

基于主动探测的直流微电网故障区段辨识与快速恢复策略

冯恽彬¹,张雪松¹,汪湘晋¹,赵波¹,郭力²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014;2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:直流微电网是未来智能配用电系统的重要组成部分。直流系统故障时,冲击电流上升速度快,可供保护获取的数据信息极少,严重影响直流保护的故障诊断。将电力电子变流器的故障控制与保护相结合,提出了一种基于主动探测的直流微电网故障区段辨识与快速恢复策略,通过增加AC-DC变流器的故障控制模块,使其具有主动注入短路电流的能力,进一步协同直流保护装置,实现对故障位置的准确识别和快速隔离。同时,各变流器还能基于本地电压和探测电流信息自动诊断故障消除情况,以快速恢复系统运行。基于实时数字仿真平台的仿真结果表明,所提策略能够在故障发生后100 ms内完成故障定位与隔离,大幅降低了对系统供电的影响,具有一定的工程应用价值。

关键词:直流微电网;故障区段辨识;直流保护;主动探测;故障恢复

中图分类号:TM 77;TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103008

0 引言

近年来,分布式电源和直流负荷的大量接入导致中低压配电网的形态发生巨大变化。直流微电网以其运行效率高、转化环节少、便于新能源接入等优势,引起国内外学者的广泛关注^[1-3]。然而,因微电网内的电力电子设备抗冲击能力较弱,且故障后直流电流上升迅猛,导致故障特征持续时间短^[4],给故障区段的准确辨识带来巨大挑战。可靠的故障辨识技术,是实现故障快速隔离的重要保障,对缩短系统停电时间、提高供电可靠性具有重要意义^[5-6]。

现阶段,直流微电网的故障辨识与保护技术仍处于理论研究阶段,这已成为制约其推广应用的主要因素之一^[7]。当前,直流微电网保护策略大部分都是基于传统交流保护思想,即被动接收故障信号,利用短窗提取电气量的暂态特征^[8-9],实现故障辨识。由于电力电子装置的脆弱性,直流微电网在隔离故障时将更依赖于断路器的快速开断能力和通信设备的可靠性,导致被动式保护在可靠性、速动性和经济性之间的矛盾难以调和^[10-11]。因此,主动保护应运而生^[12]。主动保护是指故障发生后,电力电子设备主动改变自身控制策略,进而改变系统的故障特性,以达到故障辨识和故障隔离的目的^[10]。文献^[13]在直流电流控制中注入方波信号,进一步改变模块化多电平换流器(MMC)上下桥臂子模块的投入数量,通过特征信号识别直流线路的故障类别。文献^[14]将故障后的AC-DC变流器切换为单相整流电路,实现了故障电流的周期性半波变化,进而完

成对线路的单端测距保护。该方法由于需要改造直流微电网内的所有设备,且相关参数受线路长度与负荷功率影响较大,对实际工程的适用性有待检验。文献^[15]在光伏直流汇集系统发生故障后,通过令光伏变流器输出低幅值的故障电流,实现了故障定位与隔离;文献^[16]在直流环网故障解列后,令变流器产生特定频率的谐波信号,从而准确定位故障线路。文献^[15-16]所提策略均需要基于隔离型的DC-DC变流器,将大幅增加系统的建设成本。

综上,现有的直流微电网主动保护技术,主要关注长直流线路下的故障辨识、测距与定位,当系统内馈线较多且线路长度较短时,以上方法将不再适用。同时,上述文献均没有考虑故障清除后,直流系统的供电恢复方案。为此,本文基于主动保护的思想,提出了一种直流微电网故障区段辨识与快速恢复策略,通过设计AC-DC变流器的故障控制模块,主动注入可控的探测电流,构造稳定的短路电流特征;进一步协同直流保护装置,实现对故障点的准确识别和快速隔离;微电网内的各变流器还能根据设备端口电压和探测电流自动诊断故障消除情况,以快速恢复系统供电。最后,基于实时数字仿真(RTDS)平台的仿真结果验证了所提策略的有效性。

1 直流微电网系统结构

本文研究的直流微电网系统结构如图1所示^[17-18],主要由以下4个部分组成:AC-DC变流器;以光伏为代表的分布式电源;储能单元,包括蓄电池储能和超级电容等;直流负荷。实际系统中,直流微电网内的各组成单元均通过一段线路(L_1 — L_5)和直流断路器(S_1 — S_5)接入直流母线。

直流微电网的接地方式是保护分析的基础,按照接地电阻划分,主要可分为不接地、高阻接地、直

收稿日期:2020-11-19;修回日期:2021-01-14

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1506800)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2020YFB1506800)

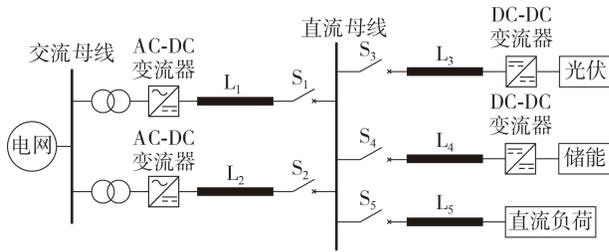


图1 典型直流微电网系统结构

Fig.1 Structure of typical DC microgrid system

接地3种^[19],由具体的应用场景和需求决定。目前大量的低压直流系统都是用不接地或高阻接地方式^[19]。而在直流微电网故障类型中,极间短路危害最为严重,容易导致系统崩溃。因此,本文主要针对高阻接地的直流微电网极间短路故障展开研究。

1.1 AC-DC变流器拓扑结构

直流微电网中,AC-DC变流器的电路拓扑如图2所示。该变流器采用传统三相桥式结构,交流侧配置LCL滤波器,直流侧为稳压电容 C_1 ,电容电压为 U_{dc1} 。为了快速限制直流故障电流,本文在变流器的直流侧额外设计了故障控制模块,如图中虚框部分所示,由绝缘栅双极型晶体管(IGBT) T_1 、反并联二极管 D_1 和限流电感 L_{n1} 三部分组成。变流器端口电压为 U_{o1} ,输出电流为 i_1 。正常运行时,AC-DC变流器采用直流电压控制模式,将 U_{dc1} 维持在额定值 U_{rate} 附近。此时 T_1 导通,故障控制模块不起作用,可以等效为一个串联电感,且 $U_{o1} \approx U_{dc1}$ 。

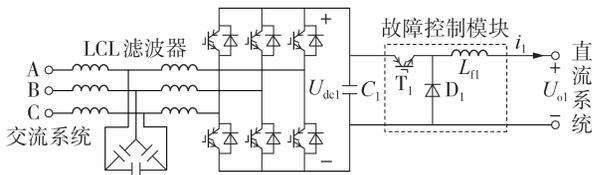


图2 AC-DC变流器结构

Fig.2 Structure of AC-DC converter

1.2 DC-DC变流器拓扑结构

直流微电网中,光伏和储能均通过DC-DC变流器接入电网,其电路拓扑如图3所示。该变流器采用传统Buck型降压电路,输入侧接光伏电源或储能电池,输出侧通过滤波电感 L_{r2} 和稳压电容 C_2 接入直流母线。为了限制短路电流,在电容支路还安装了故障切除装置。变流器端口电压为 U_{o2} ,输出电流为 i_2 。正常运行时,DC-DC变流器采用功率控制模式,

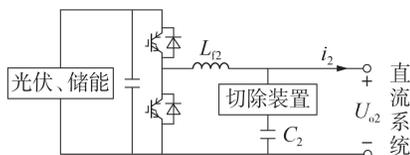


图3 DC-DC变流器结构

Fig.3 Structure of DC-DC converter

实现对直流微电网的功率支撑。

2 变流器故障控制策略

2.1 AC-DC变流器故障控制策略

当直流微电网内发生极间短路故障时,AC-DC变流器的出口电容 C_1 短路放电,输出电流 i_1 迅速上升。此时,故障控制模块检测到设备过流,立即闭锁 T_1 ,将变流器与故障隔离; D_1 导通,为故障电流提供续流回路。待短路电流大幅衰减后,故障控制模块还具备主动向直流微电网注入稳定可控探测电流的能力,为直流保护的正确动作奠定基础。具体的故障控制策略说明如下(控制逻辑如图4所示)。

(1)当 i_1 超过设备的保护动作值 I_1 时,故障控制模块启动,闭锁 T_1 ,隔离故障; T_1 左侧的三相桥式整流电路继续保持电压闭环控制,维持 U_{dc1} 稳定。

(2)待故障电流衰减后(约10 ms),故障控制模块以一定占空比 d 逐渐导通 T_1 ,使得变流器主动向故障点注入探测电流,并通过电流闭环将 i_1 控制在设备额定电流 I_{rate} 的50%。

(3)当外部故障清除后,变流器输出的探测电流会自动流向直流微电网中的光伏/储能DC-DC变流器出口电容充电,使得直流母线电压抬升。当 U_{o1} 超过阈值 U_{th} 时,故障控制模块转为采用电压控制,将直流电压调节到 U_{rate} ,系统重新恢复正常运行。若 U_{o1} 长时间小于 U_{th} (超过200 ms),则认为直流故障清除失败,关断 T_1 ,AC-DC变流器停机。

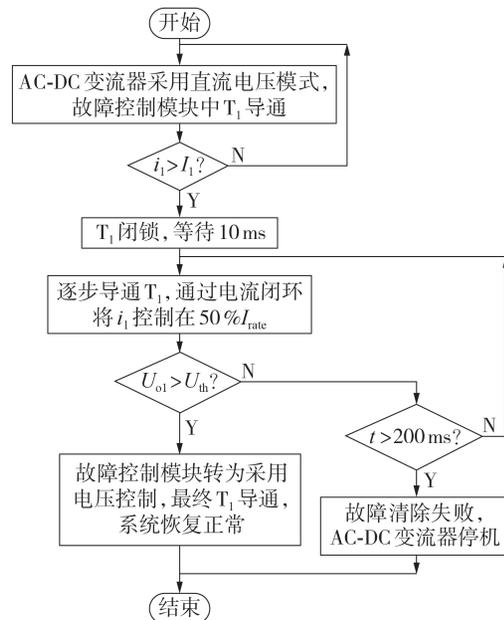


图4 AC-DC变流器故障控制逻辑

Fig.4 Fault control logic for AC-DC converter

故障控制模块电流、电压闭环控制框图见图5。

当 $U_{o1} \leq U_{th}$ 时,开关状态 $S = 1$,故障控制模块采用电流控制,具体工作原理说明如下。首先通过比

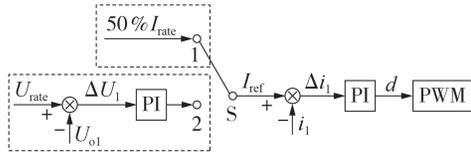


图 5 故障控制模块控制框图

Fig.5 Control block diagram of fault control module

较电流参考 $50\%I_{rate}$ 与变流器输出电流 i_1 (即探测电流) 得到偏差信号 Δi_1 , 经过经典的比例-积分 (PI) 控制器得到占空比 d , 最后通过脉宽调制 (PWM) 得到驱动信号, 控制 T_1 的通断。当 i_1 受到扰动发生变化时, 假设 i_1 减小, 此时 Δi_1 增大, 经过 PI 控制后 d 同样增大, 使得 T_1 导通时间增加, i_1 增大, 重新恢复至参考值附近, 实现对电流的快速跟踪与无差调节。当 $U_{o1} > U_{th}$ 时, 开关状态 $S=2$, 故障控制模块转为采用电压控制, 采用电压电流双环结构。外环为电压环, 通过比较电压参考值 U_{rate} 与变流器端口电压 U_{o1} , 得到偏差信号 ΔU_1 , 经过 PI 控制后得到内环电流参考值 I_{ref} , 之后的控制过程与电流控制一致, 最终实现了 $U_{o1} = U_{rate} = U_{dcl}$, T_1 重新完全导通, 恢复正常运行。

2.2 DC-DC 变流器故障控制策略

与 AC-DC 变流器故障控制不同, DC-DC 变流器作为功率源, 在直流微电网发生极间短路故障时, 主要采取限功率措施, 具体策略如下。

(1) 当检测到输出电流 i_2 超过保护动作值 I_2 时, DC-DC 变流器立即闭锁 Buck 电路开关, 同时故障切除装置启动, 切除出口电容 C_2 并放电。

(2) 待故障电流衰减后 (约 10 ms), 重新投入 C_2 , 使变流器处于待机状态。当检测到端口电压 U_{o2} 恢复正常后, 重启设备, 进入正常运行模式。若直流电压超过 200 ms 没有恢复正常, 则认为直流故障清除失败, DC-DC 变流器停机。

3 直流微电网故障辨识与快速恢复策略

3.1 基于主动探测的故障区段辨识

由第 2 节研究分析可得, 在直流故障控制阶段, AC-DC 变流器能够主动向直流微电网注入稳定可控的故障探测电流。基于该探测电流, 进一步协同直流保护装置, 可实现对直流系统不同故障区段的准确识别和快速隔离。对于图 1 所示的直流微电网系统, 短路故障点按区段划分主要可以分为进线故障 f_1 、电源故障 f_2 、负荷故障 f_3 和母线故障 f_4 这 4 类, 如图 6 所示。直流保护装置的测点分布在开关 S_1-S_5 上, 具备母差保护和带方向的过流保护等功能。

当进线 f_1 处发生短路故障时, 直流微电网内的 AC-DC、DC-DC 变流器等设备首先进入闭锁状态, 以限制短路电流。随后, AC-DC 变流器的故障控制模块会主动向直流系统注入稳定的故障电流。故障电

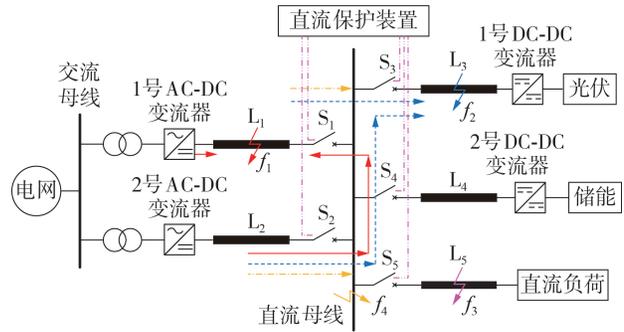


图 6 直流微电网故障区段划分

Fig.6 Fault section division of DC microgrid

流分布如图 6 中实线箭头所示。馈线 L_1 上, 1 号 AC-DC 变流器产生的故障探测电流直接流入故障点 f_1 ; 馈线 L_2 上, 2 号 AC-DC 变流器产生的探测电流分别经过断路器 S_2 、直流母线和断路器 S_1 流入 f_1 。以流出母线作为直流保护的参考方向, 此时流过非故障馈线上的探测电流与保护参考方向相反, 流过故障馈线上的探测电流与保护参考方向相同。馈线 L_3-L_5 上, 由于 DC-DC 变流器闭锁、负荷属于无源设备, 均不会产生持续性的短路电流。

当光伏电源 f_2 处发生短路故障时, 2 台 AC-DC 变流器产生的探测电流汇集于 f_2 , 如图 6 中虚线箭头所示。该工况下, 馈线探测电流和保护参考方向的判据与发生进线故障 f_1 时相同; 所有馈线流出直流母线的电流均为穿越性电流, 其和为 0。馈线 L_4 和 L_5 上没有持续性的短路电流。负荷故障 f_3 特性与电源故障 f_2 基本一致, 因此不再赘述。

当直流母线 f_4 处发生短路时, 2 台 AC-DC 变流器产生的探测电流流入母线, 如图 6 中点划线箭头所示。此时流过馈线上的探测电流均与保护参考方向相反, 所有馈线流出直流母线的电流之和不为 0。因此, 与交流保护类似, 可以快速识别母线故障。

综上, 基于 AC-DC 变流器所注入的探测电流, 直流保护装置仅需获取所有馈线出口的电压/电流信息, 就可以实现整个直流微电网的故障区段辨识。不同故障区段下, 直流微电网馈线故障电流分布特征如表 1 所示。

表 1 不同故障区段下的馈线故障电流分布特征

Table 1 Distribution characteristics of feeder fault current under different fault sections

故障位置	流过馈线的探测电流方向					电流和
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	
f_1	+	-	/	/	/	0
f_2	-	-	+	/	/	0
f_3	-	-	/	/	+	0
f_4	-	-	/	/	/	不为 0

注: “+”表示流过馈线的探测电流与保护参考方向一致; “-”表示流过馈线的探测电流与保护参考方向相反; “/”表示不会产生持续性的短路电流。

由表1可知,当发生馈线故障 f_1 — f_3 时,所有流出直流母线的电流之和恒为0,故障线路的短路电流方向与保护参考方向一致,此时线路保护闭锁,待接收到AC-DC变流器发出的解锁信号后,直流保护装置才启动故障辨识,完成故障隔离;当发生母线故障 f_4 时,流出直流母线的电流之和不为0,直流保护装置可立即识别故障类型,正确动作。

3.2 直流保护协同控制时序流程

本文所提的直流微电网主动保护策略保护动作时序如图7所示。

(1) t_0 时刻,直流微电网发生短路故障,故障电流上升迅猛,在1 ms内便达到变流器的保护动作值,AC-DC、DC-DC变流器故障闭锁,限制短路电流。此时,直流保护装置的线路保护处于闭锁状态。

(2)经过约10 ms的暂态过程,直流故障电流衰减,故障特征消失。AC-DC变流器的故障控制模块启动,向直流微电网主动注入探测电流,使得系统内呈现持续、稳定的故障电流特征,同时向直流保护装置发送解锁信号。保护装置启动线路故障辨识。

(3) t_3 时刻,直流保护装置辨识故障区段,完成故障定位,保护跳闸出口,经过30~40 ms,馈线上对应的直流断路器分断^[7],实现故障隔离。

(4)短路故障清除后,直流母线电压抬升,AC-DC变流器故障控制模块自动转为采用电压控制模式,将母线电压重新调节到 U_{rate} 。DC-DC变流器检测到电压正常后,重新启动,直流微电网恢复运行。

由图7可知,从直流故障发生到系统恢复运行,直流保护动作总时间小于100 ms,本文所提策略最大限度地减小了系统故障对负荷供电的影响,有助于实现负荷的短时故障穿越^[20],提高供电可靠性。

4 仿真实证

为了验证本文所提策略的有效性,在RTDS平台中搭建了如图6所示的直流微电网的半实物仿真模型,搭建的RTDS平台如附录中图A1所示,并分别对进线故障、负荷故障和母线故障进行仿真分析。直流系统相关参数如附录中表A1所示。

正常运行时,直流负荷功率为100 kW,光伏和储能分别向系统输出40 kW功率,2台AC-DC变流器均分剩余功率,即均为10 kW。假设直流微电网发生金属性短路,过渡电阻 R_g 取0.1 Ω 。

(1)进线故障。

图8为直流微电网在进线 f_1 处发生极间短路故障的电压、电流波形。图中, U_{debus} 、 i_{acdc1} 、 i_{acdc2} 、 i_{dcdc1} 、 i_{dcdc2} 、 i_{load} 分别为直流母线电压、1号AC-DC变流器输出电流、2号AC-DC变流器输出电流、1号DC-DC变流器电感电流、2号DC-DC变流器电感电流和直流负荷电流。由图8可知, $t_0=100$ ms时故障发生,直流母线电压瞬间跌落至0附近,变流器检测到过流后

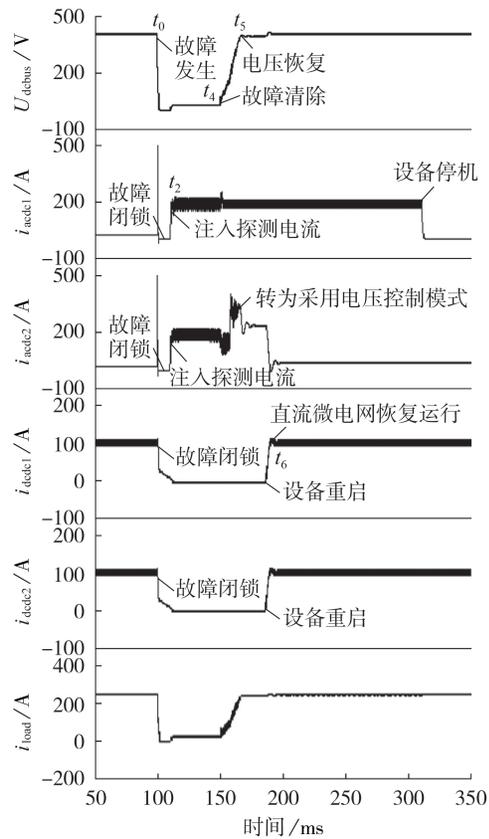


图8 进线故障 f_1 时电压、电流波形图

Fig.8 Waveforms of voltage and current under line fault f_1

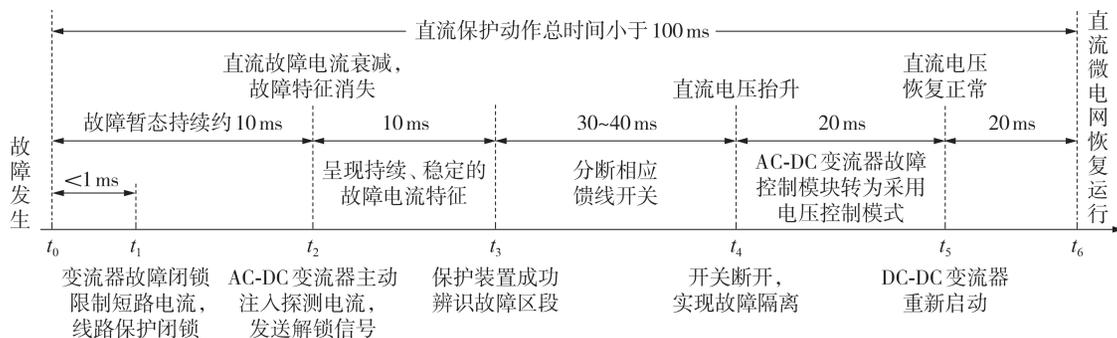


图7 保护动作逻辑时序图

Fig.7 Time sequence diagram of protection action logic

迅速闭锁;10 ms后(t_2 时刻),故障电流衰减,2台AC-DC变流器的故障控制模块主动向直流微电网注入大小为 $50\%I_{\text{rate}}$ (约187.5 A)的探测电流,为直流保护提供了稳定的故障特征;直流保护装置基于表1所示的故障电流分布特征,将故障定位在馈线 L_1 上,并于约30 ms后(t_4 时刻)成功分断直流断路器 S_1 ,实现故障清除;2号AC-DC变流器故障控制模块检测到电压抬升后自动转为采用电压控制模式,于 t_5 时刻将母线电压恢复到额定值400 V;最后,2台DC-DC变流器重启,直流微电网重新恢复正常运行(t_6 时刻),直流保护动作总时间小于100 ms。

由于故障点位于馈线 L_1 处,开关 S_1 断开后,1号AC-DC变流器将继续向短路点注入探测电流。200 ms后,由于端口电压并未抬升,认为故障隔离失败,1号AC-DC变流器停机,实现对设备自身保护。

(2) 负荷故障。

附录中图A2为直流微电网在负荷 f_3 处发生极间短路故障的电压、电流波形。由图A2可知, $t_0=100$ ms时故障发生,直流母线电压跌落至0附近,变流器检测到过流后迅速闭锁;10 ms后(t_2 时刻),AC-DC变流器主动向直流系统注入探测电流,探测电流流入馈线 L_5 ,形成了稳定的故障特征;直流保护装置基于表1所示的特性,成功辨识故障区段,并于 t_4 时刻成功分断直流断路器 S_5 ,实现故障清除;此时探测电流自动转为向DC-DC变流器出口电容充电,直流电压抬升,当超过电压阈值时,AC-DC变流器的故障控制模块转换为采用电压控制模式,于 t_5 时刻将母线电压恢复到额定值;当DC-DC变流器检测到母线电压恢复正常后自动重启,完成整个直流保护协同配合流程,总时间控制在100 ms内。

当电源 f_2 处发生短路时,其故障特性与负荷故障基本一致,受篇幅限制,不再赘述。

(3) 母线故障。

当直流微电网发生母线故障时,各设备端口电压、电流波形如附录中图A3所示。由图可知, t_0 时刻故障发生,直流母线电压快速跌落,变流器检测到过流而闭锁;由于母线故障特征较为特殊,直流保护装置基于表1所示的特性就能直接辨识,实现保护跳闸出口;经过约30 ms后(t_4 时刻),馈线 L_1 — L_5 上所有直流断路器均断开,完成故障隔离。

(4) 过渡电阻的影响。

基于附录中图A2的负荷故障场景,分别减小、增大过渡电阻阻值,对本文所提策略的适用性进行进一步验证。附录中图A4—A6分别为过渡电阻取0.05、0.2、0.3 Ω 时,直流微电网发生负荷故障下的母线电压和AC-DC变流器输出电流波形。由图可知,随着过渡电阻增大,直流母线电压跌落和短路电流上升速度变缓,故障区段辨识与快速恢复策略依然准确可靠。

5 结论

针对直流微电网极间短路故障,本文基于主动保护思想,将变流器的就地故障控制与直流保护相结合,提出了一种直流微电网的故障区段辨识与快速恢复策略,得到结论如下:

(1)AC-DC变流器中所设计的故障控制模块,能够主动向直流系统注入恒定可控的探测电流,为直流微电网构造了持续、稳定的故障特征;

(2)故障控制模块能够基于端口电压变化自动诊断故障消除情况,以快速恢复系统运行;

(3)所提方法能在短路故障发生后100 ms内完成故障隔离与系统恢复,大幅降低了对负荷供电的影响。

目前,该方法已在浙江上虞交直流微电网工程和海宁交直流微电网工程得到应用,设备改造便捷,应用效果较好,对未来直流微电网工程的保护方案设计具有一定的指导借鉴意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 林刚,李勇,王姿雅,等. 直流微网谐振模态分析及有源阻尼抑制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):119-132.
LIN Gang, LI Yong, WANG Ziya, et al. Resonance modal analysis and active damping suppression method for DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 119-132.
- [2] CORNEA O, ANDREESCU G, MUNTEAN N, et al. Bidirectional power flow control in a DC microgrid through a switched-capacitor cell hybrid DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3012-3022.
- [3] 王红艳,周国华,徐顺刚,等. 基于串联型分布式MPPT架构的直流微网系统无缝切换控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 188-203.
WANG Hongyan, ZHOU Guohua, XU Shungang, et al. Seamless switching control strategy of DC microgrid based on cascaded distributed MPPT architecture [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 188-203.
- [4] 宋国兵,王婷,张保会,等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析与发展[J]. 电力系统自动化,2020,44(20):173-183.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183.
- [5] GEDDADA N, MING Y, UKIL A. Experimental validation of fault identification in VSC-based DC grid system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4799-4809.
- [6] 王圣辉,范春菊,姜山. 基于暂态电压比原理的直流配电网故障保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):196-203.
WANG Shenghui, FAN Chunju, JIANG Shan. Fault protection scheme for DC distribution network based on ratio of transient voltage principle [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 196-203.
- [7] 薛士敏,齐金龙,刘冲. 直流微网保护综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3404-3412.
XUE Shimin, QI Jinlong, LIU Chong. A research review of protection for DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3404-3412.

- [8] MONADI M, GAVRILUTA C, LUNA A, et al. Centralized protection strategy for medium voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):430-440.
- [9] 王毅, 于明, 张丽荣. 环形直流微网短路故障分析及保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2):7-14.
WANG Yi, YU Ming, ZHANG Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):7-14.
- [10] 薛士敏, 李蒸, 刘存甲, 等. 直流微网接地综述与基于控保协同的保护方法研究初探[J]. 高电压技术, 2020, 46(7):2255-2269.
XUE Shimin, LI Zheng, LIU Cunjia, et al. Review of DC microgrids grounding and study on protection methods based on control and protection cooperation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7):2255-2269.
- [11] JIA Ke, ZHU Rui, BI Tianshu, et al. Fuzzy-logic-based active protection for photovoltaic DC power plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2):497-507.
- [12] 熊小伏. 电气设备主动保护与控制概念及功能架构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2):1-10.
XIONG Xiaofu. Conception and architecture of pro-active protection and control for power equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2):1-10.
- [13] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用全桥MMC注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1):149-156.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injection with FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1):149-156.
- [14] 薛士敏, 刘存甲, 李蒸, 等. 基于控保协同的环形直流微网单端测距保护技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5):122-129.
XUE Shimin, LIU Cunjia, LI Zheng, et al. Single-end ranging protection technology for ring DC microgrid based on coordinated control and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):122-129.
- [15] 朱瑞, 贾科, 赵其娟, 等. 光伏直流并网系统控保协同故障区段辨识方法[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2825-2834.
ZHU Rui, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Fault section identification of flexible DC collection system based on collaborated control-protection method[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2825-2834.
- [16] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于控保协同的多端柔性直流配电系统线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8):2559-2567.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Line protection for multi-terminal flexible DC distribution system based on control and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8):2559-2567.
- [17] 米阳, 蔡杭谊, 袁明瀚, 等. 直流微电网分布式储能系统电流负荷动态分配方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10):17-23.
MI Yang, CAI Hangyi, YUAN Minghan, et al. Dynamic distribution method of current load for distributed energy storage system in DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10):17-23.
- [18] 郭力, 冯悒彬, 李霞林, 等. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4):927-936.
GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin, et al. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4):927-936.
- [19] 李露露, 雍静, 曾礼强, 等. 低压直流双极供电系统的接地型式研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13):2210-2218.
LI Lulu, YONG Jing, ZENG Liqiang, et al. Researches on grounding types of low-voltage DC bipolar distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2210-2218.
- [20] CAIROLI P, KONDRATIEV I, DOUGAL R A. Coordinated control of the bus tie switches and power supply converters for fault protection in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4):2037-2047.

作者简介:



冯悒彬

冯悒彬(1990—),男,浙江宁波人,工程师,硕士,主要研究方向为分布式发电与微电网运行控制(E-mail:fyb728@163.com);
张雪松(1981—),男,河北唐山人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为分布式能源及微电网关键技术(E-mail:ee_zxs@163.com)。

(编辑 李玮)

Fault section identification and fast recovery strategy for DC microgrid based on active detection

FENG Yibin¹, ZHANG Xuesong¹, WANG Xiangjin¹, ZHAO Bo¹, GUO Li²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: DC microgrid will be an important part of intelligent power distribution and consumption system in the future. When DC system fault occurs, the impulse current rises quickly, and the data windows for protection is extremely short, which leads to affect the fault diagnosis of DC protection seriously. A fault section identification and fast recovery strategy for DC microgrid based on active protection is proposed through the coordination of fault control and protection of power electronic converter, where a fault control module for AC-DC converter is designed to inject controllable short circuit current to the fault point, and further cooperate with DC protection device to realize accurate identification and rapid isolation for fault location. Meanwhile, each converter in DC microgrid can also diagnose the fault removal situation automatically based on the local voltage and injection current information, so as to restore system operation quickly. The simulative results based on RTDS (Real-Time Digital Simulation) platform show that the proposed strategy can accurately locate and isolate fault within 100 ms after DC fault occurs, and significantly reduce the impact on power supply. Therefore, it has certain practical application value.

Key words: DC microgrid; fault section identification; DC protection; active detection; fault recovery

附录

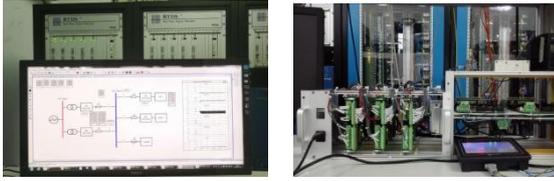


图 A1 RTDS 平台

Fig.A1 RTDS platform

表 A1 直流微电网系统参数

Table A1 Parameters of DC microgrid

设备名称	参数名称	数值
AC-DC 变流器	额定功率 P_{rateAC}/kW	150
	稳压电容 $C_1/\mu F$	5000
	限流电感 L_{f1}/mH	0.06
	过流保护动作值 I_1/A	450
	电压阈值 U_{th}/V	200
DC-DC 变流器	额定功率 P_{rateDC}/kW	150
	稳压电容 $C_2/\mu F$	5000
	滤波电感 L_{f2}/mH	1
	过流保护动作值 I_2/A	450
直流 微电网	额定电压 U_{rate}/V	400
	线路阻抗 R_{eq}/Ω 、 L_{eq}/mH	0.05、0.05

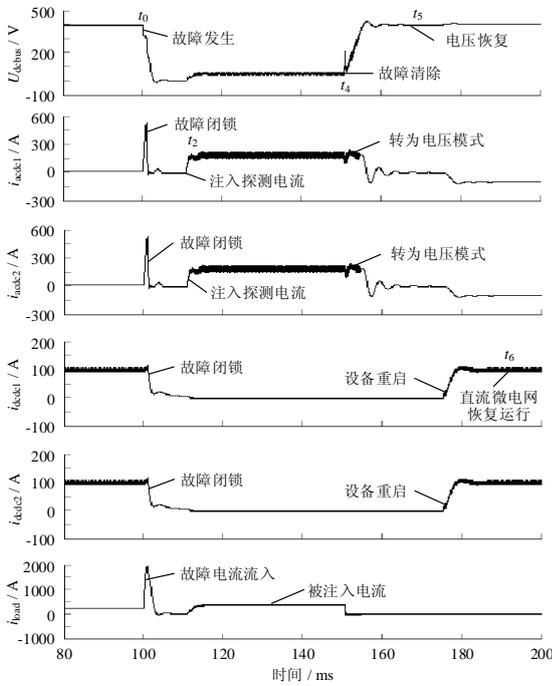


图 A2 负荷故障 f_3 电压、电流波形图

Fig.A2 Voltage and current waveforms for fault f_3

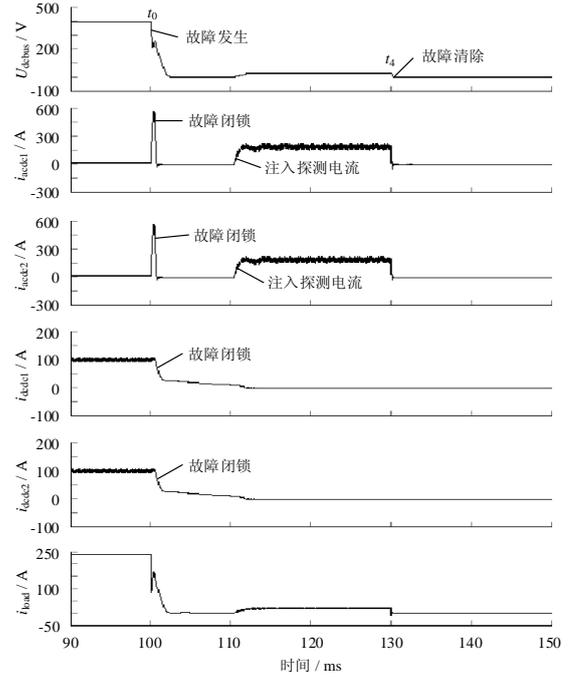


图 A3 母线故障 f_4 电压、电流波形图

Fig.A3 Voltage and current waveforms for fault f_4

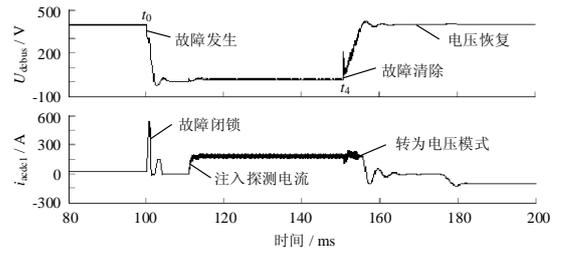


图 A4 过渡电阻 0.05Ω 下负荷故障波形图

Fig.A4 Waveforms for load fault with $R_g=0.05 \Omega$

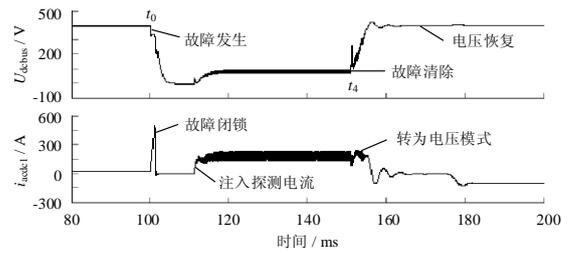


图 A5 过渡电阻 0.2Ω 下负荷故障波形图

Fig.A5 Waveforms for load fault with $R_g=0.2 \Omega$

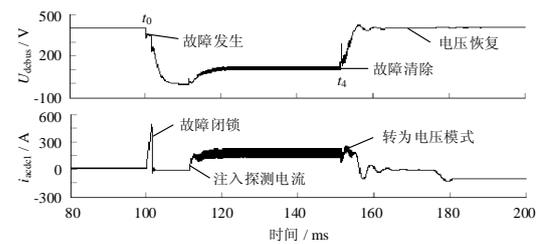


图 A6 过渡电阻 0.3Ω 下负荷故障波形图

Fig.A6 Waveforms for load fault with $R_g=0.3 \Omega$