[微电网]

适用于直流微电网线路故障的断路器可行性研究

文/陈焕栩　丁志远　郭洋　丁杰　李忠华　傅琪雯
国网江苏省电力有限公司常州供电分公司

文章调研了直流微电网的发展趋势，总结直流微电网的运行特性，在现有研究的基础上，提出一种适用于直流微电网线路故障的断路器可行性方案。

随着“双碳”工作的推进，新能源产业将迎来跨越式发展，直流微电网能够有效解决新能源发电“碎片化”接入与消纳难题，应用前景广阔。然而，直流系统线路阻抗低、惯性小，发生故障时，故障电流上升速度快、幅值高，导致直流系统故障保护面临严峻挑战。直流断路器作为直流系统故障保护关键性装备，对于直流微电网安全稳定运行至关重要。因此，本文针对直流微电网的应用场景，提出一种适用于微电网双向潮流变化和故障特征的自供电直流断路器方案。

直流微电网

1. 发展趋势

随着“双碳”目标的提出，电力行业作为碳排放量最大的行业（碳排放量占比40%以上），低碳化转型升级势在必行。然而新能源发电的随机性、间歇性以及分布性等特点，导致并网难、消纳难及运维难。由分布式发电、配电网络及储能装置组成的微电网很好地解决了新能源“碎片化”造成的接入与消纳难题，实现分布式能源的因地制宜、就地平稳消纳，必将成为我国以新能源为主体的新型电力系统的重要组成部分。

微电网分为直流微电网、交流微电网和交直流混合微电网，相比于交流微电网，直流微电网具备以下优势：

1）传输效率高、建设成本低。直流输电与交流输电相比，采用相同线路传输时，由于交流电存在趋肤效应，会引起反向涡流损耗，导致交流传输功率小于直流；而且建设相同传输功率线路，直流输电建设成本大约只有交流输电建设成本2/3。

2）控制简单、运行稳定。直流微电网电能变换只需一级AC/DC或DC/AC即可完成，交流微电网需要多级AC/DC，DC/AC。直流系统不存在交流系统特有的无功、相位和谐波等问题，直流系统的电压及潮流控制更简单。

3）直流负荷大幅增加。直流负荷需要经过必要的电能转换过程才能在交流微电网中使用，而在直流微电网中可以实现即插即用，不需要过多的电能转换过程，能够减少20%的能量损耗。

直流微电网相较于交流微电网表现出多方面优势。相对于已经非常成熟的交流系统故障保护技术研究，直流系统的故障保护技术研究相对较少。由于直流系统是一个低惯性系统，不存在自然过零点，发生故障时，故障电流上升速度快、上升幅值高。直流系统故障保护面临严峻挑战，成为制约直流系统发展的关键技术难题之一。

2. 结构及运行特征

图1为低压直流微电网的典型拓扑图，在低压直流微电网故障保护方面，固态式断路器相较于机械

式断路器关断速度快、使用寿命长；相较于混合式断路器结构简单、控制方便，更契合低压直流微电网的故障保护需求。随着SiC和GaN等第三代宽禁带半导体材料的迅速发展，具备耐压高、通态电阻小、导热率强和功率大的优点，进一步推动了固态断路器的发展与应用。研究基于第三代半导体功率器件的直流固态断路器对于低压直流微电网的发展具有重要的工程实践价值，但将直流固态断路器应用于低压直流微电网故障保护仍面临诸多挑战。

1）相比于传统电网中潮流单向流动特性，微电网潮流特性则向着源网荷储双向互动模式转变。功率半导体器件的单向关断特性，无法满足微电网潮流双向流动的故障保护要求。

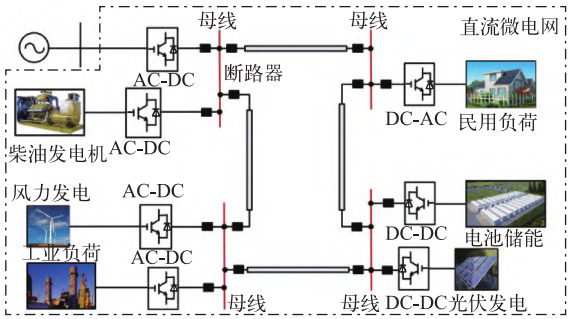

图1　低压直流微电网典型拓扑图

2）相比于低压直流微电网容量与传输电流等级，功率半导体器件的容量与电流等级较低，无法满足微电网的传输功率要求。

3）相比于机械式与混合式断路器正常工作状态下运行损耗低的特点，以功率半导体作为主开关的固态断路器运行损耗相对较高，导致器件发热，半导体材料对温度十分敏感，高温易损坏器件。

适用于直流微电网的断路器

1. 研究现状

目前，国内外学者针对直流固态断路器双向关断技术开展了大量研究工作，主要围绕主开关拓扑、缓冲与吸收电路和自供电技术三方面开展工作。主开关拓扑结构的设计是单向性功率半导体器件实现双向故障切除的关键；缓冲与吸收电路是解决由于固态断路器极快关断速度所引起过电压及震荡问题的关键，避免对器件及用电设备造成冲击和干扰；自供电技术为其工程实践应用提供便利，无需额外供电设备或线路，直接串入线路中即可使用。

现有已开发的双向直流固态断路器（Bidirectional DC Solid State Circuit Breaker，BSSCB）绝大部分无法简单地直接放置于线路中使用，都需要额外的供电电源或辅助供电线路进行供电。在很多特殊的应用场景，如水下、地下等，额外敷设辅助供电线路难以实现或经济代价过大，自供电断路器成为可行性的技术路线。基于上述问题，本文提出一种自供电BSSCB拓扑。

2. 断路器拓扑结构

含自供电BSSCB的双端电源系统拓扑结构如图2所示，固态开关为Module，其内部结构如图3所示。相邻的模块反串联连接，采用共漏极结构；二极管VD_1、VD_2、接地电阻R、金属氧化物限压器MOV和电容C共同构成了缓冲与吸收回路；DC/DC变换器将电容C上的电压通过降压隔离为BSSCB的检测单元、控制单元、控制单元和通信单元进行供电，电容C的电压是BSSCB获取稳定供能的关键。BSSCB加装在双端直流系统中，如何保持持续不间断自供电？输电电缆等效为电感L，电压源V_1、V_2是双端直流电源。

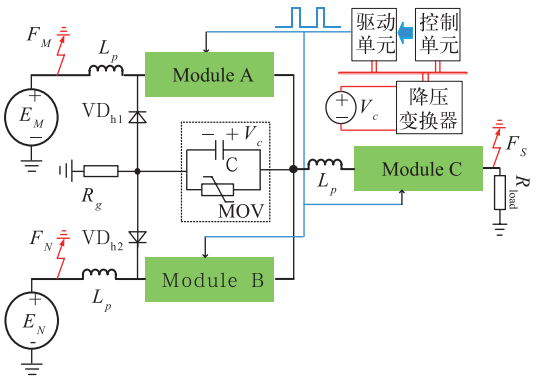

图2　含自供电BSSCB的双端电源系统拓扑

晶闸管导通瞬间，电流上升率过大导致硅体内局部过热而损坏。各模块串联的电感作为开通缓冲元件，起到抑制浪涌电流的作用。并联的电容C和金属氧化物避雷器MOV共同组成关断缓冲元件，在器件关断后能吸收回路中感性元件储存的能量，抑制过电压。每个模块内部有8个串联的SiC JFET器件（如图3所示）。R_x为均压大电阻，模块之间相邻的器件采取共漏极反串联。

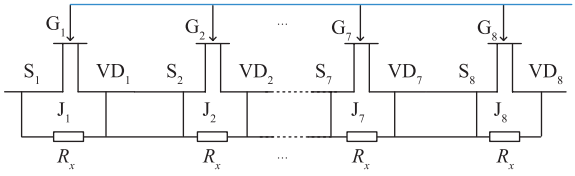

图3　模块内部器件组成

3. 自供电方式

双向固态断路器主开关拓扑采用SiC JFETs共漏极反串联结构。根据所设计主开关拓扑结构，辅以自供电电容C与二极管VD_1和VD_2组成的缓冲电路，实现故障电流的快速转移，保证故障电流的切除速度。金属氧化物限压器MOV则并联在自供电电容C两端组成故障电流吸收回路，限制功率开关器件以及续流二极管VD_1、VD_2两端电压，防止器件击穿。同时限制自供电电容两端电压V_C，保证V_C小于DC/DC变换器的最大安全输入电压，确保自供电电容两端电压经DC/DC降压隔离处理向整个断路器提供稳定自供电。接地电阻R保证自供电电容无论是在故障发生前，还是切除故障后，始终处于预充电状态，为双向直流固态断路器不间断自供能提供可能。

分析所设计拓扑结构如何保证在故障发生前与故障切除后的两个稳定阶段实现自供电的原理。

1）故障发生前，即直流系统正常工作时，自供电电容C通过接地电阻R预充电，使得V_C始终等于线路电压，通过DC/DC降压隔离处理即可实现自供电。

2）故障切除后，得益于SiC JFET的单向关断特性以及共漏极连接方式，无论在BSSCB任何一侧发生故障，使得故障侧JFET切除故障后，正常运行侧JFET并不会阻断C的预充电，使得V_C依旧等于线路电压。

4. 关键参数设计

为保证本文所提出自供电拓扑无论在发生线路侧短路故障还是电源侧短路故障都能够安全稳定运行，需要在保证系统稳定运行的前提下，尽可能减小故障切除时间。因此对拓扑电路元件参数进行分析和设计，主要参数包括：接地电阻R、自供电电容C以及金属氧化物限压器MOV。

1）接地电阻。R的大小决定了切除故障过程中BSSCB两侧故障电流的同步切除速度，当接地电阻R的阻值较小时，电源侧故障电流迅速切除，而线路电感L上储存的大量故障能量通过RL续流回路吸收，导致线路侧故障电流切除速度缓慢，严重影响线路侧的安全运行。因此，电阻R的取值应当尽量使两侧故障电流同步切除。

2）自供电电容。故障过程中自供电电容C的电压不断下降，严重危害到整个断路器的电能供应。所以自供电电容C以及接地电阻R的取值需要确保电容电压V_C在故障电流到达断路器所设定故障阈值电流I_{th}时，维持在DC/DC降压隔离变换器的最低输入电压之上。

3）限压器。由BSSCB两侧短路故障的故障响应过程可知，故障处理中限压器MOV吸收故障电流阶段，该阶段在整个故障隔离过程用时最长，针对限压器MOV参数设计尤为重要。线路电感L上故障电流下降速度与钳位电压和电压源的差值成正比，而且越高故障切除速度越快。然而，钳位电压越高，功率开关器件SiC JFET所承受的过冲电压就越高，严重威胁SiC JFET的安全运行，所以需要对钳位电压进行限制。同时自供电电容电压V_C作为DC/DC降压隔离单元前级输入电压，其电压值应始终保持在DC/DC降压隔离单元安全输入电压范围内。综上，限压器MOV的钳位电压应该小于SiC JFET漏源极击穿电压，同时还要小于DC/DC降压隔离单元最大安全输入电压。

对于额定运行电压为±10 kV的直流微电网系统，双向-自供电直流断路器元件的典型设计参数见表1。

表1　典型设计

参数	取值
R/Ω	1 000
C/uF	1
L/mH	1
MOV/V	615～1 025

结束语

随着电网体制改革不断深入，可消纳新能源发电的直流微电网得到了飞速发展。本文以直流微电网故障保护装置的研制为研究背景，针对直流微电网的运行特性和故障暂态特征，围绕双向直流固态断路器展开了深入研究，提出一种双向直流固态断路器的实现方案。EA

（收稿日期：2023-12-23）