

# 低压直流微网中固态断路器缓冲电路和续流电路的交互影响分析与混合参数设计

俞天毅, 刘 飞, 刘文君, 陈 超, 查晓明

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**当低压直流微网母线发生故障时,位于直流母线末端的固态断路器便会发挥其隔离故障区域的作用。与此同时,连接在固态断路器和母线之间的续流路径起到故障能量吸收和故障电流衰减的作用。然而在故障发生期间,与固态断路器并联的缓冲电路所起到的过电压抑制作用会影响续流路径故障能量吸收的效果,同时续流路径的阻值也相应会影响缓冲电路的过电压抑制能力。因此,着重分析了二者之间的交互影响,并设计了实现过电压抑制与故障清除时间满足约束条件的混合参数设计方案,以 $\pm 200\text{V}$ 直流为例进行了仿真验证与初步的实验,证明了设计的可行性。

**关键词:**短路故障; 固态断路器; 直流微网; 参数设计

**DOI:** 10.12067/ATEEE1711010

**文章编号:** 1003-3076(2018)12-0060-09

**中图分类号:** TM561

## 1 引言

基于小型分布式能源并网的需求,低压直流微网作为一种新颖有效的解决方案得到了快速发展<sup>[1]</sup>。为保证低压直流微网的安全稳定运行,可靠的直流故障保护策略不可或缺。和交流电流相比,直流电流没有自然过零点,电弧调控技术难度大,因而直流微网的保护相比交流微网更为困难<sup>[2,3]</sup>。目前,低压直流微网保护方面的研究主要包括保护设备的研究以及保护策略的研究,低压直流微网的保护设备主要包括熔断器、电流开关以及直流断路器。文献[4]列表详细对比并分析了各类保护设备的优缺点,并指出利用直流断路器进行故障保护是低压直流微网保护今后发展的必然趋势。文献[5]对机械断路器和固态断路器(Solid State Circuit Breaker, SSCB)进行比较,固态断路器因兼具无弧性与速动性,成为近几年的研究热点。低压直流微网保护旨在快速切断或限制故障电流,目前行之有效的保护策略主要有全控VSC、固态断路器以及超导限流等方法。文献[6]利用全控型器件代替变流器中的反向并联二极管,以实现故障关断的功能,满足

了直流保护速动性的要求,而缺点在于拓扑中的全控器件数量翻倍,无论从器件成本还是运行损耗都将使得直流保护的经济性失去保障。文献[7]在此基础上对拓扑进行了一定的改进,但仍旧未能解决利用全控VSC进行直流保护的经济性问题。文献[8,9]表明,超导限流虽满足速动性和经济性,但原件的冷却系统价格昂贵,故仅适用于特殊场合。在利用固态断路器进行低压直流微网的保护方面,目前的研究主要集中在拓扑结构的设计与分析,对故障能量转移方面研究较少。因此,提出了固态断路器与续流通路相结合的拓扑。续流路径连接在正负直流母线之间,在直流母线发生故障时开通,为等效线路电感中的故障能量提供泄放通路。此外,由于固态断路器中电力电子器件对电压的敏感性,在其两端并联一个缓冲电路进行过电压抑制<sup>[10-12]</sup>。

当固态断路器因切除故障而关断时,故障电流会转移到与之并联的缓冲电路上,当缓冲电路电压超过直流母线电压的一半时,续流通路开通,进行故障能量的泄放。进一步研究发现,在故障电流从缓冲电路到续流路径的换流过程中,固态断路器的峰值电压以及故障电流大小很大程度上是由缓冲电路

**收稿日期:** 2017-11-06

**基金项目:** 湖北省科技支撑计划项目(2015BAA109)

**作者简介:** 俞天毅(1994-),男,江苏籍,硕士研究生,主要研究方向为直流微电网保护与控制技术;

刘 飞(1977-),男,湖北籍,副教授,博士,主要研究方向为大功率电力电子技术(通讯作者)。

与续流电路参数之间的关系决定的,因而固态断路器的过电压抑制能力和故障清除速度也与此紧密相关。固态断路器的过电压抑制能力是缓冲电路好坏的主要考核标准,故障清除速度是续流电路的主要考核标准,二者都是故障排除的重要评估因素,而在这方面目前研究较少。因此,着重研究二者相互影响的机理,并设计缓冲电路与续流通路的混合参数设计流程,在满足经济性的同时使得限制过电压能力与故障清除速度得到提高<sup>[13,14]</sup>。

## 2 系统结构分析

为了解决低压直流微网中直流母线故障的问题,首先搭建了母线故障的模型,如图1所示。正负母线与地线之间的电压为 $\pm 0.5u_{DC}$ ,  $R$ 和 $L$ 为直流母线全长的等效电阻和等效电感,由于故障点设定在母线的中点处,因而图1直流母线的等效电阻和等效电感分别为 $0.5R$ 和 $0.5L$ 。常用的耗散型缓冲电路包括C型缓冲电路、RC型缓冲电路、充放电型RCD缓冲电路和放电抑制型RCD缓冲电路<sup>[15-17]</sup>。C型缓冲电路拓扑结构简单且造价低廉,但其电压超调抑制能力不够好。RC型缓冲电路不仅会导致电压超调,当高容量的IGBT与之相并联时,其吸收电流会增大,只能通过增大缓冲电路阻值来抑制<sup>[10]</sup>。因此,RC型缓冲电路主要用于保护斩波电路和小容量低频率的设备,不常用于中等容量的场合。RCD型缓冲电路采用一个快恢复型二极管钳制变化的电压,因而避免了缓冲电路电容和线路电感的振荡作用<sup>[16]</sup>。综上所述,RCD型缓冲电路比较适合中等容量的应用场合。所研究的低压直流微网固态断路器属于中等容量的设备,因而选用RCD型缓冲电路<sup>[18]</sup>。SSCB由两个反向串联的IGBT构成,并与RCD缓冲电路相并联。图1中 $C_s$ 为缓冲电路电容, $D_s$ 为缓冲电路二极管, $R_s$ 为缓冲电路电阻。续流通路由续流二极管 $D_F$ 和续流电阻 $R_F$ 串联而成,连接在固态断路器和直流母线之间。在故障发生之前,负载电阻为 $R_L$ ,系统以额定电流正常运行。

图1展示了两种常见形式的直流母线故障标识,A为母线与地之间的故障,即正负母线与地发生短路;B为正负母线之间的故障,即正负两极之间发生短路。一般而言,正负母线短路产生的线路阻抗通常较低,而正负母线与地之间短路产生的线路阻抗不易确定。故正负母线短路所产生的故障电流通常更大<sup>[19,20]</sup>,故所述的短路情况以极间短路为准。

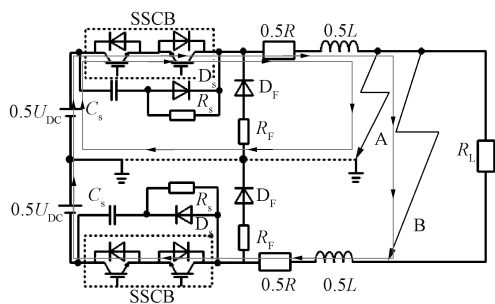


图1 直流母线故障时的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit at DC bus fault

在正负母线短路发生时,为了避免故障电流持续上升达到稳态值,系统会产生一个让固态断路器关断的信号。当关断信号发生时,固态断路器两端电压会上升,当固态断路器两端电压超过 $0.5U_{DC}$ 时,续流通路开通,为故障电流提供一个分流的路径以抑制其增长。同时,为了确保固态断路器的安全运行,常在两端并联缓冲电路,二者之间的交互作用在第3节讨论。

## 3 故障清除过程与交互影响分析

### 3.1 故障清除过程分析

#### (1) 预备阶段:SSCB关断

预备阶段故障电流流向如图2所示。预备阶段是换流过程,故障电流开始从固态断路器转移到缓冲电路直至固态断路器完全关断。由于换流时间很短,因而缓冲电路的电容电压 $U_{Cs}$ 和外部电路的电感电流 $i_L$ 视为恒定,在预备阶段结束时, $C_s$ 的初始电压 $U_{Cs}$ 为零,初始电流设为 $I_0$ 。

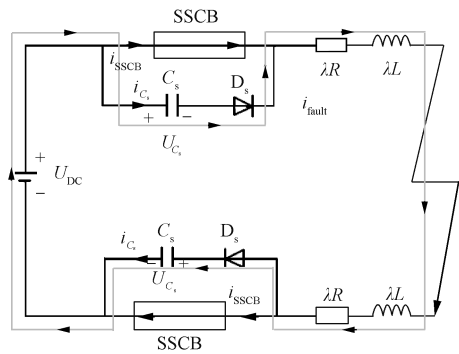


图2 预备阶段故障电流流向图

Fig.2 Fault current direction of pre-stage

#### (2) 阶段一:缓冲电路主导( $0 < t < t_1$ )

阶段一故障电流流向如图3所示。阶段一 $C_s$ 开始充电,由于阶段一 $D_F$ 受反向电压关断,因而续

流通路在此阶段未开通,故障电流全部流经  $C_s$ 。当  $C_s$  两端电压上升到  $0.5U_{DC}$  时,阶段一结束。

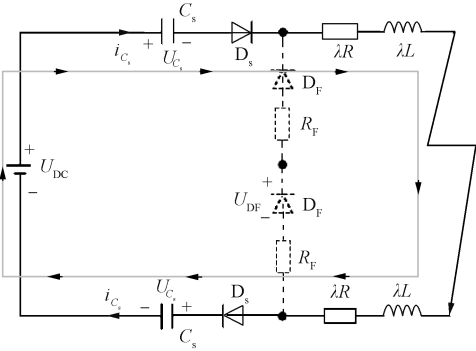


图3 阶段一故障电流流向图

Fig.3 Fault current direction of stage 1

(3)阶段二:续流通路分流( $t_1 < t < t_2$ )

阶段二故障电流流向如图4所示。随着  $C_s$  继续充电,  $D_F$  两端的电压由负变正,故而续流通路开通,标志着阶段二的开始。在阶段二,续流通路分担一部分故障电流,直到  $U_{C_s}$  到达了峰值  $U_{pk}$ ,阶段二结束。

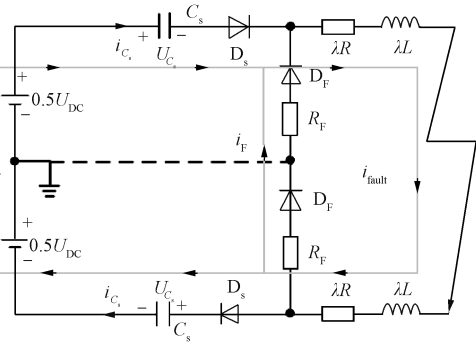


图4 阶段二故障电流流向图

Fig.4 Fault current direction of stage 2

(4)阶段三:电容开始放电( $t_2 < t < t_{ss}$ )

阶段三故障电流流向如图5所示。当  $U_{C_s}$  达到峰值  $U_{pk}$  时,  $C_s$  开始放电,经过  $C_s$  的电流  $i_{C_s}$  改变方向,缓冲电路二极管  $D_s$  反向关断,故障电流通过缓冲电路电阻  $R_s$ 。随着  $C_s$  的放电,  $U_{C_s}$  重新下降到  $0.5U_{DC}$ ,阶段三结束。

3.2 交互影响分析

假设短路时的故障电阻为  $R_F$ ,对以上三个阶段分别列写二阶微分方程进行求解,为了方便计算,将系统故障时的等效电阻设为  $R_0$ ,等效电感设为  $L_0$ ,  $R$  和  $L$  分别代表直流母线全长的等效电阻和等效电感,  $\lambda$  表征系统短路点位置,即

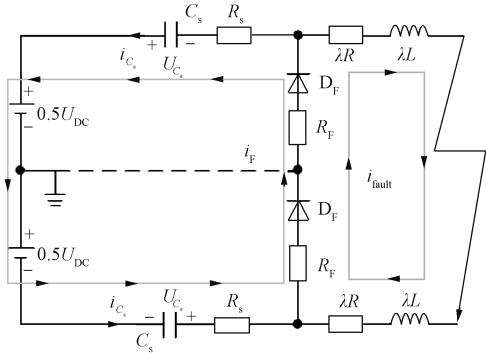


图5 阶段三故障电流流向图

Fig.5 Fault current direction of stage 3

$$R_0 = \lambda R + \frac{R_F}{2} \tag{1}$$

$$L_0 = \lambda L \tag{2}$$

可以得到各个阶段缓冲电路电容电压  $U_{C_s}$  的表达式以及起止时刻  $t_n$  的表达式,如附录中附表1所示,其中  $\Delta_2$  和  $\Delta_3$  分别为阶段二和阶段三电路微分方程的判别式,式中的相关参数的表达式见附录。

根据附录中的表达式可以得到如下的关系:

$$U_{pk} = f(C_s, R_F, R_0, L_0) \tag{3}$$

$$t_{ss} = f(C_s, R_s, R_F, R_0, L_0) \tag{4}$$

式中,  $U_{pk}$  为固态断路器峰值电压;  $t_{ss}$  为固态断路器故障清除时间。  $U_{pk}$  的值仅随  $C_s$ 、 $R_F$ 、 $R_0$  及  $L_0$  的变化而变化,  $t_{ss}$  的值仅随  $C_s$ 、 $R_s$ 、 $R_F$ 、 $R_0$  及  $L_0$  的变化而变化。此外,  $R_0$ 、 $L_0$  与线路的长短、短路点所在的位置有关,以下的讨论是基于某一特定的短路情况而言的,因而可以认为是常量。在  $C_s$  取不同的值时,绘制  $U_{pk}$  与  $R_F$  的关系曲线,如图6所示。在  $R_F$  取不同值时,绘制出  $t_{ss}$  与  $C_s$  的关系曲线以及  $t_{ss}$  与  $R_s$  的关系曲线,分别如图7、图8所示。

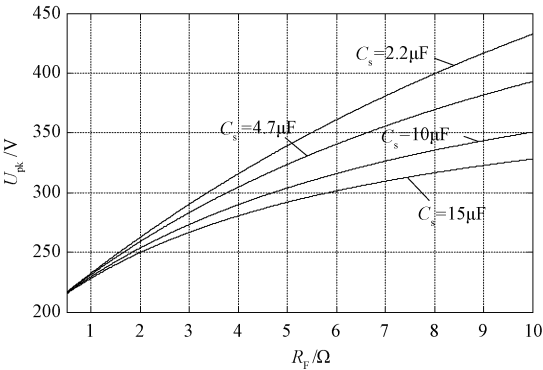


图6  $U_{pk}$ - $R_F$  关系曲线图

Fig.6 Graphs of  $U_{pk}$ - $R_F$

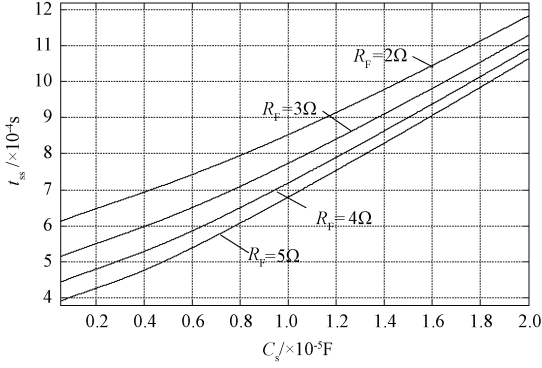

 图7  $t_{ss}$ - $C_s$  关系曲线图

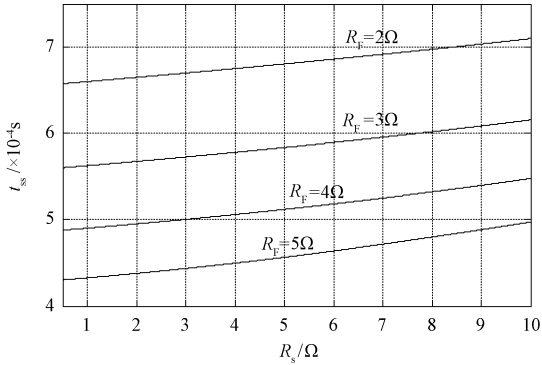
 Fig. 7 Graphs of  $t_{ss}$ - $C_s$ 

 图8  $t_{ss}$ - $R_s$  关系曲线图

 Fig. 8 Graphs of  $t_{ss}$ - $R_s$ 

由图6可知,在 $C_s$ 取不同的值时,随着 $R_F$ 的值增大, $U_{pk}$ 的值随之增大,即续流通路的阻值越小,缓冲电路的过电压抑制作用越强。此外, $C_s$ 的值越大, $U_{pk}$ 的值越小,即缓冲电路的电容值越大,过电压抑制作用越强。

由图7和图8可知,在 $R_F$ 取不同的值时,随着 $C_s$ 和 $R_s$ 值的增大, $t_{ss}$ 的值随之增大,即缓冲电路的电容值和电阻值越小,续流通路故障能量吸收的效果越好。此外, $R_F$ 越大, $t_{ss}$ 的值越小,即续流通路的阻值越大,其能量吸收的效果越好。

#### 4 缓冲电路和续流通路的混合参数设计

第4节讨论固态断路器缓冲电路的参数设计。为了确定各参数的值,需要已知以下的电路参数:线路杂散电感 $L$ ,线路电阻 $R$ ,一般故障电阻 $R_F$ ,直流母线电压 $U_{DC}$ ,母线额定电流 $I_e$ ,直流母线发生故障到固态断路器开始关断的时间间隔 $t_{delay}$ ,设计步骤如下。

(1) 计算 $I_0$ 和 $I_{DFM}$

令 $t=0$ 时刻故障电流的大小为 $I_0$ ,通过计算可得:

$$I_0 = - \left( \frac{U_{DC}}{R} - I_e \right) e^{-(R/L)t_{delay}} + \frac{U_{DC}}{R} \quad (5)$$

令

$$t_2 = \alpha_{T2} t_{ss} \quad (6)$$

式中

$$0 < \alpha_{T2} < 1 \quad (7)$$

由于故障电流下降速度较快,下降趋势接近于线性,可近似得到续流通路的最大电流:

$$I_{DFM} = (1 - \alpha_{T2}) \left[ - \left( \frac{U_{DC}}{R} - I_e \right) e^{-(R/L)t_{delay}} + \frac{U_{DC}}{R} \right] \quad (8)$$

(2) 计算 $t_2$ 时刻 $R_F$

当阶段二结束时, $U_{Cs}$ 到达最大值 $U_{pk}$ ,有:

$$R_F = \alpha_{RF} \frac{U_{pk} - 0.5 U_{DC}}{I_{DFM}} \quad (9)$$

式中

$$\alpha_{RF} > 0 \quad (10)$$

(3) 根据 $0 \sim t_2$ 时刻能量守恒,计算 $C_s$

由阶段一、阶段二能量守恒定律可得:

$$C_s = \alpha_C \frac{L(I_0^2 - I_{DFM}^2) - 0.33 t_2 R_s I_{DFM}^2}{U_{pk}^2} \quad (11)$$

式中

$$0 < \alpha_C < 1 \quad (12)$$

(4) 计算 $R_s$

当固态断路器重合闸,电流到达最大值 $I'_{pk}$ 时,有:

$$R_s = \alpha_{Rs} \frac{U_{DC}}{2 I'_{pk}} \quad (13)$$

式中

$$\alpha_{Rs} \geq 1 \quad (14)$$

(5) 修正 $U_{pk}$ 和 $t_{ss}$

根据附录中附表2,通过 $C_s$ 、 $R_s$ 、 $R_F$ 的值分别计算电容电压峰值与故障消除时间值,记为 $U'_{pk}$ 和 $t'_{ss}$ 。

考察峰值电压 $U'_{pk}$ 是否小于所设定的上限,即是否满足:

$$U'_{pk} < U_{pk} \quad (15)$$

若不满足,则减小 $\alpha_{RF}$ ,回到步骤(2)。

考察最终稳定时间是否小于设定上限,即是否满足:

$$t'_{ss} < t_{ss} \quad (16)$$



若不满足,则增大  $\alpha_c$ ,回到步骤(3)。

(6)修正  $I_{DsM}$  和  $I_{DFM}$  用于二极管选型

重新计算缓冲电路的最大电流  $I_{DsM}$  和续流通路的最大电流  $I_{DFM}$ ,有:

$$I_{DsM} = - \left( \frac{U_{DC}}{R} - I_e \right) e^{-(R/L)t_{delay}} + \frac{U_{DC}}{R} \quad (17)$$

$$I_{DFM} = \left( 1 - \frac{t_2}{t'_{ss}} \right) \left[ - \left( \frac{U_{DC}}{R} - I_e \right) e^{-(R/L)t_{delay}} + \frac{U_{DC}}{R} \right] \quad (18)$$

(7)计算  $R_s$  和  $R_F$  的功率用于电阻选型

根据能量守恒原理推得  $R_s$  和  $R_F$  的功率,有:

$$P_{RF} = \frac{LI_0^2 - 0.25C_s U_{DC}^2}{2t_{ss}} \quad (19)$$

$$P_{Rs} = \frac{U_{DC}^2}{24R_s} \quad (20)$$

可以由  $P_{RF}$ 、 $P_{Rs}$ 、 $R_F$  和  $R_s$  的值确定缓冲电路电阻  $R_s$  与续流通路电阻  $R_F$  的选型,令  $\alpha_{RF}$  和  $\alpha_c$  初值为 1。

5 仿真与实验验证

在 Matlab/Simulink 中对电路进行仿真,并绘制出在  $R_F$ 、 $C_s$  和  $R_s$  取不同值时  $U_{Cs}$  的波形图,分别如图 9 ~ 图 11 所示。系统在 0.3998s 时发生故障,经过 0.2ms 固态断路器断开,缓冲电路电容电压开始上升。由图 10 可得,随着  $R_F$  的值增大,  $U_{pk}$  的值随之增大,即续流通路的阻值越小,缓冲电路的过电压抑制作用越强。此外,由图 10 和图 11 可得,随着  $C_s$  和  $R_s$  值的增大,  $t_{ss}$  的值随之增大,即缓冲电路的电容值和电阻值越小,续流路径故障能量吸收的效果越好。

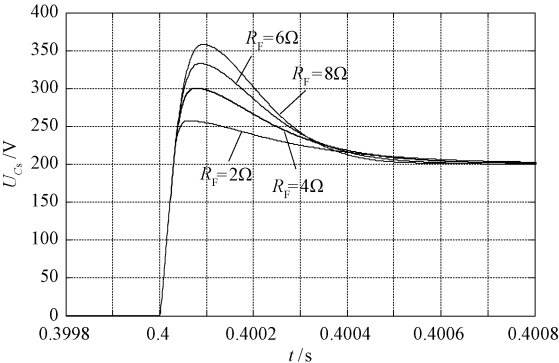


图 9  $R_F$  变化下  $U_{Cs}$  波形图

Fig. 9 Graphs of  $U_{Cs}$  when  $R_F$  changes

在仿真的基础上搭建实验平台,平台包含一个

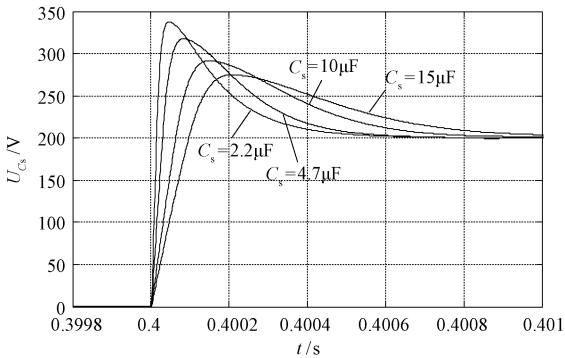


图 10  $C_s$  变化下  $U_{Cs}$  波形图

Fig. 10 Graphs of  $U_{Cs}$  when  $C_s$  changes

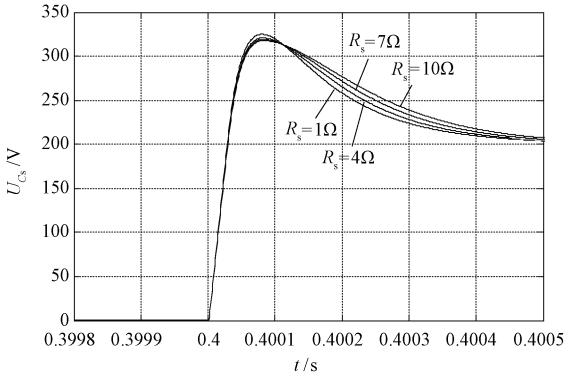


图 11  $R_s$  变化下  $U_{Cs}$  波形图

Fig. 11 Graphs of  $U_{Cs}$  when  $R_s$  changes

直流电压源,正负极母线各一个固态断路器,线路等效模型,一个直流负载以及一个与直流负载并联的短路模块,如图 12 所示。直流母线电压设置为 400V,直流负载 60Ω,正常运行下的额定电流为 6.7A,故障电阻采用 5Ω 的电阻。线路等效模型的参数如下:母线杂散电感  $L$  为 2mH,母线等效电阻  $R$  为 1Ω,母线等效电容  $C$  为 0.44μF。所使用的部分元器件型号如下,其中 IGBT 的型号为英飞凌 k40T1202,二极管的型号为 IXYS-S1510,电容的型号为 EACO-STE-700。参数调整前选取缓冲及续流电路参数如下:  $C_s = 2.35\mu F$ ,  $R_s = 10\Omega$ ,  $R_F = 4\Omega$ ,实验波形如图 13 所示。由第 4 节混合参数设计所得的参数如下:  $C_s = 4.7\mu F$ ,  $R_s = 10\Omega$ ,  $R_F = 5\Omega$ 。参数调整后实验波形如图 14 ~ 图 16 所示,其中示波器采用泰克 TDS1012B 数字示波器。

$u_{SSCB}$  和  $i_{fault}$  的波形如图 14 所示,表 1 对比了调整前后的各项指标。可以看出,参数调整前故障在大约 2.05ms 时刻被清除,固态断路器的过电压为 291V;参数调整后故障大约在 1.62ms 时刻被清除,

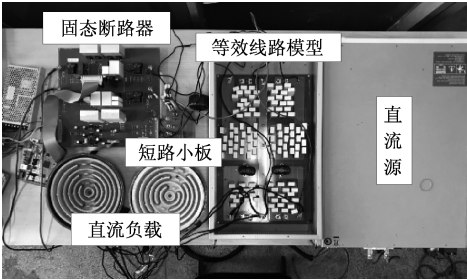


图 12 实验平台图  
Fig. 12 Experiment platform

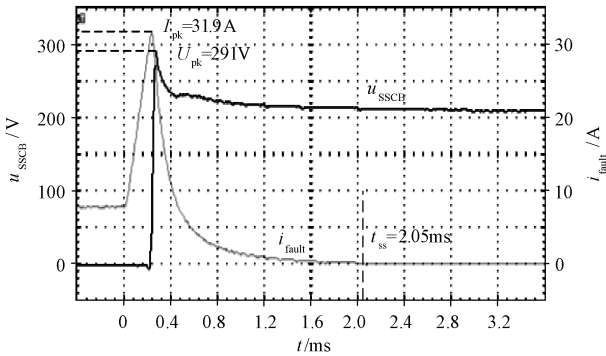


图 13 原参数故障电流和固态断路器电压波形图  
Fig. 13 Oscillograms of fault current and SSCB voltage using original parameters

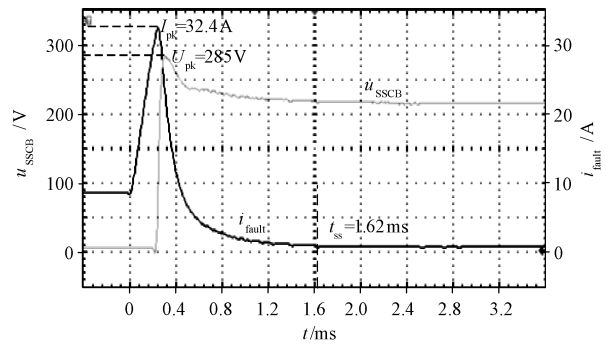


图 14 参数调整后故障电流和固态断路器电压波形图  
Fig. 14 Oscillograms of fault current and SSCB voltage after parameter adjustment

固态断路器的过电压为 285V。调整后的参数使得固态断路器拥有更小的过电压和更快的故障消除速度,满足设计的要求。优化后  $C_s$  和  $R_F$  通过的电流如图 15 和图 16 所示,体现了 RCD 缓冲电路和续流

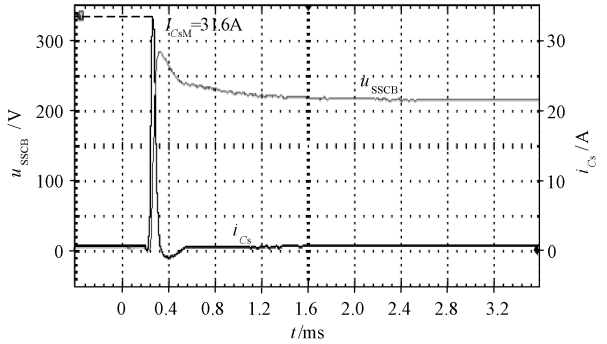


图 15 缓冲电路电流和固态断路器电压波形图  
Fig. 15 Oscillograms of  $C_s$  current and SSCB voltage

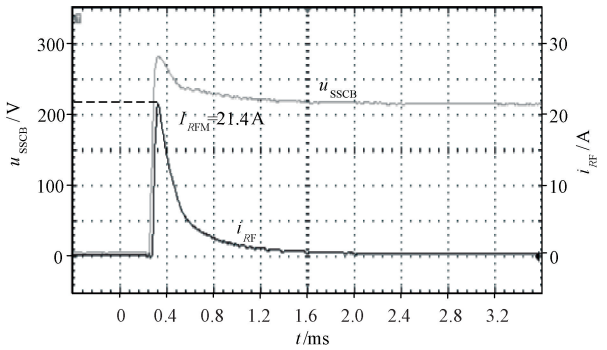


图 16 续流通路电流和固态断路器电压波形图  
Fig. 16 Oscillograms of  $R_F$  current and SSCB voltage

通路换流的过程。可以看出,缓冲电路在续流通路之前开通,续流通路在固态断路器两端电压  $u_{SSCB}$  到达 200V 时开通。

表 1 调整前后指标数据对比

Tab. 1 Index data comparison before and after adjustment		
状态	峰值电压/V	故障消除时间/ms
调整前	291	2.05
调整后	285	1.62

6 结论

本文给出了带有缓冲电路的固态断路器和续流通路的直流系统的母线故障排除过程,在此基础上着重分析了固态断路器缓冲电路和续流通路的交互影响,并进行缓冲电路与续流通路的混合参数设计。本文方法在满足经济性的同时使得抑制过电压能力与故障清除速度得到提高,最后通过仿真与初步的实验证明了设计的有效性。

附录

附表 1 各阶段不同条件下  $U_{Cs}$  和  $t$  表达式

Attached Tab. 1 Expression of $U_{Cs}$ and $t$ of all stages					
阶段一	阶段二		阶段三		
	$\Delta_2 \geq 0$	$\Delta_2 < 0$	$\Delta_3 \geq 0$	$\Delta_3 < 0$	
$U_{Cs}$	$u_{Cs}(t) = Ae^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t + \beta) + 0.5U_{DC}$	$u_{Cs}(t) = B[e^{-(a+b)(t-t_1)} - e^{-(a+b)(t-t_1)}] + 0.5U_{DC}$	$u_{Cs}(t) = A_2e^{-\alpha(t-t_1)} \cdot \sin[\omega_2(t-t_1)] + 0.5U_{DC}$	$u_{Cs}(t) = De^{-(c+d)(t-t_2)} + (\Delta U - D)e^{-(c+d)(t-t_2)} + 0.5U_{DC}$	$u_{Cs}(t) = A_3e^{-\alpha_3(t-t_2)} \cdot \sin[\omega_3(t-t_2) + \beta_3] + 0.5U_{DC}$
$t$	$t_1 = -\frac{\beta}{\omega}$	$t_2 = \frac{1}{2b} \ln\left(\frac{a+b}{a-b}\right) + t_1$	$t_2 = \frac{\arctan(\omega_2/\alpha_2)}{\omega_2} + t_1$	$t_{ss} = t_2 + \sqrt{\frac{1.9}{c^2 - d^2}}$	$t_{ss} = t_2 + \frac{1}{\alpha_3} \ln[20A_3 \cdot \sin\beta_3 / (U_{pk} - 0.5U_{DC})]$

注：下标 1、2、3 分别表示阶段一、二、三的相应变量。

附表 2 各阶段不同条件下  $U'_{pk}$  和  $t'_{ss}$  表达式

Attached Tab. 2 Expression of $U'_{pk}$ and $t'_{ss}$ of all stages		
$\Delta$	$\Delta_2/\Delta_3 \geq 0$	$\Delta_2/\Delta_3 < 0$
$U'_{pk}$	$U'_{pk} = \omega A_2 e^{\frac{\alpha_2\beta}{\omega^2}} \frac{1}{\sqrt{a^2 - b^2}} \left(\frac{a-b}{a+b}\right)^{a/(2b)} + 0.5U_{DC}$	$U'_{pk} = A_3 e^{-\frac{\alpha_3}{\omega_3} \arctan \frac{\omega_3}{\alpha_3}} \sin\left(\arctan \frac{\omega_3}{\alpha_3}\right) + 0.5U_{DC}$
$t'_{ss}$	$t'_{ss} = t_2 + \sqrt{\frac{1.9}{c^2 - d^2}}$	$t'_{ss} = t_2 + \frac{1}{\alpha_3} \ln[20A_3 \cdot \sin\beta_3 / (U_{pk} - 0.5U_{DC})]$

附表 3 附表 1 和附表 2 各参数计算式

Attached Tab. 3 Expression of parameters in Attached Tab. 1 and Attached Tab. 2		
阶段一	阶段二	阶段三
$\alpha = \frac{R_0}{2L_0}$	$a = \frac{R_0}{2L_0} + \frac{1}{2R_F C_s}$	$c = \frac{R_0}{2L_0} + \frac{R_F}{R_s + R_F} \left(\frac{1}{2R_F C_s} + \frac{R_s}{2L_0}\right)$
$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_s} - \alpha^2}$	$b = \sqrt{a^2 - \frac{1}{L_0 C_s} \left(1 + \frac{R_0}{R_F}\right)}$	$d = \sqrt{c^2 - \frac{1}{L_0 C_s} \frac{R_0 + R_F}{R_s + R_F}}$
$\beta = \arctan \frac{\omega}{\alpha - \Delta}$	$B = \frac{\omega}{2b} A e^{\frac{\alpha\beta}{\omega}}$	$D = \frac{c+d}{2d} \Delta U$
$\Delta = \frac{2I_0}{U_{DC}} \frac{1}{C_s}$	$\alpha_2 = \frac{R_0}{2L_0} + \frac{1}{2R_F C_s}$	$\Delta U = U_{pk} - 0.5U_{DC}$
$A = \frac{1}{2\omega} U_{DC} \sqrt{(\alpha - \Delta)^2 + \omega^2}$	$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_s} \left(1 + \frac{R_0}{R_F}\right) - \alpha_2^2}$	$\alpha_3 = \frac{R_0}{2L_0}$
—	$A_2 = \frac{\omega A e^{\frac{\alpha\beta}{\omega}}}{\omega_2}$	$\omega_3 = \sqrt{\frac{R_0 + R_F}{L_0 C_s (R_s + R_F)} - \alpha_3^2}$
—	—	$\beta_3 = \arctan \frac{\omega_3}{\alpha_3}$
—	—	$A_3 = \frac{U_{pk} - 0.5U_{DC}}{\sin\beta_3}$

参考文献 (References)：

[ 1 ] Zha X, Ning H, Lai X, et al. Suppression strategy for short-circuit current in loop-type DC microgrid [ A ]. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition ( ECCE ) [ C ]. 2014. 758-764.

[ 2 ] Liu W, Yang H, Liu F, et al. An improved RCD snubber for solid-state circuit breaker protection against bus fault in low-voltage DC microgrid [ A ]. 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference ( IFEEC ) [ C ]. 2015. 1-5.

- [ 3 ] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等 (Li Bin, He Jiawei, Li Ye, at al.). 多端柔性直流系统直流故障保护方案 (DC fault protection strategy for the flexible multi-terminal DC system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (17): 4627-4637.
- [ 4 ] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等 (Luo Yongjie, Li Yao-hua, Li Zixin, et al.). 多端柔性直流输电系统直流故障保护策略 (DC short-circuit fault protection strategy of multi-terminal HVDC systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 1-6.
- [ 5 ] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等 (Xue Shimin, Chen ChaoChao, Jin Yi, et al.). 直流配电系统保护技术研究综述 (A research review of protection technology for DC distribution system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (19): 3114-3122.
- [ 6 ] Baran M E, Mahajan N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (1): 406-412.
- [ 7 ] 杨丽君, 魏玲玲, 卢志刚, 等 (Yang Lijun, Wei Lingling, Lu Zhigang, et al.). 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复 (Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 73-80.
- [ 8 ] Hwang J S, Khan U A, Shin W J, et al. Validity analysis on the positioning of superconducting fault current limiter in neighboring AC and DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23 (3): 5600204.
- [ 9 ] 李斌, 何佳伟 (Li Bin, He Jiawei). 柔性直流配电系统故障分析及限流方法 (DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (12): 3026-3036.
- [ 10 ] 高爱云, 聂娟红, 李晓华, 等 (Gao Aiyun, Nie Juanhong, Li Xiaohua, et al.). 换流变压器阀侧单相接地故障保护动作分析 (Protection analysis of single-phase ground fault at converter transformer valve side) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2010, 29 (4): 71-75.
- [ 11 ] 吴俊勇, 裴丛仙子, 边国潮 (Wu Junyong, Pei Congxianzi, Bian Guochao). 光伏并网配电网中柔性环网开关的优化运行控制策略研究 (Study on control strategy for optimum operation of soft normally-open points (SNOPs) in distribution network with PV generation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 20-28.
- [ 12 ] 张明锐, 金鑫, 刘金辉 (Zhang Mingrui, Jin Xin, Liu Jinhui). 一种抑制固态断路器过电压的新方法 (Over-voltage suppression of solid-state circuit breaker) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2012, 32 (3): 37-41.
- [ 13 ] Zheng S, Wang Y, Wu X, et al. The voltage sharing of commercial IGBTs in series with passive components [A]. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [C]. 2011. 3008-3012.
- [ 14 ] Etemadi A H, Iravani R. Overcurrent and overload protection of directly voltage-controlled distributed resources in a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (12): 5629-5638.
- [ 15 ] Li R T H, Chung H S H, Sung A K T. Passive lossless snubber for Boost PFC with minimum voltage and current stress [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (3): 602-613.
- [ 16 ] Li R T H, Chung H S. A passive lossless snubber cell with minimum stress and wide soft-switching range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (7): 1725-1738.
- [ 17 ] Vodyakho O, Steurer M, Neumayr D, et al. Solid-state fault isolation devices: Application to future power electronics-based distribution systems [J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5 (6): 521-528.
- [ 18 ] 胡益, 王晓茹, 胡柏玮 (Hu Yi, Wang Xiaoru, Hu Bo-wei). 基于 CPS-SPWM 调制方法的 MMC-HVDC 输电系统冗余保护策略研究 (Redundancy protection strategy research of MMC-HVDC transmission system based on CPS-SPWM modulation method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (10): 9-16.
- [ 19 ] 穆建国, 王莉, 胡杰 (Mu Jianguo, Wang Li, Hu Jie). 直流固态断路器拓扑结构的设计与分析 (Analysis and design of topological structure for DC solid-state circuit breaker) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (18): 109-114.
- [ 20 ] 牛耕, 孔力, 周龙, 等 (Niu Geng, Kong Li, Zhou Long, et al.). 含分布式电源的配电网的供电恢复技术研究综述 (Review of power service restoration of distribution network with distributed generation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 51-62.



Interaction and combined parameters design of SSCB snubber and free-wheeling path in low-voltage DC microgrid

YU Tian-yi, LIU Fei, LIU Wen-jun, CHEN Chao, ZHA Xiao-ming  
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** When faults occur in the bus of low-voltage DC microgrid, the solid state circuit breaker (SSCB) located in the terminal of the bus will function as the isolation of the fault area. Meanwhile, the freewheeling path connected between the SSCB and the DC bus will function as absorber of fault energy and damper of fault current. However, during the fault, the over-voltage suppression of the snubber in parallel with the SSCB will affect the effect of the fault energy absorption of the free-wheeling path, and the resistance of freewheeling path will also affect the over-voltage suppression of the snubber. Hence, the interaction between the two is analyzed and a combined optimization design is proposed in this paper to make the over-voltage suppression and the fault clearing time to meet the need. In the end, simulation and an initial experiment are conducted in DC  $\pm 200\text{V}$  to prove the effectiveness of the design.

**Key words:** short-circuit fault; solid state circuit breaker (SSCB); DC microgrid; parameter design