

# 直流高速真空断路器灭弧方案的仿真研究

高银银, 陈民武, 方雨菡

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 随着直流输电技术的快速发展, 直流断路器的研制水平成为制约其发展的一个重要因素。针对直流断路器研制的的关键问题——直流高速真空断路器灭弧方案, 介绍了几种典型的直流断路器灭弧方案的工作原理。在此基础上, 结合具体实例, 对采用电流转移原理、实现灭弧进行理论与 Matlab 仿真建模。仿真结果表明, 采用电流转移原理灭弧的直流高速真空断路器具有可行性。

**关键词:** 直流断路器; 灭弧方案; 电流转移原理; Matlab 仿真

**Abstract:** With the fast development of HVDC transmission, the manufacturing ability of DC circuit breaker becomes an important factor that restricts its progress. Aiming at the essential question - arc extinction program of DC high-speed vacuum circuit breaker (HSVCB), the working principles of several typical arc extinction programs for DC circuit breaker are introduced. On this basis, combining with the example, the theory of adopting current transfer principle to extinct DC arc are analyzed and its simulation models in Matlab are established. The simulation results show that it is feasible to adopt current transfer principle to extinct the arc for DC HSVCB.

**Key words:** DC breaker; arc extinction program; current transfer principle; simulation in Matlab

中图分类号: TM561 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)03-0072-04

## 0 引言

近年来, 随着科技的进步, 作为解决高电压、大容量、长距离送电和异步联网重要手段的直流输电技术正越来越受到广泛的应用。相比交流输电, 直流输电有较好的经济效益和优越的运行特性。为了增加直流输电的灵活性、多样性, 人们希望采用多端直流输电系统, 直流断路器成为直流电力系统的“瓶颈”问题<sup>[1]</sup>。直流电流的开断不像交流电流那样可以利用交流电流的过零点, 直流断路器的主要问题就是没有可直接熄灭电弧的电流零点。因此, 直流开断最重要的问题, 是要采取有效措施让开断直流电流必须创造过零点, 使电弧电流减小到零, 以致熄灭电弧。

真空断路器起初由英国和美国进行开发, 随后日本、西德也进行开发研究, 在这些国家的配电系统中运行。国内真空断路器行业相对国外来说起步比较晚, 但是自真空开关 20 世纪 60 年代初进入电力系统以来, 已有 40 多年的历史。直流断路器的主要问题就是没有可直接熄灭电弧的电流零点。因此, 要采取有效方案使电弧电流减小到零, 以致熄灭

电弧, 对开关电器进行保护。目前对直流断路器灭弧方案的研究已引起国内外的高度重视, 欧美各国、日本的直流系统和电力部门的研究所及高等院校均设置了相关机构从事这方面的研究<sup>[2]</sup>。

## 1 直流高速断路器熄灭电弧方案

国内外采用的直流高速断路器熄灭电弧方案基本可以归纳为: 反向电压法、电流转换法、自激振荡法和电流转移原理的方法。

### 1.1 反向电压法<sup>[3-4]</sup>

由电弧方程可知, 如果电弧电压高于系统电压时, 电弧就可以熄灭, 这就是反向电压法。这种灭弧方式一般用于早期的低压直流断路器, 靠在触头分断时灭弧室强烈的冷却作用来消除电弧能量, 使电弧电压得到提高, 从而达到熄弧的目的。在初期的电气铁道中所使用的直流高速空气断路器, 就是产生一个超过电源电压的电弧电压使其电流过零的一种装置, 它主要是通过拉长发生于断路器触头间的电弧长度来提高电弧电压, 以此把电流限制到零。

但这种切断原理上说不可避免地存在着触头与灭弧栅的损耗, 而为了维持其可靠性, 则需要频繁地

进行维护与检查。此外,由于需要大的电弧间隙和飞弧距离而难于小型化。

### 1.2 电流转换法<sup>[5]</sup>

在一般的使用场合,大部分系统残余能量是靠将电流转换至电阻或电容器中耗散的,少部分能量则借助燃弧来耗散。为了切断直流电弧,在直流断路器的发展过程中,出现了一类分段限流式直流断路器,它是先对直流进行限流,然后开断。即在发生故障时,利用各种手段来实现限流,比如在线路中串联一定量的电感,或在分断时在电路中串有一定量的电阻来限流。但其动作时间长,开断电流小。

### 1.3 自激振荡法<sup>[6]</sup>

自激振荡法由L-C电路及电弧本身组成的振荡回路的高频振荡电流来建立电流零点。这种振荡主要取决于电弧的安秒特性。此时,电弧电压随着电流的增加而减小,即电弧的负阻特性。油、空气或SF<sub>6</sub>均可选作灭弧介质,而且交流开断技术也较适用于此方法。但是必须对灭弧室加以改进,使之减小并联电容。近几年来,在国内外出现了利用自激振荡原理灭弧的直流断路器,这种断路器是用在备有金属回路的传输线路中,称之为金属返回转换断路器MRTB(metallic return transfer breaker)。例如在日本建设的Kii-Channel HVDC Link中,就配备了此种断路器,在中国的一些直流输电工程中也有类似的应用。但此类高压断路器的分断能力不是很高,而且价格也比较昂贵。因此在实际应用中受到很大的限制。

### 1.4 电流转移法<sup>[4,7-14]</sup>

电流转移法就是利用预充电的电容器通过电感放电产生一个高频反向电流,叠加在直流断路器上,从而达到建立电流零点的目的。

电流转移原理是近年来较受关注的一种灭弧方式,它主要用来开断大电流且成功率较高。

## 2 仿真分析

由图1中所示,结合某船用直流系统保护断路器对图2系统发生短路时电路进行仿真分析。

其技术指标和参数如下。<sup>[11]</sup>

额定工作电压: DC 1 500 V;

额定工作电流: 4 000 A;

最大预期短路电流: 60 kA;

最大短路电流上升率: 3 000 A/ms;

限流系数: ≤0.35。

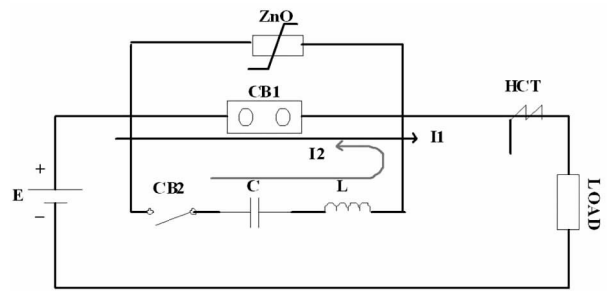


图1 电流转移原理图

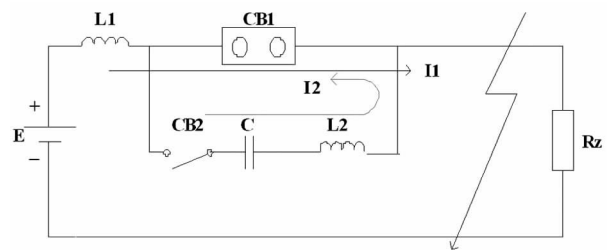


图2 系统发生短路示意图

图2为直流工作系统发生短路的示意图,此时主断路器CB1已接到命令开始分闸,产生电弧,并且触头分开到一定的开距,系统中的短路电流快速上升。控制系统同时发出指令闭合CB2,引入转移电流,促使CB1中电流过零,并且在某时刻熄灭电弧。针对以上各阶段,用等效电路做如下分析。

(1)  $t=0$ 时,系统发生短路故障,此时其等效电路如图3所示,属于一阶全响应电路。

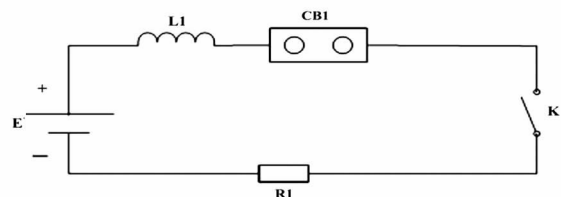


图3 发生短路时刻等效电路图

$$i_1 = \frac{U}{R_1} + \left( \frac{U}{R_2} - \frac{U}{R_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

$$\tau = L/R \quad (2)$$

$$U_{L1} = L_1 \frac{di_1}{dt} = -R_1 U \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

当短路发生1 ms后,故障电流的表达式为

$$i(t) = 60\,000 - 56\,000 e^{-55.1t} \quad (4)$$

其短路波形仿真图如图4所示。

(2) 在  $t=t_1$  时刻,断路器CB2闭合,引入转移电流,此时等效电路如图5所示。

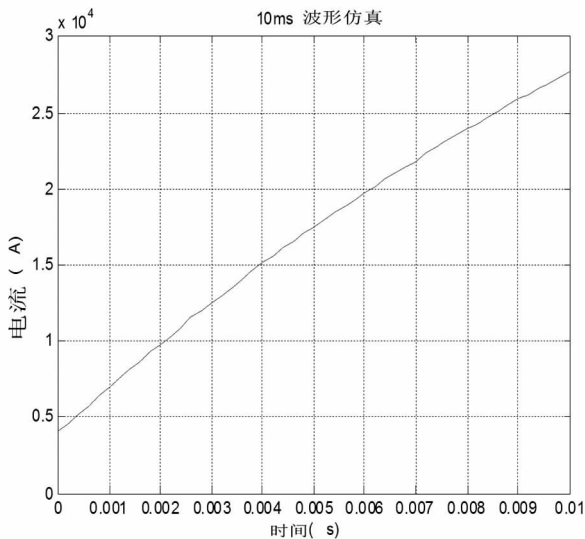


图4 直流系统短路波形仿真图

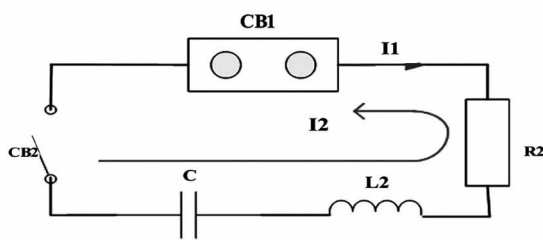


图5 转移电流投入时刻等效图

在  $t_1$  时刻, 设短路电流上升至  $I_2$  时, 闭合 CB2, 此时电路属于二阶零输入响应。

$$\begin{cases} U_c = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} & (5) \\ i_2 = C \frac{dU_c}{dt} & (6) \end{cases}$$

$$\therefore L_2 C \frac{d^2 U_c}{dt^2} + R_2 C \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0 \quad (7)$$

解上面二阶常系数奇次线性微分方程, 由于  $R_2 < 2\sqrt{\frac{L_2}{C}}$ , 所以此二阶零输入问题的解是一种欠阻尼衰减振荡情况。

$$r_{1,2} = -\frac{R_2}{2L_2} \pm i \sqrt{\frac{1}{L_2 C} - \frac{R_2^2}{4L_2^2}} = \alpha \pm i\beta \quad (8)$$

$$U_c = k \cdot e^{\alpha t} \cdot \sin(\beta t + \varphi) \quad (9)$$

$$U_c(0) = k \cdot \sin\varphi = -U \quad (10)$$

又

$$i_L = i_C = C \frac{dU_c}{dt} \quad (11)$$

$$i_L(t_1) = I_2 \quad (12)$$

得

$$k = \frac{\omega_0 U_0}{\omega} \quad \beta = \arctan \frac{-\alpha}{\omega} \quad (13)$$

$$U_{L2} = L_2 \frac{di_L}{dt} \quad (14)$$

此时通过主断路器 CB1 中的电流为

$$I = i_1 + i_2 = \frac{U}{R_1} + \left(\frac{U}{R_2} - \frac{U}{R_1}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} \frac{U_0}{\omega L_2} e^{\alpha(t-t_1)} \sin\omega(t-t_1) \quad (15)$$

$$t \geq t_1$$

当短路发生到一定时刻, 见图4所示, 在6ms左右引入转移电流, 此时在转移回路当中形成振荡, 可得流过CB2的电流波形如图6所示。

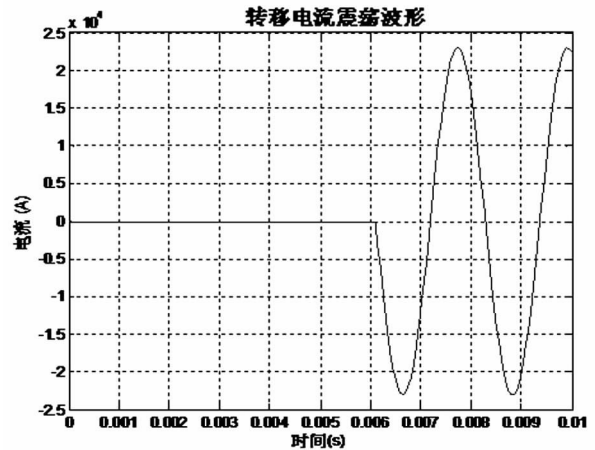


图6 转移电流振荡波形

由图6中可见, 转移振荡电流在第一波峰处超过20kA, 在此时刻, 它与直流系统短路上升电流反向相叠加, 就可以迫使电流过零, 仿真如图7所示。

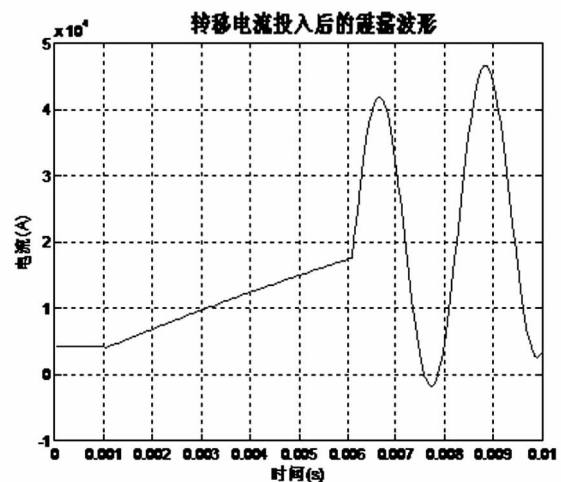


图7 转移电流投入后的振荡波形

(3) 在  $t = t_2$  时刻, 断路器 CB1 熄灭电弧, 将转移回路串入系统中, 此时等效电路如图8所示。

根据磁链守恒原理, 电路中全部电感的总磁链保持不变。

$$\Sigma\psi(0_+) = \Sigma\psi(0_-) \quad (16)$$

$$\text{即 } L_1 i_{L1}(0_+) + L_2 i_{L2}(0_+) = L_1 i_{L1}(0_-) + L_2 i_{L2}(0_-) \quad (17)$$

且换路后  $i_{L1}(0_+) = i_{L2}(0_+) = i(0_+)$  (18)

所以  $i(0_+) = \frac{1}{L_1 + L_2} [L_1 i_{L1}(0_-) + L_2 i_{L2}(0_-)]$  (19)

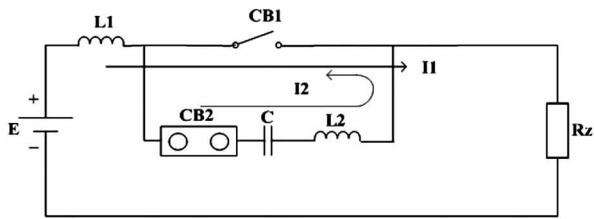


图8 电弧熄灭后系统等效原理图

此时线路中电感值对弧后电流的影响如图9所示。

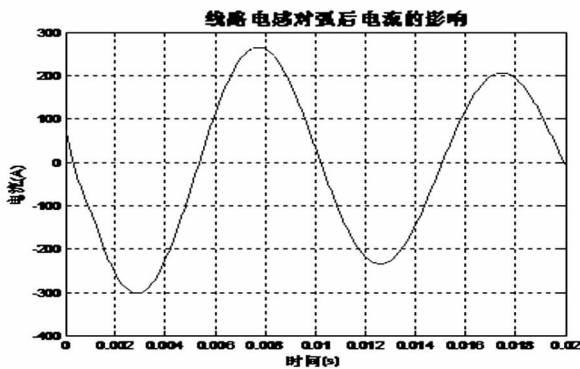


图9 线路中电感值对弧后电流的影响

为了减小振荡电流对断路器的影响,必须采取措施,采用氧化锌避雷器来消除电感中的能量<sup>[15-17]</sup>如图1所示,进一步切断电路中的剩余电流等。

### 3 讨论

在实际的直流系统中,线路的电感值是很大的,可能会高达毫亨量级。这样可能是一个幅值较大的交流电流,这对系统来说也是一个较大的威胁。

所以说在电路开断后,电路中大振荡电流及很长的振荡时间,对系统来说也是不能接受的。

### 4 结论

通过介绍几种典型直流断路器灭弧方案的原理,主要对选用电流转移电路及转移原理进行分析与仿真研究,对其分断故障电流的3个阶段分别进行理论分析与Matlab建模仿真。结合具体船用直流系统,仿真分析得出采用电流转移灭弧方案的直流高速真空断路器可成功地实现故障电流的分断,

随着中国电力工业发展,在实际应用中具有可行性。

#### 参考文献

- [1] 董恩源. 基于电子操动的快速直流断路器的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [2] 繆云青. 基于开关电源的地铁杂散电流自动检测和动态补偿装置[D]. 北京: 首都师范大学, 2006.
- [3] 董恩源, 丛吉远, 邹积岩, 等. 1500V船用新型直流断路器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 153-156.
- [4] 乌尔曼. 直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [5] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [6] Lee A, Slade PG, Yoon KH, et al. The Development of a HVDC SF<sub>6</sub> Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(10): 2721-2729.
- [7] Sakai M, Kato Y, Tokuyama S, et al. Development and Field Application of Metallic Return Protecting Breaker for HVDC Transmission[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 100(12): 4860-4868.
- [8] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] 阿津莱加. 高压直流输电[M]. 重庆: 重庆交通大学出版社, 1987.
- [10] DagAndersson, Anders Henriksson. Passive and Active DC Breakers in the Three-Gorges-Changzhou HVDC Project[C]. Icps 2001 Conference, Wuhan, China, 2001.
- [11] Tokuyama S, Arimatsu K, Yoshioka Y, et al. Development and Interrupting Test on 250kV/8kA HVDC Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. on power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2453-2459.
- [12] 李天和. 大功率开关装置的物理基础与工程应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [13] Greenwood A N, Barkan P, Kracht W C. HVDC Vacuum Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1972(92): 1575-1588.
- [14] Darwish HA, Izzularab MA, Elkalashy NI. Real-time Testing of HVDC Circuit Breakers Part I: Bench Test Development[C]. ICEEC'04, Cairo, Egypt 2004.
- [15] Krause Ch et al. Testing of Mo-surge Arresters for Application in HVDC System[C]. 6<sup>th</sup> ISH New Orleans-LA USA Aug. 26, 1959.
- [16] 孙业武. 金属氧化物避雷器限制10kV电容器组操作过电压的研究[J]. 中国电力, 1995(5): 45-49.
- [17] 黄艳. 氧化锌避雷器限制操作过电压研究[J]. 高压技术, 1997(3): 80-82.

(收稿日期: 2013-02-11)