

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.08.001

柔性直流输电故障快速清除系统及其用直流断路器

朱继斌, 朱秋楠, 张友鹏, 仝永刚, 孙珂珂
(平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001)

摘要:目前的柔性直流输电系统无法实现直流侧短路故障的清除,导致故障时所有换流站长时间停运。为解决该问题,提高系统可靠性,通过对系统故障电流的产生机理及直流开断原理的研究,以及直流断路器转移回路参数对开断性能影响的仿真分析;提出了一种开断电流500 A的机械式直流断路器及使用该断路器快速清除故障的方法;并搭建低频振荡试验回路验证直流断路器的开断性能。试验结果显示:文中提出的直流断路器稳定开断500 A直流电流,并使用该断路器的故障清除方法能够有效地缩短系统恢复时间,提高了系统稳定性,保证了电能质量。

关键词:柔性直流输电;直流侧故障;快速清除故障;直流断路器;系统重启

Fast Remove System and Its DC Circuit Breaker for Flexible DC Transmission Fault

ZHU Jibin, ZHU Qiunan, ZHANG Youpeng, TONG Yonggang, SUN Keke
(Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China)

Abstract: At present, the flexible HVDC system is incapable of achieving the DC side short circuit fault, it leads to chronic failure of all converters. To solve this problem and improve the reliability of the system, This paper researches the mechanism of fault current, the principle of DC interruption and simulates the influence of transfer parameters on DC breaking performance; This paper proposes a mechanical DC circuit breaker of 500 A and a method of clearing the DC fault using the DC circuit breaker; Finally, building a low frequency oscillation circuit verifies the interruption performance of the breaker. The results show that the breaker stably breaks 500 A; The method can effectively shorten the system recovery time, improve the stability of the system and ensure the quality of electric energy.

Key words: Flexible DC transmission; DC Fault; Fast remove fault; DC circuit breaker; System restart

0 引言

基于电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)的柔性直流输电与传统直流输电相比,具有可控性强、不存在换相失败的优点。使得柔性直流输电在多端直流输电、城市直流配网、微电网、可再生能源入网、海上钻井平台、孤岛供电、向无源负荷供电具备广泛应用前景^[1-6]。

基于半桥型的模块化多电平电压源换流器(Modular Multilevel Converter, MMC),由于子模块中存在与绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar

Transistor, IGBT)反并联的二极管,换流阀自身不具备清除直流侧故障的能力。直流侧双极短路后,交流电源侧经故障点发生三极短路;换流阀闭锁前,MMC中电容经过于IGBT大电流放电;闭锁后,交流系统经故障点发生的短路电流继续提升,由于直流系统阻抗明显低于交流系统,故障电流上升率极高,清除难度大^[2,3]。由于缺少直流断路器,直流侧故障导致多端输电系统所有换流站断电停用,交流系统受到较大冲击,存在系统失稳的风险。系统若采用架空线路,直流侧短路故障发生频率增加,研制快速清除直流侧故障的系统及缩短系统恢复时间的直流断路器至关重要。

收稿日期:2018-02-05; 修回日期:2018-04-09

基金项目:国家电网公司科技项目(5291BG150011)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (5291BG150011).

近年来,高压直流断路器深受国内外学者、企业的关注,进行了相关理论研究,并取得了相应的成果。2005年美国电力电子系统研究中心研制出4.5 kV/4 kA全固态直流断路器样机;2006年瑞典研制出基于集成门极换向晶闸管(IGCT)与机械开关的1.5 kV/4 kA混合式直流断路器样机;2011年意大利运用IGCT与机械开关研制出1.5 kV/10 kA的混合式直流断路器样机;2012年Alstom公司成功研制出开断电流达7.5 kA的120 kV/1.5 kA全固态直流断路器样机;2012年ABB研制出IGBT与快速机械开关组合的开断能力9 kA、开断时间5 ms的混合式直流断路器。国内2015国网智能电网研究院研制出全桥型混合直流断路器开断电流15 kA、开断时间3 ms的200 kV混合直流断路器样机^[17-14],但目前均没有投入使用;其工程运行可靠性有待考证,并其成本高昂,达数千万。研制一种能够快速清除故障的系统,成本经济、运行可靠的直流断路器至关重要。

文中以舟山柔性直流输电示范工程为应用背景,提出一种故障快速清除系统,研制出安装于直流极线、满足电流开断要求的机械式直流断路器。以切断故障衰减电流,使故障换流站退出运行,大幅缩短故障电流衰减过零时间,实现柔性直流输电系统的快速重启供电。研制的机械式直流断路器,经过仿真分析,实现谐振回路参数最优化配置,结构紧凑、实现最优空间布置;电流分断能力>500 A,对地绝缘水平>230 kV,顺利通过开断试验验证。

1 故障快速清除系统及直流断路器

1.1 直流断路器的布置

舟山柔性直流输电系统是由5个换流站组成,为保证系统经济性,机械式直流断路器串联安装在靠近换流站正极线上(或直流电缆),见图1。负极线安装普通断路器充当快速隔离开关。正常运行阶段加载额定电流、承受对地绝缘;故障清除阶段开断衰减电流;系统重启阶段耐受系统恢复电压。

直流断路器分闸后,正极线故障电流被切断;此时,负极线无法形成回路,电流为零^[8]。不考虑经济性及换流站安装空间限制,正负极均可安装直流断路器。

结合实际工程空间,满足电气、机械要求,通过仿真计算,设计紧凑型机械式直流断路器,实现其最优化设计。

1.2 故障快速清除系统

目前柔性直流输电系统中,由于换流阀MMC拓

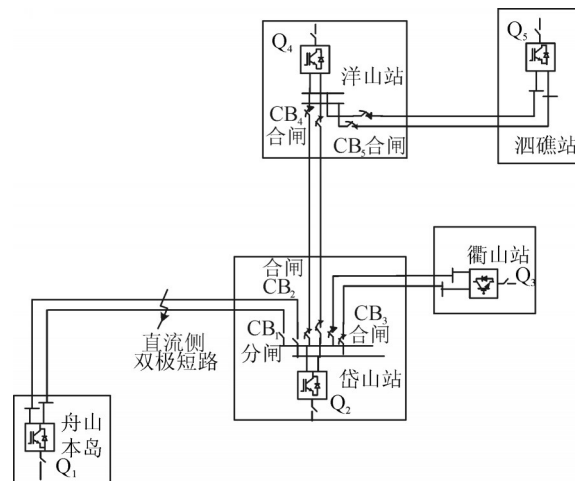


图1 舟山柔性直流换流站拓扑

Fig. 1 Schematic Diagram of Zhoushan Flexible HVDC

扑存在二极管续流,直流故障侧时,无法实现短路电流的清除,造成整个系统停运。解决直流侧故障可行的技术方案主要有:①电力电子式直流断路器(一般开断时间<5 ms);②跳闸交流侧断路器,切断电源。

目前直流断路器没有工程应用,对故障没有选择性;并且造价较昂贵,单台价格达数千万元。交流断路器跳闸,要求所有换流站全部停运,并且直流侧故障不能清除,无法实现系统重启。

文中涉及一种快速清除故障的方法,直流侧故障后进行的措施:

- 1)换流阀闭锁,阻止电容放电。
- 2)投入阻尼器,抑制短路峰值电流,加速故障电流衰减。
- 3)交流断路器跳闸,切断电源。
- 4)机械式直流断路器分闸,切断衰减电流。
- 5)故障换流站退出,非故障站重启,恢复系统供电。

故障清除时间对比见图2。换流阀电容器闭锁、电源切断后,线路依然残存故障衰减电流,衰减过零时间长。投入阻尼器,抑制短路电流,加快电流衰减;机械式直流断路器过零前切断故障衰减电流,通过直流故障选线实现故障隔离。

换流阀闭锁及阻尼器投入时间<5 ms,电源侧交流断路器跳闸<50 ms,直流断路器分断<40 ms。系统重启恢复时间根据桥臂阻尼器选择而变化,合理选择各分设备,故障发生到系统重启恢复时间可控制350 ms之内。

该方法不仅缩短故障清除的时间,并且故障隔离,实现非故障换流站的重启,减小故障对电网的冲击,保证电能质量和电网的可靠运行。

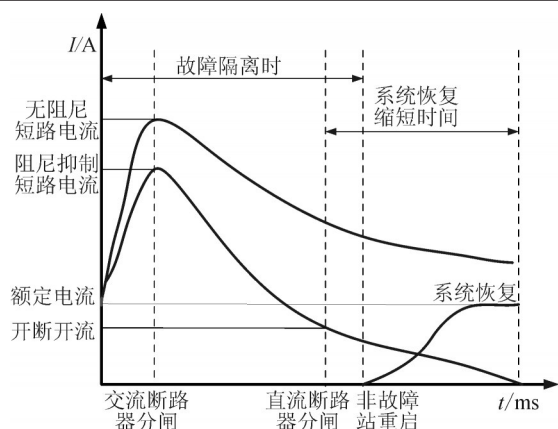


图2 故障清除时间对比

Fig. 2 Contrast of Fault Eliminate Time

1.3 系统设备的运行方式

正常运行时,直流断路器处于合闸状态,正常通流,承受系统电压,满足对地绝缘。IGBT与桥臂阻尼器 R 并联形成的SR子模块,见图3。子模块SR串入换流阀段与桥臂电抗器之间。电流通过IGBT或与其反向并联的二极管,桥臂阻尼器被旁路,导通状态IGBT压降小,忽略不计,换流阀与常规MMC相同。

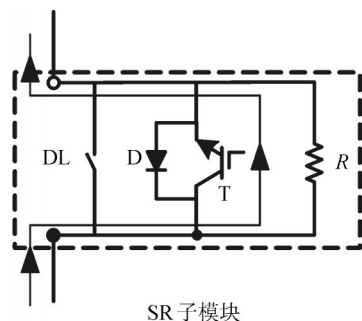


图3 子模块正常运行状态

Fig. 3 Condition of submodule SR operation

系统直流侧短路故障,子模块SR中IGBT闭锁,故障电流通过阻尼器 R ^[12,15-16],见图4。回路阻抗增加,系统进入深度限流状态,加速故障电流衰减,缩短系统重新启动时间。

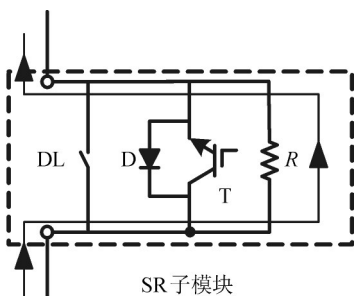


图4 短路故障子模块SR运行

Fig. 4 Condition of submodule SR when fault

1.4 故障电流形成机理

正常运行过程,为维持系统运行电压,换流阀

中MMC子模块中电容器处于高电压,见图5。发生双极短路或单极接地故障,换流阀中的电容通过 T_1 经故障点放电,此回路阻抗小,放电电流急速提高,触发换流阀闭锁,电容放电截止^[13,16]。

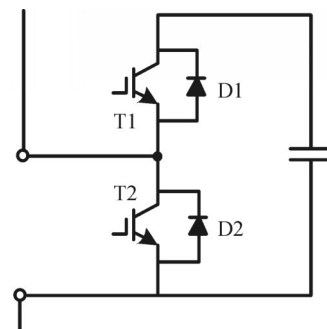


图5 MMC子模块拓扑结构

Fig. 5 Topology of MMC submodule

此时,交流系统经MMC模块中反向并联二极管,如图5中二极管 D_2 所示,发生三极短路,产生短路电流。控制保护系统触发各换流站交流侧断路器动作,切断直流侧与交流电源侧的通路;完成开断后,闭锁SR子模块中IGBT,如图4所示^[16]。阻尼器 R 串入换流阀与桥臂电抗器之间。此时系统电路简化如下:

- 1)交流断路器跳闸,系统电源断开,此时系统无源,独立存在。
- 2)换流阀闭锁,MMC模块中的IGBT闭锁,电流流过反并联二极管,二极管阻抗小,故此时换流阀相当于导线。
- 3)桥臂电抗器充当续流器,等效为电感。
- 4)阻尼器投入,串联到系统中,用电阻等效。
- 5)线路采用 π 型结构等效。

整个系统等效电路简化后的图见图6。

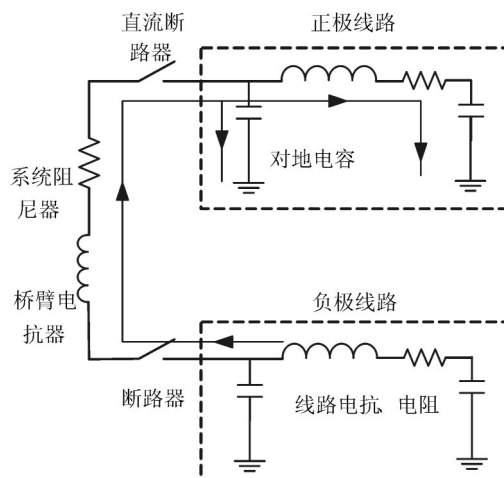


图6 系统等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram of the system

此时换流阀电容器闭锁、交流电源切断,线路中的电流来自电抗器的续流及对地电容放电。由于 RLC 回路衰减周期长,衰减过零时间 $\gg$ 系统要求的故障清除时间,系统断电时间长,导致交流系统冲击大、电能质量下降,同时换流阀电容掉电严重,系统重启充电时间长。故需直流断路器在电流衰减到一定值时(文中以 500 A 为例)开断电流。本文直流断路器采用机械式自激振荡型,利用 LC 谐振回路,振荡产生过零点,开断电流。

1.5 系统重启

为了保证电能质量,缩短停电时间,减小由于故障造成停电事故的严重程度,直流断路器完成电流开断,实现故障隔离,系统自动重新启动。此时直流断路器两侧的隔离刀闸在合闸状态(刀闸动作时间近 20 s),系统重启的恢复电压加载到直流断路器两端。

2 直流断路器研制

2.1 工作原理

目前机械式直流断路器主要有 2 种^[12, 17-18]:①有源型强迫过零:成本高昂、控制繁琐,主要用于大电流分断;②无源型自激振荡过零:结构紧凑、可靠性高、经济性好;小电流分断中具有明显优势。

自激振荡过零型直流断路器基本组成结构,见图 7。

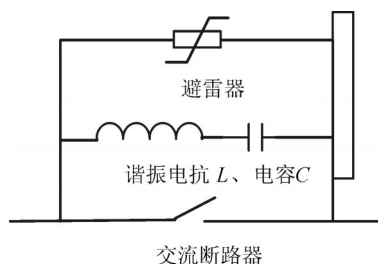


图 7 无源型直流断路器原理图

Fig. 7 Principle diagram of passive DC circuit breaker

其结构主要由 4 部分组成:①开断装置采用传

统交流断路器;②满足通流、绝缘的高压电抗器、电容器设备;③MOV 非线性电阻器为 ZnO 避雷器,限制过电压,保护电容器及开断装置;④放置电容、电抗、避雷器的绝缘平台。电抗、电容、交流断路器形成谐振回路^[7],利用电弧的不稳定性及负阻特性振荡产生过零点开断^[13, 17, 19-20]。

2.2 绝缘要求

直流断路器各组件均耐受电流开断、系统重启导致的过电压。开断装置及谐振回路的过电压取决于并联的非线性电阻器。对比开断、重启过电压,合理选择避雷器的参数。

1)开断过程。线路能量转移到电容器形成端子间电压,幅值取决于电容值及系统能量,系统能量由桥臂电抗、线路电抗及其残余电流、对地电容及其残余电压决定。

2)系统重启。交流断路器合闸,交流电源对换流阀电容充电,导致线路及谐振回路操作过电压。根据仿真结果,系统重启导致直流断路器两侧产生过电压,幅值 230 kV,持续时间 200 ms,随后恢复到稳态电压 200 kV,在此过程中要求避雷器不产生放电电流。针对开断电流及系统重启绝缘要求,本方案选择避雷器额定电压 266 kV,操作残压 330 kV。

2.3 开断性能仿真

为最优化设计,合理选择电容器、电抗器参数尤为重要,文中采用 PSCAD/EMTDC 软件对直流断路器的工况进行模拟仿真计算^[21-24],深入分析转移回路对直流电流开断性能的影响,改善整体方案,实现最优化设计。

针对舟山柔性直流输电故障清除过程,建立直流断路器的仿真模型。根据直流断路器结构及性能,编写相应程序,模拟断路器在燃弧过程的电气性能参数变化,不仅辅助方案设计,同时实现关键参数的数字化分析。根据直流断路器开断电流的

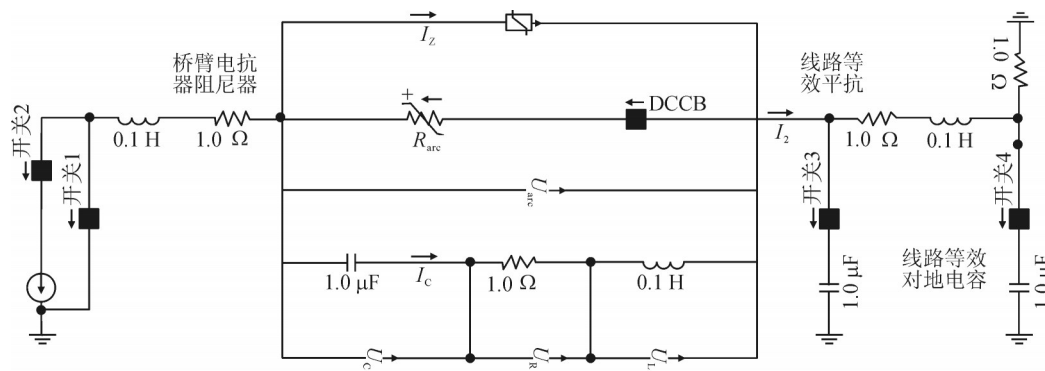


图 8 直流断路器仿真模型

Fig. 8 Simulation model of DC circuit breaker

要求,仿真模型建立见图8。

非线性电阻器 R_{arc} 与开关DCCB串联模拟断路器开断装置,电容器、电抗器、电阻模拟谐振回路(电阻为导线电阻)。

采用 R_{arc} 模拟机械断路器的电弧特性,电弧的动态数学模型已公认是十分复杂的,文中模型只考虑电弧能量损耗、储存,故采用相对简单,但能充分模拟负阻特性的Cassie-Mayr电弧模型,假设电弧的电阻率随电弧储存能量而变,电弧从表面散热。其方程为

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{\theta_0 r_\alpha^{-\alpha}} \left(1 - \frac{i^2 R}{N_0 r_\alpha^{-\beta}} \right) \quad (1)$$

式(1)中: $\theta_0 r_\alpha^{-\alpha}$ 为电弧时间常数,代表单位体积的储存能量除以耗散能量; α 、 β 、 N_0 、 θ_0 均为常数,根据机械断路器种类、结构以及电弧电流大小来决定。文中根据类似产品的试验数据取值。

交流断路器分闸、换流阀闭锁后的故障回路模型,如图8所示,直流侧故障电流采用电流源产生。

采用电流表对通过断路器的电流进行检测,电流到达触发值,断路器动作。根据断路器结构及运动特性,利用非线性电阻器模拟断路器电弧特性。

文中比较分析了电容值分别为3、6 μF 时的电流开断过程,见图9。仿真结果表明: $C=6 \mu\text{F}$, $L=400 \mu\text{H}$ 时,成功开断500 A直流电流,燃弧时间短,振荡的周期短。 $C=3 \mu\text{F}$, $L=400 \mu\text{H}$ 时,开断500 A电流失败。

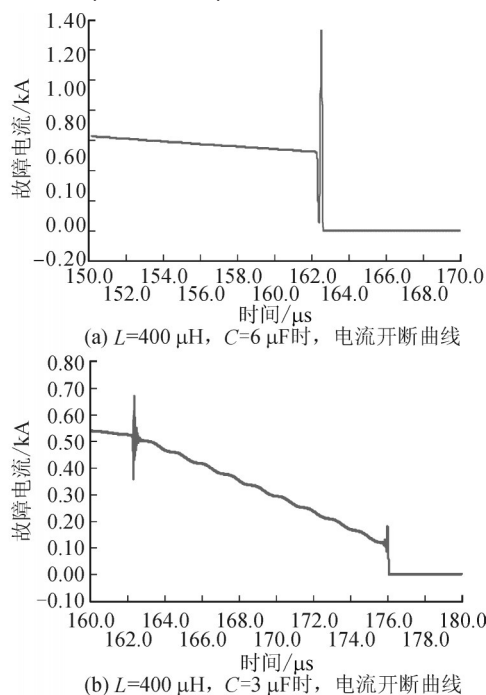


图9 电容值对电流开断的影响曲线

Fig. 9 Influence of capacitor on breaking current

文中分析了电感分别为4 mH、25 μH 断路器直流电流开断性能,见图10。由图9、10可知,电感为

400 μH 时,电流振荡周期数少,燃弧时间短。

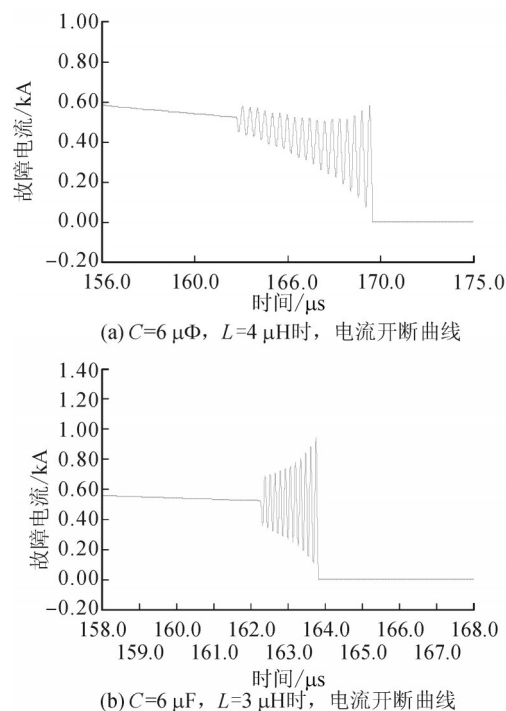


图10 电感值对电流开断的影响曲线

Fig. 10 Influence of reactance on breaking current

3 试验验证与结果分析

3.1 实验原理

舟山柔性直流工程,故障电流衰减频率由桥臂电抗器、线路等效电感、对地电容决定,实验室由于成本及空间限制,难以实现与现场工程完全相同的工程回路。针对实际工程对直流断路器的考核指标,采用低频振荡回路等效舟山柔性直流工程故障电流。断路器的开断试验,有效地验证整体方案的合理性,为现场运行提供保证。

3.2 试验回路搭建

试验回路见图11。电源通过变压器升压,经整流装置变换成直流;充电开关 K_1 合闸、放电开关 K_2 分闸,经限流电阻 R_1 对电容器 C_1 充电; K_1 分闸、 K_2 合闸、被试品合闸, C_1 、 L_1 、被试品与回路等效电阻 R 构成RLC串联电路。放电电流幅值由 C_1 的充电电压决定、频率由 C_1 、 L_1 决定^[25-27],文中所选的试验回路的振荡频率为4.0 Hz。试验电流 I_1 为

$$I_1(t) = U_0(\omega\tau) e^{-\delta \sin(\omega\tau)} \quad (2)$$

式(2)中: U_0 为 C_1 充电电压; $\delta=R/(2L)$ 。

3.3 实验结果

为了验证设计方案的可行性及仿真结果的可靠性,采用上述试验回路进行了谐振回路电容值为3、6 μF ,电抗器为25、400 μH 电流开断试验,实验数据见表1。

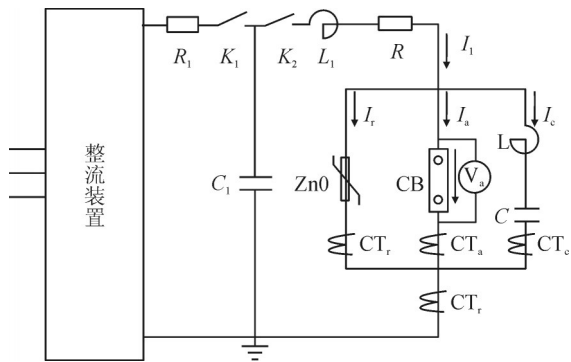


图 11 试验回路结构图

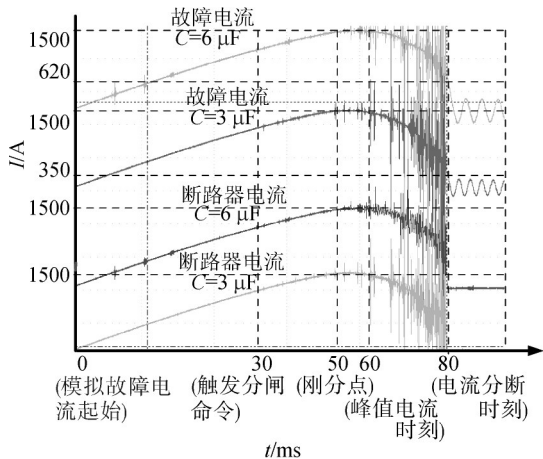
Fig. 11 Schematic diagram of test circuit

表 1 实验结果

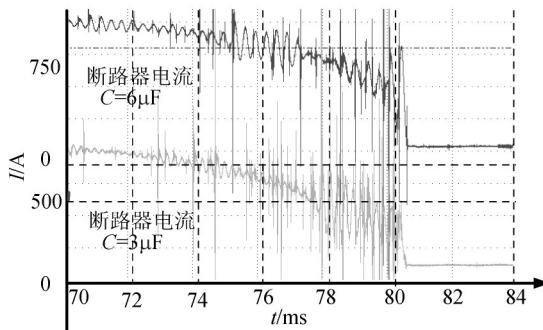
Table 1 Experimental result

序号	C/ μ F	L/ μ H	开断电流/A	燃弧时间/ms	峰值电流/A
1	6	400	691	16.8	1 556
2	6	400	624	18.4	1 509
3	3	25	354	18.2	1 547
4	3	25	280	19.9	1 534

文中对比了电容值对电流开断性能的影响,见图 12。实验结果表明:回路放电电流峰值相同时,转移回路电容值为 $6\ \mu\text{F}$ 相对于 $3\ \mu\text{F}$ 回路振荡频率 ($3.3\ \text{kHz}$) 低,开断电流大,燃弧时间短;受绝缘介质恢复速度的限制,振荡频率过高,电流开断性能受到影响。



(a) 回路故障电流及断路器开断曲线

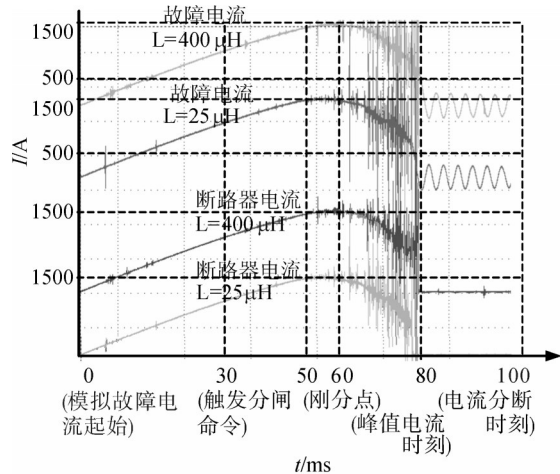


(b) 直流断路器振荡曲线对比

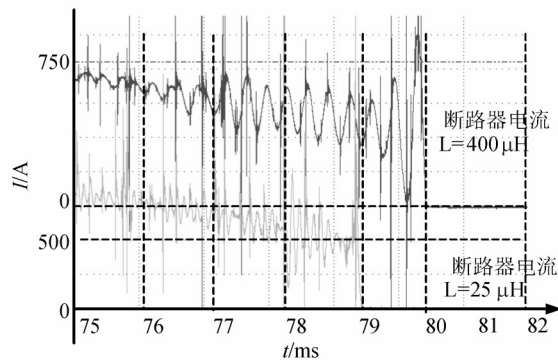
图 12 电容器对开断性能影响

Fig. 12 Influence of capacitor on breaking current

文中分析了电感对电流开断性能的影响,见图 13。电容为 $6\ \mu\text{F}$,电感为 $400\ \mu\text{H}$ 或 $25\ \mu\text{H}$ 时,均能够开断 $500\ \text{A}$ 的电流。通过分析开断曲线,电感值为 $400\ \mu\text{H}$ 时,振荡电流幅值稳定增加,开断性能稳定;电感值为 $25\ \mu\text{H}$ 时,谐振回路振荡频率高、续流能力差,振荡电流幅值增加过程出现波动,电流开断性能不稳定。



(a) 回路故障电流及断路器开断曲线



(b) 直流断路器振荡曲线对比

图 13 电抗器对开断性能影响

Fig. 13 Influence of reactance on breaking performance

从波形及实验数据显示:断路器分闸后,回路峰值电流下降速度快,原因是 $1\ 500\ \text{A}$ 峰值电流对应的电容 C_1 充电电压近 $1\ 000\ \text{V}$,断路器分闸后,电弧电压快速增加 $>1\ 000\ \text{V}$,电弧与回路 L_1 、 C_1 形成放电回路,导致回路电流 I_1 快速下降。 $6\ \mu\text{F}$ 对应的回路电流下降速度小于 $3\ \mu\text{F}$,原因是电弧对谐振回路及试验回路同时放电, $6\ \mu\text{F}$ 谐振回路阻抗小、电压低、放电电流大,故试验回路电流 I_1 下降慢。

4 结论

通过产品整体方案设计、仿真计算及对本文研制的直流断路器试验验证,主要的结论有:

1)研制的直流断路器满足舟山柔性直流输电故

障快速回复系统开断500 A电流的工程要求。

2)使用文中提出的机械式直流断路器的故障快速清除系统,从故障到系统重启需要500 ms,根据阻尼器及断路器的优化可进一步缩短。

3)分析了采用低频交流试验回路等效柔性直流输电故障清除过程中阻尼衰减电流的科学性。

4)采用PSCAD/EMTDC软件,建立了直流断路器的仿真模型,仿真了不同电容、电抗对电流开断性能的影响,实现方案的最优化设计。

5)电感为400 μH ,电容为6 μF 时能开断500 A电流,电容为3 μF 时,500 A电流开断失败。

6)电容为6 μF ,电感为400 μH 、25 μH 均能开断500 A电流,但 $L=400 \mu\text{H}$ 时,开断性能稳定。

7)分析了电弧电压及谐振回路电容、电抗对试验回路的影响。

参考文献:

- [1] Asplund G, et al. HVDC Grid Feasibility Study[J]. Electra, 2013:50-59
- [2] JOVICIC D, HERTEM D V, LINDEN K, et al. Feasibility of DC transmission networks[C]//2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies.[s.l.]:IEEE, 2011: 11-17.
- [3] LUNDBERG P, JONSSON T, MAITI S, et al. Converter technologies and functional requirements for reliable and economical HVDC grid design[C]//CIGRE symposium.Calgary: CIGRE, 2013: 407-410.
- [4] MOBAREZ M, KAISHANI M G. A novel control approach for protect of multi-terminal VSC based HVDC transmission system against DC fault[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 10(2): 4208-4213.
- [5] DASTGEER F, KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]// Australasian Universities Power Engineering Conference. Adelaide, SA, USA: [s.n.], 2009: 1-5.
- [6] ULLAH N, THIRINGER T, KARLSSON M D. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines - potential and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 601-612.
- [8] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2008年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 221-234.
LIU Zhenya. Album of research achievements on UHVDC (2008)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 221-234.
- [9] HERTEM D V, GHANDHART M. Multi-terminal VSC-HVDC for the European supergrid: obstacle[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2010, 14(9): 3156-3163.
- [10] VITHAYATHIL J, COURTS L, PETERSON G, et al. HVDC circuit breaker development and field tests[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1985, 104(10): 2693-2705.
- [7] NOVELLO L, GAIO E, PIOVAN R. Feasibility study of a hybrid mechanical-static DC circuit breaker for superconducting magnet protection[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(2): 76-83.
- [8] SKARBY P, STEIGER U. An ultra-fast disconnecting switch for a hybrid HVDC breaker-A technical breakthrough[C]// CIGRE Canada Conference. Calgary: CIGRE, 2013:
- [9] 穆建国, 王莉, 胡杰. 直流固态断路器拓扑结构的设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 109-114.
MU Jianguo, WANG Li, HU Jie. Analysis and design of topological structure for DC solid-state circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 109-114
- [10] 胡杰, 王莉, 穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 145-150.
HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid state circuit breaker and its potential application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 145-150.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 274-276.
XU Zhen. Flexible DC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 274-276.
- [12] 王帮田. 高压直流断路器技术[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 61-65.
WANG Bangtian. Technology of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 61-65
- [13] 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 ultrahigh voltage DC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 151-156.
- [15] NOE M, JUENGST K P, ELSCHNER S, et al. High voltage design, requirements and test of a 10 MVA superconducting fault limit[J]. IEEE Transactions of Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 2082-2085.
- [16] RAFFERTY J. DC fault analysis of VSC based multi-terminal HVDC system[C]//International Conference on AC and DC Power Transmission.[S.l.]: IET, 2013: 1-6.
- [17] 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和仿真[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 study on current commutation of the DC transfer switches in UHVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36): 1-7.

- [18] 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(2):7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(2):7-12.
- [19] 黄瑜珑,程铁汉. 高压直流转换开关的研究与产品开发. 2013年中国电机工程学会直流输电与电力电子专委会学术年会,重庆,2013. 10. 23-26.
HUANG Yulong, CHENG Tiehan. Analysis and simulation study on current commutation of the DC transfer switches in UHVDC transmission systems[J], Proceedings of the CSEE, 2013, 31(36):1-7.
- [20] 马元社,李宾宾,王蔚华,等. 高压直流断路器振荡回路特性[J]. 南方电网技术,2011,5(3):10-13.
MA Yuanshe, LI Binbin, WANG Weihua, et al. Characteristic of oscillation circuit in HVDC circuit breakers[J], Southern Power System Technology, 2011, 5(3):10-13.
- [21] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:71-79.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineer technologies[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004. 71-79.
- [22] HAMZAH A. QISTIRAMLI A. Using a PSCAD simulation software in calculating the probability of surge protective device failure in an installation served by overhead lines[J], Proceedings of the IEEE, 2012, 15(6):1127-1133.
- [23] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京:中国电力出版社,2014:164-173.
ZHAO Chengyong. Modeling and simulation technology of flexible direct current transmission[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014:164-173.
- [24] SURGEVIL T, VARDAR K, AKPINAR E. Analysis of shunt active power filter using PSCAD for parallel operation[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 12(6):263-267.
- [25] TAHATA K, KA S, TOKOYODA S, et al. HVDC HVDC circuit breaker for HVDC Grid application[C]//CIGRE AORC Technical Meeting, Pairs, France: CIGRE, 2014:1120.
- [26] 那 虎,丁正平,孙晋峰,等. 高压直流输电用直流转换开关转换电流试验回路的分析与设计(1)[J]. 高压电器, 2012, 48(11):75-81.
NA Hu, DING Zhengping, SUN Jinfeng, et al. Design of test circuits of DC circuit breaker for high voltage direct current (HVDC) distribution system(1)[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11):75-81.
- [27] 那 虎,丁正平,孙晋峰,等. 高压直流输电用直流转换开关转换电流试验回路的分析与设计(2)[J]. 高压电器, 2013, 49(1):91-95.
NA Hu, DING Zhengping, SUN Jinfeng, et al. Design of test circuits of DC circuit breaker for high voltage direct current (HVDC) distribution system(2)[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1):91-95.

朱继斌(1988—),男,硕士,工程师,主要从事高压直流输电技术、柔性直流输电、直流电网技术。