

直流断路器在特高压直流输电中的应用

卢鹏,张钰声,雷磊,王辰曦
(陕西电力科学研究院,陕西 西安 710054)

摘要:介绍了直流断路器开断的技术难点以及高压直流工程中使用的直流断路器的工作原理、组成结构。针对特高压直流输电工程中双极换流站直流断路器的配置原则与运行方式的转换进行综述,展望了特高压直流断路器在工程中的应用。

关键词:直流断路器;直流开断;MRTB;转换电流

中图分类号:TM561 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-7598(2011)12-0068-04

Application of DC Circuit Breaker in UHVDC Transmission Project

LU Peng, ZHANG Yu-sheng, LEI Lei, WANG Chen-xi
(Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper introduces the working principle, composition structure of DC circuit breaker used in HVDC engineering as well as its technical difficulties in interrupting course, makes a review on the allocation principle as well as operation mode of the DC circuit breaker in bipolar converter station for UHVDC transmission project, and gives a prospect that the DC circuit breaker may be used in the UHVDC project.

Key words: DC circuit breaker; DC interrupting; MRTB; switching current

0 引言

在特高压直流输电工程中,系统的基本工作原理是通过送端换流站,将交流电转变为直流电,将直流电输送到受端换流站,再由受端换流站将直流电转变为交流电送入交流系统。在整个过程中,直流断路器是换流站中的重要电气一次设备。当系统出现故障或检修时,在不停电的情况下改变供电系统结构,保证系统正常运行^[1]。

本文对直流开断过程中的相关问题进行了分析,介绍了目前高压直流输电中采用的2种直流开断方法,综述了几种具有代表性的直流断路器以及直流开关设备配置。

1 直流断路器的工作原理与组成结构

按组成结构,可将直流断路器分为无源型和有源型2种^[2],其组成结构如图1所示。无源型直流断路器适用于转换中等幅值的直流电流,而有源型直流断路器适用于转换较大幅值的直流电流。无源辅

助电路直流断路器一般由1台SF₆断路器(断口)B,1台电容器C,1台避雷器R,以及1台电抗器L组成;有源型直流断路器在无源型直流断路器的基础上增加了1台隔离开关S₁及1台直流充电装置U_{dc}。

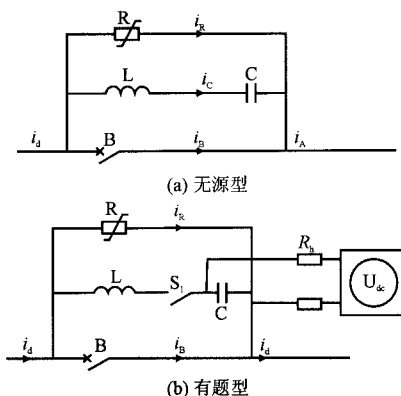


图1 直流断路器组成结构

对于无源辅助电路直流断路器来说,断路器触头分开之后,SF₆断路器与L-C支路构成的环路中的谐振电流是靠电弧激发产生的。有源辅助电路直流断路器中电容器开始时并没有和断路器连接,只是由充电器将其预充电到一定的直流电压。在断路器触头分离之后的适当时刻,合上隔离开关S₁,预充

过电的电容器跨接到断路器上, 激发起振荡电流, 实现断路器断口电流过零, 断口间电弧熄灭。对于无源及有源辅助电路直流断路器来说, 当断口间电弧熄灭之后两者的工作原理完全一样。对于无源型和有源型直流断路器, 在SF₆断路器的电弧熄灭前, 振荡电流频率很高, 可达数千赫兹, 电流峰值的时间很短。

2 直流断路器的开断

2.1 直流开断的技术难点

(1) 无过零点。在交流系统中的断路器, 主要是应用交流电流在每个周期内的 2 个电流零点来熄灭电弧, 在这一瞬间弧隙介质的介电强度也得到很好恢复, 为灭弧创造了很好的条件。由于直流电流总是定值, 没有电流零点, 故直流电弧的熄灭要借助于交流电流过零这一特性实现^[3]。

(2) 释放巨大能量。故障时直流等值电路如图 2 所示。

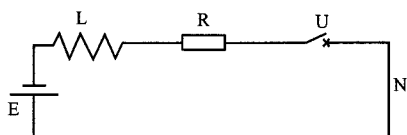


图 2 直流电路断路等值电路

弧隙回路的电压平衡方程为

$$L \frac{di}{dt} = E - iR - U_{arc} \quad (1)$$

式中: $L \frac{di}{dt}$ 为自感产生的感应电势; R 为回路电阻; E 为电源直流电势; U_{arc} 为弧熄电压。

由式(1)可得短路过程中电流电压变化状况为:

$$\begin{aligned} A &= \int_0^a U_{arc} idt = \int_0^a (E - iR - L \frac{di}{dt}) idt \\ &= -L \int_0^a idt + \int_0^a (E - iR) idt = A_1 + A_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: t_1 为触点开断时刻; A_1 为触点断开瞬间储存于回路中的磁场能量; A_2 为燃弧期间由电源向开关供给的能量。

上述能量的表达式由 2 部分组成, 第一部分 A_1 依赖于电网电压、时间常数 T 和 t_1 (触点开断时刻), 且线路越长, L 越大, A_1 越大 (1H 4 000A 的平波电抗器储能约在 8MJ); 第二部分 A_2 取决于电流降低的速度及开关特性, 电流减小越快, 燃弧时间就越短, A_2 越小。理论上 A_2 可趋于零。由于 A_1 的存在, 直流回路切断过程如何吸收所释放的巨大的能量成了直流电路断开的另一个技术难点^[4]。

(3) 产生的过电压。由于直流系统存在许多电容电感元件, 如平波电抗器、滤波装置、过电压波吸收电容器以及导线的线间电容和对地电容等。当系统进行操作时或发生故障时, 由于系统参数和工作条件的改变, 会引起电容和电感间电磁能量转换 (振荡), 引起内部过电压^[5]。

2.2 在高压直流工程中采用的直流开断方案

在高压直流系统中由于电感的存在, 系统里储存了大量的能量, 需要采取有效手段来耗散这些能量。同时需要抑制过电压, 保证间隙完成介质恢复和保护系统设备免受损坏。目前, 在高压直流系统中采用“迭加振荡电流法”进行直流开断。下面介绍已经在高压直流输电中得到应用的 2 种形式。

2.2.1 自激振荡

自激振荡是利用电弧的负电阻特性和不稳定性, 在与开断弧间隙并联的电容、电感串联回路中产生递增的自激振荡, 使在电弧间隙的开断直流电流上迭加增幅的振荡流, 利用电流过零时开断电路。其原理电路如图 3 所示, i 为被开断的直流电流, i_a 为断路器电弧电流, L 、 C 、 R 分别表示转移回路的电感、电容和电阻, ZnO 表示氧化锌吸能元件。

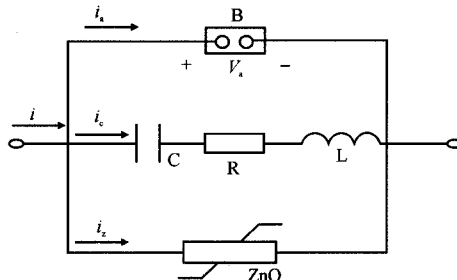


图 3 自激振荡型直流断路器原理

电容 C 和电感 L 串联组成的换流电路并联到断路器上, 当断路器触头分开后, 由电弧电压向电容 C 充电。由于电弧的不稳定性, 电弧电压产生波动, 使电容器 C 和电弧之间有 1 个充放电的过程, 产生充放电电流, 电弧的负阻特性使这一电流 i_a 的振荡不断增加, 当电流的振幅等于所开断的电流时, 在断路器触头之间产生电流过零点。电弧电流过零后, 断路器触头之间开始介质恢复阶段, 这时直流系统仍储存着巨大的能量, 这部分能量将变成电容器 C 上的恢复电压, 只有当断路器具有较快的介质恢复速度才不至于发生重燃现象。当恢复电压上升到并联的非线性电阻氧化锌吸能装置的额定电压时, 吸能装置导通, 吸收掉这部分能量, 使系统电流下降到零, 至此完成 1 个直流开断过程。自激振荡开断过程中的电压电流波形如图 4 所示。

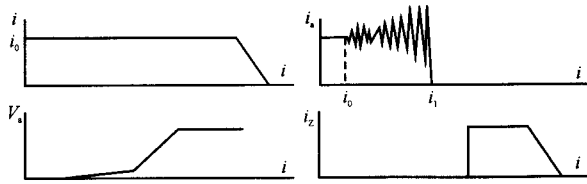


图4 自激振荡开断过程中的电流电压波形

由图4可以看出这种方式的直流断路器开断过程可划分为3个阶段:第1阶段是强迫电流过零阶段,第2阶段是介质恢复阶段,第3阶段是能量吸收阶段。与交流断路器不同的是断路器的介质恢复特性是高频介质的恢复特性。

自激型的高压直流断路器无需辅助设备和控制系统,简单可靠。

2.2.2 它激振荡

它激振荡的并联辅助回路与自激型相似,然而回路中的电容C有1个预充电过程,如图5所示。

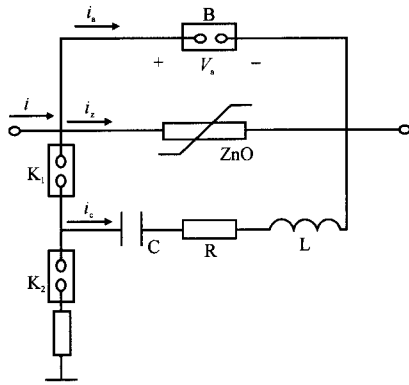


图5 它激振荡原理

断路器处于合闸位置时,先用充电装置将电容C预充电到一定的电压。等到断路器得到跳闸命令,触头开始分开时,开关K合上,并联回路投入使用。电容放电产生的反向电流与通过断路器的正向电流叠加,得到1个变化电流。当断路器的开距达到额定开距时,变化电流到达电流零点时熄灭电弧,从而开断电流。它激振荡开断过程中的电压电流波形如图6所示。

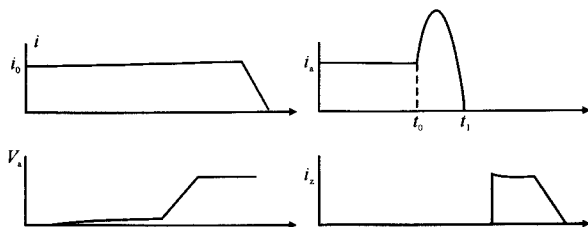


图6 它激振荡开断过程中的电流电压波形

由于并联电路投入后在短时间内产生变换电流并到达电流零点,此时断路器触头很可能未达到

额定开距。在前几个电流零点处没有办法熄弧,触头达到额定开距后,电流过零,将电弧熄灭,达到截流目的。由上分析得知,它激振荡型并联回路直流断路器是利用并联回路中的电容电感元件使得流过断路器触头的电流产生振幅增加的振荡,并且在电弧电流到达零点的时候开断电流,其截流时间和效果取决于直流电流的大小以及并联回路的性能。

因此它激振荡型并联回路直流断路器对于截断电流以及并联回路元件值都有一定的要求。它激振荡型并联回路直流断路器是利用充电电容电压直接迫使流过断路器触头的电流为零,其开断能力比自激振荡型并联回路断路器高,然而其充电回路较为复杂,相对来说成本较高。

因此针对4 kV及以下的直流电流,多采用自激振荡型并联回路,而针对4 kV以上的电流,采用它激振荡型并联回路。

3 特高压直流开关设备配置原则

双极系统接线方式是特高压直流输电工程中采用的接线方式。可根据实际情况,通过金属回路转换断路器(MRTB)、大地回路转换断路器(GRTS)、中性母线断路器(NBS)、双极运行中性线临时接地开关(NBGS)及各种直流隔离开关操作完成双极运行方式、单极大地回路方式、单极金属回路方式和双极线并联大地回路运行方式接线的转换。直流开关设备的操作同时确保了直流运行故障的保护切除、检修的隔离等,提高了系统运行的灵活性和可用率。特高压换流站主接线与直流开关设备配置图见图7。

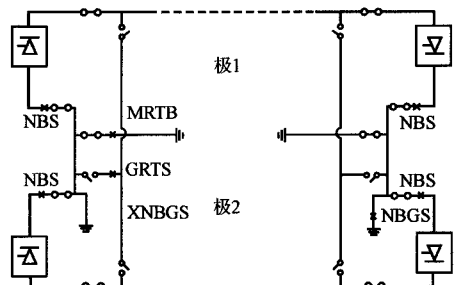


图7 特高压换流站主接线与直流开关设备配置

(1) 金属回线转换断路器(MRTB)

MRTB装设于接地极线回路中,用以将直流电流从单极大地回线转换到单级金属回线,以保证转换过程中不中断直流功率的输送。如果允许暂时中断直流功率的输送,则可不装设MRTB。MRTB必须

与 GRTS 联合使用。

GRTS 合闸之后 MRTB 动作,建立 2 个并联的回路,直流电流被分流,到达稳态之后,MRTB 动作进行电流转换操作,转换成功之后,和 MRTB 串联的隔离开关将断开,以确保 MRTB 不承受持续的电压。

(2)大地回线转换开关(GRTS)

GRTS 装设在接地极线与极线之间。它是用于在不停运情况下,将直流电流从单极金属回线转换至单极大地回线。

在 GRTS 动作之前,MRTB 先合闸,建立大地回路和金属回路 2 个并联的回路,直流电流被分流,到达稳态之后,GRTS 动作进行电流转换操作,转换成功之后,和 GRTS 串联的隔离开关将断开,以确保 GRTS 不承受持续的电压。

(3)中性母线断路器(NBS)

当单极计划停运时,换流器在没有投旁通对的情况下闭锁,换流器将使该极直流电流为零,NBS 在无电流情况下分闸。这也是当换流器内发生除了接地故障以外的故障时,利用 NBS 进行隔离的正常程序。当正常双极运行时,如果 1 个极的内部出现接地故障,故障极带投旁通对闭锁,则利用 NBS 将正常极注入接地故障点的直流电流转换至接地线路。

对于 NBS,最苛工况是平波电抗器的线路侧对地故障,换流器投旁通对,此时需 NBS 动作,将故障回路电流转换到健全极回路中。

(4)双极运行中性线临时接地开关(NBGS)

NBGS 装设于中性线与换流站接地网之间。当接地极线路断开时,不平衡电流将使中性母线电压升高,为了防止双极闭锁,提高高压直流输电系统的稳定性,利用 NBGS 的合闸来建立中性母线与大地的连接,以保持双极继续运行,从而提高了高压直流输电系统的可用率。当接地引线由于故障断开时,中性母线电压将不可控,此时 NBGS 合闸将系统转为站内接地,将中性母线电压重新稳定在零电位。当接地引线重新正常运行后,NBGS 打开,将电流转换到接地引线回路中。另外,当 NBS 无法进行转换时,NBGS 也可以提供临时接地通路,以减少 NBS 的转换电流。NBGS 还有另一个作用,当 NBS 转换失败时,NBGS 合闸提供临时站内接地。

4 大地和金属回路的转换过程

(1)大地转金属回路(极 1)

首先合 MRTB 及其两侧刀闸,之后断开与 MRTB 并联的刀闸,再合 GRTS 及其两侧刀闸和至极 2 的刀闸,形成单极大地与金属回路并联运行。最后断开 MRTB 完成转换。

(2)金属转大地回路(极 1)

首先合 MRTB 及其两侧刀闸,之后合与 MRTB 并联的刀闸,形成单极大地与金属回路并联运行。再断开 GRTS 及其两侧刀闸和至极 2 的刀闸,最后断开 MRTB 及其两侧刀闸完成转换。

5 结语

随着我国特高压直流输电工程的建设与发展,直流断路器的开发与研制也得到了长足进步,保证了特高压直流输电的稳定运行。现今我国特高压直流输电方式采用双端网络,存在着传输方式的单一性。如果有适用的特高压直流断路器,不仅能够建立直流多站系统,还可以建立直流系统之间的联络,使直流系统具有灵活的运行方式和可靠的调节手段。因此,直流断路器是解决系统联网、提高可靠性和可控性的重要途径。

参考文献

- [1] 赵婉君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 刘振亚.特高压直流电气设备[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [3] 吉嘉琴,张力超,张节容.高压直流断路器的研制现状[J].高压电器,1989,(6):54.
- [4] 李宾宾,荀锐锋,张万荣. ± 800 kV 特高压直流输电系统用直流断路器研究[J].电力设备,2007,8(3):8-11.
- [5] 孙舒捷,邵能灵,薄志谦.高压直流输电工程中的直流断路器设计及应用仿真[J].华东电力,2009,37(3):412-417.
- [6] 王新,宋元锋,王明,等.陕西电网直流输电关键技术框架设置论证[J].陕西电力,2010,38(12):42-45.

(责任编辑 张健)

收稿日期:2011-11-30

作者简介:卢鹏(1985—),男,陕西西安人,助理工程师,从事高电压试验方面的工作。