# 特高压直流换流站金属回线转换开关电磁暂态特性分析

刘守豹!,侯玉成!,盛明珺!,方 圆!,童 理!,雷 潇2

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司,广西 南宁 530007;2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610094)

摘要:相比交流断路器,直流断路器的开断过程较为复杂,开展直流开关电磁暂态模拟具有重要的理论和现 实意义。以某特高压直流换流站金属回线转换开关(MRTB)避雷器爆炸事故为分析对象,采用PSCAD/ EMTDC建立仿真模型。利用 Mayr 电弧方程对直流断路器动态电阻进行模拟,将 MRTB 纳入完整的直流系统 对其暂态过程进行分析,对MRTB开断过程中避雷器能量吸收进行量化计算,确定了避雷器爆炸故障原因。 实现了对MRTB开断过程的电磁暂态仿真分析,对直流断路器的制造和运维具有重要参考价值。

关键词:特高压直流;换流站;金属回线转换开关;电磁暂态;电弧;避雷器 中图分类号:TM 721.1;TM 862

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101031

# 0 引言

在特高压直流输电系统单极运行方式下,通过 金属回线转换开关(MRTB)实现单极大地回线运行 方式转换为金属回线运行方式。由于直流电流没有 过零点,为了顺利实现断路器开断,MRTB断路器支 路与LC支路并联构成振荡回路,利用断路器开断时 出现变化的电弧电阻激发形成振荡电流,创造电流 过零点,实现断路器开断[1-6]。在断路器开断瞬间, LC支路中存储的电能在开关断口形成过电压,为了 释放这部分电能,与断路器支路、LC支路并联的还 有避雷器组<sup>[7-10]</sup>。由于需要吸收的能量较大,MRTB 避雷器组由数十支同类型直流避雷器并联构成,尽 管如此,实际运行中避雷器损坏事故仍有发生[11-16]。

开展 MRTB 电磁暂态过程的模拟是 MRTB 设 计、制造和故障分析的基础,MRTB的开断过程模拟 应完整考虑直流工程单极运行方式,重点是对断路 器开断后的电流振荡过程进行复现,难点是准确模 拟电弧电阻,核心是对转换过程中避雷器组的能量 吸收进行量化。

本文以某±800 kV 直流换流站连续2次发生的 大地回线向金属回线转换过程中MRTB避雷器爆炸 事故为分析对象,利用PSCAD / EMTDC建立直流工 程仿真模型,编写 Mavr 电弧方程模拟直流断路器动 态电阻,对MRTB开断过程进行电磁暂态仿真,量化 避雷器非均匀配置下所吸收的能量。

#### MRTB电路拓扑及其避雷器损坏事故 1

特高压直流换流站MRTB一次设备布置方式见

# 收稿日期:2020-04-15;修回日期:2020-11-30

基金项目:中国大唐集团有限公司科技项目(智能水电设备 状态评估及仿真关键技术研究及应用)

Project supported by the Science and Technology Project of China Datang Group Co., Ltd. (Research and Application of Key Technologies of Intelligent Hydropower Equipment Condition Assessment and Simulation)

附录中图A1。图A1对应的MRTB电路见图1。图  $中, i_{R}, i_{C}, i_{R}, i_{L}$ 分别为避雷器支路、LC支路、SF。断路 器支路、MRTB电路的电流。MRTB由1台SF。断路 器 $B_1$ 台电容器 $C_1$ 台避雷器R以及1台电抗器L 组成:断路器触头分开之后,断路器与LC支路构成 环路中的谐振电流通过电弧电阻激发产生。激发形 成的振荡电流振幅逐渐变大,创造断路器断口电流 过零点,断口间电弧熄灭,熄灭瞬间MRTB系统中存 储的能量通过避雷器吸收。



图1 MRTB电路图 Fig.1 Circuit diagram of MRTB

MRTB电路中LC支路的电感值为124.56 µH, 电容值为50 µF;避雷器支路中共36支避雷器并联, 其额定电压为65 kV(单支避雷器内部共4阀柱并 联,直流电流为4mA,参考电压为91kV),单支避雷 器额定吸收能量为1200 kJ,避雷器伏安特性曲线根 据产品说明书设置,如图2所示。







第一次 MRTB 避雷器事故前直流系统运行于极 II 单换流器-大地回线模式,直流电压为-400 kV,直流 电流为3kA,系统输送有功功率为1200 MW。在 MRTB动作前,金属回线已投入,流过MRTB断路器支 路的电流从3kA降低至2.376kA。在开断直流接地 极电流过程中MRTB避雷器组中的1支避雷器出现闪

络、爆炸现象,爆炸后避雷器解体情况见附录中图A2。

第二次MRTB避雷器事故前直流系统运行于极 Ⅱ 双换流器-大地回线模式,直流电压为-800 kV,直 流电流为5 kA,系统输送有功功率为4000 MW。金 属回线投入后,流过 MRTB 断路器支路的电流从 5 kA降低至4.016 kA。在开断直流接地极电流过程 中MRTB避雷器组再次出现1支避雷器爆炸,爆炸 避雷器电阻片见附录中图A3。

由于2次爆炸故障均发生在直流工程调试过程 中,不存在电阻片老化的问题。在MRTB避雷器故 障前,均开展了避雷器绝缘电阻、直流1mA参考电 压和泄漏电流测试,数据未见异常,在避雷器解体过 程中也未发现密封缺陷,排除了受潮导致爆炸的可 能。闪络发生在电阻片表面,没有发生电阻片高阻 层内部的崩溃,说明电阻片材料无质量问题。

## 2 仿真模型的建立

为了对MRTB操作过程中避雷器能量吸收问题 进行分析,应建立特高压直流换流站的电磁暂态分 析模型,尤其是对MRTB开断过程的电弧进行模拟。 本节建立Mayr电弧模型<sup>[17-20]</sup>及直流系统大地回线金 属回线转换模型。

### 2.1 Mayr 电弧模型

Mayr 电弧模型的电导方程为:

$$i = gu$$
 (1)

其中,i、u、g分别为电弧电流、电压、电导,均为时间t的函数。式(1)的微分表达式为:

$$dg/dt = \left(i^2/p(g) - g\right)/\tau(g)$$
(2)

其中,p(g)、 $\tau(g)$ 分别为电弧散热功率、电弧时间常数,其均为g的函数,且 $p(g) = ag^b \mathcal{D} \tau(g) = cg^d$ ,a、b、c、d均为时间常数,取 $a = 4 \times 10^6$ ,b = 0.68, $c = 1.5 \times 10^{-6}$ , d = 0.17。采用欧拉法求解式(2),即:

$$g(t+\Delta t) = g(t) + \left(i^2/p(g) - g(t)\right)\Delta t/\tau(g)$$
(3)

其中, Δt 为时间间隔。若采用式(3)进行计算, 将出现数值解不稳定的现象, 需将其进行变形。首先将函数 e<sup>x</sup>展开为泰勒级数, 即:

$$e^{x} = 1 + x + x^{2}/2! + x^{3}/3! + \cdots$$
 (4)  
根据式(4)的前2项可得:

$$\begin{cases} -x - 1 - e \\ x = 1 - e^{-x} \end{cases}$$
(5)

(6)

令 
$$x=\Delta t/\tau(g)$$
,代人式(5)可得:  
 $\Delta t/\tau(g)=1-e^{-\Delta t/\tau(g)}$ 

将式(6)代入式(3)可得 Mayr 电弧模型中电导 的控制方程为:

$$g(t + \Delta t) = g(t) + (i^2/p(g) - g(t))(1 - e^{-\Delta t/\tau(g)})$$
(7)

为了说明电弧电阻的动态特性,根据式(7)在 PSCAD/EMTDC中建立电弧电阻自定义模型并搭建 测试电路,如附录中图A4所示。电弧电阻于0.06s 时投入,电弧初始电阻为10°Ω。计算得到电弧电压 和电流波形如图3所示。与图3相对应的电弧动态 电阻曲线如图4所示,图4纵坐标为电阻值以10为 底的对数。由图3、4可知,电弧电阻极不稳定,当电 弧电流较大时电弧电阻很小,其数量级约为10<sup>-2</sup>~ 10<sup>-1</sup>,但在电弧电流过零瞬间电弧电阻会急剧增大, 其数量级可增加至10<sup>4</sup>。



图3 电弧电压和电流波形





图4 电弧动态电阻值随时间变化的曲线



#### 2.2 单极大地回线模型

在PSCAD中建立的直流系统计算模型,在送端换流站建立Mayr电弧模型,操作前极 I 支路换流站以双12脉动满功率运行(极 I 支路的线电压为800 kV,电流为5 kA)。为简化分析,不建立直流系统的极 II 支路换流站,如附录中图A5所示。对图A5中送端换流站的Mayr电弧模型进行细致建模,根据图A1中的接线图布置对应元件,其中避雷器组由36支避雷器并联组成,Mayr电弧模型中的电阻采用自定义模型,如附录中图A6所示。

模型总运行时间为2.3 s,其中0.4 s时直流系统 进入稳定运行,极 I 支路的直流线路和接地极线路 电流幅值为5 kA,0.6 s时极 II 支路的直流线路投入 运行,约1 s后系统再次进入稳定运行状态;1.8 s时 MRTB 断路器支路开始动作,约0.2 s后系统从单极 大地回线运行转为单极金属回线运行,以上过程中 送端换流站接地极线路电流波形见图5。图中,t<sub>1</sub>为 系统启动完成时间;t<sub>2</sub>为高压线路极 II 支路投入时 间;t<sub>3</sub>为系统再次进入稳定运行时间;t<sub>4</sub>为MRTB断路 器合闸时间;t<sub>5</sub>为大地回线转为金属回线时间。



图 5 MRTB开断过程中送端接地极线路电流波形 Fig.5 Current waveform of ground electrode during MRTB disconnection

# 3 MRTB开断过程及其暂态特性

222

本节对MRTB开断过程的暂态特性进行分析,在 MRTB开断过程中,流过MRTB断路器支路的电流 和电弧电阻波形见图6。由图6可知,断路器开断前 电流保持在-4kA,断路器开断后,电弧电阻波形出 现振荡且振幅逐渐变大,流过MRTB的电流波形也 出现振荡且振幅逐渐变大。当MRTB断路器支路的 电流出现过零点时,断路器将电流切断,流过断路器 支路的电流变为0,电弧消失,支路电阻急剧增大。





在MRTB开断过程中,图1所示3条支路的电流 波形如图7所示。由图7可知,断路器支路电流中的 直流分量为-4kA,且其波动方向与LC支路的电流 波形的波动方向相反,幅值相同,即在电弧电流未熄 灭前,流过MRTB的电流仍然为-4kA。根据图6(b) 可知,电弧出现后断路器支路出现动态电阻,激发LC





支路与断路器支路产生振荡电流,导致电弧电阻阻 值不断振荡增大,进而促进了断路器支路和LC支路 的电流振荡。

当断路器支路电弧电流过零熄灭时,LC支路的 振荡电流幅值达到最大,即整个系统中(包括接地极 线路、LC支路等)电感存储的磁场能量达到最大,电 容中存储的电场能量最小,由于电感电流不能突变, LC支路的电流通过给电容充电的方式存在。

根据图7所示避雷器支路的电流波形可知,避 雷器支路电流出现在LC回路电容充电过程的后期。 当电弧熄灭后,随着电容充电过程持续,避雷器两端 电压上升并达到动作值,避雷器开始泄流,系统能量 不再注入电容,MRTB避雷器组开始吸收能量。 MRTB避雷器支路的电压、电流波形如图8所示。由 图可知,避雷器组由导通状态恢复至高阻状态期间, 持续时间约为0.17 s。



图 8 MRTB开断时避雷器支路的电压、电流波形 Fig.8 Voltage and current waveforms of arrester when MRTB disconnecting

# 4 MRTB避雷器支路的能量吸收过程

由图 A6(b)可知,送端换流站 MRTB 避雷器支路共 36 支避雷器并联,理想情况下每支避雷器吸收能量相同,实际情况为避雷器参数并不完全相同,存在能量吸收不一致的情况。

本节对 MRTB 开断过程中避雷器的能量吸收情况进行分析,首先对避雷器参数均一情况下的避雷器能量吸收情况进行分析,接着对避雷器非均一配置情况下的能量吸收情况进行分析。为便于理解,本文对1号避雷器参数进行改变,保持2—36号避雷器参数为额定值不变,将1号、2号避雷器的计算结果进行对比,说明异常避雷器与正常避雷器在能量吸收方面的差异。

### 4.1 参数一致时避雷器的能量吸收情况

此种情况下,36支避雷器的额定电压均为理论 设计值65 kV,任意避雷器支路的电流曲线和能量吸 收曲线如图9所示。由图9可知,虽然单支避雷器通 流幅值仅为110 A,但是由于其导通时间长,其吸收 的能量达到了0.969 MJ。

### 4.2 参数不一致时避雷器的能量吸收情况

改变1号避雷器参数,以额定电压65 kV为中心,电压偏差依次为-3%、-2%、-1%、0、1%、2%、



图9 参数相同时单支避雷器电流及能量吸收波形



3%,2—36号避雷器的额定电压保持不变。可得1 号避雷器的能量吸收值依次为1934、1587、1265、 969、709、502、341 kJ,2号避雷器的能量吸收值依次 为939、949、958、969、974、979、984 kJ。分析上述结 果可知:当1号避雷器额定电压低于其他避雷器时, 其吸收能量明显高于其他避雷器;当1号避雷器额 定电压高于其他避雷器时,其吸收能量明显低于其 他避雷器;当其中某支避雷器参数明显低于其他避 雷器时,避雷器吸收能量将大于额定值1200 kJ。

图10为1号、2号避雷器的电流波形,上图和下 图中1号避雷器的电压偏差分别为-3%和3%。由 图可知,在保持其他避雷器额定电压不变的情况下, 1号避雷器额定电压的微小改变将导致其在MRTB 开断过程中的电流幅值发生很大变化。





under different rated voltages

实际情况下,36支避雷器中每支内部含有4个阀柱,则36支避雷器由144个阀柱并联构成。理论上144个阀柱的额定电压均为65kV,其吸收的能量为234.75kJ。在MRTB开断过程中,若1号避雷器的电压为63.05kV(电压偏差为-3%),则推断其内部某个阀柱的电压为63.05kV,其吸收的能量为1229.75kJ。由此出现某个阀柱吸收的能量明显大于其他阀柱的现象,导致阀片表面发热,气体热游离,绝缘击穿。

# 5 结论

(1)在MRTB断路器支路开断过程中,所形成的 不稳定电弧使系统出现振荡电流,其幅值逐渐变大, 在电流过零时刻电弧熄灭,LC回路存储的能量在避 雷器支路形成过电压并通过避雷器导通释放。

(2)由于 MRTB 避雷器支路在生产过程中工艺 控制问题,导致实际参数存在差异,对于多支路并联 工作的避雷器,一旦其中某支路动作电压明显低于 其他避雷器,将导致其吸收能量大于其耐受值,进而 发生损坏。

(3)对于多支路并联的避雷器组,传统检测单支 路避雷器参数以判断其性能的方法已难以保证避雷 器组的安全运行,应该制定新的测试标准对各支路 避雷器参数一致性进行分析。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

### 参考文献:

- [1]何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019,45(8):2353-2361.
   HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019,45(8): 2353-2361.
- [2] 沙彦超,蔡巍,胡应宏,等. 混合式高压直流断路器研究现状综述[J]. 高压电器,2019,55(9):64-70.
   SHA Yanchao, CAI Wei, HU Yinghong, et al. Review of research status of hybrid HVDC circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(9):64-70.
- [3] 赵书涛,王波,华回春,等. 基于马尔科夫模型的直流断路器可 靠性评估方法[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊1):126-132.
   ZHAO Shutao, WANG Bo, HUA Huichun, et al. Reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model[J]. Transaction of China Electrotechnical Society,2019, 34(Supplement 1):126-132.
- [4] 刘恒,程铁汉,钟建英,等. 基于耦合负压回路的高压直流断路器集成化设计[J]. 南方电网技术,2019,13(10):15-23.
   LIU Heng, CHENG Tiehan, ZHONG Jianying, et al. Integrated design of high voltage DC circuit breaker based on coupled negative voltage circuit[J]. Southern Power System Technology, 2019,13(10):15-23.
- [5]赵坚鹏,赵成勇,吕煜,等.适用于直流电网保护的高压直流断路器时序配合方法[J].电力系统自动化,2019,43(11):121-130,165.
   ZHAO Jianpeng,ZHAO Chengyong,LÜ Yu,et al. Time-sequence coordination method of high voltage DC circuit breaker of DC grid protection[J]. Automation of Electric Power System,

2019,43(11):121-130,165.
[6]田阳,朱玉,田宇,等.直流断路器模拟试验回路的设计与仿真
[J].高压电器,2020,56(2):40-46.
TIAN Yang,ZHU Yu,TIAN Yu,et al. Design and simulation of test circuits of DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(2):40-46.

- [7] 单任仲,王世友,刘闯,等.双臂架构的混合型直流断路器拓扑 结构研究[J]. 电网技术,2019,43(6):2065-2071.
   SHAN Renzhong, WANG Shiyou, LIU Chuang, et al. Research on topology structure of double-bridge hybrid DC breaker[J].
   Power System Technology,2019,43(6):2065-2071.
- [8] 韩乃峥,樊强,贾秀芳,等.一种具备限流能力的多端口直流断路器[J].中国电机工程学报,2019,39(17):5172-5181,5298.
  HAN Naizheng, FAN Qiang, JIA Xiufang, et al. A multi-port DC circuit breaker with current limiting capability [J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(17):5172-5181,5298.
- [9] 王金健, 王志新. 一种具有限流能力的新型混合式高压直流断

路器拓扑[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):143-149.

WANG Jinjian, WANG Zhixin. A novel hybrid high-voltage DC circuit breaker topology withcurrent limiting capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):143-149.

- [10] 孙银山,苟锐锋,杨晓平,等. 一种新型电感激励换流式高压直流断路器及其仿真研究[J]. 电网技术,2019,43(6):2058-2064.
   SUN Yinshan, GOU Ruifeng, YANG Xiaoping, et al. Research on a kind of high voltage DC circuit breaker based on novel inductance drive commutation and its simulation[J]. Power System Technology,2019,43(6):2058-2064.
- [11] 严俊,许建中,赵成勇. 高压直流断路器中能量吸收支路设计方法综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(14):4301-4314,4325.
   YAN Jun, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. A review of design methods for energy absorption path design in high voltage direct current circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(14):4301-4314,4325.
- [12] 胡宇洋,余珊珊. 葛南直流大地-金属回线转换实例分析[J].
   电力系统自动化,2017,41(23):150-155.
   HU Yuyang,YU Shanshan. Instance analysis of conversion be-

tween ground return and metallic return in Gezhouba-Nanqiao HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 150-155.

 [13] 袁虎强,程建登,刘文泽,等.基于电流分析的高压直流输电 MRTB并联振荡装置故障诊断方法[J].高压电器,2018,54
 (4):81-86.

YUAN Huqiang, CHENG Jiandeng, LIU Wenze, et al. Diagnosis method of HVDC MRTB parallel oscillating device fault based on the current analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(4):81-86.

- [14] 唐力,陈浪. 天广直流金属大地回线方式转换不成功原因分析 与改进建议[J]. 电工技术,2019(14):85-87.
   TANG Li, CHEN Lang. Cause analysis and improvement suggestions for unsuccessful transfer from metallic return to ground return in Tianshenqiao-Guangzhou HVDC[J]. Electric Engineering,2019(14):85-87.
- [15] 王辉,马超,郝全睿,等. 一种强制换流型混合式高压直流断路 器方案[J]. 高电压技术,2019,45(8):2425-2433.
   WANG Hui, MA Chao, HAO Quanrui, et al. Scheme of hybrid high voltage DC circuit breaker with forced current commutation[J]. High Voltage Engineering,2019,45(8):2425-2433.
- [16] 王华清,程显,葛国伟,等. 中压混合式直流断路器真空短间隙

介质恢复特性[J]. 电网技术,2020,44(1):377-384.

WANG Huaqing, CHENG Xian, GE Guowei, et al. Investigation on dielectric recovery performance of short vacuum gap in medium-voltage hybrid DC circuit breakers[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 377-384.

[17] 贾博文,武建文,刘俊堂,等. 270 V 直流开断特性研究与耗散 功率变化的 Mayr模型仿真分析[J]. 中国电机工程学报,2019, 39(5):1334-1342.

JIA Bowen, WU Jianwen, LIU Juntang, et al. Research on DC breaking characteristics of 270 V DC system and simulation analysis of the Mayr model with variable dissipation power [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5):1334-1342.

- [18] 程显,葛国伟,杨培远,等.基于真空断路器与SF<sub>6</sub>断路器串联的新型混合式高压直流断路器理论分析[J].电力自动化设备,2019,39(6):68-74.
   CHENG Xian, GE Guowei, YANG Peiyuan, et al. Theoretical analysis of novel hybrid HVDC circuit breaker based on a series of vacuum interrupter and SF<sub>6</sub> interrupters[J]. Electric
- Power Automation Equipment,2019,39(6):68-74.
  [19] 杨明波,龙毅,樊三军,等. 基于组合 Mayr 和 Cassie 电弧模型的 弧光接地故障仿真及分析[J]. 电测与仪表,2019,56(10):8-13.
  YANG Mingbo, LONG Yi, FAN Sanjun, et al. Simulation and analysis of arc grounding fault based on combined Mayr and Cassie arc models[J]. Electrical Measurement & Instrumenta-
- [20] 江润,方艳东,鲍光海,等.适用于低压串联故障电弧的 Mayr 改进模型[J].电器与能效管理技术,2019(21):14-18.
  JIANG Run, FANG Yandong, BAO Guanghai, et al. An improved Mayr model applicable to low voltage series arc faults
  [J]. Electrical & Energy Management Technology,2019(21): 14-18.

#### 作者简介:

tion, 2019, 56(10):8-13.



刘守豹(1983—),男,湖北洪湖人,高 级工程师,博士,通信作者,主要研究方向为 电力系统暂态分析与工程电磁场数值计算 (E-mail:627909585@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

# Analysis of electromagnetic transient characteristics of metallic return transfer breaker in UHVDC converter station

LIU Shoubao<sup>1</sup>, HOU Yucheng<sup>1</sup>, SHENG Mingjun<sup>1</sup>, FANG Yuan<sup>1</sup>, TONG Li<sup>1</sup>, LEI Xiao<sup>2</sup>

(1. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610094, China)

Abstract: Compared with AC circuit breaker, the breaking process of DC circuit breaker is more complex, so it has important theoretical and practical significance to carry out electromagnetic transient simulation of DC circuit breaker. The explosion accident of arrester in a UHVDC MRTB (Metallic Return Transfer Breaker) is selected as the research object, the simulation model is built by PSCAD / EMTDC. The Mayr arc equation is used to simulate the dynamic resistance of DC circuit breaker. The MRTB is integrated into a complete DC system to analyze its transient process. The energy absorption of arrester during the breaking process of MRTB is quantitatively calculated, which determines the cause of the explosion failure of the arrester. The electromagnetic transient simulation analysis of UHVDC switch breaking process is realized, which has important reference value for the manufacture, operation and maintenance of DC circuit breaker.

Key words: UHVDC; converter station; metallic return transfer breaker; electromagnetic transient; arc; arrester



图 A1 MRTB 一次设备布置示意图





图 A2 第一次爆炸的避雷器解体图

Fig.A2 Breakdown diagram of arrester for first explosion



图 A3 第二次爆炸避雷器的电阻片 Fig.A3 Resistance piece of second explosion arrester



Fig.A4 Arc characteristic test model



图 A5 单极直流系统电磁暂态仿真模型

Fig.A5 Electromagnetic transient simulation model of single pole DC system



(c)电弧模型图 A6 MRTB 电弧模型建立Fig.A6 Model building of MRTB arc