换流站参数

Table 2 MMC converter station parameters

参数	取值
额定容量/MVA	30
单个桥臂 SM 数量/个	30
桥臂 SM 电容/ μ F	3000
桥臂电抗器/mH	50
子模块导通电阻/m Ω	5
直流母线电压/kV	± 30
交流电网电压/kV	35
额定频率/Hz	50
线路电抗/(mH/km)	0.56
线路电阻/(Ω /km)	0.03

4.1 故障暂态特性仿真

对直流变换器与 MMC 变换器故障暂态特性的分析,以 20 km 的直流送出线为例,设定系统稳定运行后的 2 s 时发生金属性双极短路故障,且发生故障位于 MMC 出口处。

在未加限流电抗器的情况下,此时仅考虑线路电抗(线路电感为 11.2 mH),结合表中数据,并根据式(2)得到直流变换器侧故障电流的理论峰值为 2.01 kA,仿真结果如图 11 所示,其仿真峰值为 1.95 kA。同理,由式(5)可以得到 MMC 直流侧故障电流峰值为 6.51 kA,图 12 为换流站直流侧的输出电流,仿真得到故障电流峰值为 6.69 kA。两者的故障电流理论分析与仿真结果基本一致,故此分析方法可以作为所提限流控制策略的理论依据。

4.2 限流控制策略仿真

在模型的交流侧与直流侧分别设置断路器,其中直流侧采用混合型直流断路器,完成关断总耗时约 5 ms。系统稳定运行后,在 $t = 2$ s 时发生金属性

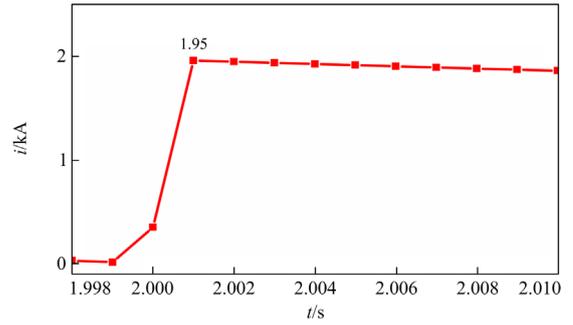


图 11 直流变换器输出故障电流

Fig. 11 DC converter output fault current

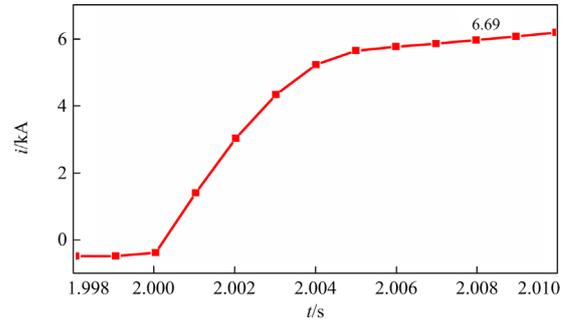


图 12 MMC 换流站直流侧输出故障电流

Fig. 12 Output fault current of MMC converter station DC side

双极短路故障,故障时间持续 0.1 s。2.005 s 时直流变换器与 MMC 换流站闭锁,2.01 s 时跳开相应断路器,2.25 s 后重新合闸断路器,2.275 s 后解锁直流变换器与 MMC 换流站。

图 13 为有无限流情况下的直流侧电流,从图中可以看出,未限时故障电流上升迅速;而采用限流控制后,平均上升速率减小了约 31.4%。

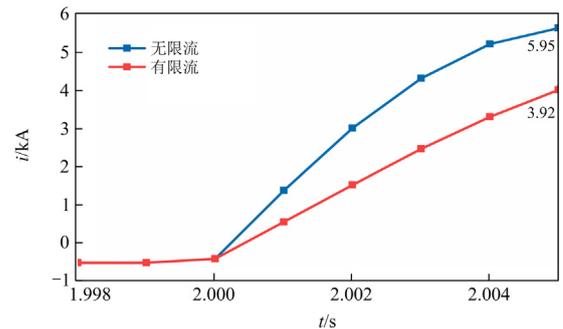
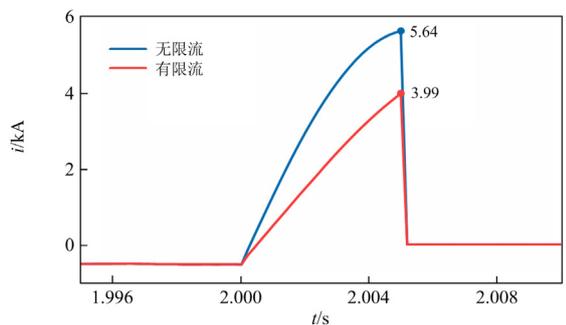


图 13 有无限流控制的直流侧电流

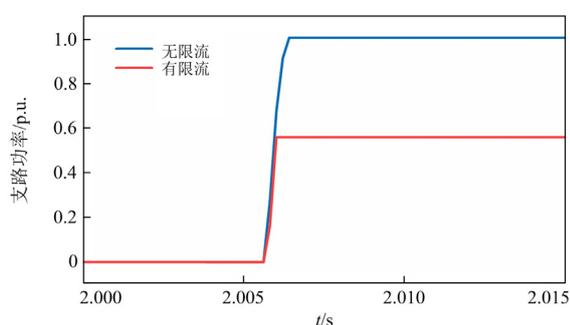
Fig. 13 DC side current of with infinite current control

图 14 为有、无限流控制下直流断路器的工作特性对比图。在保证同一速动性要求下,流经直流断路器快速开关处的电流由 5.64 kA 降为 3.99 kA,降低了 29.3%,其中耗能支路中避雷器的吸能降低

了 43.1%。这充分表明, 限流策略可以实现较好的限流效果, 且显著减少了直流断路器的开断容量。



(a) 流经断路器电流



(b) 断路器耗能支路功率

图 14 限流控制下断路器的工作需求

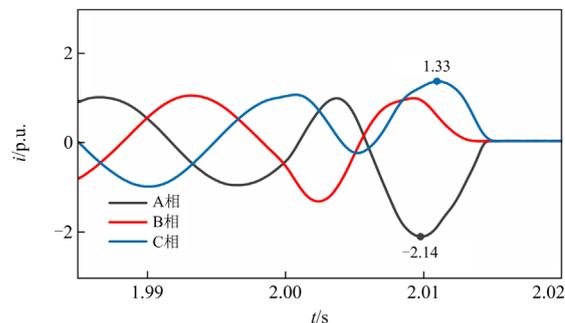
Fig. 14 Operating requirements of circuit breakers under current limiting control

有、无限流控制时的故障后交流侧电流变化如图 15 所示。故障发生后, 光伏输送功率的降低导致交流电流呈现初期减小而后反向增大的变化规律。未加限流控制的交流侧电流最大值达到 2.14 p.u.; 而加入限流控制后, 由于交流侧电压的跌落, 交流电流最大值将会增至 2.89 p.u.。这表明, 在限流控制启动下, 交流侧电流将会有明显的升高。

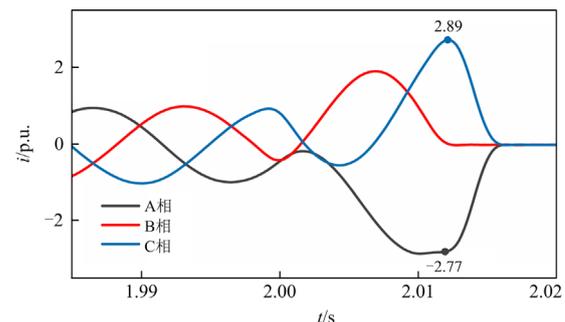
根据式(11)可知, 桥臂电流幅值由交流侧电流与直流电流共同决定, 其中直流侧的增幅要大于交流侧的增幅。因此桥臂电流的变化主要由直流电流决定。图 16 为故障后桥臂最大电流, 由图可知, 当启动限流控制后, 桥臂电流峰值由 2.31 kA 降为 1.95 kA, 且闭锁时间有所延长, 这充分表明桥臂电流得到了抑制。

在故障发生后, 随着限流程度的增加, 子模块的减投程度增大, 子模块的电容放电程度将会不断减小, 且限流控制时交流分量增大导致电容充电速度加快。图 17 为故障后上桥臂模块电容平均电压。由图可知, 限流控制时, 故障后的子模块电容平均电压将会升高, 故障清除后子模块能快速恢复至正

常运行状态, 从而减轻了系统的波动程度。



(a) 无限流



(b) 有限流

图 15 故障后的交流侧电流

Fig. 15 AC side current after fault

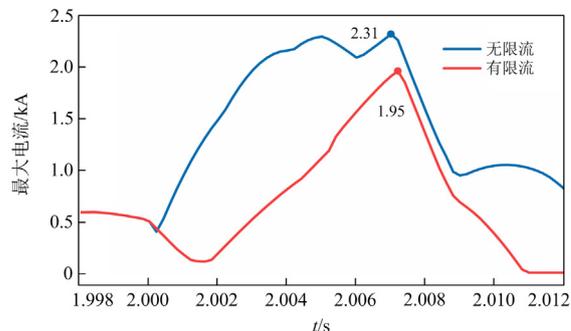


图 16 故障后桥臂最大电流

Fig. 16 Maximum current of bridge arm after fault

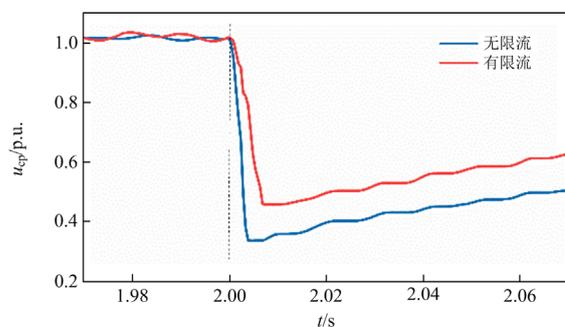


图 17 故障后上桥臂模块电容平均电压

Fig. 17 Average voltage of upper bridge arm capacitor

图 18 为故障后有、无限流的有功功率变化。故障发生的最初时段, 变换器仍处于并网状态, 这时输送功率将会出现亏损。虽然在限流控制时, 理论上交流电流的增大将会导致功率波动程度的增加。但图 18 的仿真结果表明, 限流控制对系统恢复的影响较弱, 故障清除重合闸后, 功率到达平稳的时间基本一致。

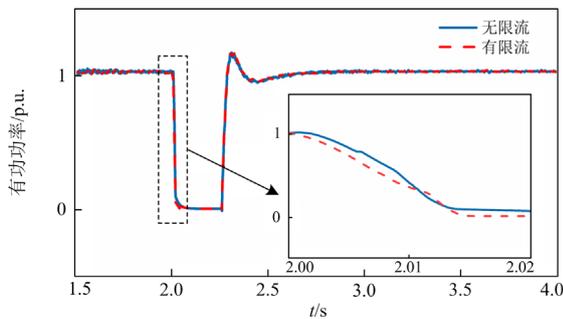


图 18 故障后 MMC 的有功功率变化

Fig. 18 Active power variation of MMC after fault

5 总结

1) 针对光伏直流升压并网线路发生短路故障, 依据其控制原理, 考虑系统可靠闭锁情况下的故障暂态过程, 给出了直流侧短路电流计算式, 可进一步为保护整定提供依据。

2) 提出基于送出线电压变化的限流控制策略, 减少投入子模块数量的方式可以有效限制 MMC 换流站的直流侧故障电流。随着电压跌落程度的加深, 限流效果逐步增强。

3) 仿真结果表明, 直流故障发展过程迅速, 提出的短路电流计算式具有一定准确性; 同时, 提出的限流控制方法可以有效降低断路器的开断容量要求, 减小子模块内的电力电子器件电流应力。

参考文献

- [1] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2-13.
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2-13.
- [2] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75-83.
JING Tao, CHEN Geng, WANG Zihao, et al. Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 75-83.
- [3] 肖瑶, 钮文泽, 魏高升, 等. 太阳能光伏/光热技术研究现状与发展趋势综述[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 392-404.
XIAO Yao, NIU Wenzhe, WEI Gaosheng, et al. Review on research status and developing tendency of solar photovoltaic/thermal technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 392-404.
- [4] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [5] 张新燕, 赵理威, 赵理飞, 等. 新能源多馈入直流并网与传统交流并网对比[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1121-1128.
ZHANG Xinyan, ZHAO Liwei, ZHAO Lifei, et al. Contrasting analysis on multi-infeed VSC and AC grid-connection of new energy[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1121-1128.
- [6] 韩伟, 杨睿璋, 刘超, 等. 混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 179-188.
HAN Wei, YANG Ruizhang, LIU Chao, et al. DC fault characteristics and fault current suppression strategy of three-terminal hybrid HVDC system based on LCC and hybrid MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 179-188.
- [7] 唐欣, 黄晟, 潘一彬, 等. 直流故障下基于交流侧馈能的 MMC 换流站主动限流策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 56-64.
TANG Xin, HUANG Sheng, PAN Yibin, et al. C Active current limiting strategy of an MMC converter station based on AC side energy feedback under a DC fault[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9): 56-64.
- [8] 杨志勇, 杨炳元, 任永峰, 等. 基于单端高频电流量的 MMC-MTDC 输电线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 151-160.
YANG Zhiyong, YANG Bingyuan, REN Yongfeng, et al. Transmission line protection scheme of MMC-MTDC based on single terminal high frequency current[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 151-160.
- [9] 唐志扬, 胡健, 焦提操, 等. 用于直流微电网互联的双向 DC-DC 变换器设计[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 148-155.
TANG Zhiyang, HU Jian, JIAO Ticao, et al. Design of bidirectional DC-DC converter for DC microgrid

- interconnection[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2022, 43(5): 148-155.
- [10] 全月, 王志远, 李彬彬. 集成直流断路器功能的高压大容量 DC/DC 变换器[J]. *中国电力*, 2021, 54(10): 46-54.
QUAN Yue, WANG Zhiyuan, LI Binbin, et al. A High-voltage large-capacity DC/DC converter integrated with the function of DC circuit breaker[J]. *Electric Power*, 2021, 54(10): 46-54.
- [11] 倪翰文, 李庚, 鲍刚, 等. 基于能量平衡的模块化多电平变换器调制方法[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(7): 9-15, 24.
NI Hanwen, LI Geng, BAO Gang, et al. A modulation method of modular multilevel converter based on energy balance[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(7): 9-15, 24.
- [12] 黄欣科, 王环, 周宇, 等. 兆瓦级光伏中压直流并网变换器研制及实证应用[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(14): 150-157.
HUANG Xinke, WANG Huan, ZHOU Yu, et al. Development and empirical application of megawatt-level medium-voltage DC photovoltaic grid-connected converter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(14): 150-157.
- [13] ALOTAIBI S, DARWISH A. Modular multilevel converters for large-scale grid-connected photovoltaic systems: a review[J]. *Energies*, 2021, 14(19): 6213.
- [14] 王丰, 夏镜冰, 勾雅婷, 等. 基于 MMC 的规模化光伏汇集系统电—热调控方法研究[J/OL]. *高压电器*: 1-13 [2023-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20221206.1825.001.html>.
WANG Feng, XIA Binbing, GOU Yating, et al. MMC-based electric-thermal regulation method for large-scale PV collection system[J/OL]. *High Voltage Apparatus*: 1-13 [2023-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20221206.1825.001.html>.
- [15] 郑涛, 黄予园, 宗伟, 等. 光伏并网系统故障二次谐波产生机理及其对变压器保护的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(12): 13-22.
ZHENG Tao, HUANG Yuyuan, ZONG Wei, et al. Second harmonic generation mechanism of a photovoltaic grid-connected system fault and its influence on transformer protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(12): 13-22.
- [16] LIU Y, HE B, BIAN C, et al. Research on dual-mode fault suppression strategy of AC isolation and current limiting based on hybrid MMC[J]. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2022.
- [17] 张成明, 陈德志, 赵文良. 基于 IGBT 选型的整流器、逆变器损耗计算新方法研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(4): 81-88, 116.
ZHANG Chengming, CHEN Dezhi, ZHAO Wenliang. New loss calculation method of rectifier and inverter based on IGBT selection[J]. *Smart Power*, 2022, 50(4): 81-88, 116.
- [18] 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 networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(2): 173-183.
- [19] 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.
- [20] 艾小清, 袁旭峰, 熊炜, 等. 柔直配电系统混合型 MMC 可靠性评估[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(9): 88-95.
AI Xiaoqing, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Reliability evaluation of hybrid MMC for flexible DC distribution system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(9): 88-95.
- [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): 3527-3537.
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.
- [22] GAO Y, HAN Y, ZHANG J, et al. Study on fault current characteristics and current limiting method of plug-in devices in VSC-DC distribution system[J]. *Energies*, 2019, 12(16): 3159.
- [23] 郭贤珊, 李探, 李高望, 等. 张北柔性直流电网换流阀故障穿越策略与保护定值优化[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(24): 196-202.
GUO Xianshan, LI Tan, LI Gaowang, et al. Fault ride-through strategy and protection setting optimization of converter valve in Zhangbei VSC-HVDC grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 196-202.
- [24] 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.

[25] 田艳军, 官仕卿, 王毅, 等. 光伏直流汇集系统中母线开关电容稳压控制及短路电流抑制[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1375-1384.
TIAN Yanjun, GUAN Shiqing, WANG Yi, et al. Voltage stabilization control and short circuit current suppression of switching capacitor in photovoltaic DC collection system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1375-1384.

[26] 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.

[27] 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.

[28] ZHAO P, GUO F, WEN A, et al. A method of suppressing overcurrent in DC microgrid based on virtual impedance[C] // The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020), July 2-3, 2020: 2038-2044.

[29] 鞠昌斌, 冯伟, 王环, 等. 基于 Boost 隔离升压拓扑的光伏直流并网变流器的设计与实现[J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 752-758.
JU Changbin, FENG Wei, WANG Huan, et al. Design and implementation of photovoltaic DC grid-connected converter based on Boost isolated full-bridge topology[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(3): 752-758.

[30] 张博文, 闫龙, 陆凌辉, 等. 光伏电站汇集系统单极接地故障的皮尔逊相关系数识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2): 116-121.
ZHANG Bowen, YAN Long, LU Linghui, et al. Single-pole grounding fault identification method for photovoltaic power station collection system based on Pearson correlation coefficient[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2): 116-121.

[31] 张鑫宇, 樊艳芳, 马健, 等. 适用于光伏直流升压变换器的故障诊断及保护策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 68-77.
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Fault diagnosis and protection strategies for photovoltaic DC-DC converters[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(11): 68-77.

[32] 刘海金, 李斌, 温伟杰, 等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3463-3480.
LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3463-3480.

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-08-25

作者简介:

陈新岗(1968—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电气设备状态监测、智能发电运行与控制、信号采集与信号处理; E-mail: chenxingang@cqut.edu.cn

张金京(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为直流配网的保护与控制; E-mail: 460791112@qq.com

马志鹏(1988—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。E-mail: mazhipeng@cqut.edu.cn

(编辑 姜新丽)