

DOI: 10.7667/PSPC161078

短路故障下直流固态断路器缓冲电路的设计

冯 锐¹, 杨 娅², 陈 超¹, 熊晓琪¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网湖北省电力公司黄石供电公司, 湖北 黄石 435000)

摘要: 在低压直流微电网发生短路故障时, 直流固态断路器(Solid-state circuit breaker, SSCB)可以快速有效地将故障区域隔离, 然而它自身的安全可靠性依赖于缓冲电路。由于 SSCB 上的缓冲电路的侧重点是过电压抑制能力和故障能量的快速吸收, 而不是减少缓冲电路的损耗, 所以不能直接使用适用于变换器器件的传统缓冲电路设计方法。因此, 提出一种拥有过电压抑制能力的 SSCB 缓冲电路的设计方法。针对放电阻止型 RCD 缓冲电路进行保护动作后缓冲机理分析, 选定三种性能指标并给出详细的参数设计步骤, 然后选定工况计算出合适的缓冲参数。最后通过实验验证了上述分析结果的正确性和放电阻止型缓冲电路的有效性。

关键词: 短路故障; 直流固态断路器; 放电阻止型 RCD; 缓冲电路; 过电压抑制

Design of snubber circuit for DC solid-state circuit breaker in short-circuit fault

FENG Kun¹, YANG Hua², CHEN Chao¹, XIONG Xiaoqi¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Huangshi Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Huangshi 435000, China)

Abstract: Under a short-circuit fault in low-voltage DC microgrid, the Solid-State Circuit Breaker (SSCB) can isolate the faulted area quickly and effectively, while its own safety and reliability depends on the snubber circuit. For the design of the snubber, however, traditional method suited for snubber of converter device cannot be directly applied, because the snubber for circuit breaker puts more stress on its overvoltage suppression and rapid absorption of fault energy instead of snubber loss reduction. Therefore, this paper proposes a design method for SSCB snubber circuit with overvoltage suppression ability. The snubber mechanism of discharge-suppressing type RCD snubber circuit after protection action is analyzed. Three performance indicators are selected and a detailed procedure for parameter design is proposed, then suitable snubber parameters are calculated after selecting working condition. Experiments are conducted finally to verify the correctness of the above analysis results and effectiveness of the discharge-suppressing type RCD snubber circuit.

This work is supported by Science and Technology Support Program of Hubei Province (No. 2015BAA109).

Key words: short-circuit fault; DC solid-state circuit breaker; discharge-suppressing type RCD; snubber circuit; overvoltage suppression

0 引言

直流固态断路器(Solid-state circuit breaker, SSCB)因其快速的开关速度和高压阻断能力普遍应用于高压直流输电(HVDC)中^[1-3], 其对低压直流线路也有效。因为低压直流微电网在发生母线故障时需要这样的断路器^[4-6], 所以 SSCB 也开始应用于低压直流微电网^[7-8]。然而, 在故障切除时, 快速下降的故障电流会在 SSCB 两端产生过电压, 过电压会使 SSCB

失效, 甚至可以毁坏 SSCB 里的敏感器件^[9]。因此拥有过电压能力的缓冲电路对于 SSCB 是否有效关断是非常重要的^[10]。

压敏电阻已经作为固态断路器缓冲电路在使用, 但没有在一个上百伏等级的系统中做过实验证实其有效性^[11-12]。传统 RCD 电路主要用于变换器开关的缓冲电路, 其侧重于减少缓冲电路的损耗和快速抑制能力, 故设计方法不能直接用于 SSCB 缓冲电路。SSCB 缓冲电路起的主要作用是过电压抑制能力和故障能量的快速吸收^[13-14]。为实现上述目标, 本文将开展以下工作: 选定工况下最合适的

RCD 缓冲电路拓扑, 并进行短路故障时的缓冲机理分析、指标选取、参数设计。

1 直流微电网线路模型及短路故障

1.1 直流母线等效模型

如图 1 所示是低压直流环形微电网中端口与直流母线之间等效电路, 由于本文所研究的直流微电网的故障分析是在直流线路中点模拟故障, 所以采用两个一样的双极性直流线路 π 型等值链型电路串联来模拟该直流线路^[15]。R 代表线路等效电阻, L 代表线路等效电感, C 代表线路等效电容。在等效电路两端的 SSCB 由两个反串联且自带反并联二极管的 IGBT 组成。如图 1 中所示 F1 是单极接地故障、F2 是极间短路故障, 由于极间短路故障对系统的影响较大, 甚至可以引起系统的崩溃, 所以本文主要探讨直流母线极间短路故障。

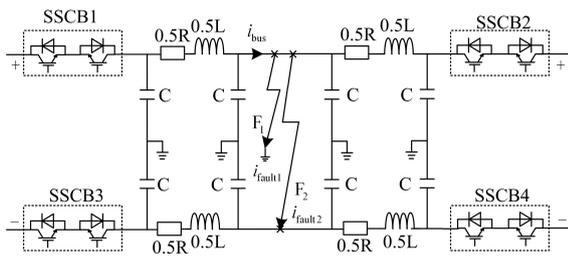


图 1 直流母线 π 型等效电路及短路故障类型

Fig. 1 π equivalent circuit and short-circuit fault types of DC bus

1.2 直流母线短路故障时 SSCB 动作时刻定义

图 2 所示为在直流母线故障中故障清除和 SSCB 重合闸的过程中的时间轴的定义。将延时时间定义为 t_{delay} , 代表着在故障发生之后控制器检测故障和将断开信号传送给正向 IGBT 的时间。当 SSCB 响应关断信号时, 故障隔离开始, 直到故障电流降为零, 此时两个 SSCB 共同承担直流母线电压, 则有 $i_{bus}=0, u_{SSCB}=0.5u_{DC}$ 。在此将故障清除的时间定义为 t_{SS} , 将 SSCB 重合闸的时间定义为 $T_{reclose}$ 。

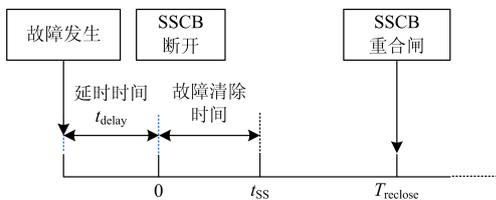


图 2 故障发生后时间轴的定义

Fig. 2 Definition of the timeline after fault clearing

当故障隔离的时候, 快速下降的故障电流会在 SSCB 两端形成过电压, 如果不采取措施, 这个过电压会导致 SSCB 失效。因此, 对于 SSCB 来说, 拥有过电压抑制能力的缓冲电路, 是确保其能安全断开的保障。

2 放电阻止型 RCD 缓冲电路机理分析

在 RCD 缓冲电路中, 当使用在过电压抑制和故障能量的快速吸收时, 放电阻止型缓冲电路是非常合适的选择, 所以在本文中作为主要的研究对象。图 3 中是放电阻止型缓冲电路的拓扑, 在此假定左边为输入, 右边为输出, 所以只在正向 IGBT 上画了缓冲电路。

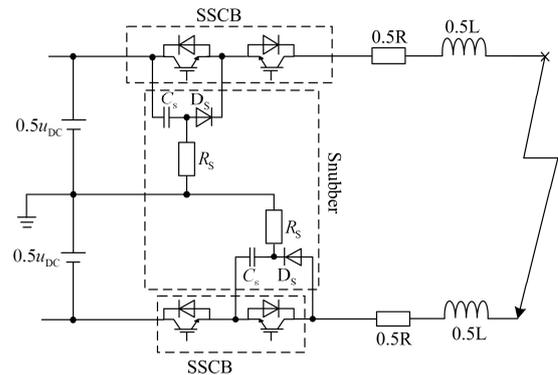


图 3 SSCB 的缓冲电路-放电阻止型

Fig. 3 SSCB snubber circuits-discharge-suppressing type

为了简化分析, 在此假设:

(1) 两个缓冲电容的两端的电压值是一样的:

$$u_{Cs1}=u_{Cs2}=u_{Cs};$$

(2) 忽略掉缓冲二极管上的通态电阻: $R_{on}=0$;

(3) 忽略掉 IGBT 两端的通态压降: $V_{CEon}=0$;

(4) 在 IGBT 断开的瞬间时设定: $t=0$;

(5) 忽略等效直流线路上的线路电容: $C=0$;

如图 4 所示的是放电阻止型缓冲电路的缓冲过程的时间轴, 在图 5 中所示的是放电阻止缓冲型缓冲电路的缓冲过程三个阶段等效电路, 其中阶段 3 分成两个部分。

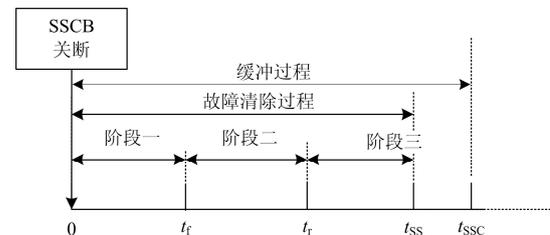


图 4 故障清除的三个阶段

Fig. 4 Three stages of the fault clearing

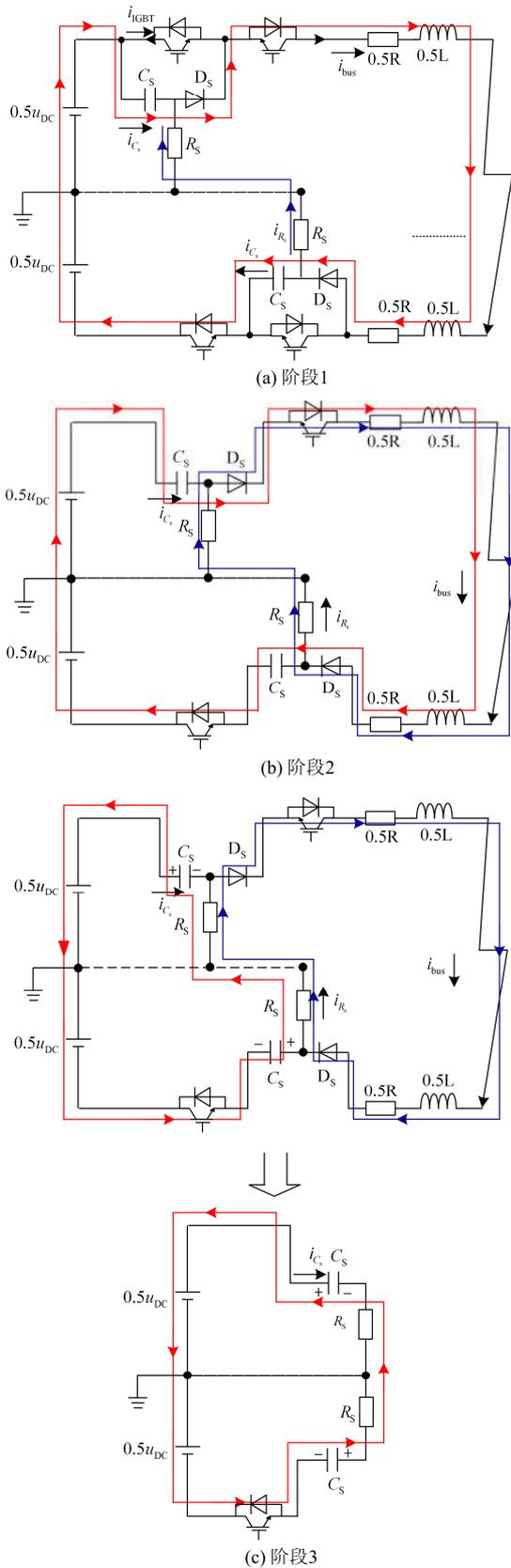


图 5 放电阻止型缓冲电路的缓冲过程

Fig. 5 Snubber process of discharge-suppressing type

在 SSCB 断开之前, u_{C_s} 的值等于 $0.5u_{DC}$ 。因此, 在阶段 1 结束时, 即阶段 2 开始的时候, i_{C_s} 和 u_{C_s} 可以表示为

$$\begin{cases} i_{C_s}(t_f) = I_{bus} \\ u_{C_s}(t_f) = \frac{1}{2}u_{DC} \end{cases} \quad (1)$$

上式说明了放电阻止型缓冲电路的缓冲电容会有较高的初始电压。在阶段 2 时, 放电阻止型缓冲电路允许部分故障电流流向缓冲电阻 R_S 支路, 来减轻缓冲电容 C_S 负担的。当 u_{C_s} 达到它的峰值的时候, i_{C_s} 降到零, 随后阶段 3 开始。在阶段 3 时, L 和 C_S 都将储存的能量释放给 R_S 。阶段 3 的初始条件如下:

$$\begin{cases} t_r = \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\omega}{\alpha} + t_f \\ i_{C_s}(t_r) = 0 \\ u_{C_s}(t_r) = U_{C_{spk}} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{R}{2L} + \frac{1}{2R_S C_S}, B = \frac{1}{2}u_{DC} \omega = \sqrt{\frac{2}{LC_S} + \frac{R}{LR_S C_S} - \alpha^2}。$$

在阶段 3 时, 在 L 完成放电之前, 电流流通的线路保持不变。 i_{C_s} 的绝对值上升, i_{bus} 而在下降, 直到 i_{bus} 降到零, 此时就是阶段 3 的第二部分的开始, 此时的初始条件是:

$$\begin{cases} t_{SS} = \frac{1}{\omega} \arctan \frac{\omega}{\alpha - \frac{1}{R_S C_S}} + t_f \\ i_{C_s}(t_{SS}) = i_{R_S}(t_{SS}) \end{cases} \quad (3)$$

在阶段 3 的第二部分, 如图 5(c)所示, 缓冲二极管阻止了右半边电流的流通, 所以电流只能在左半边电路流通。 u_{SSCB} 的表达式为

$$u_{SSCB}(t) = \begin{cases} \frac{u_{DC}}{2}t & 0 \leq t < t_f \\ Ae^{-\alpha(t-t_f)} \sin \omega(t-t_f) + B & t_f \leq t < t_{SS} \\ \frac{1}{2}u_{DC} & t \geq t_{SS} \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} + \frac{1}{2R_S C_S}, \omega = \sqrt{\frac{2}{LC_S} + \frac{R}{LR_S C_S} - \alpha^2},$$

$$B = \frac{1}{2}u_{DC}$$

$$A = \frac{I_{bus}}{\omega C_S}$$

$$t_{SS} = \frac{\pi}{\omega} + t_f,$$

3 缓冲电路性能指标的选取

对 SSCB 的缓冲电路提出以下要求:

- (1) 在低电压中等容量的应用场合里有较高的可靠性;
- (2) 确保 SSCB 在故障切除时, SSCB 受到最小的过电压冲击;
- (3) 缓冲过程在 SSCB 重合闸之前结束;
- (4) 体积小和成本低。

根据上述要求,选取一些缓冲电路的性能指标。首先,缓冲电路的最重要的任务就是将 SSCB 的电压峰值限制在一定的范围内,这样定义 SSCB 的峰值电压为 U_{pk} ,它代表的是缓冲电路的过电压抑制能力,是主要的指标。 U_{pk} 的表达式为

$$U_{pk} = u_{SSCB}(t_r) = \frac{\omega}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} A e^{\frac{-\alpha \arctan \frac{\omega}{\alpha}}{\omega}} + B \quad (5)$$

除此之外,整个缓冲过程需要在 SSCB 重合闸之前完成,这就意味着在 SSCB 重合闸时缓冲电路和直流线路上是没有电流流过的。对于放电阻止性缓冲电路,线路电流要流过缓冲电容和缓冲电阻, i_{bus} 可能比 i_c 早稳定到 0 A,所以 $t_{SS} \leq t_{SSC}$ 。因此为了确保缓冲过程在 SSCB 重合闸之前完成, t_{SSC} 应该比重合闸的时间 $T_{reclse}=(0.2\sim 0.5 \text{ s})$ 短一些,所以将其选为第二个指标。它的表达式为

$$t_{SSC} = \frac{\pi}{\omega} + (3 \sim 5)R_S C_S \quad (6)$$

这里将放电阻止型缓冲电路的稳态时间 t_{SSC} 定义成为直流线路达到 0 A 时的时间。

缓冲电路的成本和体积大小也是考虑这个缓冲电路是否合适的因素。缓冲电容的容值和峰值电压是决定了缓冲电路的体积大小的因素之一,缓冲电容的峰值电压 U_{CSpk} 与 SSCB 峰值电压 U_{pk} 相等,是考虑的指标之一,另一个需考虑的指标是缓冲电容的容值 C_S 。

综上所述,在此选定的 RCD 缓冲电路的三种评价指标如下。

- (1) SSCB 的峰值电压: U_{pk} (主要指标);
- (2) SSCB 的缓冲电路达到稳态的时间 t_{SSC} ;
- (3) 缓冲电容的容值 C_S ;

4 缓冲电路的参数设计和性能指标

为了设计 RCD 缓冲电路的参数,需要以下的电路参数:线路电感 L ;线路等值电阻 R ;直流母线电压 u_{DC} ;额定线路电流 I_e ;延迟时间 t_{delay} ; IGBT 的断开所需要的时间 t_f ; SSCB 最短重合闸时间 T_{reclse} ;在 SSCB 重合闸时 IGBT 所允许通过的峰值

电流 I_m ; SSCB 两端所允许的最大电压值 U_{max} ; U_{max} 设定在 $1.5U_f$ 。放电阻止型缓冲电路的参考电压值设定为 $U_f=0.5u_{DC}$ 。在参数设计时,假设这些参数为常量。设计过程如下所述。

(1) I_{bus} 。在故障发生之后,SSCB 断开之前,线路电流开始上升。则在 SSCB 关断时线路电流 I_{bus} 可以表示为

$$I_{bus} = -\left(\frac{u_{DC}}{R} - I_e\right)e^{-\frac{R}{L}t_{delay}} + \frac{u_{DC}}{R} \quad (7)$$

(2) R_S 。通过缓冲电阻的最大电流值是在 $t=tr$ 时达到的,可以由下面的式子得到。

$$I_{RSM} = i_{R_S}(t_r) = i_{D_S}(t_r) = \alpha_R I_{bus} \quad (8)$$

$$t_r = \frac{I_{bus} - I_{RSM}}{I_{bus}} t_{SS0} = (1 - \alpha_R) t_{SS0} \quad (0 < \alpha_R < 1)$$

其中 t_{SS0} 表示人工设定的线路电流第一次为零的时间,所以 t_{SS0} 要比 T_{reclse} 小。 R_S 可以由下式得到:

$$R_S = \frac{U_{max} - \frac{u_{DC}}{2}}{\alpha_R I_{bus}} \quad (9)$$

在此需要根据常用的阻值来给 α_R 选定一个接近于 1 的确定的值,之后可以得到 R_S 的值。

(3) C_S 。缓冲电容的容值可以用能量守恒定律计算,在这里忽略 R 上消耗的能量,则 C_S 可以表示为

$$C_S = \alpha_C C_{S0} = \alpha_C \frac{\frac{1}{2}L(I_{bus}^2 - I_{RSM}^2) - \frac{2}{3}t_r R_S I_{RSM}^2}{U_{max}^2 - \left(\frac{u_{DC}}{2}\right)^2} \quad (10)$$

α_C 是接近于 1 的一个值,要根据常用的电容值来给 α_C 选择一个确定的值,之后才可以得到 C_S 的值。

(4) 当 C_S 和 R_S 的值确定以后,就可以得出 I_{bus} 的表达式。 t_{SS} 表示实际求出的线路电流第一次等于零的时间,如果式(11)成立,则继续第(5)步,如果不成立,则回到第(2)步,改变 t_{SS0} 的值,让 t_{SS0} 的值接近 t_{SS} 的值。

$$\left| \frac{t_{SS0} - t_{SS}}{t_{SS}} \right| \leq 10\% \quad (11)$$

(5) 当 C_S 和 R_S 的值确定以后,就可以得到 u_{SSCB} 表达式,则 SSCB 两端电压的峰值电压 U_{pk} 可以得出。如果式(12)成立,则可以选定的缓冲电容 C_S 所承受最大电压: $U_{Cs}=(1.2\sim 1.5)U_{pk}$,继续第(6)步;如果式(12)不成立,则要回到第(2)步改变 α_R 的值,再代入式(12)中,直到其成立。

$$\frac{U_{pk} - U_{max}}{U_{max}} \leq 20\% \quad (12)$$

(6) t_{SSC} 。 t_{SSC} 可以表示为

$$t_{SSC} = \frac{\pi}{\omega_2} + (3 \sim 5)R_S C_S \quad (13)$$

如果 $t_{SSC} < T_{reclose}$, 则继续第(7)步, 如果 $t_{SSC} \geq T_{reclose}$, 则回到第二步改变 α_R 的值。

(7) I_{DSM} 。 I_{DSM} 是缓冲二极管的最大正向浪涌电流, 而且在线路电流换流结束之后与线路电流相等, 可以用下式表示。

$$I_{DSM} = I_{bus} \quad (14)$$

先选定缓冲电路的使用工况, 设计直流母线电压为 $\pm 200 \text{ V}$, 将 SSCB 串联在直流母线上, SSCB 的额定电流为 6.7 A 。线路等效电感 L 为 2 mH , 线路等效电阻 R 为 1Ω 。在此使用上述参数设计方法设计出的缓冲参数如表 1 所示。

表 1 缓冲电路的缓冲参数

Table 1 Parameter of snubber circuit

参数	理论值
$C_S/\mu\text{F}$	4.7
U_{CS}/V	300
R_S/Ω	5

5 实验验证

5.1 实验平台及测试点介绍

为了验证放电阻止型 RCD 缓冲电路的缓冲效果是否如上述结论所言, 在实验室搭建实验平台, 实验参数如表 1、表 2 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameter

名称	参数
直流母线电压	$\pm 200 \text{ V}$
负载电阻	60Ω
线路 π 型等效电阻 R	1Ω
线路 π 型等效电感 L	2 mH
线路 π 型等效电容 C	$0.22 \mu\text{F}$

5.2 实验波形及结论

如图 6 所示, 当母线极间故障发生之后, 如果 SSCB 没有成功关断, i_{bus} 一直上升到 100 A 以上才在直流电压源的过电流保护下迫使 u_{DC} 和 i_{bus} 下降, 因此只靠直流电压源的过电流保护来保护母线极间故障是远远不够的。

如图 7 所示, 是母线极间故障发生后, SSCB 切断后两种缓冲电路 i_{bus} 和 u_{SSCB} 的波形。图 7 中的 $u_{GE}(T_1)$ 表示 SSCB 的驱动信号, 从高电平到低电平表示 SSCB 断开; $u_{GE}(T_5)$ 表示短路 IGBT 的驱动信

号, 从低电平到高电平表示母线极间故障的发生, 所以在这里用 $u_{GE}(T_1)$ 和 $u_{GE}(T_5)$ 标记故障发生的时间和 SSCB 断开的时刻。

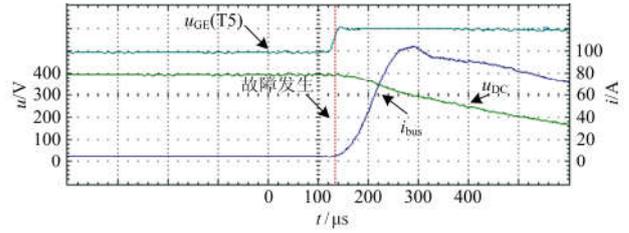


图 6 直流母线发生故障时不加隔离时的波形

Fig. 6 Prospective current at DC bus fault without fault interruption

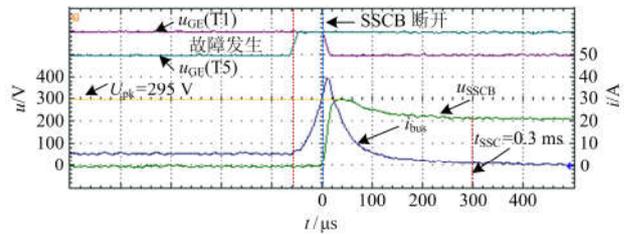


图 7 i_{bus} 和 u_{SSCB} 的波形

Fig. 7 Oscillograms of i_{bus} and u_{SSCB}

从图 7 中可以看出放电阻止型缓冲电路 SSCB 两端电压的峰值为 295 V , 稳态时间 t_{SSC} 分别为 0.3 ms , 这与缓冲电路过电压抑制能力理论计算结论相符合。

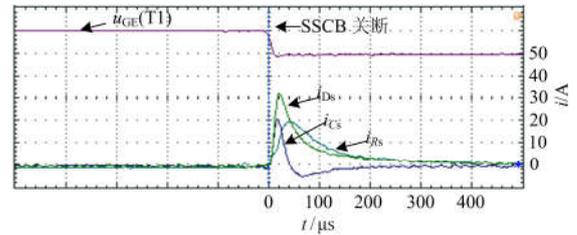


图 8 i_{DS} , i_{CS} 和 i_{RS} 的波形

Fig. 8 Oscillograms of i_{DS} , i_{CS} , and i_{RS}

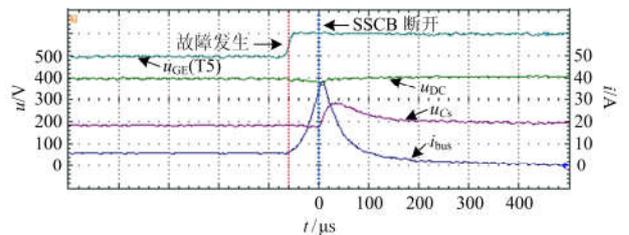


图 9 u_{CS} 和 u_{DC} 的波形

Fig. 9 Oscillograms of u_{CS} and u_{DC}

从图 8 中可以看出,在放电阻止型缓冲电路中,从缓冲电路开始工作时 R_S 就开始消耗故障能量。从图 9 中可以看出,放电阻止型缓冲电路中 C_S 的初始电压分别为 200 V,但在故障之后 C_S 的稳态电压也稳在 200 V,上述分析也与理论计算的结论相符。

6 结论

综上所述,所有的实验波形和实验结论都能证实理论分析的正确性,并且可以证实在所选取的工况中,放电阻止型缓冲电路能够有效的抑制 SSCB 两端的过电压,并且快速的消耗故障能量。

参考文献

- [1] 程星星, 张怿宁, 王健, 等. 高压直流接地极线路故障特性仿真及其故障测距新算法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 105-114.
CHENG Xingxing, ZHANG Yining, WANG Jian, et al. Research on HVDC grounding electrode line fault simulation and its new fault location algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 105-114.
- [2] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 134-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 134-139.
- [3] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [4] 陶以彬, 李官军, 柯勇, 等. 微电网并/离网故障特性和继电保护的配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 95-100.
TAO Yibin, LI Guanjun, KE Yong, et al. Research on the fault characteristics and relay configuration of micro-grid in the grid and off-grid mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 95-100.
- [5] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. Research on the fault characteristics and relay configuration of micro-grid in the grid and off-grid mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [6] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [7] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [8] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [9] 韩彬, 林集明, 陈维江, 等. 隔离开关操作速度对特快速瞬态过电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 12-17.
HAN Bin, LIN Jiming, CHEN Weijiang, et al. Analysis on the influence of the switching speed of disconnecter on very fast transient overvoltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 12-17.
- [10] PENG C, SONG X Q, REZAEI M A, et al. Development of medium voltage solid-state fault isolation devices for ultra-fast protection of distribution systems[C] // Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2014, Dallas, USA: 5169-5176.
- [11] ZHA X, NING H, LAI X, et al. Suppression strategy for short-circuit current in loop-type DC microgrid[C] // Energy Conversion Congress and Exposition, September 14-18, 2014, Pittsburgh, USA: 758-764.
- [12] LAI X, LIU F, DENG K, et al. A short-circuit current calculation method for low-voltage DC microgrid[C] // International Power Electronics and Application Conference and Exposition, November 5-8, 2014, Shanghai, China: 365-371.
- [13] MAGNUSSON J, SAERS R, LILJESTRAND L, et al. Separation of the energy absorption and overvoltage protection in solid-state breakers by the use of parallel varistors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 2715-2722.
- [14] MAGNUSSON J, BISSAL A, ENGDahl G, et al. On the use of metal oxide varistors as a snubber circuit in solid-state breakers[C] // Innovative Smart Grid Technologies Europe, October 6-9, 2013, Lyngby, Denmark: 1-4.
- [15] 蒋智化, 刘连光, 刘自发, 等. 网格式中压直流配电网潮流计算与稳态功率分布特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 2-12.
JIANG Zhihua, LIU Lianguang, LIU Zifa, et al. Research on power flow calculation and steady state power distribution in meshed medium voltage DC distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 2-12.

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2017-01-12

作者简介:

冯 锐(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为直流微网。E-mail: whufengkun@163.com

(编辑 姜新丽)