

# 基于限流电抗电压积分值的环状柔性 直流配电网保护方案

戴志辉<sup>1</sup>,刘雪燕<sup>1</sup>,刘自强<sup>1</sup>,陈思琦<sup>1</sup>,李毅然<sup>1</sup>,秦良栋<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室,河北 保定 071003;

2. 国网河北省电力有限公司,河北 石家庄 050021)

**摘要:**直流故障电流上升速度快,故障影响范围广,传统的交流故障检测方法不再适用。为此,基于系统复频域模型提出一种基于直流线路限流电抗电压积分值的多端直流环网故障快速检测方法。首先,详细分析了多端环状柔性直流配电网中各元件的时域和复频域等效模型。在此基础上,给出了限流电抗电压的计算方法,其实现了系统等效模型在时域和复频域上的转化,求解简单,建模难度低,且对不同系统的建模有普适性。其次,提出一种基于限流电抗电压积分值的故障检测方法,其抗噪能力强且具有一定的耐受过渡电阻能力。最后,在PSCAD/EMTDC中搭建仿真模型,验证了所提计算方法的正确性和保护方案的可行性。

**关键词:**直流配电系统;拉普拉斯变换;复频域等效;限流电抗电压;单端量保护

**中图分类号:**TM 77

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202009031

## 0 引言

与传统的交流配电网相比,多端柔性直流配电网因具有线路损耗低、传输容量大、系统控制更灵活以及分布式能源接入更高效等优点,成为未来配电网研究的热点之一<sup>[1]</sup>。但另一方面,多端柔性直流系统阻尼小、故障发展迅速,在故障后的几毫秒内就能危及整个直流电网。而多端柔性直流配电网换流站中含有大量不能承受较大电流的电力电子设备,因此,快速可靠的直流故障识别方法对维持系统安全稳定运行至关重要。通常情况下,由于故障后换流站电容的放电,直流配电网的保护需在2 ms左右检测出直流线路故障<sup>[2]</sup>,而现有交流配电网的故障检测技术无法达到该要求。因此,有必要针对多端直流配电网提出一种快速、准确的故障检测方案。

为了限制故障电流大幅度增加,实际多选择在直流线路两端安装限流电抗以减小故障电流<sup>[3-4]</sup>。由于限流电抗对电流具有吸收、阻滞作用,因此可利用限流电抗两侧的故障特性差异来识别故障线路<sup>[5]</sup>。文献[6]利用发生区内、区外故障时限流电抗电压初始值的差异构成故障识别判据,根据区内故障下两极限流电抗电压初始值的差异构成故障选极判据,但由于仅计算了限流电抗电压初始值,保护数

据窗短,抗干扰能力较弱,且对采样频率的要求高。文献[7]利用边界元件对电流高频分量的吸收、阻滞作用,通过电流高频暂态能量的大小区分区内、区外故障,实现故障的快速、可靠识别,但其保护定值没有完整的理论分析过程和计算方法。文献[8]利用线路单端限流电抗电压变化率区分区内、区外故障,但对变化率的求解中含有大量的高阶方程,增加了计算时间和计算难度,且基于变化率的保护易受噪声干扰,对保护的可靠性有一定影响。文献[9]以限流电抗电压和模块化多电平换流器(MMC)直流侧电压的组合为判据,实现直流线路和母线双极故障的快速识别,但未涉及单极故障的识别方法。文献[10]利用故障线路和非故障线路直流电抗器电压大小和方向的不同,实现故障线路的快速识别;利用故障线路正、负极直流电抗器电压大小的差异进行故障类型和故障极的判别。文献[11]提出一种基于附加电感电压积分值的保护方法,但对附加电感电压的计算缺少完备的理论分析方法。另外,上述基于边界特性的直流保护大多基于时域分析,而在多端配电网中含有大量的换流器和直流线路,需要求解大量的高阶微分方程。因此针对故障电流、电压,有必要提出一种具有普适性的简便计算方法,并以此为基础,提出快速可靠的直流线路保护方案。

本文针对MMC和电压源型换流器(VSC)共存的环网中直流线路保护问题,首先详细分析了环状柔性直流配电网中各元件的时域和复频域等效模型;在此基础上,提出了系统的复频域等效模型方法,并给出限流电抗电压波形的计算方法,将系统等效模型从时域变换到复频域,其求解简单、建模难度低,且对不同系统的建模有普适性;然后提出一种基于

**收稿日期:**2019-11-26; **修回日期:**2020-07-24

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51877084);国家重点研发计划项目(2016YFB0900203);河北省自然科学基金资助项目(E2018502063)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877084),the National Key R&D Program of China (2016YFB0900203) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2018502063)

限流电抗电压积分值的故障检测方法,利用区内、区外故障下限流电抗电压的波形差异构成保护;最后,在PSCAD/EMTDC软件中验证了所提计算方法的正确性和保护方案的可行性。

## 1 环状柔性直流配电网的建模方法

多端环状柔性直流配电网的主要元件包括线路及其两端的限流电抗、直流母线、MMC、VSC以及大量的分布式电源。现有文献多是在时域上进行等效模型的建立,但由于多端环状柔性直流配电网中含有大量的电容、电感,时域计算需求解大量高阶方程,加大了计算的复杂度。为简化建模以及求解,本文将多端环状柔性直流配电网中各元件在复频域上进行等效,并以此为依据搭建系统的复频域等效模型。

### 1.1 直流输电线路等效模型的建立

采用输电线路 $\pi$ 型等效模型,由于中压直流配电网线路较短,可忽略对地电容的影响。附录A中的图A1—A3分别给出电阻、电感和电容元件的时域和复频域等效模型<sup>[12]</sup>,由此得出直流输电线路的时域、复频域等效模型如图1所示。图中, $i(t)$ 、 $i(s)$ 分别为时域、复频域上流过线路的电流; $u_R(t)$ 、 $U_R(s)$ 分别为时域、复频域上电阻 $R$ 两端的电压; $u_L(t)$ 、 $U_L(s)$ 分别为时域、复频域上电感 $L$ 两端的电压; $Li_L(0^-)$ 仅取决于电感电流的初始值,在电感电流初值为0的情况下,此部分为0。

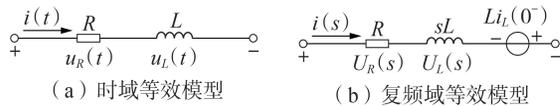


图1 直流输电线路等效模型

Fig.1 Equivalent model of DC power transmission line

### 1.2 换流器等效模型的建立

多端柔性直流环网中的换流器主要包括MMC、VSC和直流变压器(DCT)。故障初始阶段(故障后大约2ms),短路电流主要是由MMC子模块电容、VSC和DCT直流侧并联大电容放电形成的。参考文献<sup>[13]</sup>,在该阶段MMC可等效为电容、电感的串联,如图2(a)所示;VSC和DCT可等效为直流侧并联电容,如图2(b)所示(由于VSC、DCT在电容放电阶段的等效模型相同,将两者的等效模型统称为VSC的等效模型);则MMC、VSC的复频域等效模型分别如图2(c)、(d)所示。图中, $C_{eq}=6C/N$ , $C$ 为MMC子模块电容值, $N$ 为一相子模块数; $L_{eq}=2L_a/3$ , $L_a$ 为桥臂电感; $C_s$ 为VSC和DCT直流侧并联电容值; $i_L(0^-)$ 、 $U_C(0^-)$ 分别为电感电流和电容电压的初始值; $U_p$ 、 $U_n$ 分别为直流正、负极电压; $U_{dc}$ 为直流电压。

### 1.3 系统等效模型的建立

环状柔性直流配电网中的任意元件可按1.1节

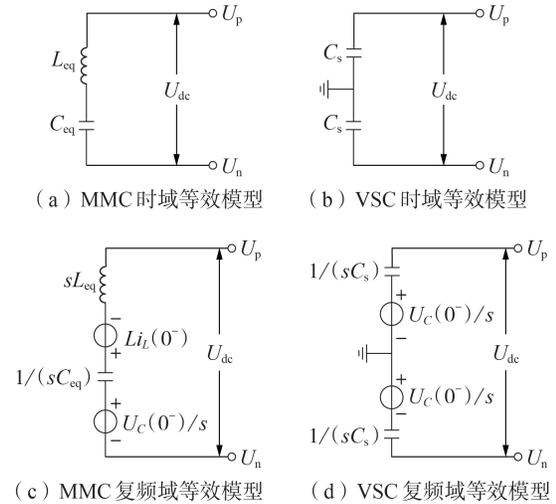


图2 换流器等效模型

Fig.2 Equivalent model of converters

和1.2节中的方法进行等效,并以此为基础,根据网络拓扑建立系统的时域和复频域等效模型。由于任意拓扑的直流系统均由上述元件构成,该等效方法具有普适性。

## 2 故障特性分析方法

本文以附录A中图A4所示的六端环状柔性直流配电网为载体,提出一种基于复频域等效模型的故障特性分析方法。该方法在复频域上进行系统等效并求解,降低了系统建模及故障求解的难度。

文献<sup>[14]</sup>指出,直流线路发生双极短路故障时,故障过程可分为电容放电阶段、二极管导通阶段和故障稳定阶段;发生单极接地故障时,故障过程可分为故障极电容放电、健全极电容充电和故障稳定阶段。由于电容放电阶段会产生非常大的故障电流,易损坏电力电子器件,保护应在电容放电阶段完成之前动作。对于最严重的双极故障,电容放电阶段一般持续2ms左右<sup>[15]</sup>。因此有必要对该阶段的故障特性进行分析,并以此为依据提出快速可靠的故障识别方法。

### 2.1 区内故障特性分析方法

#### 2.1.1 系统等效模型的建立

发生单极接地故障时,系统正、负极不对称,可将故障后不对称的正、负极电气量分别分解为对称的一模和零模分量。正、负极电气量和一模、零模分量的关系如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} e_p \\ e_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_p \\ e_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $e_1$ 、 $e_0$ 分别为一模、零模分量,零模分量不能在2条线路中形成环流,只能流入大地,一模分量在2条极线中形成环流,不流经大地; $e_p$ 、 $e_n$ 分别为直流线路正、负极电气量; $\mathbf{S}$ 为解耦矩阵。

以图A4中的 $f_1$ 处发生正极接地故障为例,在电

电容放电阶段,系统中各换流器都向故障点放电。忽略距故障点较远的端口 $T_4$ 、 $T_2$ <sup>[16]</sup>,系统的一模时域、复频域等效网络分别如图3(a)、(b)所示。图中, $Z_{c2}$ 、 $Z_{c6}$ 分别为线路2、6的总阻抗,其大小为线路阻抗、两端限流电抗之和; $L_{1.1}$ 、 $L_{1.6}$ 为线路1两端的限流电抗; $Z_{1f}$ 为故障点距 $L_{1.1}$ 处的线路阻抗; $Z_1$ 为线路1的阻抗; $U_{f1}$ 为故障点对地电压的一模分量; $U_c(0^-)$ 为故障前电容 $C_s$ 上的电压, $U_c(0^-)=10$  kV。由于电容放电阶段的压降主要集中在电感以及限流电抗上,为简化计算,以下分析不计线路电阻与MMC等效电阻的影响。

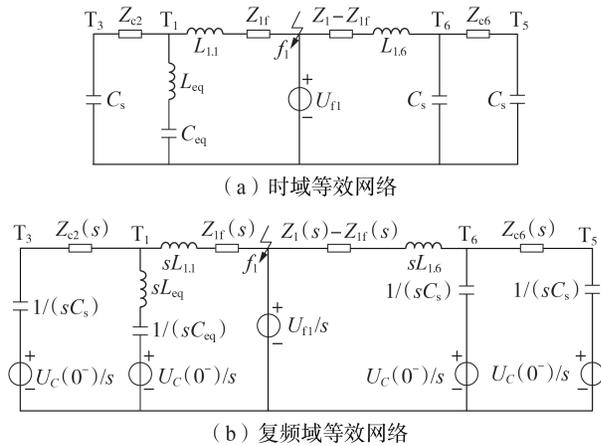


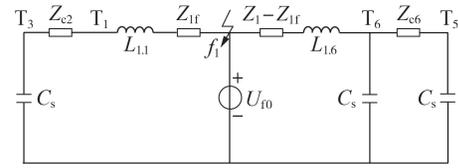
图3  $f_1$ 处发生故障时的一模等效网络

Fig.3 Equivalent 1-mode network during fault at  $f_1$

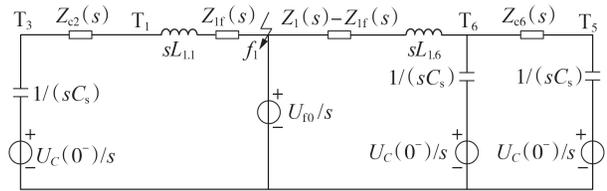
在电容放电阶段,由端口 $T_3$ 向故障点 $f_1$ 的放电电流主要有2条通路:①端口 $T_3$ -线路2-故障点 $f_1$ ;②端口 $T_3$ -线路3-线路4-线路5-线路6-故障点 $f_1$ 。通路②的阻抗远大于通路①的阻抗,即流过通路②的电流远小于流过通路①的电流。同理,由端口 $T_5$ 向故障点 $f_1$ 的放电电流主要有2条通路:①端口 $T_5$ -线路6-故障点 $f_1$ ;②端口 $T_5$ -线路5-线路4-线路3-线路2-故障点 $f_1$ 。流过通路②的电流远小于流过通路①的电流。因此近似认为 $T_3$ 和 $T_5$ 之间无电流通过,将环网解环。

正常运行时限流电抗上的压降可以忽略,即 $L_{iL}(0^-) \approx 0$ ,系统的零模等效网络的时域和复频域模型分别如图4(a)、(b)所示。图中, $U_{f0}$ 为故障点对地电压的零模分量;由于故障前无零模分量,在零模网络中,故障前电容 $C_s$ 上的电压为0,则 $U_c(0^-)=0$ 。线路和换流器时域等效参数解耦时,取 $Z_{x-1}=Z_{x-0}$ , $Z_{MMC-1}=Z_{MMC-0}$ 。其中, $Z_{x-1}$ 、 $Z_{x-0}$ 分别为线路 $x(x=1,2,\dots,6)$ 的一模、零模阻抗; $Z_{MMC-1}$ 、 $Z_{MMC-0}$ 分别为MMC的一模、零模等效阻抗。在此基础上,换流器和线路复频域等效参数解耦时,取 $Z_{x-1}(s)=Z_{x-0}(s)$ , $Z_{MMC-1}(s)=Z_{MMC-0}(s)=sL_{eq}+1/(sC_{eq})$ <sup>[17]</sup>。

根据 $f_1$ 处发生故障时的边界条件,即正极电压



(a) 时域等效网络



(b) 复频域等效网络

图4  $f_1$ 处发生故障时的零模等效网络

Fig.4 Equivalent 0-mode network during fault at  $f_1$

为0、负极对地电流为0,可得 $f_1$ 处发生故障时系统的复合模量网络的复频域模型如图5所示。图中, $Z_{3f-0}(s)$ 、 $Z_{5f-0}(s)$ 分别为端口 $T_3$ 、 $T_5$ 到故障点的零模等效阻抗。若线路1发生负极接地故障,分析方法与正极接地故障类似。线路1发生双极故障时,由于正负极电气量对称,一模网络即为复合模量网络。

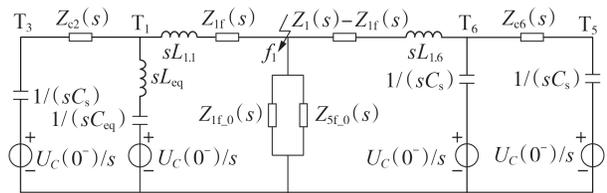


图5  $f_1$ 处发生故障时的复合模量网络的复频域模型

Fig.5 Complex frequency model of complex modulus network during fault at  $f_1$

### 2.1.2 限流电抗电压的求解

根据图5,以限流电抗 $L_{1.1}$ 为例,在电容放电阶段, $L_{1.1}$ 上电压的一模分量和零模分量分别如式(2)和式(3)所示。

$$u_{L_{1.1},1}(s) = \frac{(U_c(0^-)/s)Z_{f-1}(s)sL_{1.1}}{(Z_{f-1}(s) + Z_{f-0}(s))Z_{3f-1}(s)} \quad (2)$$

$$u_{L_{1.1},0}(s) = \frac{(U_c(0^-)/s)Z_{f-0}(s)sL_{1.1}}{(Z_{f-1}(s) + Z_{f-0}(s))Z_{5f-0}(s)} \quad (3)$$

$$Z_{3f-1}(s) = Z_{3f-1}(s) + sL_{1.1} + Z_{1f}(s) = \left[ \frac{1/(sC_s) + Z_{c2}(s)}{sL_{eq} + 1/(sC_s)} \right] + sL_{1.1} + Z_{1f}(s) \quad (4)$$

$$Z_{3f-0}(s) = 1/(sC_s) + Z_{c2}(s) + sL_{1.1} + Z_{1f}(s) \quad (5)$$

$$Z_{5f-1}(s) = Z_{5f-1}(s) + sL_{1.6} + Z_{f-1}(s) - Z_{1f}(s) = \left[ \frac{1/(sC_s) + Z_{c6}(s)}{1/(sC_s)} \right] + sL_{1.6} + Z_{f-1}(s) - Z_{1f}(s) \quad (6)$$

$$Z_{5f-0}(s) = Z_{5f-1}(s) \quad (7)$$

$$Z_{f-1}(s) = Z_{3f-1}(s) // Z_{5f-1}(s) \quad (8)$$

$$Z_{f-0}(s) = Z_{3f-0}(s) // Z_{5f-0}(s) \quad (9)$$

其中,  $u_{L_{1,1}}(s)$ 、 $u_{L_{1,0}}(s)$  分别为区内故障电容放电阶段,复频域上流限电抗  $L_{1,1}$  上电压的一模和零模分量;  $Z_{f,1}(s)$ 、 $Z_{f,0}(s)$  分别为复频域上系统对于故障点的一模、零模等效阻抗;  $Z_{3f,1}(s)$ 、 $Z_{5f,1}(s)$  分别为端口  $T_3$ 、 $T_5$  到故障点的一模等效阻抗;  $Z_{56}$  为端口  $T_5$ 、 $T_6$  之间的等效阻抗;  $Z_{31}$  为端口  $T_1$ 、 $T_3$  之间的等效阻抗。结合式(1)可得发生区内正极故障时的限流电抗  $L_{1,1}$  的正、负极电压如式(10)所示。

$$\begin{cases} u_{L_{1,1,p}}(s) = u_{L_{1,1}}(s) + u_{L_{1,0}}(s) \\ u_{L_{1,1,n}}(s) = u_{L_{1,1}}(s) - u_{L_{1,0}}(s) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $u_{L_{1,1,p}}$ 、 $u_{L_{1,1,n}}$  分别为限流电抗  $L_{1,1}$  的正、负极电压。在 MATLAB 中利用反拉普拉斯变换语句可得时域的  $u_{L_{1,1,p}}$ 、 $u_{L_{1,1,n}}$ 。

同理可得,当发生区内双极故障时,系统的复合复频域模量网络如图 5 所示,限流电抗  $L_{1,1}$  的正、负极电压如式(11)所示。

$$u_{L_{1,1,p}}(s) = u_{L_{1,1,n}}(s) = \frac{(U_C(0^-)/s)sL_{1,1}}{Z_{3f,1}(s)} \quad (11)$$

将式(10)、(11)相减可得附录 B 中的式(B1),可知发生区内故障时,在电容放电阶段,发生双极短路故障时  $u_{L_{1,1}}$  大于发生单极接地故障时的  $u_{L_{1,1}}$ 。将式(10)中  $u_{L_{1,1,p}}(s)$ 、 $u_{L_{1,1,n}}(s)$  相减可得附录 B 中的式(B2),可见发生区内单极故障时,故障极电压大于健全极电压。且在其他条件不变的情况下,随着  $Z_{1f}$  的增大,  $u_{L_{1,1}}$  减小。可知,在线路 1 靠近 VSC 端发生正极接地故障时,  $u_{L_{1,1,p}}$  最小,记为  $u_{L_{1,1,p,\min}}$ ,如附录 B 中的式(B3)所示。

## 2.2 区外故障特性分析方法

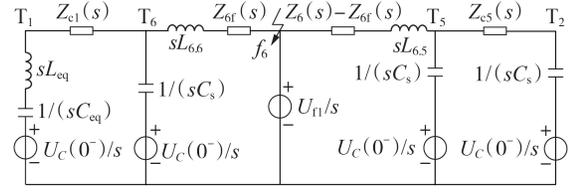
### 2.2.1 系统等效模型的建立

当线路 6 的  $f_6$  处发生故障时,对保护  $P_{1,1}$  而言为正向区外故障,此时系统的复频域模量网络等效方法同区内故障,如图 6 所示。图中,  $Z_{c5}$  为线路 5 的总阻抗;  $L_{6,6}$ 、 $L_{6,5}$  为线路 6 两端的限流电抗;  $Z_6$  为线路 6 的阻抗;  $Z_{6f}$  为故障点距离  $L_{6,6}$  处的线路阻抗;  $Z_{1f,0}$ 、 $Z_{2f,0}$  分别为端口  $T_1$ 、 $T_2$  到故障点的零模等值阻抗;  $U_C(0^-) = 10 \text{ kV}$ 。

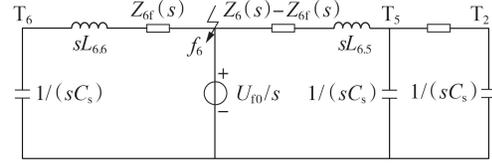
### 2.2.2 限流电抗电压的求解

区外  $f_6$  处发生故障时,系统的复合复频域模量网络如图 6(c) 所示。电容放电阶段  $u_{L_{1,1}}$  的一模分量和零模分量分别如式(12)和式(13)所示。

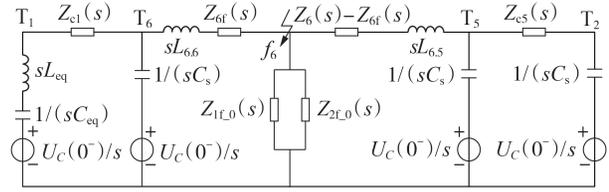
$$u_{L_{1,1}}(s) = \frac{(U_C(0^-)/s)Z_{f,1}(s)}{Z_{f,1}(s) + Z_{f,0}(s)} \times \frac{Z_{16}(s)sL_{1,1}}{Z_{1f,1}(s)[sL_{\text{eq}} + 1/(sC_{\text{eq}}) + Z_{c1}(s)]} \quad (12)$$



(a) 一模等效网络



(b) 零模等效网络



(c) 复合模量网络

图 6 点  $f_6$  发生故障时系统等效模量网络

Fig.6 Equivalent modulus network after fault at  $f_6$

$$u_{L_{1,1,0}}(s) = \frac{(U_C(0^-)/s)Z_{f,0}(s)sL_{1,1}}{(Z_{f,1}(s) + Z_{f,0}(s))Z_{1f,0}(s)} \quad (13)$$

$$Z_{1f,1}(s) = Z_{16}(s) + sL_{6,6} + Z_{6f}(s) =$$

$$\left[ sL_{\text{eq}} + 1/(sC_{\text{eq}}) + Z_{c1}(s) \right] // \left[ 1/(sC_s) \right] + sL_{1,1} + Z_{6f}(s) \quad (14)$$

$$Z_{1f,0}(s) = 1/(sC_s) + sL_{6,6} + Z_{6f}(s) \quad (15)$$

$$Z_{2f,1}(s) = Z_{25}(s) + sL_{6,5} + Z_6(s) - Z_{6f}(s) = \left[ 1/(sC_s) + Z_{c5}(s) \right] // \left[ 1/(sC_s) \right] + sL_{6,5} + Z_6(s) - Z_{6f}(s) \quad (16)$$

$$Z_{2f,0}(s) = 1/(sC_s) + Z_6(s) - Z_{6f}(s) \quad (17)$$

$$Z_{f,1}(s) = Z_{1f,1}(s) // Z_{2f,1}(s) \quad (18)$$

$$Z_{f,0}(s) = Z_{1f,0}(s) // Z_{2f,0}(s) \quad (19)$$

其中,  $Z_{1f,1}(s)$ 、 $Z_{2f,1}(s)$  分别为端口  $T_1$ 、 $T_2$  到故障点的一模等效阻抗;  $Z_{6f}(s)$  为故障点距离  $L_{6,6}$  处的线路阻抗;  $Z_{16}$  为端口  $T_1$ 、 $T_6$  之间的等效阻抗;  $Z_{25}$  为端口  $T_2$ 、 $T_5$  之间的等效阻抗。结合式(1)可得发生区外正极故障时限流电抗  $L_{1,1}$  的正、负极电压如式(10)所示。在 MATLAB 中求得时域的  $u_{L_{1,1,p}}$ 、 $u_{L_{1,1,n}}$ 。

同理可得,发生区外双极接地故障时,限流电抗  $L_{1,1}$  的正、负极电压如式(20)所示。

$$u_{L_{1,1,p}}(s) = u_{L_{1,1,n}}(s) = \frac{U_C(0^-)L_{1,1}Z_{16}(s)}{Z_{1f,1}(s)[sL_{\text{eq}} + 1/(sC_{\text{eq}}) + Z_{c1}(s)]} \quad (20)$$

将式(12)、(13)代入式(10),将结果分别与式(20)相减可得附录 B 中的式(B5),可知发生正向区

外故障时,在电容放电阶段仍有双极短路故障下的 $u_{L_{1,1}}$ 大于单极接地故障下的 $u_{L_{1,1}}$ 。且在其他条件不变的情况下,随着 $Z_{gf}$ 的增大, $u_{L_{1,1}}$ 减小。因此,当在线路6首端发生双极短路故障时, $u_{L_{1,1}P}$ 取区外 $f_6$ 处发生故障时的最大值 $u_{L_{1,1}P\_omax}$ ,如附录B中的式(B6)所示。

将 $u_{L_{1,1}P\_imin}$ 和 $u_{L_{1,1}P\_omax}$ 相减后可知,发生区内故障时 $u_{L_{1,1}P}$ 的最小值大于发生正向区外故障时 $u_{L_{1,1}P}$ 的最大值。故可利用限流电抗电压的大小识别区内、外故障。发生区内故障时,将 $u_{L_{1,1}P}$ 和 $u_{L_{1,1}n}$ 相减可得故障极的限流电抗电压恒大于健全极的限流电抗电压,因此可利用限流电抗电压的值区分故障极。

### 3 直流线路保护方案

#### 3.1 方向启动元件

为防止保护频繁启动,参考文献[7]设计了基于限流电抗电压压降的方向启动元件,由于发生反方向故障时,不满足保护启动判据,保护不启动,因此称其为方向启动元件。定义正极线路的正方向为母线指向线路,负极线路正好相反。以保护 $P_{1,1}$ 为例,正常运行时, $u_{L_{1,1}}=0$ ;当发生正向故障时, $u_{L_{1,1}}>0$ ;当发生反向故障时,限流电抗电压 $u_{L_{1,1}}<0$ 。且故障发生时,方向判据以首次检测到的非零电压值作为启动开始的依据。因此保护启动判据如式(21)所示。

$$u_{L_{1,1}} > V_{set} \quad (21)$$

其中, $u_{L_{1,1}}$ 为保护 $P_{1,1}$ 检测到的 $L_{1,1}$ 上的电压; $V_{set}$ 为保护的启动定值,其整定原则为躲过正常运行时 $u_{L_{1,1}}$ 的最大值,本文取 $V_{set}=0.05$  kV。为躲避雷击干扰,启动数据窗设为0.3 ms。

#### 3.2 故障识别

由第2节可知,发生区内故障时限流电抗电压的大小与发生正向区外故障时限流电抗电压的大小存在明显差异,因此通过限流电抗电压能够可靠地区分区内、区外故障。同时,为了避免测量误差和噪声干扰,且能不断积累区内、外故障的差异性,本文对限流电抗电压进行积分。以保护 $P_{1,1}$ 为例,其限流电抗电压 $u_{L_{1,1}}$ 的积分为:

$$u_{L_{1,1}int} = \int_0^T u_{L_{1,1}} dt \quad (22)$$

其中, $T$ 为积分时间,综合考虑保护的速动性和可靠性,取 $T=0.5$  ms。故障识别判据为:

$$u_{L_{1,1}int} > u_{set} \quad (23)$$

$$u_{set} = K_{rel} u_{L_{1,1}int\_omax} \quad (24)$$

其中, $u_{set}$ 为故障识别定值,其整定原则为躲过发生正向区外故障时限流电抗电压积分值的最大值;

$u_{L_{1,1}int\_omax}$ 为发生正向区外故障时 $u_{L_{1,1}int}$ 的最大值; $K_{rel}$ 为可靠系数,取为1.5。由第2节可知,在线路6首端发生双极短路故障时, $u_{L_{1,1}int}$ 取发生正向区外故障时的最大值 $u_{L_{1,1}int\_omax}$ 。将 $Z_{gf}=0$ 代入式(12)~(20)、(22)及式(B6)中得 $u_{L_{1,1}int\_omax}$ ,代入式(24)可得 $u_{set}$ 。另外,发生正向区外故障时,限流电抗电压从0开始逐渐增加,其积分值也从0开始逐渐增加。而本文的模型等效和故障分析均是针对电容放电阶段(故障后2 ms),为防止故障2 ms后保护误动,并综合考虑保护的可靠性,规定若保护在启动后的1 ms内没有判定故障,则闭锁保护。

#### 3.3 故障选极

当限流电抗电压满足式(23)时,进行故障选极。由第2节可知,发生区内故障时,电容放电阶段故障极的限流电抗电压恒大于健全极的限流电抗电压。以保护 $P_{x,y}$ ( $x$ 为线路编号, $y$ 为母线编号)为例,故障选极判据表示为:

$$\begin{cases} |u_{L_{x,y}P\_int}| / |u_{L_{x,y}n\_int}| > \lambda_{set} & \text{正极故障} \\ |u_{L_{x,y}P\_int}| / |u_{L_{x,y}n\_int}| < 1/\lambda_{set} & \text{负极故障} \\ 1/\lambda_{set} < |u_{L_{x,y}P\_int}| / |u_{L_{x,y}n\_int}| < \lambda_{set} & \text{双极故障} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $|u_{L_{x,y}P\_int}|$ 、 $|u_{L_{x,y}n\_int}|$ 分别为限流电抗 $L_{x,y}$ 的正、负极电压积分值绝对值; $\lambda_{set}$ 为故障选极定值。由第2节的分析可以知道,当发生双极故障时,正、负极限流电抗电压积分值相等, $|u_{L_{x,y}P\_int}| / |u_{L_{x,y}n\_int}| = 1$ ;当发生正极故障时, $|u_{L_{x,y}P\_int}| / |u_{L_{x,y}n\_int}| > 1$ ;当发生负极故障时, $|u_{L_{x,y}P\_int}| / |u_{L_{x,y}n\_int}| < 1$ 。因此 $\lambda_{set}$ 为略大于1的正数,本文取 $\lambda_{set}=1.2$ 。

需要说明的是,若限流电抗本体发生故障,则其参数会发生变化,原保护整定值可能无法保证保护的可靠性,因此本保护的出口逻辑总结为:本保护判据成立且限流电抗本体无故障。

### 4 仿真实验

在PSCAD/EMTDC中搭建如附录A中的图A4所示的六端环状直流配电网模型,其参数如附录A中的表A1所示,采样频率为20 kHz。结合系统参数和第3节的整定原则,可得保护 $P_{1,1}$ 的保护启动定值 $V_{set}=0.05$  kV,故障识别定值 $u_{set}=0.6$  kV·ms,故障选极定值 $\lambda_{set}=1.2$ 。

#### 4.1 区内故障

(1) 双极短路故障。

假设在线路1中点发生双极短路故障,故障时

刻为 0.6 s,相应的仿真结果如图 7 所示。

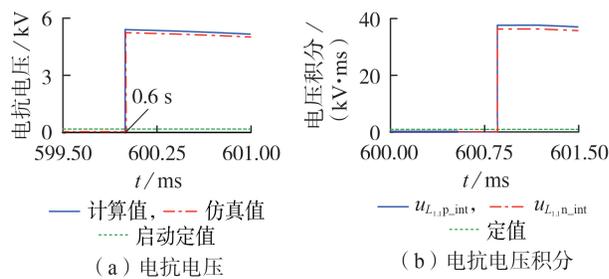


图 7 区内双极短路故障的仿真结果

Fig.7 Simulative results of internal bipolar short circuit fault

由图 7 可以看出,限流电抗电压的仿真值和计算值非常接近,证明了前文理论分析的正确性。另外,在故障初始时刻 0.6 s,  $u_{L_{1,p}}=u_{L_{1,n}}$ ,且大于保护启动定值,保护启动。由图 7(b)可知,正、负极的电抗电压积分值相等,且满足连续 3 个采样点均大于故障识别定值,因此保护经 0.9 ms 判定为区内双极短路故障,保护正确动作。

#### (2) 单极接地故障。

假设在线路 1 中点发生正极接地故障,其他仿真设置同双极短路故障仿真,仿真结果如图 8 所示。

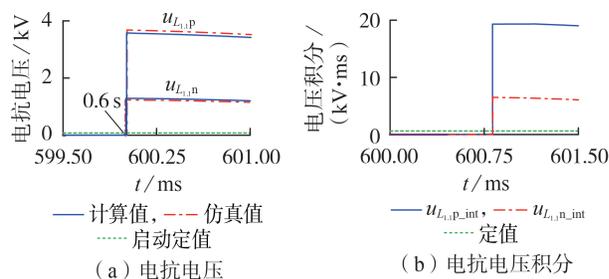


图 8 区内正极接地故障的仿真结果

Fig.8 Simulative results of internal positive-pole-to-ground fault

在图 8(a)中,故障初始时刻为 0.6 s,  $u_{L_{1,p}}$ 、 $u_{L_{1,n}}$  均大于保护启动定值,保护经 0.3 ms 启动。由图 8(b)可知,  $u_{L_{1,p,int}}$ 、 $u_{L_{1,n,int}}$  均满足连续 3 个采样点大于故障识别定值,且  $|u_{L_{1,p,int}}|/|u_{L_{1,n,int}}|=3.86>1.2$ ,因此保护经过 0.9 ms 判定发生区内正极接地故障,保护能正确动作。

#### 4.2 区外故障

假设  $f_2$ 、 $f_6$  分别为线路 2 和线路 6 的中点,在  $f_2$ 、 $f_6$  处发生区外正极接地故障,其他设置同双极短路故障仿真,仿真结果如图 9 所示。

由图 9(a)可知,当  $f_2$  处发生反向区外故障时,  $u_{L_{1,1}}$  小于启动定值,保护不启动;当  $f_6$  处发生正向区外故障时,  $u_{L_{1,1}}$  在第 4 个采样点大于启动定值,保护

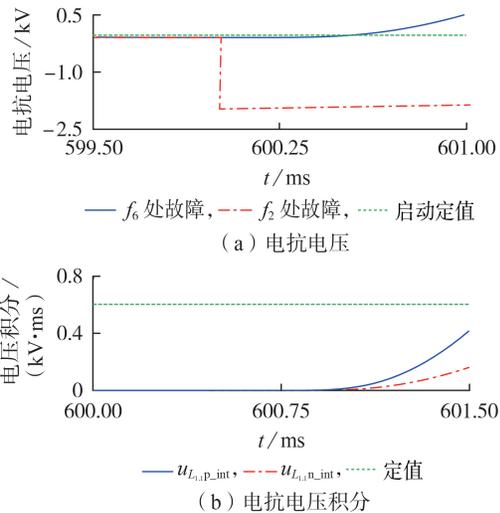


图 9 区外故障的仿真结果

Fig.9 Simulative results of external fault

启动,启动时间为 0.5 ms。由图 9(b)可知,在保护启动后的 1 ms 内,  $u_{L_{1,1}}$  的积分值恒小于故障识别定值,因此保护闭锁,不会误动。

#### 4.3 过渡电阻的影响

以上分析未考虑过渡电阻,因此本节研究过渡电阻的影响。假设在线路 1 中点分别发生经  $5\Omega$ 、 $10\Omega$  过渡电阻的正极接地故障,根据式(2)~(11),得故障后 2 ms 内限流电抗电压波形如图 10 所示。

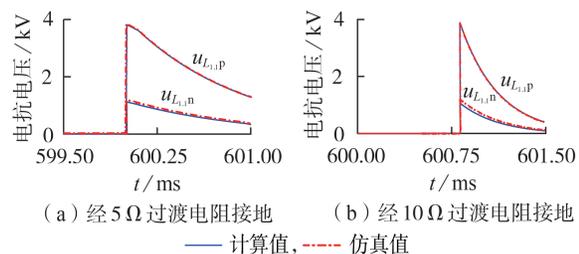


图 10 经过渡电阻接地故障的仿真结果

Fig.10 Simulative results of pole-to-ground fault with fault resistance

由图 10 可见:加入过渡电阻后,限流电抗电压的理论值和积分值仍高度接近,因此上述等效和计算方法不受过渡电阻的影响;过渡电阻不会改变限流电抗电压的初始值,但会加速限流电抗电压的下降速度,且随着过渡电阻越大,电压下降得越快。

附录 C 中的表 C1 列出了在不同的过渡电阻、不同故障类型下本文所提保护的启动情况;附录 C 中的表 C2 为正极经  $50\Omega$  过渡电阻接地故障下,其他文献基于限流电抗电压和电压变化率的保护启动情况。可以看出,本文所提保护方法具有较强的抗过渡电阻能力。

#### 4.4 雷击干扰的影响

当直流线路遭受雷击干扰时,直流电流会突增,

引起限流电抗电压激增,可能导致保护误动。为了验证所提保护方法的抗雷击干扰能力,参考文献[18]中的雷电流模型,设0.6 s时在线路1中点发生雷电干扰,其仿真结果如图11所示。

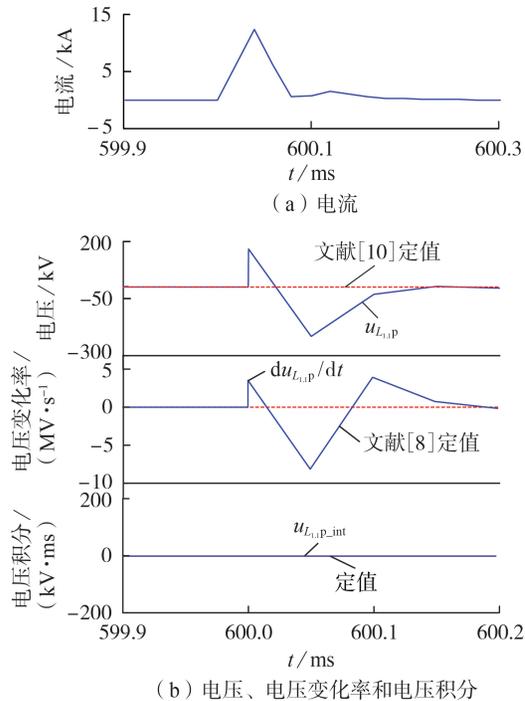


图11 雷击干扰的仿真结果

Fig.11 Simulative results of lightning interference

由图11(a)可以看出,雷电流持续时间大约为 $200\ \mu\text{s}$ ,由于启动判据数据窗为 $0.3\ \text{ms}$ ,因此在雷击干扰下保护不启动,不会发生误动。由图11(b)可以看出,雷击干扰使得限流电抗电压发生了突变,文献[10]中所提的基于限流电抗电压的直流保护会发生误动;雷击干扰也使得限流电抗电压变化率发生了突变,因此文献[8]中所提的基于限流电抗电压变化率的保护会误动。因此,对比上述2种方法,本文所提保护方法具有较强的抗雷击干扰能力。

#### 4.5 噪声的影响

若采样信号受到噪声干扰,保护可能会误动。考虑最严重的情况,即在线路6首端发生双极短路故障时,向限流电抗电压信号中添加信噪比为 $10\ \text{dB}$ 的噪声分量,所测得电感电压及其积分值如图12所示。由图12(a)可以看出,相比于无噪声的情况,加入噪声会直接影响限流电抗电压波形,使其幅值和极性都发生波动。但由图12(b)可知,即使存在信噪比为 $10\ \text{dB}$ 的白噪声,在保护启动后的 $1\ \text{ms}$ 内,电压积分值始终小于保护定值,因此保护不会误动。

在采用文献[8]所提方法的情况下,向限流电抗电压信号中添加信噪比为 $30\ \text{dB}$ 的噪声分量,保护的動作情况如图13所示。可以看出,在故障后第2个采样点附加电抗电压变化率大于保护阈值,文献

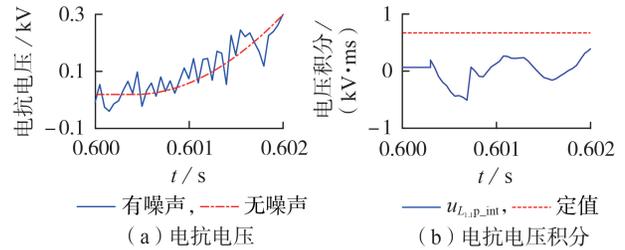


图12 噪声对本文方法的影响

Fig.12 Influence of noise on proposed method

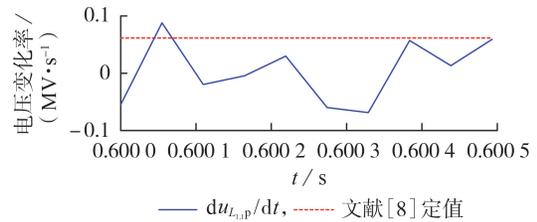


图13 噪声对文献[8]方法的影响

Fig.13 Influence of noise on method in Reference[8]

[8]所提保护方法可能误动。相比之下,本文所提保护方法有较强的抗噪声能力。

#### 4.6 限流电抗大小的影响

由于本文利用限流电抗电压积分值构成保护判据,因此限流电抗 $L_{x,y}$ 的大小是影响保护选择性和速动性的一大因素。一方面,限流电抗电压与 $L_{x,y}$ 的大小成正比,当 $L_{x,y}$ 减小时,限流电抗电压也减小,导致保护定值整定困难;另一方面, $L_{x,y}$ 越小,其作为边界的阻滞效果就越小,区内、区外故障特性的差异就越小,保护的灵敏度就越低。但是, $L_{x,y}$ 不能过大,因为 $L_{x,y}$ 越大,意味着故障暂态过程中存储的能量越大,其能量释放越慢,增加了故障切除的时间;此外,较大的 $L_{x,y}$ 也增加了正常运行时的电阻损耗,不利于系统的稳定性<sup>[19]</sup>。以保护 $P_{1,1}$ 为例,分别设置不同的 $L_{x,y}$ 来探究保护的動作情况,仿真结果如图14所示。

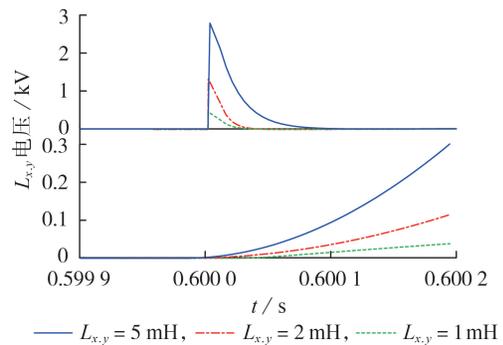


图14 不同 $L_{x,y}$ 下的仿真结果

Fig.14 Simulative results under different values of  $L_{x,y}$

图14的上图为线路1末端发生正极经 $20\ \Omega$ 过渡电阻接地故障时的电抗电压,图14的下图为区外线路6首端发生双极故障时的电抗电压。由图14可

以看出,随着 $L_{x,y}$ 的减小,限流电抗电压逐渐减小,且区内外故障的限流电抗电压差异性也越小,与理论分析一致;且随着 $L_{x,y}$ 进一步减小到2 mH,发生区内故障时的积分值将小于发生正向区外故障时的积分值,保护误动。本文综合考虑限流、保护的选择性和裕度,并结合已有文献中对 $L_{x,y}$ 的选取,取 $L_{x,y}=5$  mH。实际应用中, $L_{x,y}$ 的大小应综合考虑与直流断路器、换流器、保护等的配合<sup>[20]</sup>。

## 5 结论

本文针对 MMC 和 VSC 共存的柔性中压直流配电网的直流线路保护,首先详细分析了环状柔性直流配电网中各元件的时域和复频域等效模型。在此基础上,提出了系统的复频域等效模型方法,并给出限流电抗电压波形的计算方法。该方法仅利用了故障后 2 ms 内的电气量,并利用拉普拉斯和反拉普拉斯变换相结合对该时段内限流电抗电压的求取提供了详细的计算方法,为保护原理和定值整定提供了理论依据。本文主要结论如下:

(1) 本文建立了对任意系统均适用的复频域等效模型建立方法,降低了建模难度,并提出一种复频域故障分析方法,简化了计算过程;

(2) 本文所提保护方案仅利用了线路单端电气量,对于区内故障,可在 1 ms 内同时判别故障区段和故障类型,满足柔性直流中压配电网对保护速动性的要求;

(3) 本文所提保护方案利用积分构成判据,具有较强的抗噪声、抗过渡电阻和抗雷击干扰的能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.  
YAO Liangzhong,WU Jing,WANG Zhibing,et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6007-6020.
- [3] 孙栩,王华伟,雷霄,等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):219-223.  
SUN Xu,WANG Huawei,LEI Xiao,et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):219-223.
- [4] 林湘宁,刘琦,范理想,等. 基于突变能量比值的多端柔性直流配电网闭锁式纵联保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):2-8,16.  
LIN Xiangning,LIU Qi,FAN Lixiang,et al. Blocking pilot protection based on ratio of superimposed energy for VSC-MTDC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):2-8,16.
- [5] 张明,和敬涵,罗国敏,等. 基于本地信息的多端柔性直流电网故障定位方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):155-161.  
ZHANG Ming,HE Jinghan,LUO Guomin,et al. Local information-based fault location method for multi-terminal flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):155-161.
- [6] 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):6825-6836,7117.  
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):6825-6836,7117.
- [7] 李斌,何佳伟,李晔,等. 基于边界特性的多端柔性直流配电网单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749.  
LI Bin,HE Jiawei,LI Ye,et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):5741-5749.
- [8] 祁晓敏,裴玮,李鲁阳,等. 基于限流电感电压的多端交流混合配电网直流故障检测方案[J]. 电网技术,2019,43(2):537-545.  
QI Xiaomin,PEI Wei,LI Luyang,et al. DC fault detection scheme for multi-terminal hybrid AC/DC distribution network based on current-limiting inductor voltage[J]. Power System Technology,2019,43(2):537-545.
- [9] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 柔性高压直流环网直流侧故障保护策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(增刊):1-11.  
YAO Liangzhong,WU Jing,WANG Zhibing,et al. Studies on DC fault protection strategies for MMC based HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(Supplement):1-11.
- [10] 周家培,赵成勇,李承昱,等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流配电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):89-94,146.  
ZHOU Jiawei,ZHAO Chengyong,LI Chengyu,et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(19):89-94,146.
- [11] 杨赛昭,向往,文劲宇. 基于限流电抗器电压差异性的架空柔直配电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):1196-1211.  
YANG Saizhao,XIANG Wang,WEN Jingyu. A fault protection scheme based on the difference of current-limiting reactor voltage for overhead MMC based DC grids[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(22):1196-1211.
- [12] 江缉光,刘秀成. 电路原理[M]. 北京:清华大学出版社,2007:355-358.
- [13] 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.  
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.
- [14] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电网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.
- [15] SALEH K A,HOOSHYAR A,EL-SAADANY E F. Hybrid passive-overcurrent relay for detection of faults in low-voltage DC grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(3):1129-1138.
- [16] XIANG Wang,YANG Saizhao,XU Lie,et al. A transient

- voltage-based DC fault line protection scheme for MMC-based DC grid embedding DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):334-345.
- [17] 王艳婷, 范新凯, 张保会. 柔性直流电网行波保护解析分析与整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3201-3211.  
WANG Yanting, FAN Xinkai, ZHANG Baohui. The analytical analysis and protection setting of traveling wave protection in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3201-3211.
- [18] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39.  
XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22):32-39.
- [19] 刘剑, 郇能灵, 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, 5393.
- 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, 5393.
- [20] DAMAKI A A, HAJHOSEINI ZARCHI S H. Optimal design and analysis of a variable reactor fault current limiter[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(9):1619-1626.

#### 作者简介:



戴志辉

戴志辉(1980—),男,宁夏固原人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:daihuadian@163.com);

刘雪燕(1997—),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 任思思)

### Protection scheme for ring flexible DC distribution grids based on integration of current-limiting reactance voltage

DAI Zhihui<sup>1</sup>, LIU Xueyan<sup>1</sup>, LIU Ziqiang<sup>1</sup>, CHEN Siqu<sup>1</sup>, LI Yiran<sup>1</sup>, QIN Liangdong<sup>2</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** The traditional AC fault detection methods are not applicable for DC fault identification considering the fact that DC fault current rises rapidly and has a wide influencing range. Therefore, a fast fault detection approach based on the integration of current-limiting reactance voltage for the multi-terminal DC ring network is proposed based on the complex frequency domain model of the system. Firstly, the equivalent models of each component of multi-terminal DC ring network in both time domain and complex frequency domain are analyzed in detail. Based on this, the calculation method of current-limiting reactance voltage is elaborated, by which the transformation of the system model between time domain and complex frequency domain is realized. The calculation method has the advantages of simple solution, low modeling difficulty and universality for modeling of different systems. Subsequently, a fault detection method based on the integration of current-limiting reactance voltage is proposed, which has strong anti-noise ability and a certain ability against transition resistance. Finally, the validity of the proposed calculation method and the feasibility of the protection scheme are verified via PSCAD / EMTDC based simulations.

**Key words:** DC distribution grid; Laplace transform; complex frequency domain equivalence; current-limiting reactance voltage; single-ended protection

# 附录 A

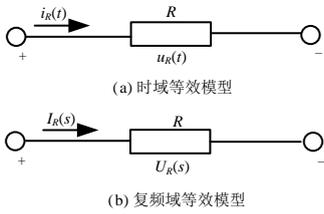


图 A1 电阻元件等效模型  
Fig.A1 Equivalent model of resistance

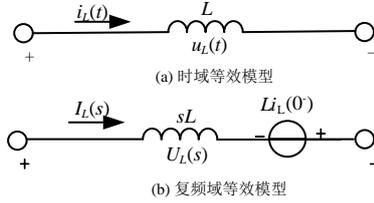


图 A2 电感元件等效模型  
Fig.A2 Equivalent model of inductor

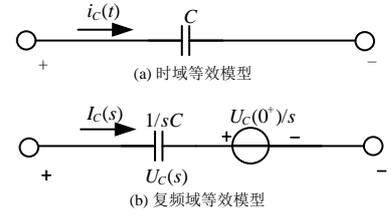


图 A3 电容元件等效模型  
Fig.A3 Equivalent model of capacitor

本文研究的六端环网柔性直流配电网的拓扑结构如图 A4 所示，其包括交流系统、2 个 MMC (MMC<sub>1</sub> 和 MMC<sub>2</sub>)、2 个 VSC (VSC<sub>1</sub> 和 VSC<sub>2</sub>)、单向直流变压器 (UDCT) 和双向直流变压器 BDCT、1 个光伏电源、1 台风机、交直流负荷和交直流线路。图中，T<sub>1</sub>—T<sub>6</sub> 为端口编号；UDCT 和 BDCT 的拓扑结构均如图 A5 所示，图中 2 个高频 H 桥经高频变压器相连接，高频变压器的电压比为  $n: 1$ ，C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 分别为输入、输出端并联电容。为抑制单极接地故障后桥臂子模块的放电，MMC 交流侧采用不接地方式；为保证正常运行时正负极电压平衡以及单极接地故障线路切除后正负极电压的恢复，MMC 直流侧采用经大电阻接地的方式；对于为维持直流侧正负极对称运行，保证保护能快速识别故障，VSC 和直流变压器 (DCT) 采用分裂电容中点接地。系统的控制策略、保护配置与文献[8]中的相同。限流电抗电压测量方法为：互感器分别测量限流电抗两端的电压，并规定正极线路限流电抗上的电压为母线端电压减线路端电压，负极线路上的限流电抗电压则为线路端电压减母线端电压。

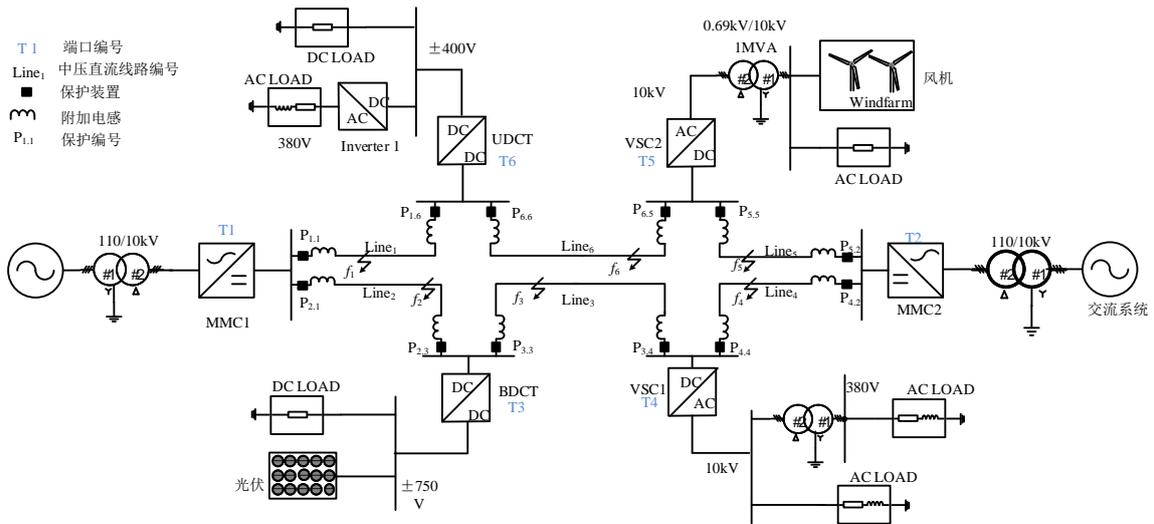


图 A4 环状多端柔性直流配电网

Fig.A4 Ring multi-terminal flexible DC distribution network

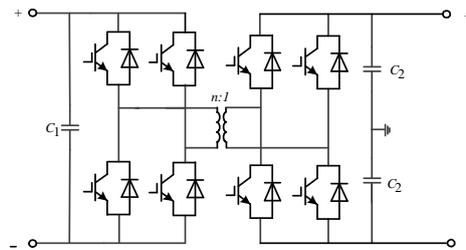


图 A5 DCT 拓扑图

Fig.A5 Topology of DCT

表 A1 系统参数

Table A1 System parameters

| 系统参数             | 数值   |
|------------------|------|
| 额定直流电压/kV        | 10   |
| 桥臂电感/H           | 0.01 |
| 子模块数             | 24   |
| 交流电抗器/mH         | 5    |
| 直流限流电抗/mH        | 5    |
| 直流电容/ $\mu$ F    | 4500 |
| 线路 1、2、4、5 长度/km | 5    |
| 线路 3、6 长度/km     | 15   |

## 附录 B

发生区内故障时有：

$$u_{L_{1,1}P-sj}(s) - u_{L_{1,1}P-p}(s) = \frac{U_C(0^-)L_{1,1}Z_0(s)(Z_{3f_0}(s) - Z_{3f_1}(s))}{(Z_1(s) + Z_0(s))Z_{3f_1}(s)Z_{3f_0}(s)} \quad (B1)$$

$$u_{L_{1,1}P}(s) - u_{L_{1,1}M}(s) = u_{L_{1,1-1}}(s) + u_{L_{1,1-0}}(s) - (u_{L_{1,1-1}}(s) - u_{L_{1,1-0}}(s)) = 2u_{L_{1,1-0}}(s) \quad (B2)$$

$$u_{L_{1,1}P-min} = \frac{U_C(0^-)L_{1,1} \left\{ Z_{f-1}(s) \left[ \frac{1}{sC_s} + sL_{1,1} + Z_{f-1}(s) \right] + Z_{f-0}(s)(Z_{3f_1}(s) + sL_{1,1}) \right\}}{(Z_{f-1}(s) + Z_{f-0}(s)) \left[ \frac{1}{sC_s} + sL_{1,1} + Z_{f-1}(s) \right] (Z_{3f_1}(s) + sL_{1,1})} \quad (B3)$$

$$\begin{cases} u_{L_{1,1}P}(s) = u_{L_{1,1-1}}(s) + u_{L_{1,1-0}}(s) = \\ \frac{U_C(0^-)L_{1,1} (Z_{f-1}(s)Z_{3f_0}(s) + Z_{f-0}(s)Z_{3f_1}(s))}{(Z_{f-1}(s) + Z_{f-0}(s))Z_{3f_1}(s)Z_{3f_0}(s)} \\ u_{L_{1,1}M}(s) = u_{L_{1,1-1}}(s) - u_{L_{1,1-0}}(s) = \\ \frac{U_C(0^-)L_{1,1} (Z_1(s)Z_{3f_0}(s) - Z_0(s)Z_{3f_1}(s))}{(Z_1(s) + Z_0(s))Z_{3f_1}(s)Z_{3f_0}(s)} \end{cases} \quad (B4)$$

将式 (B3) 从复频域转换到时域上再与 0 比较大小。令  $f(t)$  为式 (B3) 的时域表达式，如图 B1 所示。图 B1 (a) 为不同限流电抗  $L$  下  $f(t)$  的变化曲线，可以看出，在故障时刻  $f(t)$  最小且满足  $f(t) > 0$ ，随着时间增大  $f(t)$  逐渐增大；随着限流电抗的增大， $f(t)$  也增大且不改变上述  $f(t)$  的变化趋势，因此  $f(t) > 0$  成立。图 B1 (b) 为  $L=5\text{mH}$  时不同子模块数  $N$  下  $f(t)$  的变化曲线，可以看出在故障时刻  $f(t)$  最小，之后逐渐增大；随着子模块数（即换流器参数）的增大， $f(t)$  减小。当子模块数目达到 250 时， $f(t)$  的最小值接近 0。鉴于目前  $\pm 500\text{kV}$  直流电网中 MMC 子模块数一般为 200 左右<sup>[13]</sup>、配电网中子模块数远小于该值，故  $f(t)$  仍大于 0。综上所述， $f(t) > 0$  成立。

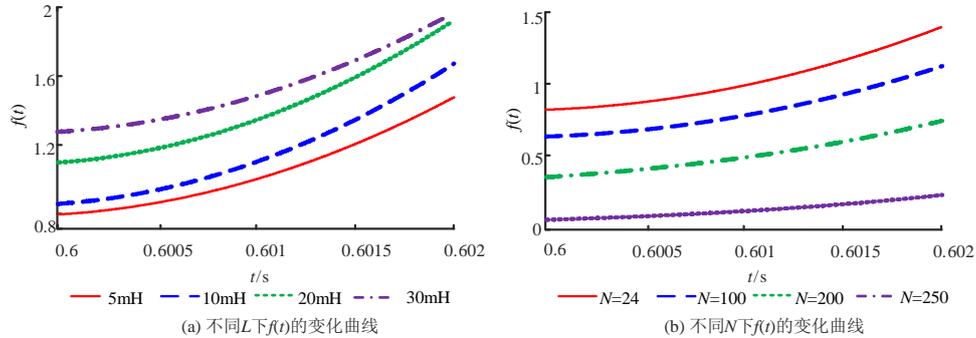


图 B1  $f(t)$  的变化趋势

Fig.B1 Change trend of  $f(t)$

发生区外故障时有：

$$u_{L_{1,1}P-sj}(s) - u_{L_{1,1}P-p}(s) = \frac{U_C(0^-)L_{1,1} \left\{ Z_{f-0}(s)Z_{1f_0}(s) \left[ sL_{eq} + 1/(sC_{eq}) + Z_{c1}(s) \right] \right\} - Z_1(s)Z_{1f_1}(s)Z_{1f_0}(s)}{Z_{1f_1}(s) \left[ sL_{eq} + 1/(sC_{eq}) + Z_{c1}(s) \right] (Z_{f-1}(s) + Z_{f-0}(s))Z_{1f_0}(s)} \quad (B5)$$

同理可证式 (B5) 的时域计算结果大于 0 恒成立。

$$u_{L_{1,1}P-omax} = \frac{U_C(0^-)L_{1,1} \left[ sL_{eq} + 1/(sC_{eq}) + Z_{c1}(s) \right] // \left[ 1/(sC_s) \right]}{Z_{1f_1}(s) \left[ sL_{eq} + 1/(sC_{eq}) + Z_{c1}(s) \right]} \quad (B6)$$

## 附录 C

表 C1 不同过渡电阻下保护动作情况

Table C1 Protection actions under different transition resistances

| 故障类型 | 过渡电阻/ $\Omega$ | $u_{L_{1,p\_int}} / (\text{kV}\cdot\text{ms})$ | $u_{L_{1,n\_int}} / (\text{kV}\cdot\text{ms})$ | $\left  \frac{u_{L_{x,p\_int}}}{u_{L_{x,n\_int}}} \right $ | 判断结果 |
|------|----------------|--|--|--|------|
| 正极故障 | 5              | 13.11/12.45/11.81                              | 4.16/3.99/3.73                                 | 3.16/3.13/3.17   | 区内正极 |
|      | 10             | 10.28/9.31/8.45                                | 3.43/3.21/2.98                                 | 3.00/2.91/2.84   | 区内正极 |
|      | 20             | 6.76/5.63/4.73                                 | 2.56/2.27/2.04                                 | 2.65/2.49/2.32   | 区内正极 |
|      | 50             | 2.98/2.45/1.89                                 | 1.58/1.39/1.18                                 | 1.89/1.77/1.61   | 区内正极 |
| 双极故障 | 5              | 30.6/28.76/27.1                                | 30.6/28.76/27.1                                | 1  | 区内双极 |
|      | 10             | 26.86/25.12/23.85                              | 26.86/25.12/23.85                              | 1  | 区内双极 |
|      | 20             | 10.02/9.68/8.34                                | 10.02/9.68/8.34                                | 1  | 区内双极 |
|      | 50             | 8.36/7.15/5.98                                 | 8.36/7.15/5.98                                 | 1  | 区内双极 |

表 C2 方法比较

Table C2 Comparison of different methods

| 文献   | $u_{L_{1,p\_int}} / \text{kV}$ | $du_{L_{1,p}} / dt / (\text{kV}\cdot\text{s}^{-1})$      | 定值                             | 动作情况 |
|------|--------------------------------|--|--------------------------------|------|
| [10] | 2.153/1.353/0.82               | —  | 2.02kV                         | 可能拒动 |
| [8]  | —                              | $4.33 \times 10^4 / 1.59 \times 10^4 / 1.07 \times 10^4$ | $7.51 \times 10^4 \text{kV/s}$ | 正确动作 |