

柔性直流电网故障限流技术分析与探讨

刘 剑¹,何雨微¹,徐祥海¹,唐 剑¹,邵能灵²,杨 翀¹

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司,浙江 杭州 310016;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240)

摘要:故障限流技术是实现柔性直流电网保护和故障隔离的重要过渡手段。基于柔性直流电网的故障特征,结合国内外研究成果,从交流侧限流、换流器限流以及直流侧限流3个方面分析了柔性直流电网各类限流技术和方法的原理及性能,对相关限流技术和方法进行了仿真测试和比较。基于对比分析结果,提出了一种改进的电感型限流电路拓扑。所提出的限流电路能够有效抑制故障电流,在配合直流断路器开断故障的情况下,可加速故障电流衰减。最后探讨了未来直流电网故障限流技术可能的研究方向。

关键词:柔性直流电网;保护;直流线路;故障隔离;故障限流

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202002030

0 引言

随着全球化石能源的日益枯竭和改善环境压力的不断增加,我国乃至世界均面临着能源结构的战略性调整,大规模开发和利用新能源是实现该战略的重要措施^[1-3]。近年来,全球新能源发电技术得到快速发展,相关工程大量投建,然而风能、太阳能等新能源发电具有间歇性、随机性特点以及传统电网自身消纳能力的技术限制等问题^[1,4]。为了适应未来能源格局的深刻变化,需在电网侧加快新型汇集及送出技术的研发,以提高新能源发电的利用效率。基于柔性直流技术的直流电网可以实现新能源的平滑接入、有功无功的独立控制、快速灵活的远距离电力传输以及全局功率调节互济,被认为是构建全球能源互联网骨干网架的关键技术之一^[2]。与传统高压直流系统相比,直流电网有望提供更高的供电可靠性、设备的冗余性及适应性更强的供电模式和灵活安全的潮流控制^[4]。

与传统高压直流系统不同,直流电网一般无低压限流环节和直流侧线路边界(如平波电抗器),直流侧发生故障时,故障电流具有峰值大、上升速度快的特点。由于直流电容快速放电,直流侧电压迅速跌落,直流侧故障电流峰值高达额定电流的几十倍,较大的故障冲击电流极易使直流线路以及换流器件因过流而损坏^[5-6]。同时,由于直流侧的低阻抗特征,直流电网中的非故障部分也容易出现低压现象。此外,无论是两电平的电压源型换流器(VSC)还是基于半桥子模块的模块化多电平换流器(MMC),均面临着无法闭锁交流侧馈入电流的问题:当直流侧发生故障时,换流器内部的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为了实现自保护而立即关断,由于续流二极管的存在,在IGBT全部关断后将构成一个不控整流

桥,交流电网持续向直流侧馈入故障电流^[6-7]。

由于两电平VSC和传统MMC均不具备直流故障的自清除能力,其故障隔离一般需要借助断路器来实现,其主要包括利用交流断路器或直流断路器来隔离直流侧故障。利用交流断路器隔离故障的方案简单方便,但交流断路器动作时间较长,一般需要2~3个周期^[6-7]。从提高直流电网供电可靠性的角度而言,利用直流断路器能够实现最小范围、有选择性的故障切除,是理想的直流故障隔离手段^[6]。目前直流断路器按照技术原理主要可以分为3种类型:机械式直流断路器、固态直流断路器和混合式直流断路器。其中固态直流断路器和混合式直流断路器在开断能力和速度上具有一定的优势,是目前直流断路器技术的重点研究方向^[7]。2015年,全球能源互联网研究院研制成功了世界首台 ± 200 kV高压直流断路器,可在3 ms内断开高达15 kA的故障电流。2016年,南瑞集团有限公司研制出世界首台500 kV直流断路器,其分断电流高达25 kA,开断时间小于3 ms。此外,机械式直流断路器的容量和开断速度也取得新突破,2017年世界首台机械式高压直流断路器在南方电网 ± 160 kV广东汕头南澳多端柔性直流输电系统成功投运,具备0~9 kA电流的双向开断能力,开断时间约为3.5 ms。阿尔斯通、西门子等公司亦针对直流断路器技术进行了大量的研究与试验工作。然而,就目前的技术而言,具有快速分断较大故障电流能力的高压直流断路器尚未完全成熟,直流断路器的开断容量、速度和技术经济性还有待进一步提升^[6-7]。因此,为避免直流线路和换流器件因过流而损坏,并实现直流电网的安全稳定运行,需要对故障电流进行抑制,以配合相关开关器件快速、有效地隔离直流电网故障^[8]。

本文在分析直流电网故障特征的基础上,结合故障阶段性特征和故障电流馈入路径,从交流侧限

流、换流器限流以及直流侧限流3个方面分析了目前直流电网各类限流技术和方法的原理和特点,对相关限流技术和方法进行了仿真测试和比较,并基于分析对比结果提出了一种改进的电感型限流电路(ICLC)拓扑,该限流电路由限流电感和能量耗散电路并联构成。限流电感用于限制故障电流,以降低对于直流断路器开断容量和开断速度的要求;能量耗散电路由受控双向晶闸管(DTS)和吸能电阻组成,用于减少直流断路器中吸能元件(如氧化锌避雷器)耗散故障电流的压力,并加速故障电流衰减。最后,结合相关原理的分析和对比结果,探讨了未来直流电网故障限流技术可能的研究方向。

1 直流电网故障电流特征

直流电网的拓扑结构和电压等级还没有统一标准,目前主要的拓扑结构包括环状、放射状和两端这3种,不同拓扑结构的可靠性有待进一步研究^[6,9]。目前在已投建的柔性直流输电工程中两电平VSC和半桥MMC的应用较为广泛。与MMC相比,两电平VSC的输出波形谐波含量较高,在高压直流系统中对IGBT开断的离散性要求高、开关损耗大^[10],但两电平VSC具有控制策略简单、投资成本低等优点,应用于电压等级相对较低的直流电网中仍具有一定的优势^[6,11]。

图1给出了一种基于两电平VSC的多端柔性直流电网结构示意图。该直流电网由3座主换流站、直流线路、中低压直流系统、储能以及光伏和风电等新能源发电系统组成。系统部分参数见附录中表A1。图中, F_1 和 F_2 为对称位置的直流线路故障点, F_1 至换流站1及 F_2 至换流站2的距离均为10 km; i_a 、 i_b 、 i_c 为交流电网电流; i_{D1} — i_{D3} 为换流站内IGBT单元电流; D_1 — D_3 为续流二极管; C 为直流侧电容; L_{cable1} 、 L_{cable2} 为直流线路; $i_{cable12}$ 、 $i_{cable21}$ 为直流线路两侧电流。

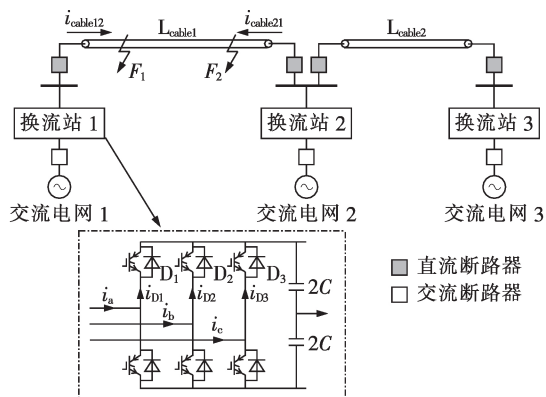
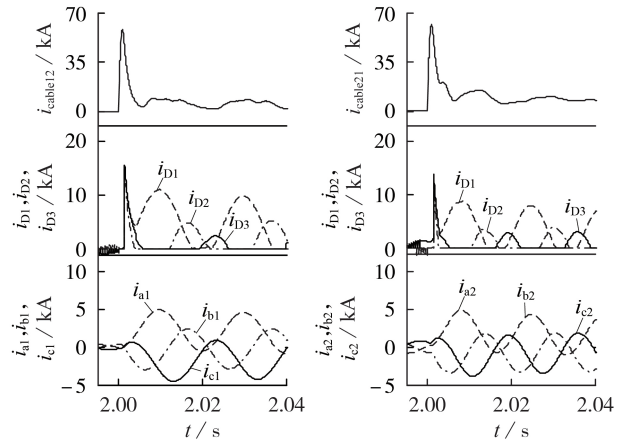


图1 柔性直流电网结构示意图

Fig.1 Structure diagram of flexible DC grid

直流电网故障具有明显的阶段性特征,包括电容放电、二极管续流以及交流电网馈入3个阶段。

图2给出了 F_1 和 F_2 处发生极间故障时两侧换流器处的故障电流,包括直流线路电流、换流站内IGBT单元电流(IGBT闭锁后, i_{D1} 、 i_{D2} 、 i_{D3} 与续流二极管电流一致)以及交流侧换流站1电流 i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 和换流站2电流 i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} 的曲线。



(a) F_1 处故障

(b) F_2 处故障

图2 直流电网故障电流

Fig.2 Fault current in DC grid

由图2(a)可知,当 F_1 处发生故障时,换流站1直流侧电容迅速放电,直流线路电流快速增大,IGBT因自我保护而迅速闭锁;当直流侧电压下降至0时,故障进入二极管续流阶段,此时极大的故障电流转移至二极管,其幅值高达IGBT正常电流的十几倍。当故障电流进一步衰减至一定值时,交流电网开始向直流侧馈入电流,此时故障特征与交流侧三相短路故障相似,交流侧出现明显过流。图1中,换流站1直流侧出口仅有一条直流馈线, F_1 处发生故障时,故障特征主要受换流站1及交流电网1参数的影响。而当 F_2 处发生故障时,由于换流站2直流侧出口有2条直流馈线,非故障线路将向 F_2 处馈入电流,使得直流侧过流程更严重,如图2(b)所示,其余特征与 F_1 处故障类似。单极故障电流水平较极间故障低,除没有二极管续流阶段外,其余故障特征与极间故障一致。

MMC直流侧电容分布在各个子模块中,当直流侧发生故障时,在IGBT闭锁前,故障电流迅速达到峰值,特征与两电平VSC类似^[13]。图3为两端MMC-HVDC直流线路10 km处发生极间故障时直流线路电压 u_{cable} 、电流 i_{cable} 的仿真曲线,两端MMC-HVDC系统参数见附录中表A2。

由此可见,不论是由VSC还是MMC构成的柔性直流电网,其故障电流具有峰值大、上升速度快的特征,直流侧故障电流峰值远大于目前直流断路器的开断水平。直流侧极大的故障电流和直流侧电压的快速跌落容易导致换流站内部和交流侧出现明显的过流现象,威胁器件的安全和系统的稳定运行。此

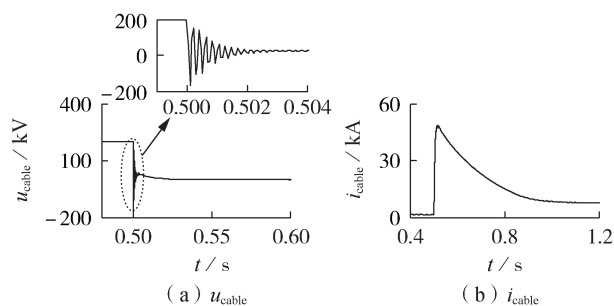


图3 MMC-HVDC系统直流侧极间故障特征

Fig.3 Characteristics of DC side inter pole fault in MMC-HVDC system

外,相邻直流线路的馈入作用使得故障过流情况更为严重。因此,对故障电流进行限制或分流,以抑制故障电流峰值和上升速度,避免换流器件因过流而损坏,是目前处理柔性直流电网故障亟需采取的措施。

从上述分析可以看出,直流电网故障电流主要由交流侧电网馈入、换流站并联电容放电(子模块电容放电)和直流侧助增这3个部分构成,其中直流侧包括相邻线路馈入和线路分布电容放电^[14]。因此,后文将主要从交流侧、换流站内和直流侧3个方面开展限流技术分析。

2 直流电网故障限流技术

根据直流电网故障电流特征,限流技术的研究可归纳为交流侧馈入分量抑制、换流内部过流阻断或分流、直流侧限流3个方面。

2.1 交流侧限流技术

为抑制交流电网向直流侧馈入电流,文献[15]提出在交流侧增加并联DTS的方案,如附录中图A1所示。当直流电网发生故障时,交流侧晶闸管组触发导通,在交流侧形成三相短路故障,以此来转移交流侧馈入的电流。由图A1可知,该方案对于阻断交流侧馈入的电流具有一定的作用,但无法抑制直流侧电容放电的冲击电流。

类似地,文献[16-17]提出了在换流器交流侧出口串入电感-电容-电感(LCL)电路的限流方案(简称LCL方案),如附录中图A2所示。通过合理地设计电容、电感参数,该LCL电路既可以实现换流变压器的功能,又能够有效地抑制交流电网向直流侧馈入故障电流。此外,通过交流侧断路器切断交流电网馈入的电流是两端柔性直流系统采取的限流方案之一。然而,柔性直流电网故障电流发展速度极快,几毫秒内即可达到峰值,交流断路器动作时间较长,无法满足动作时间的要求。此外,对于多端系统和直流电网而言,利用交流断路器隔离故障往往会致整个系统停运,严重影响系统的可用率^[7]。

2.2 基于换流器拓扑结构的限流技术

直流电网发生故障时极易引起换流单元过

流,为保护换流单元,在不改变换流器基本拓扑的前提下,对故障电流进行分流是一种较好的处理方法。文献[18]提出了在换流单元并联增加单向或DTS的方法。文献[6]提出了一种MMC拓扑改进结构,该拓扑在MMC的每个桥臂串入一个限流模块,如附录中图A3所示。正常运行时,限流模块内的开关一直处于导通状态,一旦检测到故障开关立即关断,使得限流电阻投入电流回馈回路中,抑制故障电流。

阿尔斯通结合传统两电平VSC和MMC的特点,提出了混合型换流器拓扑,该混合型换流器拓扑由导通开关和整流电路组成^[19]。因导通开关和整流电路的位置不同,可分为混合级联多电平换流器HCMC(Hybrid Cascaded Multilevel Converter)和桥臂交替导通换流器AAMC(Alternate-Arm Multilevel Converter)。与在交流侧增加限流措施的方法类似,当直流电网发生故障时,混合型换流器可通过整流电路提供的反向并联二极管使交流侧馈入的电流迅速下降到0。此外,国内外学者还提出了多种具有故障电流抑制和闭锁功能的新型子模块拓扑,如全桥子模块、箝位双子模块^[17],通过合理结构和控制设计,使这些具有新型子模块的MMC实现直流故障电流闭锁^[6]。

2.3 直流侧故障限流技术

直流侧电容的放电过程是直流侧出现明显过流的重要原因。文献[21]提出了在直流侧电容支路串联直流断路器的方法,一旦检测到直流线路故障,直流断路器立即动作,切断电容支路,从而避免电容放电过程。该方法对直流断路器开断速度要求极高。由于目前直流断路器开断容量和开断速度的不足,在直流侧增加限流装置(如附录中图A4所示)以降低故障电流峰值和上升速度,再结合直流断路器进行故障切除,是目前直流电网处理故障的一种经济、有效的手段。文献[8,22-23]提出了在直流线路端串入电感来限制故障电流的方法。当正常运行时,限流电感不会产生明显的压降,而在直流电网发生故障时,电流变化速度极快,电感阻抗效应明显增大,能有效地抑制故障电流峰值和电流上升速度。

液氮冷却技术和超导涂层导线技术的进展使得超导限流器(SFCL)在直流电网中的应用成为可能^[5-6]。由于SFCL在系统正常运行时,呈现无阻抗的特征,而故障时,SFCL进入失超状态而呈现高阻抗特征,进而可以有效地限制故障电流。根据限流阻抗特性,SFCL可分为电阻型SFCL和电感型SFCL这2类。文献[5-6,24-25]详细分析了电阻型SFCL和电感型SFCL应用在直流系统的性能。电感型SFCL的串入增加了故障电流的振荡过程,使得故障电流衰减变慢,与加入常规限流电感的方法类似。而电阻型SFCL在故障时相当于串入电阻,减小了故障回

路的阻尼特性,抑制了直流电容电流的振荡过程。因此,电阻型SFCL应用于直流电网相较于电感型SFCL限流更有优势^[5-6]。文献[26-27]给出了电阻型SFCL的建模方法,且考虑了失超的过渡过程。

附录中图A5给出了电阻型SFCL电阻值的过渡特性曲线,在失超后的短暂时间内,电阻型SFCL的电阻值可模拟为时间的指数函数 $R_{\text{SFCL}} = R_m(1 - e^{-t/T_{\text{sc}}})$,其中, R_m 为SFCL失超后最终限流电阻, T_{sc} 为超导态过渡到正常态的时间。

3 故障限流技术性能分析

3.1 故障限流技术建模与仿真结果

为了对比分析3类限流技术和方法的性能,建立了几种典型直流电网故障限流方案和模型,主要从交流侧电流、换流器内部二极管电流以及直流线路电流这3个方面进行对比分析各类方法的限流性能,直流侧故障下,相关的仿真结果如附录中图A6所示。

图A6(a)、(b)分别给出了图1中 F_1 处发生短路故障时,在交流侧增加双向晶闸管组(简称ACDTS方案)和LCL这2种方案下,换流器1侧的故障电流仿真结果。 F_1 处的故障发生时刻为第2s。为了方便对比,设定保护判定故障的时间为1ms,即在故障发生1ms后,ACDTS方案迅速导通晶闸管;对于LCL方案,根据文献[16-17]的设计方法,其相关参数分别设计为 $L_1=650\text{ mH}$ 、 $L_2=480\text{ mH}$ 、 $C=13.2\text{ }\mu\text{F}$ 。

图A6(c)、(d)分别给出了图1中 F_1 处发生短路故障时,在换流单元增加双向晶闸管组(简称DTS方案)、桥臂串入限流模块(简称LM方案)方案下换流器1侧的故障电流仿真结果。混合型换流器的限流机理与交流侧增加限流环节和桥臂增加限流模块方法类似,本文不再赘述。此外,对于多种具有直流故障闭锁能力的子模块方案,文献[6]已开展了较为详细的研究,因此未予以仿真。同样地,设定故障后1ms,DTS方案投入双向晶闸管组,LM方案投入限流电阻,其限流电阻值设为 $R_{\text{lim}}=20\text{ }\Omega$,在MMC拓扑中,投入的限流电阻为各个子模块之和,因此 R_{lim} 可以设置为较小值。

图A6(e)、(f)分别给出了 F_1 处发生短路故障时,在直流侧串入限流电感(简称CLC方案)和电阻型SFCL方案下换流器1侧的故障电流仿真结果。对于CLC方案,设置直流侧的电感为 55 mH ^[22];理想情况下,限流电感与电感型SFCL的效果相当,因此本节仅对电阻型SFCL的性能进行分析,由图A5可知,本文设置方案参数为 $R_m=30\text{ }\Omega$ 、 $T_{\text{sc}}=2\text{ ms}$ ^[5,27]。

3.2 故障限流性能对比分析

如图A6(a)所示,在ACDTS方案下,由于交流侧形成了三相短路故障,交流电网电流较大。在故障

进入二极管续流阶段时,换流单元电流较大,由于ACDTS方案转移了交流侧馈入的电流,在故障后期换流单元过流程度明显降低。LCL方案对交流电网电流抑制作用明显,如图A6(b)所示。由于LCL电路无法完全阻断交流电网的馈入,故障后期换流单元仍有一定的过流。由此可知,通过在交流侧增加限流电路或措施对于抑制交流电网的馈入具有较为明显的作用,然而由于无法抑制直流电容的放电过程,在故障暂态期间,换流单元和直流线路将出现明显过流,且电流幅值极大,容易引起换流单元因过流而损坏。

如图A6(c)所示,在DTS方案下,交流电网电流水平与ACDTS方案相当,换流单元电流水平与图2(a)相比略有降低,这主要是由于双向晶闸管通过分流达到减轻换流单元过流的目的。同样地,DTS方案无法抑制直流线路故障电流。如图A6(d)所示,当发生直流电网故障时,LM方案可以较好地抑制交流电网电流和换流单元电流,如果限流电阻增大,限流效果将更明显。需要说明的是,LM方案可用于两电平VSC系统和MMC系统,当其用于MMC系统时,由于LM方案的限流电阻与子模块电容为串联关系,在子模块闭锁前的故障暂态期间可以较好地抑制电容放电冲击电流^[6],但限流电阻的串入增加了MMC结构的复杂性,且需要考虑限流电阻的散热问题。

如图A6(e)、(f)所示,直流侧串入限流电感和电阻型SFCL时,故障电流均可以得到较好的抑制。当电阻型SFCL失超后的电阻值足够大时,交流电网、换流单元以及直流线路电流过流程度将明显降低。由图A6中的换流单元电流可知,在LM和电阻型SFCL方案下,故障后的短暂时间内,换流单元几乎没有出现过流。在此阶段,若依靠直流断路器开断故障,即可避免换流单元因过流而闭锁,有利于故障的恢复。

由图A6(e)、(f)中的直流线路电流曲线可知,在这2种方案下,直流线路电流峰值明显降低,经过合理的参数设计,甚至可以使得故障电流峰值低于目前直流断路器开断水平,从而可降低直流电网故障切除对直流断路器容量和速度的要求。此外,可以发现,由于电感的储能续流作用,电感型SFCL方案对故障电流水平地限制效果略低于电阻型SFCL,尤其对于直流线路电流而言,故障电流衰减速度慢得多。

综上所述,故障限流性能对比分析结果见表1。

4 改进的ICLC

4.1 拓扑设计

由上述分析可知,直流侧串入限流电感和电阻型SFCL这2种方案应用于多端柔性直流电网时,在配合直流断路器切除故障的情况下,将极大地利于

表1 限流性能对比分析

Table1 Comparison and analysis of fault current limiting performance

限流技术方案	限流效果		
	交流电流	二极管电流	直流电流
ACDTS	无限流	无法限制故障暂态期间的严重过流,故障后期限流效果明显	无限流
LCL	限流效果显著	无法限制故障暂态期间严重过流,故障后期限流效果明显	无限流
DTS	无限流	限流效果微弱	无限流
LM	有一定的限流效果	限流效果一般	对VSC拓扑无限流效果,对MMC拓扑限流效果显著
CLC	故障暂态期间限流效果显著	故障暂态期间限流效果显著	限流效果显著
电阻型SFCL	限流效果显著	故障暂态期间限流效果显著	限流效果显著

故障恢复,提高多端系统的可用率。在超导技术商业化成熟应用前,采用直流侧串入限流电感不失为中间过渡阶段使用的经济型方案。为减少电感的储能续流,进一步加快故障电流衰减,本文提出了一种改进的ICLC,其结构示意图如图4所示。图中,ICLC由限流电感和能量耗散电路组成; L_{mn} 为限流电感(m, n 取1、2、3时分别表示位于不同直流电缆的不同换流器端口处);能量耗散电路由双向可控晶闸管 T_1 和 T_2 以及吸能电阻 R_r 组成。正常运行时,晶闸管 T_1 和 T_2 处于关断状态。当直流线路发生故障时,一旦直流断路器主开关开断时, T_1 和 T_2 触发导通,使得吸能电阻与直流断路器中的金属氧化物避雷器(MOA)共同释放故障电流能量。

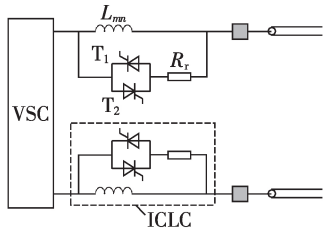


图4 改进的电感型限流电路

Fig.4 Improved ICLC

4.2 限流特性分析

为了方便起见,直流断路器(固态直流断路器和混合直流断路器)可以用1个具有不同延时动作特性的主开关和由MOA组成的泄能回路组成^[28],如附录中图A7所示。图中, t_{CBO} 为直流断路器接受保护判定信号后的动作时间。ICLC配合直流断路器切除故障电流的时序等值电路如附录中图A8所示。

附录中图A9给出了 F_2 处发生故障时,改进的ICLC配合直流断路器切除故障电路的仿真结果,包

括直流线路电流 $i_{cable21}$ 、限流电感电压 U_L 、MOA电流 i_M 和MOA吸收的能量 E_M 。为了对比仿真,图A9(a)和(b)分别给出了直流侧无限流措施和仅串入限流电感的仿真结果。设 $t_{CBO} = 2 \text{ s}^{[28]}$,MOA额定电压设置为150 kV,残压特性为默认电压-电流曲线,采用2个MOA并联方式吸收故障电流能量。设限流电感为55 mH, $R_r = 20 \Omega$ 。

如图A9(a)所示,无限流措施下,在断路器动作前,线路需承受极大的故障电流,直流断路器主开关断开后,MOA吸收的能量极高;如图A9(b)所示,限流电感能够有效地限制故障电流;然而仅在限流电感的情况下,故障电流熄灭时间明显增加,这主要是由于限流电感的储能和续流作用。当没有能量耗散元件时,MOA吸收的能量较高,容易导致MOA热过载;然而,由图A9(b)可知,在该ICLC的作用下,当直流断路器主开关开断后,故障电流迅速下降到0,且MOA吸收的能量明显减少,大幅缩短了故障切除,有利于故障后系统的恢复。

4.3 参数设计

结合图4和图A8可知,故障后,在直流断路器主开关断开之前,晶闸管 T_1 和 T_2 处于关断状态,其两端承受的电压为限流电感的电压。考虑到最严重的情况,即直流线路始端发生故障,晶闸管 T_1 和 T_2 承受的最大电压为直流线路的正常运行电压。当并联电容向故障点放电时,直流侧电压逐渐下降,此时晶闸管 T_1 和 T_2 承受的电压下降。因此,晶闸管 T_1 和 T_2 的额定电压应该高于直流线路的额定电压,需要采用阀组实现。

理想情况下,晶闸管 T_1 和 T_2 导通后的压降为0,因此,吸能电阻的电压 U_{Rr} 等于限流电感电压 U_L ,可通过式(1)得到:

$$U_{Rr} = L_{mn} di_{Lmn}/dt \quad (1)$$

吸能电阻的能量 E_{Rr} 为:

$$E_{Rr} = \int \frac{U_{Rr}^2}{R_r} dt = \int \frac{(L_{mn} di_{Lmn}/dt)^2}{R_r} dt \quad (2)$$

$$E_{Rr} = E_L - E_M \quad (3)$$

其中, E_L 为直流断路器主开关开断时刻限流电感存储的能量; i_{Lmn} 为限流电感电流。由图A8和图A9可知,晶闸管导通后,MOA吸收的能量降低,转移到吸能电阻上。由式(2)可知,吸能电阻 R_r 越小,吸收的能量越多,较小的 R_r 对于减小故障切除时间和MOA吸收能量 E_M 的作用更明显,然而这也意味着 R_r 吸收了更多从MOA转移过来的能量。为了防止吸能电阻过热,可通过采用并联多个吸能电阻的方式。

5 柔性直流电网故障限流技术研究展望

柔性直流电网自身结构的特殊性使得其故障具有电流峰值大、故障发展速度快的特点,容易引起换

流器件损坏,且威胁着交直流系统的安全稳定运行。由于目前缺乏成熟且经济的故障电流开断设备,采用故障限流技术是实现柔性直流电网保护和故障隔离的重要过渡手段。基于目前国内外技术研究的现状和发展趋势,柔性直流电网故障限流技术面临的问题以及未来的研究方向包括以下几个方面。

(1)具有故障限流和快速恢复功能的新型换流器拓扑结构研究。

具备故障电流闭锁功能的子模块以及在换流器桥臂串入的限流模块可以有效地减少交流电网馈入电流,并抑制电容放电的冲击电流,对于保护换流单元、抑制直流线路电流具有重要的作用,因此,具有限流功能的换流器拓扑将是未来直流电网故障限流技术研究的关键内容之一。当发生直流电网故障时,为了抑制故障电流,具备限流功能的换流器应立即切换调控方式,进入限流模式(非正常运行方式),整个直流电网将进入非正常运行方式,甚至出现短暂性停运。因此,为了提高系统的可用率,要求在故障隔离后,换流器具有快速恢复正常调控方式的能力。同时,新型换流器拓扑的研究也需要关注限流模块和限流功能的引入对系统结构和控制的复杂性的影响。

(2)具备理想阻抗转换功能的直流侧故障限流装置与方案研究。

直流侧限流技术可较好地抑制交流电网馈入电流、换流单元过流以及直流线路电流,在结合直流断路器开断的情况下,可有效地实现直流电网故障隔离。SFCL因其理想的阻抗特性,在直流电网故障限流方面具有明显的优势,其中电阻型SFCL与电感型SFCL和常规电感限流器相比,电流抑制效果更优。利用电阻型SFCL实现故障限流的方法还需要考虑一个问题:电阻型SFCL必须在直流电压过零点以前改变故障回路的阻尼特性,以便实现对交流侧设备和续流二极管的过流限制。此外,目前SFCL动作后失超恢复时间较长,难以满足直流电网故障后快速恢复的要求,且超导材料成本较高。因此,有必要关注电阻型SFCL过渡过程的时间,研究电阻型SFCL快速失超技术、失超后快速恢复技术以及降低超导材料成本是影响其能否大规模应用于直流电网的关键因素。在目前技术条件下,基于常规器件的直流侧限流装置,如限流电感,不失为一种过渡时期使用的经济型限流方案。当然需要考虑限流装置串入对直流电网动态性能的影响,如何优化常规限流器件在直流侧的接入方式,如串并联方式的切换,以减少限流元件在正常运行方式和故障恢复过程中的不利影响,是亟待解决的问题。

(3)故障限流技术方案与直流断路器及直流电网控制系统的配合、协调策略研究。

对于柔性直流电网而言,采用直流断路器快速、有选择地切除直流线路故障,可避免系统各区域出现明显过电流和低电压现象,对于保护换流设备,维持系统非故障部分的稳定运行,提高直流电网的可用率极为关键,也是直流电网较为理想的故障隔离方法。因此,在研究和使用限流技术方案时,需要考虑与直流断路器的配合方式和配合策略,如相应的动作时间和控制方式,这对于加快故障切除极为重要;同时,在故障切除后,要求相关限流装置和方案能与直流电网控制系统进行协调配合,以加快系统恢复稳定运行,这也是未来需要重点关注的问题。

6 结论

本文基于柔性直流电网故障电流特征,从交流侧限流、换流器限流以及直流侧限流3个方面系统分析了目前国内外柔性直流电网各类限流技术和方案的原理及性能。对几种典型的限流技术和装置进行了仿真分析和比较,从保护换流设备、快速隔离故障、提高柔性直流电网可用率的角度出发,总结了柔性直流电网故障限流面临的关键问题,并提出了一种改进的ICLC拓扑,该限流电路能有效限制故障电流,在配合直流断路器开断故障的情况下,有效地加速故障电流的切除。最后,探讨了未来直流电网故障限流技术进一步的研究方向,为后续研究提供一定的参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [2] 胡文旺,唐志军,林国栋,等. 柔性直流输电工程系统调试技术应用、分析与改进[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):197-203,210.
HU Wenwang, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Application, analysis and improvement of system commissioning technology for flexible DC transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 197-203, 210.
- [3] 贺之渊,刘栋,庞辉. 柔性直流与直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术,2018,42(1):1-12.
HE Zhiyuan, LIU Dong, PANG Hui. Research of simulation technologies of VSC-HVDC and DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 1-12.
- [4] 孙棚,王华伟,雷霄,等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):219-223.
SUN Xu, WANG Huawei, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.
- [5] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.

- [6] 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.
- [7] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):158-167.
LIU Jian,TAI Nengling,FAN Chunju,et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(20):158-167.
- [8] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 多端VSC-HVDC直流线路故障限流及限流特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5122-5133,5393.
LIU Jian,TAI Nengling,FAN Chunju,et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(19):5122-5133,5393.
- [9] 朱良合,袁志昌,盛超,等. 基于柔性直流输电的异步互联系统频率支援控制方法综述[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):84-92.
ZHU Lianghe,YUAN Zhichang,SHENG Chao,et al. Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(2):84-92.
- [10] XUE Y L,XU Z,TU Q R. Modulation and control for a new hybrid cascaded multilevel converter with DC blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(4):2227-2237.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2014:1-2.
- [12] YANG J,FLETCHER J E,O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(10):3827-3837.
- [13] 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 overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.
- [14] BUCHER M K,FRANCK C M. Contribution of fault current sources in multiterminal HVDC cable networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(3):1796-1803.
- [15] ELSEROUGI A A,ABDEL-KHALIK A S,MASSOUD A M,et al. A new protection scheme for HVDC converters against DC-side faults with current suppression capability [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(4):1569-1577.
- [16] LIN W X,JOVCIC D. LCL and L-VSC converters with DC fault current-limiting property and minimal power losses [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(5):2359-2368.
- [17] JOVCIC D,ZHANG L,HAJIAN M. LCL VSC converter for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(1):137-144.
- [18] LI X Q,SONG Q,LIU W H,et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(1):483-490.
- [19] DAVIDSON C C,TRAINER D R. Innovative concepts for hybrid multi-level converters for HVDC power transmission[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2010:51-56.
- [20] NAMI A,LIANG J Q,DIJKHUIZEN F,et al. Modular multi-level converters for HVDC applications; review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(1):18-36.
- [21] PENG C,HUANG A Q. A protection scheme against DC faults VSC based DC systems with bus capacitors[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Fort Worth,TX,USA:IEEE,2014:3423-3428.
- [22] LIU J,TAI N L,FAN C J,et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multiterminal VSC-HVDC system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(7):5595-5607.
- [23] 李承昱,李帅,赵成勇,等. 适用于直流电网的限流混合式直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2017,37(24):7154-7162,7429.
LI Chengyu,LI Shuai,ZHAO Chengyong,et al. A novel topology of current-limiting hybrid DC circuit breaker for DC grid [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(24):7154-7162,7429.
- [24] LI B,HE J W. Studies on the application of R-SFCL in the VSC-based DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2016,26(3):1-5.
- [25] CHEN L,CHEN H K,SHU Z Y,et al. Comparison of inductive and resistive SFCL to robustness improvement of a VSC-HVDC system with wind plants against DC fault [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2016,26(7):1-8.
- [26] 刘旭,盛杰,洪智勇,等. 超导限流器在多端直流系统中的应用研究[J]. 电网技术,2015,39(4):983-988.
LIU Xu,SHENG Jie,HONG Zhiyong,et al. Research on application of superconducting fault current limiter in VSC-MT-DC[J]. Power System Technology,2015,39(4):983-988.
- [27] 李旭,陈树勇,唐晓骏,等. 电阻型超导故障电流限制器应用于VSC-HVDC系统的位置优选研究[J]. 电力建设,2016,37(7):78-83.
LI Xu,CHEN Shuyong,TANG Xiaojun,et al. Optimal location selection of resistive-type superconducting fault current limiter in VSC-HVDC system[J]. Electric Power Construction,2016,37(7):78-83.
- [28] SNEATH J,RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(3):973-981.

作者简介:



刘 剑

刘 剑(1990—),男,湖南永州人,工程师,博士,通信作者,主要从事直流电网保护和能源互联网方面的研究和管理工作的研究;
(E-mail:scut_liujian@163.com);

何雨微(1991—),女,四川广元人,博士,主要从事配网调度和配网自动化方面的研究工作;

徐祥海(1979—),男,浙江江山人,高级工程师,硕士,从事电力系统调度与能源互联网方面的管理工作;

唐 剑(1975—),男,浙江杭州人,工程师,从事电力系统调度与控制方面的管理工作;

邵能灵(1972—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统继电保护和电力系统综合自动化;

杨 翔(1987—),男,湖南常德人,博士,主要从事电网规划方面的研究工作。

(编辑 王欣竹)

Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid

LIU Jian¹, HE Yuwei¹, XU Xianghai¹, TANG Jian¹, TAI Nengling², YANG Xuan¹

(1. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Fault current limiting technology is an important transition mean to realize the protection and fault isolation of flexible DC grid. Based on the fault characteristic of flexible DC grid and research results at home and abroad, the principle and performance of various current limiting techniques and methods are analyzed considering three aspects, including current limiting at AC side, current limiting by converter and current limiting at DC side. In addition, simulations are carried out to test and evaluate those current limiting techniques and methods. An improved hybrid current limiting circuit is proposed based on the comparative analysis results. The current limiting circuit is able to limit the fault current effectively and accelerate the fault current decay during fault interruption with a DC circuit breaker. Finally, possible research directions for fault current limiting technology of flexible DC grid are also discussed.

Key words: flexible DC grid; protection; DC line; fault isolation; fault current limiting

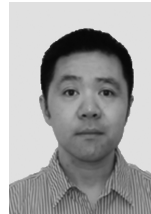
(上接第8页 continued from page 8)

案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 13-19.

WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19.

作者简介:

林湘宁(1970—), 男, 广西南宁人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护与控制 and 新能源微



林湘宁

网规划运行;

刘琦(1993—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: liuqi804250283@qq.com);

童宁(1988—), 男, 广东广州人, 博士后, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: tony1109@qq.com)。

(编辑 任思思)

Blocking pilot protection based on ratio of superimposed energy for VSC-MTDC grid

LIN Xiangning^{1,2}, LIU Qi¹, FAN Lixiang², ZHENG Yuchao², TONG Ning², LI Zhengtian²

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: When the current limiting reactor in the multi-terminal DC grid is designed for centralized configuration, the lack of boundary elements between the DC lines will make it difficult to distinguish internal and external faults. Aiming at the above-mentioned VSC-MTDC grid, a blocking pilot protection scheme based on the ratio of superimposed energy is proposed. The superimposed energy in the protection installation site is used as the start-up criterion to detect the fault in the DC grid, and the protection action criterion is constructed by using the difference between the ratio of superimposed energies of forward and backward traveling waves at two sides of the converter station. A logical exchange can be made to determine whether to perform a trip or not after the judgment of two-terminal protection is completed. The effectiveness of the proposed protection scheme is verified on the PSCAD/EMTDC platform. The simulative results show that the proposed protection scheme can effectively distinguish internal and external faults with better resistant capability to transition resistance and noise.

Key words: VSC-MTDC grid; relay protection; pilot protection; traveling wave propagation characteristics; superimposed energy; converter station

附录

表 A1 系统部分参数

TableA1 Part parameters of system

参数类别	参数数值
直流侧额定电压/kV	± 200
直流线路额定电流/kA	0.5
直流侧并联电容/ μF	300
换流站 1 额定功率/MW	400
换流站 2 额定功率/MW	-200
换流站 3 额定功率/MW	-200
直流电缆 Cable 1 长度/km	100
直流电缆 Cable 2 长度/km	80

表 A2 两端 MMC-HVDC 系统参数

TableA1 Parameters of two-terminal MMC-HVDC system

参数类别	参数数值
直流侧额定电压/kV	± 200
直流线路额定电流/kA	1.5
子模块电容/ μF	3 000
电平数	21
直流电缆长度/km	200

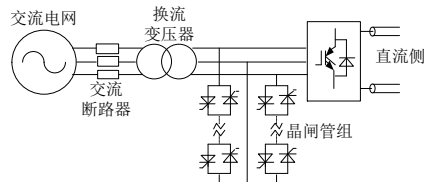


图 A1 交流侧晶闸管组

Fig.A1 Thyristor group at AC side

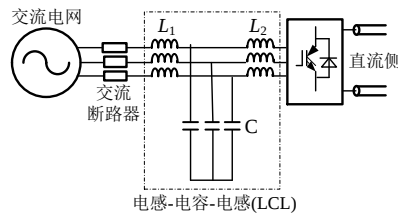


图 A2 交流侧 LCL 电路

Fig.A2 LCL circuit at AC side

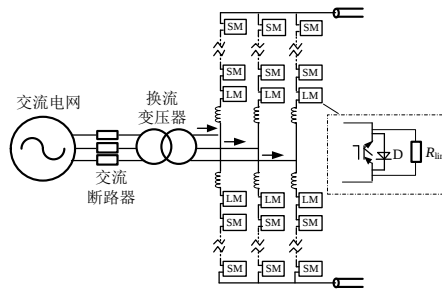
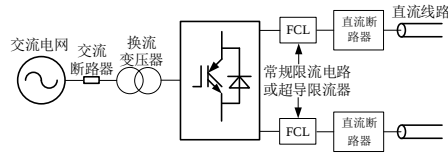


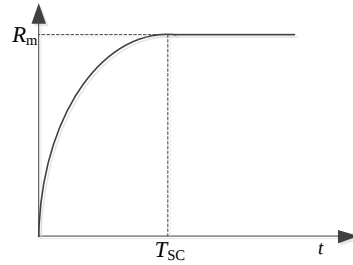
图 A3 换流器桥臂增加限流模块 (LM)

Fig.A3 Current limiting module series with converter bridge



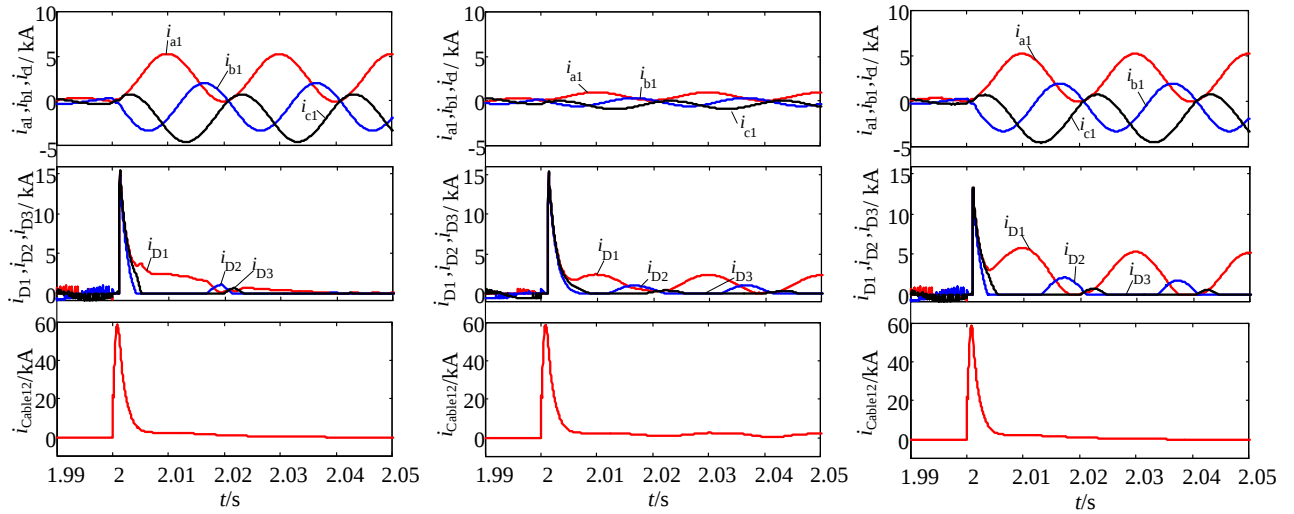
图A4 直流侧故障限流装置

Fig.A4 Fault current limiting configuration at DC side



图A5 电阻型SFCL电阻值的过渡特性

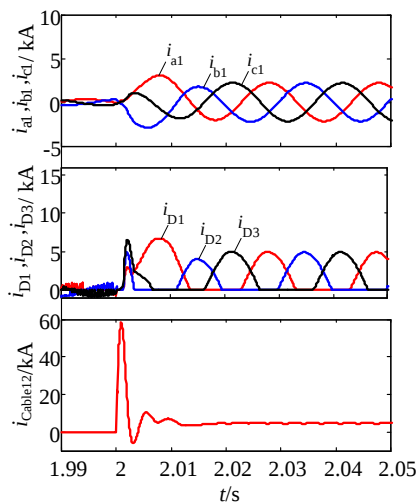
Fig.A5 Resistance value transition characteristics of R-SFCL.



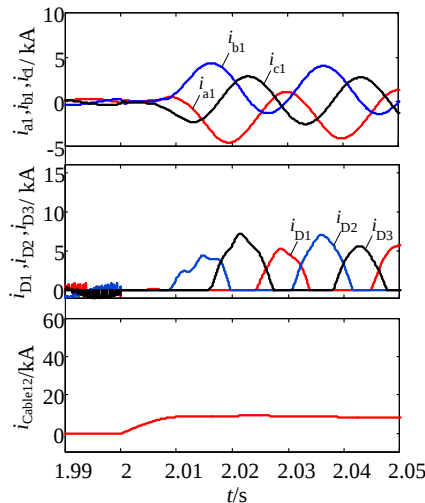
(a) ACDTS 方案

(b) LCL 方案

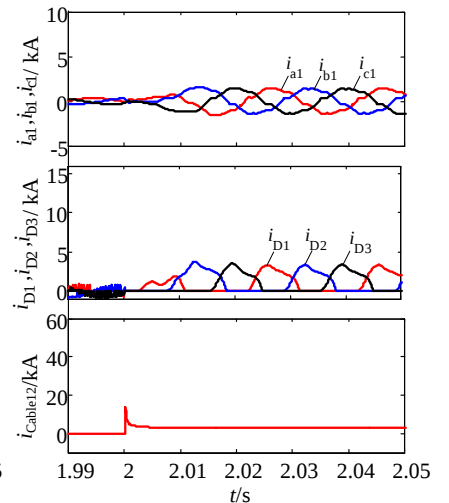
(c) DTS 方案



(d) LM 方案



(e) CLC 方案



(f) 电阻型-SFCL 方案

图 A6 故障限流技术方案仿真结果
Fig.A6 Simulative result of current limiting schemes

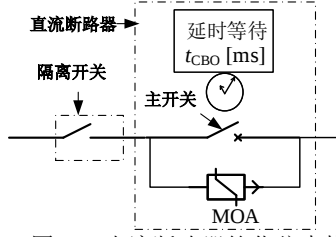
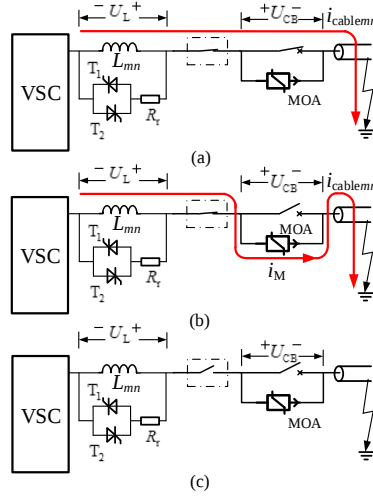


图 A7 直流断路器简化仿真模型
Fig.A7 Simplified simulation model for DC circuit breaker



(a) 直流线路故障 (b) 直流断路器动作, DTST₁ 和 T₂ 触发导通 (c) 隔离开关切除残余电流, DTST₁ 和 T₂ 关闭

图 A8 故障电流切除时序图
Fig.A8 Sequence of fault current interruption

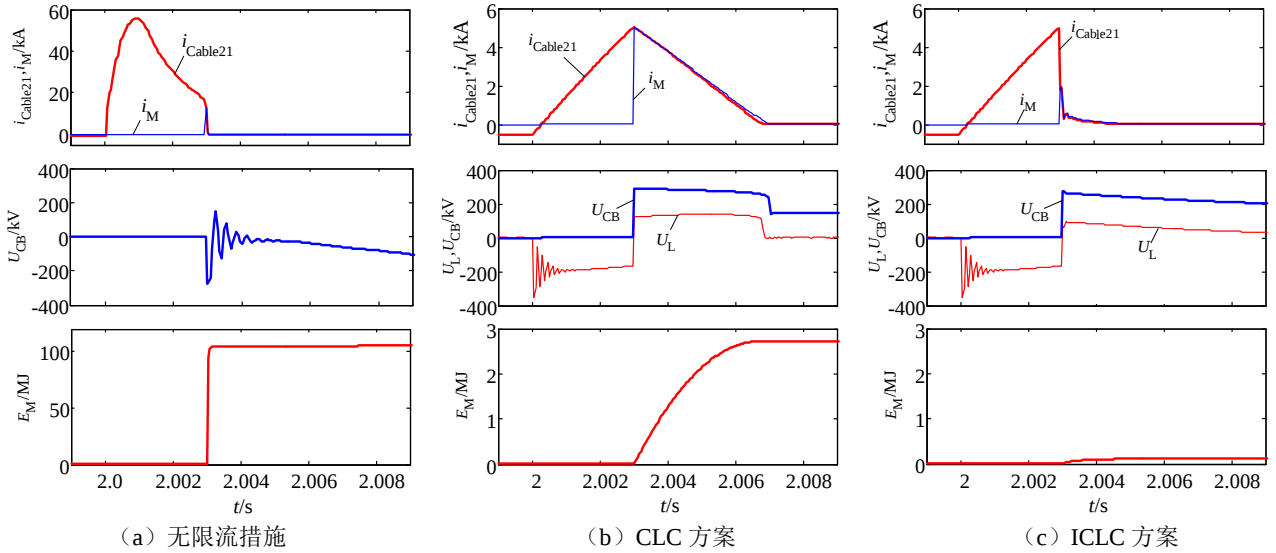


图 A9 限流方案下故障电流切除仿真结果
Fig.A9 Simulative results of fault current interruption performance