

FBMMC 直流故障穿越机理及故障清除策略

和敬涵¹, 黄威博¹, 李海英², 罗国敏¹, 王光江¹, 许寅¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 南瑞继保有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 针对模块化多电平换流器型直流输电(MMC-HVDC)直流故障的快速清除, 对全桥型模块化多电平换流器(FBMMC)直流故障机理及故障清除控制策略进行了研究。研究了全桥子模块的导通模式与运行特性; 分析了闭锁前后直流侧双极短路故障机理、故障电流阻断原理和故障清除控制策略。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了仿真模型, 对全桥子模块的运行特性、直流故障机理、故障清除及快速恢复策略进行了仿真分析, 结果验证了所提策略在直流故障穿越方面的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 全桥子模块; 直流输电; 直流故障; 闭锁; 故障穿越

中图分类号: TM 46; TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.001

0 引言

模块化多电平换流器(MMC)是电压源换流器(VSC)的一种拓扑结构, 具有诸多优点: 模块化设计、可拓展性好、单个器件开关频率低、谐波性能好等^[1-3]。其是目前电压源换流站拓扑的主要技术方案。

随着柔性直流输电技术的发展, 模块化多电平换流器型直流输电(MMC-HVDC)技术受到越来越多的关注。目前实际 MMC 工程中基本上都是采用半桥型模块化多电平换流器(HBMMC)。在直流侧发生短路故障时, 交流电源将通过子模块中的续流二极管向短路点馈入电流, 换流器无法通过闭锁来切断故障电流, 故使系统的安全稳定运行受到严重危害^[4-5]。一方面, 由于高压大功率的直流断路器仍然处于研究开发阶段, 其工程应用还不成熟^[6], 所以采用直流断路器的方法暂时还无法解决直流侧故障电流问题; 另一方面, 实际工程中通过断开交流断路器来实现直流侧故障的隔离和清除, 但该方法动作速度慢, 系统恢复时间长^[7], 面对系统内部的故障, 尤其是瞬时故障, 清除故障的代价比较大。然而, 随着交直流混联电网的高速发展和应用需求越来越多, 直流系统故障的快速清除就变得非常必要。因此, 结合交流断路器实现故障清除的 HBMMC 限制了 MMC 在远距离输电和多端直流领域的发展^[8-9]。

直流故障保护策略对 MMC 的可靠运行有重要作用, 研究具有直流故障穿越能力的 MMC 拓扑结构具有重要的应用价值。文献[10]提出了一种采用双向晶闸管旁路式子模块的瞬时性故障保护方法, 其

成本低、无额外损耗, 但需与交流断路器保护配合, 具有局限性。而在快速切除故障电流方面, 全桥型模块化多电平换流器(FBMMC)^[11]具有相当大的优势, 这种拓扑通过将子模块电容引入桥臂, 利用电容电压来关断续流二极管。由于电力电子器件的开关速度非常快, 从而能够在极短时间内切除故障电流, 无需断开交流断路器。由于其具有直流故障闭锁能力, 能够在发生瞬时性故障后实现系统的快速重启, 恢复供电, 因此其在故障率相对较高的远距离架空线输电场合具有相当大的应用价值, 经济效益好。文献[12]提出了适用于全桥型模块化多电平换流器型多端柔性直流输电(FBMMC-MTDC)的直流故障选线“握手原则”及衡量直流故障穿越能力指标, 但缺乏对 FBMMC 直流故障机理的分析和理论推导。文献[13]针对实际工程中功率模块具有恒功率负载特性, 换流站闭锁期间功率模块电容电压会逐渐发散并最终导致交流断路器跳闸的问题, 提出一种全桥型模块化多电平换流器型直流输电(FBMMC-HVDC)的故障穿越控制保护策略, 但未细化直流故障闭锁保护原理。

FBMMC 在直流侧故障时能够有效控制交直流两侧的能量交换, 具有较好的故障电流阻断能力。为了深入分析其直流故障闭锁保护原理, 细化直流故障穿越机理, 研究故障清除及恢复策略。本文首先从全桥子模块(FBSM)导通模式角度出发, 介绍了 FBMMC 的充电机理, 然后重点分析了 FBMMC 的故障机理和闭锁前后的故障等效电路, 最后总结并验证了本文所提故障清除控制策略的有效性。

1 MMC 拓扑结构及工作原理

图 1 为典型的 MMC 拓扑结构: 换流器共有 6 个桥臂, 每个桥臂由 1 个电抗器 L_0 和 N 个子模块(SM)串联组成, 每相上、下桥臂合在一起为一个相单元,

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2017-08-01
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015-AA050101); 国家自然科学基金资助项目(51277009, 51507008)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA-050101) and the National Natural Science Foundation of China(51277009, 51507008)

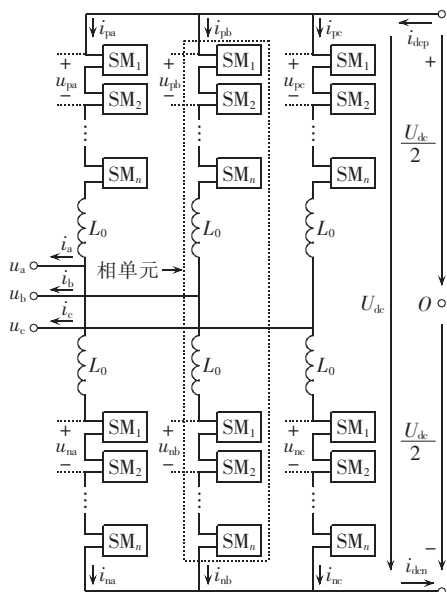


图 1 MMC 拓扑结构

Fig.1 Topological structure of MMC

MMC 由 3 个完全相同的相单元构成。图中, O 点为零电位参考点; U_{dc} 为直流侧电压; i_{dep} 、 i_{den} 为直流侧电流; u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为外部交流系统三相交流电压和电流; i_{pa} 、 i_{pb} 、 i_{pc} 和 i_{na} 、 i_{nb} 、 i_{nc} 分别为上、下桥臂三相电流; u_{pa} 、 u_{pb} 、 u_{pc} 和 u_{na} 、 u_{nb} 、 u_{nc} 分别为上、下桥臂除桥臂电抗器之外的三相电压。

当 MMC 正常运行时, 每个相单元中处于投入状态的子模块数在任意时刻都相等且保持投入子模块总数不变, 可通过对每相上、下桥臂中处于投入状态的子模块数进行分配来实现换流器交流侧输出多电平电压波形的目的。桥臂电抗器 L_0 不但能抑制相间环流, 降低桥臂电流谐波畸变率, 还能在发生故障时抑制故障电流, 保护设备。

目前工程中 MMC 通常都采用半桥子模块 (HBSM), 其拓扑结构如图 2 所示: 由 2 个 IGBT、2 个反并联二极管以及 1 个直流电容器组成。正常工作时 V_{T1} 、 V_{T2} 交替导通。根据子模块内 V_{T1} 、 V_{T2} 的开关状态和电流流通方向, 可将子模块分为全电压、零电压和闭锁 3 种运行状态。

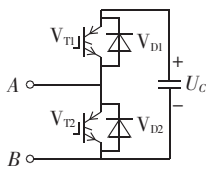


图 2 HBSM 结构

Fig.2 Structure of HBSM

2 FBMCC 拓扑结构及控制策略

FBMMC 与 HBMMC 的拓扑结构相同, 唯一不同之处在于子模块的结构。FBMMC 具有穿越直流故障的能力, 在直流故障隔离方面具有 HBMMC 不具备的突出优点。FBSM 拓扑结构如图 3 所示: 由 4 个 IGBT 和 4 个反并联二极管组成。图中, C_0 为子模块

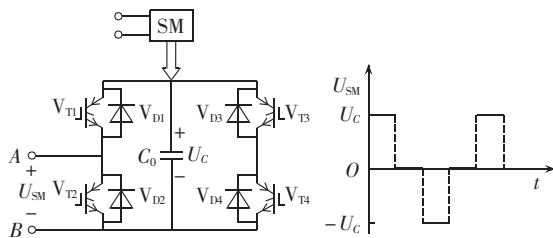


图 3 FBSM 结构及其输出电压

Fig.3 Structure of FBSM and its output voltage

电容; U_C 为电容电压值; U_{SM} 为 FBSM 输出电压值。

定义 FBMMC 的桥臂电流正方向为流入子模块正端口的方向, 反之则为负方向。 V_{T1} 、 V_{T4} 导通时, $U_{SM} = U_C$; V_{T2} 、 V_{T3} 导通时, $U_{SM} = -U_C$; V_{T1} 、 V_{T3} 或 V_{T2} 、 V_{T4} 导通时, $U_{SM} = 0$ 。

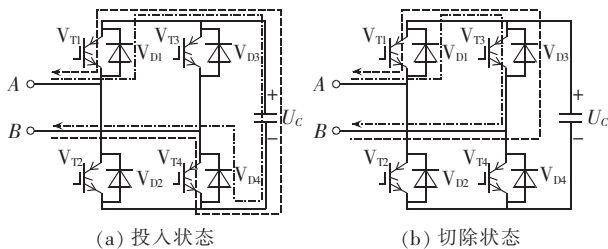
与 HBSM 相同, FBSM 的运行状态也可分为闭锁、投入和切除 3 种状态。根据以上运行机理, 将 FBSM 的 3 种工作状态分为 2 种工作模式, 并以此作为 IGBT 的轮换导通方法^[11]: PLUS 模式, 子模块交替输出 U_C 和 0; MINUS 模式, 子模块交替输出 $-U_C$ 和 0。在 PLUS 模式下, 子模块的 3 种状态分别如下。

a. 闭锁状态: V_{T1} — V_{T4} 全部关断, 电流经 V_{D1} 、 V_{D4} 给电容充电, 或者电容经 V_{D2} 、 V_{D3} 反极性接入电路。

b. 投入状态: V_{T1} 、 V_{T4} 导通, V_{T2} 、 V_{T3} 关断, 电流经 V_{D1} 、 V_{D4} 给电容充电, 或者经 V_{T1} 、 V_{T4} 放电。

c. 切除状态: V_{T1} 、 V_{T3} 导通, V_{T2} 、 V_{T4} 关断, 电流经 V_{D1} 、 V_{T3} 或 V_{D3} 、 V_{T1} 将子模块旁路。

稳态运行时, 子模块工作在投入或切除状态; 而在 MMC 不控启动充电阶段和系统出现故障情况下, 子模块则工作在闭锁状态。2 种情况下电流通路分别如图 4 和图 5 所示。



(a) 投入状态

(b) 切除状态

图 4 稳态时电流通路

Fig.4 Current path under steady-state operation

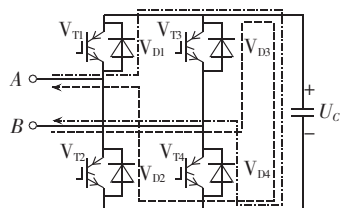


图 5 闭锁时电流通路

Fig.5 Current path when blocking

FBMMC 可以方便地继承和移植 HBMMC 已经相对成熟的控制或调制策略。当全桥子模块只输出

2 种电平(1、0)或(-1、0),开关动作时,子模块电平变化的方向是唯一的,与半桥子模块类似。此时,全桥子模块投入和切除的控制策略与半桥相同,仅 IGBT 选通信号不同。图 6 为 FBMMC 工作在调制比小于 1 情况下的运行特性。图中, K_1 为 a 相上桥臂第一个子模块输出状态; K_{sp} 为 a 相上桥臂所有子模块输出状态之和; K_{sn} 为 a 相下桥臂所有子模块输出状态之和。可见,当变压器阀侧交流电压峰值小于直流电压的一半时,子模块只输出 2 种电平(1、0),不会出现负投入的情况。

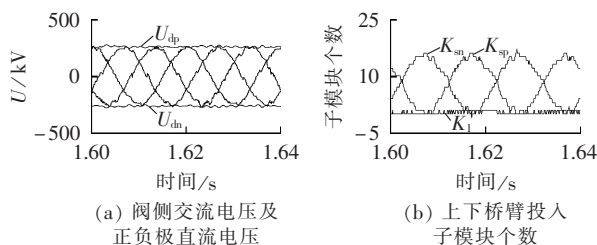


图 6 FBMMC 直流电压及子模块个数(调制比小于 1)

Fig.6 FBMMC DC voltage and number of submodule (modulation ratio less than 1)

由于 FBSM 与 HBSM 相比,多了负电平输出功能,故可以通过调制作用在保证其直流电压恒定的前提下,输出交流相电压峰值略高于单极直流电压,可有效降低输入换流器的电流,进而降低换流器的运行损耗。此时,FBSM 可输出 3 种电平(1、0、-1),采用的投入和切除的控制策略与半桥不同。图 7 为 FBMMC 工作在调制比大于 1 情况下的运行特性。可见,当变压器阀侧交流电压峰值大于直流电压的一半时,子模块输出 3 种电平(1、0、-1),存在负投入的情况。

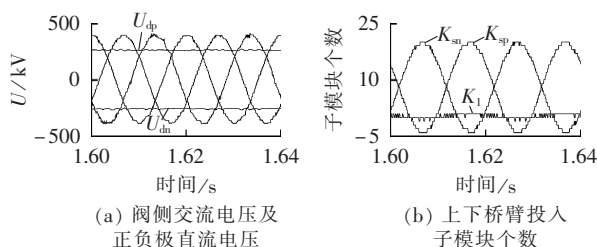


图 7 FBMMC 直流电压及子模块个数(调制比大于 1)

Fig.7 FBMMC DC voltage and number of submodule (modulation ratio more than 1)

3 FBMMC 直流故障机理及故障清除策略

3.1 FBMMC 直流故障机理

与交流输电系统相比,直流输电系统的阻尼往往比较低,响应时间常数也比较小,因此故障发展会更快,故障的切除难度更大^[14-15]。直流故障是直流输电系统中最严重的故障之一,不仅会对直流系统造成影响,还会影响交流系统,严重危害电力系统安全稳定运行^[16-17]。在直流系统故障中,主要有单极接地

故障和双极短路故障。当发生单极接地故障时,理论上只是改变了直流系统电位参考点的位置,非故障极电压幅值上升一倍,正负极直流电压保持不变,两端系统可正常输送功率。相比于单极接地故障,双极短路故障则严重得多,因此本文以双极短路故障为例进行故障机理分析。

与 HBSM 相比,FBSM 在直流故障清除方面具有相当大的优势。直流侧发生故障时,需要迅速闭锁所有子模块的 IGBT,而此时电流在子模块中的流通路径是衡量 MMC 直流故障清除能力的关键。FBSM 在闭锁时的电流通路如图 5 所示。

在故障初期,子模块还来不及闭锁,该阶段内故障电流主要由子模块电容放电和交流电源馈流组成,其中子模块电容放电占主导。故障初期子模块按照正常调制模式进行投切,任一时刻上下 2 个桥臂总共投入 N 个子模块。根据子模块电容电压平衡控制策略可知,其间所有子模块均会投入或切除,因此每相所有子模块可近似等分为并联的 2 个小组,每组 N 个子模块依次交替放电。综上,极间短路故障可以等效成如图 8 所示的一个 RLC 二阶振荡放电回路。

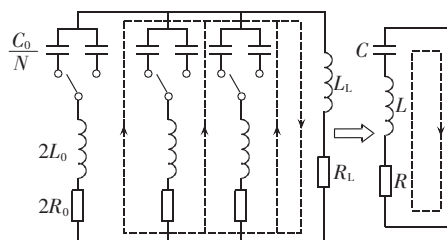


图 8 FBMMC 闭锁前等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of FBMMC before locking

$$C = \frac{6C_0}{N} \quad (1)$$

$$L = \frac{2L_0}{3} + L_L \quad (2)$$

$$R = \frac{2R_0}{3} + R_L \quad (3)$$

在 t_0 时刻发生短路故障,等值电容电压 u_{c0} 满足微分方程:

$$\frac{d^2 u_{c0}}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{c0}}{dt} + \frac{N}{2LC} u_{c0} = 0 \quad (4)$$

其初始状态满足: $u_{c0}(t_0) = U_{dc}$, $i_{t0}(t_0) = I_{t0}$ 。其中 I_{t0} 为电容放电电流初始电流值。

FBMMC 直流短路故障放电电流 i_{t0} 和电容电压 u_{c0} 的解析式如下:

$$u_{c0} = e^{-t/\tau_0} \left[U_{dc} \sin(\omega_0 t + \theta_0) - \frac{NI_{t0}}{2\omega_0 C} \sin(\omega_0 t) \right] \quad (5)$$

$$i_{t0} = e^{-t/\tau_0} \left[U_{dc} \sqrt{\frac{C}{NL}} \sin(\omega_0 t) + I_{t0} \cos(\omega_0 t) \right] \quad (6)$$

其中, $\tau_0 = 4L/(2R + R_L)$ 为放电回路等效电路的时间常数; $\omega_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N}{LC}}$ 为放电回路的谐振角频率; $\theta_0 =$

$\arctan\left(\sqrt{\frac{NL}{C(2R+R_i)^2}-1}\right)$ 为电流初始相角。

故障初期子模块电容电压快速下降,直流线路故障电流快速上升,由此也对子模块的快速闭锁提出了更高要求。当直流保护检测到直流故障的发生后,为了保护换流器,系统立即发出闭锁信号,关断所有 IGBT 触发信号,闭锁换流器内所有子模块,进入子模块闭锁后阶段。

闭锁后,每个桥臂可等效为二极管和级联带电容串联的结构。若忽略阻抗,此时故障等效电路如图 9 所示,简化电路如图 10 所示。

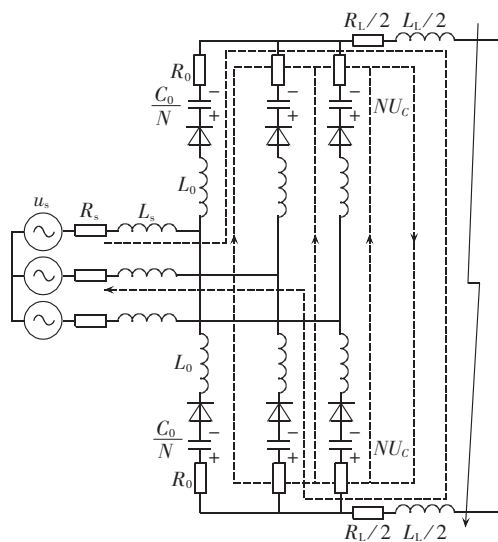


图 9 FBMMC 闭锁后等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of FBMMC after locking

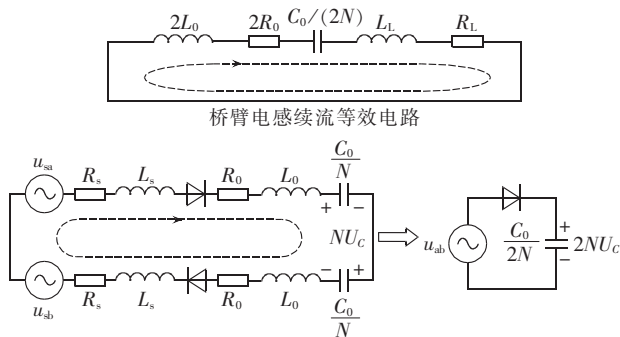


图 10 FBMMC 闭锁后简化电路

Fig.10 Simplified circuit of FBMMC after locking

可以看出,在闭锁后,交流系统向直流侧短路点馈流的潜在通路主要是由经换流器两相上下桥臂和直流故障弧道构成的回路。在通路中,桥臂级联电容电压将会提供一个反电势,利用二极管的反向阻断能力,迫使故障电流迅速下降到 0 或者一个极小值。而要实现换流器的完全闭锁,还应保证回路中级联电容电压提供的反电势大于交流线电压幅值,从而利用二极管的反向阻断能力实现完全闭锁,即:

$$2NU_C > \sqrt{3} U_m \quad (7)$$

在不考虑子模块冗余的情况下,一般有桥臂级联电容额定电压之和等于直流电压,即:

$$NU_{Cn} = U_{dc} \quad (8)$$

一般地,电压调制比 k 的取值在 0.8~0.9 之间,且:

$$k = \frac{2U_m}{U_{dc}} \leq 1 \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得:

$$2NU_C = 2U_{dc} \geq 4U_m > \sqrt{3} U_m \quad (10)$$

由此可见,式(7)恒成立,完全可以保证换流器实现完全闭锁。

3.2 FBMMC 故障清除控制策略

当直流侧发生故障时,FBMMC 能发挥其自身的直流故障电流闭锁能力,无需跳开交流断路器就可以有效处理直流侧故障,并实现换流器的快速重启。故障后换流器控制策略如图 11 所示。图中, I_{DC} 为直流电流; I_{max} 为直流电流限值; U_{DC} 为直流电压; U_{ref} 为直流电压目标值; ε 为直流电压波动限值; N_{ul} 为子模块 IGBT 解锁次数; λ 为解锁次数限值。

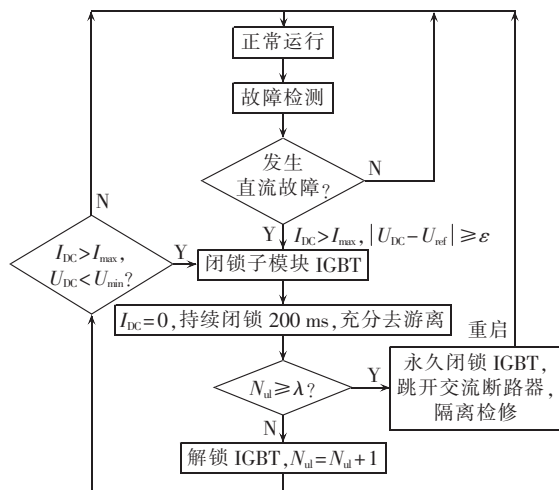


图 11 直流故障时的控制策略

Fig.11 Control strategy for DC fault

由图 11 的故障控制策略可以看出,直流故障下系统的动作响应特性大致可分为以下 5 个状态。

a. 正常运行状态。系统未检测到直流故障,保护逻辑单元不动作,换流器仍保持原有状态运行,系统正常传输功率。

b. 闭锁过程。系统未检测到直流故障,保护逻辑单元动作,向换流器发出闭锁指令,控制器迅速关断所有 IGBT 的触发脉冲。故障电流仅通过二极管向储能电容充电并迅速减小,加快直流网络能量的释放。交流电源由于交流线电压幅值小于电容电压反电势不能馈流。当故障电流降低到 0 后,由于电容电压和二极管反向阻断能力使得换流器进入完全闭锁状态。

c. 线路去游离。换流器进入闭锁状态后,保持此

状态运行一段时间(通常为 200~500 ms),使得故障线路完全去能和充分去游离,确保闪络弧道消失,使绝缘性能恢复到原有水平。

d. 解锁与系统恢复。线路充分去游离后,判断解锁次数 N_{un} ,若 $N_{\text{un}} < \lambda$,则解锁子模块 IGBT,尝试建立系统直流电压;若 $N_{\text{un}} \geq \lambda$,则判定故障为永久性故障,进入过程 **e**。在解锁后,若直流电压能够恢复,则故障为暂时性故障且已被切除,线路已具备重新输电的条件,重新逐渐恢复功率传输,进入正常运行状态;若无法恢复直流电压,则意味着故障弧道可能仍然存在,IGBT 解锁失败,此时将重复过程 **b—e**。

e. 隔离与重启。通过解锁 IGBT 进行系统恢复失败的情况,认为发生永久性故障,此时系统停机。根据故障定位信息,断开故障线路两端的隔离开关,经过检修后重启。

由此可见,FBMMC 能够通过自身子模块的闭锁能力,实现直流侧故障的快速隔离和自清除而不需要交流断路器的动作,保证系统的快速恢复。

4 仿真分析

为验证 FBMMC 抑制直流故障电流、实现故障自清除的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建双端 21 电平 FBMMC 模型,如图 12 所示。整流侧采用定有功功率和定无功功率控制,逆变侧采用定直流电压和定无功功率控制^[18-19]。系统控制策略采用同步旋转坐标系下的双闭环矢量电流控制,调制策略采用最近电平逼近调制。仿真参数如下:额定功率为 1000 MW,交流系统电压为 220 kV,变压器变比为 220 kV/391 kV,直流母线电压为 ± 320 kV,桥臂子模块个数为 20,子模块电容为 1300 μF ,桥臂电感为 60 mH,采样频率为 10 kHz,直流电缆长度为 10.7 km。

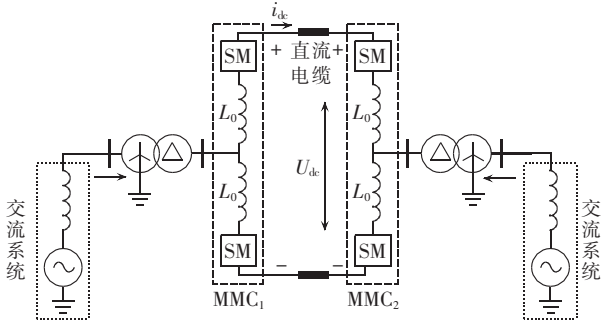


图 12 仿真模型
Fig.12 Simulation model

1.2 s 前,系统处于子模块充电阶段,子模块电压波形如图 13 所示。系统稳定后,设定在 1.8 s 时 FBMMC 系统发生双极短路故障,考虑故障识别等因素,设定换流器闭锁时间为故障后 0.5 ms,即换流器在 1.8005 s 时闭锁。对比 FBMMC 无闭锁和有闭锁 2

种情况,直流故障仿真结果如图 14 所示。

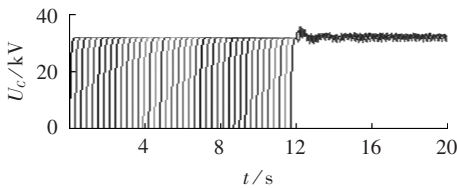


图 13 子模块电容电压

Fig.13 Capacitor voltage of submodule

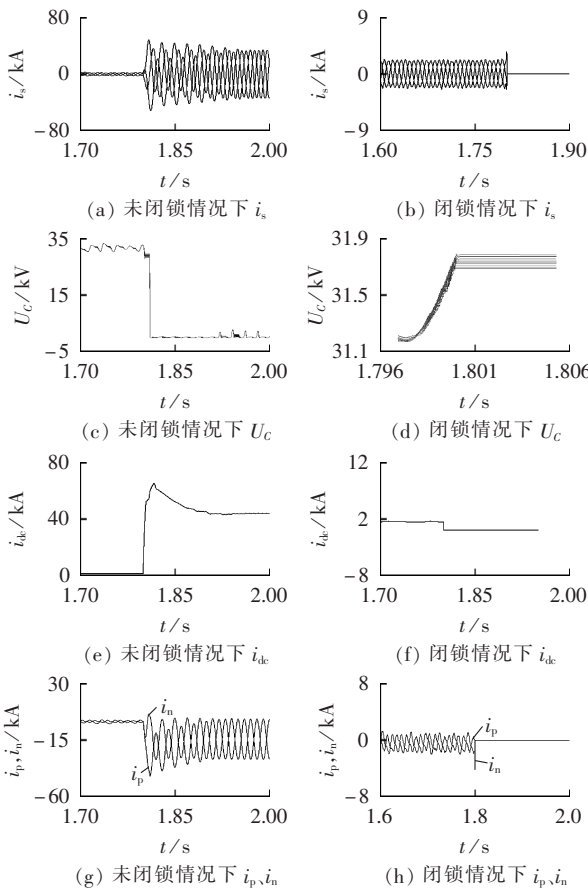


图 14 双端 FBMMC-HVDC 系统直流故障仿真结果

Fig.14 DC fault simulative results of double-terminal FBMMC-HVDC system

图 14(a)、(c)、(e)、(g)表明,FBMMC-HVDC 系统发生直流故障后,如果不采取任何保护措施,子模块电容将会放电,各子模块电容电压(U_c)迅速降为 0,交流电流(i_s)、直流电流(i_{dc})、桥臂电流(i_p 、 i_n)将迅速增加,将直接危害电力电子器件安全并影响故障清除后的系统恢复。而图 14(b)、(d)、(f)、(h)则表明,故障后迅速闭锁换流器,由于电容电压给二极管一个反向电压,在二极管反向阻断能力作用下三相交流电流以及直流侧电流、桥臂电流迅速降为 0,交流系统不再向直流故障点馈入电流,同时子模块电容电压得以保持,便于故障清除后系统的快速恢复。

假设故障持续时间为 0.2 s,2 s 时故障消失,换流器解锁,系统恢复运行。仿真结果如图 15、16 所示。可以看出,在控制系统的作用下,系统起初正常

运行,随着故障的发生,直流电压开始下降,换流器闭锁后,直流电压降为 0,有功传输终止。图 14(d)也表明,只要闭锁及时,子模块电容电压略有降落,随后将维持在额定电压附近,保持不变。随着故障消失,换流器解锁,子模块电容经过短暂充电后电压基本维持稳定,直流母线和有功功率迅速增大,经短时振荡后恢复到稳定状态,重新恢复直流定压和有功传输,系统恢复正常运行。

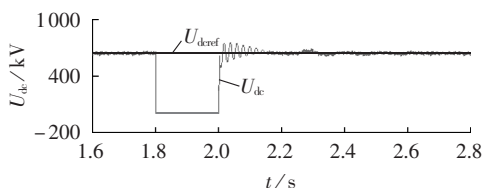


图 15 整流侧直流母线电压

Fig.15 DC bus voltage of rectifier-side

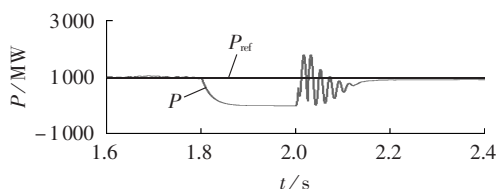


图 16 逆变侧有功功率

Fig.16 Active power of inverter-side

由仿真结果可知,FBMM 在直流侧发生双极短路故障后,能够通过闭锁换流器来切断故障电流,具有较好的直流故障穿越能力。

5 结论

本文针对常规 HBMMC 子模块无直流故障闭锁能力的问题,选取了具有直流故障穿越能力的 FBMM。首先分析了其导通充电机理,然后对其清除直流故障电流的机理和控制策略进行了分析,最后在直流侧双极短路故障下,对其切断直流故障电流的能力进行了建模仿真分析。结果表明 FBMMC 具有闭锁直流故障的能力,在无需交流断路器动作的情况下能快速切断故障电流,具有 HBMM 所不具备的突出优势,非常适用于采用架空线远距离的柔性直流输电场合。

参考文献:

- [1] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):1-14.
YANG Xiaofeng,LIN Zhiqin,ZHENG Trillion Q,et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(6):1-14.
- [2] ZUNIGA-GARCIA L,ZARAGOZA-HERNANDEZ A,NADAL-MARTINEZ J M,et al. MMC technology and its participation in the integration of variable renewable energies and implementation of DC grids[C]//2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, Ixtapa,Mexico:IEEE,2014:1-6.
- [3] WANG J,BURGOS R,BOROYEVICH D. A survey on the modular

multilevel converters-modeling,modulation and controls[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(IECE). Denver,USA:IEEE,2013:3984-3991.

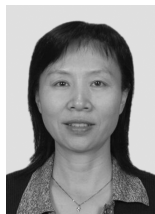
- [4] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan,ZHOU Xiaoxin,TANG Guangfu,et al. Analysis of submodule over current caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.
- [5] 张国驹,祁新春,陈瑶,等. 模块化多电平换流器直流双极短路特性分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):151-157,199.
ZHANG Guojia,QI Xinchun,CHEN Yao,et al. Characteristic analysis of modular multilevel converter under DC pole-to-pole short-circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(12):151-157,199.
- [6] 周万迪,魏晓光,高冲,等. 基于晶闸管的混合型无弧高压直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2014,34(18):2990-2996.
ZHOU Wandu,WEI Xiaoguang,GAO Chong,et al. Thyristor based hybrid arc-less high voltage direct current circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(18):2990-2996.
- [7] SCHMITT D,WANG Y,WEYH T,et al. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids[C]//International Multi-Conference on Systems,Signals & Devices. Chemnitz, German:[s.n.],2012:1-5.
- [8] CANDELARIA J,JAE-DO P. VSC-HVDC system protection:a review of current methods[C]//Power Systems Conference and Exposition. Phoenix,AZ,USA:IEEE,2011:1-7.
- [9] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
DONG Yunlong,LING Weijia,TIAN Jie,et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):169-175.
- [10] LI Xiaoqian,SONG Qiang,LIU Wenhua,et al. Protection of non-permanent faults on DC overhead lines in MMC based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013, 28(1):483-490.
- [11] MARQUARDT R. Modular multilevel converter:an universal concept for HVDC-networks and extended dc-bus-applications[C]//2010 International Power Electronics Conference(IPEC). Sapporo, Japan:IEEE,2010:502-507.
- [12] 赵成勇,许建中,李探. 全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J]. 中国科学:技术科学,2013(1):106-114.
ZHAO Chengyong,XU Jianzhong,LI Tan. DC faults ride-through capability analysis of full-bridge MMC-MTDC system[J]. Scientia Sinica Technologica,2013(1):106-114.
- [13] 罗永捷,李耀华,李子欣,等. 全桥型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越控制保护策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1933-1943.
LUO Yongjie,LI Yaohua,LI Zixin,et al. DC short-circuit fault ride-through control strategy of full-bridge MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):1933-1943.
- [14] 赵鹏豪,王朝亮,许建中,等. 一种具有直流故障穿越能力的 MMC 子模块拓扑[J]. 电网技术,2014,38(12):3441-3446.
ZHAO Penghao,WANG Chaoliang,XU Jianzhong,et al. A sub-module topology of MMC with DC fault ride-through capability

- [J]. Power System Technology, 2014, 38(12):3441-3446.
- [15] 吴婧,姚良忠,王志冰,等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11):2681-2694.
- WU Jing, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11):2681-2694.
- [16] 薛英林,徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21):63-70, 194.
- XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21):63-70, 194.
- [17] 王一,刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8):2312-2319.
- WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8):2312-2319.
- [18] 张建坡,田新成,尹秀艳. 模块化多电平换流器直流输电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11):103-108.
- ZHANG Jianpo, TIAN Xincheng, YIN Xiuyan. Control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):103-108.
- [19] 喻锋,王西田. 基于冒泡原理的模块化多电平换流器快速电压

均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9):81-86.

YU Feng, WANG Xitian. Fast voltage balancing control based on bubbling principle for modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9):81-86.

作者简介:



和敬涵

和敬涵(1964—),女,北京人,教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制;

黄威博(1990—),男,四川内江人,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制;

李海英(1972—),男,内蒙古赤峰人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为高压直流输电控制保护、柔性直流输电技术和交直流输电技术;

罗国敏(1983—),女,四川内江人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统故障诊断、在线监测、故障识别和定位(E-mail: gmluo@bjtu.edu.cn);

王光江(1989—),男,云南昭通人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制;

许寅(1986—),男,福建宁德人,教授,博士,主要研究方向配电网自愈控制、电力系统韧性、电力系统电磁暂态仿真与高性能计算。

FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy

HE Jinghan¹, HUANG Weibo¹, LI Haiying², LUO Guomin¹, WANG Guangjiang¹, XU Yin¹

(1. School of Electrical and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In view of the rapid clearing of MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based HVDC) DC fault, the DC fault mechanism and fault clearing control strategy of full-bridge modular multilevel converters are studied. The conducting mode and operating characteristics of the full-bridge submodule are analyzed. The mechanism of DC-side pole-to-pole fault, the fault current blocking principle and the fault clearing control strategy before and after locking are proposed. A simulation model is built in PSCAD/EMTDC, based on which the operating characteristics of full-bridge submodule, the DC fault mechanism, the fault clearing and fast recovery strategy are carried out. The simulative results verify the effectiveness of the proposed control strategy for full-bridge submodule in aspects of DC fault ride-through.

Key words: modular multilevel converter; full-bridge submodule; DC power transmission; DC fault; locking; fault ride-through