

# 基于VSC的直流配电网限流电抗器位置和参数优化配置方法

王守相<sup>1</sup>, 嵇程程<sup>1</sup>, 刘琪<sup>1</sup>, 杨景刚<sup>2</sup>, 陈庆<sup>3</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100; 3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:**直流配电系统发生故障后故障电流快速上升,通过安装故障限流装置能有效降低故障电流上升的速率,减小故障电流的峰值,保护系统中的电力电子装置。基于电压源型换流器构建双端柔性直流配电网模型,分析直流配电系统发生极间短路故障的故障原理和故障特征,研究限流电抗器在不同接入位置的限流原理和效果。考虑到换流器耐流特性、保护装置及断路器动作特性,提出基于限流电抗器的故障限流位置和参数优化配置方法,并通过PSCAD/EMTDC平台进行仿真优化,从而确定故障限流电抗器的最优配置方案。

**关键词:**直流配电网;极间短路故障;故障特征;故障限流;限流电抗器

**中图分类号:**TM 46;TM 727

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201911030

## 0 引言

随着直流型分布式电源(DG)的大规模接入和电动汽车等直流负荷的不断增加,配电系统的直流特征日益突出。发展直流配电系统能有效提高对DG的接纳能力,减少换流环节,降低线路损耗,提高系统效率<sup>[1-3]</sup>。

考虑到由于物理损伤、环境应力、电应力和电缆老化等原因导致的直流短路故障频发,文献[4]针对基于电压源型换流器(VSC)的直流电缆的短路故障分析和定位开展了研究。一些针对直流微电网的研究也发现,当发生直流短路故障时,会产生强大的冲击电流,导致线路损耗、电容烧毁,还可能造成线路保护误动作、断路器烧毁等<sup>[5-6]</sup>。由此值得借鉴,当直流配电系统直流侧发生故障时,必须采取有效的故障限流措施,以减少故障电流对换流器及电力线路的冲击,保证故障线路切除后,系统能够正常运行,提高供电可靠性。

目前,针对直流系统故障限流主要通过采用具有故障清除能力的换流阀及安装限流模块或限流装置等方式实现。其中,通过采用可以清除故障电流的模块化多电平换流器(MMC)可有效限制故障电流,实现直流故障无闭锁穿越,对提高直流配电系统的供电可靠性具有重要意义<sup>[7]</sup>。由于半桥子模块存在无法清除直流故障电流的问题,文献[8]提出一种具有直流故障阻断能力的新型电容箝位子模块拓扑,其能有效阻断直流故障电流。文献[9]提出一种基于二极管箝位子模块的增强型MMC拓扑结构,其

可以实现直流故障的快速清除,以及非永久性故障的系统自动恢复,但采用电力电子器件较多,增加了MMC的设备成本。为进一步降低具有故障清除能力的MMC的设备成本,文献[10]提出一种新型的自阻型MMC子模块拓扑,并进一步构建基于自阻型和常规型模块组成的混合型MMC,有效提高了直流系统的经济性和可靠性。考虑到直流配电系统中直流断路器的设备成本较高,文献[11]通过改进MMC的控制方式,提出一种基于混合型MMC的主动限流控制方法,降低了对直流断路器开断速度、开断容量以及吸收能量的要求,减少直流电网建设成本。

相比于采用具有故障限流功能的换流阀,通过在直流配电系统中安装限流模块或限流装置实现故障限流,可降低换流阀的设备成本,并实现限流装置与断路器等设备的协调配合,是直流系统限流的一个重要研究方向。文献[12]将双向晶闸管连接在换流器交流侧输出端,系统发生故障时交流侧被短路,可有效隔离换流器和交流电源,降低故障电流的峰值。文献[13]提出基于双向晶闸管的保护方案,在滤波电容的交流侧增加2个单向晶闸管,同时在直流侧并联电感和电阻,既可使交流侧与直流侧隔离,又可减小直流侧线路故障电流。文献[14]提出一种基于LCL-VSC的故障电流限制方法,相比于传统的L-VSC,其可减小交流侧能量的馈入,降低直流断路器的动作速度和容量要求,同时会减小电力电子器件的损耗。由于限流电抗器参数过大会造成系统不稳定,并增大建设成本,因此需要合理配置限流电抗器参数。文献[15]针对四端直流电网短路故障,以直流断路器切断电流值最小与故障限流器和直流断路器的金属氧化物避雷器吸收能量最小为双目标函数,采用单纯形法对直流线路电抗器进行优化配置。

收稿日期:2019-03-14;修回日期:2019-09-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2018YFB0904700)

文献[16]以系统配置电感总和最小为目标函数,采用“教与学”算法确定限流电抗器的最优配置。

考虑到故障限流与直流断路器的协调配合,文献[17]研究有限流能力的直流断路器,提出一种新型混合式强迫换流直流断路器拓扑,其不仅可快速切除故障电流,还可实现开关的零电流开断,提高断路器的可靠性。文献[18]针对多端基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)系统直流线路故障电流特征,提出一种基于限流电路和混合直流断路器的直流线路故障处理方案,其能够有效限制故障电流,降低直流线路对直流断路器的要求。超导限流器也可有效限制故障时的短路电流。文献[19]依据直流配电系统直流故障暂态机理,提出利用电阻型超导限流器抑制故障电流,其能够有效限制直流侧、交流侧和换流器内部的故障电流水平;文献[20]提出一种直流断路器与超导限流器的协调配合方案,其可以有效抑制故障电流值,减少直流断路器中耗能支路耗散的能量,加速故障隔离过程。

目前,针对限流电抗器的优化配置主要考虑通过在直流侧安装限流电抗器以限制直流线路故障电流。而对限流装置在不同位置对线路、换流阀二极管等器件的限流效果的研究较少。为此,本文基于三相两电平VSC构建了双端柔性直流配电网模型,分析了直流配电系统发生极间短路故障的故障原理和故障特征;研究了限流电抗器在不同接入位置的限流原理;考虑换流阀耐流特性、保护装置及断路器动作特性,提出了基于限流电抗器的故障限流位置和参数优化配置方法,通过PSCAD/EMTDC平台进行仿真优化,确定了故障限流的最优方案。

## 1 直流配电网建模与故障电流分析

### 1.1 直流配电网网络故障分析

以图1所示的典型双端柔性中压直流配电网为例进行故障分析。

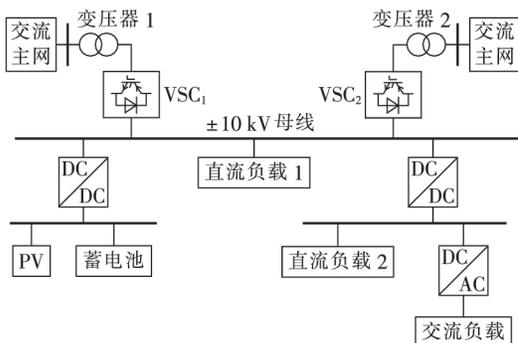


图1 柔性双端直流配电网结构图

Fig.1 Structure diagram of flexible double-end DC distribution network

极间短路故障是最严重的一类线路故障,直流

配电网发生极间短路故障的等效电路如图2所示。图中, $L_s$ 、 $R_s$ 分别为交流侧等效电感和电阻; $L$ 、 $R$ 分别为母线到故障点的等效电感和电阻; $C$ 为直流侧稳压电容。

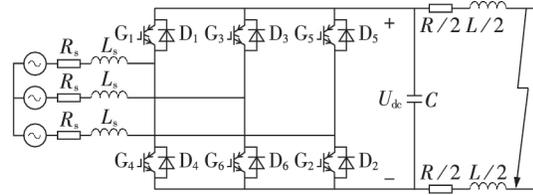


图2 直流配电网发生极间短路故障的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of DC distribution network under pole-to-pole short circuit fault

### 1.2 故障后换流阀闭锁的极间短路故障分析

当换流阀检测到故障电流快速上升启动闭锁,根据换流阀闭锁后直流线路两极短路故障电路响应特性,可以将故障过程大体分为以下4个阶段:滤波电容放电阶段、二极管交替导通的电容放电阶段、二极管同时导通续流阶段和不可控整流稳态阶段<sup>[21]</sup>。

#### 1.2.1 滤波电容放电阶段

当发生极间短路故障时,IGBT检测到故障电流快速上升而瞬间闭锁,交流侧通过续流二极管与直流侧连接。此时直流侧电压大于交流侧线电压,因此,直流线路故障电流即为直流电容向故障点放电电流。直流侧可等效为一个二阶放电电路,设 $I_0$ 、 $U_0$ 分别为电感电流初始值和电容电压初始值。

当 $R > 2\sqrt{L/C}$ 时,电容放电的过程是过阻尼非振荡放电过程,则故障电流为:

$$i_{f1} = \left( \frac{U_0}{2\omega L} + \frac{-\delta + \omega}{2\omega} I_0 \right) e^{(-\delta + \omega)t} + \left( -\frac{U_0}{2\omega L} + \frac{\delta + \omega}{2\omega} I_0 \right) e^{(-\delta - \omega)t} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\left( \frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

当 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时,电容放电的过程是二阶欠阻非振荡过程,则故障电流为:

$$i_{f2} = e^{-\delta t} \sqrt{I_0^2 + \left( \frac{U_0}{\omega' L} - \frac{\delta}{\omega'} I_0 \right)^2} \sin(\omega' t + \beta) \quad (2)$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2}, \quad \beta = \arctan \frac{I_0}{\frac{U_0}{\omega' L} - \frac{\delta}{\omega'} I_0}$$

#### 1.2.2 二极管交替导通的电容放电阶段

当直流侧电容电压下降到交流侧线电压时,二极管承受正向电压,不可控整流电路导通,交流侧电源通过交替导通的续流二极管向故障点馈入电流,故障点能量由放电电容和交流侧同时提供。以 $D_1$ 、 $D_2$ 导通为例,以交流侧线电流 $i_s$ 、直流侧故障电流 $i_f$ 、

直流侧端电压  $u_{dc}$  为状态变量,根据电路原理可得:

$$\begin{cases} i_f = i_s + Cdu_{dc}/dt \\ u_{dc} = i_f R + Ldi_f/dt \\ u_s = 2i_s R_s + 2L_s di_s/dt + u_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $u_s$  为交流电源的输出电压。

### 1.2.3 二极管同时导通电感续流阶段

当故障电路工作在过阻尼状态,即  $R > 2\sqrt{L/C}$  时,电容电压无振荡衰减,直流侧电压不会过零点,故障电路直接进入不可控整流阶段。

当故障电路工作在欠阻尼状态,即  $R < 2\sqrt{L/C}$  时,直流侧电压振荡衰减至过零点,稳压电容被续流二极管短路,电容电压保持为 0,此时换流阀中反向并联的二极管全部导通,交流侧变为发生三相对称短路故障;同时电感释放吸收的电能以维持电流的连续性,直流侧放电回路变为由电感  $L$  和电阻  $R$  构成的一阶电路。假设  $t_0$  时刻进入此过程,此时电流值为  $I'_0$ ,则电感放电阶段直流线路上的电流可表示为:

$$i_f = I'_0 e^{-\frac{R}{L}(t-t_0)} \quad (4)$$

由式(4)可知,此过程通过续流二极管的电流为直流线路故障电流的 1/3,即  $i_D = i_f/3$ 。其值是正常运行时二极管电流的几十倍甚至上百倍,必须采取限流的措施限制二极管的故障电流。

### 1.2.4 不可控整流稳态阶段

电感放电阶段完成后系统进入稳定状态,系统换流阀相当于一个三相不可控整流桥,二极管自然换相,交替导通,交流电源将持续提供故障电流,直至故障切除。

## 2 限流电抗器在不同安装位置的限流作用

直流配电系统故障电流峰值大、上升速率快,易造成配电线路及配电设备过流。通过安装限流装置能有效抑制电流上升的速率及故障电流的峰值,保障配电设备及配电线路的安全。限流电抗器由于工艺成熟且价格便宜,在实际工程中应用广泛,因此本文主要通过安装限流电抗器来限制故障电流。

限流电抗器可以安装在换流器直流侧出口处(A处)、交流侧出口(B处),如图 3 所示。电抗器的安装位置会影响其限流效果,本节对安装在各个位置的电抗器的限流原理和限流能力进行分析。

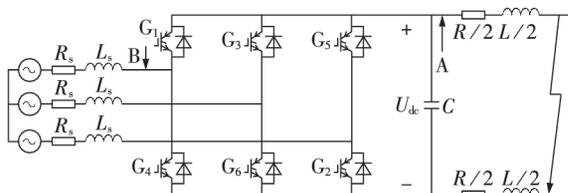


图3 限流电抗器安装位置

Fig.3 Location of current-limiting reactor

### 2.1 限流电抗器安装于直流侧出口处

在滤波电容放电阶段,直流侧出口处安装限流电抗器相当于增大电容放电回路电感。设加装电感值为  $L_1$ ,则回路电感变为  $L_1 + L$ ,如果电路处于欠阻尼状态,根据式(2)可得故障电流幅值为:

$$|i_f| = \sqrt{I_0^2 + \left[ \frac{U_0}{\omega'(L+L_1)} - \frac{\delta}{\omega'} I_0 \right]^2} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{R}{2(L+L_1)}, \omega' = \sqrt{\left[ \frac{R}{2(L+L_1)} \right]^2 - \frac{1}{(L+L_1)C}}$$

由式(5)可知,电容放电回路电感增大,放电电流幅值减小,从而抑制故障电流的峰值;回路电感增大,导致回路电流衰减常数  $\delta$  减小,从而延缓电容放电,抑制回路电流的上升速率,降低对线路直流断路器的要求。

在二极管同时导通阶段,限流电抗器不会接入交流侧短路回路,但会接入直流侧短路回路,如图 4 所示。可知,限流电抗器可以增大回路电感,从而抑制该阶段直流侧短路故障电流峰值,降低对续流二极管耐流能力的要求。

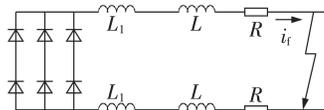


图4 直流侧短路故障的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of DC-side short circuit fault

### 2.2 限流电抗器安装于交流侧出口处

限流电抗器安装于交流侧,虽然不会抑制电容放电电流,但可以抑制交流侧故障电流的馈入,从而抑制线路故障电流。

在极间短路故障第一阶段,交流侧不会向故障点馈入电流,此时限流电感不起作用。当故障进入第二阶段,续流二极管交替导通,交流侧能量经电感、二极管馈入故障点,相当于三相不可控整流电路短路,以  $D_1$ 、 $D_2$  导通为例,可等效为一阶放电回路,如图 5 所示。可知,交流侧出口处加限流电抗器,相当于增大回路电感(包含交流侧等效电感及直流线路等效电感),从而使回路电流峰值减小,故障电流上升速率变小,进而抑制交流侧的电流馈入。

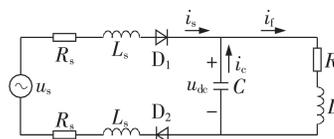


图5 电容放电阶段的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of capacitor discharge stage

当交流侧故障进入三相对称短路阶段时,增大

交流侧电感,可以抑制三相短路电流峰值,从而减小故障电流对续流二极管的冲击,降低对电力电子器件的要求。

### 3 限流电抗器位置和参数综合优化配置

由第2节分析可知,不同位置加装限流电抗器,对流过交、直流侧线路和电力电子器件的故障电流限制水平不同。为限制直流线路故障电流,必须在直流侧出口处安装限流电抗器;为限制续流二极管电流,可在交流侧出口处安装限流电抗器。限流电抗器的电抗值越大,对故障电流的抑制效果越好,但是电抗过大会造成系统启动时间过长,引起系统电压振荡,控制响应速度变慢,建设成本增加。另外,限流电抗器自身存在电阻,会引起系统功率损耗,因此必须在保证限流能力的前提下,对限流电抗器进行优化配置。本节基于系统建设成本和限流电抗器限流能力建立了数学优化模型。

#### 3.1 目标函数

将限流电抗器投资成本及所产生的功率损耗成本之和最小作为优化的目标函数:

$$\min f = g_1 + g_2 \quad (6)$$

其中, $g_1$ 、 $g_2$ 分别为电抗器投资成本和电抗器自身电阻所产生的功率损耗成本,具体表达式分别如式(7)和式(8)所示。

$$g_1 = N_A k_1 L_A + N_B k_1 L_B \quad (7)$$

$$g_2 = k_{e,ele} T k_R (N_A L_A I_{dc}^2 + N_B L_B I_a^2) \quad (8)$$

其中, $L_A$ 、 $L_B$ 分别为A、B处电抗器的设计容量,可以为0; $N_A$ 、 $N_B$ 分别为A、B处电抗器的个数,由图3可知,其取值分别为3、2; $k_1$ 为电抗器的投资成本; $I_a$ 、 $I_{dc}$ 分别为交流侧相电流、直流侧线电流; $T$ 为运行周期; $k_{e,ele}$ 为单位网损电量的成本; $k_R$ 为单位电感的电阻值。

#### 3.2 约束条件

(1)直流线路电流约束。

$$I_{dc} \leq I_{dc,max} \quad (9)$$

其中, $I_{dc}$ 为直流线路电流; $I_{dc,max}$ 为直流线路的最大允许电流。

(2)直流断路器开关开断电流容量及故障电流上升速率约束。

$$\begin{cases} I_{dc} \leq I_{bk,max} \\ dI_{dc}/dt \leq I'_{bk,max} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $I_{bk,max}$ 为直流断路器开断电流上限; $I'_{bk,max}$ 为直流断路器承受的最大电流变化率。

(3)交流线路电流约束。

$$|I_{ac}| \leq I_{ac,max} \quad (11)$$

其中, $I_{ac}$ 为交流线路电流; $I_{ac,max}$ 为交流线路的最大允许电流。

(4)续流二极管电流约束。

$$|I_{dv}| \leq I_{dv,max} \quad (12)$$

其中, $I_{dv}$ 为通过续流二极管的电流; $I_{dv,max}$ 为通过续流二极管电流上限。

(5)直流侧电压波动约束。

为保证安装电容器后系统正常运行时电压的稳定性,需满足直流侧电压波动约束:

$$0.9U_{dcN} \leq U_{dc} \leq 1.1U_{dcN} \quad (13)$$

其中, $U_{dc}$ 为直流线路电压; $U_{dcN}$ 为系统额定电压。

### 3.3 优化方法

依据所建立的数学优化模型,利用PSCAD/EMTDC仿真软件的逻辑元件,建立对应的优化模型,并利用“Optimum Run”模块自带的遗传算法进行优化,选择操作采用精英保留策略,同时,采用单点交叉和单点变异方法。

## 4 仿真分析

利用PSCAD/EMTDC搭建±10 kV的双端直流配电系统仿真模型,其中换流器VSC<sub>1</sub>为定电压控制,换流器VSC<sub>2</sub>为定功率控制,系统总容量为8.5 MW。换流阀滤波电容为20 mF,平波电抗器容量为10 mH,换流阀交流侧电感、电阻分别为5 mH、0.001 Ω,直流线路电阻、电感分别为0.2 Ω/km和0.1 mH/km。

#### 4.1 限流电抗器限流效果分析

分别在不同安装位置加装限流电抗器并对其限流效果进行仿真分析。由式(2)可知,故障点越靠近换流阀,故障回路的阻抗越小,故障电流上升的峰值越大,考虑到换流器出口发生短路故障概率很小,在距VSC<sub>1</sub>侧出口500 m处设置极间短路故障,故障发生时间为1 s,持续0.1 s。

##### 4.1.1 不加限流电抗器的故障仿真

不采取限流措施时,故障电流波形见图6。可见正常运行条件下,直流侧故障电流峰值为0.2 kA,续流二极管电流峰值为0.35 kA,交流侧线路电流峰值为0.3 kA;发生故障后,直流侧故障电流峰值为10.5 kA,续流二极管电流峰值为8.6 kA,交流侧线路电流峰值为8 kA。可知,故障后二极管及交、直流线路承受较大的过电流,易造成线路及二极管烧毁。

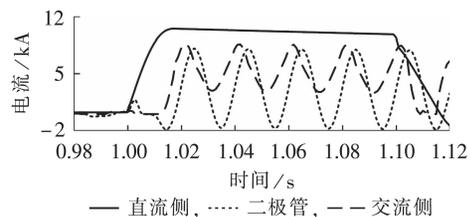


图6 不加限流电抗器的故障电流波形  
Fig.6 Fault current waveforms without current-limiting reactor

#### 4.1.2 在直流侧出口处加装限流电抗器的故障仿真

分别在直流侧出口加装 10、20 mH 的电抗器,直流侧短路电流、续流二极管电流及交流短路电流如图 7 所示。

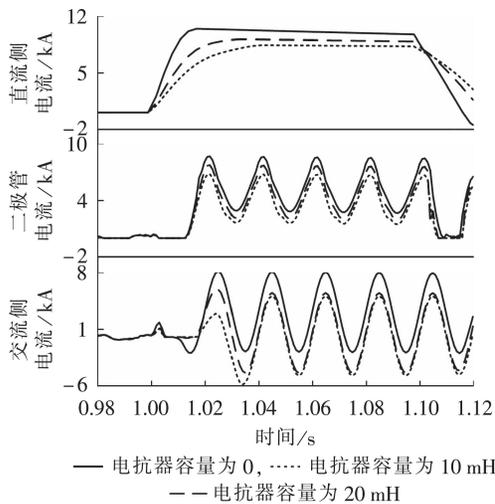


图 7 直流侧出口加装限流电抗器的故障电流波形  
Fig.7 Fault current waveforms with current-limiting reactor at DC side

由图 7 易知,直流侧加装限流电抗器不仅可以减小直流线路故障电流峰值,还可以降低故障电流的上升速率;限流电抗器电抗值越大,故障电流峰值及电流上升速率越小;直流侧加装限流电抗器会减小续流二极管的电流,但作用效果不明显,这是因为直流电抗器不会抑制续流二极管全导通阶段的直流侧短路故障电流。

#### 4.1.3 在交流侧出口处加装限流电抗器的故障仿真

分别在交流侧出口加装 10、20 mH 的电抗器,直流侧短路电流、续流二极管电流及交流侧短路电流如图 8 所示。

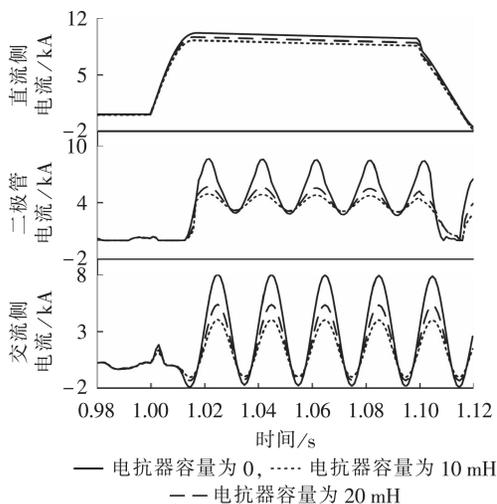


图 8 交流侧出口加装限流电抗器的故障电流波形  
Fig.8 Fault current waveforms with current-limiting reactor at AC side

由图 8 易知,交流侧出口加装限流电抗器对直流线路故障电流的影响非常小,尤其是对故障电流上升阶段几乎没有影响;随着限流电抗器电感值的增大,续流二极管故障电流及交流侧线路故障电流明显减小。

#### 4.2 不同位置限流电抗器限流效果对比

分别在直流侧出口处(A处)和交流侧出口(B处)加装 2、4、6、8 mH 的限流电抗器,进行极间短路故障仿真,设定故障发生时间为 1 s,持续 0.1 s,并提取对应故障电流峰值进行对比,结果如图 9 所示。

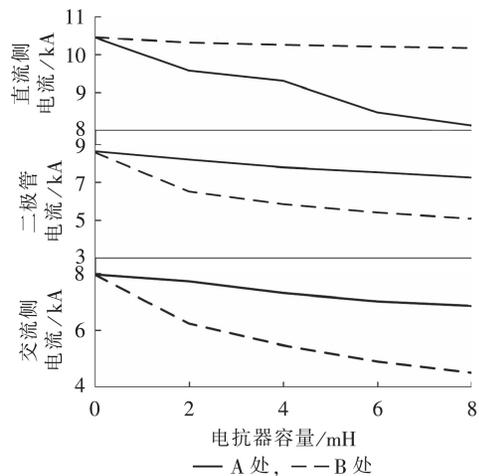


图 9 不同位置限流电抗器限流效果对比

Fig.9 Comparison of current-limiting effect with current-limiting reactor under different locations

由图 9 可知,在不同位置加装相同电抗值的限流电抗器对故障电流的限制效果不相同,直流侧出口处加装限流电抗器对直流侧故障电流的限制效果更明显;交流侧出口加装限流电抗器对交流侧故障电流及续流二极管故障电流的限制效果更明显,但对直流侧故障电流的限制效果较小。

#### 4.3 限流电抗器位置和参数优化仿真

采用电压等级为 $\pm 10$  kV、开断容量为 6 kA、开断时间为 2 ms、承受最大电流变化率为 3.5 kA/ms 的直流断路器,考虑断路器开断电流值需预留一定裕度,设置断路器最大短路电流为 5 kA,即 $I_{bk,max}=5$  kA,为保证断路器能正常开断直流侧故障电流,取 $I_{bk,max}=I_{ac,max}$ ;为提高优化结果的可靠性,对于二极管电流峰值及交流侧电流峰值保留 10% 的裕度,取 $I_{dv,max}=3$  kA、 $I_{ac,max}=3$  kA;对于 2 mH 的电感,其电阻为 18.9 m $\Omega$ ,因此 $k_R=0.00945 \Omega/\text{mH}$ ;根据限流电抗器市场价格,设置 $k_1=1560$ ;取 $k_{c,ele}=0.725$ 元/(kW·h);设定电抗器的运行周期为 5 a,即 $T=43800$  h;遗传算法中设置种群数量为 100,精英数量为 10,变异率为 5%,迭代 1000 次。

故障电流的切除时间会影响限流电抗器参数的选取,故设定系统在 1 s 时发生故障,故障持续时间

分别为10、20、50 ms,电抗器参数优化结果见表1。

表1 电抗器参数优化结果

Table 1 Optimization results of reactor parameters

故障持续时间/ms	电抗器容量/mH		电抗器损耗/kW		成本/万元
	A处	B处	A处	B处	
10	7.8	5.1	5.90	1.29	27.626
20	21.4	5.8	16.36	1.55	68.573
50	32.3	8.1	27.43	2.31	105.667

由表1可得,故障持续时间会影响限流电抗器参数的配置,故障持续时间越小,所需限流电抗器的电抗值越小,系统网损越小。如果能在故障电流达到峰值前切除故障,可大幅度减小电抗器配置成本和系统运行成本。

根据优化结果进行限流电抗器配置,配置限流电抗器后的直流侧电流、续流二极管电流及交流侧电流波形如图10所示。

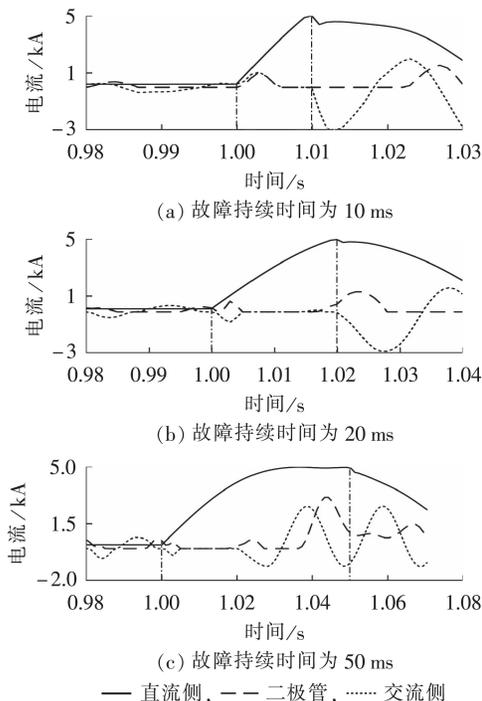


图10 优化配置电抗器后的故障电流波形

Fig.10 Fault current waveforms after optimal allocating reactor

由图10可知,优化配置电抗器后,直流侧故障电流峰值从10.5 kA降低到5 kA,电流上升速率为0.25 kA/ms,续流二极管的故障电流峰值从8.6 kA降低到3 kA以下,交流侧故障电流峰值从8 kA降低到3 kA以下,因此,该方案满足优化模型约束条件。

## 5 结论

针对直流配电系统故障电流上升迅速、短路电流冲击影响范围大等问题,本文构建了基于三相两电平VSC双端柔性直流配电网模型,从4个阶段分

析了直流配电系统发生极间短路故障,研究了不同位置安装限流器的限流效果,提出了基于限流电抗器的直流配电系统故障限流器位置和参数优化模型和方法,并在PSCAD/EMTDC平台中进行仿真优化,得出最终优化结果方案,为工程建设提供理论依据。但本文只针对三相两电平换流器进行故障分析及限流方法研究,所提限流方案并不完全适于基于MMC的直流配电网,这也是笔者今后研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.  
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [2] 杜翼,江道灼,尹瑞,等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):139-145.  
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.
- [3] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [4] YANG J, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analysis and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3827-3837.
- [5] 薛士敏,齐金龙,刘冲. 直流微网保护综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3404-3412.  
XUE Shimin, QI Jinlong, LIU Chong. A research review of protection for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3404-3412.
- [6] 王毅,于明,张丽荣. 环形直流微网短路故障分析及保护方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):7-14.  
WANG Yi, YU Ming, ZHANG Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 7-14.
- [7] 和敬涵,黄威博,李海英,等. FBMMC直流故障穿越机理及故障清除策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):1-7.  
HE Jinghan, HAUNG Weibo, LI Haiying, et al. FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 1-7.
- [8] 阳莉汶,江伟,王渝红,等. 具有直流故障阻断能力的电容嵌位子模块拓扑及其特性[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):172-177.  
YANG Liwen, JIANG Wei, WANG Yuhong, et al. Capacitor-embedded submodule topology with DC fault blocking capability and its characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 172-177.
- [9] LI X, LIU W, SONG Q, et al. An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 6182-6188.
- [10] 向往,林卫星,文劲宇,等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5171-5179.  
XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability

- and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5171-5179.
- [11] 周猛, 向往, 林卫星, 等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2062-2072.  
ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current-limiting control to handle overhead line fault in DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2062-2072.
- [12] 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.
- [13] 田鑫, 高亮, 张俊峰. 基于电压源换流器的直流配电网限流方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9):62-68.  
TIAN Xin, GAO Liang, ZHANG Junfeng. Research on current limiting scheme of DC distribution based on voltage source converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9):62-68.
- [14] 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.
- [15] 朱思丞, 赵成勇, 李承昱, 等. 考虑故障限流器动作的直流配电网限流电抗器优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15):142-149.  
ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Optimal configuration of current-limiting reactor included DC fault current limiter action in bipolar MMC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15):142-149.
- [16] 李岩, 龚雁峰. 多端直流配电网限流电抗器的优化设计方案[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23):120-128.  
LI Yan, GONG Yanfeng. Optimal design scheme of current limiting reactor for multi-terminal DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23):120-128.
- [17] 高阳, 贺之渊, 王成昊, 等. 一种新型混合式直流断路器[J]. 电网技术, 2016, 40(5):1320-1325.  
GAO Yang, HE Zhiyuan, WANG Chenghao, et al. A new hybrid circuit breaker for DC-application[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1320-1325.
- [18] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 多端 VSC-HVDC 直流线路故障限流及限流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19):5122-5133.  
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5122-5133.
- [19] 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 current analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12):3026-3036.
- [20] 赵坚鹏, 赵成勇, 许建中, 等. 直流电网中超导限流器与高压直流断路器的协调配合方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11):121-128.  
ZHAO Jianpeng, ZHAO Chengyong, XU Jiangzhong, et al. Coordination between superconducting current limiter and high voltage DC circuit breaker in DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):121-128.
- [21] 金毅. 直流配电系统故障特征及保护原理研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
JIN Yi. Research of fault analysis and protection for DC distribution system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

#### 作者简介:



王守相

王守相(1973—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真(E-mail: sxwang@tju.edu.cn);

嵇程程(1994—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为直流配电系统故障限流(E-mail: zhuochengcheng@tju.edu.cn);

刘琪(1992—),男,山东临沂人,博士研究生,主要研究方向为直流配电系统故障暂态机理分析(E-mail: liuqi\_tj@tju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Optimal allocation method for location and parameter of current-limiting reactor in VSC-based DC distribution system

WANG Shouxiang<sup>1</sup>, ZHUO Chengcheng<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, YANG Jinggang<sup>2</sup>, CHEN Qing<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211100, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The fault current of DC distribution system rises rapidly after fault occurs, which brings impacts to the power electronic devices. By equipping with CLR(Current-Limiting Reactors), the rising rate of fault current can be effectively suppressed, the peak value of the fault current can be reduced, and the power electronic devices of the system can be protected. An electrical-magnetic simulation model based on three-phase two-level VSC(Voltage Source Converter) is built. The fault principle and characteristics of pole-to-pole short circuit fault are explored, and the current limiting principle and effect of CLR at different locations are studied. Considering the flow resistance characteristics of VSC and the action characteristics of protection devices, the method of optimizing the location and parameters for CLR is proposed. The optimum configuration scheme of CLR is determined by simulation optimization on PSCAD/EMTDC platform.

**Key words:** DC distribution network; pole-to-pole short circuit fault; fault characteristics; fault-current limiting; current-limiting reactor