

DOI: 10.7667/PSPC170518

# 基于电压源换流器的直流配电限流方案研究

田鑫, 高亮, 张俊峰

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 为了限制直流配电网中电压源换流器(Voltage Source Converters, VSC)直流侧发生两极短路故障时的直流侧故障电流, 研究了其故障发生时的暂态过程, 并对交流侧连接双向晶闸管(AC side connecting Double Thyristors, ACDTS)的保护方案进行分析。针对 ACDTS 直流侧电流过大问题, 提出了利用单向晶闸管以及并联电阻电感的方式对其改进。利用 PSCAD/EMTDC 对改进 ACDTS 方案进行直流侧故障仿真, 并与传统的直流侧线路故障以及 ACDTS 保护方案下的直流侧故障相互对比。仿真结果表明, 利用改进 ACDTS 保护方案可以有效地限制直流侧故障电流。

**关键词:** 电压源换流器; 直流配电网; 保护方案; PSCAD/EMTDC; ACDTS

## Research on current limiting scheme of DC distribution based on voltage source converter

TIAN Xin, GAO Liang, ZHANG Junfeng

(College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In order to limit the DC side fault current due to poles short-circuit of the Voltage Source Converters (VSC) DC side in DC distribution network, this paper studies the transient process of different stages during the DC side short circuit faults, and analyzes the protection scheme of AC Side Connecting Double Thyristors (ACDTS). Aiming at the problem that the current of ACDTS DC side is too large, this paper presents a way to improve the performance by making use of unidirectional thyristor, parallel resistance and inductance. The PSCAD/EMTDC is used to simulate the DC side fault of the improved ACDTS scheme, and compare with the traditional DC line fault and the DC side fault under the ACDTS protection scheme. The simulation results show that the improved ACDTS protection scheme can effectively limit the DC fault current.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607110) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 14ZR1417600).

**Key words:** VSC; DC distribution network; protection scheme; PSCAD/EMTDC; ACDTS

## 0 引言

近年来, 随着储能装置和分布式电源的发展, 以及高压直流输电的完善, 直流配电系统的研究逐渐成为国内外学者研究的热点。直流配电的供电容量、电能质量、传输效率、可靠性以及分布式电源接入等方面都较交流配电系统有了很大的改善<sup>[1-3]</sup>。在现实应用中, 直流供电方式在地铁、通信、船舶系统中已得到广泛的应用<sup>[4]</sup>。

其中由于两电平电压源换流器具有换相不会失败、控制策略较好等优点广泛用于直流输电中, 但

在直流侧发生故障时, 因其自身的大电容以及故障瞬间 IGBT 闭锁的原因, 故障后电容会往直流故障点放电, 瞬时电流为额定电压的几十倍<sup>[5]</sup>, 同时 VSC 内部的续流二极管仍然构成一个不控整流桥, 交流侧向故障点持续馈入故障电流, 对线路以及续流二极管造成极大的危害。低压线路并不适合全部安装直流断路器, 高压及中压直流断路器由于高压灭弧处理尚不成熟<sup>[6]</sup>, 在实际应用中通常利用断开交流侧断路器来清除直流线路的故障, 但是由于断路器的响应时间过长, 以及直流侧故障瞬时电流较大, 对直流侧线路以及续流二极管造成了极大的损害。

国内外的学者对直流线路故障诊断<sup>[7]</sup>以及如何限制短路电流、提高可靠性进行了深入研究。其中利用线路与 VSC 结构对短路电流进行限制的方案

**基金项目:** 国家自然科学基金资助(51607110); 上海市自然科学基金资助(14ZR1417600)

主要有:文献[8]提出了在 VSC 交流电源侧连接双向晶闸管(ACDTS),如图 1(a)所示。在直流侧故障发生后,利用晶闸管使交流侧三相短路,不再往故障点馈入短路电流,但是这种方法使直流侧电流自然衰减,对直流侧线路伤害较大,续流二极管也会出现过电流,文献也没有对 ACDTS 进行详细的暂态分析。文献[9]对比了 VSC 电容的几种接地方式,并提出 VSC 在高阻接地方式下,可以有效地对直流侧短路电流进行限制。文献[10-11]提出了在交流电源侧增加并联电容与串联电感的方案来限制直流侧短路电流,如图 1(b)所示。但是由于交流侧还继续往故障点馈入电流,对直流线路以及续流二极管的损害都较大。文献[12]提出了在续流二极管侧并联晶闸管与开关的方式来对续流二极管分流,减小通过二极管的电流,起到分流作用,如图 1(c)所示。但是直流侧的故障电流并不受影响,对线路损害仍很大。文献[13]分析了基于 VSC 柔性直流线路的故

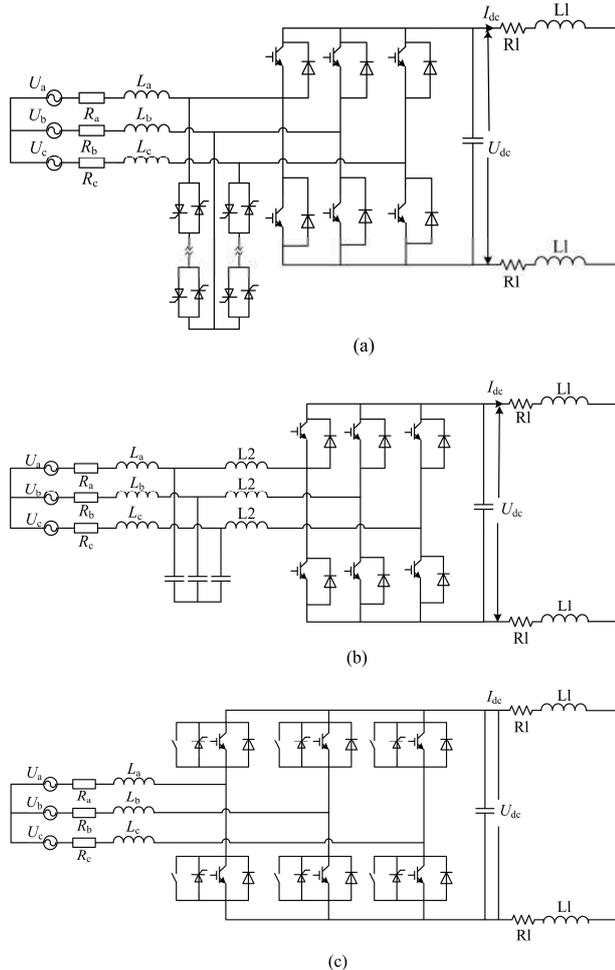


图 1 几种故障限流保护方案

Fig. 1 Several kinds of fault current limiting protection schemes

障特性,并且在直流线路中加入了电阻型超导限流器(R-SFCL)来限制短路时刻直流侧的故障电流,但是由于超导限流器的成本过高,并不适合安装于全部的配电网中。

本文研究了直流故障下 VSC 的暂态过程,对文献[8]提出的 ACDTS 保护方案进行暂态分析,并对其改进,改进后的保护方案可以有效地对直流线路中的故障电流以及续流二极管中的过电流进行限制,最后通过 PSCAD/EMTDC 进行仿真验证。

## 1 直流侧线路故障分析及保护方案研究

### 1.1 直流线路故障分析

在直流侧线路发生故障时,两极短路对系统的影响最大<sup>[14]</sup>。当直流侧发生两极短路故障时,如图 2 所示,线路中 IGBT 瞬时闭锁。在故障初期,直流电压  $U_{dc}$  大于交流线电压<sup>[15]</sup>,此时直流侧线路形成 RLC 放电回路,短路电流主要由滤波电容提供,其余由续流电抗提供;由于直流侧线路中电阻远小于电感,  $R < 2\sqrt{L/C}$ ,  $I_{dc}$  震荡衰减;当  $U_{dc}$  衰减小于交流线电压时,续流二极管形成不控整流桥,交流电源向故障点持续馈入电流,此时直流侧短路电流主要由交流侧提供;在故障末期,  $U_{dc}$  震荡过零,续流二极管全部导通,此时 VSC 内部同时承受交流侧三相短路电流与直流侧电抗的续流<sup>[13]</sup>,对 VSC 造成极大的危害。

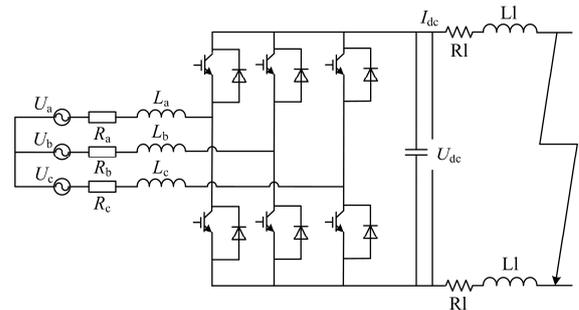


图 2 VSC 直流侧两极短路故障

Fig. 2 VSC DC side poles short circuit fault

### 1.2 ACDTS 保护下直流侧线路故障分析

文献[8]的保护方案,在 VSC 交流电源侧增加双向晶闸管,当直流侧线路发生两极短路故障时,VSC 中 IGBT 瞬时闭锁,直流侧线路检测到过流或欠压的故障特性时,将信号发送给双向晶闸管,向晶闸管发出导通信号,双向晶闸管导通。可以将故障分为两个阶段,第一阶段为滤波电容放电阶段,此时滤波电容电压远大于零,交流侧视为三相短路,不向直流侧馈入短路电流,如图 3(a)所示;直流侧故障电流由滤波大电容放电提供,如图 3(b)所示。

由于直流线路的电抗大于其电阻,  $R < 2\sqrt{L/C}$ ,  $U_{dc}$  震荡衰减, 同时直流侧短路电流在短时间内达到最大值后也进行震荡衰减, 此时续流二极管流过电流为零。

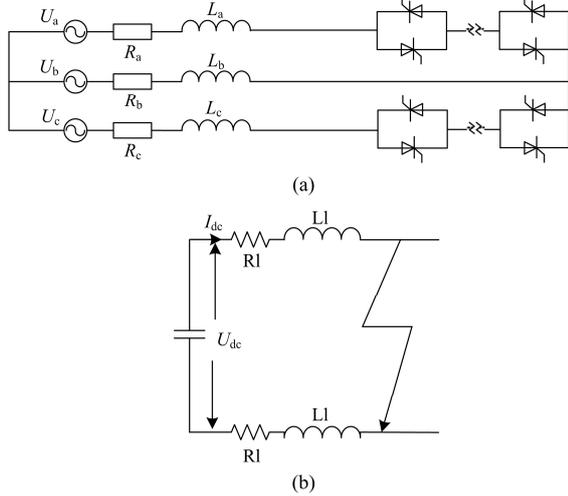


图3 ACDTS 保护方案下故障分解

Fig. 3 Fault decomposition under the ACDTS protection scheme

第二阶段为交流侧向直流侧供电, 当  $U_{dc}$  第一次震荡过 0 时, 此时  $U_{dc} < 0$ , 交流侧不能再视作三相短路, 交流侧电源开始向直流侧供电,  $U_{dc}$  电压一直在 0 处微小震荡。  $I_{dc}$  衰减速度减慢不发生震荡, 其随时间的增大而趋于稳定, 缩小到线路可承受的电流之内。在第二阶段初期续流二极管中电流由 0 瞬间增大, 会对二极管造成极大的损害, 在二阶段后期, 二极管电流随着时间的增大慢慢减小并且趋于稳定, 电流在二极管可承受范围之内。

### 1.3 改进 ACDTS 保护下直流侧线路故障分析

对 ACDTS 保护方案进行改进, 如图 4 所示。

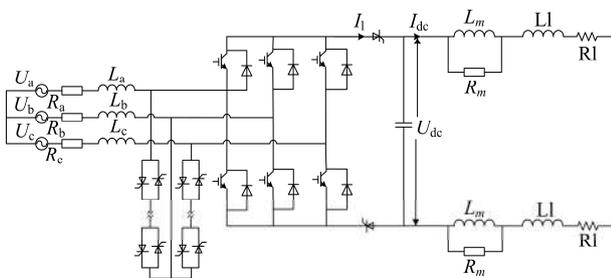


图4 改进 ACDTS 保护方案

Fig. 4 Improved ACDTS protection scheme

在滤波电容的交流侧增加两个单向晶闸管, 在正常运行时给予单向晶闸管导通信号, 当直流侧检测到过流或欠压的短路特性后, 给予单向晶闸管关断信号, 可以有效地将直流故障与交流电源隔离, 使续流二极管中的电流降为零。直流侧增加并联的

电感与电阻, 在线路正常运行时, 由于电感的特性, 在正常运行时并不体现电抗值, 相当于将电阻短路, 基本不造成功率损耗, 而在直流侧线路发生故障后, 线路电流突变, 电感体现出电抗特性, 电阻与电感并联, 增加了线路的电抗与电阻, 可以使线路中的故障电流有效地减小。

下面以情况最为严重的 VSC 出口处发生两极短路故障进行讨论分析。

当故障发生时, 直流侧检测到故障特征, 将信号发送给双向晶闸管和单向晶闸管, 双向晶闸管导通, 此时由于  $U_{dc}$  远大于零, 交流侧三相短路, 单向晶闸管流过电流为零, 可以关断。单向晶闸管关断后将直流侧与交流侧分为两个部分, 交流侧三相短路, 直流侧结构如图 5 所示。

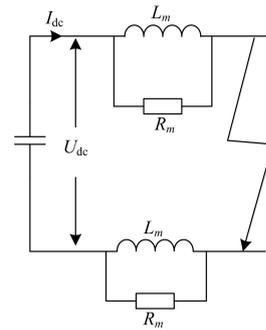


图5 改进 ACDTS 两极短路后直流侧结构

Fig. 5 Improved ACDTS DC structure after the poles short circuit

直流侧可以等效为 RLC 并联电路,  $2L_m=L$ ,  $2R_m=R$ ,  $G=1/R$ , 此时直流侧线路应满足基尔霍夫定律:

$$LC \frac{d^2 i_L}{dt} + GL \frac{di_L}{dt} + i_L = 0 \quad (1)$$

$$i_{L(0-)} = i_{L(0+)} = i_{dc} \quad (2)$$

$$\frac{di_{L(0+)}}{dt} = \frac{U_{L(0+)}}{L} = \frac{U_{C(0+)}}{L} = \frac{U_{dc}}{L} \quad (3)$$

令  $\alpha = G/C$ ,  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ ; 为使线路不发生震荡, 有  $G > 2\sqrt{C/L}$ , 式(1)的特征根为

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega^2} \quad (4)$$

$$s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega^2} \quad (5)$$

$s_1 \cdot s_2 = 1/LC$ , 电感电流  $i_L$  为

$$i_L = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (6)$$

将式(2)、式(3)代入式(6)得

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = i_{dc(0)} \\ \frac{di_L}{dt} = A_1 s_1 + A_2 s_2 = \frac{U_{dc(0)}}{L} \end{cases} \quad (7)$$

$$i_L = \frac{U_{dc(0)}}{L(s_1 - s_2)}(e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) + \frac{i_{dc(0)}}{s_1 - s_2}(s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}) \quad (8)$$

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} = \frac{U_{dc(0)}}{s_1 - s_2}(s_1 e^{s_1 t} - s_2 e^{s_2 t}) +$$

$$\frac{i_{dc(0)}}{C(s_1 - s_2)}(e^{s_2 t} - e^{s_1 t}) \quad (9)$$

$$i_{dc} = i_L + GU_L \quad (10)$$

因为线路不发生震荡, 当  $\frac{di_{dc}}{dt} = 0$  时,  $i_{dc}$  有最大值。

$$t = \frac{\ln\left(\frac{CU_{dc(0)}s_1 + GCLU_{dc(0)}s_1^2 - i_{dc(0)} - GLi_{dc(0)}s_1}{CU_{dc(0)}s_2 + GCLU_{dc(0)}s_2^2 - i_{dc(0)} - GLi_{dc(0)}s_2}\right)}{s_2 - s_1} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)可得  $i_{dc}$  最大值, 由式(8)一式(10)看出  $U_{dc(0)}$  和  $I_{dc(0)}$  分别与  $i_{dc}$  成正相关关系, 在同一时刻时初始电压电流越大, 直流侧短路电流越大。令  $U_{dc(0)}$  和  $I_{dc(0)}$  为常数代入式中, 得出  $R$ 、 $L$  与  $i_{dc}$  最大值的关系如图 6 所示。

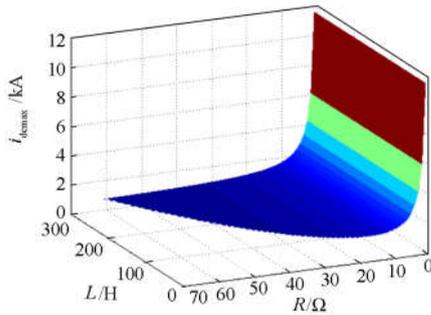


图 6  $R$ 、 $L$ 、 $i_{dcmax}$  的关系

Fig. 6 Relations among  $R$ ,  $L$ , and  $i_{dcmax}$

由图 6 可知, 在线路中  $R$  的取值直接影响短路电流的最大值,  $R$  越大直流侧短路电流最大值越小, 而  $L$  的变化对短路电流最大值无影响。由于线路中需满足  $G > 2\sqrt{C/L}$ , 但由 RLC 放电回路特性知  $L$  的选值越大短路电流衰减速度越慢, 利用在恶劣情况下即  $U_{dc(0)}$  和  $I_{dc(0)}$  最大时整定最小  $R$ 、 $L$  的值即可满足在任何运行条件下对短路电流进行有效的限制。

## 2 仿真实验

本文利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建了基于 PWM 控制的 VSC 仿真模型, 并对直流侧故障进行仿真, 对危害最为严重的直流线路两极短路故障进行分析, 10 kV 配网中主线路一般采用 LGJ-185 或 LGJ-150 线路<sup>[16]</sup>, 由于直流侧短路电流较大, 本文

采用 LGJ-240 线路作为直流侧线路, 相关参数如表 1 所示。

表 1 线路相关参数

Table 1 Line related parameters

项目名称	参数	项目名称	参数
直流额定电压	10 kV	交流侧电感	0.004 8 H
交流侧电阻	0.5 $\Omega$	直流线路电阻	0.13 $\Omega$ /km
线路载流量	610 A	直流线路电感	0.007 16 H/km
直流电容	20 000 $\mu$ F	线路能承受的最大电流	1.2 kA

### 2.1 直流线路故障仿真分析

假设线路在直流侧距换流站 3 km 处 10 s 时发生两极短路故障, 故障时运行条件为: 线路负荷为 2 MW, 电压为额定电压 10 kV。在不采用任何限流措施时, 仿真结果如图 7 所示,  $U_{dc}$  为直流侧电压,  $I_{dc}$  为直流侧电流,  $I_D$  为流过 a 相续流二极管的电流。

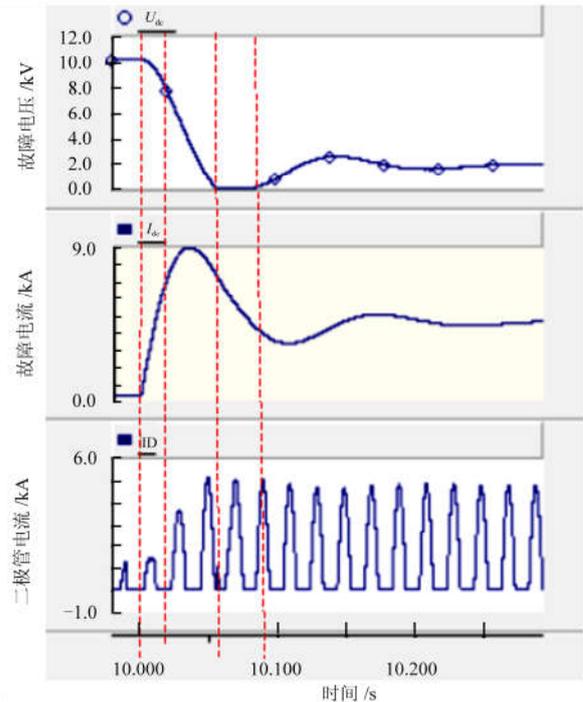


图 7 直流侧两极短路故障

Fig. 7 DC side poles short circuit fault

由图 7 可以看出, 在第一阶段, 滤波电容放电, 直流侧故障电流主要由电容放电提供, 流过续流二极管的电流为交流侧电感的续流, 此时直流侧故障电流不断上升; 在第二阶段, 滤波电容两端电压小于交流侧线电压, 交流侧电源向故障点馈入电流, 续流二极管形成不控整流桥, 电容也同时向故障点放电, 故障电流达到峰值后开始下降, 峰值为 9 kA 左右, 是正常电流的 45 倍, 对线路造成极大的损害, 续流二极管中电流也在不断增大; 在第三阶段, 电

容两端电压放电至零，续流二极管全部导通，此时续流管承受交流侧三相短路电流与直流侧电抗续流，电流达到最大值，为正常运行时的 5~6 倍，对二极管造成极大损害；第四阶段，续流二极管中电流过零后关断，交流侧通过不控整流桥向故障点供电，此时故障电流趋于稳定，为正常电流的 20 倍左右。

### 2.2 ACDTS 保护下直流侧两极短路分析

对文献[8]提出的 ACDTS 保护方案进行仿真分析，假设线路在直流侧距换流站 3 km 处 10 s 时发生两极短路故障，故障时运行条件为：线路负荷为 2 MW，电压为额定电压 10 kV。仿真结果如图 8 所示。

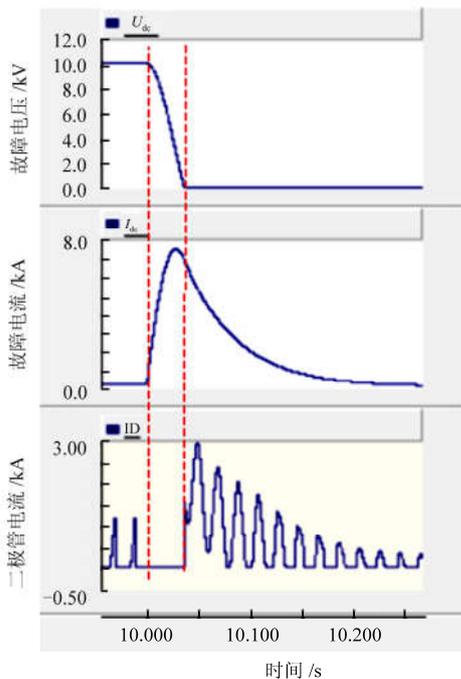


图 8 ACDTS 保护下直流侧两极短路故障

Fig. 8 DC side poles short circuit fault under the ACDTS protection scheme

由图 8 可以看出，在故障发生后第一阶段，交流侧被双向晶闸管短路，直流故障电流由滤波电容放电提供，由于故障电流达到峰值后衰减，峰值为 7.5 kA 左右，为正常运行时电流的 37 倍左右，续流二极管此时没有电流流过。在第二阶段，当电容两端电压衰减过零时， $U_{dc}$  小于交流侧双晶闸管电压，交流侧开始向直流故障处供电，续流二极管中电流增大至正常运行下的 3 倍，对二极管造成损坏，此时直流侧故障电流由交流侧电流与线路电抗续流组成，逐渐衰减至 70 A 时达到稳定， $U_{dc}$  在零左右震荡。

### 2.3 改进 ACDTS 保护下直流侧两极短路分析

根据规定，10 kV 及以下供电电压允许偏差应

在标称系统电压的  $\pm 7\%$  内，为考虑恶劣情况设直流侧电压偏差为  $\pm 10\%$ ，初始电压范围为 9~11 kV。线路中正常运行时电流不超过线路载流量，初始电流范围为 0~0.61 kA。

利用  $U_{dc(0)}$ 、 $I_{dc(0)}$  分别与  $i_{dc}$  成正相关关系，且  $L$  对  $i_{dcmax}$  无影响，取最大  $U_{dc(0)}$ 、 $I_{dc(0)}$  的运行条件即在短路电流最大的情况下对  $R$  的选值进行分析。将  $U_{dc(0)}=11$  kV,  $I_{dc(0)}=0.61$  kA 代入式(10)和式(11)，利用 Matlab 进行计算分析，得出  $R$  与短路电流  $i_{dcmax}$  的关系如图 9 所示。

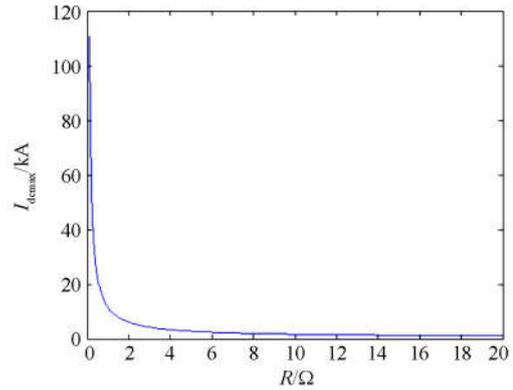


图 9 满载条件下  $R$ 、 $i_{dcmax}$  关系

Fig. 9  $R$  and  $i_{dcmax}$  relations under full load condition

将  $i_{dcmax}=1.2$  kA 代入图 9，得  $R=18.6 \Omega$ ， $L$  需满足  $G > 2\sqrt{C/L}$ ，得  $L > 27.67$  H，取  $L=28$  H。则限流元件中  $R_m=9.3 \Omega$ ， $L_m=14$  H。将  $R$ 、 $L$  的值代入式(10)、式(11)得出在  $R=18.6 \Omega$ 、 $L=28$  H 时，初始电压电流与最大短路电流的关系，如图 10 所示。

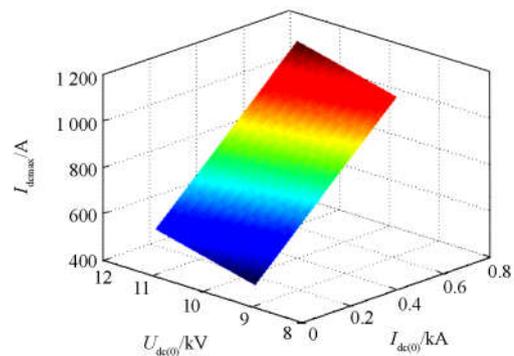


图 10  $U_{dc(0)}$ 、 $I_{dc(0)}$ 、 $i_{dcmax}$  关系

Fig. 10 Relations among  $U_{dc(0)}$ 、 $I_{dc(0)}$  and  $i_{dcmax}$

由图 10 可以看出在任何运行方式下线路发生最严重的 VSC 出口处两极短路时，改进 ACDTS 保护方案都可以有效地将最大短路电流限制在 1.2 kA 以下。

假设在直流侧距换流站 3 km 处 10 s 时发生两

极短路故障, 在线路初始电压最大且满载的情况下如图 11(a)所示, 在线路负荷为 2 MW, 电压为额定

电压 10 kV 的情况下如图 11(b)所示、初始电压最小且空载的情况下如图 11(c)所示。

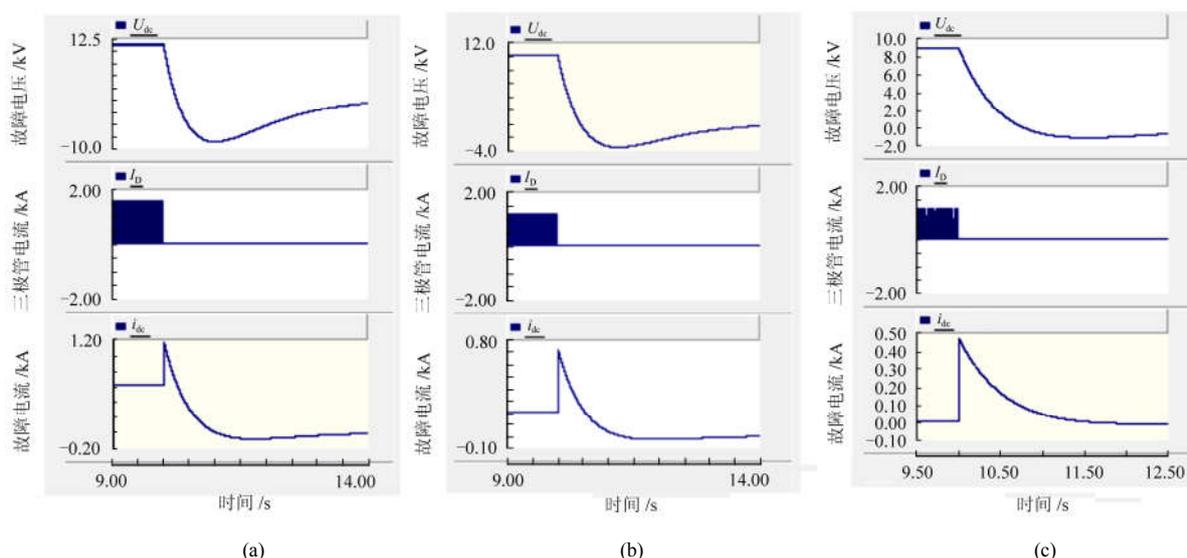


图 11 改进 ACDTS 保护下直流侧两极短路

Fig. 11 DC side poles short circuit fault under the Improved ACDTS protection scheme

由图 11 可以看出, 在改进 ACDTS 保护下, 在直流侧发生两极短路时, 双向晶闸管导通, 交流侧短路, 续流二极管中电流为零, 关断单向晶闸管, 使交流侧与直流侧完全分开。当  $U_{dc}$  电压过零时, 交流侧不向直流侧馈入短路电流, 保护了续流二极管。同时, 直流侧增加了限流元件使直流系统在任何运行条件下都能将直流侧短路电流有效地限制在 1.2 kA 以下。

由图 11(b)与图 7、图 8 进行对比可知, 在线路负荷为 2 MW, 电压为额定电压 10 kV 的运行方式下发生两极短路时, 无保护方案下直流侧短路电流最大值在 9 kA 左右, ACDTS 保护下最大值在 7.5 kA, 而在改进 ACDTS 保护下直流侧短路最大电流只有 0.75 kA。续流二极管中的过电流在无保护方案下是原电流的 6 倍, ACDTS 保护下为原电流的 3 倍, 而在改进 ACDTS 下续流二极管中电流为零。在无保护方案下交流侧向直流侧馈入大电流, 对线路造成极大损害, 在 ACDTS 保护下可以将交流侧向直流侧馈入的短路电流有效的限制, 而在改进 ACDTS 保护下可以将直流侧与交流侧分离, 使交流侧不向故障点馈入短路电流。由此可见, 改进后的保护方案可以有效地保护直流侧线路和电压源换流器中的续流二极管不受短路电流的损害。

### 3 结论

直流电网的短路特性限制了其在未来的发

展, 本文利用单向晶闸管与并联电阻与电感对 ACDTS 进行了改进, 改进后的保护方案具有以下优点: ① 能够有效地将直流侧的故障电流限制在线路最大载流量之下, 保护了直流侧线路; ② 避免续流二极管在短路过程中受到过电流的冲击, 保护了续流二极管; ③ 使交流侧与直流侧隔离, 避免了交流电源向故障点馈入短路电流。利用仿真验证表明利用改进 ACDTS 保护方案对直流侧故障的限流效果明显, 能够有效、快速地对故障电流进行限制。

### 参考文献

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.  
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [2] 秦红霞, 孙刚, 时伯年, 等. 柔性直流配电网极间故障控制保护策略与主设备参数配合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 150-156.  
QIN Hongxia, SUN Gang, SHI Bonian, et al. Research on control and protection strategy of MMC based DC distribution grid with interpoles fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 150-156.
- [3] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.  
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key

- technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [4] 张威, 施伟锋, 胡红钱. 船舶区域配电系统全智能体重构及其优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 9-15.  
ZHANG Wei, SHI Weifeng, HU Hongqian. Research on agent based reconfiguration and its optimization for shipboard zonal power systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 9-15.
- [5] CHANG B, CWIKOWSKI O, BARNES M, et al. Point-to-point two-level converter system faults analysis[C] // IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives: IET, April 8-10, 2014, Midland, Manchester UK: 1-6.
- [6] 魏晓光, 高冲, 罗湘, 等. 柔性直流输电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-102.  
WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [7] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [8] ELSEROUGI A A, ABDEL-KHALIK A S, MASSOUD A M, et al. A new protection scheme for HVDC converters against DC-side faults with current suppression capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1569-1577.
- [9] 鲁国正, 高亮, 梁智敏. 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 75-80.  
LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 75-80.
- [10] LIN W, JOVCIC D. LCL and L-VSC converters with DC fault current-limiting property and minimal power losses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2359-2368.
- [11] JOVCIC D, ZHANG L, HAJIAN M. LCL VSC converter for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 137-144.
- [12] CANDELARIA J, PARK J D. VSC-HVDC system protection: a review of current methods[C] // Power Systems Conference and Exposition: IEEE, March 20-23, 2011, Phoenix, AZ, USA: 1-7.
- [13] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.  
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [14] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [15] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [16] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

收稿日期: 2017-04-11; 修回日期: 2017-11-02

作者简介:

田鑫(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护、直流配电系统; E-mail: 498510438@qq.com

高亮(1960—), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及数字化变电站;

张俊峰(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电保护与控制。

(编辑 张爱琴)