

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.009

基于静态开关技术的直流断路器仿真

雷敏, 袁兰兰, 曾进辉, 莫霜叶

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 综合机械开关的静态特性与电力电子开关的动态特性, 能够实现快速且无弧的故障开断。基于此, 提出了一种高速机械开关与双向集成门控晶闸管组件并联的组合新型拓扑结构, 分析了混合式直流断路器的电路工作原理, 并在 Matlab/Simulink 环境下搭建了实验仿真模型。所得仿真结果表明, 所提出的断路器实现了故障在零电压情况下的无弧开断, 且比传统直流断路器更为快速, 故障切除后能够有效抑制过电压及故障电流的上升速率。

关键词: 直流断路器; 静态开关模块; 无弧中断; 电流换向

中图分类号: TM773⁺.1; TM561 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2018)01-0049-06

Simulation of DC Circuit Breakers Based on Static Switching Technology

LEI Min, YUAN Lanlan, ZENG Jinhui, MO Shuangye

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A fast and non-arc fault break can be realized by combining the advantages of both static characteristics of integrated mechanical switches and the dynamic characteristics of power electronic switches. Based on this concept, a new type of topological structure of high-speed mechanical switches and bidirectional integrated thyristor assembly has thus been proposed. By analyzing the working principles of hybrid DC circuit breakers, this paper seeks to establish an experimental simulation model in environment. The simulation results show that the proposed circuit breaker can realize a non-arc break of the circuit breaker at zero voltage with a quicker speed than that of traditional DC circuit breakers. After the fault removal, the circuit can effectively suppress the rising rate of over-voltage and fault current.

Keywords: DC circuit breaker; static switch module; non-arc interruption; current transfer

1 研究背景

直流断路器是电力系统中正常或故障运行时具有开启和关闭功能的最大类电气装置。传统的机械式直流断路器利用电弧的反向阻抗特性来实现开关的换向, 由于经典机械式断路器在闭合位置具有非常小的接触电阻(几微欧姆), 在“接通”操作时, 触点闭合所产生的电弧会严重影响开关动作的速度。

在“关断”操作时, 由于触点上的热复合和吹弧槽组件所产生的电弧效应会引发较高的瞬态恢复过电压和介电负载, 严重影响关断速度; 同时会造成接触点的腐蚀, 缩短设备寿命。因此, 直流断路器的设计不仅需要考虑开关切换操作的速度, 还必须考虑在“切换”操作中由电弧造成的危害。系统出现短路故障时呈现出来的特点主要包括:

1) 因短路电流的迅速上升, 造成直流系统过高

收稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607064)

作者简介: 雷敏(1973-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事复杂网络理论及其在电网稳定性分析中的应用研究, E-mail: 13607331653@163.com

的过电压。

2) 断路器断开故障电流时, 机械开关触点两端的电弧无法熄灭, 造成电弧在触点间反复燃烧, 影响关断速度和设备寿命。

3) 系统的残余能量会影响下一次的开关动作。

直流系统中存在的等效电感会产生过高的寄生过电压, 其值决定于电流峰值以及释放时间。抑制过电压的最佳方式, 是通过减小当前电流峰值而非释放时间。因为燃弧时间太短会造成电感过大耗能及出现自感电势, 从而导致较大的过电压。因此, 必须在有限的电流和时间内, 产生适当大小的电弧电压, 其值保持在不超过电源电压的值。在此基础上, 综合考虑设备的运动学和电弧原理, 以优化超快速断路器的开断短路操作。

为解决传统高速断路器无法实现无弧开断的问题, 本文提出一种基于静态开关技术的混合式断路器拓扑结构, 以快速转移故障电流, 有效抑制过电压, 从而实现快速无弧开断故障电流。

2 直流开断方式

2.1 现有直流开断方法介绍

已知用于开断直流电流的方法可以总结为以下3种: 反向电压法、强制过零法和混合开关法^[1]。这3种方法均是基于创建人工电流零点来实现电弧熄灭的, 它们在直流电压下的电流和电压的特定波形如图1所示。

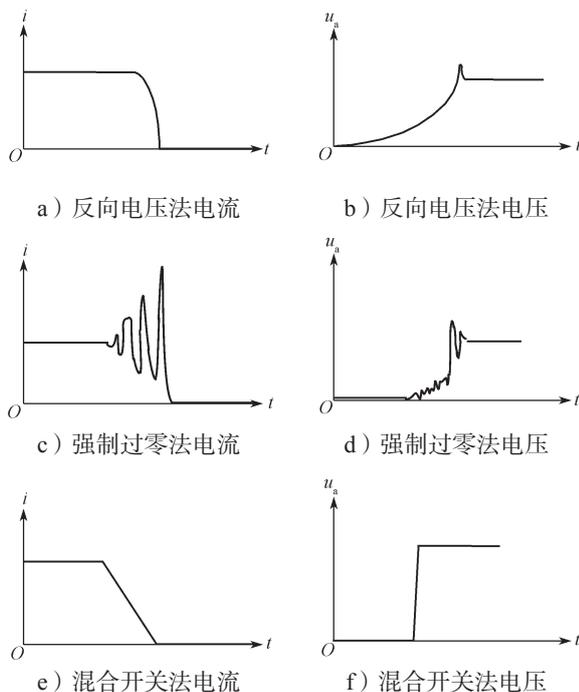


图1 各断开直流电流的具体波形

Fig. 1 Specific wave-forms of the disconnected DC current

1) 反向电压法^[2]。其通过产生高于断路器系统电压的电弧电压, 将故障电流降低到0, 从而熄灭电弧。该方式主要利用液体灭弧介质或者磁吹的方法拉长电弧, 最终熄灭电弧。但其绝缘介质的冷却装置和灭弧腔室制造工艺要求较高。这种灭弧方式多被用于较早的低压直流断路器(额定电压小于3 000 V)中, 现在用得较少。

2) 强制过零法^[3]。强制过零法是由L-C电路和高速机械开关组成振荡电路产生的高频振荡电流来建立电流零点, 该方法充分应用了电弧的安秒特性, 其装置由普通交流断路器和强制过零装置组合而成。根据转换方式的不同, 强制过零法可分为自激式和有源式2种^[4]。其中, 自激式强制过零法利用电弧的不稳定性和安秒特性产生一个高频振荡电流, 并迭加到故障电流上, 从而熄灭电弧完成故障切除。有源式强制过零法通过预充电的电容器放电, 产生一个反向振荡电流, 并迭加到故障电流上, 从而实现系统故障切除。强制过零法要求换流参数最佳配合才能达到理想效果, 适用于中高压断路器。

3) 混合开关法^[5]。其结构由高速机械式开关与静态开关以及辅助支路并联组成, 混合式断路器完美地将机械开关的良好静态特性与静态开关的良好动态特性相结合, 可以实现快速且无弧的故障开断要求^[6]。根据开关动作的速度要求, 加入检测、缓冲、吸能等相应辅助支路。

2.2 混合式断路器拓扑结构的提出

针对传统直流断路器无法熄弧的缺点, 本文提出一种新型的混合式断路器拓扑结构, 它基于绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)静态电力电子开关来转移故障电流, 缓冲支路抑制关断产生的较大过电压和吸能支路吸收残能, 限制电流上升速率, 从而实现故障电流的快速无弧开断, 其拓扑结构如图2所示。

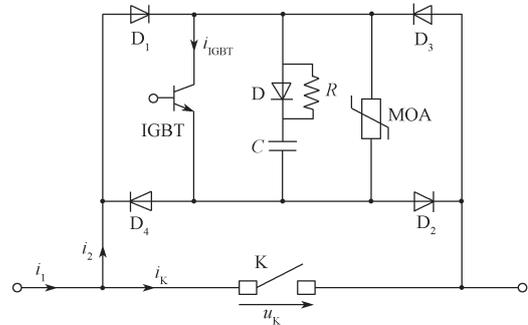


图2 带静态开关的断路器拓扑结构

Fig. 2 Circuit breaker topology with static switches

直流系统存在的杂散电感会在IGBT关断的同时引起较高的浪涌电压和较大的电流上升率, 因此在其

两端并联 RCD 缓冲电路, 以确保 IGBT 在正常工作区的动作^[7]。为防止 IGBT 被高压击穿, 在其两端并联吸能限压保护支路^[8]。

通过上述改进设计, 不仅可以实现机械开关支路的快速无弧分闸, 而且可以卸掉传统直流断路器体积笨重的冷却装置和频繁需要维修的灭弧室, 实现了整体设备的小型化。

2.3 故障开断波形

在接通状态下, 正常的负载电流由机械开关承载。在故障情况下, 故障检测单元检测到故障后, 向机械开关发出断开触点的信号, 并且同时产生 IGBT 接通信号。经过一段时间的电流释放, 触点分离。

触点分离所产生的弧压作用在二极管 D_1 和 D_2 以及 IGBT 上, 形成换向电压, 将电流快速且完全地转移到 IGBT 静态开关上。与此同时, 缓冲支路投入运行, 抑制静态开关开断故障电流所产生的过电压。为方便下一次的开关动作, 吸能支路吸收电路中的残余电能, 各支路的电压与电流换向特性如图 3 所示。

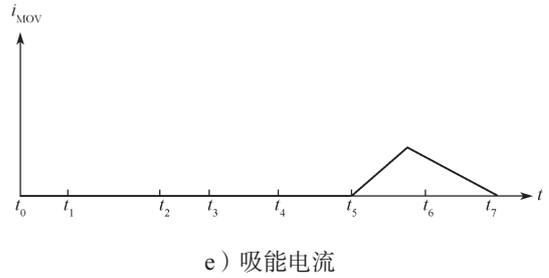
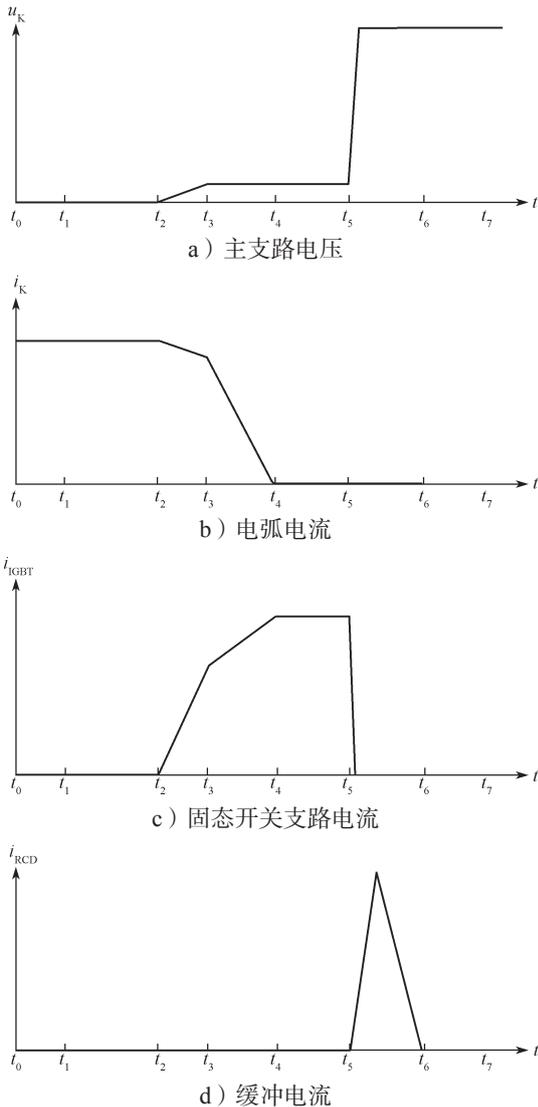


图 3 故障开断过程中的主要波形

Fig. 3 Main waveform in the process of fault disconnection

1) 区间 I $[t_0, t_1)$ 。 t_0 时刻之前, 地铁牵引供电系统正常运行, 电流仅流过直流断路器机械开关支路, 另外 3 条支路不投入工作。此时, 机械开关两端电压 u_k 为 0, 流过的正常工作电流为 i_{k0} 。假定在 t_0 时刻系统发生短路, 电流检测设备开始检测。

2) 区间 II $[t_1, t_2)$ 。在 t_1 时刻, 电流检测设备检测到故障发生, 发出机械开关分闸信号, 同时向 IGBT 发出导通信号。

3) 区间 III $[t_2, t_3)$ 。在 t_2 时刻, 机械开关 K 触头打开, 电流向 IGBT 支路转移。

4) 区间 IV $[t_3, t_4)$ 。在 t_3 时刻, 故障电流由机械开关转至 IGBT 上, 此时, IGBT 元件上流过的 i_{IGBT} 增大, 机械开关流过的 i_k 下降。

5) 区间 V $[t_4, t_5)$ 。在 t_4 时刻, 故障电流完全转移至电力电子开关支路上, i_k 下降为零, i_{IGBT} 增至最大值。

6) 区间 VI $[t_5, t_6)$ 。在 t_5 时刻, IGBT 接收到关断信号, IGBT 关断, 流经 IGBT 元件的 i_{IGBT} 迅速下降为 0。与此同时, 缓冲支路投入运行, 抑制电路中的故障电流, 关断过电压。

7) 区间 VII $[t_6, t_7)$ 。 T_6 时刻, 吸能支路开始吸收电路中的残余电能。

3 建模与仿真算例

3.1 系统等效数学模型

直流系统的等效简图见图 4。

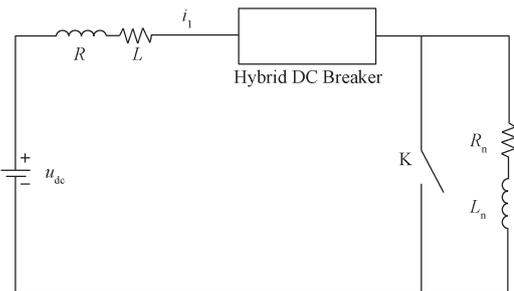


图 4 直流系统等效图

Fig. 4 DC system equivalent diagram

图4中, R 和 L 为直流系统变压器参数和线路的集成等效阻抗, R_n 和 L_n 为负荷侧的等效阻抗, 开关 S 模拟短路故障。

假定在 t_0 时发生短路故障, 由图4可以求出系统的短路电流为

$$i(t) = i(\infty) + [i(0_+) - i(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{式中: } i(0_+) = i(0_-) = \frac{u_{dc}}{R + R_n}; \quad \tau = \frac{L}{R}。$$

其中, u_{dc} 为直流系统的工作电压; $i(t)$ 为故障短路电流的瞬时值。

因此, 有

$$i(t) = \frac{u_{dc}}{R} + \left[\frac{u_{dc}}{R + R_n} - \frac{u_{dc}}{R} \right] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

本研究中, 用麦也耳 (Mayr) 电弧数学模型模拟高速机械开关动作特性^[9]。电弧的动态特性数学表达式为

$$\frac{1}{g_{arc}} \frac{dg_{arc}}{dt} = \frac{1}{\delta} \left(\frac{u_{arc} i_{arc}}{P_s} - 1 \right),$$

$$\text{即 } \frac{1}{u_{arc}} \frac{du_{arc}}{dt} - \frac{1}{i_{arc}} \frac{di_{arc}}{dt} = \frac{1}{\delta} \left(1 - \frac{u_{arc} i_{arc}}{P_s} \right)。$$

式中: g_{arc} 为电弧电导; u_{arc} 为电弧电压; i_{arc} 为电弧电流; δ 为电弧时间常数; P_s 为电弧散热功率。

其中 δ 和 P_s 与机械式断路器的自身属性相关, 数值上为定值。

当系统发生故障时, 静态开关 IGBT 在 t_6 时刻完全关断电流, 关断电流最大值为

$$i_{IGBT} = i_{L(t_6)} = i_0 + \frac{u_{dc}}{L} t_6。$$

IGBT 分断瞬间所需要承受的暂态过电压为

$$u_{IGBT} = u_{dc} - L \frac{di_{(t_6)}}{dt} - i_{(t_6)} R。$$

RCD 缓冲电路能控制直流回路中寄生电感储存的能量, 有效抑制谐振的产生。同时, IGBT 关断时集电极与发射极出现的高尖峰电压, 能最终保证静态开关工作在软关断状态^[10]。吸能支路吸收残能限制电 di/dt , 从而达到快速无弧故障电流的开断。

回路中电感储存的能量为

$$E_1 = \frac{1}{2} Li^2。$$

式中: E_1 为寄生电感储存的能量; L 为直流系统等效电感; i 为短路电流。

缓冲支路电容的能量吸收公式为

$$E_2 = \frac{1}{2} C \Delta u^2。$$

式中: E_2 为电容需要吸收的能量; C 为系统中的等效电容; Δu 为回路中的过电压, 且 $\Delta u = u_{max} - u_{dc}$, 其中 u_{max} 为测量设备测出的最高测量限制电压, 也是吸能支路能够承受的电压最大值。

在 IGBT 开断短路电流 i_{IGBT} 时, 假定回路中的电感储能完全由电容 C 吸收, 则有

$$C = \frac{Li_{IGBT}^2}{\Delta u^2}。$$

为避免引起缓冲支路的电容与线路电感发生振荡, R 应该满足如下条件:

$$R \geq 2\sqrt{L/C}。$$

二极管应选择能够快速恢复的二极管 D , 以钳制暂态过电压, 防止振荡产生。

3.2 仿真算例

在 Matlab/Simulink 平台上搭建直流系统仿真模型, 以验证本文提出的断路器开断特性。将混合式断路器各支路搭建出来, 并封装于 Hybrid DC Breaker 子系统中, 其仿真模型如图5所示。图5所示模型中, R_L 为直流系统等效阻抗, R_{11} 为系统短路故障时的过渡电阻。

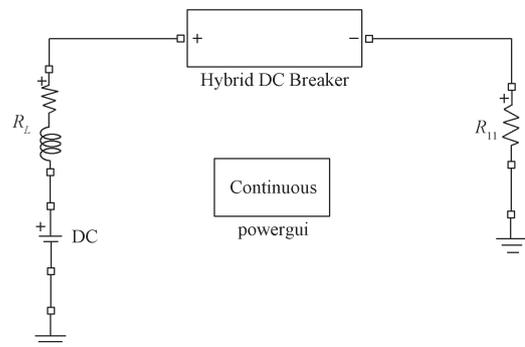


图5 仿真模型

Fig. 5 A simulation model

此处 IGBT 的触发信号由两个 Step 信号 (T_1 和 T_2) 相减获得, 接入 IGBT 栅极, 使得静态开关在 2.0~2.1 ms 内处于导通状态。其中直流系统及断路器各元件参数设置见表1。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

系统电压	线路等效电阻	等效电感	过渡电阻	机械开关固有分闸时间	IGBT 触发信号时间
400 V	69 mΩ	0.3 mH	0.005 Ω	2 ms	1.0~2.5 ms

3.3 仿真结果

根据设定的参数进行仿真实验, 所得直流断路器开断特性结果如图6~11所示。

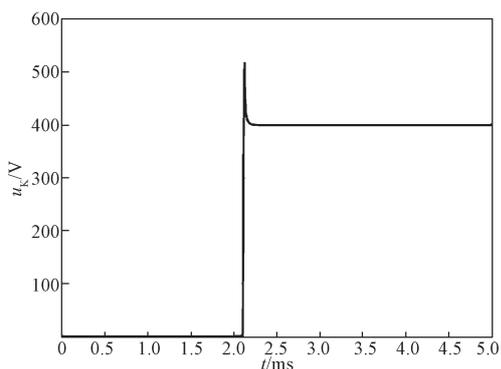


图 6 机械开关支路电压变化

Fig. 6 Voltage change of the mechanical switch branch

由图 6 所示机械开关支路电压变化曲线可知, 当直流系统处在正常运行状态时, 只有机械开关导通, 其他 3 条支路均不作用, 机械开关两端电压为 0。在 $t=2.2$ ms 时, 电路断开, 故障完全切除, 机械开关两端电压恢复到 400 V 系统电压。

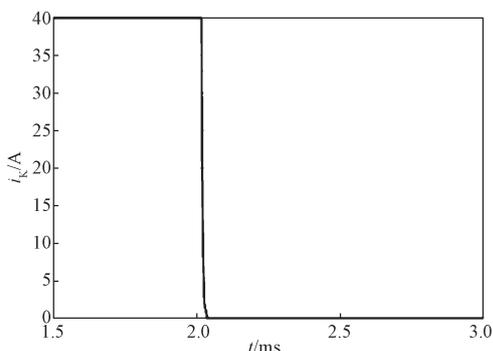


图 7 机械开关支路电流变化

Fig. 7 Current change of the mechanical switch branch

由图 7 所示机械开关支路电流变化曲线可知, 当 0 时刻出现故障, 电流检测设备检测到故障, 机械开关经固有分闸时间 2 ms 开始分断, 机械开关电流由 40 A 迅速下降至 0 A。

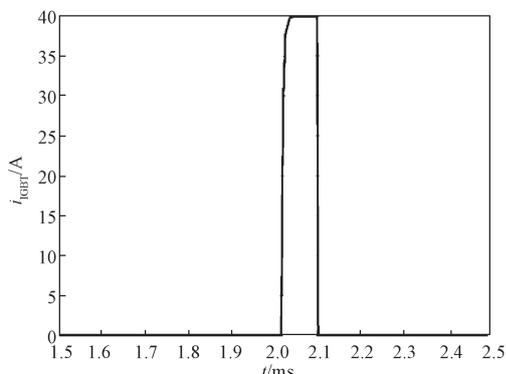


图 8 IGBT 静态开关支路电流变化

Fig. 8 Current change of IGBT static switch branch

由图 8 所示静态开关支路电流变化曲线可知, 机械开关分断的同时, 向静态开关发出导通信号 (2.0~2.1 ms), 机械开关触点两端产生电弧电压, 并将

故障电流转移至静态开关支路。其后, 静态开关在 0.1 ms 内将故障电流关断。

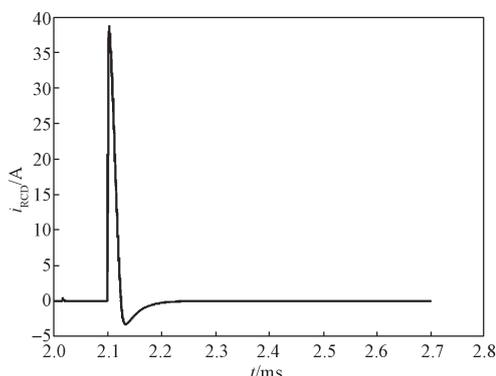


图 9 缓冲支路电流变化

Fig. 9 Current change of the buffer branch

由图 9 所示缓冲支路电流变化曲线可知, 缓冲支路在 2.1 ms 投入工作, 控制 IGBT 关断引起的大电流上升率, 减轻静态开关所承受的尖峰电压。

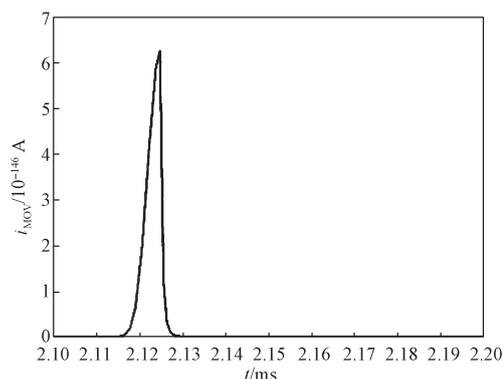


图 10 吸能支路电流变化

Fig. 10 Current change of the energy absorbing branch

由图 10 所示吸能支路电流变化曲线可知, 吸能支路吸收静态开关分断后的残压, 为断路器的下一次保护动作做准备。

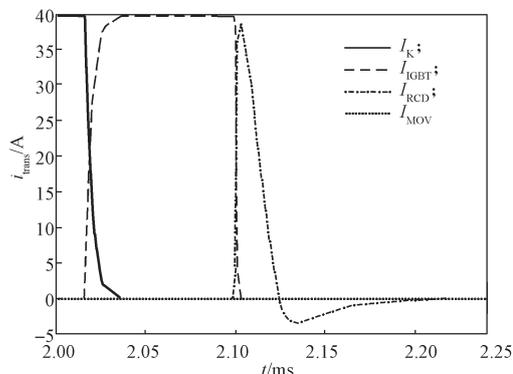


图 11 故障电流转移情况

Fig. 11 Fault current transfer

由图 11 所示整个故障切除过程中电流转移曲线可知, 整个断路器从系统短路故障发生到故障切除总

用时为 2.2 ms, 开断故障电流的效果显著。

4 结论与展望

本研究对直流断路器的拓扑结构进行了改进, 并在 Matlab/Simulink 环境下对直流系统出现短路故障时直流断路器的电流转移情况进行了仿真模拟, 仿真结果表明:

1) 所提出的断路器实现了故障在零电压下的无弧开断;

2) 故障切除时间为 2.2 ms, 小于传统断路器切除时间 (6 ms), 可见其比传统直流断路器更快速;

3) 故障切除后, 新型直流断路器能够有效抑制过电压及故障电流的上升速率;

近年来直流输电及直流电网工程发展迅速, 运行稳定, 且开断无弧的高可靠性静态开关技术是目前直流系统开关技术发展的重要研究方向之一。采用高速机械开关与双向集成门控晶闸管组件并联组合的直流断路器, 在理想仿真情况下能实现故障的正常无弧开断, 这为直流系统保护开关的发展奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王容华, 刘云. 直流开断方法分析比较[J]. 电工材料, 2011(4): 40-45.
WANG Ronghua, LIU Yun. Analysis and Comparison of DC Interruption Techniques of Switches[J]. Electrical Engineering Materials, 2011(4): 40-45.
- [2] 龙润, 刘攀. 一种改进型真空直流限流断路器研究[J]. 船电技术, 2015, 35(6): 75-77.
LONG Run, LIU Bo. Research on a Modified DC Vacuum Current Limiting Circuit Breaker[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2015, 35(6): 75-77.
- [3] 杨锋, 高海林, 江壮贤, 等. 双向强迫换流型直流限流断路器的分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2701-2707.
YANG Feng, GAO Hailin, JIANG Zhuangxian, et al. Analysis and Design of a Bidirectional Forced Current DC Current Limiting Circuit Breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2701-2707.
- [4] 王帮田. 高压直流断路器技术[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 61-64.
WANG Bangtian. Technology of HVDC Circuit Breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 61-64.
- [5] 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.
- [6] 刘路辉, 庄劲武, 江壮贤, 等. 混合型直流真空断路器小间隙下的分断特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5991-5997.
LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Interruption Characteristics of Hybrid DC Vacuum Circuit Breakers with Small Contact Gaps[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5991-5997.
- [7] 刘顺炮, 郑建勇, 查申森, 等. 基于新型混合式断路器的 IGBT 缓冲电路研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(3): 31-34.
LIU Shunpao, ZHENG Jianyong, ZHA Shensen, et al. Research on IGBT Snubber Based on Hybrid Circuit Breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(3): 31-34.
- [8] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 18-30.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Transient Model and Operation Characteristics Researches of Hybrid DC Circuit Breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 18-30.
- [9] SCHAVEMAKER PH, VAN der Sluis L. The Arc Model Blockset[C]//Iasted International Conference Power and Energy Systems. Crete: [s. n.], 2002: 644-648.
- [10] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive Hybrid HVDC Breakers—A Key Innovation for Reliable HVDC Grids[C]//Integrating Supergrids and Microgrids International Symposium. Bologna: [s. n.], 2011: 1-9.

(责任编辑: 廖友媛)