

# 基于耦合电感的直流故障限流器

张 烁<sup>1</sup>, 邹贵彬<sup>1</sup>, 张成泉<sup>2</sup>, 魏秀燕<sup>1</sup>, 周成瀚<sup>1</sup>

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网山东省电力公司 潍坊供电公司, 山东 潍坊 261021)

**摘要:**柔性直流电网存在故障电流上升速度快、幅值高,感性元件储存能量大等问题,这造成故障电流难以分断,并且使得直流断路器的耗能支路承受巨大压力。为了限制故障电流峰值并且降低直流断路器耗能压力,提出一种基于耦合电感的直流故障限流器。当发生短路故障时,该故障限流器利用电感耦合特性等效投入电阻与电容组成的限流支路,以实现无延时的故障限流;当直流断路器分断故障电流时,该故障限流器利用耗能电阻耗散耦合电感储存的能量,从而分担直流断路器耗能压力,以达到降低避雷器容量需求、加快故障电流分断速度的目的。大量电磁暂态仿真结果表明,所提故障限流器具有良好的限流效果,能极大降低直流断路器的耗能压力。且该故障限流器制造成本低,易于实现。

**关键词:**柔性直流电网;直流故障限流器;耦合电感;直流断路器;耗能压力

**中图分类号:**TM721.1;TM774

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202310004

## 0 引言

面对环境污染和化石能源短缺的困境,基于化石能源的发电方式越来越不适应社会发展的需求。风电、光伏等新能源发电因清洁、可再生的特性逐渐受到青睐。但受限于传统输电技术的消纳能力,大量新能源仍未被有效利用。柔性直流输电技术的发展为新能源消纳提供了有效手段,其中柔性直流电网因其无需无功补偿、输送容量大、可向无源负荷供电等优势<sup>[1]</sup>,在新能源消纳方面具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

虽然直流输电技术发展迅速,但其仍存在部分技术问题,故障电流过高便是其一。直流系统的低阻抗特性导致其在发生直流故障后电流上升速度极快,在数毫秒内可达额定电流的数十倍<sup>[4]</sup>,且故障电流无自然过零点,造成故障电流开断困难。目前实际工程中通常在直流线路两端安装限流电抗器(current-limiting reactor, CLR)来抑制故障电流的上升速度,但CLR会降低系统的响应速度,并会延长直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)的故障电流分断时间。除CLR外,直流故障限流器(direct current fault current limiter, FCL)是另一种故障限流方案。

超导FCL利用超导材料在流过负荷电流时呈现低阻抗而在故障后呈现高阻抗的特性实现故障限流,既保证了正常运行时极低的运行损耗,又保证了

发生故障后故障电流能被快速、有效地抑制<sup>[5-6]</sup>。目前,已有160 kV电阻型超导FCL研制成功并投入工程应用<sup>[6]</sup>。虽然超导FCL已开展了诸多研究,但存在诸多问题亟待解决,如实现成本高、恢复速度慢等。

文献[7]利用CLR限制故障电流,并且在DCCB分断故障电流时控制晶闸管投入耗能电阻以缩短电流分断时间,极大降低了DCCB中金属氧化物避雷器(metal oxide varistor, MOV)的容量需求。在此基础上,文献[8]将文献[7]所提FCL多端口化,在保证限流效果的同时降低了设备总成本。文献[9]提出的FCL利用晶闸管将CLR投入故障回路以限制故障电流,但是该方案限流效果存在延时,并且晶闸管的可靠关断难以得到保证。文献[10]提出的FCL利用耦合电感的同名端顺向串联以提高等效电感来限制故障电流。但是如果负荷电流和故障电流的方向不同,在正常运行时负荷电流将会流过二极管支路,从而产生较大的功率损耗。文献[11]利用全控型电力电子开关将限流元件等效接入故障回路,具有良好的限流效果,但该方案的制造成本较高,控制较为复杂。文献[12]提出通过周期性投入耦合电感以限制故障发展速度,然而由于需要大量全控型电力电子器件,存在成本高、控制复杂的问题。文献[13]提出的FCL由成本较低的晶闸管和二极管组成,因此总成本相对较低。但由于该FCL需要预充电电容辅助关断晶闸管支路,因此需要额外的控制手段或辅助设备实现电容的预充电。

此外,将FCL与柔性直流电网中其他关键设备(如直流潮流控制器、DCCB)进行集成也是一个重要的研究方向<sup>[14-16]</sup>。文献[15]提出了集成故障限流功能的直流潮流控制器,节省了额外配置FCL的成本,经济效益明显。文献[16]提出了同时具备故障限流和故障分断功能的集成设备,然而由于在正常运行

收稿日期:2022-11-22;修回日期:2023-07-14

在线出版日期:2023-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077124);山东省自然科学基金资助项目(ZR2023QE281);中国博士后科学基金资助项目(2023M732046)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52077124), the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2023QE281) and the China Postdoctoral Science Foundation(2023M732046)

时负荷电流需要流经由较多全控型器件组成的固态开关,因此存在运行损耗大、成本高的问题。

为了解决现有 FCL 故障限流效果存在延时、控制复杂等问题,本文提出一种基于耦合电感的直流故障限流器(coupled-inductor-based direct current fault current limiter, CI-FCL)。该 CI-FCL 利用电感耦合特性在故障电流上升阶段将限流支路投入故障回路,从而限制故障电流峰值;在故障电流分断阶段利用耗能支路分担 DCCB 的耗能压力,缩短故障电流清除时间。所提 CI-FCL 不包含全控型电力电子开关,制造成本低,不需要额外的控制手段,运行可靠性高。在四端柔性直流电网仿真模型中的测试结果表明,CI-FCL 能够无延时地限制故障电流,显著降低故障电流幅值,同时能够降低 DCCB 的故障电流分断时间和 MOV 容量需求。

## 1 直流断路器的拓扑及动作过程

由于 CI-FCL 的工作原理与 DCCB 的动作过程紧密相关,因此首先介绍 DCCB 的拓扑及动作过程。典型混合式 DCCB 包括主支路、主断路器(main breaker, MB)和剩余电流开关(residual current breaker, RCB)3 个部分。其中,主支路为负荷转移开关(load commutation switch, LCS)和快速机械开关(ultrafast disconnecter, UFD)组成的串联支路。混合式 DCCB 拓扑如附录 A 图 A1 所示。

混合式 DCCB 的动作时序如下:假设直流线路在  $t_0$  时刻发生短路故障,  $t_1$  时刻 DCCB 接收到跳闸信号,导通 MB 并且闭锁 LCS,故障电流由 LCS 换流进入 MB。同时,控制 UFD 开始分闸,该过程大约持续 2 ms。  $t_2$  时刻 UFD 动作结束,闭锁 MB,故障电流被强迫换流到 MOV 中进行耗散,故障电流迅速下降。  $t_3$  时刻故障电流将为 0,打开 RCB 将故障点完全隔离。各支路电流示意图如附录 A 图 A2 所示。

## 2 CI-FCL

### 2.1 CI-FCL 的基本拓扑

本文提出的 CI-FCL 的基本拓扑见图 1,共由 4 条支路构成,分别是原边支路、副边支路、限流支路和耗能支路。图中:原边、副边支路分别由原边电感  $L_p$  和副边电感  $L_s$  构成,  $M$  为二者互感;限流支路包含 1 个限流电阻  $R_c$  和 1 个限流电容  $C_c$ ,负责限制故障电流的幅值;耗能支路由二极管阀  $D_e$  和耗能电阻  $R_e$  组成,负责分担 DCCB 的耗能压力,同时在故障电流分断

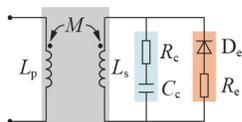


图1 CI-FCL 的拓扑

Fig.1 Topology of CI-FCL

之后耗散副边电感  $L_s$  和限流电容  $C_c$  中残存的能量。

### 2.2 CI-FCL 的工作原理

根据故障发展阶段,将 CI-FCL 的工作过程分为 4 个阶段,分别为正常运行阶段、故障限流阶段、故障清除阶段和故障恢复阶段。

1) 正常运行阶段。为了简化分析,假设换流器在正常运行时等效为理想电压源  $V_{dc}$ ,此时负荷电流将会流过 CI-FCL 的原边电感  $L_p$  和混合式 DCCB 的主支路,如图 2 所示。图中:  $i_p$ 、 $i_s$  分别为原、副边电感电流;  $i_c$ 、 $i_e$  分别为限流支路和耗能支路的电流;  $U_{pm}$ 、 $U_{sm}$  分别为电感耦合作用在原、副边产生的等效电压;  $i_{LCS}$  为 DCCB 中主支路电流;  $i_{MB}$ 、 $i_{MOV}$  分别为 DCCB 的 MB 中半导体开关支路和 MOV 支路的电流。其中,电感耦合作用在原、副边产生的等效电压分别用  $U_{pm}(Mdi_p/dt)$  和  $U_{sm}(Mdi_s/dt)$  表示。

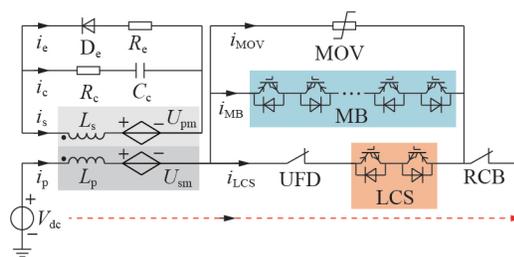


图2 正常运行阶段

Fig.2 Normal operation stage

由于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)在正常运行时电流纹波小,耦合电感不会产生感应电压,因此 CI-FCL 不会对直流电网的正常运行产生影响。

2) 故障限流阶段。假设直流线路在  $t_0$  时刻发生短路故障,原边电感电流  $i_p$  会迅速上升并且在副边支路产生感应电压  $U_{pm}$ ,同时副边电感电流  $i_s$  也会在原边支路产生感应电压  $U_{sm}$ 。由于  $U_{pm}$  极性为正,因此二极管阀  $D_e$  将承受反向电压闭锁,副边电感电流  $i_s$  将仅流过限流支路,如附录 A 图 A3(a) 所示。此时,各支路电流满足附录 A 式(A1)。通过求解式(A1)可得原边电感电流  $i_p(t)$  和副边电感电流  $i_s(t)$  分别为:

$$i_p(t) = I_{Load} + \frac{V_{dc}}{L_p}(t - t_0) + \frac{M^2 V_{dc}}{\beta L_p (L_p L_s - M^2)} e^{-\alpha(t-t_0)} \sin[\beta(t-t_0)] \quad (1)$$

$$i_s(t) = -\frac{M V_{dc}}{\beta (L_p L_s - M^2)} e^{-\alpha(t-t_0)} \sin[\beta(t-t_0)] \quad (2)$$

式中:  $I_{Load}$  为负荷电流;  $\alpha$ 、 $\beta$  表达式见附录 A 式(A2)。

假设  $t_1$  时刻 DCCB 开始动作,控制 MB 导通、LCS 闭锁,之后故障电流被换流至 MB 的子模块中,如附录 A 图 A3(b) 所示。由于该过程仅改变 DCCB 中的电流流路径,因此 CI-FCL 中原、副边电感电流仍满足式(1)和式(2)。待 DCCB 中 UFD 于  $t_2$  时刻动作

完成,CI-FCL的故障限流阶段结束。

3)故障清除阶段。待 $t_2$ 时刻UFD动作完成后,闭锁DCCB中MB各子模块,故障电流被换流至MOV,由MOV耗散故障电流的能量。由于MOV的非线性伏安特性,MOV的耗能过程等效于在故障回路中串联接入电压大小为 $\lambda V_{dc}$  ( $\lambda > 1$ )的反向电压源,此时CI-FCL将自动进入故障清除阶段。当 $U_{FCL} > 0$ 时,二极管阀 $D_e$ 承受反向电压闭锁,CI-FCL的耗能支路未投入,故障电流流过原副边支路和限流支路,如附录A图A4(a)所示。此时,各电流量满足式(3)。

$$\begin{cases} L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} - V_{dc} + \lambda V_{dc} = 0 \\ L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt} - U_{Cc} - i_c R_c = 0 \\ i_c = C_c \frac{dU_{Cc}}{dt} = -i_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: $U_{Cc}$ 为限流电容 $C_c$ 的电压。假设 $t_3$ 时刻开始 $U_{FCL}$ 小于0,二极管阀 $D_e$ 将承受正向电压导通,副边电感电流 $i_s$ 将会同时流过限流支路和耗能支路,如附录A图A4(b)所示。此时,各电气量满足式(4)。

$$\begin{cases} L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} - V_{dc} + \lambda V_{dc} = 0 \\ L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt} - U_{Cc} - i_c R_c = 0 \\ i_c R_c - U_{Cc} - i_c R_c = 0 \\ i_c = C_c \frac{dU_{Cc}}{dt} = -i_s - i_e \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得故障限流阶段原边电感电流和副边电感电流。随着时间推移,故障电流将会持续下降直至衰减为0,此时CI-FCL的故障清除阶段结束,打开DCCB的RCB即可将故障点隔离。

4)故障恢复阶段。假设 $t_4$ 时刻原边电流 $i_p(t)$ 衰减为0,之后CI-FCL将会自动进入故障恢复阶段,限流电容 $C_c$ 和副边电感 $L_s$ 储存的能量将会继续通过耗能电阻 $R_e$ 耗散,如图3所示。在该过程中,各电气量满足附录A式(A3)。

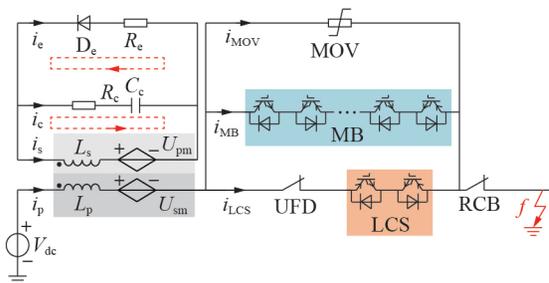


图3 故障恢复阶段

Fig.3 Fault recovery stage

假设 $t_5$ 时刻副边电感电流 $i_s$ 衰减为0,此时故障恢复阶段结束,CI-FCL动作完成。

### 3 CI-FCL的参数设计

#### 3.1 目标函数

CI-FCL的制造成本主要集中在耗能支路的二极管阀 $D_e$ 上,其承担的电压和电流幅值越大,则需要串并联的二极管阀数目越多,成本也就越高。

二极管阀 $D_e$ 的串联数目与承受的最大电压有关。二极管阀 $D_e$ 仅在故障限流阶段承受限流电容 $C_c$ 施加的反向电压 $U_{FCL}$ ,其值可表示为附录A式(A4)。由式(A4)可知,二极管阀 $D_e$ 电压在 $T_{Dmax}$ 时刻承受电压达到最大值 $U_{Dmax}$ 。 $T_{Dmax}$ 、 $U_{Dmax}$ 的表达式分别为:

$$\begin{cases} T_{Dmax} = \frac{\pi - 2\varphi_{FCL}}{\beta} \\ U_{Dmax} = U_{FCL}(T_{Dmax}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varphi_{FCL} = \arctan(\alpha/\beta)$ 。在故障清除阶段( $t_3 < t < t_4$ ),二极管阀 $D_e$ 承受正向电压导通,由式(4)可得其最大电流 $I_{Dmax}$ 满足式(6)所示约束条件。

$$I_{Dmax} \leq (\lambda - 1) \frac{MV_{dc}}{L_p R_e} \quad (6)$$

为了简化计算,二极管阀的最大电流取式(6)所示约束条件的最大值。由于CI-FCL能够降低故障电流峰值,进而降低DCCB的MB中并联绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块数量,因此在进行参数优化时还应考虑DCCB的成本。由于故障电流达到峰值可能发生在CI-FCL的故障限流阶段或者DCCB中MB闭锁时刻,因此故障电流峰值 $I_{Fmax}$ 可能存在2种情况。

若故障电流峰值出现在故障限流阶段中,则其值满足附录A式(A5)。若故障电流在MB闭锁时达到峰值,则故障电流峰值 $I_{Fmax}$ 满足附录A式(A6)。此外,MB在MOV耗能过程中需要承受暂态分断电压 $\lambda V_{dc}$ ,这会影响到MB中串联IGBT的数目。

基于上述分析,可以得到如下目标函数:

$$F(x) = C_1 \frac{\gamma V_{dc}}{U_1} \frac{I_{Fmax}}{I_1} + C_D \frac{U_{Dmax}}{U_D} \frac{I_{Dmax}}{I_D} \quad (7)$$

式中: $C_1$ 、 $C_D$ 分别为IGBT和二极管阀的单价; $U_1$ 和 $I_1$ 分别为IGBT的额定电压和额定电流; $U_D$ 和 $I_D$ 分别为二极管阀的额定电压和额定电流。该目标函数为CI-FCL和DCCB的近似总制造成本,由于半导体器件成本远高于其他类型元件,因此在式(7)中其他类型元件的成本已忽略。由式(7)可知,目标函数 $F(x)$ 为关于变量 $L_p$ 、 $M$ 、 $L_s$ 、 $R_c$ 、 $C_c$ 、 $R_e$ 的优化问题。

#### 3.2 约束条件

除目标函数外,各参数还应满足相应的约束条件。首先,该优化问题应满足基本的数学约束,如附录A式(A7)所示。除此之外,对于通过架空线路输电的柔性直流电网,由于DCCB通常配备有自动重合闸,因此在进行CI-FCL的参数设计时还应考虑自动重合闸的要求,即要求故障清除阶段 $T_{CCS}$ 和故障恢复阶段 $T_{RCS}$ 的总时长应小于DCCB自动重合闸的

动作时间  $T_{ARC}$ , 如式(8)所示。

$$T_{CCS} + T_{RCS} \leq T_{ARC} \quad (8)$$

由2.2节可知,故障清除阶段的持续时间含2个部分:电压  $U_{FCL}$  由  $U_{FCL}(t_2)$  降为0( $t_3$ 时刻)的电压下降时间  $T_{CCS,U}$  和电流  $i_p$  由  $i_p(t_3)$  降为0( $t_4$ 时刻)的电流下降时间  $T_{CCS,I}$ 。由式(3)可得电压下降时间  $T_{CCS,U}$  为:

$$T_{CCS,U} = \left[ \arccos \frac{(\lambda - 1)MV_{dc}}{k_3 \sqrt{k_1^2 + k_2^2}} - \varphi_{FCL} - \varphi_{CCS,U} \right] / \beta \quad (9)$$

式中:  $k_1$ — $k_3$ ,  $\varphi_{CCS,U}$  的表达式如附录A式(A8)所示。

由式(4)可知,电流  $i_p(t)$  在  $[t_3, t_4]$  时段呈指数变化,工程上一般认为4个时间常数左右指数函数衰减为0。因此,电流下降时间  $T_{CCS,I}$  可以近似表示为:

$$T_{CCS,I} = \frac{8k_4}{k_5 - \sqrt{k_5^2 - 4k_4R_e}} \quad (10)$$

式中:  $k_4$ 、 $k_5$  的表达式如附录A式(A9)所示。

由式(A3)可知,在故障恢复阶段 CI-FCL 的副边电感电流  $i_s(t)$  呈指数变化,因此在该故障恢复阶段的时长  $T_{RCS}$  可近似表示为:

$$T_{RCS} = \frac{8(R_c + R_e)C_c L_s}{L_s + R_c R_e C_c - \sqrt{(L_s + R_c R_e C_c)^2 - 4(R_c + R_e)C_c L_s R_e}} \quad (11)$$

### 3.3 优化算法

为了解决3.1节和3.2节提出的6变量非线性优化问题,本文采用了原理简单且便于实现的粒子群优化算法进行求解。粒子群优化算法是由鸟类觅食抽象来的算法<sup>[17]</sup>,利用群体之间信息交互,确定整体最优值,然后其他个体根据整体最优和个体最优调整自身,通过不断更新逐渐靠近最优值。

## 4 仿真实验

### 4.1 理论分析验证

#### 4.1.1 仿真模型

为了验证本文所提 CI-FCL 理论的正确性以及参数设计的合理性,首先在图2所示单端柔性直流系统仿真模型进行仿真测试。仿真模型额定电压为500 kV,额定电流为2 kA,DCCB中MOV残余电压为800 kV。利用3.1—3.3节参数设计方法可求解得到 CI-FCL 的最优参数如下:  $L_p=0.1$  H,  $L_s=0.0834$  H,  $M=0.0767$  H,  $C_c=28$   $\mu$ F,  $R_c=9$   $\Omega$ ,  $R_e=13$   $\Omega$ 。

#### 4.1.2 仿真分析

在1 ms时设置短路故障,之后 CI-FCL 和 DCCB 将按照其工作原理动作,仿真后所得波形以及通过2.2节理论分析结果得到的计算波形见附录A图A5。由图可知,在  $t_1=3$  ms 时刻前保护装置尚未判别故障,故障电流持续上升,在此期间 CI-FCL 已自动进入故障限流阶段。 $t_1$  时刻 DCCB 接收到跳闸命令开始动作,  $t_2=5$  ms 时刻 DCCB 中 MB 各子模块闭锁, CI-

FCL 进入故障清除阶段,之后故障电流将会开始下降。  $t_3=5.59$  ms 时刻二极管阀  $D_e$  导通, CI-FCL 的耗能支路自动投入,之后于  $t_4=7.08$  ms 时刻故障电流降为0, CI-FCL 进入故障恢复阶段。  $t_5=35$  ms 时刻副边支路电流衰减为0, CI-FCL 动作结束。由仿真结果可知, CI-FCL 的动作过程与2.2节理论分析各阶段相同,并且仿真结果与理论计算结果基本一致。

### 4.2 柔性直流电网仿真实验

#### 4.2.1 仿真模型

在 PSCAD / EMTDC 仿真软件中搭建了如附录A图A6所示的四端柔性直流电网仿真模型,各换流器采用 MMC。图中,仅在直流线路 LINE<sub>12</sub> 上靠近 MMC<sub>1</sub> 侧配置本文所提 CI-FCL,其他线路端口配置 CLR。此外,在每条直流线路两端均配置混合式 DCCB。仿真模型的部分参数如附录A表A1所示。

#### 4.2.2 仿真分析

在1 ms时于直流线路 LINE<sub>12</sub> 的中点处设置短路故障,故障电流仿真波形如图4所示。为了突出本文所提 CI-FCL 的优势,将 CI-FCL 替换为 CLR 并且在相同故障场景下进行仿真,仿真结果同样见图4。图中:  $i_{CI-FCL}$ 、 $i_{CLR}$  分别为配置 CI-FCL 和 CLR 时的线路故障电流。由图可知,当配置本文所提 CI-FCL,故障电流峰值可降低22.49%,故障电流清除时间可缩短69.47%,限流效果显著。

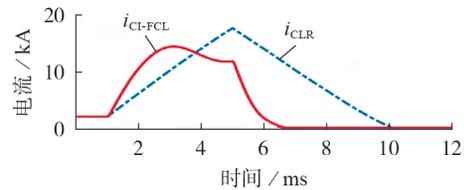


图4 CI-FCL 和 CLR 的限流效果对比

Fig.4 Fault current limiting performance comparison of CI-FCL and CLR

在 CI-FCL 动作过程中,各支路电压、电流波形如图5所示。图中:  $U_{De}$  为二极管阀  $D_e$  的电压。由图可知,在故障发生后,由于电感耦合作用副边支路产生耦合电流, CI-FCL 进入故障限流阶段。此时,二

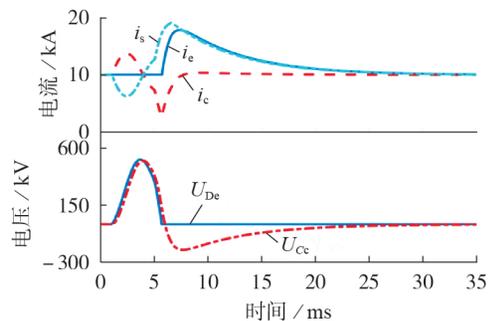


图5 CI-FCL 动作过程中各支路电气量仿真波形  
Fig.5 Electrical quantity simulative waveforms of each branch during CI-FCL operation process

极管阀D<sub>2</sub>承受反向电压闭锁,耗能支路不会投入。在5 ms时DCCB中MB各子模块闭锁,CI-FCL进入故障清除阶段。6.56 ms时故障电流降为0,CI-FCL进入故障恢复阶段。之后于35 ms时副边电流*i<sub>s</sub>*衰减为0,CI-FCL动作完成。

## 5 对比分析

为了突出本文所提CI-FCL的优势,对比CI-FCL与其他3种限流方案。其中,方案1为混合式FCL<sup>[8]</sup>,方案2为基于晶闸管的FCL<sup>[10]</sup>,方案3为耦合电感串联型FCL<sup>[11]</sup>,方案4为本文所提CI-FCL。对比测试系统采用附录A图A6所示四端柔性直流电网。

### 5.1 故障限流能力

由于近端故障时故障电流具有最大的上升速度,因此在LINE<sub>12</sub>上各FCL近端设置金属性短路故障以对比其故障限流能力,各方案的仿真结果如图6和附录A表A2所示。

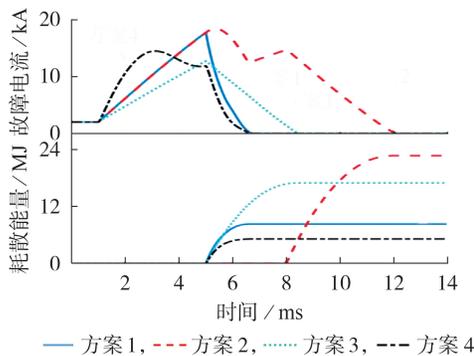


图6 不同方案对比分析

Fig.6 Comparison analysis of different schemes

由仿真结果可知,方案3在故障电流上升时通过耦合电感的同名端顺向串联以提高等效电感来限制故障电流,因此在所有方案中具有最佳的限流效果。但是,该方案通过辅助手段仅泄放副边电感的电流,因此故障电流需要比方案4更长的时间衰减至0。方案1与方案4具有相近的耗能时间,但是方案1仅通过CLR限流,因此故障电流峰值比方案4高。方案2通过各支路配合将CLR串联接入故障回路以限制故障电流,由于各支路动作需要时间,因此该方案的限流效果存在延时。此外,由于该方案不存在辅助耗能手段,因此方案2中DCCB所需耗散的能量为所有方案之中最高。

综合上述分析结果,虽然本文所提CI-FCL的故障限流能力稍逊于方案3,但是故障电流清除速度和所需DCCB的MOV容量均明显优于其他方案。

### 5.2 制造成本

本节对配置不同故障限流方案时FCL和DCCB的总成本进行了对比分析。除上述方案提出的FCL和DCCB的分立配置方案外,本节将对方案5<sup>[18]</sup>、

方案6<sup>[19]</sup>提出的FCL与DCCB的集成配置方案。假设所采用的IGBT型号为FZ3600R17HE4PHPSA1(其额定电压为1.7 kV,额定电流为7.2 kA,单价为11 454元),晶闸管型号为T2180N18TOFVTPSA1(其额定电压为1.8 kV,额定电流为38 kA,单价为4 472元),二极管阀型号为VS-SD1100C20C(其额定电压为2 kV,额定电流为13 kA,单价为555元)<sup>[20]</sup>。此外,假设MOV的制造成本大约为10万元/MJ,则各方案中FCL和DCCB所需的器件数量或容量及总成本如附录A表A3所示。

由表A3可知,相较于方案1—3、5、6,基于本文所提CI-FCL、FCL和DCCB的总成本分别降低了36.19%、52.24%、7.39%、22.15%、58.13%。此外,由于所提CI-FCL不包含受控元件,因此无需额外的控制电路成本,提高了设备的可靠性。

## 6 结论

为了解决柔性直流电网故障电流峰值高、DCCB耗能压力大等问题,本文提出一种CI-FCL,其动作过程分为正常运行阶段、故障限流阶段、故障清除阶段和故障恢复阶段。在正常运行阶段,CI-FCL的运行损耗仅为原边电感的导通损耗,其值远小于基于电力电子器件的FCL;在故障限流阶段,CI-FCL利用电感耦合特性等效投入限流支路,能够无延时地限制故障电流;在故障清除阶段,CI-FCL利用耗能电阻分担DCCB的耗能压力,从而显著降低避雷器容量需求并且大幅缩短故障电流分断时间。

理论分析与仿真验证表明,所提CI-FCL具有良好的无延时限流效果,并且能显著降低DCCB的耗能压力。此外,所提CI-FCL无需主动控制,因此具有可靠性高、投资成本低,易于实现等优点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 郑安然,郭春义,伍子东,等. 适用于对称故障仿真的特高压柔性直流换流站动态相量建模[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 127-134.  
ZHENG Anran, GUO Chunyi, WU Zidong, et al. Dynamic phasor modeling of VSC-UHVDC converter station suitable for symmetrical fault simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 127-134.
- [2] 张梓霖,康忠健,赵兵,等. 新能源经柔直送出系统新型孤岛鲁棒控制[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 111-121.  
ZHANG Zilin, KANG Zhongjian, ZHAO Bing, et al. New island robust control for renewable energy generation sent through islanded MMC-HVDC[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 111-121.
- [3] 李国庆,王延旭,辛业春,等. 基于附加级联陷波滤波器的MMC-HVDC多频段谐振抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 10-15.  
LI Guoqing, WANG Yanxu, XIN Yechun, et al. Multi-band resonance suppression strategy for MMC-HVDC based on additional cascaded notch filters[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2023, 43(4): 10-15.
- [4] 束洪春,任敏,田鑫萃,等. 适用于半桥型MMC附加限流控制的直流线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1):150-158. SHU Hongchun, REN Min, TIAN Xincui, et al. DC line pilot protection scheme suitable for half bridge MMC additional current limiting control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 150-158.
- [5] LI B, WANG C, WEI Z, et al. Technical requirements of the DC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4):1-5.
- [6] SONG M, SHENG C, MA T, et al. Current limiting tests of a prototype 160 kV/1 kA resistive DC superconducting fault current limiter[J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(1):014002.
- [7] LIU J, TAI N, FAN C, et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7):5595-5607.
- [8] LI B, HE J, LI Y, et al. The improved topology and control strategy for the HCLC in multi-terminal flexible DC grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2):1795-1807.
- [9] XU J, ZHAO X, HAN N, et al. A thyristor-based DC fault current limiter with inductor inserting-bypassing capability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3):1748-1757.
- [10] FU Z, SIMA W, YANG M, et al. A mutual-inductance-type fault current limiter in MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5):2403-2413.
- [11] NIE Z, YU Z, GAN Z, et al. Topology modeling and design of a novel magnetic coupling fault current limiter for VSC DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4):4029-4041.
- [12] 官二勇,董新洲,冯腾. 一种固态直流限流器拓扑结构[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4):978-986. GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4):978-986.
- [13] 唐诵,贾冠龙,张成浩,等. 适用于直流电网的预限流型直流断路器拓扑[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11):152-162. TANG Song, JIA Guanlong, ZHANG Chenghao, et al. Topology of DC circuit breaker with pre-current-limiting capability for DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11):152-162.
- [14] 张烁. 柔性直流电网直流线路故障处理关键技术研究[D]. 济南:山东大学, 2022. ZHANG Shuo. Research on key technology of DC line fault handling for flexible DC grids[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [15] 黄昕昱,张家奎,徐千鸣,等. 具有限流功能的模块化直流潮流控制器及其控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5):38-46. HUANG Xinyu, ZHANG Jiakui, XU Qianming, et al. Modular DC power flow controller with current limiting function and its control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5):38-46.
- [16] HEIDARY A, ROUZBEHI K, HESAMI M, et al. Bridge-type fault current limiter and hybrid breaker for HVDC grids applications[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18):3913-3919.
- [17] 李振坤,张天翼,田飞,等. 基于时间卷积网络和误差函数的光伏电站有功功率优化分配[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6):142-149. LI Zhenkun, ZHANG Tianyi, TIAN Fei, et al. Optimal allocation of active power for photovoltaic power station based on temporal convolutional network and error function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6):142-149.
- [18] AHMAD M, WANG Z, ZHANG Y. An improved fault current limiting circuit for VSC-HVDC transmission system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118:105836.
- [19] AHMAD M, WANG Z, SHAFIQUE M, et al. Significance of fault-current-limiters and parameters optimization in HVDC circuit breakers for increased capacity of VSC-HVDC transmission networks application[J]. Energy Reports, 2022, 8:878-892.
- [20] ZHANG S, ZOU G B, WEI X Y, et al. Combined hybrid DC circuit breaker capable of controlling current flow[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11):11157-11167.

#### 作者简介:

张烁(1995—),男,博士,研究方向为柔性直流电网保护与控制(**E-mail**: zhangshuo95@foxmail.com);  
 邹贵彬(1971—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**: guibinzou@sdu.edu.cn)。  
 (编辑 王欣竹)

## DC fault current limiter based on coupled inductor

ZHANG Shuo<sup>1</sup>, ZOU Guibin<sup>1</sup>, ZHANG Chengquan<sup>2</sup>, WEI Xiuyan<sup>1</sup>, ZHOU Chenghan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Weifang Power Supply Company, State Grid Electric Power Company, Weifang 261021, China)

**Abstract:** The flexible DC grid has the problems such as the rapid rising speed and high magnitude of the fault current, and large energy storage of inductive elements, which makes it difficult to interrupt the fault current and puts the energy dissipation branch of DC circuit breaker (DCCB) under enormous pressure. To limit the peak value of fault current and reduce the energy dissipation pressure of DCCB, a DC fault current limiter (FCL) based on coupled inductor is proposed. After a short circuit fault occurs, the FCL uses the inductive coupling characteristic to be equivalent to insert a current-limiting branch composed of resistor and capacitor to suppress the fault current without time delay. When the DCCB interrupts the fault current, the FCL utilizes the energy dissipation resistor to absorb the energy stored in the coupled inductor, there by sharing the energy consumption pressure of DCCB, so as to reduce the arrester capacity demand and accelerate the fault current interruption speed. Extensive electromagnetic transient simulative results show that the proposed FCL has good current limiting performance, can greatly reduce the energy dissipation pressure of the DCCB. And the FCL has low manufacture cost and is easy to be implemented.

**Key words:** flexible DC grid; DC fault current limiter; coupled inductor; DCCB; energy dissipation pressure

## 附录 A

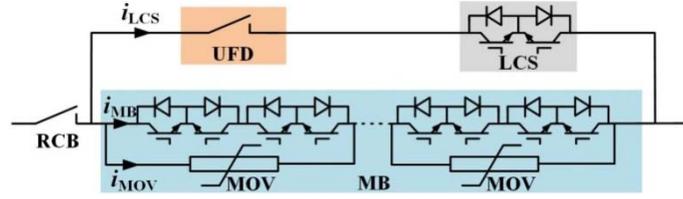


图 A1 典型混合式直流断路器的拓扑  
Fig.A1 Topology of typical hybrid DCCB

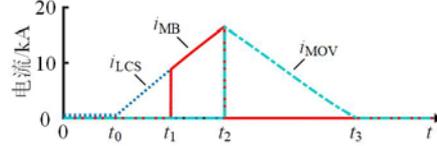


图 A2 混合式直流断路器各支路电流示意图  
Fig.A2 Schematic diagram of branch currents in hybrid DCCB

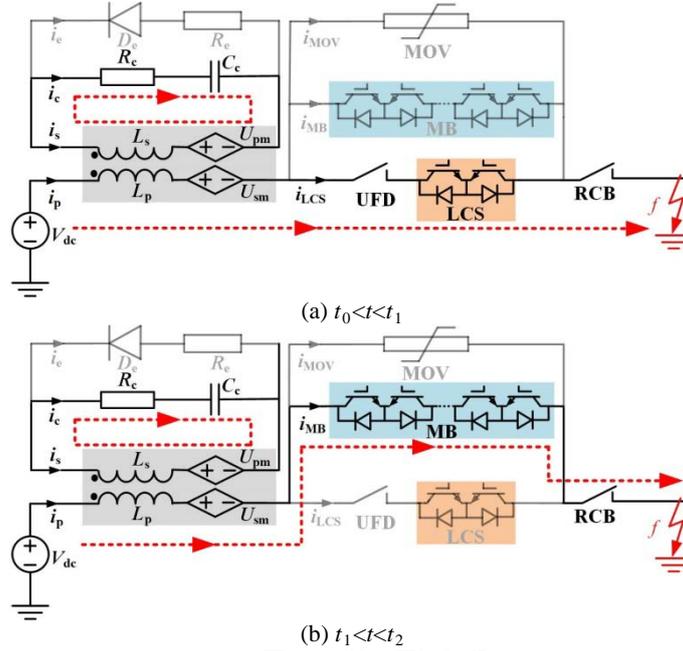


图 A3 故障限流阶段

Fig.A3 Fault current limiting stage

$$\begin{cases} L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} - V_{dc} = 0 \\ L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt} - U_{Cc} - i_c R_c = 0 \\ i_c = C_c \frac{dU_{Cc}}{dt} = -i_s \end{cases} \quad (A1)$$

式中： $U_{Cc}$ 为限流电容 $C_c$ 的电压。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{L_p R_c}{2(L_p L_s - M^2)} \\ \beta = \sqrt{\frac{L_p}{C_c(L_p L_s - M^2)} - \frac{L_p^2 R_c^2}{4(L_p L_s - M^2)^2}} \end{cases} \quad (A2)$$

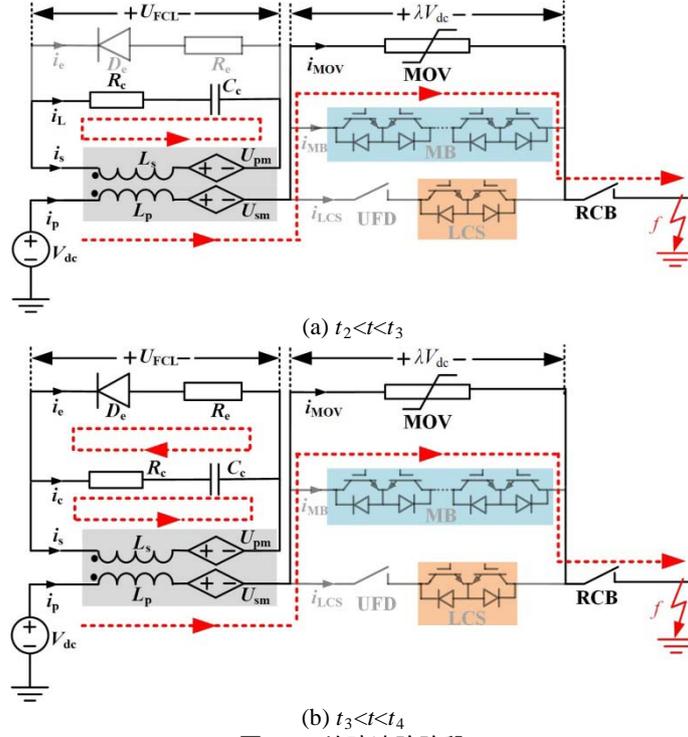


图 A4 故障清除阶段

Fig.A4 Fault current clearing stage

$$\begin{cases} L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} = 0 \\ L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt} - U_{Cc} - i_c R_c = 0 \\ i_e R_e - U_{Cc} - i_c R_c = 0 \\ i_c = C_c \frac{dU_{Cc}}{dt} = -i_s - i_e \end{cases} \quad (A3)$$

$$U_{FCL}(t) = \left( L_s - \frac{M^2}{L_p} \right) k_{FCL} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} e^{-\alpha t} \times \cos(\beta t + \varphi_{FCL}) + \frac{M}{L_p} V_{dc} \quad (A4)$$

式中： $\varphi_{FCL}$ 为 $\arctan(\alpha/\beta)$ 。

$$I_{Fmax} < I_{Load} + \frac{V_{dc} \arccos\left(1 - \frac{L_s L_p}{M^2}\right)}{L_p \beta} + \frac{M^2 V_{dc} \sin\left(\arccos\left(1 - \frac{L_s L_p}{M^2}\right)\right)}{L_p \beta (L_p L_s - M^2)} \quad (A5)$$

$$I_{Fmax} = \frac{M^2 V_{dc}}{\beta L_p (L_p L_s - M^2)} e^{-\alpha T_{FCR}} \sin(\beta T_{FCR}) + I_{Load} + \frac{V_{dc}}{L_p} T_{FCR} \quad (A6)$$

式中： $T_{FCR}$ 为故障发生到MB闭锁之间的时间间隔。

$$\begin{cases} \beta > 0 \\ \alpha^2 + \beta^2 \geq 0 \\ -1 < 1 - \frac{L_s L_p}{M^2} < 1 \\ \left( L_s - \frac{M^2}{L_p} + R_c R_e C_c \right)^2 - 4 \left[ (R_c + R_e) C_c \left( L_s - \frac{M^2}{L_p} \right) \right] R_e > 0 \\ (L_s + R_c R_e C_c)^2 - 4 \left[ (R_c + R_e) C_c L_s \right] R_e > 0 \end{cases} \quad (A7)$$

$$\begin{cases} k_1 = -\frac{MV_{dc} e^{-\alpha t_2} \sin(\beta t_2)}{\beta(L_p L_s - M^2)} \\ k_2 = \frac{[\lambda - e^{-\alpha t_2} \cos(\beta t_2)] MV_{dc}}{\beta(L_p L_s - M^2)} \\ k_3 = (L_p L_s - M^2) \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \\ \varphi_{CCS.U} = -\arctan \frac{e^{-\alpha t_2} \sin(\beta t_2)}{\lambda - e^{-\alpha t_2} \cos(\beta t_2)} \end{cases} \quad (A8)$$

$$\begin{cases} k_4 = (R_c + R_e) C_c \left( L_s - \frac{M^2}{L_p} \right) \\ k_5 = L_s - \frac{M^2}{L_p} + R_c R_e C_c \end{cases} \quad (A9)$$

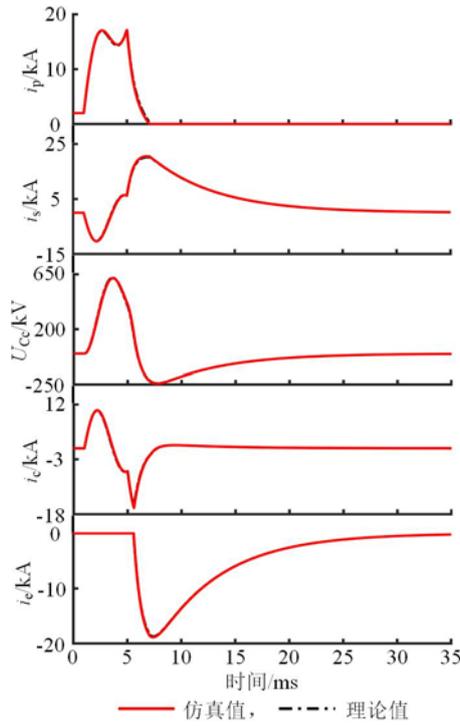


图 A5 理论计算与仿真结果对比

Fig.A5 Comparison of theoretical and simulated results

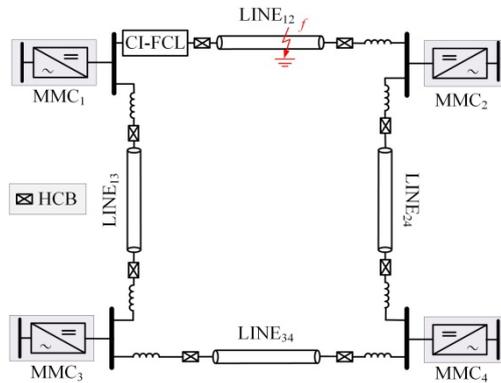


图 A6 仿真模型示意图

Fig.A6 Schematic diagram of simulation model

表 A1 仿真模型参数

Table A1 Simulation model parameters

参数	参数值
换流器额定电压/kV	500
换流器功率/MW	750、450、1125
线路长度LINE <sub>12</sub> —LINE <sub>14</sub> /km	200、100、160、120
子模块电容/mF	15
桥臂子模块数	250
桥臂电感/mH	29
限流电感/mH	100
MOV 残压/kV	800
UFD 分闸时间/ms	2

表 A2 不同方案仿真结果对比

Table A2 Simulation comparison of different schemes

方案名称	故障电流峰值/kA	MOV 耗能时间/ms	MOV 耗散能量/MJ
方案 1	17.72	1.71	8.33
方案 2	14.71	4.04	22.76
方案 3	12.70	3.42	23.20
方案 4	13.72	1.56	6.68

表 A3 不同方案成本对比

Table A3 Total cost comparison of different schemes

方案名称	IGBT 个数	晶闸管个数	二极管个数	MOV/MJ	总成本/万元
方案 1	2832	472	0	8.33	3538.2
方案 2	2838	2792	0	22.76	4727.0
方案 3	1920	0	124	23.20	2438.1
方案 4	1888	0	514	6.68	2257.9
方案 5	2532	0	0	6.29	2900.2
方案 6	4708	0	0	16.34	5392.5