

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.001

基于 MMC 的中压直流配电网极间短路故障保护策略

吕家乐¹, 吴在军¹, 窦晓波¹, 陈庆², 杨景刚², 肖小龙²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

摘要:近年来基于模块化多电平换流器(MMC)的直流配电网得到快速发展,但因其直流线路极间短路电流上升速度快,电力电子器件耐流能力差等原因,直流侧故障保护成为了亟需解决的问题。针对这一问题,考虑半桥型 MMC(HBMMC)和全桥型 MMC(FBMMC)2种不同的拓扑结构,分别分析中压直流线路极间短路情况下的故障特性并推导了故障电压电流的解析表达式。对于 HBMMC 提出一种桥臂限流模块和直流断路器配合的保护策略,解决了故障电流衰减缓慢和稳态电流过大的问题,降低了对直流断路器开断能力的要求。利用 FBMMC 子模块的故障电流自清除能力,提出一种改进的基于换流器解锁的快速恢复保护策略,减少瞬时性故障的系统停运时间。最后结合实际工程参数,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了保护策略的有效性和实用性。

关键词:直流配电网;模块化多电平换流器;直流极间短路;故障特性;保护策略

中图分类号:TM726

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0002-08

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展,直流配电技术凭借其线路成本低、损耗小、供电可靠性高、环保等优势受到了国内外学者的广泛关注^[1]。模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)相较于传统的电网换相型换流器(line commutated converter, LCC)具有不存在换相失败、输出特性好、结构模块化、能实现快速解耦控制等优势,在直流配电网得到了越来越多的应用^[2-5]。但基于 MMC 的直流配电网发生极间短路后子模块电容迅速放电,故障电流会在几毫秒内达到峰值,对子模块内的绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)和二极管造成不可逆的冲击^[6-10],所以直流故障保护策略是构建直流配电网亟需解决的技术难题。

直流侧故障特性分析是直流配电网保护的基础,文献[11]采用忽略暂态过程子模块投切实时数量变化的电路模型分析方法,对 MMC 直流侧单极接地和极间短路故障等值电路模型进行研究,为保护策略的设计提供理论依据。文献[12]对全桥型 MMC(full-bridge MMC, FBMMC)的直流故障机理及故障清除控制策略进行了研究。针对直流配电网线路故障保护,文献[13]提出一种基于直流断路器的直流电流突变率保护策略,快速隔离直流线路故障,但并未给出具体的保护整定方案。文献[14]利用 FBMMC 的短路电流清除能力,提出一种单极对

地短路故障快速恢复保护策略,能够在交流侧低阻抗接地方式下避免交流断路器跳闸快速恢复功率传输,但该方法未考虑过渡电阻的影响。文献[15]在此基础上采用 Pearson 相关系数计算正负极电流相关性的单极接地故障识别方法,该方案可快速、可靠地识别区内外故障,并具有一定耐受过渡电阻的能力。

文中针对基于不同拓扑结构 MMC 的双端直流配电网系统,研究了半桥型 MMC(half-bridge MMC, HBMMC)和 FBMMC 直流侧极间短路故障特性,并建立数学模型推导了暂态电压电流的数学表达式。在此基础上,对 HBMMC 提出基于桥臂限流模块和直流断路器配合的保护策略,加速故障断开的同时降低了直流断路器开断容量。基于全桥型子模块直流故障闭锁特性^[16],进一步改进传统的基于换流器重解锁的故障保护策略,实现系统的快速恢复。最后在 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了所提保护方案的可行性。

1 直流配电网电路模型

1.1 直流配电网模型

文中采用双端直流配网的拓扑结构,主要保护对象为中压 ± 10 kV 直流线路,其双端 11 电平 MMC 直流配电网模型如图 1 所示。交流侧变压器采用 Yn/ Δ 型接地方式,当直流侧发生单极接地时,接地支路、直流系统和交流系统不构成放电通路。因此直流侧不会出现过电流,故障极母线电压为零,非故障极电压上升为直流侧电压^[17-20]。在直流线路耐压允许的情况下无需闭锁换流站,系统可继续运

收稿日期:2019-01-11;修回日期:2019-03-12

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

行一段时间。而极间短路故障产生的过电流严重危害直流配电网系统,所以文中主要针对直流侧极间短路进行故障特性分析和保护策略研究。

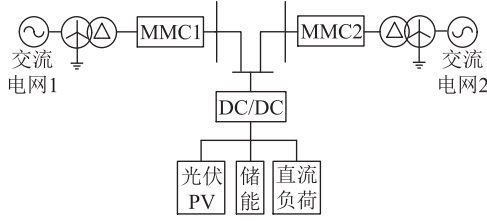


图1 直流配电网模型

Fig.1 Model of DC distribution network

1.2 MMC 电路拓扑

典型的 MMC 换流器电路拓扑如图 2 所示,由 3 个相单元,共 6 个桥臂组成,上、下桥臂由多个功率子模块(sub-module, SM)和桥臂电感 L_{arm} 串联而成。

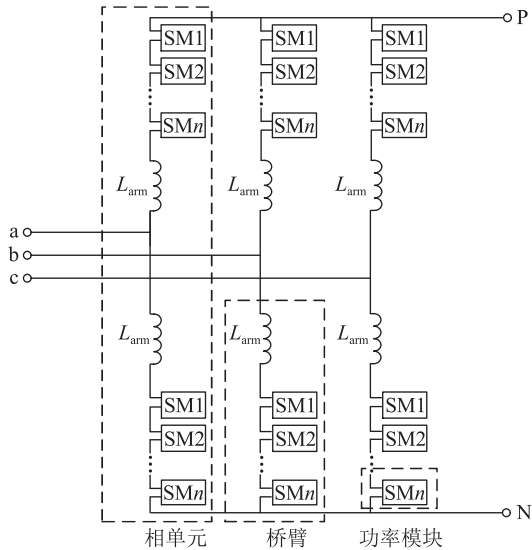


图2 MMC 拓扑结构

Fig.2 Topology of MMC

常用的 SM 拓扑主要有半桥型 SM (half-bridge SM, HBSM)、全桥 SM (full-bridge SM, FBSM) 和钳位双子模块 (clamped double SM, CDSM), 如图 3 所示。HBSM 凭借其结构简单、成本低等优势在实际工程中取得广泛应用,但其无法有效切断自身故障电流。FBSM 和 CDSM 具备直流故障清除能力,但 CDSM 电力电子器件较多,成本较高^[16-21]。文中主要对 HBMMC 和 FBMMC 展开研究。

2 HBMMC 极间短路故障保护

2.1 HBMMC 极间故障特性

当 HBMMC 直流侧发生极间短路故障时,交流侧通过各相桥臂子模块二极管向直流侧故障点注入短路电流,同时各个 SM 的电容器通过 IGBT 向短路

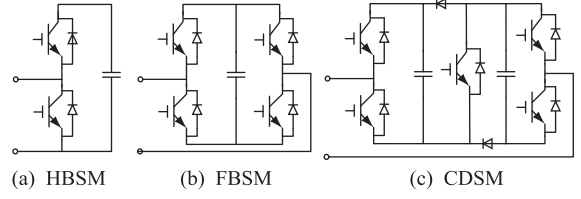


图3 子模块电路拓扑

Fig.3 Topology of sub-modules

点放电^[22-23],以单相桥臂为例,其放电路径如图 4 所示(加粗部分表示电流流过)。

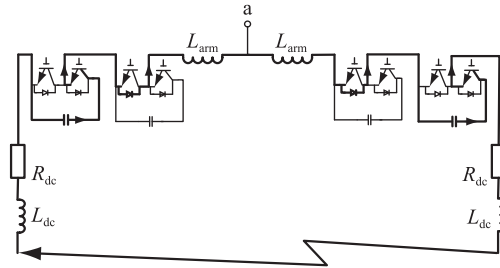


图4 HBMMC 闭锁前放电路径

Fig.4 Discharge path of HBMMC before blocking

换流器闭锁前,短路电流主要由处于投入状态的 SM 电容放电电流决定,其等效放电回路如图 5 所示。由此可得直流侧故障电流和桥臂电容电压如式(1)和式(2)所示。

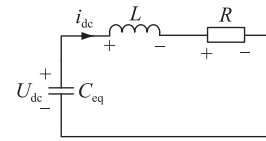


图5 SM 电容等效放电电路

Fig.5 Equivalent discharge circuit of SM capacitor

$$i_{dc}(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\frac{U_c(0)}{\omega L} \sin \omega t - \frac{I_L(0) \omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \beta) \right] \quad (1)$$

$$U_c(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\frac{U_c(0) \omega_0}{\omega} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_L(0)}{\omega C_{eq}} \sin \omega t \right] \quad (2)$$

式中: $U_c(0)$ 与 $I_L(0)$ 分别为故障时刻桥臂电容电压和直流电流; R, L, C_{eq} 分别为短路回路等效电阻、电感和电容; R_f 为过渡电阻,极间短路故障过渡电阻较小^[20],可近似认为 $R_f \approx 0$; $R = 2R_{dc}$; $L = 2L_{dc} + 2L_{arm}/3$; $C_{eq} = 3C/N$; $\tau = 2L/R$; $\beta = \arctan(\omega\tau)$; $\omega = \sqrt{1/(LC_{eq}) - (1/\tau)^2}$; $\omega_0 = \sqrt{1/(LC_{eq})}$ 。极间短路故障换流器闭锁前的电容放电阶段仿真曲线如图 6 所示。

换流器闭锁后,短路电流仍由两部分组成:桥

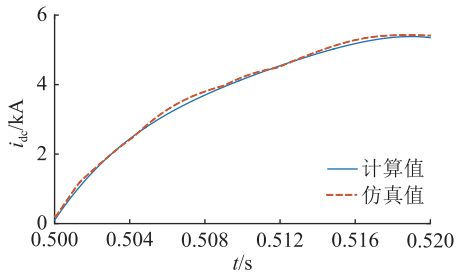


图6 HBMMC 闭锁前直流侧短路电流

Fig.6 DC side short-circuit current of HBMMC before blocking

臂电抗通过二极管的续流和交流系统向故障点注入的短路电流^[24-26]。其中桥臂电抗上的续流占主体,等效放电回路如图7所示,可知直流侧放电电流如式(3)所示。

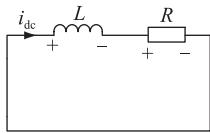


图7 桥臂电抗续流等效电路

Fig.7 Equivalent discharge circuit of L_{arm}

$$i_{dc}(t) = I_{L0} e^{-\frac{t}{\tau'}} \quad (3)$$

式中: $\tau' = L/R$; I_{L0} 为闭锁时刻的直流电流。极间短路故障换流器闭锁后的桥臂电抗放电阶段仿真曲线如图8所示。换流器在 0.515 s 闭锁,故障电流下降缓慢,稳态电流达 1.75 kA。

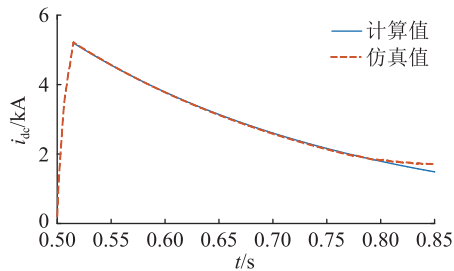


图8 HBMMC 闭锁后直流侧短路电流

Fig.8 DC side short-circuit current of HBMMC after blocking

2.2 HBMMC 故障保护策略

由上述分析可知,当直流电缆发生极间短路故障时,HBMMC 闭锁后故障电流具有暂态衰减慢、稳态幅值高的特性。据此提出一种桥臂限流模块和直流断路器配合的 HBMMC 直流配网极间短路保护策略。其具体流程如图9所示。

(1) 故障判定: 直流线路极间故障时,故障点电压快速下降为零,电流迅速上升。由此配置直流低电压过电流保护,其动作判据为式(4)和式(5)。

$$|U_{pos} - U_{neg}| < U_{set} \quad (4)$$

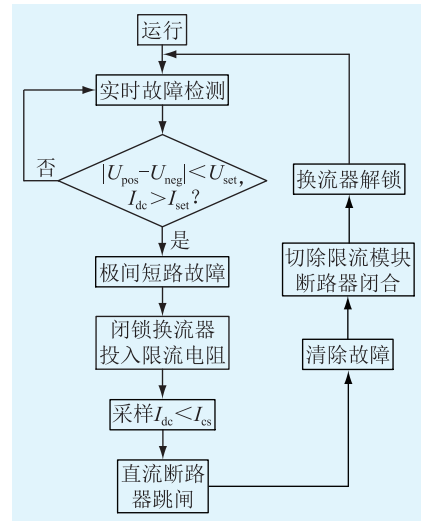


图9 HBMMC 直流配网保护策略

Fig.9 Protection strategy of HBMMC DC distribution network

$$I_{dc} > I_{set} \quad (5)$$

式中: U_{pos} , U_{neg} 分别为直流线路的正负极对地电压。电压动作门槛值 $U_{set} = k_{set} U_{DChase}$, k_{set} 取 0.75; 电流动作门槛值 $I_{set} = k_{set} I_{DChase}$, k_{set} 取 3, 保护延时 2 ms 动作。其中 U_{DChase} , I_{DChase} 分别为系统电压电流稳态值, 分别为 20 kV 和 0.2 kA。

(2) 限流模块投入: 故障限流模块如图10所示,正常运行时,桥臂电流可通过 T_1 、 T_2 交替流通,限流电阻被旁路。低电压过电流保护动作后,立刻闭锁换流器,限流模块 T_1 、 T_2 关断,此时限流电阻被串入放电回路,限制故障电流的大小。从式(1)可以看出限流电阻能减小时间常数 τ , 加速故障电流的衰减,对 MMC 电力电子器件起到了良好的保护作用。

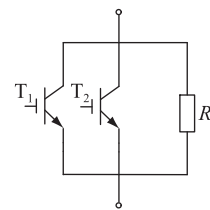


图10 故障限流模块

Fig.10 Fault current limiting module

(3) 直流断路器跳闸: 由于 HBMMC 不具备故障电流清除能力,所以换流器闭锁后交流侧对故障点仍有电流注入。当故障电流衰减到满足直流断路器分断能力(即 $I_{dc} < I_{cs}$)时,经一定延时断开直流断路器,以切断交流系统的功率流动。其中 I_{cs} 为断路器开断电流, I_{cs} 的取值需确保换流器出口侧在发生极间短路情况下仍能有效开断,取 0.7 kA。桥臂限流模块可有效抑制故障电流,降低了对直流断

路器开断能力的要求,基本可满足工程实际应用需求。

(4) 系统重启:故障清除后切除限流模块,并闭合直流断路器,最后向换流器发出解锁信号,恢复功率输送。

3 FBMMC 极间短路故障保护

3.1 FBMMC 极间故障特性

基于 FBMMC 的直流配电网在换流器闭锁前的极间短路故障过程与 HBMMC 类似。区别在于,FBMMC 换流器闭锁后,无论故障电流方向是正是负,由于二极管单向导通特性 SM 电容都处于充电状态^[27-30]。在 SM 电容反电动势的作用下电流迅速下降,最终清除故障电流。FBMMC 换流器闭锁后,以单相桥臂为例,其放电回路如图 11 所示。等效放电回路如图 12 所示,故障电流和桥臂电容电压表达式见式(6)和式(7)。

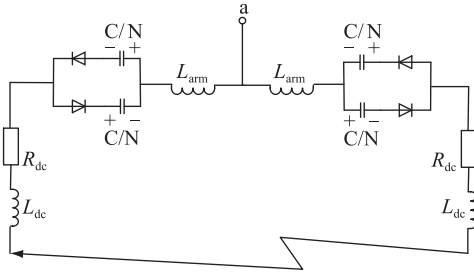


图 11 FBMMC 闭锁后放电回路

Fig.11 Discharge circuit of FBMMC after blocking

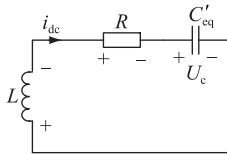


图 12 FBMMC 闭锁后等效放电回路

Fig.12 Equivalent discharge circuit after blocking

$$i_{dc}(t) = -e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\frac{U'_c(0)}{\omega L} \sin \omega t + \frac{I'_L(0) \omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \beta) \right] \quad (6)$$

$$U_c(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\frac{U'_c(0) \omega_0}{\omega} \sin(\omega t + \beta) + \frac{I'_L(0)}{\omega C'_{eq}} \sin \omega t \right] \quad (7)$$

式中: U'_c , I'_L 分别为换流器闭锁时刻桥臂电容电压和直流电流; R, L, C'_{eq} 分别为短路回路等效电阻、电感和电容; $\omega = \sqrt{1/(LC'_{eq}) - (1/\tau)^2}$; $\omega_0 = \sqrt{1/(LC'_{eq})}$; $C'_{eq} = 3C/2N$ 。FBMMC 闭锁后短路电流仿真曲线如图 13 所示。

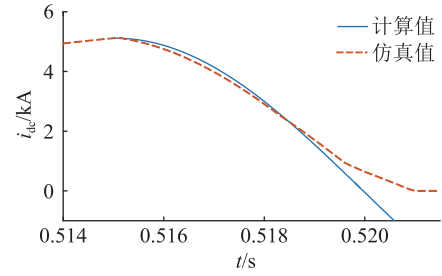


图 13 FBMMC 闭锁后直流侧短路电流

Fig.13 Short-circuit current of FBMMC after blocking

3.2 FBMMC 故障保护策略

由上述分析可知,FBMMC 在 SM 闭锁后具备故障电流快速清除功能。据此提出一种改进的基于换流器解锁的 FBMMC 直流配网极间短路保护策略,流程如图 14 所示。

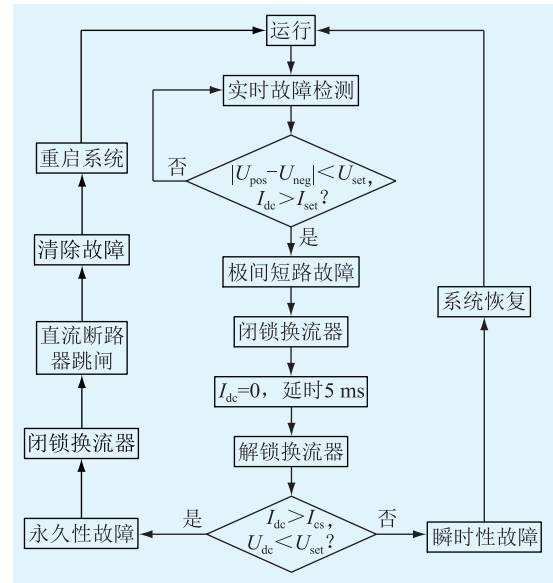


图 14 FBMMC 直流配网保护策略

Fig.14 Protection strategy of FBMMC DC distribution network

(1) 故障识别:根据低电压过电流判据以及线路电压电流等电气量对直流侧极间短路做出快速识别,降低电力电子器件过电流风险。其动作判据同半桥型 MMC 保护策略。

(2) 换流器闭锁:极间短路保护动作后经一定延时闭锁 SM IGBT。

(3) 解锁与永久性判定:由于 FBMMC 的拓扑特性换流器闭锁后故障电流迅速衰减至零。经 5 ms 延时重新解锁换流器,若仍存在低电压过电流现象,则判定故障为永久性故障。此时需重新闭锁换流器 SM,跳开直流断路器,清除故障后进行系统重启。若直流线路电压电流在换流器解锁后能恢复正常,则判定为瞬时性故障,系统逐渐恢复功率

输送。

(4) 系统重启:若直流线路极间短路为永久性故障,则在故障清除后闭合直流断路器并向换流器发出解锁信号,恢复功率输送。

4 仿真验证

4.1 仿真平台

为验证上述提出的 HBMMC 和 FBMMC 直流配网极间短路故障特性分析和保护策略,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的双端直流配电网模型,系统仿真参数详见表 1。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

分类	参数	有名值
交流系统	额定功率/MW	10
	交流电网电压/kV	110
	变压器电压变比	110/10
直流系统	中压直流母线电压/kV	± 10
	低压直流母线电压/V	± 375
	单位电缆电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.014
	单位电缆电感/ $(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.15
	线路长度/km	10
换流器	单相桥臂模块数	20
	桥臂电感/mH	40
	子模块电容/mF	3

4.2 HBMMC 极间短路保护策略仿真分析

为验证所提出的基于 HBMMC 直流配网保护策略的有效性,现对直流极间短路故障进行仿真。系统稳定运行至 0.5 s 时发生直流极间短路故障,故障点距离换流器直流出口侧 5 km。系统仿真结果如图 15 所示。

由图 15(a)和图 15(b)可见,系统故障时刻直流电流急剧上升,直流侧电压迅速下降。低电压过电流保护动作,在 2 ms 延迟后闭锁换流器,在故障至闭锁期间直流电流由正常运行的 0.2 kA 上至 1.7 kA。换流器闭锁的同时在桥臂投入限流电阻模块,直流电流衰减迅速并在 0.508 s 满足直流断路器开断能力,经 4 ms 延迟断开直流断路器。相较于 2.1 节中 1.75 kA 的直流侧稳态电流,加入限流电阻后稳态电流明显减小。以上仿真结果证明故障限流模块不仅解决了稳态电流过大的问题,降低了直流断路器成本,还消除了极间短路情况下交流侧的过电流冲击。直流断路器跳开后,直流出口侧出现瞬时过电压,直流侧不存在放电回路,此时直流线路电流变为 0。而换流站相当于三相不控整流器,交流系

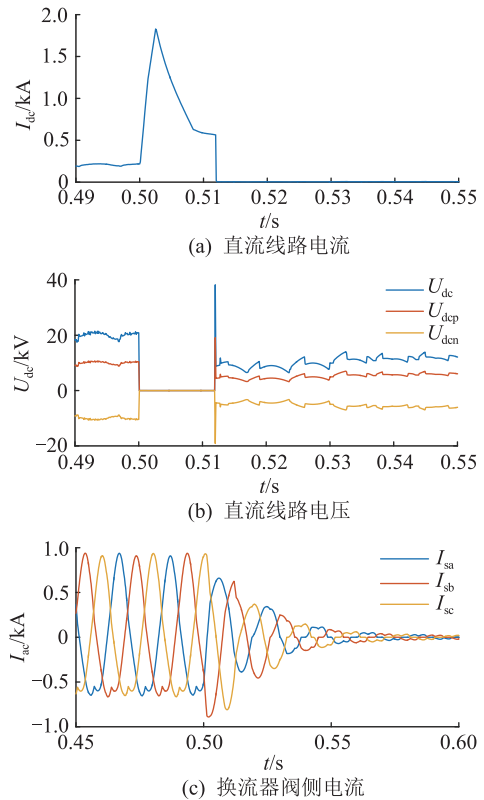


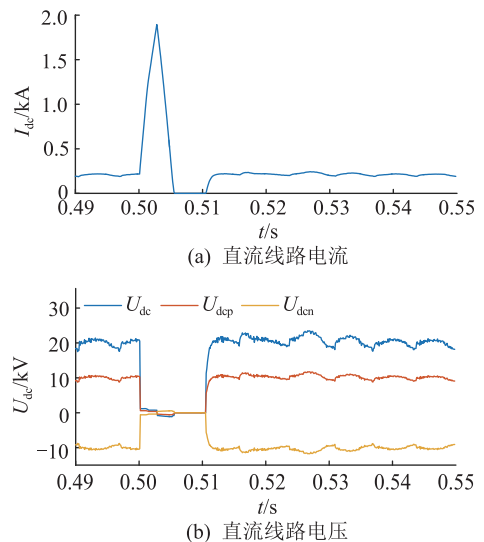
图 15 HBMMC 故障保护仿真

Fig.15 Simulation diagram of HBMMC fault protection

统通过桥臂对故障时刻放电的子模块电容进行充电,直至直流出口侧电压等于交流侧线电压,如图 15(b)和图 15(c)所示。

4.3 FBMMC 极间短路保护策略仿真分析

FBMMC 直流配网保护策略能够实现暂时性极间短路故障的快速恢复,而在永久性短路故障时需要直流断路器跳闸清除故障。为验证所提快速恢复保护策略的有效性仅对暂时性故障情况进行仿真分析。极间短路故障情况与 HBMMC 相同,其仿真结果如图 16 所示。



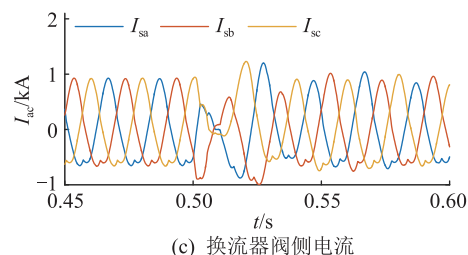


图 16 FBMMC 故障保护仿真

Fig.16 Simulation diagram of FBMMC fault protection

故障发生时刻换流器子模块电容迅速放电,直流侧电流从正常运行的 0.2 kA 迅速上升至 1.7 kA,直流侧电压急剧下降,如图 16(a)和图 16(b)所示。直流侧故障电气量使得保护判定模块迅速动作,并在 2 ms 延迟后关断所有 IGBT 触发信号。换流器闭锁期间在 FBSM 电容的反电势作用下故障电流迅速衰减为零。在阀控系统确认故障点弧道熄灭后,延时 5 ms 重新解锁换流器。从仿真结果可以看出,此时直流电压电流快速恢复正常运行状态,换流器阀侧电流经 3~4 个工频周期后恢复稳定,系统重新恢复功率传输。以上仿真结果证明文中 FBMMC 极间短路故障快速恢复策略能够实现故障电流的迅速清除和功率传输的快速恢复。

5 结论

文中针对基于 MMC 的双端直流配电网,建立数学模型分析了直流极间短路故障特性,并在此基础上分别提出了 HBMMC 和 FBMMC 直流极间短路故障保护策略,得出以下结论:

(1) 基于桥臂限流电阻的 HBMMC 极间短路保护策略改善了电流衰减缓慢的特性,通过加快故障电流的衰减速度以及降低稳态电流幅值减小了直流断路器的开断容量,降低直流断路器成本的同时保护了电力电子器件。

(2) 针对 FBMMC 自清除能力所改进的一种极间短路快速恢复策略使得直流配电系统在瞬时性故障情况下无需跳开断路器,通过换流器重解锁实现功率输送的快速恢复,提升了系统的供电可靠性。

(3) 所提出的 2 种保护策略都采用低电压过电流保护判据,利用直流断路器切断故障电流,能满足直流配电网保护速动性的要求。

参考文献:

[1] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
JIANG Daozhuo,ZHENG Huan. Research status and prospects of dc distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):98-104.

[2] YADAV A,SINGH S N,DAS S P. Modular multi-level converter topologies;Present status and key challenges[C]//2017 4th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical,Computer and Electronics (UPCON),Mathura,2017.

[3] 许建中,李承昱,熊岩,等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3381-3392.
XU Jianzhong,LI Chengyu,XIONG Yan,et al. A review of the research on efficient modeling methods for modular multilevel converters [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2015,35(13):3381-3392.

[4] 祁欢欢,陆振纲,陈静,等. 基于模块化多电平的统一潮流控制器换流器和直流侧故障特征分析及保护配置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):59-68.
QI Huanhuan,LU Zhengang,CHEN Jing,et al. Converter and DC side fault characteristics and protection scheme of the unified power flow controller based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control,2018,46(20):59-68.

[5] 陆羿,李继红,裘鹏,等. 基于电容电压波动的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(24):158-164.
LU Yi,LI Jihong,QIU Peng,et al. Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation[J]. Power System Protection and Control,2018,46(24):158-164.

[6] 于海. 直流断路器的现状及发展[J]. 电力工程技术,2018,37(2):114-120.
YU Hai. The status and development of dc circuit breakers[J]. Electric Engineering Technology,2018,37(2):114-120.

[7] MUAZU H, THOMAS S. Overview of solid state circuit breaker technology and some recent experiment prototypes[C]//2017 13th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Abuja,2017.

[8] 卫思明,张森,黄永章. 新型直流断路器拓扑及在多端柔直工程中的仿真研究[J]. 智慧电力,2017,45(11):7-13.
WEI Siming,ZHANG Sen,HUANG Yongzhang. Research on a novel topology of dc breaker and its application in simulation of multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Smart Power,2017,45(11):7-13.

[9] 郑重,杜赫,邱馨仪,等. 高压直流断路器用压接式 IGBT 芯片封装设计[J]. 智慧电力,2018,46(10):55-62.
ZHENG Zhong,DU He,QIU Xinyi,et al. Packing design for press pack IGBT used in HVDC breaker[J]. Smart Power,2018,46(10):55-62.

[10] 刘路辉,叶志浩,付立军,等. 快速直流断路器研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报,2017,37(4):966-978.
LIU Luhui,YE Zhihao,FU Lijun,et al. Research status and prospects of fast DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(4):966-978.

[11] 杨海倩. 基于模块化多电平变换器的直流输电系统暂态特性分析[D]. 北京:北京交通大学,2017.

- YANG Haiqian. Transient characteristics analysis of HVDC transmission system based on modular multilevel converter [D]. Beijing :Beijing Jiaotong University,2017.
- [12] 和敬涵,黄威博,李海英,等. FBMMC 直流故障穿越机理及故障清除策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):1-7.
HE Jinghan, HUANG Weibo, LI Haiying, et al. The FBMMC DC fault traversing mechanism and fault clearing strategy [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):1-7.
- [13] 洪潮,时伯年,孙刚,等. 基于 LCC-MMC 的三端混合直流输电系统故障特性与控制保护策略[J]. 电力建设,2017,38(8):73-79.
HONG Chao, SHI Bonian, SUN Gang, et al. Fault characteristics and control protection strategy of three-terminal hybrid HVDC transmission system based on LCC-MMC [J]. Electric Power Construction,2017,38(8):73-79.
- [14] 罗永捷,徐罗那,熊小伏,等. MMC-MTDC 系统直流单极对地短路故障保护策略[J]. 电工技术学报,2017,32(S1):98-106.
LUO Yongjie, XU Luona, XIONG Xiaofu, et al. The protection strategy of DC single pole to ground short circuit in MMC-MTDC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(S1):98-106.
- [15] 戴志辉,苏怀波,刘宁宁,等. 基于电流相关性的直流线路单极故障保护方案[J]. 电力建设,2018,39(7):74-80.
DAI Zhihui, SU Huaibo, LIU Ningning, et al. Single-pole fault protection scheme based on current correlation [J]. Electric Power Construction,2018,39(7):74-80.
- [16] 唐圣辉,袁旭峰,唐立,等. 不同子模块 MMC 在中压直流配电网中的应用研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2017,34(6):43-48.
TANG Shenghui, YUAN Xufeng, TANG Li, et al. Application of different sub-modules mmc in medium voltage DC distribution network [J]. Journal of Guizhou University(Natural Science),2017,34(6):43-48.
- [17] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-37.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong. Simulation analysis of dc side fault characteristics of MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-37.
- [18] 王振浩,刘婕,李国庆,等. 采用桥臂电抗器耦合的 MMC 直流侧故障过电流抑制新方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(17):9-15.
WANG Zhenhao, LIU Jie, LI Guoqing, et al. A new method of over current suppression based on coupled bridge arm reactors for DC faults of modular multilevel converters [J]. Power System Protection and Control,2018,46(17):9-15.
- [19] 高淑萍,胡振宇,张保会,等. 一种适用于 MMC-HVDC 直流输电线路的保护新原理[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13):13-20.
GAO Shuping, HU Zhenyu, ZHANG Baohui, et al. A new relay protection principle of MMC-HVDC transmission lines [J]. Power System Protection and Control,2018,46(13):13-20.
- [20] 李玉. 多端柔性直流配电网故障特性分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
LI Yu. Fault characteristics analysis of multi-terminal flexible DC distribution network [D]. Xi'an :Xi'an University of Architecture and Technology,2018.
- [21] 许义佳,罗映红,史彤彤,等. 具有直流故障自清除能力的新型 MMC 子模块及其混合拓扑[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(7):129-137.
XU Yijia, LUO Yinghong, SHI Tongtong, et al. A new MMC sub-module with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology [J]. Power System Protection and Control,2018,46(7):129-137.
- [22] 朱铭炼,姜田贵,欧阳有鹏,等. 模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力研究[J]. 电力工程技术,2018,37(2):44-48,60.
ZHU Minglian, JIANG Tiangui, OUYANG Youpeng, et al. Research on tolerance of DC bipolar short circuit fault in modular multilevel converter [J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(2):44-48,60.
- [23] 胡竟竞. 直流配电系统故障分析与保护技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
HU Jingjing. Research on fault analysis and protection technology of DC power distribution system [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2014.
- [24] 孙刚,时伯年,赵宇明,等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(22):127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on fault location and protection configuration of flexible dc distribution network based on MMC [J]. Power System Protection and Control,2015,43(22):127-133.
- [25] 李国庆,付贵,王斯忱,等. MMC 柔性直流输电系统网侧故障时紧急功率支援控制[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13):107-112.
LI Guoqing, FU Gui, WANG Sichen, et al. Emergency power support control for MMC flexible HVDC transmission system during AC fault [J]. Power System Protection and Control,2018,46(13):107-112.
- [26] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Over-current analysis of HVDC DC bipolar short circuit submodule of modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.
- [27] 王光江. 基于全桥 MMC 的柔性直流输电系统控制策略与故障隔离[D]. 北京:北京交通大学,2016.
WANG Guangjiang. Control strategy and fault isolation of flexible HVDC transmission system based on full bridge MMC [D]. Beijing :Beijing Jiaotong University,2016.
- [28] 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.
- [29] 徐雨哲, 徐政, 张哲任, 等. 基于 LCC 和混合型 MMC 的混合直流输电系统控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(9):13-25.
XU Yuzhe, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Control strategy for hybrid HVDC transmission system based on LCC and hybrid MMC [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9):13-25.
- [30] 范志华, 苗世洪, 刘子文, 等. 模块化多电平换流器子模块故障特性分析与解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16):3707-3718.
FAN Zhihua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. Analysis of fault

characteristics and decoupling control strategy of modular multilevel converter submodules [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16):3707-3718.

作者简介:



吕家乐

吕家乐(1995),男,硕士在读,研究方向为直流配电网保护(E-mail:jialelv@126.com);

吴在军(1975),男,博士,教授,研究方向为电站自动化、分布式发电与微电网、电能质量分析与控制等(E-mail:zjwu@seu.edu.cn);

窦晓波(1979),男,博士,教授,研究方向为有源配电网优化运行、分布式电源变流器控制等。

Bipolar short circuit protection strategy for MMC based medium voltage DC distribution network

LYU Jiale¹, WU Zaijun¹, DOU Xiaobo¹, CHEN Qing², YANG Jinggang², XIAO Xiaolong²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: In recent years, the DC distribution network based on MMC is developing rapidly. However, DC side fault protection has become an urgent problem because of the sharply rising overcurrent generated by short circuit and the poor overcurrent capacity of power electronics. Considering the two different topologies of half-bridge and full-bridge MMC, the fault characteristics are analyzed and the analytical expressions of fault voltage and current are derived respectively when a bipolar short circuit occurs on medium voltage DC lines. For the half-bridge MMC, a protection strategy based on bridge arm current-limiting module and DC circuit breaker is proposed, which solves the problem of slow fault current attenuation and excessive steady current, and thus reduces the requirement for the breaking capacity of the DC circuit breaker. Based on the fault current self-clearing capability of the full-bridge MMC sub-module, an improved fast recovery protection strategy is proposed to reduce the system outage time by unlocking the MMC. Finally, the PSCAD/EMTDC simulation results prove the effectiveness and practicability of the protection strategy based on the actual engineering parameters.

Keywords: DC distribution network; modular multilevel converter; DC bipolar short circuit; fault characteristics; protection strategy

(编辑 方晶)