

电容型直流断路器拓扑结构研究

赵明君¹, 叶 晗², 李中奇³, 高 森³, 朱海勇³, 朱 旭⁴

(1. 国网新疆信通公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 东南大学先进电能变换技术与装备研究所, 江苏 南京 210096;

3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 4. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要:高压直流断路器是多端直流输电及直流电网技术中的核心设备之一。文中对现有的各类电容型直流断路器进行了比较分析,指出了各类电容型断路器方案的优缺点及其应用场合;在此基础上,提出了一种基于预充电电容的组合式直流断路器方案;在详细描述了所提方案的拓扑结构、工作原理及控制策略后通过在 PLECS 中搭建三端环网模型对其可行性和有效性进行了验证;最后指出了电容型直流断路器未来的研究方向和需要解决的问题。

关键词:直流断路器;电容型直流断路器;组合式直流断路器;预充电电容

中图分类号:TM561

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)06-0062-07

0 引言

高压直流输电技术因在接纳新能源、远距离大容量传送功率等方面具有独特的优势,得到了广泛应用^[1-3]。随着直流电网的不断扩大、直流节点数的增加以及电网结构的日益复杂化,产生了许多亟待解决的问题,短路故障处理便是其中之一。与传统交流电网相比,直流电网的短路保护难度更大。直流电网具有“低阻性”、“低惯量”的特点,因此一旦发生短路故障,换流站两端的并联电容将迅速释放,大量电流在很短的时间内注入到短路点,电流值可在几毫秒内达到额定电流的几十倍甚至百倍^[4-6],严重危害电网设备的安全,影响系统的可靠性运行。因此,发展可靠的直流断路器,及时切除故障线路显得尤为关键。

目前,国内外研究主要将直流断路器分为传统的3类:机械式直流断路器、全固态式直流断路器和混合式直流断路器^[7-11]。电容型直流断路器是指电容在装置中起主要作用的断路器方案,与传统的分类有交叉。电容型直流断路器中既有机械式直流断路器,也有部分混合式直流断路器。在机械式直流断路器中,电容通过与电感谐振产生过零点,为机械开关的无弧分断创造条件^[12];在混合式直流断路器中,电容可以起到缓冲作用以及预充电后的限流作用,提高可靠性。由此可见,电容型直流断路器的发展是断路器研究的重要方向。

为此,本文以直流电网为背景,首先分析了电网对直流断路器的基本要求;接着对已有文献中电

容型直流断路器的拓扑结构及相应的控制策略进行综述;随后提出一种基于预充电电容的新型直流断路器,对其工作原理、控制策略进行详细分析,并通过仿真对其进行验证;最后指出电容型直流断路器未来的发展方向和必须要解决的问题。

1 电容型直流断路器发展现状

1.1 直流断路器的基本要求

直流断路器作为直流电力系统运行控制和保护的关键设备,在工作性能方面有着独特的要求。

1.1.1 安全可靠

与传统的交流电网不同,直流电网不存在自然的过零点,短路故障的切除难度更大,因此安全可靠地实现无弧分断,将故障线路从系统中切除,避免对电力系统产生严重危害是直流断路器的重要指标^[5,7]。

1.1.2 快速分断

直流故障电流上升非常迅速,为了保护电网设备、换流阀等,必须快速切除故障。由于直流电网的故障定位需要一定的时间,留给故障切除的工作时间被压缩,因此系统对直流断路器的快速性提出了严格的要求。

1.1.3 耐压耐流

直流电网的发展方向为多端、高电压和大电流,因此切断直流电流时,承受较高的过电流和过电压是直流断路器必须解决的重要问题。

1.1.4 经济成本

多端直流输电及直流电网的发展需要使用大量的断路器,同时每个断路器涉及到大量的高压固态器件,所以断路器造价十分昂贵。因此设备的经

收稿日期:2018-07-13;修回日期:2018-08-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904604)

济性也是直流断路器的重要指标。

1.1.5 能量耗散和重复开断能力

在直流短路故障线路被切除之后,系统中的储存能量需要释放^[12],以便于直流断路器能够循环投入电网中以备下次使用。尤其是电容型直流断路器,为保持重复开断能力,电容须要放至正常电压水平。

1.2 电容型直流断路器方案

电容型直流断路器是指在拓扑结构中使用电容型一类直流断路器的总称。按照断路器内起核心作用和占主要成本的开关器件类型,可将电容型直流断路器分为机械开关式、全控固态开关式和半控固态开关式。

1.2.1 机械开关式电容型直流断路器

机械开关式电容型直流断路器的基本原理如图1所示。正常工作时,系统通过机械开关传送功率;系统短路时,触发谐振支路产生交变电流,为机械开关的无弧关断提供人工过零点;在机械开关完全关断之后,能量最终在避雷器所在支路消耗吸收。依据断路器中是否存在预充电装置,可将该类断路器分为有源型和无源型^[13-15]。

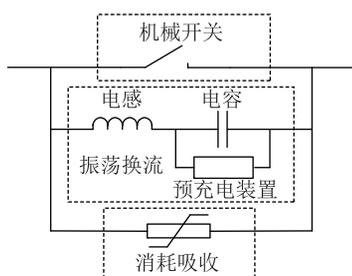


图1 机械开关式电容型断路器结构

Fig.1 The topology of capacitor DC circuit breaker with mechanical switch

最早的无源机械开关式电容型直流断路器开断能力为 500 kV/2 kA^[15],由欧洲 BBC (Brown Boveri Corporation, BBC) 公司研制,该方案开断能力较强,但开断速度较慢,无法实际投运;与无源型断路器相比,有源型断路器增加了预充电装置,缩短了故障线路的切断时间。文献[16]提出有源型断路器方案,开断能力达到 80 kV/16 kA,开断时间为 10 ms;西安交通大学及其合作团队提出了一种有源型方案,开断能力达到 110 kV/12 kA,开断时间缩短至 4.6 ms;华中科技大学团队所提方案应用于南澳±160 kV 多端柔性直流输电系统,可实现快速分断,是目前世界上首次应用于直流工程的机械开关式电容型断路器^[17]。

1.2.2 全控固态开关式电容型直流断路器

由全控固态开关组成的电容型直流断路器的基本原理如图2所示。正常工作时,系统通过全控固态开关支路传送功率;当电网发生短路时,给固态开关关断信号,将故障电流转移到电容支路,对电容进行充电;当电流转移支路的电压达到避雷器的保护阈值后,能量通过避雷器支路消耗吸收。与机械开关式电容型直流断路器相比,该类电容型直流断路器可加快故障电流转移速度,缩短断路器工作时间。

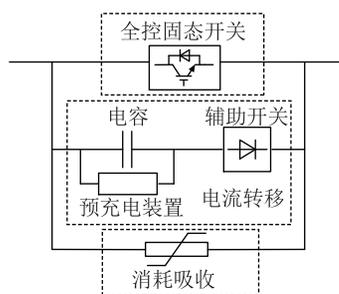


图2 全控固态开关式电容型断路器结构

Fig.2 The topology of capacitor DC circuit breaker with full-controlled switch

基于此基本原理,文献[18-19]提出了一种带外部预充电装置的电容型直流断路器。该方案在保证故障线路可靠切除的同时,电容预充电电压可以有效地抑制短路电流,但全控固态开关的大量串联会增加通态损耗,降低电网效率;文献[20-22]提出的电容换流型方案在固态开关支路上添加了机械开关,降低了通态损耗,但电容的快速充电可能导致机械开关关断难度增大;国家电网全球能源互联网研究院提出的直流断路器方案,将绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)与高压电容组成的全桥结构作为故障电流转移支路的子模块,在舟山多端柔性直流工程中实际投运,开断能力达到 200 kV/15 kA,动作时间为 3 ms,但是大量全桥结构串联使得该方案的设备成本巨大^[23];为此,中国科学院电工研究所提出了基于半桥结构的模块级联型直流断路器,保证了故障线路可靠切除的同时,降低了设备成本^[24]。但是由于全控固态开关式电容型直流断路器主要依靠全控开关实现向电容支路快速换流,需要大量开关管串联,因此该类方案的设备成本相对较高。

1.2.3 半控固态开关式电容型直流断路器

半控固态开关式电容型直流断路器的基本原理如图3所示。正常工作时,系统通过以机械开关为主的载流支路进行能量传送;一旦系统发生短路故障,立即触发导通半控固态开关支路,为载流支路提供零电压的分断条件;在载流支路可靠分断

后,通过触发以电容为主要元件的辅助关断支路,将半控固态开关关断;最终能量将通过避雷器进行消耗吸收。与全控固态开关式电容型直流断路器相比,该类方案由于采用价格较低的半控型器件,可大大降低设备的整体成本。

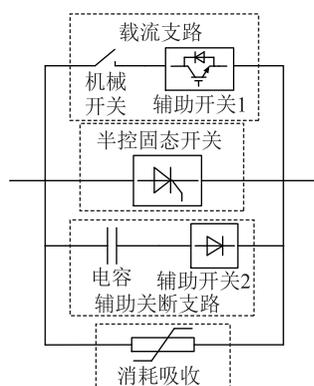


图3 半控固态开关式电容型断路器结构
Fig.3 The topology of capacitor DC circuit breaker with half-controlled switch

基于此基本原理,国网智研院提出的半控开关式电容型直流断路器方案利用预充电电容的反向放电电流辅助晶闸管有效关断^[25],保证故障线路的快速无弧分断,并在 200 kV/3 kA 的额定工况下进行了仿真验证,但该方案在短路瞬间电容放电电流与短路电流方向一致,对故障电流的抑制效果欠佳;文献[26]采用可精确控制的火花间隙代替部分晶闸管,降低了设备成本,但存在限流差的问题;华北电力大学提出的基于晶闸管方案分为断路阀和限流阀,通过触发不同的阀段,使得断路器在稳态时对外呈现低阻抗、故障时呈现高阻抗,从而增强断路器的动态功能特性,提高限流效果^[27];国外研究学者提出采用三电容的晶闸管方案^[28],通过电容之间的相互放电为晶闸管提供强迫关断的反向电流,保证双向工作的同时,具有一定的限流能力,并研制出 2 kV/2 A 的原理样机。

总体来说,机械开关式电容型直流断路器的工作时间较长,很难满足直流电网对断路器的可靠性和快速性要求;固态开关式方案中,全控器件的使用可以提高系统的可靠性和控制精确性,但应用于高压场景的全控器件如 IGBT,价格昂贵,成本很高;半控器件的使用会大幅降低设备成本,如相同电压电流应力条件下的晶闸管比 IGBT 成本节省 80% 以上,但是对电路的控制更加困难,设计要求更高,工作时间也相对较长,因此在选择电容型断路器方案时,须综合考虑断路器的经济性、快速性和可靠性等因素。3 种直流断路器的具体对比见表 1。

表 1 电容型直流断路器对比
Tab.1 Comparison between different DC breakers with capacitors

电容型断路器类别	优点	缺点	应用场合
机械开关式	结构简单 成本低	控制复杂 动作较慢 设计难度大	低压、 小容量场合
全控固态开关式	控制简单 动作快速 可靠性高	成本较高 运行损耗大	中低压场合
半控固态开关式	成本较低 可靠性较高	结构和控制 较复杂	高压场合

2 组合电容型直流断路器方案

2.1 拓扑结构

随着电网结构复杂、输电线路增多,尤其是一个换流站对应多条直流出线,需要大量直流断路器,设备成本巨大。为降低直流电网的断路器成本,提高可靠性,文中提出一种基于预充电电容的组合式直流断路器方案(简称“组合电容型直流断路器”),属于半控固态开关式电容型直流断路器。主要分为两个部分:站端部分(A部分)和线路部分(B部分,包括 B1、B2...BN),配置方法如图 4(a)所示,站端部分为所有出线共享部分,安装在换流站的直流出口侧,线路部分安装在每一条直流出线上。

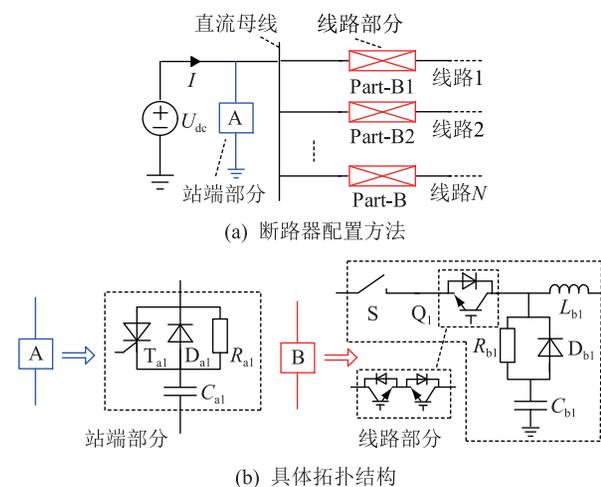


图4 组合电容型直流断路器的配置方法及其拓扑结构
Fig.4 Configuration and topology of assembly hybrid high voltage DC breaker based on pre-charged capacitors

如图 4(b)所示,站端部分的具体拓扑包括一个电容器组 C_{a1} ,一个晶闸管阀组 T_{a1} ,一个二极管阀组 D_{a1} ,一个电阻器 R_{a1} ;线路部分,以安装于线路 1 上的 B1 部分为例,具体拓扑包括一个机械开关 S ,一个反向串联的 IGBT 开关管组 Q_1 ,一个限流电感

L_{b1} , 一个二极管阀组 D_{b1} , 一个电阻器 R_{b1} 和一个电容器组 C_{b1} 。实际应用中, 根据系统中的耐压耐流条件, 每个阀组中的元器件可进行适当的串并联来匹配要求。

2.2 工作原理

正常工作时, 系统通过断路器线路部分中机械开关 S 和开关管组 Q_1 组成的载流支路传送功率; 同时, 站端部分电容 C_{a1} 和线路部分电容 C_{b1} 进行预充电, 直至其电压均达到系统电压等级。当电网的线路 1 发生短路故障, 线路电流将迅速增大。

(1) 故障第 1 阶段: 短路发生之后, 站端电容 C_{a1} 通过二极管阀组 D_{a1} 、线路侧电容 C_{b1} 通过二极管阀组 D_{b1} 以及换流站直流侧电容向故障点放电, 线路电流迅速增大;

(2) 故障第 2 阶段: 当线路电流达到保护阈值时, 立即给晶闸管阀组 T_{a1} 触发信号, 为载流支路的关断做准备; 接着, 关断载流支路上的开关管组 Q_1 , 由于此时线路电流并非很大, 因此对开关管组 Q_1 的耐流要求较低; 在 Q_1 关断之后, 站端电容 C_{a1} 由放电状态变为充电状态, 通过晶闸管 T_{a1} ; 此时立即给机械开关 S 分闸信号, 由于前序操作的固态开关动作时间都在微秒级别, 因此站端部分电容 C_{a1} 和线路部分电容 C_{b1} 的电压差异, 即机械开关 S 的承压很小, 满足无弧分断条件;

(3) 故障第 3 阶段: 待机械开关完全达到绝缘开距后, 站端侧回路继续谐振, 停止触发晶闸管阀组 T_{a1} , 谐振电流只能通过二极管阀组 D_{a1} 和电阻器 R_{a1} , 最终达到稳定; 同理, 线路侧回路电流最终通过电阻器 R_{b1} 进行续流消耗。

由上可知, 该方案属于半控固态开关式电容型直流断路器, 成本较低; 同时, 所提断路器的站端部分为多条线路断路器的共享部分, 因此对于复杂电网来说, 可进一步降低设备成本, 且随着换流站的直流出线数越多, 经济性越好。

2.3 仿真验证

为了验证所提组合电容型直流断路器的可行性和有效性, 搭建了如图 5 所示的三端直流环网模型。其中, 换流站 (voltage source converter, VSC) VSC1 和 VSC2 为定功率站, 功率分别为 300 MW 和 120 MW, 换流站 VSC3 为定电压站, 电压为 200 kV; 线路 12、13 和 23 的长度分别为 100 km, 200 km 和 150 km, 电阻值分别为 1Ω , 2Ω 和 1.5Ω , 电感值分别为 40 mH, 80 mH 和 60 mH; 对于所提断路器, A 部分代表站端部分, B1、B2 部分代表换流站两条直流出线上的线路部分, 具体参数如表 2 所示 (以 A

部分和 B1 部分为例)。基于上述三端环网, 以线路 13 发生短路故障为例, 对故障切除过程和与已有方案对比进行仿真验证。

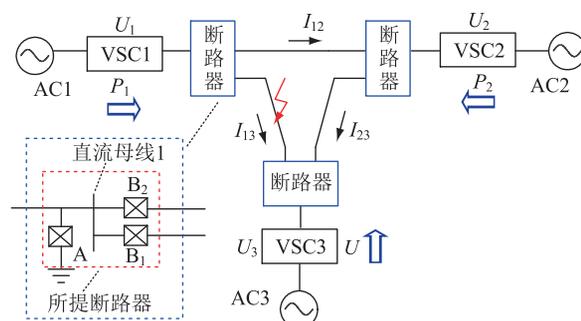


图 5 某三端环网加装新型直流断路器的结构

Fig.5 Three-terminal meshed DC grid with proposed DCCB

表 2 组合电容型断路器参数

Tab.2 Parameters of the proposed DCCB

参数变量	取值大小
站端电容 $C_{a1}, C_{b1}/\mu\text{F}$	2000
电阻器 $R_{a1}, R_{b1}/\Omega$	20
限流电感 L_{b1}/mH	100
机械开关动作时间 t_s/ms	2
机械开关无弧分断能力/kA	0.01
IGBT 阀组 Q_1 额定电压/kV	10
晶闸管阀组 T_{a1} 额定电压/kV	300
二极管阀组 D_{a1}, D_{b1} 反向耐压/kV	300
故障电流检测阈值/kA	1.5

4 s 之前, 电网正常运行。在 4 s 时 (即 t_0 时刻), 线路 13 发生短路故障, 断路器开始投入工作, 仿真波形如图 6 所示。图中电流 I_{13}, I_{23}, I_{12} 分别为线路 13、23、12 的电流; 电压 U_1, U_2, U_3 分别为换流站 1~3 的直流电压; I_s 为短路点电流; I_{Cb1} 为断路器线路侧电容电流, I_{Ca1} 为断路器站端侧电容电流, U_T 为载流支路两端承压, U_{Ca1}, U_{Cb1} 分别为断路器的站端侧电容和线路侧电容电压。

故障切除过程如图 6(a) 所示, t_0 时刻短路故障发生, I_{13} 开始增大, 组合电容型断路器站端部分和线路部分的电容均开始放电, I_{Ca1}, I_{Cb1} 开始上升, U_{Ca1}, U_{Cb1} 开始下降; 此时, 由于站端电容和线路侧电容并联放电, U_T 为零; t_1 时刻, 短路电流上升至检测阈值, 断路器开始动作, 给晶闸管 T_{a1} 触发信号; t_2 时刻, 关断 Q_1 , 此时切断载流支路电流, 站端侧电容由放电变为充电状态, I_{Ca1} 改变方向, 线路侧电容继续放电, U_T 开始上升; 在 t_3 时刻, 给机械开关 S 分闸信号, 经过一定时间动作延时, 达到绝缘开距; 在 t_4 时刻, 停触 T_{a1} , 站端侧通过 R_{a1} 达到稳定, 线路侧能量最终谐振消耗在 R_{b1} 支路。由 U_T 波形可以看出, 故

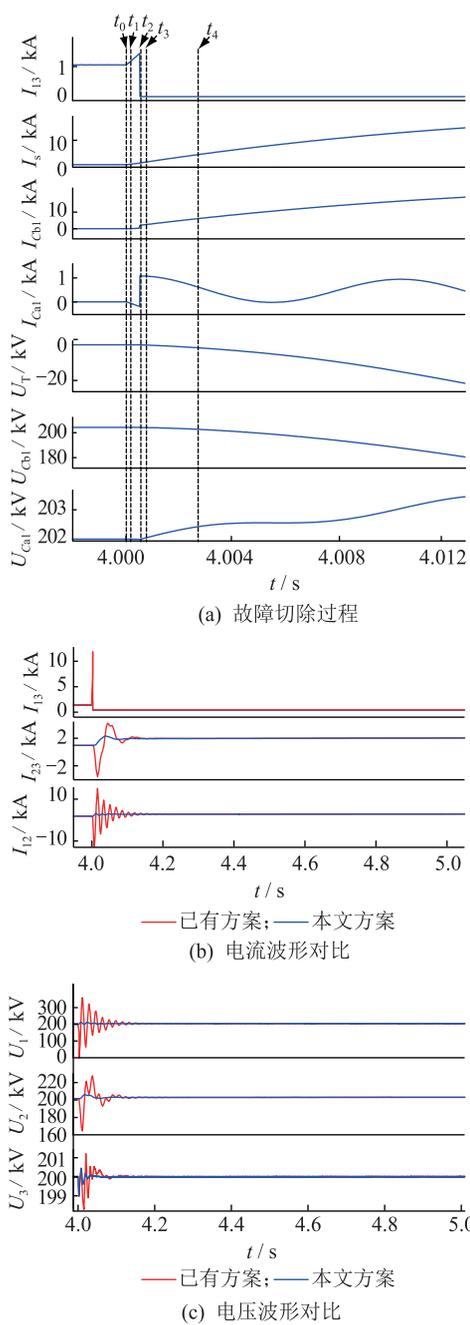


图6 组合电容型直流断路器的仿真结果

Fig.6 Simulation results with the proposed DCCB

障切除过程中,载流支路的两端最大承压保持很小,满足无弧分断条件。

将所提组合电容型方案和已有的组合式方案^[29-30]进行对比仿真研究。仍以图5的三端环网,4 s时线路13发生短路故障为例,仿真结果如图6(b)、(c)所示。从图中可以看出,故障线路电流差异不大,但已有方案故障切除过程中,等效在换流站出口侧设置了虚拟短路点,导致非故障线路电流波动较大,电网电压下降太快,一定程度上影响电网的正常运行;而本文所提方案由于在站端采用了预充电电容,可有效限制故障电流对站端的影响,

保证故障线路可靠切除,同时非故障线路的电流很快恢复到正常运行状态,动态性能优越。且本文所提方案属于半控固态开关式电容型直流断路器方案,晶闸管的使用可大大降低电网的设备成本,经济性更好。

3 电容型直流断路器技术发展方向

经济社会的发展对直流电网技术将提出更加复杂、严格的要求,尤其是短路故障切除的可靠性、快速性,因此机械开关式电容型直流断路器难以满足要求。全控固态开关式和半控固态开关式电容型断路器因控制相对简单、可靠性高,是未来的重要研究方向,具有较好的发展前景,但仍有许多需要解决的技术难题,如:

(1) 故障切除时间优化:目前国内外多要求故障发生后5 ms内切除故障,包括故障定位、检测和断路器工作时间,缩短故障切除时间,有利于降低对系统控制保护的要求。

(2) 机械开关无弧分闸:直流起弧需要满足电压、电场强度的要求^[31],因此直流断路器可从降低机械开关两端的电压、场强和电流大小来避免燃弧,提供系统的可靠性。

(3) 高压电容研制:在几十万伏、几百兆瓦的实际工程中,电容型直流断路器的应用必须有能够满足耐压耐流条件的高压电容,而目前国内外的高压电容主要通过小容量电容的串并联设计,技术尚不成熟、成本昂贵^[23]。

(4) 降低断路器整体造价:大量串并联的固态开关、高压电容等需要巨大成本,因此保证断路器可靠工作的情况下,降低设备成本是重要研究方向。

(5) 串并联固态开关器件控制信号同步问题和故障切除后能量耗散问题。

4 结语

柔性直流输电及直流电网技术是未来电力系统的重要组成部分,而直流断路器更是其核心设备之一。本文以直流电网为应用背景,对直流断路器的重要分支——电容型直流断路器进行研究。首先,根据直流电网的特点,给出了直流断路器的基本要求,并对现有的电容型方案进行分类、比较;接着提出一种新型组合电容型直流断路器拓扑,详细分析了工作原理,并搭建仿真模型验证了其可行性和有效性;最后给出了电容型直流断路器的发展方向 and 待解决的技术问题,为电容型断路器的进一步研究作理论铺垫。

参考文献:

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 董飞飞, 俞登科. 我国电网技术的回顾与展望[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 6-10.
DONG Feifei, YU Dengke. Retrospect and Prospect of China Power Grid Technology [J]. Smart Power, 2018, 46(4): 6-10.
- [3] 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.
- [4] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [5] CHANG B, CWIKOWSKI O, BARNES M, et al. Point-to-point two-level converter system faults analysis [C] // Manchester, UK: 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. IET, 2014: 1-6.
- [6] 魏承志, 史文博, 文安. 三端 MMC-HVDC 换流站直流母线双极短路故障特性分析 [J]. 广东电力, 2016, 29(9): 63-66, 113.
WEI Chengzhi, SHI Wenbo, WEN An. Analysis on characteristic of bipolar short-circuit fault of DC bus of three-terminal MMC-HVDC converter station [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(9): 63-66, 113.
- [7] 江道灼, 张弛, 郑欢, 等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 65-71.
JIANG Daozhuo, ZHANG Chi, ZHENG Huan, et al. A scheme for current limiting hybrid DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 65-71.
- [8] 何俊佳, 袁召, 赵文婷, 等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [9] 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.
- [10] 徐政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 347-357.
XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 347-357.
- [11] 于海, 迟颂, 李尔平. 基于全控型电力电子器件的强制换流型混合直流断路器[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 168-172.
YU Hai, CHI Song, LI Erping. Forced current commutation DC hybrid circuit breaker based on full controlled power electronic devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 168-172.
- [12] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: a review [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [13] 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 breaker [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2): 114-120.
- [14] 乔峰, 何英发, 李浩, 等. 应对特高压特殊运行工况的最后断路器保护改进策略[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 78-83.
QIAO Feng, HE Yingfa, LI Hao, et al. Improved strategies for last circuit breaker protection in UHVDC special operating mode [J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 78-83.
- [15] 张万荣, 苟锐锋, 赵伯南, 等. 直流断路器转移直流过程仿真计算研究[J]. 高压电器, 2002, 38(2): 1-4.
ZHANG Wanrong, GOU Ruifeng, ZHAO Bonan, et al. Study on digital simulation of transferring direct current using DC breakers [J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(2): 1-4.
- [16] TAHATA K, KA S, TOKOYODA S, et al. HVDC circuit breaker for HVDC grid application [C] // CIGRE AORC Technical Meeting. Paris, France: CIGRE, 2014: B4-1120.
- [17] 张祖安, 黎小林, 陈名, 等. 应用于南澳多端柔性直流工程中的高压直流断路器关键技术参数研究[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2417-2422.
ZHANG Zu'an, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research on critical technical parameters of HVDC circuit breakers applied in Nan'ao multiterminal VSC-HVDC project [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2417-2422.
- [18] ELSEROUGI A, AHMED S, MASSOUD A. Half-bridge modular multilevel-based HVDC converters with external pre-charged capacitors for dc fault current suppression capability [C] // IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. IET, 2016.
- [19] ELSEROUGI A, MASSOUD A, AHMED S. Arrester-less DC fault current limiter based on pre-charged external capacitors for half-bridge modular multilevel converters [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(1): 93-101.
- [20] 周猛, 左文平, 林卫星, 等. 电容换流型直流断路器及其在直流电网的应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1045-1052.
ZHOU Meng, ZUO Wenping, LIN Weixing, et al. Capacitor commutated DC circuit breaker and its application in DC grid

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1045-1052.
- [21] 赵文婷, 袁 召, 方 帅, 等. 一种新型电容缓冲式混合高压直流断路器的设计与仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 41-46.
- ZHAO Wenting, YUAN Zhao, FANG Shuai, et al. Design and simulation of a new type of capacitance buffering hybrid HVDC circuit breaker[J]. High-Voltage Electrical Appliances, 2015, 51(11): 1-5.
- [22] 赵文婷, 袁 召, 汤广福, 等. 电容缓冲式混合直流断路器的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6476-6483.
- ZHAO Wenting, YUAN Zhao, TANG Guangfu, et al. Experimental studies on capacitance buffering hybrid DC circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6476-6483.
- [23] 裘 鹏, 黄晓明, 王 一, 等. 高压直流断路器在舟山柔直工程中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 403-408.
- QIU Peng, HUANG Xiaoming, WANG Yi, et al. Application of high voltage DC circuit breaker in Zhoushan VSC-HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 403-408.
- [24] 朱 晋, 刘单华, 尹靖元, 等. 基于模块级联技术的混合型高压直流断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1560-1567.
- ZHU Jin, LIU Danhua, YIN Jingyuan, et al. Research on hybrid DC breaker based on modular cascaded structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1560-1567.
- [25] 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.
- [26] 封 磊, 苟锐锋, 杨晓平, 等. 基于串联晶闸管强迫过零关断技术的混合式高压直流断路器[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 388-394.
- FENG Lei, GOU Ruifeng, YANG Xiaoping, et al. Hybrid HVDC circuit breaker based on series-connected thyristors with forced zero crossing technique[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 388-394.
- [27] 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): 1-8.
- 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): 1-8.
- [28] KESHAVARZI D, FARJAH E, GHANBARI T. A Hybrid DC Circuit Breaker and Fault Current Limiter With Optional Interruption Capability, IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2330-2338.
- [29] 刘高任, 许 烽, 徐 政, 等. 适用于直流电网的组合式高压直流断路器[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 70-77.
- LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. An assembled HVDC breaker for HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 70-77.
- [30] LIU G, XU F, XU Z, et al. Assembly hvdc breaker for hvdc grids with modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 931-941.
- [31] 向学位, 柴建云, 孙旭东. 基于抑制起弧原理的中压无弧直流断路器[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 238-247.
- XIANG Xuewei, CHAI Jianyun, SUN Xudong. Medium voltage arcless DC circuit breaker on arc suppression [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 238-247.

作者简介:



赵明君

赵明君(1970—),男,硕士,高级工程师,从事电网运行相关工作(E-mail: mingjun1988@sina.com);

叶 晗(1994—),男,硕士研究生,研究方向为高压直流输电技术(E-mail: yehannjust@163.com);

李中奇(1989—),男,本科,从事继电保护相关工作。

Comparison and Study of Direct Current Circuit Breaker With Capacitors

ZHAO Mingjun¹, YE Han², LI Zhongqi³, GAO Sen³, ZHU Haiyong³, ZHU Xu⁴

(1. State Grid Xinjiang Information & Telecommunication Branch, Xinjiang 830000, China;

2. Center for Advanced Power-conversion Technology and Equipment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 4. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: High-voltage DC circuit breaker is one of the core equipment in multi-terminal DC transmission and DC grid technology. Existing DC circuit breakers based on capacitors are compared and analyzed in this paper, and advantages, disadvantages and applications of them are also pointed out. Then, an assembly DC circuit breaker based on pre-charged capacitors is proposed. The topology, working principle and control strategy of the proposed scheme are described in detail. Besides, the feasibility and effectiveness are validated by building a three-terminal ring DC model in PLECS. Finally, future research directions and problems to be solved for DC circuit breaker based on capacitors are pointed out.

Key words: DC circuit breaker; DC circuit breaker with capacitors; assembly circuit breaker; pre-charged capacitors

(编辑 方 晶)