

# 基于LCL型电压源换流器的柔性直流配电网故障机理分析

郭倩雯, 许中, 周凯, 栾乐, 马智远

(广州供电局有限公司 电力试验研究院, 广东 广州 510420)

**摘要:** 由于LCL滤波器相比于L滤波器有更好的高频滤波功能以及更低的价格成本, 逐渐受到广泛应用。但是当前基于LCL型电压源换流器(VSC)的 $\pm 10$  kV柔性直流配电网故障机理尚未进行过深入讨论。针对“手拉手”式的 $\pm 10$  kV柔性直流配电网, 先给出了LCL型VSC应用在柔性直流配电网中的控制模型, 之后详细分析了在直流故障下柔性直流配电网的暂态特性, 并研究了接地方式、IGBT闭锁与否以及线路阻抗大小对故障情况的影响, 最后通过仿真模型证明了理论分析的正确性。

**关键词:** 电压源换流器; 柔性直流配电网; 直流故障; LCL滤波器; 故障机理

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22010

## Fault Mechanism Analysis of Flexible DC Distribution Network Based on LCL-type Voltage Source Converter

GUO Qianwen, XU Zhong, ZHOU Kai, LUAN Le, MA Zhiyuan

(Electric Power Research Institute, Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China)

**Abstract:** Compared with L filter, LCL filter has better high-frequency filtering function and lower cost, so it is gradually widely used. But at present, the fault mechanism of  $\pm 10$  kV flexible DC distribution network based on LCL-type voltage source converter (VSC) have not been discussed in depth. In view of  $\pm 10$  kV flexible DC distribution network of "hand in hand" type, the control model of LCL-type VSC applied in flexible DC distribution network was given, then the transient characteristics of flexible DC distribution network under DC fault were analyzed in detail, and the influences of grounding mode, IGBT blocking or not and line impedance for the situation of fault were studied. Finally, the correctness of theoretical analysis was proved by simulation model.

**Key words:** voltage source converter; flexible DC distribution network; DC fault; LCL filter; fault mechanism

随着当今电力电子技术的蓬勃发展, 将电压源换流器(voltage source converter, VSC)应用于高电压等级的直流输电技术已经日益成熟, 现在各地学者已将研究焦点逐渐放在了中低电压等级的直流配电网中<sup>[1-2]</sup>。基于VSC的直流配电网由于具有供电能力良好、线路损耗小以及无换相失败等优点而拥有广阔的发展潜力, 成为当今电力领域的热门研究方向<sup>[3-4]</sup>。但是直流配电网中的VSC大多采用L型滤波器<sup>[5]</sup>, 相比于LCL滤波器, L型滤波器拥有更大的滤波器体积以及较低的高频滤波功能, 因此LCL型VSC在直流配电网中将

具有更大的应用价值<sup>[6]</sup>。

故障机理分析是柔性直流配电网设计保护方案的核心基础, 具有非常重要的理论价值和工程意义, 但是当前基于LCL型VSC的柔性直流配电网故障机理分析还较为缺乏, 较多文献仅对基于L型VSC的柔性直流配电网进行了故障机理分析。文献[7-8]指出一旦VSC的直流侧电压下降至0, 将导致VSC中所有的二极管导通, 柔性直流配电网将发生三相短路故障; 文献[9]将配电网的极间短路故障过程细分为电容放电、二极管导通和系统稳定三个阶段, 但未给出详细的公式证明; 文

**基金项目:** 南方电网公司科技项目(GZHKJXM20170141)

**作者简介:** 郭倩雯(1989—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, Email: 1255009231@qq.com

献[10-11]分别详细对比了VSC在故障情况下闭锁IGBT和不闭锁IGBT的工作特性,但未考虑中性点联结方式对故障特性的影响;文献[12]发现在不考虑系统接地方式的情况下,IGBT闭锁后的交流侧电压比IGBT闭锁前的交流侧电压高,但未给出明确原因。综上所述,目前基于LCL型VSC的柔性直流配电网故障机理分析还很缺乏,同时现有文献还存在理论分析不够透彻、考虑因素不够全面的问题,因此有必要在考虑多种因素的影响下对LCL型VSC的柔性直流配电网进行故障机理分析。

鉴于此,本文将着重研究基于LCL型VSC的“手拉手”式柔性直流配电网的故障机理。首先给出了LCL型VSC应用在柔性直流配电网中的控制模型,之后在考虑接地方式、IGBT闭锁与否以及线路阻抗大小等因素的影响下,详细分析了柔性直流配电网发生极间短路故障和单极接地故障时的暂态特性,最后仿真结果验证了理论分析的正确性,为实际工程应用提供了良好的参考。

## 1 基于LCL型VSC的柔性直流配电网

### 1.1 柔性直流配电网的拓扑结构

柔性直流配电网中普遍的“手拉手”式拓扑结构如图1所示,110 kV的交流电网经过变压器连接两个LCL型电压源换流器VSC<sub>1</sub>,VSC<sub>2</sub>对柔性直流配电网进行供电。变压器为Y/Δ联结方式,并且低压侧采用中性点经大电阻的接地方式,VSC<sub>1</sub>采用定功率控制,VSC<sub>2</sub>采用定电压控制<sup>[13]</sup>,配电网电压等级为±10 kV,line<sub>1</sub>,line<sub>2</sub>,line<sub>3</sub>,line<sub>4</sub>,line<sub>5</sub>分别为配电网中的5条直流母线,每条母线两端皆配置直流断路器,一方面,配电网通过逆变器VSI<sub>1</sub>,VSI<sub>2</sub>给交流负荷和交流微网供电,另一方面,通过直流变换器DCSST<sub>1</sub>,DCSST<sub>2</sub>给直流负荷和直流微网供电,同时为了防止负荷侧的电压受到直流故障的影响,VSI<sub>1</sub>,VSI<sub>2</sub>,DCSST<sub>1</sub>,DCSST<sub>2</sub>均采用定负荷侧电压控制<sup>[14-15]</sup>。

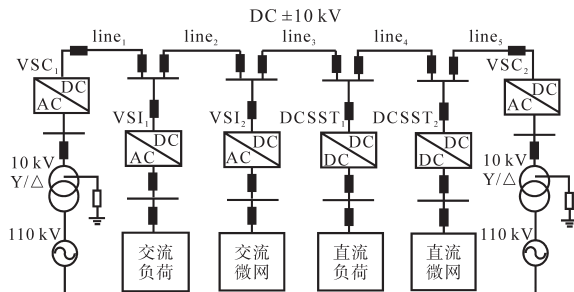


图1 柔性直流配电网拓扑结构

Fig.1 Topology structure of flexible DC distribution network

### 1.2 LCL型VSC的拓扑结构

以VSC<sub>2</sub>为例,图2为LCL型VSC在柔性直流配电网当中的拓扑结构。图2中, $u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}$ 为110 kV交流电网经变压器降压后的10 kV交流电压; $i_{ga}, i_{gb}, i_{gc}$ 为网侧电流; $i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}$ 为整流器侧电流; $R_T$ 为变压器接地电阻; $L_2, L_1$ 以及 $C_f$ 分别为LCL滤波器的网侧电感、整流器侧电感和滤波电容; $u_a, u_b, u_c$ 为VSC的交流侧相电压; $S_1 \sim S_6$ 为VSC的六个IGBT开关管; $C_p, C_n$ 为直流侧的滤波电容,且两电容容值相等; $U_{dc}$ 为VSC的直流侧电压; $i_{dc}$ 为VSC的直流侧电流; $i_p$ 和 $i_n$ 为直流母线上的正负极电流; $R_{line}$ 和 $L_{line}$ 为线路电阻和线路电感。

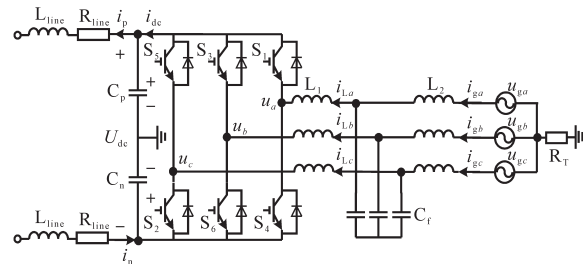


图2 LCL型VSC的拓扑结构

Fig.2 Topology structure of LCL-type VSC

## 2 柔性直流配电网的故障机理分析

### 2.1 单极接地故障

以VSC<sub>2</sub>为例,柔性直流配电网发生单极接地故障时的电路图如图3所示。图3中, $U_p, U_n$ 为直流侧正负极电容的电压, $R_f$ 为接地故障的过渡电阻, $i_f$ 为故障支路电流, $i_0$ 为VSC<sub>2</sub>向配电网负载注入的电流。

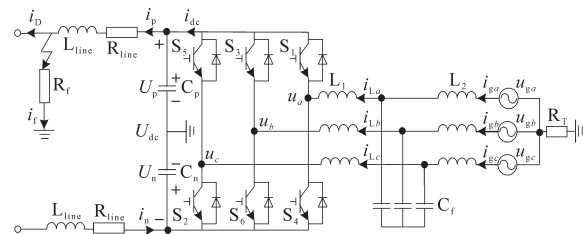


图3 单极接地故障时柔性直流配电网的电路图

Fig.3 Circuit diagram of flexible DC distribution network under single-pole grounded fault

配电网在接地故障下的特性可分为故障电流特性和故障电压特性。

#### 2.1.1 故障电流特性

由于配电网的直流侧正极或负极可能会突发接地故障,从而导致正极或负极电容向故障支路放电,交流电网同时也会向故障支路放电,从而导致故障支路的电流 $i_f$ 大幅上升。本文中假设

正极发生接地故障,图4为正极电容和电网对故障支路的放电回路,由于电网每相对故障支路的放电电路是相同的,所以分析时只给出a相的放电电路。图4中, $i_{cp}$ 为正极电容对故障支路的放电电流, $i_{dc,a}$ 为a相对故障支路的放电电流, $U_{dc,a}$ 为a相向直流侧提供的等效直流电压源。

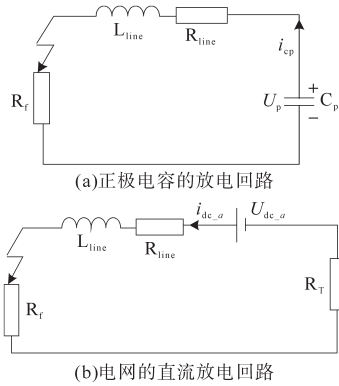


图4 单极接地故障下的放电回路

Fig.4 Discharge circuit under single-pole grounded fault

对于图4a所示的电容放电回路,该放电回路为一个二阶电路,假设 $U_p$ 为正极电容 $C_p$ 的初始电压,若以故障发生时刻为初始时刻,可列出 $i_{cp}$ 的表达式,如下式所示:

$$i_{cp} = \frac{U_p e^{-\tau t} \sin(\omega_{cp} t)}{\omega_{cp} L_{line}} \quad (1)$$

式中: $\omega_{cp}$ 为放电电流的角频率; $\tau$ 为时间常数。参数表达式如下:

$$\begin{cases} \tau = \frac{R_{line} + R_f}{2L_{line}} \\ \omega_{cp} = \sqrt{\frac{1}{L_{line} C_p} - \frac{(R_{line} + R_f)^2}{4L_{line}^2}} \end{cases} \quad (2)$$

在 $i_{cp}$ 达到峰值 $i_{cp,m}$ 时,有 $e^{-\tau t} \approx 1$ 成立,故可给出 $i_{cp,m}$ 的表达式:

$$i_{cp,m} = \frac{U_p}{\sqrt{\frac{L_{line}}{C_p} - \frac{(R_{line} + R_f)^2}{4L_{line}^2}}} \quad (3)$$

由二阶电路零输入响应理论可知,该放电回路的电流会在极短时间内上升到极大值,之后下降趋近于0,若该回路为欠阻尼系统,则下降过程表现为振荡过0。

对于图4b所示的直流放电回路,不难得出等式:

$$i_{dc,a} = \frac{U_{dc,a}}{R_{line} + R_f + R_T} \quad (4)$$

从式(4)可以发现,a相交流电网经整流器向

故障支路提供的故障电流 $i_{dc,a}$ 的大小取决于回路上电阻的大小。考虑最严重的情况,接地故障类型为金属性接地,即过渡电阻 $R_f=0 \Omega$ ,且接地故障发生在VSC<sub>2</sub>的端口处,即线路电阻 $R_{line}=0 \Omega$ ,若此时变压器低压侧采用中性点接地,即 $R_T=0 \Omega$ ,那么 $i_{dc,a}$ 将趋于无穷大,严重烧毁VSC中的IGBT开关管,虽然VSC可采用过流保护来防止IGBT烧毁,即桥臂电流超过IGBT额定电流的2倍则断开开关管,但是这样就降低了柔性直流配电网的供电可靠性。

另外,通过式(4)还可发现,若变压器低压侧采用中性点经大电阻的接地方式,可显著增大该回路上的电阻值,从而减小了交流电网注入的故障电流,故可以得出结论:中性点经大电阻的接地方式能在配电网发生接地故障时有效保护电力电子器件。

### 2.1.2 故障电压特性

首先对于直流侧,由于VSC在发生接地故障后 $i_{cp}$ 会急剧增大,一旦 $i_{cp}$ 大于交流电网提供给负极电容的充电电流,将导致直流极间电压 $U_{dc}$ 下降,直到正极电容的放电电流小于交流电网提供的充电电流时, $U_{dc}$ 才会上升,因此最终正极电容的电压 $U_p$ 将降至接近0V,而负极电容的电压 $U_n$ 由于LCL型VSC中电压控制器 $G_u(s)$ 的作用将被抬高至母线电压额定值的2倍,母线不平衡电压大小如下式所示:

$$U_{unb} = \frac{|U_p| - |U_n|}{2} \quad (5)$$

式中: $U_{unb}$ 为直流侧正负母线的不平衡电压。

在接地故障下,虽然正负母线的对地电压受到了影响,但极间电压 $U_{dc}$ 仍然不变,因此该故障并不影响交流电网对负载供电,此时配电网可带故障短时间运行,但是要求直流母线的绝缘性能良好,否则单极接地故障可能进一步恶化为极间短路故障。

而对于交流侧,正常情况下少量的电流会流过变压器的接地电阻,因此变压器的接地方式并不影响交流电网的对地相电压。但是在接地故障情况下,如图4b所示,该接地方式会导致大量的直流故障电流流过接地电阻,使得交流电网的对地相电压 $u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}$ 含有较多的直流电压,影响了VSC的系统控制。但是在故障清除后,交流电网可通过LCL滤波器、整流桥、正极电容以及接地电阻形成回路,重新对正极电容进行充电,而

负极电容可通过整流桥、LCL滤波器、交流电网以及接地电阻形成放电回路,实现直流侧极间电压的重新平衡。

## 2.2 极间短路故障

图5为柔性直流配电网发生极间短路故障时的电路图。

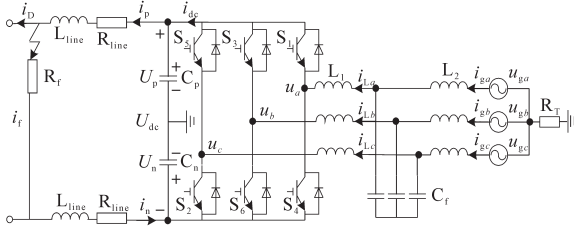


图5 极间短路故障时柔性直流配电网的电路图

Fig.5 Circuit diagram of flexible DC distribution network under inter-pole short circuit fault

极间短路故障对VSC内部器件的危害是极大的,发生极间短路故障时的配电网特性从暂态到稳态可分为三个阶段。

### 2.2.1 电容放电阶段

图6为直流电容的放电回路图。如图6所示,与单极接地故障类似,在发生故障后直流侧电容 $C_p, C_n$ 会向故障支路快速放电,形成二阶电路,导致故障电流 $i_f$ 急剧上升,且电容的放电电流远大于交流电网提供的直流电流 $i_{dc}$ ,可把此时的故障电流 $i_f$ 看作是电容的放电电流,即 $i_f \approx i_{cpn}$ ,而直流侧电压 $U_{dc}$ 表现为在短时间内急剧上升和振荡下降的特性。

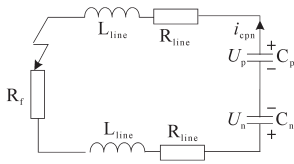


图6 直流电容的放电回路

Fig.6 Discharge circuit of DC capacitance

根据图6,由KVL定理可列出等式:

$$L_t C_t \frac{d^2 U_{dc}}{dt^2} + R_t C_t \frac{dU_{dc}}{dt} + U_{dc} = 0 \quad (6)$$

式中: $L_t$ 为图6回路中的总电感值; $C_t$ 为图6回路中的总电容值; $R_t$ 为图6回路中的总电阻值。

各参数的表达式如下:

$$\begin{cases} L_t = 2L_{line} \\ C_t = \frac{C_p}{2} \\ R_t = 2R_{line} + R_f \end{cases} \quad (7)$$

假设在故障时刻,直流侧电压 $U_{dc}$ 的初始值为 $U_{dc_0}$ ,等效电容 $C_t$ 的放电电流的初始值为 $i_{cpn_0}$ 。由

于线路电阻 $R_{line}$ 通常较小,导致式(6)所示的二阶电路呈欠阻尼状态,因此可求得式(6)的一对特征解:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\sigma + \xi j \\ \lambda_2 = -\sigma - \xi j \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\sigma$ 为特征解 $\lambda$ 的实数部分; $\xi$ 为特征解 $\lambda$ 的虚数部分。

$\sigma$ 与 $\xi$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{R_t}{2L_t} \\ \xi = \sqrt{\frac{R_t^2}{4L_t^2} - \frac{1}{L_t C_t}} \end{cases} \quad (9)$$

由此,可给出直流侧电压 $U_{dc}$ 的表达式:

$$U_{dc} = M e^{-\sigma t} \sin(\xi t + \Psi) \quad (10)$$

式中: $M$ 为幅值; $\Psi$ 为相角。

幅值 $M$ 与相角 $\Psi$ 的表达式如下:

$$\begin{cases} M = \sqrt{U_{dc_0}^2 + \left( \frac{\sigma U_{dc_0}}{\xi} - \frac{i_{cpn_0}}{\xi C_t} \right)^2} \\ \Psi = \arctan\left( \frac{\omega_{cpn} C_t U_{dc_0}}{\sigma U_{dc_0} C_t - \omega_{cpn} \xi i_{cpn_0}} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\omega_{cpn}$ 为回路的角频率。

由式(11)可以看出, $U_{dc}$ 的暂态过程存在欠阻尼特性,可在短时间内达到电压峰值,之后大幅下降,且下降过程表现为振荡特性,最终电压值小于0,并进入极间短路故障的第二阶段。

### 2.2.2 二极管导通阶段

根据二极管的导通性质,当直流侧电压 $U_{dc}$ 下降过0时,VSC中所有的二极管将会发生单向导通,此时流过二极管的电流为两部分,一部分为交流电网注入的故障电流 $i_{af}, i_{bf}, i_{cf}$ ;另一部分为直流侧线路电感的放电电流 $i_{lf}$ ,如图7所示,图中虚线表示电流路径。

对于图7a的交流电网来说,相当于发生了三相交流短路故障, $i_{af}, i_{bf}, i_{cf}$ 分别为三相交流电网向故障支路注入的电流,其表达式如下式所示:

$$\begin{cases} i_{af} = \frac{\sqrt{2} u_{ga}}{\sqrt{R_{lg}^2 + (\omega L_{lg})^2}} \sin(\omega_0 t + \Psi_f - \Psi_a) \\ i_{bf} = \frac{\sqrt{2} u_{gb}}{\sqrt{R_{lg}^2 + (\omega L_{lg})^2}} \sin(\omega_0 t + \Psi_f - \Psi_b) \\ i_{cf} = \frac{\sqrt{2} u_{gc}}{\sqrt{R_{lg}^2 + (\omega L_{lg})^2}} \sin(\omega_0 t + \Psi_f - \Psi_c) \end{cases} \quad (12)$$

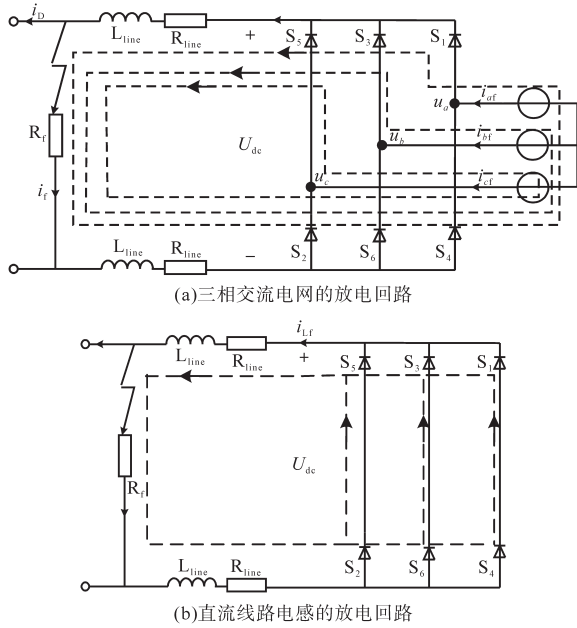


图7 极间短路故障下的放电回路  
Fig.7 Discharge circuit under the fault of inter-pole short circuit

式中:  $u_{ga}, u_{gb}, u_{gc}$  分别为交流电网对地相电压的有效值;  $R_{lg}, L_{lg}$  分别为单相回路上的总电阻和总电感;  $\Psi_f$  为故障情况下交流电网单相的相角;  $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  为正常情况下交流电网单相的相角;  $\omega_0$  为交流电网的基波角频率。

关闭 IGBT 开关管也无法断开交流电网注入的故障电流, 交流电网仍可通过二极管向故障支路注入电流。

而对于图 7b 的直流侧线路电感来说, 在二极管导通时刻, 线路电感已储存了大量能量, 二极管一旦导通, 线路电感将通过二极管释放大电流,  $i_{Lf}$  为线路电感的放电电流, 其放电回路为一阶电路, 其表达式如下式所示:

$$i_{Lf} = i_{Lf0} e^{-(R_f/L_f)t} \quad (13)$$

式中,  $i_{Lf0}$  为故障时刻线路电感的初始电流。此时二极管中的电流可达到桥臂额定电流的几倍, 严重威胁 VSC 器件的安全。

另外, 由式 (12) 和式 (13) 可发现, 若增加回路上的总电感值  $L_{lg}$  和总电阻值  $R_{lg}$ , 不仅可以有效减小桥臂上故障电流的峰值, 而且还可延长故障电流达到峰值的时间, 但是增加回路电阻会削弱 VSC 输出电压的传输效率, 因此可选择增加回路电感的方法来减小桥臂上故障电流的峰值。

### 2.2.3 稳定阶段

随着 VSC 二极管中故障电流的衰减, 将出现

故障电流过零的现象, 导致交流电网对直流侧电容重新充电, 此时  $U_{dc}$  将逐渐上升, 但是  $U_{dc}$  的最大值  $U_{dc,m}$  因极间短路故障而受到限制, 其最大值的表达式如下:

$$U_{dc,m} = i_f R_f + 2i_p R_{line} \quad (14)$$

式中:  $i_p$  为稳定阶段直流正极母线上的电流。

## 3 仿真验证

为了验证上述理论部分的正确性, 搭建了如图 1 所示的柔性直流配电网仿真模型。由于本文主要研究的是直流故障对整流器端口处的影响, 所以在仿真部分中仅给出了 VSC<sub>2</sub> 和故障支路的电气参数的暂态特性, 并且考虑最严重的情况, 即直流故障发生在 VSC<sub>2</sub> 的端口处, 故障点与直流侧电容之间的线路阻抗较小, 同时故障过渡电阻  $R_f=0 \Omega$ , 柔性直流配电网各换流器仿真参数如表 1 所示, VSC<sub>2</sub> 的各元件仿真参数为: 滤波器电感  $L_1=7 \text{ mH}$ , 滤波器电容  $C_f=2 \mu\text{F}$ , 滤波器电感  $L_2=3.5 \text{ mH}$ , 直流侧正极电容  $C_p=0.06 \text{ F}$ , 直流侧负极电容  $C_n=0.06 \text{ F}$ 。

表 1 柔性直流配电网各换流器仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of converter in flexible DC distribution network

| 换流器                | 功率/(MV·A) | 电压等级              |
|--------------------|-----------|-------------------|
| VSC <sub>1</sub>   | 80        | AC 10 kV/DC 10 kV |
| VSC <sub>2</sub>   | 80        | AC 10 kV/DC 10 kV |
| VSI <sub>1</sub>   | 10        | DC 10 kV/AC 10 kV |
| VSI <sub>2</sub>   | 10        | DC 10 kV/AC 10 kV |
| DCSST <sub>1</sub> | 3         | DC 10 kV/DC 750 V |
| DCSST <sub>2</sub> | 3         | DC 10 kV/DC 400 V |

### 3.1 单极接地故障

设定 VSC 的 IGBT 开关管额定电流为 8 kA, 线路电阻  $R_{line}$  和线路电感  $L_{line}$  分别为  $0.05 \Omega$  和  $1 \text{ mH}$ , 直流正极母线在 1.5 s 时发生接地故障, 给出了  $R_f=0 \Omega$  和  $R_f=200 \Omega$  时两种情况下配电网的故障特性。

图 8 为  $R_f=200 \Omega$  和  $0 \Omega$  时 VSC 桥臂电流的暂态特性, 很明显可以看出  $R_f=200 \Omega$  时, 暂态过程中的 VSC 桥臂电流较小, 仅为额定值 50%, 不会危及开关管的安全, 且在 1.9 s 后系统达到稳态后, VSC 桥臂电流恢复为额定值。而  $R_f=0 \Omega$  时, 暂态过程中的 VSC 桥臂电流达到额定值的 2 倍以上, 严重损坏了开关管, 验证了 2.1 节中故障电流

特性分析的正确性。

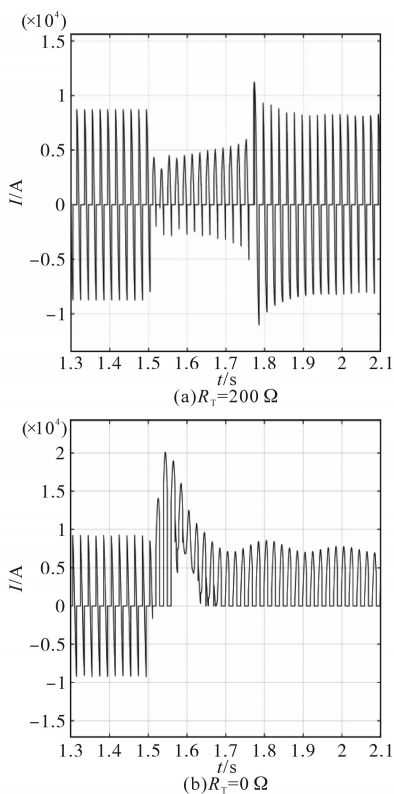


图8 桥臂电流的暂态特性

Fig.8 Transient characteristics of bridge arm current

图9为  $R_r=200 \Omega$  和  $0 \Omega$  时故障支路电流的暂态特性。

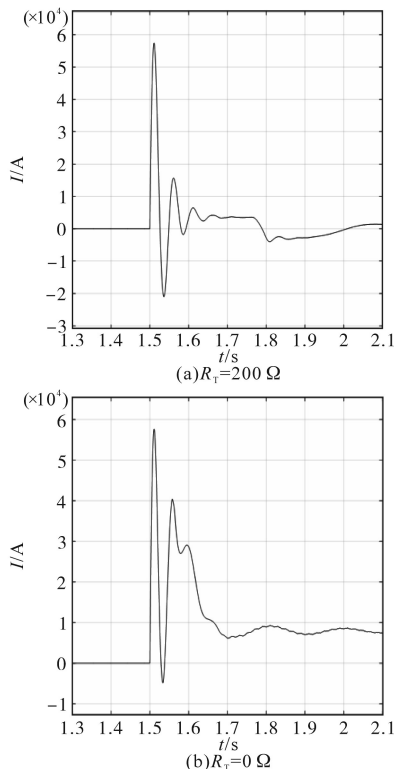


图9 故障支路电流的暂态特性

Fig.9 Transient characteristics of fault branch current

图9a与图9b均表明,故障支路电流在故障发生后的20ms均达到峰值60kA左右,且都表现为振荡过0的特性,但由于图9a中的回路电阻较大,此时系统处于过阻尼状态,其电流峰值仅在故障发生40ms后得到了大幅衰减。而由于图9b中的回路电阻较小,系统为欠阻尼状态,故障支路长时间存在着较大的电流,且振荡幅度远大于图9a所示的系统,验证了2.1节中故障电流特性分析的正确性。

图10为  $R_r=200 \Omega$  和  $0 \Omega$  时,交流侧单相对地电压的暂态特性,由于故障电流在接地电阻上产生了直流电压,导致单相对地电压不再为标准的正弦波,且只要接地故障存在,直流电压分量就始终存在,而  $R_r=0 \Omega$  时,单相对地电压不存在直流电压分量,验证了2.1节中故障电压特性分析的正确性。

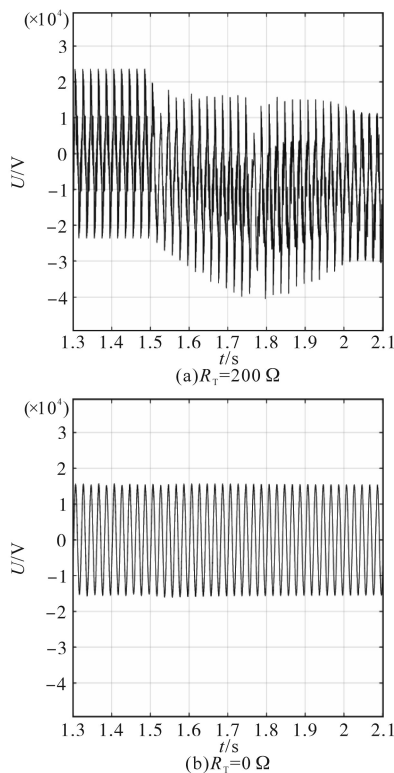


图10 交流侧单相对地电压的暂态特性

Fig.10 Transient characteristics of single-phase voltage to ground on AC side

图11为  $R_r=200 \Omega$  和  $0 \Omega$  时,直流母线电压的暂态特性,由图11a看出  $R_r=200 \Omega$  时,正极母线电压由于发生接地下降至  $0 \text{ V}$ ,而负极母线电压由于电压控制器的作用变为  $-20 \text{ kV}$ ,正负母线不平衡电压大小为  $10 \text{ kV}$ ,但极间电压保持不变。当  $R_r=0 \Omega$  时,如图11b所示,极间电压下降过  $0$  导致二极管导通,使得极间电压无法恢复至

正常情况,验证了2.1节中故障电压特性分析的正确性。

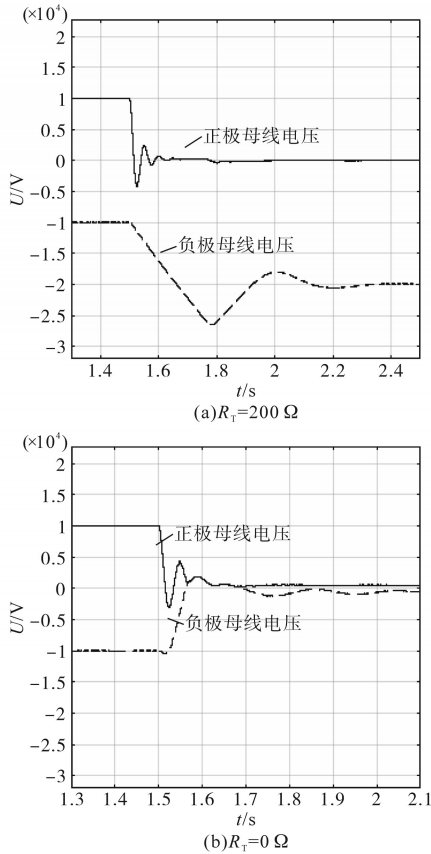


图11 直流母线电压的暂态特性

Fig.11 Transient characteristics of DC bus voltage

综上所述,在单极接地故障下,变压器低压侧采用中性点经大电阻的接地方式可显著减小桥臂故障电流,很好地保护了IGBT开关管,并且防止了极间电压过0现象的发生,使得柔性直流配电网在短时间内仍然可以带故障运行,提高了配电网的供电可靠性。

### 3.2 极间短路故障

同样设定VSC的IGBT开关管额定电流为8 kA,线路电阻 $R_{line}$ 和线路电感 $L_{line}$ 分别为 $0.05 \Omega$ 和 $1 \text{ mH}$ ,直流正极母线在 $1.5 \text{ s}$ 时发生极间短路故障,变压器低压侧采用中性点经大电阻的接地方式。

图12为柔性直流配电网发生极间短路故障时,VSC桥臂电流、极间电压以及故障支路电流的暂态过程。可以发现,在故障发生后的 $10 \text{ ms}$ 时刻,极间电压发生下降过0的现象,且下降过程存在一定的振荡特性,之后所有二极管处于导通状态,进而使得VSC桥臂电流和故障支路电流也在故障发生后的 $10 \text{ ms}$ 时刻上升至最大值,且最

大值为额定值的2倍左右,这将严重损坏二极管,之后交流电网给直流电容充电,极间电压上升至最大限定值,VSC桥臂电流和故障支路电流下降,验证了2.2节理论分析的正确性。

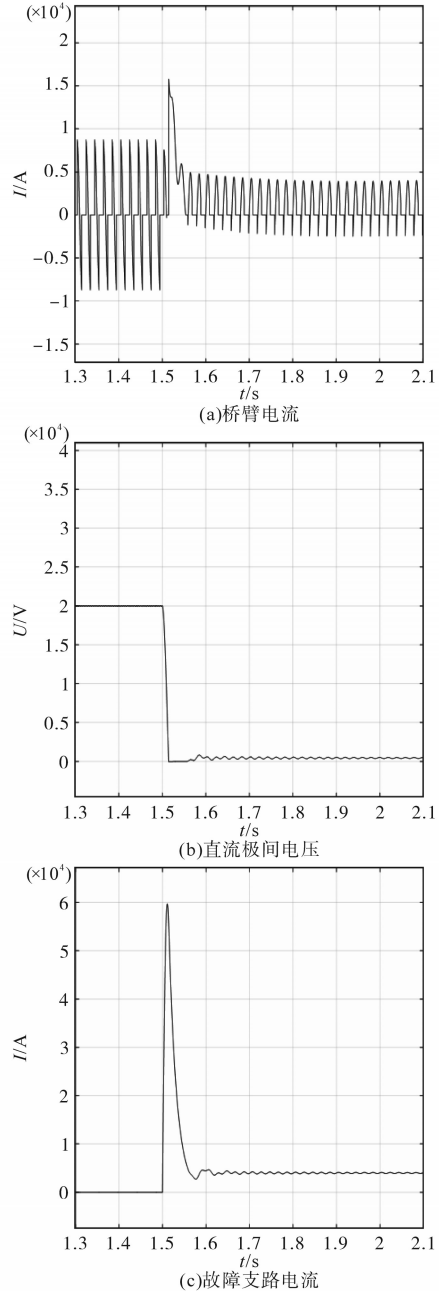


图12 极间短路故障下配电网的暂态特性

Fig.12 Transient characteristics of distribution network under inter-short circuit fault

为了验证增加线路电感可有效的减小故障电流峰值,延迟故障电流达到峰值的时间,图13给出了线路电感 $L_{line}$ 增大至 $10 \text{ mH}$ 时配电网的故障电流特性。将图13与图12进行对比后发现,图13中的桥臂电流和故障支路电流得到了大幅下降,表明增大线路电感可以有效避免

二极管被损坏,并且故障电流达到峰值的时间也被延长至 40 ms,为直流断路器的动作争取了足够的响应时间,更利于故障的清除和定位,但是增加线路电感明显延长了故障暂态时间,削弱了系统的动态响应能力,故线路电感的增加量需选择合适的值,验证了2.2节理论分析的正确性。

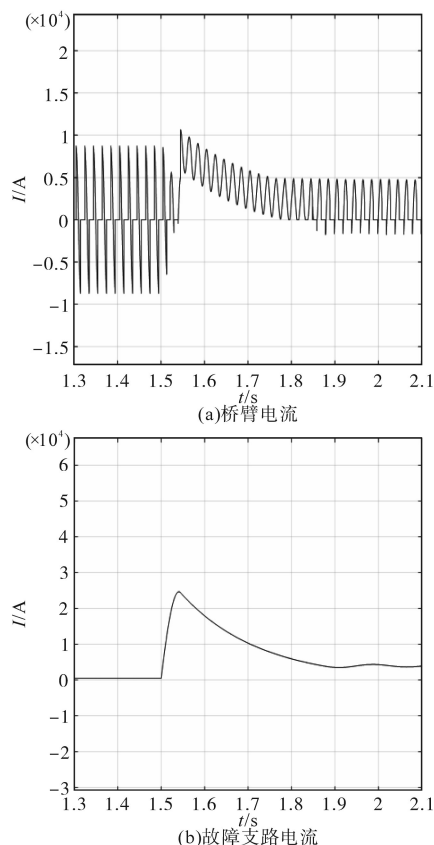


图13 线路电感增大时配电网的暂态特性

Fig.13 Transient characteristics of distribution network when circuit inductance increases

为了验证极间故障发生后,IGBT闭锁对配电网故障特性的影响,设定IGBT在故障发生后的5 ms时刻闭锁,图14给出IGBT闭锁时配电网的暂态特性。

将图12a与图14a进行比较后发现,IGBT闭锁与否并不影响故障电流的峰值大小,而且VSC桥臂仍然存在故障电流,表明交流电网和直流电感可通过导通的二极管形成回路,进而对二极管的安全构成威胁,验证了2.2节理论分析的正确性。

综上所述,在极间短路故障下,变压器低压侧采用中性点经大电阻的接地方式与故障后闭锁IGBT的方法均不能减小或切断VSC桥臂上的故障电流,故障电流将通过导通的二极管构成回路,从而对二极管的安全造成威胁。而采用增大线路

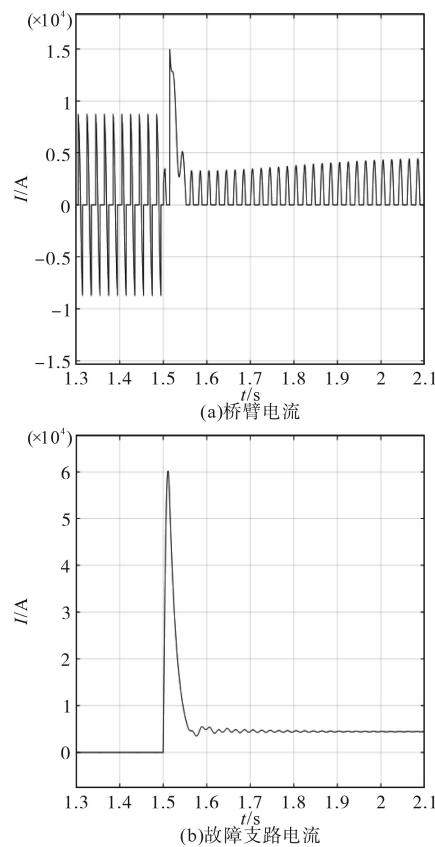


图14 IGBT闭锁时配电网的暂态特性

Fig.14 Transient characteristics of distribution network when IGBT is locked

电感的方法不仅可有效减小VSC桥臂电流和故障支路电流的大小,同时还可延长电流达到峰值的时间,但削弱了配电网的动态响应能力,系统达到稳态的时间将被延长,且延长时间与线路电感大小呈正比。

## 4 结论

本文着重研究了基于LCL型VSC的柔性直流配电网在直流故障下的暂态特性,且最终仿真结果与理论分析一致,为实际工程的应用提供了良好的参考,其理论结论主要为以下几点:

1) 变压器低压侧采用中性点经大电阻的接地方式可显著减小单极接地故障对配电网的危害,配电网可短时间内带故障运行,但该接地方式对极间短路故障没有保护作用。

2) 在极间短路故障下,增加线路电感可大幅减小桥臂电流和故障支路电流的峰值,延长故障电流达到峰值的时间,但是线路电感的增大影响了系统的动态性能。

3) 极间短路故障发生后闭锁IGBT对故障电流的峰值没有影响,交流电网和直流电感仍然可



通过导通的二极管构成回路,对二极管的安全造成了严重威胁。

#### 参考文献

- [1] 陈争光,周泽昕,王兴国,等.混合多端直流输电系统线路保护方案研究[J].电网技术,2019,43(7):2617-2622.  
Chen Zhengguang, Zhou Zexin, Wang Xingguo, *et al.* Research on protection scheme of hybrid multi-terminal DC transmission lines[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2617-2622.
- [2] 曾杰,张弛,袁志昌,等.实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J].电气传动,2019,49(9):46-51.  
Zeng Jie, Zhang Chi, Yuan Zhichang, *et al.* Research on control strategy of DC distribution grid with balanced load ratio between connected AC zones[J]. Electric Drive, 2019, 49(9): 46-51.
- [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] 戴志辉,黄敏,苏怀波,等.环状柔直配电网线路的单端量保护原理[J].中国电机工程学报,2018,38(23):6825-6836.  
Dai Zhihui, Huang Min, Su Huaibo, *et al.* Single-terminal quantity based line protection for ring flexible DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6825-6836.
- [5] Jovicic Dragan, Zhang Lu, Hajian Masood. LCL VSC converter for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 137-144.
- [6] 钟庆,童晋方,马新华,等.电压源型换流器LCL滤波器确定性设计[J].高电压技术,2016,42(10):3068-3074.  
Zhong Qing, Tong Jinfang, Ma Xinhua, *et al.* Deterministic design of LCL filter for voltage source converter[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3068-3074.
- [7] 戴志辉,葛红波, Peter Crossley, 等.柔性直流配电网故障识别与隔离策略综述[J].华北电力大学学报(自然科学版),2017,44(4):19-28.  
Dai Zhihui, Ge Hongbo, Peter Crossley, *et al.* An overview on fault detection and isolation strategies of flexible DC distribution networks[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(4): 19-28.
- [8] Emhemed A A S, Burt G M. An advanced protection scheme for enabling an LVDC last mile distribution network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2602-2609.
- [9] 李猛,贾科,张秋芳,等.基于全电流方向特征的柔性直流配电网纵联保护[J].电力系统自动化,2019,43(23):116-122,130.  
Li Meng, Jia Ke, Zhang Qiufang, *et al.* Directional pilot protection for flexible DC distribution network based on directional characteristics of instantaneous current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 116-122,130.
- [10] Yang Jin, 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.
- [11] 秦红霞,孙刚,时伯年,等.柔性直流配电网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.
- [12] Carminati M, Grillo S, Piegari L, *et al.* Fault protection analysis in low voltage DC microgrids with PV generators[C]//2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italy: IEEE, 2015: 184-191.
- [13] 时伯年,赵宇明,孙刚.柔性直流配电网保护方案研究及实现[J].南方电网技术,2015,9(9):11-16.  
Shi Bonian, Zhao Yuming, Sun Gang. Research and implementation of protection scheme for MMC DC distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 11-16.
- [14] 佟子昂,武建文,马速良,等.一种基于主动电压扰动的直流微网负载均流控制策略[J].电工技术学报,2019,34(24):5199-5208.  
Tong Ziang, Wu Jianwen, Ma Suliang, *et al.* A load current-sharing control strategy for DC microgrid converters based on active voltage disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5199-5208.
- [15] 马钊,赵志刚,孙媛媛,等.新一代低压直流供用电系统关键技术及发展展望[J].电力系统自动化,2019,43(23):12-22.  
Ma Zhao, Zhao Zhigang, Sun Yuanyuan, *et al.* Key technologies and development prospect of new generation low-voltage DC power supply and utilization system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 12-22.

收稿日期:2020-06-03

修改稿日期:2020-06-15