

# 直流开断与直流断路器

郑占锋, 邹积岩, 董恩源, 段雄英

(大连理工大学电气工程系, 辽宁 大连 116024)

DC Interruption and DC Circuit Breaker

ZHENG Zhan-feng, ZOU Ji-yan, DONG En-yuan, DUAN Xiong-ying

(Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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。对直流断路器研制的关键问题——直流开断进行了分析, 综述了直流断路器采用的典型开断方法, 并对实际系统中比较有代表性的3种直流断路器进行了介绍。

关键词: 直流断路器; 直流开断; 电流转移原理; 直流输电; 柔性直流输电

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: With the fast development of HVDC Transmission, the manufacture ability of DC circuit breaker becomes an important factor that restricts its progress. This paper performs an analysis on the essential question——DC interruption, and summarizes most of the interrupting methods used by DC circuit breaker. Furthermore, three representative HVDC circuit breakers in the actual power system are introduced.

Key words: DC circuit breaker; DC interruption; current commutation principle; HVDC transmission; HVDC flexible

## 0 引言

1954年, 世界上第一个高压直流输电(HVDC)工程(Gotland 直流工程)在瑞典投入商业运行。50多年来, 高压直流输电以其交流输电不可替代的优点, 在远距离大功率输电、电缆输电和交流系统的非同步联络等方面得到广泛的应用。近年来, 柔性直流输电(HVDC Flexible)技术的出现, 更使直流输电延伸到了近距离小容量的输电场合<sup>[1-2]</sup>。目前, 世界上投入运行的HVDC工程有90多个, 总容量超过70 000 MW<sup>[3]</sup>。

虽然直流输电技术发展已经比较成熟, 但是相对于交流输电系统灵活、多样的联结方式, 目前世界上已运行的直流系统绝大多数仍采用两端系统, 其主要原因就是缺乏实用的高压直流断路器。随着直流输电

技术的进一步发展, 多端系统必然成为新的发展方向。而作为系统中起着控制和保护双重作用的开关电器, 直流断路器的研制具有十分重要的意义。

另一方面, 对于近年来兴起的柔性直流输电系统, 虽然有电力电子技术可直接控制和保护系统, 但作为最后的保护单元, 直流断路器也是必不可少的。

笔者对直流开断的相关问题进行了分析, 综述了目前比较成熟的直流开断方法, 并详细介绍了几种具有代表性的直流断路器。

## 1 直流开断

在交流系统中, 电流每周波有两次自然过零点, 交流断路器就是充分利用此时机熄灭电弧, 完成介质恢复。而直流系统不存在自然过零点。因此, 开断直流电路就要困难许多。下面从直流电弧的特性出发, 对它的开断参数进行分析, 找出影响开断的因素和开断直流的方法。

### 1.1 直流电弧的开断参数

直流系统的简化电路如图1所示, 有电压为U的直流电源E、电阻R、电感L及断路器CB, 稳定工作时的电流为I。



图1 直流系统的简化电路

当断开CB时, 产生电弧, 电弧压降为 $u_a$ , 电路方程为:

$$U=Ri+L\frac{di}{dt}+u_a \quad (1)$$

设直流电弧在 $t_a$ 时刻熄灭, 则燃弧时间 $t_a$ 、电弧能量A和系统过电压 $U_m$ 成为三个重要的参数<sup>[4]</sup>。

燃弧时间 $t_a$ 可由式(1)得:

$$t_a=L\int_0^I\frac{di}{u_a-(U-Ri)} \quad (2)$$

收稿日期: 2006-03-09

作者简介: 郑占锋(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流输电设备。

由式(2)可知, 电流 I 越大, 线路中的电感 L 越大, 燃弧时间  $t_a$  越长。电弧电压  $u_a$  越大, 则  $t_a$  越短。所以, 可以通过提高电弧的电压来缩短燃弧时间。

电弧能量 A 可通过电弧的瞬时功率(电弧瞬时电流和电弧瞬时电压的乘积)对燃弧时间积分来求得:

$$A = \int_0^a (U_i - R_i^2) dt + \frac{1}{2} LI^2 \quad (3)$$

由式(3)可知, 电弧能量由两部分组成: 一部分是在燃弧时间  $t_a$  内由电源供给的能量, 它等于电源在  $t_a$  内提供的总能量减去电阻上的损耗; 另一部分是开断前, 电路中的电感存储的能量, 它要在燃弧过程中全部从电弧中释放出来<sup>[5]</sup>。因此, 开断直流电路时, 电路的构成也需要认真考虑。

开断直流电路的过程是将某一恒定电流强迫过零的过程, 通常希望燃弧时间越短越好。但燃弧时间太短, 电感中将产生很大的自感电势。该电势与电源电压叠加后, 使弧隙两端和线路上的电气设备承受过电压<sup>[5]</sup>。

由式(1)可得自感电势 U 为:

$$U = -L \frac{di}{dt} = u_a - (U - Ri) \quad (4)$$

显然, 电路电感越大, 电流下降越快, 过电压值越大。所以, 开断过程要综合考虑燃弧时间和系统过电压。

### 1.2 直流开断方法

直流开断的首要任务是熄灭电弧。其次, 由于直流系统中电感的存在, 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, 依据各种机理的直流开断方法很多, 已经有几个实际应用或实验效果良好的方法:

#### (1) 增大电弧电压法<sup>[6-8]</sup>

由图 1 可知, 电弧熄灭需要满足  $di/dt < 0$ , 物理意义是随着时间的推移, 电弧电流不断减小, 直到熄灭。把它带入式(1), 可得电弧熄灭条件:

$$u_a > U - Ri \quad (5)$$

提高电弧电压可用拉长电弧的方法解决。比如利用液体灭弧介质或磁吹的方式, 把电弧压入或引入栅片达到拉长电弧的目的。应用这种原理的直流断路器, 额定电压一般不高 (<3 000 V), 主要应用在地铁、船电等领域。

#### (2) 分段串接入限流电阻法<sup>[8]</sup>

其原理见图 2(a), 有多对串联的触头, 除了最后一对触头并联 R, C 元件外, 其他各对都与电阻并联。

当要断开直流电流时, 各对触头  $M_1 \sim M_4$  依次断开, 串入的电阻逐步增大, 相应得使直流电流逐步减小, 见图 2(b)。最后, 电流小到可以用最后一对触头断开。由于电流是逐步减小的, 所以这种断路器在

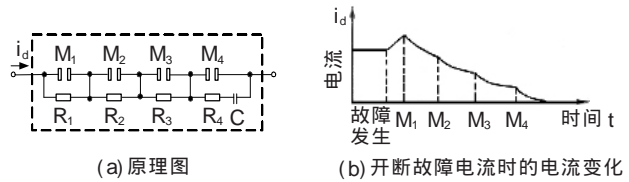


图 2 分段串入电阻的直流断路器

切断直流电路时, 基本不会引起过电压。

#### (3) 磁场控制气体放电管断流法<sup>[8-10]</sup>

该断路器利用的原理是巴申定律, 见图 3(a)。其主要元件是磁场控制的低气压放电管。

放电管外部控制磁场和它的两极之间的电场正交。当有磁场作用时, 放电管中电子和离子从一个电极移动到另一个电极的实际距离 d 增大; 当乘积  $P \times d$  超过一定值时, 则放电电压下降到曲线的底部, 放电管两极之间放电而导通。当要断开电流时, 除去外部磁场, 使乘积  $P \times d$  减小, 提高了放电管的放电电压, 从而断开。

断路器电路结构见图 3(b),  $T_1, T_2$  是磁场控制放电管; ID 是一个能快速断开的开关, 起导通正常运行电流的作用; 非线性电阻 R 和电容  $C_1, C_2$  均起耗散和吸收能量的作用。

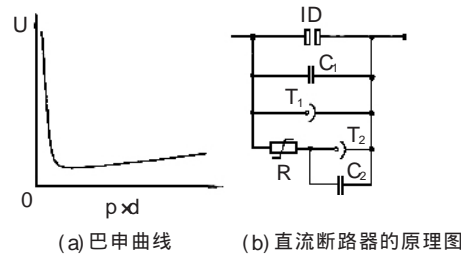


图 3 使用磁场控制放电管的直流断路器

当断路器接到分闸指令后, ID 先断开。弧压使电流向  $T_1$  中转移,  $C_1$  充电以抑制  $T_1$  的电压上升率。当 ID 熄弧后,  $T_1$  继续导通一段时间来使 ID 完成介质恢复。然后去除  $T_1$  的磁场, 使其断开。电流转移到电阻 R 和  $T_2$  中。R 的插入, 耗散掉输电线路中所贮存的大部分能量, 并实现限流。最后,  $T_2$  断开, 电流移至  $C_2$  中, 使它充电至系统电压, 并吸收残余的线路能量, 最终完成线路的开断。

#### (4) 迭加振荡电流法<sup>[9, 12-23]</sup>

迭加振荡电流法就是通过直流电流上迭加一个振幅逐渐增大的振荡电流来制造一个“人工电流零点”, 直流断路器利用此时机熄灭电弧, 完成电路开断。振荡电流的产生是利用了电弧的负阻特性<sup>[17]</sup>。如图 4 所示, 曲线 1 为电弧的静态伏安特性, 3 为有振荡电流的电弧工作特性曲线, 曲线 1 与曲线 2 交点为起振时刻的电弧电压和电流。

当电弧电流大到一定程度后, 电弧的静态伏安特性曲线下降趋于平缓 ( $dU/dI \rightarrow 0$ )。此时, 电弧负阻特性就变得不很明显, 不能保证振荡电流稳定振荡

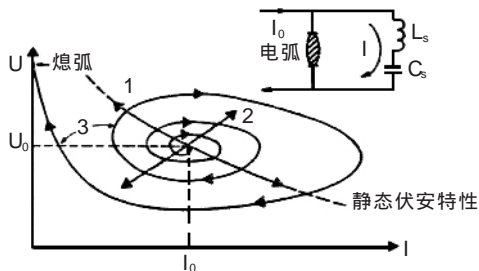


图4 电弧电路不稳定性的物理描述

到可产生零点的幅值。所以, 该类断路器的开断电流能力有一定的限制。

采用迭加振荡电流法的直流断路器原理见图5, 由电容C和电感L串联组成的换流电路并联到断路器上, 用以产生振荡电流。并联的非线性电阻ZnO避雷器用来抑制过电压和耗散系统的能量。产生振荡电流需要电弧具有较好负阻特性, 所以断路器CB的选择很关键, 以空气开关和SF<sub>6</sub>开关为主。

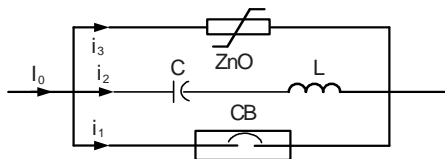


图5 采用迭加振荡电流法的直流断路器原理图

当CB闭合时,  $i_1$  等于  $I_0$ ,  $i_2, i_3$  为零。打开CB, 产生电弧。由C, L和CB组成的回路产生一增幅的振荡电流。经过大约几个到几十个ms(与开断的电压U和电流I, 换流电容C和电感L的值有关), 振荡电流与CB中原电流迭加产生零点, CB断口电弧熄灭。所有的电流流入LC回路, 恢复电压开始极速上升。当达到ZnO阈值电压, ZnO导通, 抑制电压继续升高, 并耗散掉大量的能量。最后, 系统能量耗散完毕, ZnO截止, 电路完成开断。一般来说, 该类断路器都要串接一个隔离开关, 以实现完全的电气隔离。

应用迭加振荡电流原理的直流断路器结构简单, 容易控制, 开断能力较强, 成为目前实际应用较多的直流断路器。

#### (5) 电流转移法<sup>[7-8, 11-13, 23-27]</sup>

电流转移法是用一预充电电容放电来产生一个与系统电流方向相反的电流来制造“人工电流零点”, 为熄灭电弧提供机会。

如图6所示, 该类断路器由主体开关CB, 电容C、电感L及开关S<sub>1</sub>串联而成的换流回路, 能量耗散装置ZnO避雷器, 电容充电的辅助设备四大部分组成。工作时, 电容预充了电, 所以换流回路需要通过S<sub>1</sub>连接到主开关上。由于CB的最佳燃弧时间和最短开距的存在, 换流回路投入时间的精度要求较高。所以S<sub>1</sub>一般选用导通时间短的开关, 如火花间隙(SG)、真空触发开关(TVS)等。为电容充电的直流源应能够较快完成电容的充电, 以使断路器在短时间

间隔内有完成多步操作循环的能力。

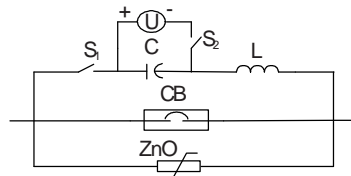


图6 应用电流转移原理的直流断路器

当断路器收到分闸命令后, CB打开。同时闭合S<sub>1</sub>, 将预充电的电容投入到回路中。电容放电产生的反向电流与CB中电弧电流迭加振荡, 当CB的开距达到额定开距, 振荡电流产生零点时, 电弧熄灭。接着, ZnO避雷器因陡增的恢复电压而动作, 把系统电感中存储的能量耗散掉。若S<sub>1</sub>为SG或TVS, 其电流降低到一定程度后, 自动断开, 将换流电路与系统隔离。

从换流电路接入回路到电弧熄灭这一过程, 时间非常短。例如开断5kA的电流, 过程不到1ms<sup>[23]</sup>。这么短时间的开断, 有点类似截流, 巨大的di/dt将产生极高的瞬态恢复电压, ZnO避雷器有点力不从心。因此, 实际应用的该类断路器, 都采取一些特殊措施来抑制。比如, 主断路器CB上串接一个饱和电抗器, 或并联一个RC回路<sup>[26]</sup>。

采用电流转移原理的直流断路器, 可以开断很大的电流, 而且开断时间较短。但是, 该类断路器组件较多, 控制复杂, 可靠性受到一定影响。

## 2 直流断路器的典型应用

直流电力系统中清除故障线、开断并行线、隔离故障换流器等保证系统其它部分的正常运行是直流断路器的基本职责。直流断路器还可被用来组成串联型、并联型、网孔型和辐射型等多端直流输电系统。此外, 在两端系统中, 直流断路器还有一些特殊应用, 如金属回路保护断路器MRPB和金属回路转换断路器MRTB等<sup>[27]</sup>。

19世纪70年代初, 美国通用电气公司的专家制成了80kV/30kA的直流断路器样机并进行了实验。最终为美国麻省理工国家磁实验室研制了一台用于热核聚变实验的直流断路器。20世纪70年代后期到80年代中期, 欧洲的BBC公司和美国的西屋电气公司分别制造了用于太平洋联络线的直流断路器。它们经过了实验室的测试后, 于1984年2月在美国太平洋直流联络工程的CELILLO换流站进行了现场测试, 在开断线路、开断负载、切除故障和多端系统转换四种工况下表现良好。20世纪80年代以来, 日本在研制直流断路器方面比较活跃。东芝、日立、三菱等公司都有相关的产品问世。其中, 日立在1985年研制了250kV/8kA的直流断路器并进行了实验室测试, 值得一提的是该断路器还具有高速重合功能。20世纪90年代中期, 三菱公司设

计了 ±500kV DC GIS, 进行了一年的挂网测试, 表现良好。20 世纪 90 年代末, 东芝公司制造的 ±500 kV/3 500 kA 直流断路器被用于日本的本洲——四国直流输电工程中作金属回路转换断路器。

(1) 核聚变用强功率直流高压断路器<sup>[25-26]</sup>

美国麻省理工学院的 国家磁实验室用该断路器作聚变研究中产生高强度磁场的短路开关。这台断路器采用电流转移原理开断直流, 其结构见图 7。这里的换流开关使用动作迅速的真空点火球隙 TVG, 转移电流可以在几个微秒内建立。L<sub>4</sub> 是饱和电抗器, 用来改变电流降低的速度, 减小瞬态恢复电压。RC<sub>1</sub> 串联电路并在主断口上也是为了抑制恢复电压的上升速度。

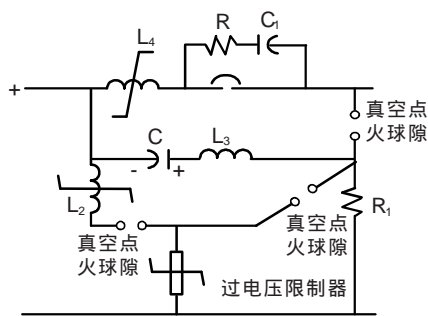


图 7 核聚变用高压直流断路器接线图

当载流为 30 kA 的时候, 线圈储能为 3 MJ。由于该断路器需要频繁动作, 所以其主断口采用标准的真空断路器, 并把三相并联连接。

(2) 基于压缩空气开关的高压直流断路器<sup>[15-16]</sup>

这台直流断路器由 BBC 公司制造, 被安装在美国太平洋直流联络工程的 CELILO 换流站。其电路结构图见图 8, 采用的直流开断方法是无源型迭加振荡电流法。它由主断口单元 CB<sub>1</sub>~CB<sub>4</sub>, 换流电路 C<sub>1</sub>L<sub>1</sub>~C<sub>4</sub>L<sub>4</sub> 和能量吸收装置 ZnO<sub>1</sub>~ZnO<sub>4</sub> 组成的四个相同结构的模块串联而成。主开断元件选用的是 BBC 公司生产的 DLF 型 550 kV 四断口压气式交流断路器。R<sub>1</sub>~R<sub>4</sub> 和 S<sub>1</sub>~S<sub>4</sub> 分别是该型断路器四个断口的预插入限流电阻和辅助开关。其中, 每个断口的预插入电阻的阻值为 400 Ω。单个 ZnO 过电压抑制器的阈值电压是 175 kV。

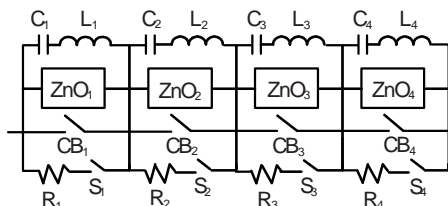


图 8 压缩空气式直流断路器电路图

其标称参数如下: 额定电压 500 kV DC; 反向电压 700 kV DC; 开断电流 2 200 A DC; 浪涌耐受水平 1 175 kV; 脉冲耐受水平 1 550 kV; 避雷器能量泄放

能力 10 MJ; 触发到换流的最长时间不超过 35 ms。

该断路器经过实验室测试后, 于 1984 年 2 月在 CELILO 换流站进行了现场测试。测试在额定电压 400 kV 下进行, 内容有线路开断、负载开断和故障切除, 电流范围为 500 A ~ 2 000 A。所有测试全部成功。后来, 这台断路器就挂在太平洋直流联络线上开断线路。

(3) 基于 SF<sub>6</sub> 开关的高压直流断路器<sup>[16-17]</sup>

东芝公司制造的这台直流断路器作为金属回线转换开关 MRTB, 被安装在日本的本州——四国直流输电工程的 Kihoku 换流站, 用来消除金属回线的接地短路故障。它应用的灭弧原理也是无源型迭加振荡电流法, 结构见图 9。它的主开断单元选用的是 SF<sub>6</sub> 气体开关。一个隔离开关被用来隔离 MRTB 和金属回线。

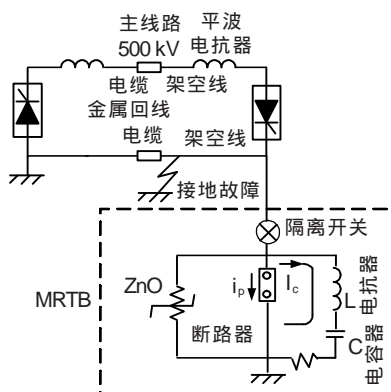


图 9 MRTB 结构与操作

当金属回线接地短路发生时, MRTB 关合。这使短路发生点入地的电流转移而通过 MRTB 流入大地, 故障点的电流减小。等故障点的电弧熄灭后, 金属回线的对地绝缘恢复, 故障切除。此时, 用 MRTB 开断直流电流, 让电流重新转回到金属回线中。最后, 隔离开关将 MRTB 与金属回线隔离。该断路器的额定开断能力达到了 500 kV/3 500 A。

### 3 结语

随着电力需求的不断增长, 我国正在大力进行电力基础设施建设。在“西电东输, 南北互连”的战略布局下, 高压直流输电以其独特的优点成为重点发展的技术。风力发电等清洁型能源的大力发展, 柔性直流输电技术也将在新能源应用中崭露头角。

制造完善实用的直流断路器, 是整个开关行业的一个技术难题。我国科技人员要加快步伐, 争取在此取得突破, 以满足国家电力工业发展的要求。

### 参考文献:

[1] Suzuki Hirokazu, Ajima Tatsuhiro. Development and Testing of Prototype Models for a High performance 300 MW Self-commuted AC/DC Convert [J]. IEEE Trans. on Power

- Delivery, 1997, 12(4): 1 589-1 597.
- [2] Lars Weimers. HVDC Light——A New Technology for a Better Environment [J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 18(8): 19-20.
- [3] Stan Green. HVDC Systems Gotland: the HVDC Pioneer [J]. Power Engineering International, 2004, 12(7): 28-29.
- [4] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 王章启, 何俊佳, 邹积岩, 等. 电力开关技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [6] 董恩源, 丛吉远, 邹积岩, 等. 1 500 V 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.
- [7] 乌尔曼. 直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [8] 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.
- [9] Courts A L, Vithayathil J J, Hingorani N G, et al. A New DC Breaker Used as Metallic Return Transfer Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 4 112-4 121.
- [10] Hofmann G A, Labarbera G L. A High Speed HVDC Circuit Breaker with Crossed-field Interrupters[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(4): 1 182-1 193.
- [11] 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): 4 860-4 868.
- [12] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [13] 阿津莱加. 高压直流输电[M]. 重庆: 重庆交通大学出版社, 1987.
- [14] 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): 2 072-2 080.
- [15] Bachmann B, Mauthe G, Ruoss E, et al. Development of a 500 kV Airblast HVDC Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2 460-2 466.
- [16] Vithayathil J J, Courts A L, Peterson W G, et al. HVDC Circuit Breaker Development and Field Tests[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(10): 2 693-2 705.
- [17] Lee A, Slade P G, Yoon K H, et al. The Development of a HVDC SF<sub>6</sub> Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(10): 2 721-2 729.
- [18] 刘国云. 葛洲坝换流站直流断路器的原理及改进[J]. 中国电力, 1995(9): 18-20.
- [19] Ito H, Hamano S, Ibuki K, et al. Instability of DC Arc in SF<sub>6</sub> Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(4): 1 508-1 513.
- [20] Hiroyuki Nakao, Yoshihiko Nakagoshi, Masayuki Hatano, et al. D C Current Interruption in HVDC SF<sub>6</sub> Gas MTRB by Means of Self-excited Oscillation Superimposition[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(4): 687-693.
- [21] Manabu Shikata, Koji Yamaji, Masayuki Hatano, et al. Development of Design of DC-GIS[J]. Electrical Engineering in Japan, 1999, 129(2): 51-61.
- [22] Hara S, Hirose M, Hatano M, et al. Fault Protection of Metallic Return Circuit of Kii Channel HVDC System[J]. AC-DC Power Transmission, 2001(11): 132-137.
- [23] Dag Andersson, Anders Henriksson. Passive and Active DC Breakers in the Three-Gorges-Changzhou HVDC Project[C]// Iqps 2001 Conference, Wuhan, China, 2001.
- [24] Tokuyama S, Arimatsu K, Yoshioka Y, et al. Development and Interrupting Test on 250 kV 8 kA HVDC Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2 453-2 459.
- [25] 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.
- [26] Greenwood A N, Barkan P, Kracht W C. HVDC Vacuum Circuit Breaker[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1972(92): 1 575-1 588.
- [27] Darwish H A, Izzularab M A, Elkalashy N I. Real-time Testing of HVDC Circuit Breakers Part I: Bench Test Development[C]// ICEEC 04, Cairo, Egypt, 2004.

(上接第 444 页)

向曲率较小, 这表明过渡平缓的触头表面对电力线有拉伸的作用, 能使电力线分布较均匀。最终得到的最优的触头结构使得电场有了合理的分布。由以上分析可知, 介绍的灭弧室内触头形状的这种优化具有实际意义。

## 4 结语

建立了 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室的 CAD 模型, 分析并计算了断路器灭弧室内的电场分布, 详细介绍了利用 ANSYS APDL 对 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室内的电场进行分析优化的方法, 对灭弧室内触头形状进行了优化设计。经过优化计算得到了灭弧室内最优的触头形状, 这不仅使各触头表面最大电场强度有不同程度的变化, 而且使整个场域的最大场强也减小了

19.76%。通过定量分析触头形状对电场分布的影响, 为 LW-110 型高压 SF<sub>6</sub> 断路器灭弧室的设计提供了有效的参考数据。

## 参考文献:

- [1] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] 盛剑霓. 电磁场数值分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [3] 王 昆, 朱 狄, 杨建明. 基于 ANSYS 分析的电铸阳极设计[J]. 航空精密制造技术, 2004, 40(6): 17-19.
- [4] 博弈创作室. APDL 参数化有限元分析技术及其应用实例[M]. 北京: 中国水利出版社, 2004.
- [5] CAO Yun-dong, LIU Xiao-ming, WHANG Er-zhi, et al. Electric Field Optimization Design of Vacuum Interrupter Based on the Tabu Search Algorithm [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2): 169-172.