

具有自动隔离故障能力的直流固态断路器

吴铁洲, 赵 瑞, 李厚佳

(湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430063)

摘要:相较于机械式断路器, 固态断路器(solid-state circuit breaker, SSCB)因其短路发生时切断电流无电弧及可靠性高的优点在直流电网短路保护中受到广泛关注。文中设计了一种具有自动隔离故障能力的直流固态断路器, 该断路器由短路判定模块与故障电流缓冲模块组成, 短路发生后可以在没有外部控制系统的情况下切除故障电流。文中对该固态断路器不同的工作状态进行分析, 建立相应的数学模型, 并以此作为参数设计的理论依据, 在设计完成后与现有的固态断路器在10 kV/500 A直流电网的短路切除仿真中进行对比, 仿真结果表明:加入具有自动隔离故障能力的直流固态断路器后, 输电线的运行损耗仅增加0.025%, 因此该断路器不影响电路的正常运行;当直流电网发生短路故障后, 该断路器能在5 ms内自动关断, 且可以平滑的吸收故障电流使固态开关所承受的峰值电压不超过线路电压的1.5倍, 对直流电网具有可靠的保护作用。

关键词:直流故障; 固态断路器; 短路判定; 故障电流缓冲; 峰值电压

DC Solid State Circuit Breaker with Automatic Fault Isolation Capability

WU Tiezhou, ZHAO Rui, LI Houjia

(Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Solid state circuit breaker(SSCB), compared with mechanical circuit breakers, has received much attention in short-circuit protection of DC network due to its such advantages as arc-free current interruption upon short circuit occurrence and high reliability. In this paper, a DC SSCB with automatic fault isolation capability is designed. The SSCB consists of a short-circuit judgement module and a fault current buffer module which, in case of short circuit, can clear the fault current without an external control system. The different operating states of this solid-state circuit breaker is analyzed, the corresponding mathematical model is set up and used as the theoretical basis for parameter design. After completion of the design, it is compared with the existing solid state circuit breaker in short circuit interruption simulation at 10 kV/500 A DC network. The simulation result shows that after addition of the SSCB with automatic fault isolation capability, the operation loss of the transmission line is only increased by 0.025%, therefore the circuit breaker does not affect the normal operation of the circuit. After the occurrence of short circuit fault of the DC network, the circuit breaker can automatically interrupt within 5 ms and smoothly absorb the fault current so that the peak voltage sustained by the SSCB does not exceed 1.5 times the line voltage, thereby providing reliable protection for the DC network.

Key words: DC faults; solid-state circuit breakers; short-circuit determination; fault current buffering; peak voltage

0 引言

直流输电对于光伏发电和风力发电等新能源发电技术而言是比交流输电更为有效的输电方案,

是支撑中国践行“碳达峰、碳中和”宏伟战略的重要手段^[1-2]。直流电网通常采用架空线路进行传输, 这增加了线路故障发生的概率^[3]。且由于直流电故障电流上升率高且没有自然过零点, 导致直流电网面临比交流电网更为困难的故障保护问题^[4-5]。

收稿日期:2026-04-17; 修回日期:2026-07-19

基金项目:国家自然科学基金(52177212);湖北工业大学科技项目(锂离子电池储能电站充放电系统安全运行关键技术)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52177212), Science and Technology Project of Hubei University of Technology(Key Technology for Safe Operation of Charge/Discharge System of Lithium-ion Battery Storage Power Plant).

因为当直流侧发生短路故障时,故障电流将在微秒级的时间内超越线路的承受能力数倍,因此对直流故障保护器件的要求是在数十 ms 内检测并切除故障^[6]。但是由于线路中感性元件的存在,若直接关断电路,断开点的尖峰电压将超过线路额定电压数倍,极有可能造成开关元件和系统主设备不可逆损坏^[7]。

目前,直流断路器(DCCB)在直流系统中对隔离故障区域和维持非故障工作区正常运行起到重要作用^[8]。现有的直流断路器主要有3种类型:机械断路器、固态断路器以及混合断路器^[9],但是目前由于机械断路器与混合断路器的机械开关触发速度慢,且在切断故障电流时存在电弧导致维护成本高的问题^[10-11],使得响应速度快且关断时没有电弧的固态直流断路器成为直流电网保护的重要研究方向^[12-14]。

文[15]提出了一种基于可控硅串联技术的新型固态高压直流断路器,采用若干个晶闸管串联组成开关支路,换流支路由预充电的吸收电容与整流桥组成,多个晶闸管串联在一起可以相互分担尖峰电压,但是大量晶闸管串联增大了系统的不稳定性,一旦某一个晶闸管出现故障,整个断路器会失去切断故障路电流作用,造成严重事故的可能大大增加。文[16]中提出了一种基于PMOS管的自取电直流固态断路器,其原理是利用串联在电路中的耦合电感将短路电流的能量传导至主线路上的PMOS管的G极使其关断,具有无需外接控制器的优点,但碍于PMOS管耐压能力不足,且由于线路中直接接入了电感,导致PMOS管在关断时需要承受的电压远高于线路额定电压,因此使该断路器只能应用于低压直流电路。文[17]中介绍了使用TIM-pack开关的固态断路器拓扑:TIM-pack开关是一种晶闸管-IGBT-金属氧化物压敏电阻组成的开关结构。当系统监测到线路中发生短路时,会控制TIM-pack开关中的IGBT断开,短路电流将换流至MOV支路,基于MOV过压保护的能力防止IGBT受到尖峰电压的冲击,当MOV消耗完线路中的感性能量后进入高阻状态,晶闸管自然关闭,完成对故障电流的切断。该文提出的TIM-pack开关对短路电流和尖峰电压具有优良的限制作用,但是MOV的过压保护功能有接近50 μs的启动时间,在此期间IGBT仍会受到尖峰电压的冲击^[18]。

针对上述直流断路器存在的问题,文中提出了一种具有自动隔离故障能力的直流固态断路器,该断路器同时具有短路判定功能与故障电流缓冲能力,该断路器在对线路的正常运行没有影响;在线路短路故障出现后利用短路判定模块中的耦合电

感传递储存在电容中的能量控制IGBT断开,随后利用电流缓冲吸收回路使故障电流平滑的降为0,使开关可靠关断。

1 具有自动隔离故障能力的直流固态断路器设计及原理分析

1.1 拓扑结构

具有自动隔离故障能力的直流固态断路器见图1。文中提出的具有自动隔离故障能力的直流固态断路器主要由故障电流缓冲模块、短路判定模块两部分组成:

1)故障电流缓冲模块。故障电流缓冲模块由晶闸管(thyristor)IGBT、MOV、电感电容组成,在原有TIM-pack开关的MOV上并联了一组RC电路以辅助MOV进行更有效的限压。故障电流缓冲模块主要用于导通正常负荷电流,以及在直流线路发生短路故障时限制短路电流增长和切断输电线路。

2)短路判定模块。短路判定模块主要由供电电源、耦合电感、MOV、IGBT、稳压管、若干个电阻、电容、二极管组成。主要作用是在直流系统发生短路故障时通过将存储在耦合电感支路中的能量转移到电容 C_2 ,从而控制 Q_2 导通使电路断开。

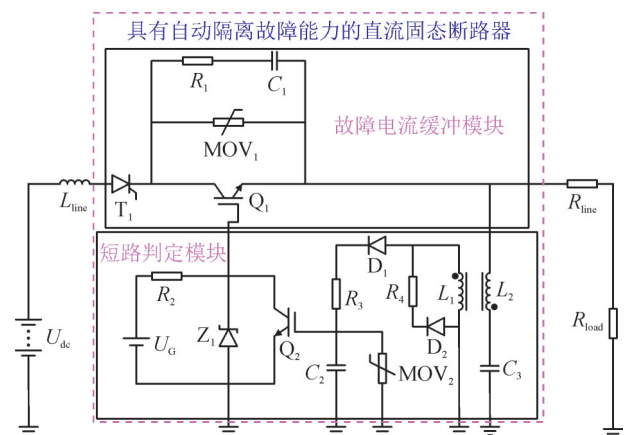


图1 具有自动隔离故障能力的直流固态断路器

Fig. 1 DC SSCB with automatic capability for isolation fault

1.2 工作原理及开关过程

文中提出的固态断路器启动状态见图2。直流电源 U_{dc} 模拟直流换流站的输出, U_c 为断路器的供电电源。当直流线路未工作时,开关 S_1 、 S_2 、 S_3 均为断开状态。若要导通线路,首先关闭 S_2 ,同时为绝缘栅双极型晶体管 Q_1 的G级供电使 Q_1 导通;并用外置电源 U_T 、 U_{C3} 分别给晶闸管 T_1 的阳极供电和电容 C_3 充电,直到 C_3 两端电压与 U_{dc} 相等;随后接通 S_1 ,当负荷电压 U_{load} 等于 U_{dc} 时接通 S_3 ,最后撤掉外置电源 U_T 与 U_{C3} ,此时直流输电线可以正常运行。

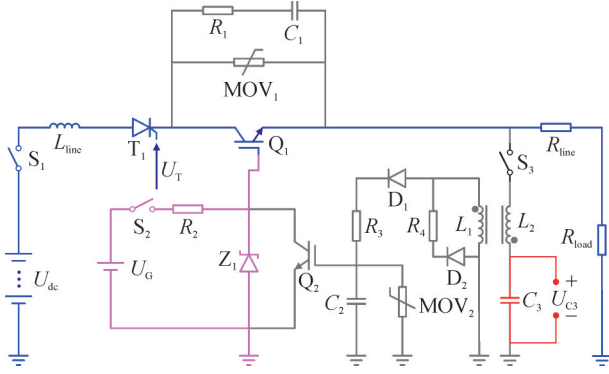


图2 直流输电线路启动初始状态

Fig. 2 Initial state of DC transmission line start-up

当直流输电线路处于正常运行状态时,具有自动隔离故障能力的直流固态断路器中的电流流向见图3。图3中, Q_1 的 G 级供电的电流流向为 $U_G \rightarrow R_2 \rightarrow Z_1$, 其中稳压管 Z_1 上的电压 U_{Z1} 大于 Q_1 的开通电压(IGBT开通所需要的栅极电压通常是 10 V), Q_1 导通。由于是直流输电,线路正常运行时直流输电线路中的线路电抗器与杂散电感叠加的等效电感 L_{line} 的影响可以忽略^[19]。此时短路判定电路中的储能电容 C_3 已经充满电,其两端电压等于负荷两端电压,可以视为断开,因此主线路中的功率流向为 $U_{dc} \rightarrow L_{line} \rightarrow T_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow R_{load}$ 。

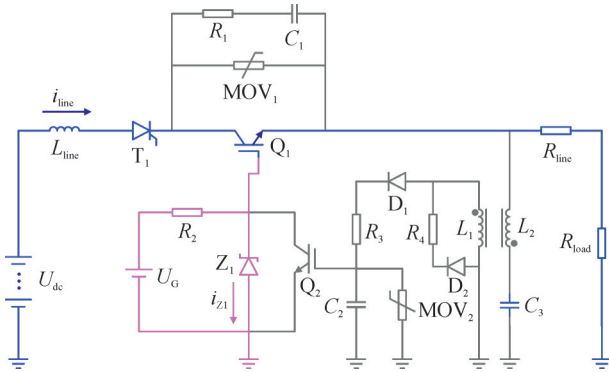


图3 直流线路稳定运行时的改进型 TIM-pack 开关直流固态断路器工作状态

Fig. 3 DC SSCB based on improved TIM-pack switch operation during stable operation of DC lines

当负荷侧发生接地故障时,故障电流迅速上升,具有自动隔离故障能力的直流固态断路器开始动作,其控制动作过程见图4。

1)第1阶段:故障在 t_0 时刻发生,短路判定模块立刻启动:储能电容 C_3 经由 L_2 向短路点释放能量,此时耦合电感 L_1 感应到磁场变化开始向电容 C_2 充电,其电流流向为 $L_1 \rightarrow D_1 \rightarrow R_3 \rightarrow C_2$ 。直到 t_1 时刻电容 C_2 的电压 U_{C2} 达到 Q_2 的导通电压,第1阶段结束。故障切除第1阶段短路判定模块可等效见图5。图5中的 R_{load} 为断路器到直流线路短路点的线路等效

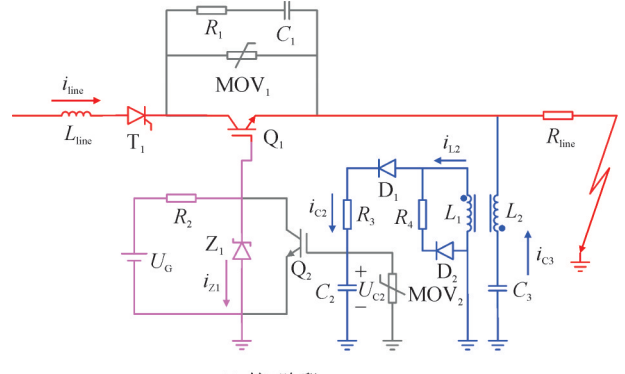
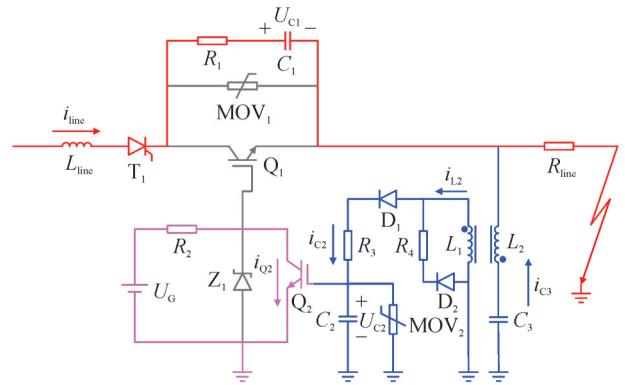
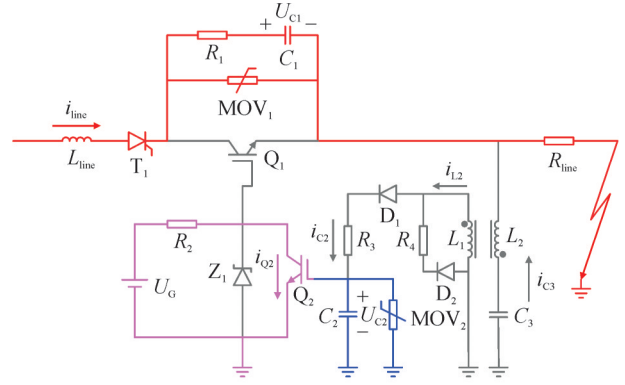
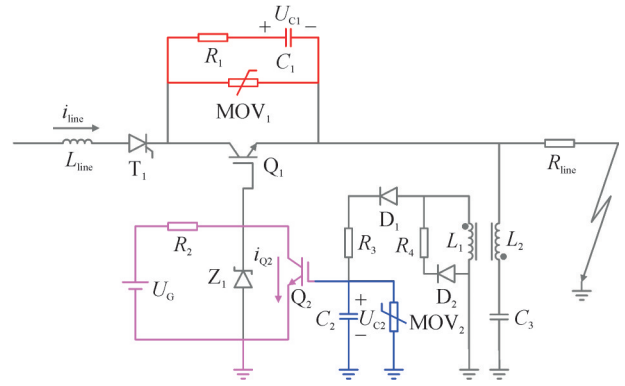
(a) 第1阶段: $t_0 < t < t_1$ (b) 第2阶段: $t_1 < t < t_2$ (c) 第3阶段: $t_2 < t < t_3$ (d) 第4阶段: $t_3 < t < t_4$

图4 具有自动隔离故障能力的直流固态断路器关断过程

Fig. 4 The fault current interruption stage

电阻。电容 C_3 的能量转移到 C_2 的路径可以看作是 $C_3 \rightarrow L_2 \rightarrow L_1 \rightarrow D_1 \rightarrow R_3 \rightarrow C_2$ 。

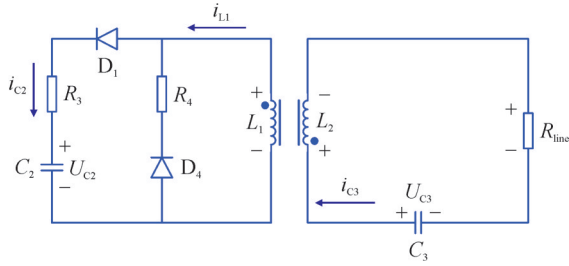


图5 故障切除第1阶段短路判定模块等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of short-circuit judgement circuit in the first stage of fault removal

t_0 时刻线路发生短路故障时的 L_2 侧电路由 KVL 方程有

$$\begin{cases} U_{C3} = L_2 \frac{di_{C3}}{dt} - M \frac{di_{L1}}{dt} + R_{load} i_{C3} \\ U_{L1} = -L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + M \frac{di_{C3}}{dt} \\ U_{L1} = R_3 i_{C2} + U_{C2} \\ i_{C3} = -C_3 \frac{dU_{C3}}{dt} \\ U_{C2} = \frac{1}{C_2} \int_0^t i_{C2} dt \\ U_{C3}(t_0) = U_{dc} \\ U_{L1}(t_0) = U_{C2}(t_0) = 0 \\ i_{L1}(t_0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_{C3} 为电容 C_3 两端的电压; U_{C2} 为电容 C_2 两端的电压; U_{L1} 为电感 L_1 两端的电压; i_{C3} 为流过 C_3 的电流; i_{C2} 为 C_2 的充电电流; i_{L1} 为 L_1 输出的电流。但由于式(1)过于复杂,无法得出解析解,因此本节对该部分的计算利用文[20]中的近似算法。取耦合电感互感为 M , 耦合系数为 k , 忽略线路杂散电阻的影响,并假设 $t_0 = 0$, 则有:

$$L_2 \frac{di_{C3}}{dt} - M \frac{di_{L1}}{dt} + \frac{1}{C_3} \int_0^t i_{C3} dt = U_{dc} \quad (2)$$

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} - M \frac{di_{C3}}{dt} + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_{C2} dt = 0 \quad (3)$$

$$i_{C3} = \frac{U_{dc}}{AL_2} \left[\frac{\beta^2 - A_1^2}{A_1} \sin(A_1 t) - \frac{\beta^2 - A_2^2}{A_2} \sin(A_2 t) \right] \quad (4)$$

$$\frac{kU_{dc}}{A\sqrt{L_1 L_2}} [A_2 \sin(A_2 t) - A_1 \sin(A_1 t)] \quad (5)$$

$$\text{式(2)-(5)中: } k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}; \alpha^2 = \frac{1}{L_2 C_3}; \beta^2 = \frac{1}{L_1 C_2};$$

$$A = \sqrt{\alpha^4 + \beta^4 - 2(1 - 2k^2)\alpha^2\beta^2}; A_1^2 = \frac{\alpha^2 + \beta^2 - A}{2(1 - k^2)}; A_2^2 =$$

$$\frac{\alpha^2 + \beta^2 + A}{2(1 - k^2)}。$$

故 t_1 时刻电容 C_2 的电压可视为

$$U_{C2}(t_1) = \frac{1}{C_2} \int_0^{t_1} i_{C2} dt \quad (6)$$

当 U_{C2} 达到 Q_2 的开通电压,也就是 $U_{C2} = 10 \text{ V}$ 时,第1阶段结束。参与第1阶段的各部件参数见式(4)-(6),因此可以根据所需的电流幅值确定储能电容及耦合电感的参数选取。

2)第2阶段: t_1 时刻, Q_2 导通使 Q_1 的栅极电压低于其导通电压导致 Q_1 关断,此时输电线电流路径为: $U_{dc} \rightarrow L_{line} \rightarrow T_1 \rightarrow R_1 \rightarrow C_1$ 。其等效电路见图6。

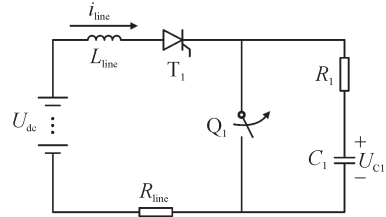


图6 故障切除第2阶段主线路等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of the main transmission line in the second stage of fault removal

图6中,IGBT管 Q_1 等效的开关在 t_1 时刻断开。假设输电线正常工作时的电流为 i_N , 对于图6可列出其二阶电路全响应的方程组

$$\begin{cases} L_{line} C_1 \frac{d^2 U_{C1}}{dt^2} + (R_1 + R_{load}) C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} + U_{C1} = U_{dc} \\ U_{C1}(t_1) = 0 \\ \left. \frac{dU_{C1}}{dt} \right|_{t=t_1} = \frac{i_{line}(t_1)}{C_1} \\ i_{line}(t_1) = \frac{U_{dc}}{R_{line}} + \left(i_N - \frac{U_{dc}}{R_{line}} \right) e^{-\frac{t_1}{\tau}} \\ \tau = \frac{L_{line}}{R_{line}} \\ t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,由于 R_1 承担保护 Q_1 的作用,若取值过大会使其在短路时收到大电流的冲击导致 Q_1 承受过大的电压,因此 R_1 取值不应过大,且第2阶段主线路等效电路应工作在欠阻尼状态。对式(7)进行求解,解得 U_{C1} 与 i_{line} 在 $t_1 < t \leq t_2$ 时的变化分别为:

$$U_{C1} = U_{dc} - [x \cos(\Delta t \omega_0) + y \sin(\Delta t \omega_0)] e^{-\lambda \Delta t} \quad (8)$$

$$i_{line} = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} \quad (9)$$

$$\text{式(8)中: } \Delta t = t - t_1; \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{line} C_1} - \lambda^2}; \lambda =$$

$$\frac{R_1 + R_{line}}{2L_{line}}; x = U_{dc}; y = \frac{1}{\omega_0} \left[\lambda U_{dc} - \frac{i_{line}(t_1)}{C_1} \right]。$$

结合式(8)、(9),可求得 Q_1 两端的电压 U_{Q1} 为

$$U_{Q1} = U_{C1} + R_1 i_{line} \quad (10)$$

U_{MOV1} 为压敏电阻 MOV_1 的阈值电压,其值依据文[21]选取为线路额定电压的1.5倍,因此有 $U_{MOV1} = 1.5 U_{dc}$ 。当 $U_{Q1} = U_{MOV1}$ 时,第2阶段结束,此

时 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

由于压敏电阻有 $t_M = 50 \mu s$ 的启动时间, 且最大耐受电压不应超过其阈值电压的 100.5%, 因此有 U_{C1} 还应满足下列条件

$$\frac{dU_{C1}(t_2)}{dt} t_M \leq 0.5\% U_{MOV1} \quad (11)$$

3) 第3阶段: 该阶段电路工作状态见图 4(c)。 t_2 时刻, MOV_1 进入限压工作区, 由于 U_{MOV1} 大于线路额定电压, 因此 $t_2 < t \leq t_3$ 时的主线路等效电路简化见图 7。

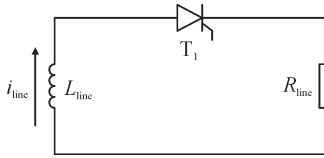


图7 故障切除第3阶段主线路等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of the main transmission line in the third stage of fault removal

对于图 7, 由一阶电路的零输入响应公式可以求得 $t_2 < t \leq t_3$ 时的 i_{line} 的变化为

$$i_{line} = i_{line}(t_2) \exp(-R_{line} t / L_{line}) \quad (12)$$

i_H 为晶闸管 T_1 的维持电流, 通常取 $i_H = 50 \text{ mA}$, 当电流小于 i_H 时晶闸管将关闭, 因此 t_3 时刻有 $i_{line}(t_3) = i_H$, 此时第3阶段结束。

4) 第4阶段: 在该阶段固态断路器已完成对故障电流的切断, 存储在电容 C_1 与 C_2 中的能量将被电阻与压敏电阻消耗, 后续也可通过人工操作消耗其中的能量。

2 具有自动隔离故障能力的直流固态断路器参数设计

2.1 短路判定模块参数设计

在城市直流微电网中, 常用 10 kV 电压等级的直流电进行输配电, 因此文中设计的固态断路器选择的额定电压为 10 kV, 额定电流为 500 A^[22-26]。由于额定电流下的线损要求在 7% 左右(效率大于 93%), 故主线路参数设定为: $U_{dc} = 10 \text{ kV}$, $R_{line} = 0 \sim 1 \Omega$, $R_{load} = 19 \Omega$ 。线路等效电感根据文[18]选取 $L_{line} = 2.8 \text{ mH}$ 。直流输电线发生短路后通常需要 1 ms 的时间才能确定发生短路^[20], 因此需要保证 $t_1 > 1 \text{ ms}$ 。考虑到耦合电感制造难度、高绝缘要求、成本以及体积限制, 耦合系数最终取 $k=0.8$, $L_1 = L_2 = 1 \text{ mH}$, $L_1 = L_2 = 1 \text{ mH}$, $M = 0.8 \text{ mH}$ 。

确定了上述初始条件, 将其代入式(4)、(5), 计算得到电容 C_2 、 C_3 与 t_1 的变化关系见图 8。

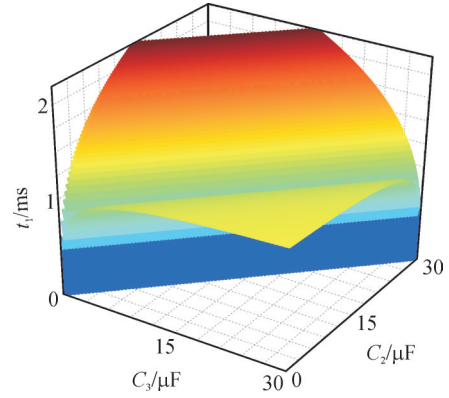


图8 C_2 、 C_3 与 t_1 的关系

Fig. 8 The relationship between C_2 , C_3 and t_1

随着 C_2 、 C_3 的增大, 短路发生时要使 C_2 两端的电压 U_{C2} 上升到 Q_2 导通所要求的栅极电压的时间 t_1 也会随之增加。由于需要 $t_1 > 1 \text{ ms}$, 且 C_3 属于线路启动前的预充电电容, 若取值过大会使充电时间过长, 存在耽误输送电的风险, 因此初步确定 $C_3 = 3 \mu F$, 对应的 C_2 范围为 5~30 μF 。

将上述求得参数和限制条件代入式(1), 得到 R_3 、 C_2 、 t_1 之间的关系见图 9。通过图 9 确定 $R_3 = 9000 \Omega$, $C_2 = 20 \mu F$, 此时 $t_1 \approx 1.2 \text{ ms}$ 。

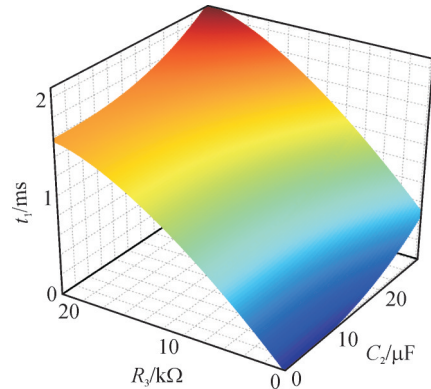


图9 R_3 、 C_2 与 t_1 的关系

Fig. 9 The relationship between R_3 , C_2 and t_1

与 C_2 并联的压敏电阻 MOV_2 主要作用是将 C_2 两端的电压钳位在 Q_2 栅极所能承受的最大电压之下, MOV_2 的大小通常取为所保护元件额定电压的 1.5 倍, 因此 MOV_2 的额定电压 $U_{MOV2N} = 15 \text{ V}$ 。同理 MOV_1 的额定电压 $U_{MOV1N} = 15 \text{ kV}$, 对于 U_G 、 R_2 、 Z_1 , 只须满足 Q_1 的导通条件即可, 文中取值为 $U_G = 24 \text{ V}$, $R_2 = 10 \Omega$, 稳压管 Z_1 的额定电压 $U_{Z1} = 13 \text{ V}$ 。

2.2 故障电流缓冲模块参数设计

将 $t_1 = 1.2 \text{ ms}$ 代入式(7)-(10), 并考虑压敏电阻 MOV_1 的作用, 得到 Q_1 承受的最大电压与其需要满足的条件为:

$$U_{Q1MAX} = R_1 i_{line}(t_1) \quad (13)$$

$$U_{Q1MAX} < U_{MOV1} \quad (14)$$

式(13)中, $i_{line}(t_1) = 3\,811\text{ A}$ 。 R_1 的作用为消耗电感 L_{line} 中的能量。 L_{line} 中的能量消耗所需的时间 t_{R1} 与 R_1 的关系见图10。

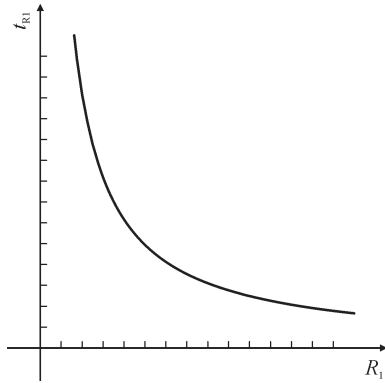


图10 L_{line} 中的能量消耗所需的时间 t_{R1} 与 R_1 的关系

Fig. 10 The effect of R_1 on the time t_{R1} of energy dissipation in L_{line}

由图10可知, L_{line} 中的能量消耗所需的时间随 R_1 的增大而减少, 结合 R_1 的取值需要满足式(13), 因此取 $R_1 = 3\ \Omega$, 此时依据式(11)可得 $C_1 = 3\ \mu\text{F}$ 。

3 仿真分析

基于MATLAB/Simulink, 搭建如图1所示的10 kV 直流线路, 基于上文的设计的参数进行仿真验证。具体仿真参数见表1。

表1 仿真参数

Table 1 The simulation parameters

元器件	参数
主线路电源电压 U_{dc}/kV	10
短路判定电路电源电压 U_c/kV	24
线路电阻 R_{line}/Ω	1
负载电阻 R_{load}/Ω	19
耦合电感 $L(L_1: L_2: M)/\text{mH}$	1:1:0.8
线路等效电感 L_{line}/mH	2.8
电阻 $R_1, R_2, R_3, R_4/\Omega$	3, 10, 9\,000, 1\,000
电容 $C_1, C_2, C_3/\mu\text{H}$	3, 20, 3
压敏电阻 MOV_1, MOV_2 额定电压 $U_{MOV1N}, U_{MOV2N}/\text{V}$	15\,000, 15
IGBT管 Q_1, Q_2 额定电压 $U_{Q1N}, U_{Q2N}/\text{V}$	16\,000, 15
Q_1, Q_2 导通的栅极电压 $U_{Q1G}, U_{Q2G}/\text{V}$	10, 10
二极管 D_1, D_2 最大耐受电压/ V	15

3.1 电路额定电流下的稳态运行仿真

稳态运行时线路部分元件电压与电流的波形见图11。图11中: $i_{line} = 499.875\text{ A}$ 为线路电流; $U_{T1} = 1.3\text{ V}$ 为晶闸管正向压降; $U_{Z1} = 13\text{ V}$ 大于 Q_1 的栅极开启电压, 因此 Q_1 导通; $U_{Q1} = 1.2\text{ V}$ 为 Q_1 的正向压降, 计算可得该断路器童泰损耗占比为0.025%; $U_{C3} = 10\text{ kV}$ 为存储在 C_3 中的电压能量; $U_{load} = 9\,497.625\text{ V}$ 为输送到负载上的电压, 有 $U_{load}/U_{dc} = 94.98\% > 93\%$, 符合工作要求。

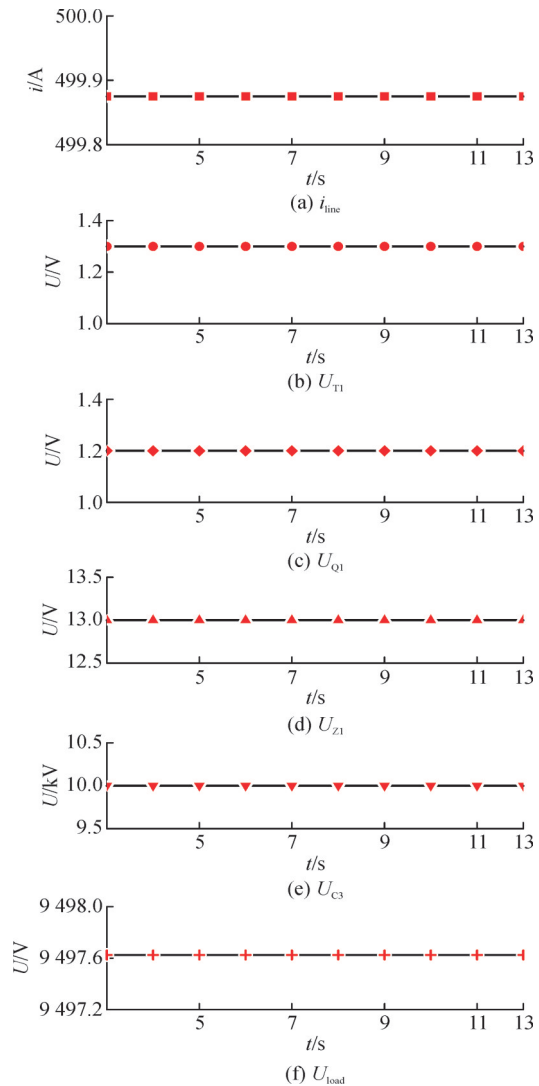


图11 稳态运行时线路部分元件电压与电流的波形

Fig. 11 Waveforms of voltage and current of major components during steady-state operation

由于文中设计的固态断路器是依靠电流的变化确定线路是否发生短路, 因此在设计参数时需要考虑不影响线路稳态运行时电流的正常波动。为了验证文设计的固态断路器不对电流的正常波动产生关闭动作, 以50 A为步长, 分别对电流波动-100、-50、50、100 A进行仿真, 仿真结果见图12。由图12可知, 当线路中添加或减少负载时的

电流波动能在 2 ms 内结束, 因此文中设计的固态断路器对线路中正常的电流波动没有阻碍作用。

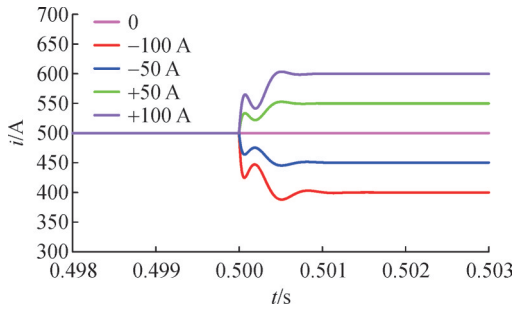


图 12 线路稳态运行时电流的正常波动的波形图

Fig. 12 Normal fluctuation of current during steady-state operation of DC transmission lines

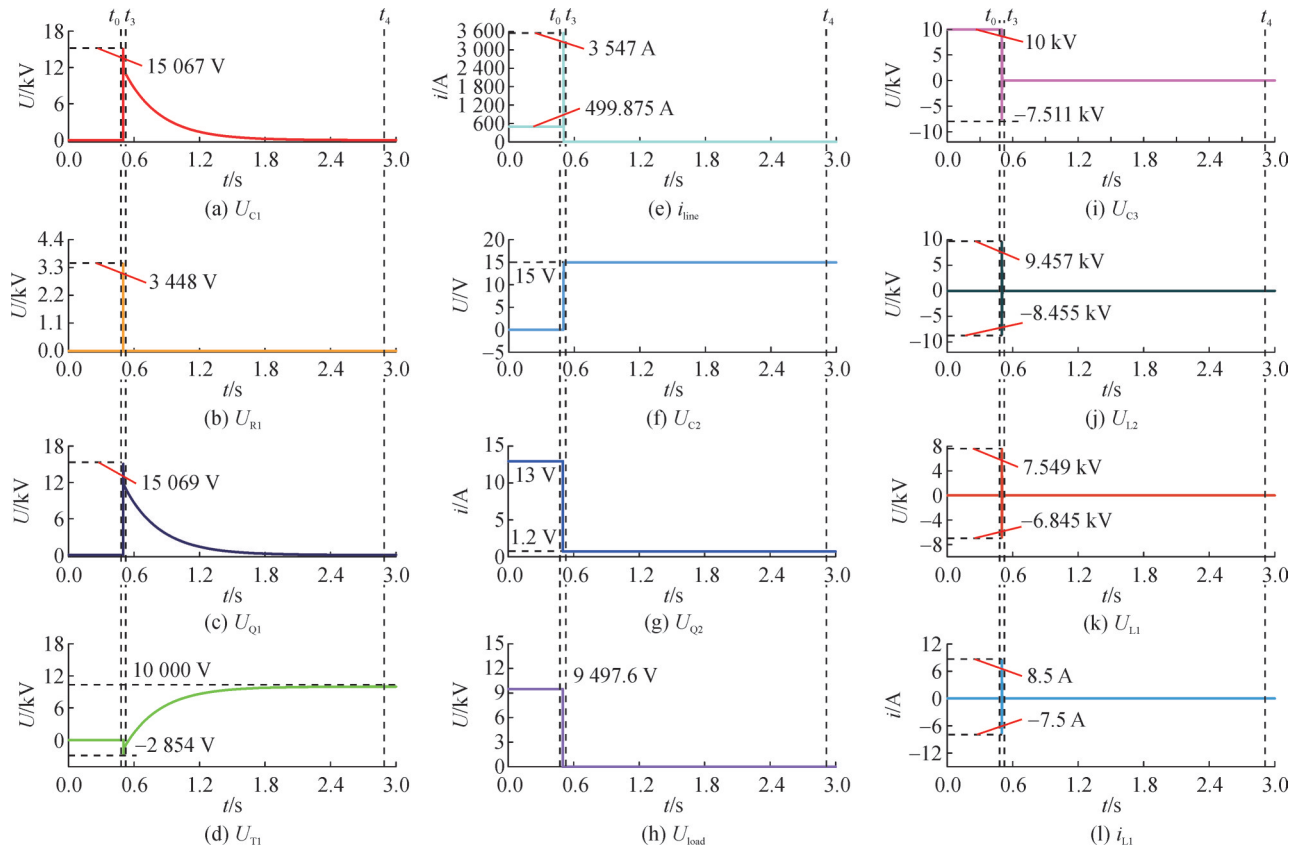


图 13 改进型 TIM-pack 开关直流固态断路器故障切除过程各元件电压电流波形(0~3 s)

Fig. 13 Waveforms of voltage and current of each component during fault removal of DC SSCB based on improved TIM-pack switch(0~3 s)

2) $t_1 = 0.501\ 04\ \text{s}$ 时 C_2 两端的电压 $U_{C2} = 10\ \text{V}$, 符合 $\Delta t_1 > 1\ \text{ms}$ 的要求, 此时 Q_2 导通、 Q_1 关断, 短路电流 i_{line} 达到 3 547 A 的最大值后开始下降, 同时向电容 C_3 充电。储存在 C_3 与耦合电感中的能量在 U_{C2} 达到 MOV_2 的额定电压 15 V 后被 MOV_2 与 R_4 吸收。

3) $t_2 = 0.501\ 07\ \text{s}$ 时 C_1 两端的电压达到最大值: $U_{C1} = 15\ 067\ \text{V}$, 压敏电阻 MOV_1 开始吸收短路能量, 短路电流 i_{line} 快速下降。

3.2 故障切除过程仿真

设置短路故障在 $t_0 = 0.5\ \text{s}$ 时发生, 短路点与断路器之间的输电线电阻为 $1\ \Omega$ 。仿真结果见图 13、14。图 13 为 0~3 s 的固态断路器故障切除过程各元件电压电流波形, 图 14 为 0.48~0.51 s 固态断路器故障切除过程各元件电压电流波形。

从图 13 与图 14 可以看出:

1) $t_0 = 0.5\ \text{s}$ 短路发生时, 负载电压 U_{load} 快速下降, 短路电流 i_{line} 激增, 电容 C_3 开始向电感 L_2 传递能量, 同时 L_1 产生感应电流 i_{L1} 向 C_2 充电。

4) $t_3 = 0.505\ \text{s}$ 时, 短路电流 i_{line} 已经减小至 0, 断路器成功的隔离了短路电流, 且由图 14 可知, 在 0.502 2 s 时刻短路电流已下降至线路额定电流(500 A)以下。随后电容 C_1 中存储的能量被 R_1 、 MOV_1 吸收, U_{Q1} 开始下降, 同时晶闸管 T_1 承受的电压 U_{T1} 开始上升。

5) $t_4 = 2.9\ \text{s}$ 时, $U_{Q1} = 0$, $U_{T1} = U_{\text{dc}} = 10\ \text{kV}$, 晶闸管 T_1 正向关断, 断路器完全进入关闭状态。

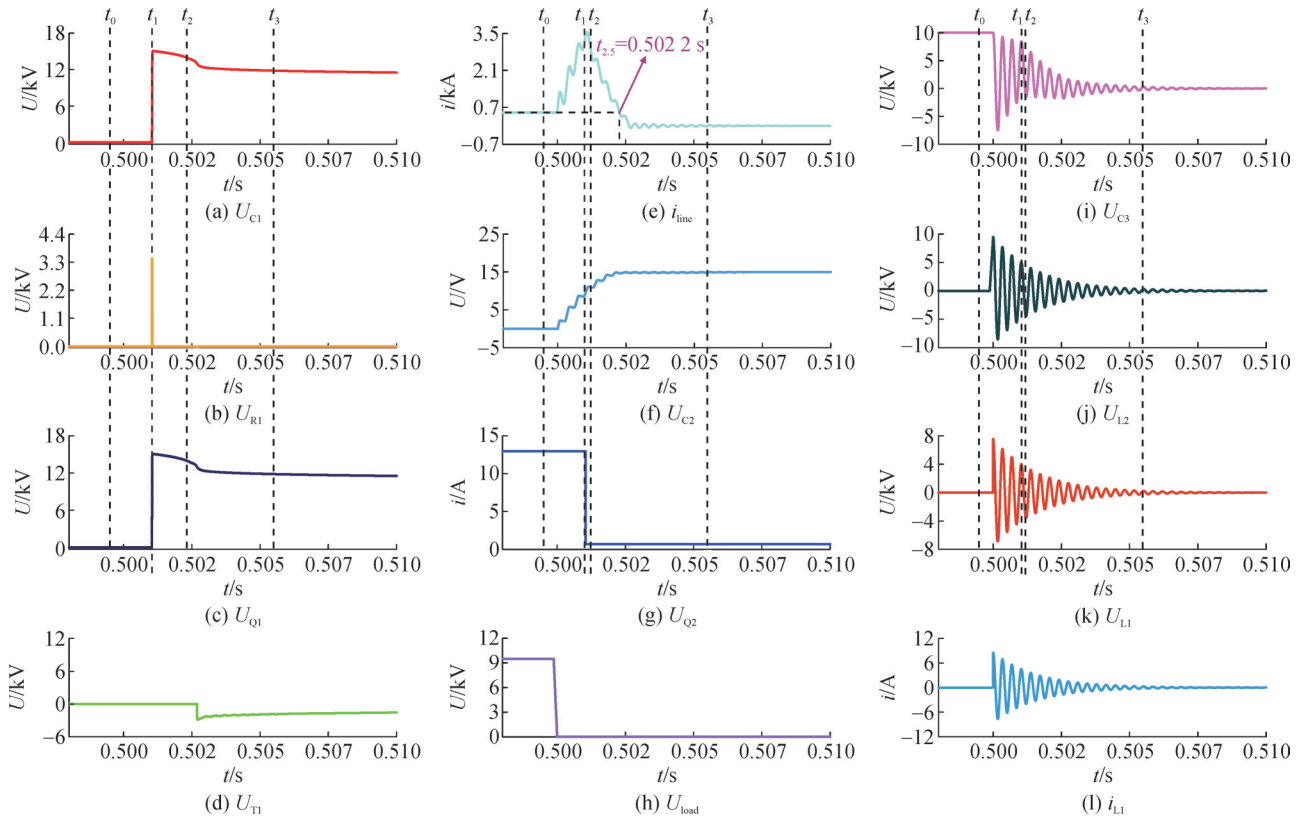


图14 改进型TIM-pack开关直流固态断路器故障切除过程各元件电压电流波形(0.48~0.51 s)

Fig. 14 Waveforms of voltage and current of each component during fault removal of DC SSCB based on improved TIM-pack switch(0.48~0.51 s)

仿真结果表明,文中设计的固态断路器在10 kV直流线路出现短路故障的第1.04 ms自行开启关闭线路的动作,在短路发生的第2.2 ms将故障电流限制到额定电流以下,并在故障发生5 ms内清除故障电流,对直流输电线路具有可靠的保护作用。

但是故障点不总是在线路最末端,因此每次发生故障时,不总有 $R_{line}=1\Omega$,故需要对各种情况下的 R_{line} 的值进行分析。以 0.2Ω 为步长分别模拟短路线路的 R_{line} 为0、0.2、0.4、0.6、0.8 Ω 情况下的断路器关断情况,不同 R_{line} 的取值对短路电流的影响见图15。短路发生在0.5 s。由图15可知,随着 R_{line} 的变小阻断短路电流的时间从5 ms逐渐上升到40 ms,造成这种现象的原因由式(12)可知: R_{line} 也具有吸收短路能量作用,吸收能量的速度随 R_{line} 的增大而变快。但无论 R_{line} 取何值文中设计的固态断路器都能将短路电流在2 ms内限制到额定电流以下,符合直流线路的保护要求。

3.3 对比分析

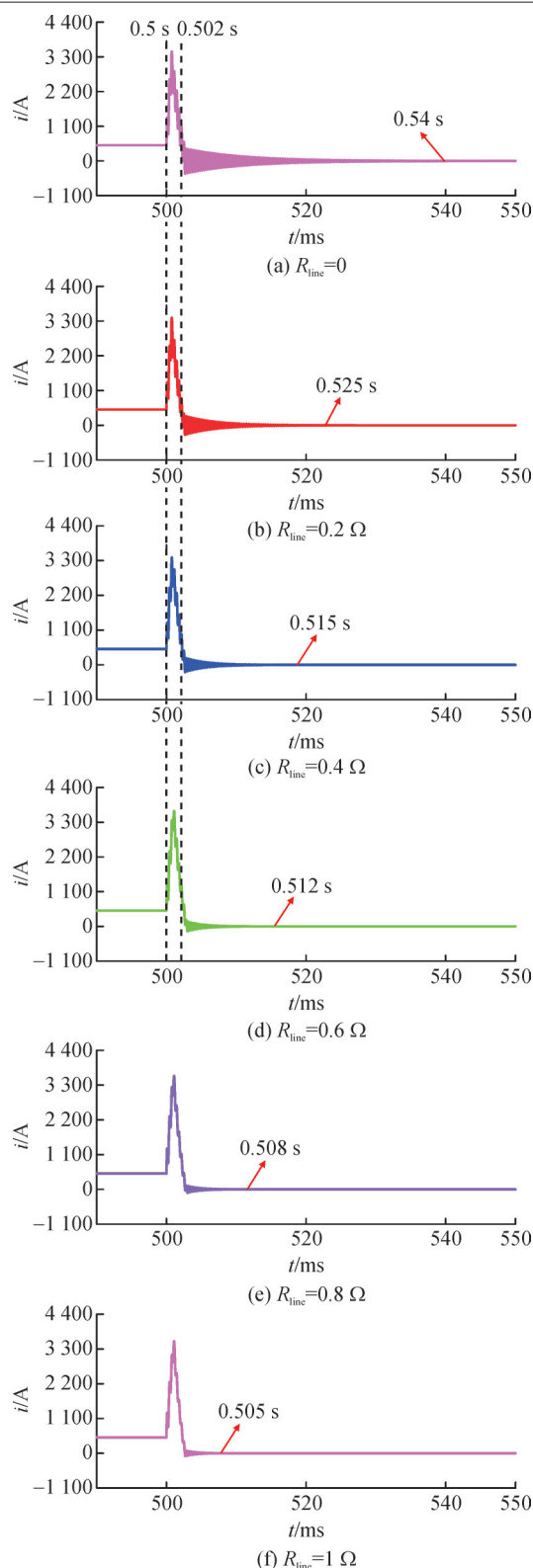
为深入研究文中所提具有自动隔离故障能力的直流固态断路器的性能,选取文[17]的传统TIM-

pack开关的直流固态断路器作为case1;文[16]的基于PMOS管的自取电直流固态断路器作为case2;文中所提的固态断路器作为case3,进行对比分析。

考虑到不同工作条件的输电线路对各固态断路器性能的影响不同,对比仿真均在10 kV/500 A的直流微电网下进行,故障设置发生在0.5 s,并且无自带短路判定功能的固态断路器设置在故障发生1 ms时进行保护动作;短路故障点与断路器间的输电线电阻设置为 $R_{line}=1\Omega$ 。仿真性能对比见图16、17。其中图16为故障电流对比,图17为故障切除时开关的电压变化对比。

在短路发生1 ms后,3种电路中的短路电流均上升至3 500 A左右,此时case2、case3自动开启关闭动作,而case1通过接收外部的短路监测装置发出的关闭信号开始进入关闭动作。

分断速度方面,case1、case3都能在5 ms内清除故障电流,而case2通过直接关闭主线路上的MOS管在100 μ s就切断了故障电流。但是通过图17可以发现,由于没有吸能装置,虽然使case2中的MOS管在切断故障时承受的尖峰电压达到 3×10^6 kV,这对MOS管的性能提出了巨大的要求,因此case2

图 15 不同 R_{line} 的取值下的短路电流变化波形Fig. 15 Waveforms of short-circuit current variation under different R_{line}

只能适用于低压直流系统。由于 case1 在开关管 IGBT 上并联了压敏电阻, 可以吸收部分短路能量, 但是没有考虑到压敏电阻有启动时间, 导致在关断时 IGBT 仍需要承受 20.5 kV 的峰值电压。相比之

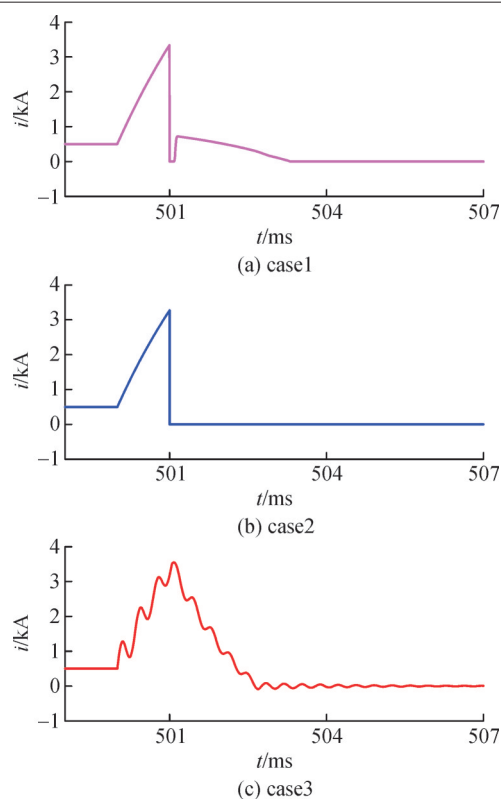


图 16 故障电流对比

Fig. 16 Fault current comparison

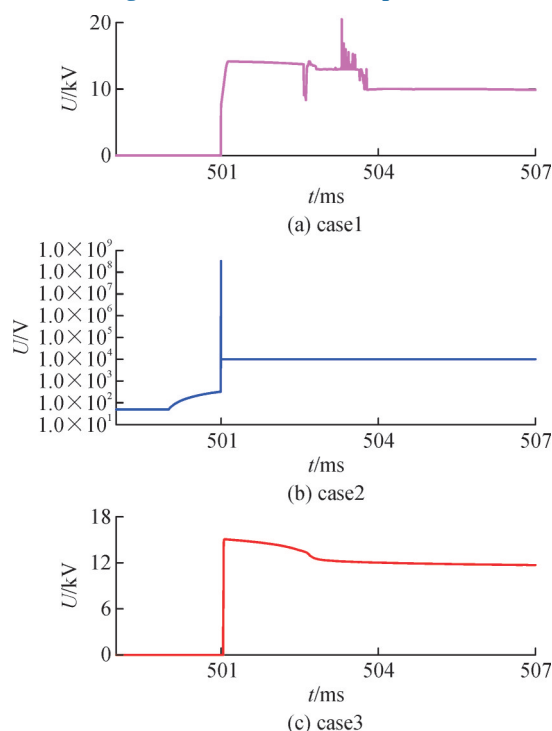


图 17 故障切除时开关的电压变化

Fig. 17 Voltage change of the switch during fault removal

下, 文中设计的 case3 开关管所承受的峰值电压仅为 15 kV, 大幅减小对开关管额定电压的要求(为基于 TIM-pack 开关的固态断路器的 73.1%), 以及降低了固态断路器的工程实现难度。

4 结语

文中提出了一种具有自动隔离故障能力的直流固态断路器。对其工作状态与原理进行了分析,并给出了相关参数的设计方法。通过仿真表明:该固态断路器在电路正常运行时不影响负载的正常工作;当线路短路故障发生时,该断路器能在2 ms内自动将故障电流限制在额定电流以下,在5 ms实现线路关断,并且开关管所承受的峰值电压仅为TIM-pack开关的73.1%,综上所述,文中设计的固态断路器具有短路响应速度快和开关关断时承受的峰值电压小的优点,满足直流微电网保护的需求。

参考文献:

- [1] Xu Xiaohui, Ye Jiamin, Wang Yu, et al. Design of a reliable bidirectional solid-state circuit breaker for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7200-7208.
- [2] 裴翔羽, 贾重霄, 周万迪, 等. 基于可控振荡的电流注入型混合式直流断路器[J]. 电工技术学报, 2025, 40(2): 625-639.
Pei Xiangyu, Jia Zhongxiao, Zhou Wandi, et al. Controllable oscillation-based current injection hybrid DC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 625-639.
- [3] 王顺亮, 李明, 辛清明, 等. 具备快速重合闸能力的低损耗低成本双向固态式直流断路器[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 128-138.
Wang Shunliang, Li Ming, Xin Qingming, et al. A low-cost bidirectional solid-state DC circuit breaker with low power loss and fast-reclosing capability[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 128-138.
- [4] Rezakallal M, Singh S, Singh B, et al. Implementation of two-level coordinated control for seamless transfer in standalone microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 1057-1068.
- [5] Peng Jiangkai, Fan Bo, Liu Wenxin. Voltage-based distributed optimal control for generation cost minimization and bounded bus voltage regulation in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 106-116.
- [6] 李斌, 王晨阳, 何佳伟, 等. 自适应限流型固态断路器的直流电源设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 30-37.
Li Bin, Wang Chenyang, He Jiawei, et al. Design of DC power supply for self-adaptive current-limiting solid-state circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 30-37.
- [7] 裴翔羽, 汤广福, 庞辉, 等. 柔性直流电网线路保护与直流断路器优化协调配合策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(s1): 11-18.
Pei Xiangyu, Tang Guangfu, Pang Hui, et al. Study on optimized coordination strategies between line protection and DC breakers for VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(s1): 11-18.
- [8] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系

统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.

- Li Hui, Liu Dong, Yao Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [9] 陈晓龙, 周宁, 韩小文, 等. 一种具备自适应重合闸能力的混合式直流断路器[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4718-4728.
Chen Xiaolong, Zhou Ning, Han Xiaowen, et al. A hybrid DC circuit breaker with adaptive reclosing ability[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4718-4728.
- [10] 苟方杰, 王忠飞, 邱东, 等. 具备低幅值振荡电流和重合检测功能的晶闸管型混合式直流断路器[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(6): 164-174.
Gou Fangjie, Wang Zhongfei, Qiu Dong, et al. Thyristor-based hybrid DC circuit breaker with low-amplitude oscillation current and reclosing detection function[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(6): 164-174.
- [11] Lazzari R, Piegari L. Design and implementation of LVDC hybrid circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7369-7380.
- [12] 王伟, 帅智康, 李杨, 等. 基于固态断路器主动注入式直流故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2360-2370.
Wang Wei, Shuai Zhikang, Li Yang, et al. Active injection dc fault location method based on solid state circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2360-2370.
- [13] 吴鑫, 陶闯闯, 王景帅, 等. 低压直流固态断路器关键技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2024(1): 1-5.
Wu Xin, Tao Chuangchuang, Wang Jingshuai, et al. Research on key technology of low voltage DC solid state circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024(1): 1-5.
- [14] 何东, 李俊桦, 兰征, 等. 寄生参数对基于常通型SiC JFET器件的中压直流固态断路器过电压的影响及抑制方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 19-29.
He Dong, Li Junhua, Lan Zheng, et al. Influence of parasitic parameters on overvoltage of medium voltage DC solid state circuit breaker based on normally-on SiC JFET devices and its suppression method[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 19-29.
- [15] 彭兆伟, 黄诗洋, 牛铮, 等. 直流断路器工况下IGCT电流分布随温度变化实验研究[J]. 电子设计工程, 2025, 33(23): 147-151.
Peng Zhaowei, Huang Shiyang, Niu Zheng, et al. Experimental study on the current distribution of IGCT with temperature variation under DC circuit breaker operating conditions[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(23): 147-151.
- [16] 彭宇航, 王鹿军, 田爱娜, 等. 基于PMOS的自取电直流固态断路器[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1304-1313.
Peng Yuhang, Wang Lujun, Tian Aina, et al. Self-powered DC solid-state circuit breakers based on PMOS[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1304-1313.
- [17] Kheirollahi R, Zhao Shuyan, Zhang Hua, et al. Fault current bypass-based DC SSCB using TIM-pack switch[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 4300-4304.
- [18] 王静, 张菁. 压敏电阻静电放电防护性能测试与研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(17): 94-97.

(下转第31页)

- Science and Technology, 2019, 28(6): 065012.
- [15] Konjević N, Jovičević S, Ivković M. Optical emission spectroscopy for simultaneous measurement of plasma electron density and temperature in a low - pressure microwave induced plasma[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(10): 103501.
- [16] Reader J. Optimizing czerny - turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing[J]. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(9): 1189.
- [17] Parigger C G. Atomic and molecular emissions in laser - induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica acta. Part B: Atomic Spectroscopy, 2013(79-80): 4-16.
- [18] Milosavljević V, Djenize S. Measured stark widths and shifts of NII, NIII and NIV spectral lines[J]. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 1998, 128(1): 197-201.
- [19] Harilal S S, Bindhu C V, Issac R C, et al. Electron density and temperature measurements in a laser produced carbon plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(5): 2140-2146.
- [20] Yang Lin, Tan Xiaohua, Wan Xiang, et al. Stark broadening for diagnostics of the electron density in non - equilibrium plasma utilizing isotope hydrogen alpha lines[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(16): 163106.
- [21] Gröger S, Ramakers M, Hamme M, et al. Characterization of a nitrogen gliding arc plasmatron using optical emission spectroscopy and high-speed camera[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2019, 52(6): 065201.
- [22] Shi Songyue, Finch K, She Yue, et al. Development of abel's inversion method to extract radially resolved optical emission maps from spectral data cubes collected via push-broom hyperspectral imaging with sub-pixel shifting sampling[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2020, 35(1): 117-125.
- [23] Killer C. Abel inversion algorithm[EB/OL]. [2026 - 04 - 16]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/43639-abel-inversion-algorithm>.
- [24] Kühn-Kauffeldt M. Plasma spectroscopy for stationary and transient welding arcs containing metal-gas mixtures[D]. München: Universität der Bundeswehr, 2016.
- [25] Schreier F. Comments on 'a common misunderstanding about the voigt line profile'[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(6): 1860-1864.
- [26] Huang Xianglei, Yung Y L. A common misunderstanding about the voigt line profile[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2004, 61(13): 1630-1632.
- [27] Predoi C A, Bouanich J P, Benner D C, et al. Broadening, shifting, and line asymmetries in the 2←0 band of CO and CO - N₂: experimental results and theoretical calculations[J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(1): 58-168.
- [28] Soukhanovskii V A, Johnson D W, Kaita R, et al. Electron density measurements in the national spherical torus experiment detached divertor region using stark broadening of deuterium infrared paschen emission lines[J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 10F127.
- [29] 刘广义, 曹 蕤, 卢 阳, 等. 发射光谱法诊断空气电弧的稳态电子密度分布[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 144-150.
- Liu Guangyi, Cao Rui, Lu Yang, et al. Diagnosis of steady state electron density distribution in air arc by emission spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 144-150.
- 肖剑桥(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为开关电弧光学诊断方法。
- 孙 昊(1988—), 男, 教授, 研究方向为电力开关装备开断技术(通信作者)(E-mail: sunhao1031@xjtu.edu.cn)
-
- (上接第 24 页)
- Wang Jing, Zhang Jing. The performance testing and research of varistor electrostatic discharge protective[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(17): 94-97.
- [19] Ejiri H, Kumada A. Transient recovery voltage in direct current circuit breaker with active current injection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3278-3281.
- [20] 潘 垣, 袁 召, 陈立学, 等. 耦合型机械式高压直流断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7113-7120.
- Pan Yuan, Yuan Zhao, Chen Lixue, et al. Research on the coupling mechanical high voltage DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7113-7120.
- [21] 李越欢, 李 格. 压敏电阻器国内自愿认证标准换版解析[J]. 质量与认证, 2023(1): 58-60.
- Li Yuehuan, Li Ge. Analysis of the replacement of domestic voluntary certification standards for varistors[J]. China Quality Certification, 2023(1): 58-60.
- [22] 翟少磊, 张学志, 段 怡, 等. 基于交直流微电网的智慧能源站拓扑结构研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 28-34.
- Zhai Shaolei, Zhang Xuezhi, Duan Yi, et al. Topology structure of smart energy station based on AC/DC microgrid[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 28-34.
- [23] 王毅钊, 王晓卫, 魏向向, 等. 基于故障电流变化趋势的有源配网高阻故障检测[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(3): 78-84.
- Wang Yizhao, Wang Xiaowei, Wei Xiangxiang, et al. High - impedance fault detection based on arc changing tendency for active distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 78-84.
- [24] 张东进, 何柏娜, 程 婷, 等. 基于振荡回路的光伏直流断路器拓扑结构设计[J]. 供用电, 2024, 41(6): 97-107.
- Zhang Dongjin, He Baina, Cheng Ting, et al. Topology design of photovoltaic DC circuit breaker based on oscillation circuit[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(6): 97-107.
- [25] 孔令哲, 何柏娜, 李 辉, 等. 低压直流断路器拓扑参数对燃弧时长影响研究[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 39-46.
- Kong Lingzhe, He Baina, Li Hui, et al. Research on the influence of topology parameters of low - voltage DC circuit breaker on arcing duration[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 39-46.
- [26] 孙曙光, 魏 硕, 王景芹, 等. 基于深度学习的万能式断路器剩余寿命预测优化方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(5): 200-207.
- Sun Shuguang, Wei Shuo, Wang Jingqin, et al. Optimization method for remaining life prediction of conventional circuit breaker based on deep learning[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(5): 200-207.
- 吴铁洲(1966—), 男, 教授, 研究方向为电力系统分析及保护(E-mail: wtz315@163.com)。
- 赵 瑞(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流系统安全预警及保护(通信作者)(E-mail: 863857342@qq.com)。