

DOI: 10.7500/AEPS20130530012

# 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案

魏晓光, 高 冲, 罗 湘, 周万迪, 吴亚楠

(国网智能电网研究院, 北京市 102200)

**摘要:** 基于柔性直流的多端直流输电和直流电网技术是解决中国新能源并网和消纳问题的有效技术手段之一,而高压直流断路器是构建直流电网的核心设备之一。从多端直流系统发生直流侧短路故障的机理及故障电流的发展趋势入手,以舟山 5 端柔性直流输电工程为例,分析了发生最严酷短路故障时,直流母线上故障电流的特性,基于分析结果提出了直流电网对直流断路器的需求;结合对现有直流断路器技术路线的对比分析,提出了一种适用于柔性直流输电网的新型快速直流断路器技术方案,并通过仿真分析验证了所提出的新型直流断路器能够满足柔性直流输电网快速切除故障电流的需求。

**关键词:** 直流输电; 直流电网; 短路故障; 直流断路器

## 0 引言

随着一次能源的短缺和环境恶化问题的不断加剧,世界各国已经认识到能源的利用与开发必须从传统能源向绿色可再生清洁能源过渡。基于常规直流及柔性直流的多端直流输电系统和直流电网技术是解决新能源并网和消纳问题的有效技术手段之一<sup>[1-5]</sup>。采用大功率绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、脉宽调制技术(pulse width modulation, PWM)和多电平控制技术,基于自换相电压源换流器(voltage source converter, VSC)的 HVDC(VSC-HVDC),特别是基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的 HVDC(MMC-HVDC)近十年得到了迅猛发展。与基于电流源换流器(current source converter, CSC)的 HVDC 技术相比, VSC-HVDC 技术具有无功功率、有功功率可独立控制,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。因此 VSC 更适合用于构建多端直流输电及直流电网<sup>[6-8]</sup>。

然而,由于直流系统的阻尼相对较低,相比于交流系统,直流系统的故障发展更快,控制保护难度更大。同时对基于 IGBT 的柔性直流输电系统来说,一旦直流侧发生故障,由于 IGBT 中反并联二极管的存在,通常无法采用闭锁换流器的方法来限制短

路电流,必须采用断开交流侧断路器的方法来分断故障电流。因此为快速限制并切断故障电流,以维持直流电网安全稳定运行并保护电网中的关键设备,高压直流断路器成为有效甚至唯一技术手段<sup>[9]</sup>。

在高压直流断路器研究方面,国外公司和研究机构的研究工作开展较早,并且已经成功地实现了理论设计向工程实践的转化。在基于常规交流断路器的机械式直流断路器研制方面,日立公司和 ABB 公司分别研制了 250 kV/8 kA(额定电压/额定开断电流,下同)和 500 kV/4 kA 的产品并成功应用于多端 CSC-HVDC 工程,但开断用时约为 35 ms,无法满足基于 VSC-HVDC 的直流电网的需求。在基于纯电力电子器件的固态断路器研制方面,美国 CPES 已研制出 2.5 kV/1.5 kA 和 4.5 kV/4 kA 样机,开断用时约为 300  $\mu$ s,但由于固态断路器的损耗较大,尚未在高压大容量领域得到工程化应用。在基于常规机械开关和电力电子器件的混合式断路器研制方面,ABB 公司于 2012 年底成功完成了样机研制,并通过了试验<sup>[10]</sup>; Alstom 公司也于 2013 年完成了样机研制,但目前两台样机的分断能力较低,扩容试验预计 2013 年年底完成。国内方面,西安交通大学、南方电网公司、中国电力科学研究院等高校、企业和科研院所均在积极推进该项技术的发展,但尚无样机研制成功的相关报道。

本文从多端直流输电系统发生直流侧短路故障的机理及故障电流的发展趋势入手,以舟山 5 端柔性直流输电工程为例,分析了发生最严酷短路故障情况下,直流母线上故障电流的特性,基于分析结果提出了基于 VSC-HVDC 的直流电网对直流断路器

收稿日期: 2013-05-30; 修回日期: 2013-06-28。  
国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51261130471)。

的需求,同时对现有直流断路器技术路线进行对比分析的基础上,提出一种新型直流断路器技术方案,并通过仿真分析验证了所提出的新型直流断路器能够满足基于 VSC-HVDC 的直流电网的需求。

1 柔性直流输电网故障电流分析

1.1 直流电网直流侧短路故障机理

MMC-HVDC 直流侧短路故障分为两种情况:单极接地故障和双极短路故障。由于 MMC 子模块结构特殊,在发生单极接地故障时,子模块电容器没有放电通路,交流侧电源也不存在放电通路,直流极线上只存在电缆杂散电容的放电电流,且电流值较小,不会对高压直流断路器形成苛刻电气应力。因此本文仅分析 MMC-HVDC 双极短路故障时线路电流的发展情况<sup>[11]</sup>。

当直流侧发生短接故障时,短路电流路径示意图 1。其故障过程分为 2 个阶段:第 1 阶段是直流电容器放电阶段,放电路径如图 1(a)所示;第 2 阶段由于 IGBT 的关断,交流侧经桥臂电感及子模块下管 IGBT 的二极管和直流侧接地点形成三相短路,如图 1(b)所示。

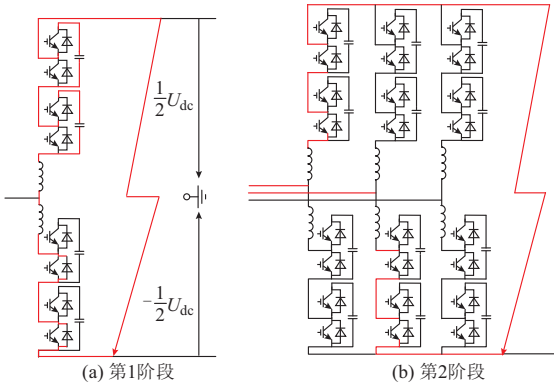


图 1 直流侧短路路径示意图  
Fig.1 Sketch map of current circuit of DC line short circuit

通过对直流双极短路故障机理的分析可知,柔性直流输电网在发生直流侧短路时,故障分为两个阶段,分别是子模块电容放电阶段和交流短路故障阶段。因此总的故障电流是第 1 阶段结束时刻的故障电流叠加第 2 阶段的故障电流。

如果设第 1 阶段电流的表达式为  $i_1(t)$ ,而第 2 阶段为  $i_2(t)$ ,IGBT 闭锁时刻为  $t_L$ ,则总电流  $i$  的表达式如下:

$$i = \begin{cases} i_1(t) & t \leq t_L \\ i_1(t) |_{t=t_L} + i_2(t) & t > t_L \end{cases} \quad (1)$$

由于通常在第 1 阶段电容放电电流达到峰值之前,即电容放电电流仍在上升阶段时,IGBT 就会闭

锁,因此第 2 阶段起始时的电流峰值与 IGBT 闭锁的时间有直接关系。直流侧短路总短路电流示意如图 2 所示。

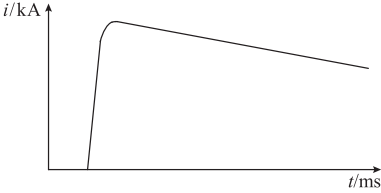


图 2 直流侧短路总短路电流示意  
Fig.2 Sketch map of current of DC line short circuit

柔性直流电网发生直流侧短路故障时,电网中所包含的换流站越多,注入短路电流上升速度越快,幅值越高,这对断路器的动作时间提出了苛刻的要求,增大了高压直流断路器的研发难度。

1.2 故障点对故障电流的影响

对于点对点两端 MMC-HVDC 系统,故障点有 3 种情况,如图 3 所示。

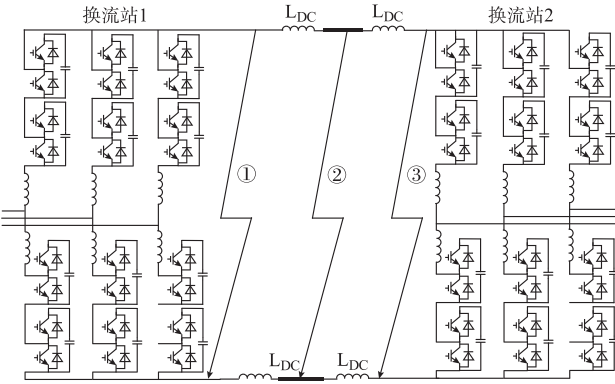


图 3 两端系统故障类型示意图  
Fig.3 Sketch map of the fault type of 2-terminal system

如图 3 所示,共有 3 处短路点:①处短路是换流站 1 出口短路,换流站 1 称为近端站,换流站 2 称为远端站;②处短路为平波电抗器(简称平抗)外直流电缆短路;③处短路为换流站 2 出口短路。当短路点位于①处时,对于换流站 1 来讲,故障情况如图 1(a)所示;对于换流站 2 来讲,则相当于换流器经平抗、直流电缆和换流站 1 平抗的两极短路,由于平抗的限制作用,换流站 2 向短路点注入的电流比换流站 1 注入的电流要小。当短路点位于②处时,对于两个换流站而言,均为平抗外两极短路故障,换流站向短路点注入的电流大小接近,由于短路电流均被平抗所限制,相比于①处短路时,换流站 1 的短路电流要小。当短路点位于③处时,情况与①处类似。

柔性直流电网可以通过多种连接方式实现,目前已投入运行或规划的工程均采用并联连接方式,典型的并联型柔性直流输电网电气拓扑见图 4。

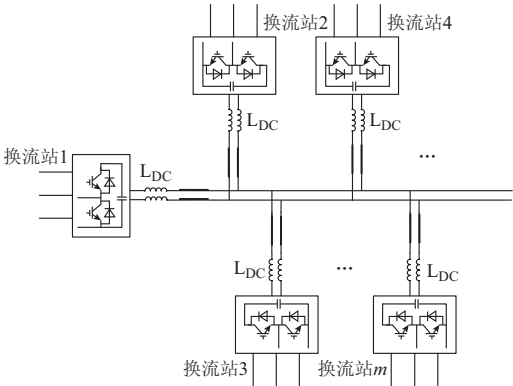


图4 并联多端柔性直流系统  
Fig.4 Multi-terminal HVDC Flexible system with parallel connection

图4中共有 $m$ 个换流站并联运行,图中的粗线是直流电缆, $L_{DC}$ 为换流站平抗。当某一个换流站 $i$ 发生出口短路时,短路点的一侧是换流站 $i$ 不经平抗向其注入的短路电流,而另一侧则是其余 $m-1$ 个换流站分别经过本站平抗、直流电缆和换流站 $i$ 的平抗向短路点注入的短路电流,输电网中的换流站越多,向短路点注入的短路电流越大。如果各换

流站的基本参数,包括换流站容量、桥臂电抗、平波电抗和交流系统短路容量等均一致,则短路电流的大小是其中一个换流站短路电流的 $m-1$ 倍。

1.3 仿真分析

以基于VSC-HVDC的舟山5端柔性直流输电工程为例,拓扑结构为并联放射形网络,如图5所示。

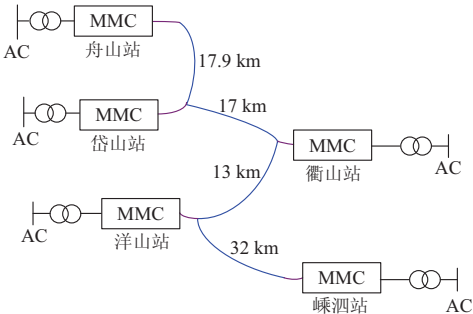


图5 舟山5端柔性直流输电拓扑  
Fig.5 Topology of Zhoushan 5-terminal HVDC Flexible transmission

利用PSCAD/EMTDC对上述5端直流系统进行仿真分析,各换流站参数列于表1。

表1 舟山5端柔性直流输电系统换流站参数  
Table 1 Parameters of converter stations of Zhoushan 5-terminal HVDC Flexible transmission

| 换流站 | 有功功率/MW | 直流电压/kV | 变压器变比/(kV/kV) | 子模块电压/kV | 子模块电容/ $\mu$ F | 子模块数量/个 | 桥臂电抗/mH |
|-----|---------|---------|---------------|----------|----------------|---------|---------|
| 舟山  | 400     | 400     | 220/200       | 1.6      | 6 000          | 275     | 96      |
| 岱山  | 300     | 400     | 220/200       | 1.6      | 6 000          | 275     | 110     |
| 大衢  | 100     | 400     | 110/200       | 1.6      | 6 000          | 275     | 318     |
| 泗礁  | 100     | 400     | 110/200       | 1.6      | 6 000          | 275     | 318     |
| 洋山  | 100     | 400     | 110/200       | 1.6      | 6 000          | 275     | 318     |

舟山站为主站,相较于其他站,在其平抗外发生直流侧短路故障时,近端站短路电流最为严重,其仿真所得数据如表2所示。

表2 舟山站平抗外短路时各换流站注入短路电流  
Table 2 Short-circuit current from each converter station for a short circuit at the outside of smoothing reactor of Zhoushan station

| 换流站 | 短路电流/kA |      |       |       |       |
|-----|---------|------|-------|-------|-------|
|     | 1 ms    | 2 ms | 3 ms  | 4 ms  | 5 ms  |
| 舟山  | 1.88    | 4.12 | 6.10  | 7.78  | 9.06  |
| 岱山  | 0.50    | 3.72 | 5.05  | 6.64  | 7.50  |
| 大衢  | 0.52    | 2.07 | 3.05  | 3.92  | 4.51  |
| 泗礁  | 1.39    | 2.21 | 3.07  | 3.89  | 4.60  |
| 洋山  | 1.39    | 2.21 | 3.07  | 3.90  | 4.60  |
| 远端  | 3.78    | 9.87 | 14.24 | 18.34 | 20.92 |

洋山站发生平抗外短路时,各站向短路点注入的短路电流值将最大,仿真数据如表3所示。

表3 洋山站平抗外短路时各换流站注入短路电流  
Table 3 Short-circuit current from each converter station for a short circuit at the outside of smoothing reactor of Yangshan station

| 换流站 | 短路电流/kA |       |       |       |       |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|
|     | 1 ms    | 2 ms  | 3 ms  | 4 ms  | 5 ms  |
| 洋山  | 1.40    | 2.56  | 3.66  | 4.69  | 5.61  |
| 岱山  | 0.41    | 3.58  | 4.96  | 6.49  | 7.31  |
| 大衢  | 0.58    | 1.97  | 2.87  | 3.84  | 3.40  |
| 泗礁  | 1.36    | 2.16  | 2.89  | 3.79  | 4.48  |
| 舟山  | 1.70    | 3.20  | 3.92  | 5.87  | 6.75  |
| 远端  | 4.05    | 10.36 | 14.64 | 20.18 | 22.77 |

目前两端柔性直流输电系统在发生直流侧短路故障时,保护方式有两种:①IGBT过电流保护,闭锁换流阀,此保护方式通过检测换流阀桥臂电流或IGBT电流,当电流阈值超过设定值时保护动作,动作时限根据桥臂电流上升率的不同而不同;②交流侧断路器跳开,此保护方式通过柔性直流输电控制

保护系统判断是否发生直流侧故障来实现,如判断发生了直流侧故障,则保护动作,动作时间约为40~60 ms。

以舟山站出口发生双极短路故障为例,如果直流断路器在舟山站换流阀保护动作之前跳闸,舟山站闭锁退出运行,其他换流站迅速与故障点隔离,依靠协调控制策略重新建立直流电压,恢复正常运行;如果直流断路器未能在保护①动作后跳闸,换流站相继闭锁,整个系统停运,待故障解除后重新启动恢复运行。在第2种情况下,要求直流断路器在保护②动作之前即交流侧断路器跳闸之前跳开故障线路和换流器,以防止交流线路跳闸,使得其他换流器能够快速重启。

发生接地短路故障时,由于换流阀中IGBT过电流保护水平相对较低,故障线路切除时间若较长,将会导致阀闭锁,因此需要直流断路器迅速动作。而且断路器动作时间越短,则需要分断的电流越小。但断路器动作时间不可能无限缩短,综合考虑系统检测时间以及机械开关动作时间,因此认为,在换流站发生平抗内短路时,很难保证该站不退出运行。配备直流断路器的目的是保证其他换流站能够正常运行。

假设柔性直流输电系统的过流保护阈值取为2.4 kA,则结合仿真数据,当舟山站出口发生短路故障时,舟山站桥臂电流在1.4 ms达到保护阈值,控制器反应时间大约在1.5 ms左右,因此故障发生后3 ms内,舟山站将会闭锁退出运行。因此,直流断路器应当在3 ms内跳开故障线路,此时,舟山站出口近端和远端的故障电流分别为6.10 kA和14.24 kA。

洋山站出口短路时,舟山站桥臂电流在4.2 ms达到保护阈值,因此故障发生后5.7 ms内舟山站将会闭锁退出运行。那么直流断路器应当在故障后5.7 ms内跳开故障线路,4 ms时舟山站和洋山站出口远端的故障电流分别为5.87 kA和20.18 kA,那么远端即岱山站的直流断路器应首先动作跳开故障线路。直流断路器若能够按照上述分析在3 ms内可靠动作,分断电流达到14.64 kA,那么故障线路切除后换流站可依靠协调控制策略重新建立起直流电压,恢复正常运行。

结合上述两种短路情况,舟山5端系统中所需高压直流断路器应能在3 ms内动作,分断短路电流峰值为15 kA。

## 2 直流断路器方案与对比

相较于已得到工程应用的直流转换开关,高压直流断路器具备切断故障电流的能力。由于直流电不存在电流过零点,直流断路器要实现对高压直流电的分断必须满足以下三项基本要求:①能够在主回路上形成电流过零点;②能够消耗存储在系统中的能量;③能够耐受住电流分断后产生的过电压。高压直流断路器基本结构如图6所示。

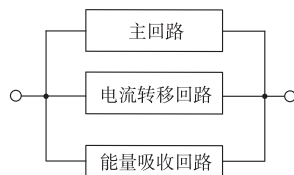


图6 高压直流断路器原理图

Fig.6 Fundamental schematic of HVDC circuit breaker

目前高压直流断路器研究方案主要集中于3种类型,分别是基于常规开关的传统机械式断路器、基于纯电力电子器件的固态断路器和基于二者结合的混合式断路器。

### 2.1 机械式断路器

传统机械式断路器通态损耗低(通态电阻微欧级),开断故障电流能力强。理论上合理设计无源式直流转换开关电路参数,可以实现故障电流的分断,但受到振荡所需时间和常规机械开关分断速度的影响,难以满足直流系统快速分断故障电流的要求<sup>[12-14]</sup>。

为提高机械断路器动作速度,文献[14]提出了一种能够实现无弧分断的快速机械开关断路器拓扑,如图7所示。

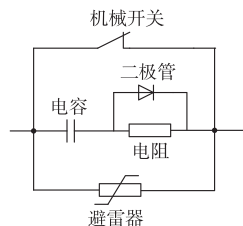


图7 无弧机械式断路器结构

Fig.7 Structure of arcless mechanical DC circuit breaker

稳态时,电流经快速机械开关流通;故障发生时,机械开关分断,电容电压无法突变,限制电容电压上升速率,保障在机械开关开断瞬间电容两端电压低于机械开关起弧电压,在机械分断过程中低于机械开关的击穿电压,从而实现机械开关无弧分断。当电容电压升至避雷器动作阈值时,电流转入避雷器中消耗吸收。电阻用于抑制电容与系统电感的振

荡。该拓扑结构断路器虽实现了无弧分断,加快了机械开关的分断速度,但同时也大大增加了高压电容的容量,使得短路电流转移至避雷器动作的时间变长,对短路电流限制效果并无明显改变。

2.2 固态断路器

固态断路器由全控电力电子器件组成,不会产生电弧,分断速度也大大提高,但受限于单个电力电子全控器件的耐受电压,应用于高压直流电网中,需要使用较多器件串联,使得固态断路器的通态损耗大、成本高<sup>[15-17]</sup>。为了降低固态断路器通态损耗,文献[17]提出了如图 8 所示拓扑。

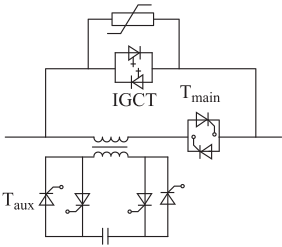


图 8 改进后的固态断路器拓扑  
Fig.8 Topology of an improved solid-state DC circuit breaker

该拓扑在稳态时通过晶闸管阀来通流,由于半控器件晶闸管通态损耗低于全控器件,相较于全控器件,其通态损耗略有下降;发生故障时,触发辅助晶闸管阀和集成门极换流晶闸管(IGCT)阀,使得电流转移至 IGBT 支路,随后关断 IGBT 阀,系统能量被避雷器所吸收。可以看出,该拓扑依然由大量串联的电力电子器件组成,虽进行了优化,但并没有本质上的改变,而且进一步提高了固态断路器的成本。

2.3 混合式断路器

混合式断路器结合了机械式断路器和固态断路器的优点,用快速机械开关来导通正常运行电流,固态电力电子器件来分断短路电流,使得其既具备较低的通态损耗,又有很快的分断速度<sup>[18-20]</sup>。最初的混合式断路器拓扑如图 9 所示。

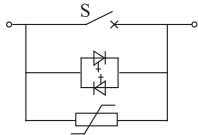


图 9 传统混合式断路器拓扑  
Fig.9 Topology of traditional hybrid DC circuit breaker

这种拓扑结构断路器依靠电弧电压将短路电流从快速机械开关支路转移至固态开关支路。在高压系统中,大量的全控器件串联产生的通态压降一般都能达到近百伏,依靠电弧电压很难实现电流的完

全转移,因而快速开关需要具备灭弧能力,使得快速开关整体质量增加,动作速度变慢,而且产生的电弧将会造成对快速开关触头的腐蚀。

文献[20]提出了一种使用半控器件晶闸管的混合式拓扑,基于电流注入原理使得快速机械开关熄弧,如图 10 所示。

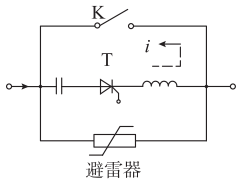


图 10 电流注入型混合式断路器拓扑  
Fig.10 Topology of current injection hybrid DC circuit breaker

发生故障时,快速机械开关 K 迅速动作,产生电弧,与此同时触发晶闸管 T,预充电电容经电感向快速机械开关注入反向电流  $i$ ,直至为 0,电弧熄灭。短路电流对电容充电直至使得避雷器动作,将系统能量吸收。断路器需要配备辅助电源对电容进行预充电。

为进一步提高机械开关动作速度,提高机械开关使用寿命,实现机械开关无弧分断意义重大。ABB 公司提出的混合式断路器在图 9 快速机械开关支路中串入了少量的全控电力电子器件,通过闭锁全控器件,促使电流强迫转移,实现机械开关无弧分断。转移回路上采用反向串联的压接式 IGBT,所应用系统的电压等级越高,需要串联的个数越多,价格越昂贵,且分断能力受限于 IGBT 器件的短时通流能力,不到 10 kA。

表 4 为 3 种类型断路器性能总结与对比。

表 4 3 种类型直流断路器性能对比  
Table 4 Performance comparison of three types of DC circuit breakers

| 性能指标 | 机械式 | 固态    | 混合式     |
|------|-----|-------|---------|
| 开关机制 | 金属  | PN 结  | 金属、PN 结 |
| 通态损耗 | 低   | 高     | 低       |
| 分断速度 | 慢   | 快     | 快       |
| 分断能力 | 强   | 中等    | 中等      |
| 设备成本 | 低   | 高     | 高       |
| 设备体积 | 中等  | 大(冷却) | 小       |
| 维护费用 | 高   | 低     | 低       |
| 使用寿命 | 有限  | 无限    | 无限      |

通过表 4 的对比分析,从技术和经济角度综合考虑,不难得出混合式断路器是高压直流断路器最具可行性的方案。

本文提出了一种新型混合式高压直流断路器,既能够实现机械开关无弧分断,缩短动作时间,又具

备较强的分断电流能力,满足直流系统对断路器的需求。

3 新型直流断路器

3.1 拓扑结构及工作原理

所提出的新型混合式高压直流断路器拓扑结构如图 11 所示,由主支路、转移支路和吸收支路 3 个并联支路构成。

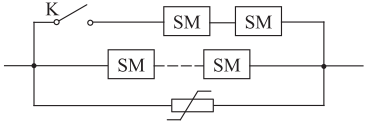


图 11 新型混合式高压直流断路器拓扑  
Fig.11 Topology of a new hybrid-type HVDC circuit breaker

主支路由快速机械开关 K 和少量的模块结构单元(sub modular, SM)串联构成;转移支路则由大量的模块结构单元串联构成;吸收支路由避雷器构成。其中,模块结构单元可由多种方式实现,两种示例结构如图 12 所示,由电力电子器件和电容器构成桥式电路,具备双向导通性,且通流能力为单只 IGBT 的 2 倍。

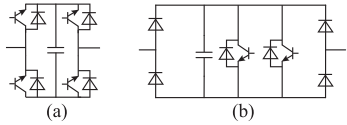


图 12 模块单元电气结构  
Fig.12 Circuit configuration of sub modular

正常运行时,电流经主支路流过;直流系统发生短路故障时,触发转移支路中的 IGBT,随后关断主支路 IGBT。短路电流将流经主支路模块单元中电容对其充电,建立反向电压,在反向电压作用下,短路电流开始向转移支路转移,随着电压上升,转移速度加快,直至短路电流为 0。在这个过程中,要注意电容值的选取,既不能让转移时间过长,又不能让电容电压过高,损坏 IGBT 模块。二极管在主支路电流过零后承受反压而截止,短路电流全部转移至转移支路中,主支路电流维持为 0,从而实现快速机械开关的无弧分断,简化开关机构,提高分断速度,约几毫秒就可以耐受短路电流分断后的暂态过电压。维持转移支路处于导通状态,让快速开关产生足够的开距后,闭锁转移支路各模块单元 IGBT。各模块 IGBT 闭锁后,所有模块电容串联连接,等效电容很小,短路电流对其充电,转移支路两端电压上升很快,达到避雷器动作阈值时,避雷器动作,短路电流全部转移至吸收回路中直至衰减为 0,断路器完成分断。

3.2 仿真波形

将新型高压直流断路器模型应用于舟山 5 端系统,舟山站在 0.01 ms 时发生平抗外直流侧短路故障,断路器在 1 ms 后开始动作,其分断过程包含 3 个阶段:①第 1 阶段为主支路电流向转移支路转移;②第 2 阶段为转移支路电流从模块中的 IGBT 向电容转移;③第 3 阶段为转移支路电流向吸收支路转移。避雷器的保护水平为 300 kV。通过 PSCAD/EMTDC 得到各阶段电流、电压仿真波形如图 13—图 15 所示。

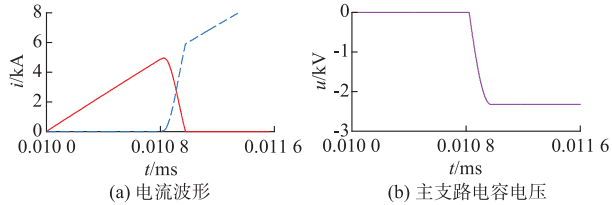


图 13 第 1 阶段电流、电压仿真波形  
Fig.13 Simulation waveforms of voltage and current at the first stage

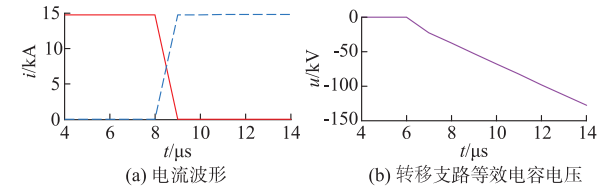


图 14 第 2 阶段电流、电压仿真波形  
Fig.14 Simulation waveforms of voltage and current at the second stage

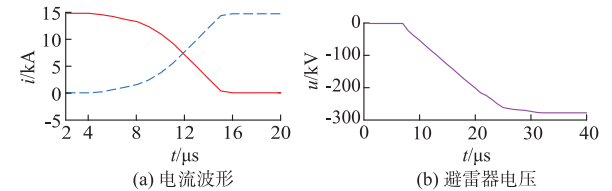


图 15 第 3 阶段电流、电压仿真波形  
Fig.15 Simulation waveforms of voltage and current at the third stage

由上述仿真波形可见,3 次换相过程均顺利完成。第一次换相(即电流从主支路转移至转移支路)用时约为 200 μs。转移支路维持导通 2 ms,保证快速机械开关分断已达到 200 kV 的耐压水平后,开始第二次换相,此时短路电流达到 15 kA,换相用时约为 1 μs。转移支路电容电压上升,达到避雷器动作阈值,开始第三次换相,换相用时约为 10 μs,避雷器电压达到保护水平 293 kV。随后由避雷器泄放系统电感存储能量,完成分断。

仿真结果较好地验证了新型直流断路器在柔性直流电网中的性能及工作原理的正确性。

## 4 结语

基于柔性直流输电技术的直流电网应用前景日渐明朗,作为该项技术瓶颈之一的直流断路器研究进展迅速,通过本文的分析可以得到以下结论。

1)柔性直流输电直流侧双极短路故障分为两个阶段,分别是直流电容放电阶段和交流侧短路阶段。

2)一个  $m$  端直流电网发生直流侧双极短路故障时,将有  $m-1$  个换流站的故障电流从故障点的同一侧流入故障点。

3)在换流站发生平抗内短路时,很难保证本站不退出运行。配备直流断路器的目的是保证其他换流站能够正常运行。

4)以舟山 5 端直流输电工程为例,分析了直流侧双极短路时的故障电流,分析得出:若直流断路器在 3 ms 内可靠动作,并且分断电流峰值达到 15 kA,那么故障线路切除后其他换流站可依靠协调控制策略重新建立起直流电压,恢复正常运行。

5)目前常用的直流断路器技术方案有 3 种,分别是机械式断路器、固态断路器和混合式断路器。混合式断路器因兼具机械式断路器良好的静态特性以及固态断路器无弧快速分断的动态特性,更加适合应用于柔性直流输电系统。

6)提出了一种新型的混合式断路器拓扑,通过 PSCAD 仿真建模对所提出的断路器拓扑开展了仿真分析,验证了设计的合理性、正确性。

## 参考文献

- [1] 国家电网公司.国家电网公司促进清洁能源发展综合研究报告[R].北京:国家电网公司,2009.
- [2] 汤广福.2004 年国际大电网会议系列报道:高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J].电力系统自动化,2005,29(7): 1-5.  
TANG Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study[R]. Melbourne: International Council on Large Electric Systems, 2011.
- [6] 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. Researches on UHVDC technology[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.

- [7] GB/T 15945—2008 电能质量电力系统频率偏差[S].北京:中国电力出版社,2008.
- [8] IEEE Std C37. 118—2005 IEEE standard for synchrophasors for power systems[S]. New York, NY, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.
- [9] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [10] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers—a key innovation for reliable HVDC grids [C]// Integrating Supergrids and Microgrids International Symposium, September 13-15, 2011, Bologna, Italy: 1-9.
- [11] 罗湘,汤广福,查鲲鹏,等.合成试验方法在 VSC-HVDC 换流阀短路电流试验中的应用[J].电网技术,2010,34(7):9-13.  
LUO Xiang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of synthetic test method in transient state operational tests for voltage source converter based high voltage direct current valves[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 9-13.
- [12] TOKUYAMA S, ARIMATSU K, YOSHIOKA Y, et al. Development and interrupting tests on 250 kV 8 kA HVDC circuit breaker [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2452-2459.
- [13] PAULI B, MAUTHE G, RUOSS E, et al. Development of a high current HVDC circuit breaker with fast fault clearing capability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 2072-2080.
- [14] MEYER C, KOWAL M, de DONCKER R W. Circuit breaker concepts for future high-power DC-application [C]// IEEE Industry Applications Society Conference, October 2-6, 2005, Hong Kong, China: 860-866.
- [15] MEYER C, SCHRODER S, de DONCKER R W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage systems having distributed power systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(5): 1333-1340.
- [16] de LANGER G, CHOL A, IJUMBA N. Application of high-power semiconductor technology in DC traction circuit-breakers [J]// 2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, July 11-15, 2005: 494-498.
- [17] MEYER C, de DONCKER R W. Solid-state circuit breaker based on active thyristor topologies[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(2): 450-458.
- [18] DUPRAZ J, MONTILLET G. New network concepts using electronic hybrid circuit breakers [C]// IEEE Power Engineering Society Transmission Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008: 1-8.
- [19] HASAN S, ATOUT M, AL-DHALAN S. Protection of the modified HVDC converters using an ultra fast hybrid circuit breaker[C]// European Conference on Power Electronics and Applications, May 24-26, 1999, Istanbul, Turkey: 1-9.

[20] OATES C D M, KUMAR E, WILIAM R. Circuit breaker apparatus[P]. US PATENT: PCT/EP2011/051161.

魏晓光(1976—),男,博士,主要研究方向:直流输电工程技术和直流电网。E-mail: weixiaoguang@sgr.sgcc.com.cn

输电工程技术和直流电网。

罗湘(1980—),男,博士,主要研究方向:直流电网及其关键设备。

周万迪(1985—),男,通信作者,硕士,主要研究方向:直流电网及其关键设备。E-mail: zhouwandi@sgr.sgcc.com.cn

高冲(1982—),男,博士研究生,主要研究方向:直流

(编辑 翟晶晶)

## A Novel Design of High-voltage DC Circuit Breaker in HVDC Flexible Transmission Grid

WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, ZHOU Wandu, WU Yanan

(State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102200, China)

**Abstract:** Multi-terminal direct current (MTDC) transmission based on flexible direct current (DC) and DC grid technology are one of the most effective means for the interconnection and accommodation of renewable energy generation. The high-voltage DC circuit breaker is a key component in the DC grid. On the basis of an analysis of the mechanism of DC-side short circuit in the MTDC system and the trend of the corresponding short-circuit current, the characteristics of the fault current through a DC bus of Zhoushan 5-terminal flexible DC transmission project under the most severe short-circuit fault are detailed, and the demands for the DC circuit breaker in the DC grid are stated. After a performance comparison of the three types of DC circuit breakers in current use, a novel topology of fast DC circuit breaker suitable for use in the flexible DC transmission grid is proposed. Simulation results have verified the fast action of the novel DC circuit breaker of cutting off the fault current of the flexible DC transmission grid.

This work is supported by the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (No. 51261130471).

**Key words:** DC transmission; DC grid; short circuit fault; DC circuit breaker