

[断路器]

直流配电网及其末端保护电器

文/桂林理工大学南宁分校 李 燕
浙江明晖智能电气有限公司 李 敏 丁国辉 张培夫

随着低碳能源、储能装置的大规模接入，电力电子技术的快速发展以及直流负荷的增长，直流配电发展前景良好。对交直流配电网进行对比，阐述了直流配电尤其是柔性直流的优势。对直流低压断路器的设计进行研究与分析。

2021年1月27日，在世界经济论坛“达沃斯议程”对话会上，中国提出加速清洁能源转型。未来5年，中国国家电网公司将年均投入超过700亿美元，推动电网向能源互联网升级，促进能源清洁低碳转型，助力实现“碳达峰、碳中和”目标。这必将推动直流配电的快速发展，本文对直流配电与交流配电进行了比较，直流配电网具有巨大的市场潜力和经济价值，交流配电也有其独特优势。同时，作为电网末端保护的直流低压断路器由于量大面广，与人民生命财产安全息息相关。对交直流配电进行了对比，对直流MCB、直流MCCB的设计进行了分析和介绍。

直流配电的优势

我国能源绿色低碳转型之路已经取得了显著成效。截至2018年底，我国电源装机中，低碳能源装机占比达40%，其中水电、风电和太阳能发电装机分别达到3.5亿kW、1.8亿kW和1.7亿kW，可再生能源装机规模和发展速度均居世界第一。这些分布式新电源一般经过整流和逆变再接入交流电网。在容量较大的场合还要经过变压器。如果直接接入直流配电网，则可以省略逆变和交流隔离环节，降低系统能量损耗，减小设备成本，控制也将得到简化。此外太阳能、风能等新能源经过逆变器接入交流电

网，将带来多逆变并联环流问题、多逆变器耦合交互引起谐波振荡问题，以及并网逆变器与电网阻抗的串联谐振问题等。接入直流配电网后，这些问题可以得到有效解决。而直流配电的损耗主要集中在电力电子变换器部分，目前已出现效率高达99%的直流变换器。而且随着宽禁带电力电子器件的逐步成熟应用，变换器的效率有望进一步提升。直流配电线路只需两根导线，当直流配电系统的一极线路发生故障时，另一极可与大地构成回路，继续配送部分甚至全部功率。对于占线故障80%~90%的单相或单极瞬时接地故障，直流比交流具有响应快、恢复时间短、可多次再启动和降压运行来创造消除故障恢复正常运行条件等优点。在直流配电系统中，没有因传递无功功率引起的网络损耗，也没有因为趋肤效应产生的损耗，具有远低于交流配电的线路损耗。另一方面，直流或含有直流环节的负载日益增多。直流配电直接为这些负载提供直流供电，效率更高。交流系统运行时需要控制电压幅值、频率以及相位，而直流系统则只需要控制电压幅值，不涉及频率稳定和无功功率等问题。由于电缆沿线电容大，配送交流电时会产生很大的电容充电电流，既增加了线路损耗，也降低了线路输电容量。此外，柔性直流输电没有无功补偿和换相失败问题，可为无源系统供电，快速控制有功和无功功率。

基金项目：广西高校中青年教师（科研）基础能力提升项目——“DC1500V直流系统两极断路器的研究”项目资助（2020KY06021）。

培育期的直流配电网与成熟期的交流配电网

1. 交直流输电电缆差异

直流输电一般采用双极中性点接地方式，直流线路仅需两根导线，三相交流线路则需三根导线，但两者输送的功率几乎相等，因此可减轻杆塔的荷重，减少线路走廊的宽度和占地面积。在输送相同功率和距离的条件下，直流架空线路的投资一般为交流架空线路投资的2/3。

2. 交直流配电系统差异

直流配电系统比交流配电系统主动控制能力更强，能提升供电质量和运行效率，其结构复杂并且投资高而故障电流清除困难，合理选择应用场景，使直流配电技术经济优势最大化。兼顾多方需求，直流电压等级、配电模式确认和电压等级序列选择是直流配电系统工程的关键。目前的评价方法缺乏系统定量评价，以定性分析为主，限制其推广应

用，要从经济性、供电质量等方面构建评价方法。

3. 交流配电网与直流配电网的投资成本

近年来，随着电力电子器件技术的发展，直流输电已朝着特高压、大容量、混合多端和远距离方向发展。各类电力电子装置的成本仍然较高，从表1可知，直流配电网的投资成本高于交流配电网。但随着经济的发展，各类负载对电能质量的要求提高，必将有越来越多的负载采用变频技术和不间断电源，以提高电能质量与电能利用效率。这将导致交流配电网中整流器配置容量的升高与直流配电网中逆变器容量的降低，此消彼长。另一方面，随着电力电子技术的迅速发展以及各类装置研发技术的逐渐成熟，功率半导体器件的价格必然继续降低，换流站、直流断路器和直流变压器等的造价也随着降低，所以直流配电网存在较大的降价空间。

表1 交流配电网与直流配电网投资成本统计表

项目	交流			直流（±7.5 kV）			直流（±15 kV）		
	单价	数量	总价/万元	单价	数量	总价/万元	单价	数量	总价/万元
变电站/换流站	300元/kW	6 MW	180	1 000元/kW	6 MW	600	1 000元/kW	6 MW	600
交/直流电缆	330元/m	2.5 km	82.5	150元/m	2.5 km	37.5	100元/m	2.5 km	25
	400元/m		100	220元/m		55	100元/m		25
	200元/m		50	100元/m		25	100元/m		25
交/直流断路器	2万元/台	3台	6	45万元/台	3台	135	70万元/台	3台	210
交/直流变压器	15万元/台	1台	15	50万元/台	1台	50	85万元/台	1台	85
整流器/逆变器	800元/kW	3 MW	240	800元/kW	2 MW	160	800元/kW	2 MW	160
总计			673.5			1 062.5			1 130

4. 直流断路器

直流断路器是提高直流配电系统的稳定性、可靠性与灵活性的重要手段，然而高压直流断路器的多数研究仍然停留在试验样机阶段，尚未实现商业化。以高压混合式直流断路器为例，假设其市场价格为研发费用的一半，则±7.5 kV及±15 kV直流断路器的价格分别为45万元/台、70万元/台。研发费用详见表2。

相对于直流断路器，交流断路器技术则要成熟得多，其价格约为2万元/台。

由此可知，交流和直流配电网各自具有优势，同时，交流配电网毕竟运行了近百年来，投入巨大，短期内无法完全被直流配电网代替。对于直流配电网来讲，由于固态和混合式的低压断路器目前还存在价格贵、功耗是机械式断路器的8~10倍、体积大（一般是机械式的1.5~2倍）、没有实现物理隔

离（固态），拓扑结构复杂及需要换流回路（混合式）等诸多问题。目前其末端保护99%以上还是采用机械式的直流低压断路器（DC MCB、DC MCCB）。而我国2019年MCB的产量是14.3亿极，正在使用的达到了600亿极，关系到家家户户的生命财产安全。

表2 直流断路器研发费用统计表

项目	所需数量		单价/万元		合计/万元	
	±7.5 kV	±15 kV	±7.5 kV	±15 kV	±7.5 kV	±15 kV
高斥力开关	1	1	40	70	40	70
LGBT	25	45	1	1	25	45
控制器	1	1	10	10	10	10
其他元器件	若干	若干	10	10	10	10
人工费	/	/	5	5	5	5
总计					90	140

直流MCB的设计原理

1. 直流熄弧的原理

交流系统中，电流每周期波形有两次自然过0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，所以在熄弧时必须强制直流燃弧电流等于0，或使电流接近于0（<10 A），才能使电弧熄灭。开断电感负载时，电弧电压和电弧电流的示波图如图1所示。

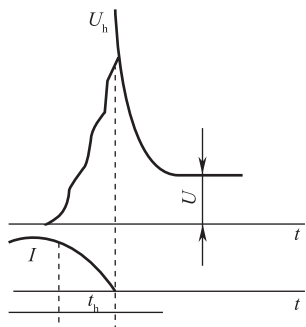


图1 开断直流电感性电路的示波图

由图1可知，电弧电流 I 在 $t=0$ 时被开断，经时间 t_h 后 I 变为0。在开断过程中电弧电压可能高于电源电压，称为过电压。可以从电弧能量角度分析产生过电压的原因。

$$E = IR + L \frac{dI}{dt} U_h \quad (1)$$

式中， E 为电源电动势； IR 为电路电阻压降（包括电源内阻压降）； $L \frac{dI}{dt}$ 为电感压降； U_h 为电弧压降。

式（1）的两边乘以 idt ，并进行积分，当 $t=0$ 、 $i=I$ 时，经过时间 t_h 后，电弧电流 I 趋近于0，则有

$$\int_0^{t_h} E idt = \int_0^{t_h} i^2 R dt + \int_0^{t_h} u_h idt + \int_1^0 L idt \quad (2)$$

移项得

$$\int_0^{t_h} u_h idt = \int_0^{t_h} (E - iR) idt + \frac{1}{2} LI^2 \quad (3)$$

式（3）等号左边为电弧能量，即灭弧过程中消耗于弧隙的能量；右边第一项为电源供给电弧的能量；右边第二项为熄弧过程开始时储存在磁场中的能量。由式（3）可知，在灭弧过程中消耗在弧隙中的能量有一部分是磁场的储能，它没有返回电源，而消耗在弧隙中，若电路电感大，则磁场储能多，由于电感中能量的泄放需要一定的时间，因而电弧不能立即熄灭，必须使能量基本上泄完后，电弧才能熄灭，此即电感性电路较电阻性电路难以熄

灭的原因。分断直流电路时，电弧熄灭的瞬间有 $i=0$ 及 $U_h=U_e$ 。式（1）表示为

$$E = L \frac{di}{dt} U_h = L \frac{di}{dt} + U_e \quad (4)$$

所以出现在触头间隙上的过电压为

$$\Delta U = U_e - E = -L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

它与电流减小的速度、灭弧强度有关。灭弧能力越强，电流减小得越快，过电压越高。其数值可达电源电压的数倍；因此，为避免太高的过电压，直流电弧不宜采用过强的灭弧措施。

2. 从直流MCB的时间常数来分析

时间常数的定义：预期直流电流上升到0.63倍最大峰值电流时的时间 $T = \frac{L}{R}$ ，单位ms。详见GB/T 10963.3《家用和类似场所用过电流保护断路器第3部分：用于直流的断路器》。由于电感限制电流具有突变的特性，以及时间常数和电路电感的正比关系，时间常数的大小间接表示了电路电感的大小，时间常数越大，电流的变化越慢，在实际应用中断路器分断短路电流越困难。大时间常数条件下起燃点必然靠前。由于电弧燃灭时刻与燃弧能量（未达到灭弧栅等灭弧装置工作区，灭弧方式为自然空气冷却灭弧）有关。同样试验电流情况下，大时间常数较小时时间常数燃弧熄灭时刻延后。大时间常数燃弧时间将会变大。

3. 从直流MCB的临界负载电流分析

临界负载电流的定义：在使用条件范围内，燃弧时间明显延长的分断电流（见GB 14048.1—2012中在基本术语中的2.5.16）。由于直流电弧受的电动力 $F=BIL$ ，电流越大，电动力越大，有利于将电弧拉向灭弧室；电流越小，电磁场力越小，不利于将电弧拉向灭弧室，当某个范围内的小电流在常规开闭时，无法熄灭电弧，且磁吹力较小，电弧运动的推动力较弱，灭弧室无法发挥作用。此时，电弧会长时间停滞并持续燃烧，使开断时间明显延长甚至开断失败。这就是临界负载电流产生的原因。

MCB的结构设计要点

交直流MCB结构参数及脱扣力见表3，目前，具体设计表现为以下方面：

1) 显著增加开距，相当于增加了弧隙，有助于克服直流临界负载电流带来的安全隐患。同时，增

加弧柱压降,从而提高电弧电压,提高断路器的限流性能。还可以克服过电压带来的降低绝缘甚至电弧重燃的隐患。

表3 交直流MCB结构参数及脱扣力

	开距/mm	超程/mm	终压力/N	脱扣力/N
AC MCB	>4.5	>1.2	5.5 ± 0.5	≤ 0.8
DC MCB	>6.5	>2	6.5 ± 0.5	≤ 0.6

2) 超程和终压力的增加,更多是从机构的快速动作来考虑,有助于提供更大的机构初始动能,拉断熔焊点,实现快速拉断电弧。

3) 脱扣力减小,也是从减小机构动作的启动时间和实际动作时间来考虑的。

4) 如图2所示,采用交叉式灭弧室,提高电弧电压和管控灭弧室在多次试验之后的短路风险。

5) 采用产气材料,依靠自动气吹技术冷却和驱动车弧,快速提高电弧电压。

6) 动静触头做成收缩跑弧道的形式,降低背后击穿的风险。

7) 对于低压断路器来说,最关键的就是短路试验、电气寿命试验和温升试验。经过这些改进,温升基本与交流MCB持平,上下浮动在2 K~3 K之间。

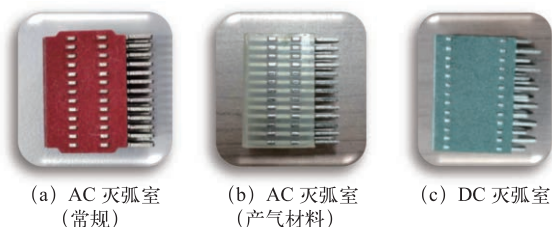


图2 典型灭弧室的对比

试验对比

1. 短路试验

短路试验对比如图3所示,短路试验数据列表见表4,波形图对比如图4所示。

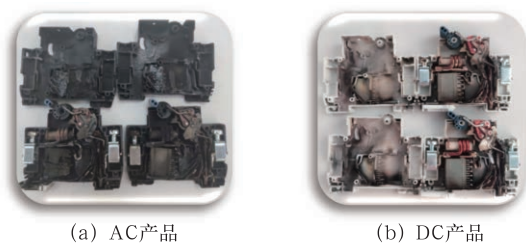
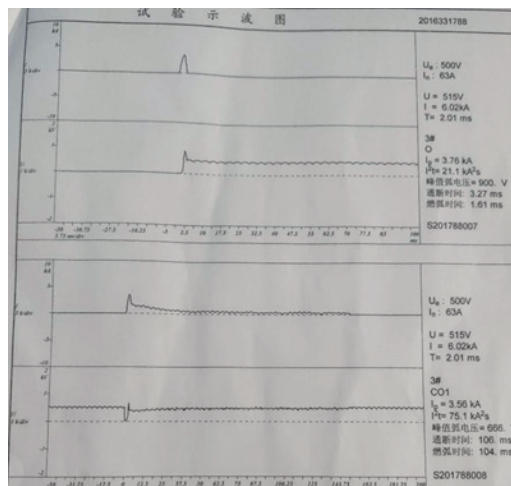


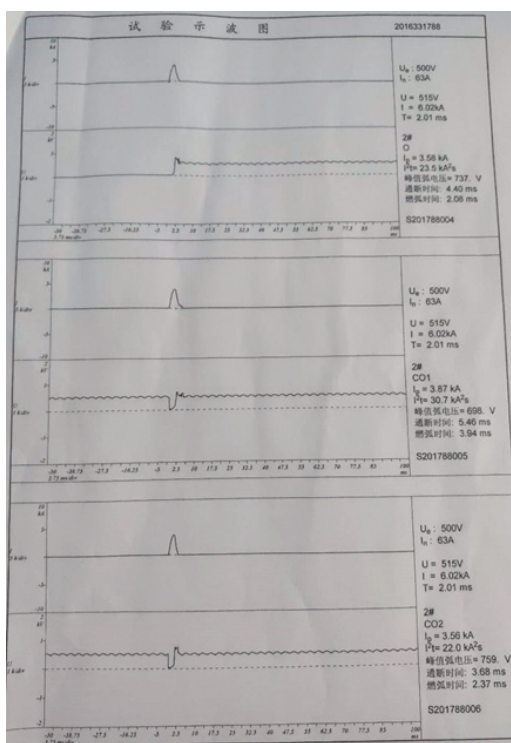
图3 短路试验对比

表4 短路试验数据列表

指标	分断指标/kA	DC电压/V	时间常数/ms	极数	I_n/A
参数	6	500	2	2	63



(a) AC MCB (做完0-CO, CO后分断电弧失败,燃弧时间过长导致能量过高,电弧无法熄灭而烧毁)

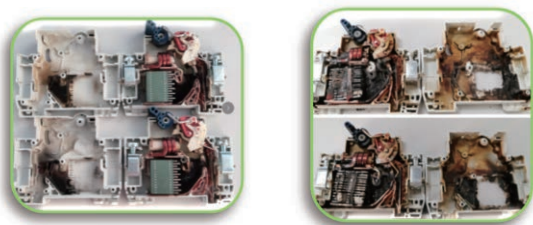


(b) DC MCB (做完O-CO-CO, 通断时间和燃弧时间均较短,能量也低,试验通过)

图4 波形图对比

2. 电气寿命试验

电气寿命对比如图5所示,电气寿命试验数据列表见表5。



(a) 交流产品 (b) 直流产品

图5 电气寿命对比

表5 电气寿命试验数据列表

指标	额定电流 /A	DC电压 /DC	极数	时间常数 /ms
参数	63	500	2	2
试验结果	交流产品65次失效，直流产品2 090次仍可继续			

总的来讲，直流断路器与交流断路器相比，更考验设计水平，从结构设计、选材到工艺，都有更高的要求 and 更严酷的考验。市场价值也远高于交流 MCB，约是交流 MCB 的 5 倍。在四极达到 1 000 V、时间常数 10 ms 及分断指标 10 kA 的产品，价格可以达到交流 MCB 的 10 倍以上。目前还处于高利润的时期。

塑壳断路器（MCCB）在光伏、风能领域引用前景广阔，尤其是做到两极 DC 1 500 V/2 ms/16 kA 的产品。

它的设计难点与 MCB 类似，直流电感的存在，间接体现在时间常数上，使电弧移动缓慢。其设计

要点为

- 1) 需要加大开距，增大到交流的 1.5 倍左右；提高介质恢复的速度，以此保证承受过电压不至于电弧重燃，达到提高额定工作电压等级的目的。
- 2) 减小机构启动的速度，降低电弧停滞的时间，使电弧电压出现得早。
- 3) 采用交叉式栅片设计，有利于电弧离开触头并迅速进入灭弧室。
- 4) 窄缝和磁吹灭弧，有助于拉长和移动电弧，从而快速提高电弧电压，有助于提高临界负载电流的分断水平。
- 5) 合理增加气吹结构，采用自动气吹技术，冷却和驱电弧进入灭弧室。结合增大开距，使电弧电压上升的幅值大大提高。从而提高介质恢复的速度和保证产品的绝缘水平。

结束语

随着世界清洁能源革命的到来，电力电子技术的快速迭代，以及碳化硅等第三代半导体材料的快速应用，导致半导体功率器件性能有大幅的提高，而价格存在大幅下降的空间。直流配电未来广阔，而其末端的低压直流断路器在机械式断路器提高性能的同时，固态和混合式断路器的占有率也将提高。EA

(收稿日期：2021-05-10)

(上接第 53 页)

2) 电容器组运行时间较长，至今已运行 25 年，且电容器组布置在室外，长期受高温、高湿及日照等因素的影响，造成 B 相放电线圈上串联二次部分连接螺栓氧化锈蚀严重，接触电阻较大，以使该相放电线圈二次回路上下两部分电压差值增大，当电压差值超过 6 V 时，即引起电压差动保护动作跳闸。

防范对策

- 1) 调整该站电容器组电压差动保护电压整定值，由原来的 6 V 改为 8 V，避免电容器组中单台熔断器熔断或系统三相电压偏差值波动时引起的电压差动保护动作跳闸。
- 2) 更换电容器组中 B 相放电线圈上串联二次部分连接螺栓及螺母，使其接触良好，避免二次回路

电阻变化引起的电压差值增大。

3) 依据电容器运行维护管理规范及电气设备预防性试验规程中的有关规定，做好电容器组及其附属设备的维护保养及试验、测试工作，及时处理存在的缺陷。

结束语

将该站电容器组电压差动保护电压整定值改为 8 V 及 B 相放电线圈二次部分连接螺栓及螺母更换处理后，电容器组运行正常，未再发生电压差动保护动作跳闸现象。在运行中应加强电容器组的巡视检查及维护，提高电容器组运行可靠性，确保电网安全稳定运行，降低网络损耗。EA

(收稿日期：2021-02-25)