

# 一种适用于风电外送的混合高压直流输电系统

韩平平<sup>1</sup>, 陈凌琦<sup>1</sup>, 丁 明<sup>1</sup>, 张 炎<sup>1</sup>, 李宾宾<sup>2</sup>

(1. 安徽省新能源利用与节能重点实验室, 合肥工业大学, 合肥 230009; 2. 国网安徽电力科学研究院, 合肥 230601)

**摘 要:** 整流侧采用模块化多电平换流器(MMC), 逆变侧采用电网换相换流器(LCC)的混合高压直流输电系统可结合两者的优点, 是一种适用于风电外送的新型拓扑。为弥补 MMC 无法清除直流侧故障的缺陷, 可在整流侧直流线路上装设混合式高压直流断路器。针对单级接地和双极短路 2 种故障分析其故障特性和对系统的影响, 并根据故障电流特性设计断路器时序控制策略。基于 PSCAD 仿真软件建立该输电模型并仿真分析其在稳定送端交流母线电压上的优势, 然后验证所提故障特性分析, 最后证明所设计的时序控制策略可有效清除直流侧故障。

**关键词:** 高压直流输电; 风力发电; 故障电流; 模块化多电平换流器; 混合式高压直流断路器

**中图分类号:** TM723; TM614 **文献标识码:** A

## 0 引 言

由于风电资源难以在当地有效消纳, 风电经高压直流外送成为研究热点。传统的电网换相换流器高压直流输电系统(LCC-HVDC)因具有潮流方向固定、系统输送容量大且有功功率快速可控等优点<sup>[1]</sup>一直被广泛应用。然而 LCC 运行时需要消耗大量无功功率, 用以补偿无功的滤波器等设备占用了大量面积。特别是在系统直流闭锁时滤波器难以及时切除, 冗余的无功功率将涌入交流系统引起过电压并威胁风电机组的稳定运行<sup>[2-4]</sup>。另一方面, LCC 需要一定强度的交流系统为其提供换相电压, 而独立运行的风电场强度较弱难以建立稳定的交流电压, 因此 LCC-HVDC 无法适用于风电孤岛外送<sup>[5]</sup>。

基于模块化多电平换流器的高压直流输电系统(MMC-HVDC)因具有可自换相无须支撑与无功补偿且有功无功独立控制等优点, 虽很适合风电外送, 但也存在着系统造价昂贵, 无法像 LCC 一样自清除直流侧故障的问题<sup>[6]</sup>。因此结合 LCC 技术成熟、成本低廉和 MMC 调节性能良好的优点来综合设计的混合直流输电系统成为一种很好的输电方案<sup>[7]</sup>。如文献[8]提到的整流侧采用 LCC、逆变侧采

用 MMC 的 LCC-MMC 混合输电模型。但此类拓扑存在送端 LCC 无法与风电直接联接且逆变侧 MMC 的直流电压响应速度慢的问题。对于风电外送而言, 建议采用整流侧 MMC 逆变侧 LCC 的方案。

针对 MMC 侧无法处理直流故障的缺陷, 目前有配置交流侧断路器、采用具有直流侧故障穿越能力的换流器及配置直流断路器 3 种方式。交流断路器是机械开关, 动作速度慢, 不利于抑制故障电流与交直流系统的恢复。具有故障穿越能力的基于全桥子模块的模块化多电平换流器<sup>[9]</sup>(F-MMC)存在器件过多经济性较差的问题。基于箝位双子模块的模块化多电平换流器<sup>[10]</sup>(C-MMC)虽然降低了器件数量, 但结构上存在并联耦合的问题。高压直流断路器作为未来智能电网安全可靠运行的重要设备, 具有快速可靠分断各种故障电流<sup>[11]</sup>的优点。

综上所述, 本文提出一种整流侧采用基于半桥子模块的模块化多电平换流器(H-MMC)并配备混合式高压直流断路器, 逆变侧采用 LCC 的混合双极高压输电系统结构。首先与 LCC-HVDC 对比分析其在直流闭锁时抑制送端交流母线过电压的优势, 然后对系统直流侧单级接地和双极短路 2 种常见直流故障进行简化建模和电路分析, 并结合直流断路器设计出各开关单元的关断时序策略用以开断

收稿日期: 2017-05-04

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900601)

通信作者: 韩平平(1981—), 女, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事风电场接入电力系统稳定性方面的研究。LH021211@163.com

直流故障电流。最后通过 PSCAD 建模仿真验证该设计是一种适用于风电直接外送的系统设计。

## 1 输电系统结构及运行原理

本文提出的混合高压直流输电系统的基本结构如图 1 所示,其中 DCCB 代表直流断路器,配备在近 MMC 侧的直流线路上。

### 1.1 混合高压直流输电系统运行原理及控制策略

整流侧 MMC 由 6 个桥臂构成,每个桥臂由  $n$  个子模块(Sub-Module, SM)串联而成,SM 拓扑结构由 IGBT 管  $T_1$  和  $T_2$ 、二极管  $D_1$  和  $D_2$  以及储能电容  $C_s$  组成,如图 1 所示。

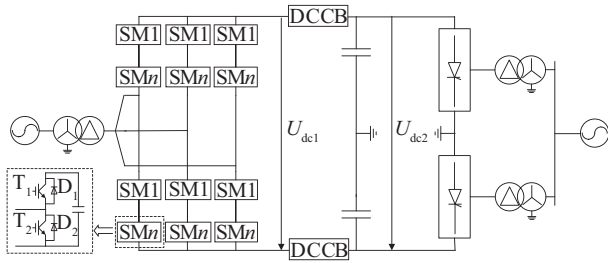


图 1 混合高压直流输电系统基本结构

Fig. 1 Topological structure of a hybrid HVDC

通过控制 2 个 IGBT 管的开断可以控制 SM 模块投入、切除与闭锁 3 种工作模式<sup>[6]</sup>。其中  $T_1$  导通且  $T_2$  关断时,SM 模块处于投入状态,此时不管电流方向如何,SM 的输出电压  $U_{SM}$  均等于电容电压  $U_C$ 。以 a 相为例,  $u_{a1}$ 、 $u_{a2}$  分别代表 a 相上下桥臂电压,正负极直流线路相对于接地点电压分别为  $U_{dc1}/2$ 、 $-U_{dc1}/2$ ,  $u_{sa}$  代表 a 相交流侧输出电压,忽略线路中阻抗的影响,满足式(1)关系<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} u_{a1} = \frac{U_{dc1}}{2} - u_{sa} \\ u_{a2} = \frac{U_{dc1}}{2} + u_{sa} \end{cases} \quad (1)$$

当 a 相上/下桥臂投入模块数量分别为  $T_{ap}$  和  $T_{an}$  时,a 相上下桥臂电压分别为:

$$\begin{cases} u_{a1} = T_{ap} U_{SM} \\ u_{a2} = T_{an} U_{SM} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可看出通过控制上下桥臂投入的子模块数量可灵活控制交流侧输出电压。直流侧电压等于相单元中上/下桥臂电压之和,所以运行时保证 MMC 上/下桥臂子模块投入数量之和固定就可稳定直流电压  $U_{dc1}$  不变。

在控制策略上,本文所提输电系统用于风电外送,为送端交流母线电压的稳定采用定交流母线电压  $U_{ac}$  控制模式。在 MMC-HVDC 中两端换流站必须有且仅有一个处于定直流电压  $U_{dc}$  控制模式,而本系统只有整流侧采用 MMC,因此最终确定整流侧采用定  $U_{dc}$ -定  $U_{ac}$  组合控制模式。

逆变侧 LCC 每级由 1 个 12 脉动换流桥构成,每个 12 脉动换流桥由 2 个 6 脉动换流器串联而成。逆变侧的控制量为超前触发角  $\beta(\beta = \pi - \alpha)$ ,  $\alpha$  代表整流器的触发延迟角。直流电压、直流电流满足式(3)、式(4)关系:

$$U_{dc2} = 1.35 U_2 \cos \beta + \frac{3}{\pi} (X_C + X_R) I_{dc} \quad (3)$$

$$I_{dc} = \frac{U_{dc1} - U_{dc2}}{R_d} \quad (4)$$

式中,  $U_{dc2}$  ——逆变侧正负极之间直流电压;  $I_{dc}$  ——直流电流;  $R_d$  ——双极直流线路电阻总和;  $X_C$  ——等值换相电抗;  $X_R$  ——等值线路电抗;  $U_2$  ——逆变侧换流变阀侧线电压幅值。

控制策略上采用定  $I_{dc}$ -定  $\gamma$  控制( $\gamma$  代表逆变器的熄弧超前角),通过 PI 控制器分别得到定电流控制和定  $\gamma$  角控制的  $\beta$  角,再选择一个最大的输出,用  $\pi$  减去后得到逆变侧触发角指令信号 AOI。其中直流电流的参考值来自低压限流环节(VDCOL),该环节可以在直流电压跌落到某个指定值时对直流电流指令进行限制,减小换相失败的可能性并能够促进直流系统的故障恢复。

### 1.2 混合高压直流输电系统在风电外送上的优势

在 LCC 输电系统稳态运行中,换流站消耗数值约为有功功率 40%~60% 的无功功率,这部分无功由交流母线滤波器提供,如式(5)所示。

$$Q = P_d \frac{\sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu) + 2\mu}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \mu)} \quad (5)$$

式中,  $P_d$  ——直流输送功率;  $\mu$  ——换向重叠角。

直流闭锁时,直流有功功率随着触发角的增大而减小,而换流站消耗的无功功率随着有功功率的降低迅速减小。由于交流滤波器来不及切除,盈余的无功将涌入交流母线,导致交流母线过电压。当送端有风电场接入时将存在并网点过电压导致风电场脱网的危险。

MMC 可独立控制有功功率和无功功率,动态补

偿交流系统无功功率来稳定交流母线电压,能够保证送端接入风电场的稳定运行<sup>[2]</sup>。因此送端采用 MMC 的混合直流输电系统更适合风电外送。

## 2 混合直流输电系统直流侧故障暂态特性分析

当发生直流故障时,逆变侧 LCC 可通过紧急停机策略将换流器触发角快速移相至大于  $90^\circ$  实现闭锁,从而切断故障电流,所以可忽略其对故障电流的影响。而整流侧 MMC 则无法通过闭锁换流阀实现故障自清除,所以需要对该混合高压直流系统中 MMC 侧直流线路单级接地故障和双极短路故障这 2 种常见故障进行暂态分析,评估故障带来的损害,并寻求解决方法。

### 2.1 单级接地故障暂态特性分析

接地故障只会造成直流母线与交流侧电压的短期偏置,随着故障结束便会迅速恢复。直流电流会因为线路对地电容的短期放电发生小幅振荡并很快恢复,因此不必采取额外的保护措施。相关分析在文献[6]中已有叙述,本节不再赘述。

### 2.2 双极短路故障特性分析

双极短路故障作为直流侧最为严重的故障,在发生后一段时间内保护装置会触发 MMC 闭锁,因此故障后的暂态过程可分为换流站闭锁前和闭锁后两个阶段。闭锁前故障电流来自投入的子模块电容通过上部的 IGBT 管  $T_1$  放电、电感续流放电和交流电网经反并联二极管放电这 3 个部分,闭锁后故障电流则来自交流电网经反并联二极管放电及电感续流放电。对于第 1 阶段放电过程,相比于交流电网注入电流,子模块电容与电感放电才是构成故障电流的主要部分,其放电回路简化图如图 2a 所示,等值电路如图 2b 所示。

图 2 中,  $L_v$  为每相单个桥臂阀电感,  $I_L$  为故障前直流线路正常运行时的电流。每级换流站与故障点之间直流线路电阻和电感分别为  $R_L$  和  $L_L$ 。直流线路的故障电流是三组桥臂放电电流之和,而三相上下桥臂电容与阀电感相互之间并联,因此等值电感为  $L = 2/3L_v + 2L_L$ ,等值电阻为  $R = 2R_L + R_{co}$ ,其中  $R_{co}$  为双极短路时的接触电阻。因为在闭锁前上下桥臂所有子模块电容随着投入和切除都参与了放电,每个桥臂内子模块相当于串联,三相桥臂之

间相当于并联,上下桥臂之间相当于并联,所以等值电容为  $C = 6C_s/n$ ,  $C_s$  为换流器单位子模块电容。故障瞬间电容电压和电感电流已知,且系统中  $R$  小于  $2\sqrt{L/C}$ ,所以该放电回路为一个已知初始条件的 2 阶欠阻尼振荡放电电路,等值电路如图 2b 所示。

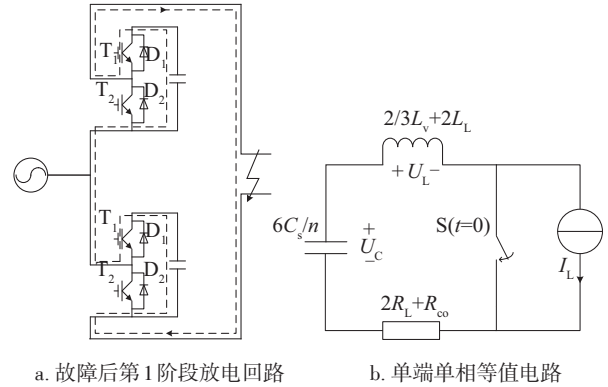


图 2 故障后第 1 阶段放电回路与单端单相等值电路

Fig. 2 Discharging path and single phase equivalent circuit of first stage after fault

初始条件为:

$$\begin{cases} U_c(0_+) = U_c(0_-) = U_{dc} \\ I(0_+) = I(0_-) = I_L \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $I_L$  ——正常运行时直流线路电流。

根据 2 阶电路振荡放电过程的电流计算公式可得直流故障电流为:

$$I_f = \frac{U_{dc}}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t + I_L e^{-\delta t} \cos \omega t \quad (7)$$

式中,  $\omega$ 、 $\delta$  ——2 阶 RLC 电路特征根的虚部和实部,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ ,  $\delta = \frac{R}{2L}$ 。

故障电流如式(7)所示,是一个振荡衰减函数,则  $I_f$  对时间  $t$  求导后  $t$  从 0 开始第 1 个使导函数为 0 的点所对应的时刻,即为放电回路达到放电电流峰值的时刻,如方程(8)所示:

$$\begin{aligned} & \frac{U_{dc}}{\omega L} (-\delta e^{-\delta t} \sin \omega t + \omega e^{-\delta t} \cos \omega t) - \\ & I_L (\delta e^{-\delta t} \cos \omega t + \omega e^{-\delta t} \sin \omega t) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

方程(8)无法直接解出  $t$ ,需将方程左边部分当做时间  $t$  的函数并通过拟合曲线找到其与横轴第 1 个交点所对应的时刻,即为放电电流到达峰值的时刻。第 1 阶段的故障电流多出了子模块电容放电部分且电感初始电流更高,因此其值远高于第 2 阶段。



同时电流到达峰值的时间通常早于 MMC 闭锁,通过闭锁换流器不能有效阻止故障过电流。而第 2 阶段故障电流未到达稳态时保护装置就已经触发交流断路器跳闸,所以第一阶段才是设计保护装置时研究的重点。

### 3 混合式高压直流断路器

#### 3.1 混合式高压直流断路器模型建立

2012 年 ABB 公司研制的混合式高压直流断路器综合了机械式直流断路器运行稳定、带载能

力强、通态损耗小和固态直流断路器开关时刻准确可控、可靠性高寿命长的特点<sup>[11]</sup>,可在 5 ms 范围内成功开断 320 kV/9 kA 高压输电系统,符合本文中直流侧故障的保护要求。其结构如图 3 所示。

图 3 所示断路器由旁通支路和主断路器并联构成。旁通支路由超快速机械开关和电流转移开关串联组成;主断路器由多个开关单元串联而成,其中每个开关单元配备若干正反向串联的 IGBT 及反并联二极管,并配备独立的避雷针吸收能量。其开断时序如图 4 所示。

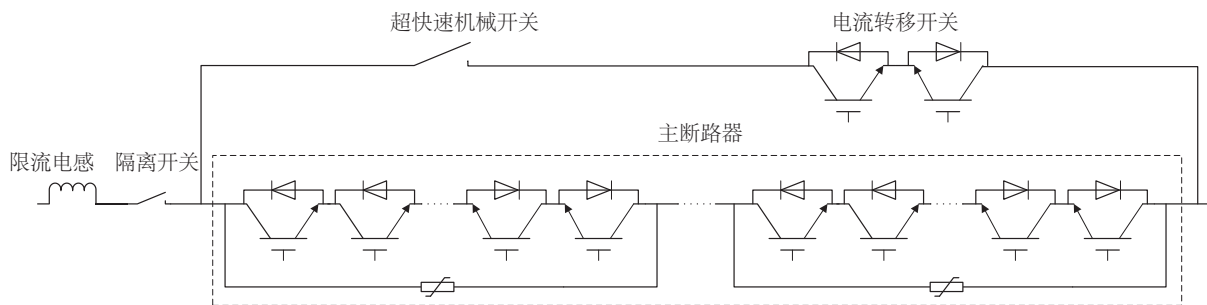


图3 ABB公司研制混合式高压直流断路器结构图

Fig. 3 Topology structure of hybrid HVDC breaker

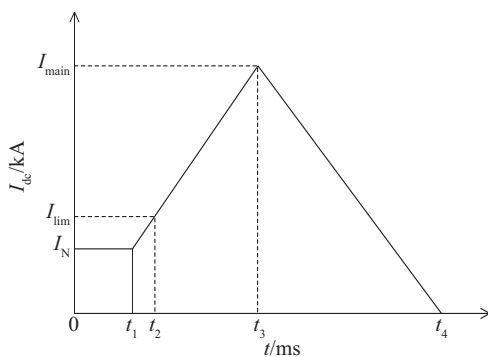


图4 混合式直流断路器开断时序图

Fig. 4 Breaking sequence of hybrid HVDC breaker

各时间段及开断时序说明如下:

1)  $0 \sim t_1$ : 系统正常运行时,额定电流  $I_N$  从旁通支路流过,主断路器处于关断状态,流经主断路器的电流为零。

2)  $t_1 \sim t_2$ : 发生直流线路发生故障后,流过旁通支路的电流迅速上升。 $t_2$  时刻,当故障电流超过设定值  $I_{lim}$  时,电流转移开关迅速断开,同时触发导通主断路器中器件,故障电流开始向主断路器转移。

3)  $t_2 \sim t_3$ : 超快速机械开关随着流过自身电流的迅速减小逐渐恢复关断能力。 $t_3$  时刻,当流经电流转移开关中的电流下降至零时,超快速机械开关断开。

4)  $t_3 \sim t_4$ : 通过主断路器的电流继续上升, $t_4$  时刻当故障电流达到限制  $I_{main}$  时,主断路器中 IGBT 触发关断,故障电流向由避雷针组成的能量吸收支路转移。

5)  $t_4 \sim t_5$ : 故障电流逐渐衰减为零, $t_5$  时刻隔离开关断开,实现故障隔离。

#### 3.2 混合式高压直流断路器开断时间整定

直流断路器的开断时序由自身的控制系统实现。如果直接设计各开关单元的电流限值判据,从判断故障电流是否越限到触发各开关单元开断电流需要一定的延时,将会影响保护动作的速动性,因此需要根据故障类型提前设计各开关单元的开断时刻指令。

由 3.1 节的开断时序介绍可得直流断路器开断的关键时刻指令为电流转移开关断开时刻指令  $t_2$

和主断路器关断时刻指令  $t_4$ 。对于双极短路故障而言,旁路支路关断电流限值以及线路最大可承受电流的计算如式(9)所示,将直流断路器的限流电感考虑在等值电路电感范围内,即等值电感为  $L = 2/3L_v + 2L_l + L_{lim}$  ( $L_{lim}$  为直流断路器限流电感。),可分别得到  $t_2$  与  $t_4$ 。在实际计算中,式(9)无法直接求解时间  $t_2$  和  $t_4$ ,需要通过曲线拟合求交点的方式求解。

$$\begin{cases} I_{lim} = \frac{U_{dc}}{\omega L} e^{-\delta t_2} \sin \omega t + I_1 e^{-\delta t_2} \cos \omega t \\ I_{main} = \frac{U_{dc}}{\omega L} e^{-\delta t_4} \sin \omega t + I_1 e^{-\delta t_4} \cos \omega t \end{cases} \quad (9)$$

$t_4$  时刻过后故障电流转移至避雷针处释放能量,所以可根据避雷针的伏安特性曲线和电流衰减特性确定  $t_4$  到  $t_5$  的时间长度,检验是否满足故障清除时间的要求,若不满足低于 5 ms 的要求则再根据结果适当调整限流电感的取值,直至满足要求为止。

## 4 案例分析

基于 PSCAD 电磁暂态仿真软件,本文搭建如图 1 所示的,在近 MMC 侧直流线路上配备有混合式高压直流断路器的双极混合高压直流输电模型和双极 LCC-HVDC 模型,通过仿真验证前 3 节所述理论,其中直流线路采用 LGJ-400 架空线路。表 1 给出了建模与理论计算所需的各项参数,所有参数单位均按照计算时使用的标准单位进行标识。

### 4.1 2 种输电系统在双极闭锁下交流母线电压对比仿真分析

图 5 为 LCC-HVDC 与 MMC-LCC 混合直流输电系统在面对逆变侧 LCC 双极闭锁时整流侧交流母线电压仿真图。闭锁时刻设置在 4 s,  $U_1$ 、 $U_2$  分别为 LCC 直流输电系统在闭锁状态下不切除与切除滤波器时的电压仿真,  $U_3$  为 MMC-LCC 混合直流输电系统的电压仿真,基准值为 320 kV。由图 5 可看出 LCC 直流输电系统无论是否切除滤波器,交流电压峰值都将超过 1.6 pu,且即便切除滤波器之后的稳态值也在约 1.3 pu,如接入风电将威胁其安全运行。而在混合直流输电系统中交流电压的暂态峰值被控制在 1.1 pu,且很快就被无功控制系统补偿至 1.0 pu,如接入风电可保证其安全稳定运行不脱网。

表 1 双极短路故障分析所需参数

Table 1 Parameters of line-to-line fault

参数	数值
直流电压等级 $U_{dc}/V$	640000
稳态运行直流电流 $I_N/A$	1800
MMC 单桥臂子模块数量 $n/\text{个}$	76
初始等值电感电流 $I/A$	1800
换流阀等值电感 $L_v/H$	0.05
直流线路单位电阻 $r_l/\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	0.078
直流线路单位电感 $l_l/H \cdot \text{km}^{-1}$	0.0013
故障点距换流站距离 $L/\text{km}$	10
直流线路等值电阻 $R_l/\Omega$	0.78
直流线路等值电感 $L_l/H$	0.013
换流器单位子模块电容 $C/F$	0.0028
双极短路接触电阻 $R_{co}/\Omega$	0.01
直流断路器限流电感 $L_{lim}/H$	0.05
旁通支路关断电流限值 $I_{lim}/A$	2340(1.3 $I_N$ )
断流主支路关断电流限值 (线路最大可承受电流) $I_{main}/A$	9000(5 $I_N$ )

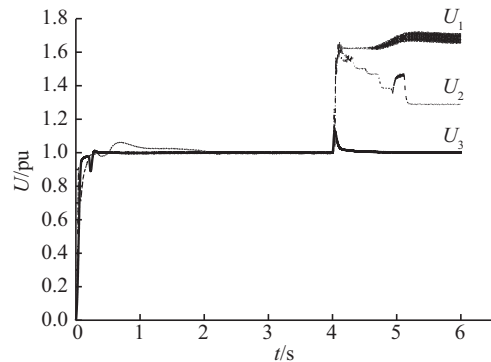


图 5 直流输电系统双极闭锁时整流侧交流母线电压

Fig. 5 Voltage of converter side AC bus after DC block

### 4.2 双极短路故障仿真分析

图 6 为双极短路故障下输电模型各参数仿真波形,故障时刻设置为 5 s, MMC 闭锁时刻设置为 5.01 s,交流断路器跳闸时刻设置为 5.1 s。

如图 6 所示,直流线路故障电流峰值出现在 5.0057 s,快于换流器闭锁的时刻 5.01 s;峰值达到 32.85 kA。结合式(7)、式(8)、表 1 进行计算并通过曲线拟合得到的故障电流曲线与到达峰值时刻如图 7a 与图 7b 所示,其中直流线路故障电流是由 2 阶

振荡回路理论得来,因此只关注该拟合曲线从0时刻到第1次到达峰值时刻的部分。

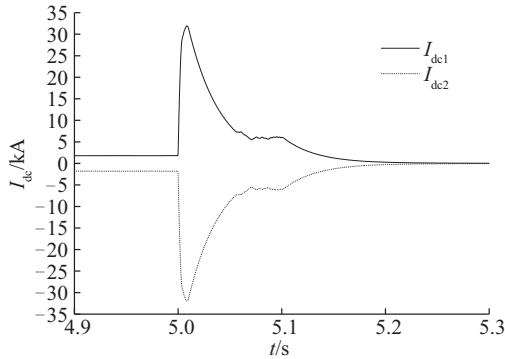
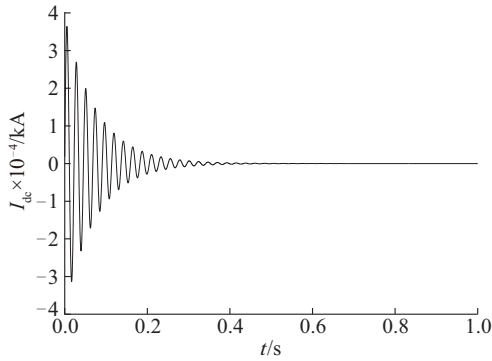
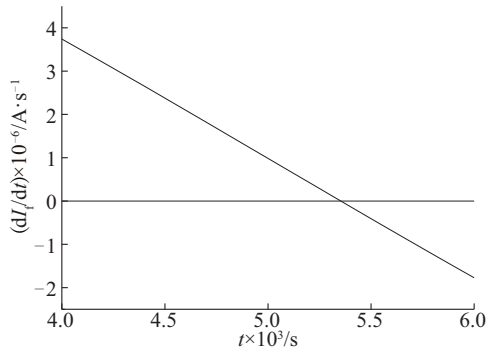


图6 双极短路故障直流电流

Fig. 6 Waveforms of DC current after fault



a. 拟合直流电流峰值



b. 拟合直流电流到达峰值时刻

图7 直流电流峰值与到达峰值时刻拟合曲线

Fig. 7 Matched curve of peak DC current and DC current peak time

由图7a可得直流故障电流峰值为35.32 kA,到达峰值所需时间如图7b为0.0053 s,均与实际结果相符,误差来源于等值电路忽略了电容放电时间的先后,所以得出的电流峰值会略高于实际值,而到达峰值的时间会略早于实际值。以系统稳态运行

时直流电流1.8 kA为基准,实际故障电流峰值达到18.25 pu,远超过系统安全运行最大值5 pu的标准,严重威胁系统安全,因此必须加装断路器切除故障。

#### 4.3 直流断路器切断双极短路故障电流仿真分析

结合式(9)通过曲线拟合求交点如图8所示,其中电流转移开关断开时刻指令 $t_2$ 为0.00013 s,主断路器断开时刻指令 $t_4$ 为0.00158 s,将计算时刻指令输入直流断路器开断控制系统中,仿真得到直流断路器开断下直流线路故障电流如图9所示。

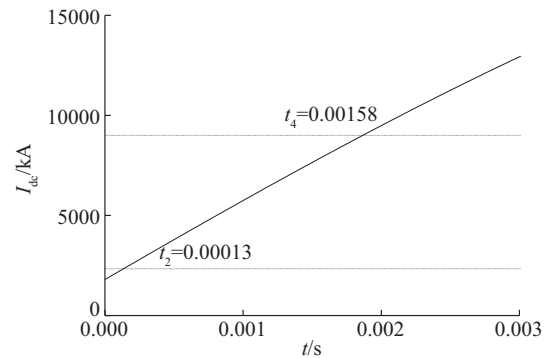


图8 拟合直流断路器开关元件开断时刻

Fig. 8 Matched curve of breaker breaking time

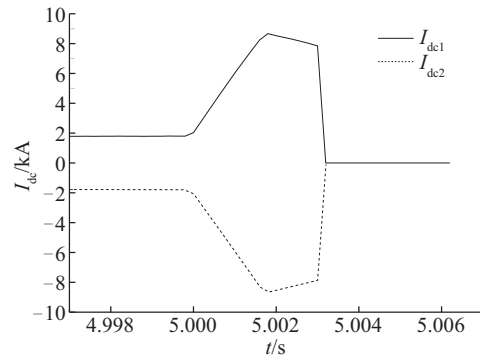


图9 直流断路器开断下直流线路故障电流

Fig. 9 Waveforms of fault current after breaker open

由图9可看出,故障电流被有效的控制在断流主支路关断电流限值9 kA即5 pu以下,且整个开断过程被限制在5 ms以内,符合直流断路器开断要求与系统过电流限值,证明了该计算方法的正确性与有效性。由于直流断路器配置在近MMC侧的直流线路上,包括交流电网通过二极管注入电流回路在内的3条放电回路都被切断,所以不会再产生第2阶段的过电流影响。

## 5 结 论

1) 本文提出的送端采用 MMC, 受端采用 LCC 的混合高压直流输电系统不需要送端交流系统提供换相电压, 且在系统触发直流闭锁保护措施时可以有效减小风电机组脱网的危险, 是一种适合风电外送的输电系统。

2) 鉴于该系统送端无法自清除直流侧故障的缺点, 针对 2 种常见直流侧故障进行理论分析与仿真研究, 并得出如下结论: 单相接地故障不会引起严重的过电流且故障恢复特性良好, 无须采取额外保护措施。双极短路故障会造成较为严重的过电流且到达峰值迅速, 系统通过自身闭锁 MMC 和跳开交流断路器的保护措施均无法限制过电流, 因此需采取保护措施切断故障电流。

3) 混合式直流断路器可快速切除故障电流以清除直流侧故障, 结合对故障电流的理论分析与直流断路器各开关单元的时间整定, 可得到各开关单元的开断时刻指令。通过建模仿真验证该方法可快速切除故障且不会使其超过直流线路最大可承受电流。

4) 该系统既可有效抑制换流站双极闭锁时交流母线电压的波动, 又可在直流侧发生故障时快速切除故障电流, 是一种适用于风电外送的输电系统。

### [参考文献]

- [1] 徐 政, 王世佳, 李宁臻, 等. 适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 55—63.
- [1] Xu Zheng, Wang Shijia, Li Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55—63.
- [2] 王 衡, 姚秀萍, 常喜强, 等. 特高压直流故障对风电场送出可靠性的影响及改进措施[J]. 电工电气, 2014, (5): 29—33, 41.
- [2] Wang Heng, Yao Xiuping, Chang Xiqiang, et al. Impacts of ultra high voltage direct current fault on output reliability of wind farm and improvement measures[J]. Electrotechnics Electric, 2014, (5): 29—33, 41.
- [3] 胡 铭, 蔡汉生, 田 杰, 等. 云广直流孤岛运行过电压控制措施研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1905—1909.
- [3] Hu Ming, Cai Hansheng, Tian Jie, et al. Study of overvoltage control schemes for Yun-Guang UHVDC transmission system in island operation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1905—1909.
- [4] 殷威扬, 杨志栋. 特高压直流无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 50—54.
- [4] Yin Weiyang, Yang Zhidong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 50—54.
- [5] 赵成勇, 刘文静, 郭春义, 等. 一种适用于风电场送出的混合型高压直流输电系统拓扑[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 146—151.
- [5] Zhao Chengyong, Liu Wenjing, Guo Chunyi, et al. Topology of hybrid HVDC Transmission system for wind power grid connection[J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(15): 146—151.
- [6] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82—87.
- [6] Zhao Chengyong, Chen Xiaofang, Cao Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC fault[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(23): 82—87.
- [7] 薛英林, 葛风雷, 赵 峥, 等. LCC-C-MMC 混合高压直流系统直流低电压穿越控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 85—96.
- [7] Xue Yinglin, Ge Fenglei, Zhao Zheng, et al. DC low-voltage ride-through control strategy of LCC-C-MMC hybrid HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 85—96.
- [8] Lee Younggi, Cui Shenghui, Kim Sungmin, et al. Control of hybrid HVDC transmission system with LCC and FB-MMC [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)[C], Pittsburgh, PA, 2014.
- [9] Mondal G, Critchley R, Hassan F, et al. Design and simulation of a modular multi-level converter for MVDC application [A]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)[C], Gdansk, Poland, 2011.
- [10] 薛英林, 徐 政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63—70.
- [10] Xue Yinglin, Xu Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63—70.

- [11] Callavik M, Blomberg A, Häfner J, et al. The hybrid HVDC breaker: An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grid[R]. ABB Grid Systems, Technical paper, 2012.

## A KIND OF HYBRID HVDC TRANSMISSION SYSTEM SUITABLE FOR WIND POWER CONNECTION

Han Pingping<sup>1</sup>, Chen Lingqi<sup>1</sup>, Ding Ming<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>, Li Binbin<sup>2</sup>

(1. *New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

2. *State Grid Electric Power Research Institute of Anhui, Hefei 230601, China*)

**Abstract:** A hybrid high voltage direct current system can combine the merits of both MMC and LCC, in which the rectifier side is made up of the modular multilevel converter (MMC) and the inverter side is composed of the line commutated converter (LCC). It is a new type of topology suitable for wind power transmission. The hybrid HVDC breaker is installed on the DC transmission line of the rectifier side to block the fault current paths which could remedy the limitation that the MMC is unable to clean up DC side faults. The DC-link fault characteristics of line-to-ground and line-to-line, as well as their effects on system are analyzed, and time sequence control strategy based on current characteristics is designed. A hybrid HVDC simulation system is built based on PSCAD software, and the advantage on stabilizing the voltage of converter side AC bus is simulated and analyzed. Moreover, the fault characteristics proposed is validated. Finally, Simulation results verify the time sequence control can effectively isolate the DC side fault.

**Keywords:** HVDC power transmission; wind power; fault currents; modular multilevel converter; hybrid HVDC breaker