

直流断路器的现状及发展

于海

(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830010)

摘要:本文在分析直流输电技术特点的基础上,总结了目前直流输电对于直流断路器的基本要求;介绍了用于直流领域的断路器的种类,分析了其工作原理以及性能特点;简要综述了直流断路器国内外发展现状,并分析了直流断路器存在的主要技术问题,指出混合直流断路器是直流输电领域的直流断路器研究的主要方向。

关键词:直流输电;机械直流断路器;固态直流断路器;混合直流断路器

中图分类号:TM561

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)02-0114-07

0 引言

目前世界各国发电主要依靠煤炭、石油等不可再生能源。随着化石燃料的不断燃烧,化石能源不断减少,环境日益恶化,人们越来越注重新能源的开发利用。世界各国的能源战略已经从传统能源向可再生能源调整^[1-3]。

我国是一个风能资源丰富,太阳能资源充足的国家。但我国的能源中心主要集中在西部、北部,负荷中心主要分布在东部沿海,能源中心与负荷中心地理位置不一致,因此必须进行远距离输电来满足我国能源需求,满足我国“西电东送,全国联网”的发展战略^[1-4]。

对于远距离输电,目前主要有两种解决办法:一种为特高压交流输电,另一种为高压直流输电。与交流输电相比,直流输电具有很多优点,如:不存在同步问题,不存在无功功率问题,稳定性较高,适合分布式电源接入,损耗小,输送容量大等^[1]。但直流系统线路阻抗低,发生短路故障时,线路电流上升迅速,在很短的时间内上升到电网难以承受的水平^[2]。直流断路器作为直流输电的关键设备,能够快速隔离故障,因此日益受到人们的关注。

文中以直流输电为背景,分析了直流输电对直流断路器的基本要求;总结了目前可用于直流输电领域的直流断路器种类,分析了各自工作原理,发展现状以及特点;同时分析了各直流断路器存在的技术问题以及发展方向;指出了混合直流断路器研究前景广阔,为直流断路器的研究提供了参考。

1 直流输电对于直流断路器的基本要求

随着大功率电力电子器件的发展,基于电压源换流器的直流输电(VSC-HVDC),由于其无功和有

功可独立控制、无需滤波及无功补偿设备、可向无源负荷供电、潮流翻转时电压极性不改变等优势,成为了未来直流输电的主要方向^[2]。但是由于直流输电线路不存在变压器等设备,所以线路电抗低,发生短路故障时,短路电流上升快,幅值高。同时,直流输电线路存在大量电力电子器件,如果故障发生,而不能迅速隔离故障,将使电力电子器件承受巨大的过电流压力,甚至损坏器件,使整个输电网络瘫痪。与交流输电相比,直流输电电流无过零点,传统的机械开关不能有效、迅速地隔离短路故障。所以,目前急需可靠的直流断路器来解决直流故障问题^[3-4]。

目前直流输电主要依靠交流侧的交流断路器切除短路故障。首先,这种方式不能在很短的时间内切除故障电路,故障电流迅速升高,给直流输电线路、换流站等带来巨大压力,损坏器件;其次,该方式会使得整个直流输电网络退出运行,造成大面积停电等事故。为了保证输电线路的可靠性,保障直流输电的可靠运行,减小对于输电线路的压力,研究性能优良的直流断路器至关重要^[4]。

目前没有开断能力强、分断速度快且满足直流输电的直流断路器产品,这极大限制了直流输电特别是多端直流输电的发展。因此世界各国加大对直流断路器的研究力度,力求研究出性能优良的直流断路器。近年来,随着直流输电技术的发展,对直流断路器提出了以下要求^[5]:

- (1) 直流断路器必须能够快速清除故障;
- (2) 能够迅速消耗直流线路中存储的能量;
- (3) 在切断直流电流时,能够承受较高的过电压和过电流;
- (4) 具有高开断能力,能够切断较高的电压或电流等级;
- (5) 具有重复开断能力;

(6) 成本低,使用寿命长,维修成本低,可靠性高。

2 直流断路器研究现状

目前直流断路器主要分成三类:机械直流断路器,固态直流断路器和混合直流断路器。

2.1 机械断路器

直流输电不同于交流输电,由于其电流不存在自然过零的现象,断路器消弧困难,所以传统的机械断路器不能用于直流输电。

针对上述问题,学者提出相应的改进方案。在传统机械断路器两端并联 LC 振荡电路,利用振荡电路使流过机械断路器的电流产生“人造”过零点进而解决消弧难的问题^[6]。按照其产生振荡方式的不同可分为两种:一种为无源型;另一种为有源型^[7]。

2.1.1 无源型机械断路器

无源型机械直流断路器结构如图 1 所示^[8]。电路组成包括机械开关,LC 振荡电路以及避雷器组成的能量吸收电路。

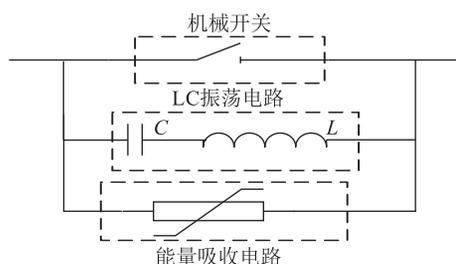


图 1 无源型机械直流断路器

Fig.1 Mechanical DC circuit breaker without power charging circuit

正常工作时,电流流过机械开关;发生短路故障时,分断机械开关,机械开关燃弧,利用电弧的不稳定性以及电弧的负阻特性,迫使 LC 振荡电路振荡,使得流过机械开关的电流出现过零点,实现灭弧,最后由避雷器吸收线路中保存的能量。

无源型机械断路器主要利用电弧的不稳定性以及电弧的负阻特性。其控制步骤少,结构简单,即使电弧重燃,也不会影响电流过零点的形成,可靠性较高,但是分断时间相对较长^[9]。

2.1.2 有源型机械断路器

有源型机械断路器与无源断路器结构相似,只是多了一个预充电装置,如图 2 所示。

图中 K1 为触发开关,电容两端有一个反向预充电装置,对电容充电。正常工作时,反向预充电装置对电容充电。发生故障时,机械开关断开,当断路器触头间达到一定开距时,闭合触发开关 K1,

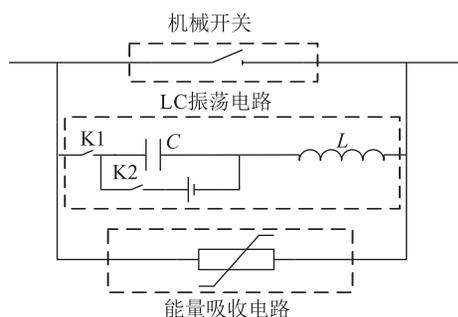


图 2 有源型机械直流断路器

Fig.2 Mechanical DC circuit breaker with power charging circuit

同时断开 K2。由预充电电容 C 使得 LC 发生振荡,叠加在机械开关上,从而使断路器中电流产过零点,机械开关中电弧熄灭,断路器成功分断^[7]。

由于预充电装置的存在,分断时间相对较短,但是其结构相对复杂,控制步骤复杂,可靠性较低。

2.1.3 机械断路器研究现状

直流机械断路器最早出现在 1972 年^[7],美国通用公司研制了有源型直流机械断路器样机,开断能力为 80 kV/30 kA。该断路器采用有源结构,提高了分断速度,但是增加了器件投入费用,控制相对复杂。20 世纪 80 年代,相继有直流机械断路器问世,其中包括欧洲 BBC 公司 500 kV/2 kA 无源型样机,该样机重点设计机械开关,提高了机械开关的开断能力;东芝公司 250 kV/1.2 kA 有源型商用直流断路器,首次将样机转化为商用产品;日立公司 250 kV/8 kA 有源型直流断路器,提高分断电流等级;美国西屋公司 500 kV/2.2 kA 无源型样机。随着机械直流断路器研制的不断发展,20 世纪 90 年代,东芝公司研制出了 500 kV/3.5 kA 直流断路器并应用于实际工程。国外机械直流断路器的研究主要在提高开断能力上,而对于分断速度上的考虑相对较少。西安交通大学研制出了 5 kV 原理样机,该样机仅为研究原理使用,电压电流等级相对较低,不能满足实际需求。2017 年 12 月,由华中科技大学牵头研制的 160 kV 机械直流断路器已应用于我国±160 南澳多端柔性直流输电系统。该断路器解决了传统机械高压预储能、快速触发、快速分断等技术难题,是世界上首次将机械断路器应用于柔性直流输电工程,改变了以往机械直流断路器分断缓慢的观念^[10]。

2.2 固态断路器

固态断路器主要依靠电力电子器件的开关特性,实现断路器的功能。

根据避雷器接入的方式不同,固态断路器分为

两种:一种为固态开关并联避雷器型固态断路器,另一种为续流二极管型固态断路器^[11]。

2.2.1 固态开关并联避雷器型固态断路器

固态开关并联避雷器型固态断路器按照其固态开关电力电子器件组成的不同又可分为半控型固态断路器以及全控型固态断路器^[12]。

半控型固态断路器如图 3(a)所示,其固态开关由半控型电力电子器件组成(如晶闸管等)。正常工作时,电流流过固态开关;发生短路故障时,闭合开关 K1,同时断开 K2,由 LC 振荡电路实现半控型电力电子器件关断电压^[13]。

全控型固态断路器如图 3(b)所示,其固态开关由全控型电力电子器件(集成门极换流晶闸管(IGBT),绝缘栅双极晶体管(IGCT),以及其他器件等)组成。其通断完全由全控型电力电子器件完成。

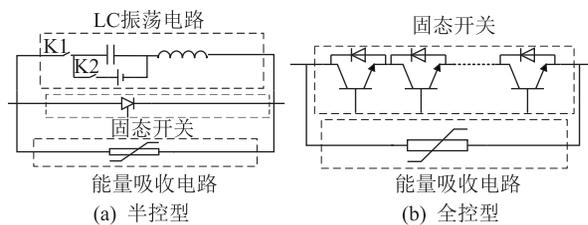


图 3 固态开关并联避雷器型固态断路器

Fig.3 Solid state DC circuit breaker with parallel arrester

与半控型固态直流断路器相比,全控型直流断路器控制灵活,动作迅速,无大电容、电感接入,体积小,模块化,便于容量扩展。但是由于全控型器件开断能力相比半控型器件较差,所以投入电力电子器件费用相对较高。

2.2.2 续流二极管型固态断路器

续流二极管型固态断路器结构如图 4 所示^[14],该类断路器能量吸收电路未并联在固态断路器两端,而是通过串联续流二极管和避雷器,使得线路故障部分与其构成回路,吸收的剩余能量只有故障电路部分,吸收的能量较少,对避雷器要求较低。

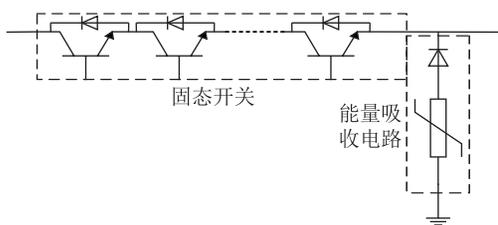


图 4 续流二极管型固态断路器

Fig.4 Solid state DC circuit breaker with wheeling diode

2.2.3 固态电路的研究现状

固态断路器的出现伴随着大功率电力电子器件的发展。1987 年,美国德克萨斯州大学研制出了

200 V/15 A 样机,该样机开断能力有限,仅为研究实验原理;随后,休斯敦大学研制出 500 V 样机,提高了电压等级,但是开断能力仍旧有限;2004 年,德国亚琛工业大学在对比不同电力电子器件以及一些固态断路器拓扑结构的基础上,提出了一种 20 kV 固态断路器结构,该结构采用电流限制器,能够有效减少行干扰,提高电能质量^[15]。美国电力电子研究中心,于 2005 年分别研制出开断能力为 2.5 kV/1.5 kA 和 4.5 kV/5 kA 样机,两类样机大大提高了开断能力。2010 年,南京航空航天大学提出一种固态断路器拓扑结构,该结构采用半控型电力电子器件替换全控型电力电子器件,减少投入费用,但该结构不能实现完全的软关断,分断速度上相对全控型还是较慢^[16]。2012 年底,ALSTOM 公司研制出 120 kV/7.5 kA 固态断路器样机,该样机是目前开断能力最强的固态直流断路器;2014 年,日本电力电子研究中心提出一种采用续流二极管吸收能量的方案,该方案能够减少避雷器消耗的能量,减少对避雷器的压力^[14]。2015 年,美国考虑用宽禁带电力电子器件以减少固态断路器通态损耗问题,但是目前宽禁带器件成本相对较高,不能大规模应用^[17]。

2.3 混合断路器

混合断路器电路由机械断路器、固态断路器以及避雷器组成。该种断路器继承了机械断路器与固态断路器的优点以及缺点^[18]。

混合断路器按照换流方式的不同可以分为自然换流型混合直流断路器以及强制换流型混合直流断路器。

2.3.1 自然换流型混合直流断路器

自然换流型混合直流断路器结构如图 5 所示^[19],由固态断路器,机械断路器以及能量吸收电路并联组成。正常工作时,电流流过机械断路器,发生短路故障时,闭合固态断路器,同时分断机械断路器,依靠机械断路器燃弧实现电流由机械断路器向固态断路器换流。当机械断路器达到有效开距分断固态断路器,线路中的能量依靠能量吸收电路吸收。

由于机械开关燃弧影响机械开关重复使用寿命,而且换流过程依靠燃弧电压,所以此类断路器开断速度以及可控性相对较差,目前多用于电压等级相对较低的场合。

2.3.2 强制换流型混合直流断路器

强制换流型混合直流断路器按照其固态断路器电力电子器件组成的不同又可分为基于半控型

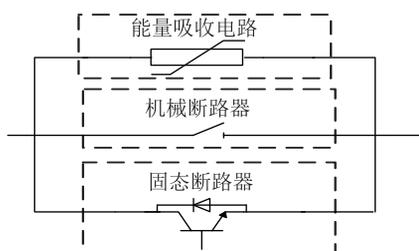


图5 自然换流型混合直流断路器

Fig.5 Nature current commutation hybrid DC circuit breaker

电力电子器件以及基于全控型电力电子器件的强制换流型混合直流断路器^[20]。

基于半控型电力电子器件的强制换流型混合直流断路器,具体电路如图6(a)所示,电路结构与有源型机械断路器结构类似,都是依靠LC振荡实现换流过程^[21]。发生短路故障时,闭合固态断路器,依靠固态断路器中LC振荡电路实现电流强制从机械断路器换流到固态断路器。该断路器分断过程仍伴随着机械断路器的燃弧过程,但是依靠LC振荡,机械断路器燃弧迅速被熄灭^[22]。此类断路器虽然在分断速度以及机械断路器使用寿命上有所提高,但是接入大电容、电感,断路器尺寸相对较大,而且需要外接预充电电源,费用相对较高,控制相对复杂。此类断路器可用于高电压等级。

基于全控型电力电子器件的强制换流混合直流断路器,具体电路如图6(b)所示。在机械开关所在支路串联辅助换流电路,发生短路故障时,辅助换流电路分断,强制电流向固态断路器转换,机械开关在零电流下分断,无燃弧现象^[23]。所以此类断路器使用寿命较长,体积较小,而且模块化便于扩展容量,全控型器件的使用,控制灵活方便。但是,辅助换流电路的加入,断路器通态损耗有所增加,同时全控型器件投入量巨大,投入费用相对较高。此类断路器也可用于高压直流输电。

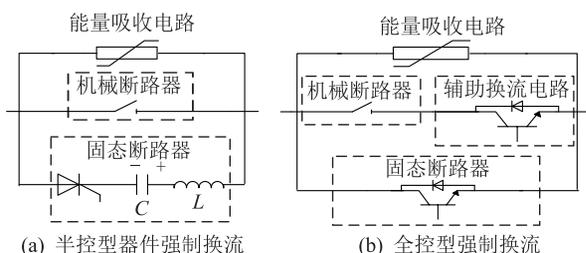


图6 强制换流型混合直流断路器

Fig.6 Forced current commutation hybrid DC circuit breaker

2.3.3 混合断路器研究现状

混合断路器最早出现在20世纪90年代。2006年,瑞典科学家Jean-Marc Meyer和Alfred Rufer等

人基于IGCT研制出了1.5 kV/4.5 kA自然换流型混合直流断路器方案^[24],该方案采用并联IGCT结构,提高其分断电流的能力,但是电压等级相对较低;2011年意大利科学家LucaNovello,Fabio Baldo等人利用IGCT串并联技术,研制出10 kA自然换流型混合直流断路器样机^[25],在保证分断电流能力的基础上,提高分断电压等级;2012年ABB公司基于IGBT,制出了320 kV/9 kA基于全控型器件的强制换流型混合直流断路器^[23],该方案真正实现了机械断路器无弧分断;2015年北卡大学基于碳化硅(SiC)器件,研制出了15 kV/45 A基于全控型器件的强制换流型混合直流断路器,新器件的应用使得该断路器在通态损耗以及分断时间上存在一定的优势,这也是首次将新器件应用到直流断路器领域^[26]。国内混合直流断路器研究起步相对较晚,2013年,西安交通大学基于ABB公司拓扑结构,提出用液态金属故障限制器代替辅助换流电路,以降低通态损耗^[27]。同年,国网智能电网研究院基于ABB混合直流断路器方案,改进IGBT单元,将断路器开断电流能力提高至15 kA,但是增加了电容的投入量,费用及技术难度有所提高^[28]。同年,海军工程大学研制出了基于半控型电力电子器件的双向非一致型混合直流断路器,该断路器采用两种工作模式,可分别实现自然换流和强制换流,主要应用在舰船领域^[29]。2014年,国网智能电网研究院设计了基于晶闸管的机械断路器无弧分断混合直流断路器方案^[30],该方案首次用半控型器件实现机械开关无弧分断。同年浙江大学设计出基于全控型器件与半控型器件混合连接的强制换流断路器,降低了全控型器件串联困难并减少了全控型电力电子器件投入费用^[31]。2015年国网智能电网研究院提出一种断路器结构,能够在减少全控型电力电子器件投入的同时,消除与IGBT并联二极管的限制^[32],但是技术难度有所加大,而且增加了机械开关的投入量。2017年河北工业大学提出一种混合直流断路器拓扑结构,在减少全控型电力电子器件投入的同时,降低对避雷器的要求,同时减少断路器分断时间^[33],该断路器同样增加了机械开关的投入数量。

3 直流断路器的技术问题及未来发展

随着直流输电的不断发展,特别是基于电压源换流器(VSC)多端口直流输电的发展,传统机械断路器基本上不能满足其要求,因此迫切需要一种能够快速隔离故障电路,而且开断能力强,能够重复

使用的直流断路器。随着对直流断路器的不断研究,直流断路器也遇到了很多技术难题,如:

- (1) 机械开关燃弧以及分断速度问题;
- (2) 固态开关串联技术、并联技术;
- (3) 迅速消耗吸收线路存储能量,使得线路电流尽快下降到零;
- (4) 提高断路器可靠性;
- (5) 降低直流断路器的投入费用;
- (6) 快速检测故障技术及快速可靠的控制技术

等。
对于直流输电,特别是基于电压源换流器的多端直流输电,断路器的分断速度是直流断路器考虑的一个重要因素。如一个直流电缆输电线路,发生短路故障时,5 ms 后将会对距离 200 km 的换流站产生影响。3 种断路器由于其结构以及构成器件的不同,各有特点。其特点对比如表 1 所示。

表 1 3 种断路器对比

Tab. 1 Comparison of three DC circuit breaker

性能指标	机械断路器	固态断路器	混合断路器
分断速度	≥20 ms	≤5 ms	≤10 ms
通态损耗	低	高	低
分断等级	高压、特高压	中低压	高压
重复操作能力	差	强	强
技术难度	相对较低	大	大
可扩展性	差	好	好

机械断路器虽然开断能力强,通态损耗低,但分断缓慢,分断过程伴随着机械开关燃弧,所以重复操作能力较差,而且基本上没有可扩展(扩容)能力。固态断路器分断速度快,可重复操作使用,可扩展性良好,但是通态损耗巨大,技术难度大,且目前多用于低压场合,不能满足直流输电对其的能耗要求。混合直流断路器由其结构特点和工作原理可知,正常工作时,电流流过机械断路器,所以其通态损耗低,与机械断路器相当;发生短路故障时,流过机械开关的电流到固态断路器,固态断路器分断速度迅速,整个混合直流断路器分断时间小于 10 ms(有些拓扑结构小于 6 ms),能够满足目前直流输电的要求,并且可扩充容量,可重复操作,但是技术难度相对较大。近年来混合直流断路器成为主要研究方向,被认为是在直流输电领域最有发展潜力的断路器。

4 结语

直流输电工程不断增加,直流输电技术不断成熟,直流断路器作为直流输电的重要保障技术,日

益受到人们的关注。本文聚焦直流输电的关键技术——直流断路器,通过分析直流输电特点,总结了目前直流输电对于直流断路器的基本要求;同时总结了目前直流断路器种类,电路组成,工作原理,研究现状以及相应的性能特点;分析了目前直流断路器研究存在的主要技术问题,并指出混合直流断路器是未来直流断路器的主要研究方向,为直流断路器的研究提供技术参考。

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] 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.
- [3] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):7-12.
- [4] 张文亮,汤涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9):1-6.
- [5] ATAOLLAH M, ADRIANO C, HELDER L, et al. A review on HVDC circuit breakers [C] // Renewable Power Generation Conference, 2014:1-6.
- [6] 彭畅,温家良,王秀环,等. 特高压直流输电系统的直流转换开关研制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):151-156.
PENG Chang, WEN Jialiang, WANG Xiuhuan, et al. Development of DC transfer switch for ultra high voltage DC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):151-156.
- [7] 张万荣,苟锐锋,赵伯南,等. 直流断路器转移直过程仿真计算研究[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.
- [8] MASOOD H, ZHANG L, DRAGAN J. DC transmission grid with low-speed protection using mechanical DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3):1383-1391.
- [9] 彭畅,温家良,马国华,等. 特高压直流输电系统中直流转换开关的电流转换分析与仿真[J]. 中国电机工程学报,2011,31(36):1-7.
PENG Chang, WEN Jialiang, MA Guohua, et al. Analysis and

- simulation on current commutation of the DC transfer switches in UHVDC transmission systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36):1-7.
- [10] 刘志伟,王潇潇,冷媚. 世界首台机械式高压直流断路器成功投运 [DB/OL]. http://www.stdaily.com/cxzg80/kebaojicui/2017-21-29/content_615629.shtml. 2017-12-29. LIU Zhiwei, WANG Xiaoxiao, LENG Mei. The world's first mechanical HVDC circuit breaker has been put in operation [DB/OL]. http://www.stdaily.com/cxzg80/kebaojicui/2017-21-29/content_615629.shtml. 2017-12-29.
- [11] LI HJ, ZHOU J N, LIU Z Y, et al. Solid state DC circuit breaker for super uninterruptible power supply [C] // Electronics and Application Conference and Exposition, 2014: 1230-1235.
- [12] 陈刚,江道灼,吴兆麟. 固态短路限流器的研究与发展 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10):89-94. CHEN Gang, JIANG Daozhuo, WU Zhaolin. Research and development of solid state fault current limiter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10):89-94.
- [13] WEN J L, FU P, TANG G F, et al. Design and reliability analysis of high power DC thyristor breaker [C] // International Conference on Power System Technology, 2006:1-8.
- [14] KENICHIRO S, MASAHIRO T. A surgeless solid-state DC circuit breaker for voltage-source-converter-based HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4):2690-2699.
- [15] CHRISTOPH M, STEFAN S, RIK W D D. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 19, (5), 2004:1333-1340.
- [16] MU J G, WANG L, HU J. Research on main circuit topology for a novel DC solid-state circuit breaker [C] // Industrial Electronics and Applications, 2010: 926-930.
- [17] SHEN Z J, SABUI G, MIAO Z Y, et al. Wide-bandgap solid-state circuit breakers for DC power systems; device and circuit considerations [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(2):294-300.
- [18] ANSHUMAN S, GEORGIOS D D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2):627-641.
- [19] 吕玮,方太勋,杨浩,等. 基于电弧电压的混合型直流断路器 [J]. 电力系统自动化, 2015, 35(11):83-102. LU Wei, FANG Taixun, YANG Hao, et al. Hybrid DC breaker based on arc voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 35(11):83-102.
- [20] RUDRANKSH K, ANSHUMAN S, GEORGIOS D. State of art of power electronics in circuit breaker technology [C] // Energy Conversion Congress and Exposition, 2012: 615-622.
- [21] 王晨,张晓锋,庄劲武,等. 新型混合式限流断路器设计及其可靠性分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12):61-67. WANG Chen, ZHANG Xiaofeng, ZHUANG Jinwu. Novel hybrid current-limiting circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12):61-67.
- [22] 王晨,庄劲武,张晓锋,等. 新型混合型限流断路器分析及试验 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15):60-65. WANG Chen, ZHUANG Jinwu, ZHANG Xiaofeng, et al. Analysis and test of novel hybrid current-limiting circuit breakers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15):60-65.
- [23] MAGNUS C, ANDERS B, JURGEN H, et al. The hybrid HVDC breaker an innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids [C] // ABB Grid Systems, Technical Paper, 2012.
- [24] JEAN M M, ALFRED R. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):646-651.
- [25] LUCA N, FABIO B, ALBERTO F, et al. Development and testing of a 10 kA hybrid mechanical-static DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, (6), 2011: 3621-3627.
- [26] CHANG P, ALEX Q H, XIAOQING S. Current commutation in a medium voltage hybrid DC circuit breaker using 15 kV vacuum switch and siC devices [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2015: 2244-2250.
- [27] YIFEI W, MINGZHE R, YI W, et al. Development of a new topology of DC hybrid circuit breaker [C] // Electric Power Equipment, 2013:1-4.
- [28] 魏晓光,高冲,罗湘,等. 柔性直流输电电网用新型高压直流断路器设计方案 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15):95-102. WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiao, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):95-102.
- [29] 江壮贤,庄劲武,王晨,等. 双向非一致混合型真空直流断路器的分析与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36):142-147. JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, WANG Chen, et al. Analysis and design of a bidirectional non-uniform vacuum DC hybrid circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36):142-147.
- [30] 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 Wangdi, 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.
- [31] 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.
- [32] 药韬,温家良,李金元,等. 基于IGBT串联技术的混合式

高压直流断路器方案[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2484-2489.

YAO Tao, WEN Jialiang, LI Jinyuan, et al. A hybrid high voltage DC circuit breaker design plan with series-connected IGBTs [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2482-2489.

[33] 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 DChybrid circuit breaker based on full controlled power elec-

tronic devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 47(12):168-172.

作者简介:



于海

于海(1987—),男,硕士,研究方向为直流输电与直流断路器的研究(E-mail: yuyuhaihai110@sina.com)。

The Status and Development of DC Circuit Breaker

YU Hai

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Wulumuqi 830010, China)

Abstract: Based on the analysis of the technical characteristics of high voltage direct current (HVDC) transmission, this paper summarizes the basic requirements of DC circuit breaker in HVDC. Also, it summarizes the current types of circuit breakers used in the field of DC, analyzing their operating principles and performance characteristics. The current status of DC circuit breaker at home and abroad is briefly reviewed and the current technology problems in DC circuit breaker are analyzed. At last, it is pointed out that hybrid DC circuit breaker is the main research direction in DC transmission field.

Key words: HVDC; mechanical DC circuit breaker; solid-state DC circuit breaker; hybrid DC circuit breaker

(编辑 方晶)