

# 远海风能集中接入的多端直流系统直流故障分析与故障检测方法

李佳朋<sup>1</sup>,李宇骏<sup>1</sup>,袁泉添<sup>1</sup>,贾科<sup>2</sup>,宋国兵<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安 710049;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

**摘要:**二电平电压源换流器(VSC)和半桥模块化多电平换流器(MMC)在直流故障期间缺乏对直流短路电流的调控能力。在多端直流系统中,为了避免整个系统因换流阀的闭锁而停运,有必要在直流故障后的第一阶段(即电容放电阶段)快速识别并隔离故障。因此,对多端直流系统故障检测而言,直流故障电容放电阶段的短路电流计算至关重要。提出了适用于多端直流系统故障分析的暂态等效模型,该模型仅保留原故障网络中的高频成分,使故障初期的电路分析大为简化。基于此模型,可以得到故障线路和健全线路的故障电流解析表达式。根据故障线路和健全线路电流的差异,提出了基于暂态电流均值的故障检测方法,该方法具有计算复杂度小、耐过渡电阻能力强、采样率低等优点。通过EMTP仿真验证了暂态等效模型的准确性和故障检测方法的有效性。

**关键词:**多端直流系统;直流故障分析;暂态等效模型;暂态电流均值;直流故障检测

**中图分类号:**TM 77

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202008023

## 0 引言

交流输电受电缆容性充电电流约束,输送能力有限。而电网换相换流器LCC(Line Commutated Converter)型的传统直流输电无法给交流风电场提供电压支撑<sup>[1]</sup>。对于超过80 km的远海风能接入,采用电压源换流器VSC(Voltage Source Converter)型的柔性直流输电是较佳方案<sup>[2]</sup>。近年来,辐射状柔性直流电网以其在潮流控制和工程造价上的优势成为实现远海风能接入的发展趋势<sup>[3]</sup>。然而,二电平VSC和半桥型模块化多电平换流器MMC(Modular Multilevel Converter)缺乏对直流故障电流的调控能力,直流故障发生后,流过换流阀的电流迅速增大,绝缘栅双极型晶体管IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)为了避免烧坏而快速闭锁,整个直流电网的电力传输将被迫中断。随着电力电子直流断路器的发展,可以在直流故障后的数毫秒内切除故障线路,避免换流阀闭锁和系统停运。为了将电力电子直流断路器应用于多端直流MTDC(Multi-Terminal Direct Current)系统,有2个基本的问题需要解决:

收稿日期:2020-06-22;修回日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807150,51707091,U1766209);中国博士后基金资助项目(2019T120908);新能源电力系统国家重点实验室开放课题资助项目(LAPS19002) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807150, 51707091, U1766209), the China Postdoctoral Science Foundation(2019T120908) and the State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(LAPS19002)

第一,直流故障初期,短路电流有什么特征? 第二,采用哪种故障检测方法可以快速识别故障?

故障分析对于直流断路器的选型和保护方案的设计至关重要。电磁暂态仿真软件EMTP通过微分代数方程描述二电平VSC和MMC的详细开关模型,可以获得短路电流的数值解<sup>[4-5]</sup>。然而,数值仿真仅提供系统在有限场景下的部分信息,并且随着多端网络规模的扩大,仿真时间将呈指数级增长。文献[6]将二电平VSC等效为对地并联电容以计算直流故障初期的短路电流。文献[7]验证了在直流故障初期,MMC可以等效为串联的RLC电路。相应地,整个直流系统可被化简为仅包含电阻、电感和电容的线性网络,能够采用拉氏变换法或状态空间法求解故障电流<sup>[8-9]</sup>。基于拉氏变换的方法可以相对直接地计算故障线路的短路电流,但对于健全线路故障电流的求解则较为困难,特别是在连接形式复杂的直流电网中,故障电流的频域表达式极其复杂,难以计算其反拉氏变换。基于状态空间的方法可以方便地应用于多端场景,但是当直流端口较多时,状态空间方程的阶数很高,得到故障电流表达式需要计算高阶矩阵的高次幂,计算量极大且无法得到解析解。因此,仍需探索适用于一般直流电网的短路电流解析计算方法。

快速准确地检测和隔离故障对电力系统的安全与稳定运行有重要的意义。总体而言,现有的直流故障检测方法可以分为基于电源特性的方法和不依赖于电源特性的方法2类。基于基尔霍夫电流定律的纵联保护从原理上具有绝对的选择性<sup>[10-11]</sup>。然

而,该方法依赖于双端通信,较长的通信延时使其不适合作为柔性直流输电线路的主保护。行波保护利用故障暂态线路储能的泄放,通过检测电压或电流的变化率实现故障的快速识别,在工程中得到了广泛应用<sup>[12-14]</sup>。但为了抓取故障行波的波头,该方法需要较高的采样率(通常为几百 kHz 至 1 MHz)。此外,由于行波传播时折反射过程较为复杂,难以获取含多个波头的电流或电压解析表达式,使得行波保护的阈值整定往往依赖于仿真。而基于电源特性的保护方法(如三段式电流保护、三段式距离保护<sup>[15]</sup>等)能够根据稳定的故障特征理论计算出保护阈值,并系统地评估保护方案的性能。文献[16]通过直流电抗器两端的电压反映故障时 MMC-HVDC 的电源特性,实现了直流故障的单端快速检测。文献[17]考察了二电平 VSC-HVDC 直流故障时的电源特性,提出了基于短时傅里叶变换的故障检测方法。但该方法仅适用于点对点型直流输电系统。此外,小波分析、数学形态学等数字信号处理方法也广泛应用于直流故障检测<sup>[18-19]</sup>。但该类方法计算复杂度较高,且保护性能易受过渡电阻影响。

针对上述问题,本文首先提出了适用于辐射状多端直流系统故障分析的暂态等效模型。考虑到本文主要关注直流电网故障初期的短路电流计算,所提模型仅保留原故障网络中的高频成分,极大地简化了故障分析电路,很容易得到故障线路和健全线路的短路电流解析表达式。该方法可以推广到具有一般性的辐射状直流电网,能快速直接地求解出网络中任意线路的故障电流。然后,本文进一步提出了适用于远海风能集中接入的多端直流系统故障检测方法,该方法利用故障电流的暂态均值实现单端速动,具有采样率要求低、计算量小、抗噪能力和耐过渡电阻能力强等优点。此外,本文基于暂态等效模型对所提故障检测方法的阈值和灵敏度进行了理论计算与分析。

## 1 辐射状多端直流系统故障分析

### 1.1 系统拓扑描述

图1为一个典型的辐射状四端直流系统拓扑图,该系统通过海底电缆将3个远海风电场与岸上交流系统连接起来。图中, VSC<sub>1</sub>—VSC<sub>3</sub>和 VSC<sub>4</sub>分别为远海风电场换流器和岸上交流系统换流器; T<sub>1</sub>—T<sub>4</sub>为直流电网的端口,端口 T<sub>m</sub>和 T<sub>n</sub>间的电缆用 Cable *mn*表示,为了简化分析,电缆线路采用集总参数模型描述, Cable *mn*的电阻与电感分别记为 R<sub>*mn*</sub>和 L<sub>*mn*</sub>;电缆的分布电容折算到线路两端,故接地电容 C<sub>*k*</sub>为 *k*端 VSC 换流器直流侧电容与电缆等效电容之和;近年来,为了限制直流故障电流的上升速率并抑制正常运行时直流电流的纹波,常在输电电缆两

端加装补偿电抗器,图中 L<sub>T<sub>*mn*</sub></sub>为加装在 Cable *mn*两端靠近 T<sub>*m*</sub>侧的补偿电抗器的电感。

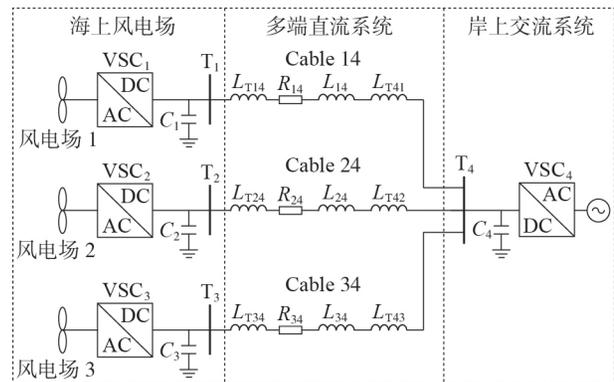


图1 远海风能集中接入的四端直流系统典型拓扑图

Fig.1 Typical topology of four-terminal DC system for offshore wind farms integration

### 1.2 基于拉氏变换的故障电路分析

本文以 Cable 14 上发生单极接地故障为例进行多端直流系统的故障分析。直流故障发生后,故障线路两侧的接地电容通过电缆线路对故障点放电,这一阶段也被称为电容放电阶段。在直流故障初期(直流故障后数毫秒),直流侧电压跌落较小,交流系统馈入直流系统的电流变化很小。因此,当计算直流故障初期的短路电流时,二电平 VSC 可以用恒流源和与之并联的接地电容进行建模。由于故障初期直流电网为线性网络,可以采用叠加原理对故障网络进行分析。图1中四端直流系统的故障分析电路见附录中的图 A1。图中, R<sub>0</sub>和 L<sub>0</sub>分别为故障点到 *k*端的电缆线路的电阻和电感; U<sub>0</sub>为正常运行时故障点处的电压; I<sub>dc<sub>refk</sub></sub>为正常运行时 *k*端换流器交流侧馈入直流侧的电流。电路中原故障电流(全量电流)、正常运行电流和故障分量电流分别用 I<sub>*t*</sub>、I<sub>*n*</sub>和 I<sub>*f*</sub>表示,并满足如下关系:

$$I_t = I_n + I_f \quad (1)$$

由于故障分量网络中仅含 1 个故障电压源,其电路分析较原网络简单。本文采用拉氏电路模型将求解原始电路所需的微分方程转化代数方程。为统一起见,电流的正方向定义为从健全线路指向故障点。

在图 A1 的故障分量拉氏电路中,对故障点左侧回路列写电压电流关系可以直接得到左侧故障支路 Cable 10 的故障分量短路电流 I<sub>*n0*</sub>为:

$$I_{n0}(s) = \frac{U_0/s}{R_{10} + s(L_{10} + L_{T14}) + 1/(sC_1)} \quad (2)$$

然而,由于故障点右侧支路 Cable 40 连接的接地支路较多,其短路电流的计算较左侧复杂。为了分析方便,首先定义相关的线路阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{24}(s) = R_{24} + s(L_{24} + L_{T24} + L_{T42}) + 1/(sC_2) \\ Z_{34}(s) = R_{34} + s(L_{34} + L_{T34} + L_{T43}) + 1/(sC_3) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $Z_{24}$  和  $Z_{34}$  分别为 Cable 24 和 Cable 34 的线路阻抗。

根据基尔霍夫电压定律(KVL),故障点右侧回路有:

$$U_0/s - I_{f40}(s) [R_{40} + s(L_{40} + L_{T41})] - U_{f4}(s) = 0 \quad (4)$$

其中,  $I_{f40}$  为故障支路 Cable 40 故障分量短路电流;  $U_{f4}$  为  $T_4$  处故障分量电压。根据基尔霍夫电流定律(KCL),有:

$$I_{f40}(s) - U_{f4}(s) (1/Z_{24}(s) + 1/Z_{34}(s) + sC_4) = 0 \quad (5)$$

联立式(4)和式(5),可得:

$$\begin{cases} I_{f40}(s) = U_0/s \left\{ s \left[ R_{40} + s(L_{40} + L_{T41}) + \frac{1}{1/Z_{24}(s) + 1/Z_{34}(s) + sC_4} \right] \right\} \\ U_{f4}(s) = U_0/s \left\{ s \left[ R_{40} + s(L_{40} + L_{T41}) \right] \times \left( 1/Z_{24}(s) + 1/Z_{34}(s) + sC_4 + 1 \right) \right\} \end{cases} \quad (6)$$

### 1.3 基于暂态等效模型的短路电流计算

一般而言,通过对变量的频域表达式进行拉氏反变换可以得到该变量的时域解。然而,式(6)的数学形式复杂,直接进行拉氏反变换较为困难。此外,用于故障分析的换流器模型仅在故障初期成立,通过拉氏反变换求解故障电流的全时域表达式是不准确且不必要的。考虑到在直流故障初期,故障分量拉氏电路中仅含有电气量的高频成分,在计算故障初期短路电流时可以仅保留原拉氏电路中的高频成分,该简化模型即暂态等效模型。

直流电缆线路等效电感与接地电容阻抗的幅频特性见附录中的图 A2,其中线路等效电感  $L_b$  等于电缆电感和补偿电抗器电感之和。在高频域内(大于 100 Hz),典型多端高压直流系统参数下的线路等效电感的阻抗幅值远大于接地电容的阻抗幅值,即:

$$|sL_{bl4}| = |s(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})| \gg |1/(sC_k)| \quad (7)$$

其中,  $l=2,3$ ;  $k=1,2,3,4$ 。

在高频域内,考虑到线路阻抗的阻性分量远小于其感性分量,线路阻抗近似于线路等效电感的阻抗:

$$\left| \frac{1}{Z_{l4}(s)} \right| = \left| \frac{1}{s(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l}) + sR_{l4} + 1/(sC_4)} \right| \approx \left| \frac{1}{sL_{bl4}} \right| \quad (8)$$

联立式(7)和式(8),可得:

$$\left| 1/Z_{l4}(s) \right| \approx \left| 1/(sL_{bl4}) \right| \ll |sC_k| \quad (9)$$

式(9)说明线路 Cable 24 和 Cable 34 的导纳远小于接地电容  $C_4$  的导纳。结合式(6)和式(9),在高频

域内可忽略与  $C_4$  并联的 Cable 24 和 Cable 34 支路,得到故障分量电流  $I_{f40}$  的高频分量  $I_{f40}^H$  为:

$$I_{f40}^H(s) = \frac{U_0/s}{R_{40} + s(L_{40} + L_{T41}) + 1/(sC_4)} \quad (10)$$

可以看出,式(10)和式(2)具有相同的形式,这也很好地验证了在计算故障初期故障线路的短路电流时,与接地电容并联的健全线路可以忽略。

对于健全线路,其故障分量电流满足:

$$I_{fl4}(s) = \frac{U_{fl4}(s)}{Z_{fl4}(s)} = I_{f40}(s) \frac{1/Z_{l4}(s)}{1/Z_{24}(s) + 1/Z_{34}(s) + sC_4} \quad (11)$$

其中,  $l=2,3$ 。类似地,结合式(9)和式(11)可以得到健全线路故障分量电流的高频分量  $I_{fl4}^H$  为:

$$I_{fl4}^H(s) = I_{f40}^H(s) \frac{1/Z_{l4}(s)}{sC_4} = I_{f40}^H(s) h_{l4}(s) \quad (12)$$

$$h_{l4}(s) = \frac{1}{s^2(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4 + sR_{l4}C_4 + C_4/C_l}$$

式(10)和式(12)分别为故障线路和健全线路故障分量电流的暂态等效模型。可以看出健全线路故障分量电流等于故障线路故障分量电流乘以一个转移函数  $h(s)$ 。根据式(12),  $h(s)$  具有二阶低通滤波器的特性。因此,健全线路故障分量电流较故障线路大幅衰减。

### 1.4 一般辐射状多端直流系统的暂态等效模型

上述的故障分析是针对四端直流电网的,为了将暂态等效模型应用于一般的辐射状多端直流网络,首先引入线路等级的概念。定义故障线路的线路等级为 0,直接与故障线路相连的线路等级为 1,与 1 级线路直接相连的健全线路的线路等级为 2,依此类推。对于附录中图 A3 所示的具有一般性的辐射状多端直流系统,其暂态等效模型可以表示为:

$$\begin{cases} I_{f40}^H(s) = \frac{U_0/s}{R_{40} + s(L_{40} + L_{T41}) + 1/(sC_4)} \\ I_{fmn}^H(s) = I_{f40}^H(s) \prod_{r=1}^D h^r(s) \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $I_{fmn}^H$  为线路 Cable  $mn$  故障分量电流的高频分量;  $h^r(s)$  为从第  $r-1$  级线路电流到第  $r$  级线路电流的转移函数;  $D$  为所计算的健全线路的线路等级。

此外,将海上风能经直流汇聚后集中送出的方案在工程中得到了广泛应用。图 2 为远海风能经直流汇聚后集中送出典型拓扑的示意图,为了使系统能够灵活扩展,方便功率的调控,一般要求在直流汇聚结点配备 DC/DC 变换器<sup>[3]</sup>。由于 DC/DC 变换器两侧均有并联电容,当计算直流故障初期的短路电流时,DC/DC 变换器也可以用恒流源和并联接地电容进行建模。与 VSC 不同的是,隔离式 DC/DC 变换器天然地具有隔离直流故障的能力。因而在进行系统故障分析时,可对原系统进行拆解,

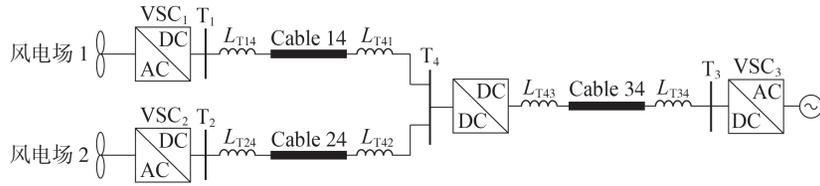


图2 远海风能经直流汇聚后集中送出典型拓扑

Fig.2 Typical topology of offshore wind farms integration system incorporating DC collection nodes

仅保留隔离式DC/DC变换器故障侧的网络。可见,直流汇聚节点可以统一到图A3所示的一般辐射状直流电网的暂态等效模型中。由于图A3是故障分量网络,不体现稳态时功率的流动方向。只要实际系统满足辐射状的直流连接形式,就可以用该模型进行简化分析。

### 1.5 短路电流解析表达式推导

基于暂态等效模型,可以进一步在高频域内忽略式(10)中的电缆线路电阻 $R_{40}$ 与接地电容 $C_4$ ,故障线路故障分量电流的高频分量可重写为:

$$I_{f40}^H(s) = \frac{U_0/s}{s(L_{40} + L_{T41})} \quad (14)$$

直流故障初期,故障线路短路电流的时域表达式可以通过对式(14)进行拉氏反变换求得:

$$I_{f40}(t) = L^{-1}(I_{f40}^H(s)) = \frac{U_0}{L_{40} + L_{T41}} t \quad (15)$$

其中, $L^{-1}(\cdot)$ 为拉氏反变换运算。

对于健全线路,在高频域内式(12)中 $h(s)$ 分母的二次项远大于一次项与常数项,即有:

$$\begin{cases} s^2(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4 \gg sR_{l4}C_4 \\ s^2(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4 \gg C_4/C_l \end{cases} \quad (16)$$

因此,式(12)中健全线路故障分量电流高频分量可以进一步简化为:

$$I_{f44}^H(s) = I_{f40}^H(s) \frac{1}{s^2(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4} = \frac{U_0}{s^4(L_{40} + L_{T41})(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4} \quad (17)$$

对式(17)进行拉氏反变换可得:

$$I_{f44}(t) = \frac{U_0}{6(L_{40} + L_{T41})(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4} t^3 \quad (18)$$

式(15)和式(18)给出了直流故障初期短路电流的解析表达式,可以看出暂态等效模型能够极大地简化复杂网络的故障分析。此外,式(15)和式(18)也说明了直流故障初期,故障线路故障分量电流线性增长,而健全线路故障分量电流呈3次方增长。

## 2 基于暂态电流均值的故障检测方法

### 2.1 暂态电流均值

基于上述分析,可以设计能反映故障初期短路电流特征的指标以区分故障线路与健全线路,实现

故障线路的快速切除。暂态均值是故障暂态电流的一个重要的特征量,其定义为电流在一个固定时间窗 $T$ 内的均值,如式(19)所示。

$$\bar{I}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t I(\tau) d\tau \quad (19)$$

将上式写为离散形式:

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{N} \sum_{y=x-N+1}^x I(y) \quad (20)$$

其中, $N$ 为一个时间窗内的采样点数,它和采样频率 $f_s$ 满足式(21)所示的关系。

$$Nf_s = T \quad (21)$$

对于连续的采样电流,其暂态均值在 $x+1$ 时刻的值为:

$$\bar{I}(x+1) = \frac{1}{N} \sum_{y=x-N+2}^{x+1} I(y) \quad (22)$$

联立式(21)和式(22),可得:

$$\begin{aligned} \bar{I}(x+1) &= \frac{1}{N} \left( \sum_{y=x-N+1}^x I(y) + I(x+1) - I(x-N+1) \right) = \\ & \bar{I}(x) + \frac{1}{N} (I(x+1) - I(x-N+1)) \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)说明,暂态电流均值每更新1个采样点,仅需要2次加减运算和1次乘除运算。可见,暂态电流均值的计算复杂度很低,十分适合实时的滚窗计算。

### 2.2 保护判据与阈值整定

基于直流故障初期故障线路和健全线路电流的明显差异,可实现单端速动的保护方法。在直流系统中,反向区外故障可以很容易地通过故障分量电流的极性进行快速识别。因此,单端量保护的重点在于区分区内故障与正向区外故障。本文在保护阈值整定时考虑最严重的正向区外故障,以Cable 14上靠近 $T_1$ 端配备的保护为例,考虑一个金属性故障发生在保护线路下级线路的出口(Cable 24上靠近 $T_4$ 端)。根据式(18),此时保护安装处的故障分量电流 $I_{f14}^{\text{ex}}$ 为:

$$I_{f14}^{\text{ex}}(t) = \frac{U_0}{6L_{T42}(L_{l4} + L_{Tl4} + L_{T4l})C_4} t^3 \quad (24)$$

结合式(19)和式(24), $I_{f14}^{\text{ex}}$ 对应的暂态电流均值 $\bar{I}_{f14}^{\text{ex}}$ 为:

$$\bar{I}_{f14}^{\text{ex}} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{f14}^{\text{ex}}(t) dt = \frac{U_0 T^3}{24L_{T42}(L_{14} + L_{T14} + L_{T41})C_4} \quad (25)$$

因此,保护阈值可按式(26)整定。

$$I^{\text{set}} = K_r \bar{I}_{f14}^{\text{ex}} \quad (26)$$

其中,  $K_r$  为可靠系数。综合保护的选择性与灵敏性, 本文将  $K_r$  设为 30。由式(23)可以实时更新故障分量电流的暂态均值, 当暂态电流均值大于整定阈值时保护启动, 保护动作判据为:

$$\bar{I}_f(t) > I^{\text{set}} \quad (27)$$

由于暂态电流均值的概念较为简单, 式(27)的计算量很小, 有利于直流故障的快速检测。

### 2.3 灵敏度分析与采样窗长选择

为了分析故障检测方法的灵敏度, 考虑区内发生最弱金属性故障的情况。对于 Cable 14 上靠近  $T_1$  端配备的保护, 当 Cable 14 上靠近  $T_4$  端发生金属性故障时, 保护安装处电流的暂态均值  $\bar{I}_{f14}^{\text{in}}$  可以通过结合式(15)和式(19)求得:

$$\bar{I}_{f14}^{\text{in}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_0 t}{L_{14} + L_{T14}} dt = \frac{U_0 T}{2(L_{14} + L_{T14})} \quad (28)$$

故障检测方法的灵敏度  $K_s$  定义为发生区内最弱金属性故障时故障分量电流暂态均值与阈值的比, 根据式(26)和式(28)有:

$$K_s = \frac{\bar{I}_{f14}^{\text{in}}}{I^{\text{set}}} = \frac{12L_{T42}(L_{14} + L_{T14} + L_{T41})C_4}{K_r(L_{14} + L_{T14})T^2} \quad (29)$$

根据式(29), 采样时间窗  $T$  越长, 保护的灵敏度越低。如果用  $K_s^{\text{min}}$  表示故障检测方法的最低灵敏度要求, 则采样时间窗  $T$  需要满足如下关系:

$$T < \sqrt{\frac{12L_{T42}(L_{14} + L_{T14} + L_{T41})C_4}{K_r K_s^{\text{min}}(L_{14} + L_{T14})}} \quad (30)$$

假设  $K_s^{\text{min}} = 10$ , 由式(30)可以计算出典型多端高压直流系统参数下采样时间窗长  $T < 2.68$  ms。为了分析方便, 本文中  $T = 2$  ms。

## 3 仿真实验

为了验证本文所提的暂态等效模型的准确性与故障检测方法的有效性, 在 PSCAD / EMTDC 中搭建了图 3 所示的四端直流系统。图中, 3 个海上风电场通过海底电缆与岸上交流系统连接。电缆线路采用频变模型, 电缆两端平波电抗器的电感为 100 mH。二电平 VSC 用详细的开关模型表示, 3 个远海风电场换流器采用定功率控制, 岸上交流系统换流器采用定电压控制, 为直流系统建立稳定的电压。采样频率为工程中常用的 10 kHz, 交流系统短路比 SCR (Short Circuit Ratio)、采样时间窗长等参数见附录中的表 A1。以安装在 Cable 14 上靠近  $T_1$  侧的保护为例对所提故障检测方法进行考察, 根据

式(25)和式(26), 可以计算出该保护装置的动作阈值为 0.1179 kA。

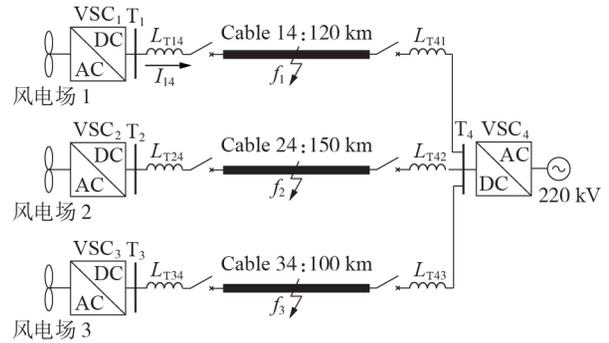


图 3 仿真四端直流系统拓扑结构图

Fig.3 Structure diagram of four-terminal DC system for simulation study

### 3.1 模型验证

图 4 为发生区内故障时不同模型下的仿真计算结果, 考察了电缆线路采用频变模型和采用集总参数模型(记为 RL 模型), 以及采用所提的暂态等效模型时故障电流的差异。记故障发生时刻为零时刻, 并用  $d$  表示故障距离, 即故障点到保护安装处的距离。由图 4(a)和(c)可以看出, 区内故障初期, 故障分量电流整体上呈线性增长, 且故障距离越近, 故障分量电流上升速率越快。此外, RL 模型和暂态等效模型下的故障电流十分接近, 说明采用暂态等效模型计算故障初期电流具有较高的精度。而频变模型下的故障分量电流在集总参数模型下故障分量电流附近有小幅波动, 并且故障距离越大, 波动越明显, 这是由于频变模型反映了行波在线路中的传播过程, 故障距离越长, 行波过程越明显。由图 4(b)和

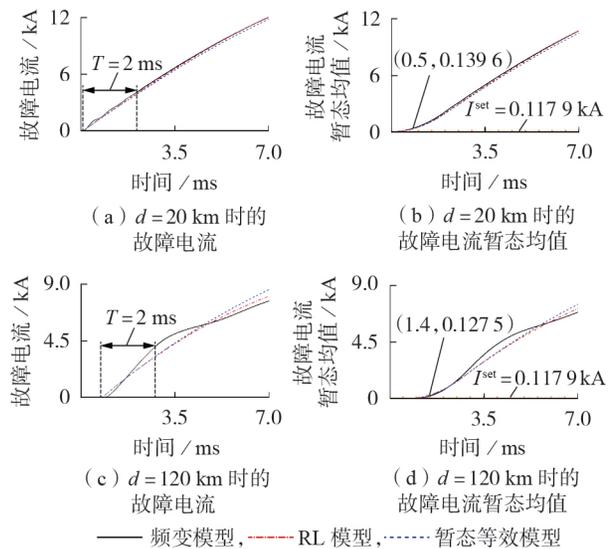


图 4 不同模型下区内故障仿真结果

Fig.4 Simulative results of internal faults with different models

(d)可以看出,3种模型下故障分量电流的暂态均值波形较为接近,说明暂态均值运算一定程度上减小了采用集总参数模型时忽略行波暂态传播过程而引入的误差。此外,对于不同距离的区内故障,本文所提的保护方法均能在故障行波到达后的1 ms内快速识别,说明该方法具有良好的速动性。

图5为金属性故障发生在保护线路下级线路出口处时不同模型下短路电流的计算结果。由图5(a)可以看出,直流故障初期,频变模型下健全线路故障分量电流符合3次方增长曲线。并且,由于接地电容滤除了故障线路电流中的高频分量,健全线路电流中难以观测到行波过程。因此,3种模型下健全线路电流非常近似,仿真结果再次验证了暂态等效模型的准确度。由图5(b)可见,发生正向区外故障时,3种模型下的暂态电流均值非常接近且上升缓慢。在区外故障后5 ms内,暂态电流均值不会超过阈值,这为故障线路的识别与切除留下了充足的时间。

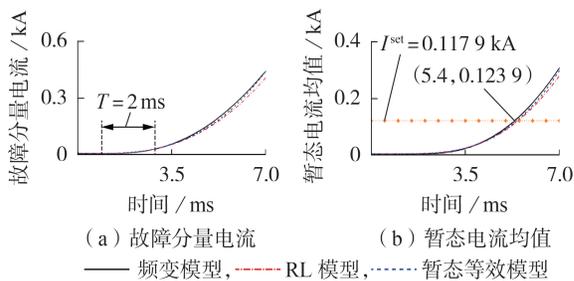


图5 不同模型下区外故障仿真结果

Fig.5 Simulative results of external fault with different models

表1为不同模型下电流暂态均值随故障距离的变化情况,其中电流暂态均值取故障电流行波到达保护安装处后2 ms时间窗的计算结果。可以看出,不同故障距离下,3种模型计算得到的电流暂态均

表1 故障距离对故障检测方法的影响

Table 1 Impact of fault distances on proposed fault detection method

故障类型	故障距离 / km	电流暂态均值 / kA		
		频变模型	RL模型	暂态等效模型
区内故障	0	2.3176	2.1647	2.1566
	20	2.2758	2.1266	2.0833
	40	2.2572	2.0563	2.0215
	60	2.2284	1.9882	1.9632
	80	2.1078	1.9258	1.9080
	100	2.0732	1.8642	1.8646
	120	1.9985	1.8074	1.8147
区外故障	120	0.00387	0.00386	0.00393
	140	0.00376	0.00384	0.00385
	160	0.00368	0.00360	0.00378
	180	0.00352	0.00351	0.00371

值比较接近,且电流暂态均值随故障距离的增大而减小。此外,发生区内故障时电流暂态均值远大于阈值,而发生区外故障时电流暂态均值远小于阈值,仿真结果验证了本文所提的故障检测方法具有较高的灵敏度。

### 3.2 耐过渡电阻能力

为了检验本文所提故障检测方法在区内最轻微故障下能否可靠动作,考察其在区内远端高阻故障下的表现。图6为频变模型下发生区内末端(故障距离为120 km)高阻故障时故障电流与其暂态均值的波形。由图6(a)可见,高阻故障初期,故障分量电流的增长速率随时间减小。此外,过渡电阻越大,故障分量电流越小。图6(b)表明随着过渡电阻的增大,电流暂态均值超过保护阈值的时间会变长。在400 Ω高阻故障下,电流暂态均值于故障行波到达保护安装处后1.6 ms超过阈值,说明故障检测方法可以在区内最轻微故障下可靠动作。仿真结果验证了本文所提的故障检测方法具有良好的耐过渡电阻能力。

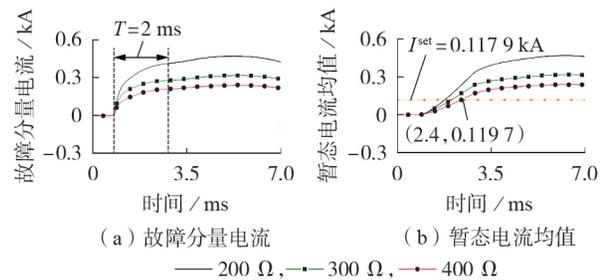


图6 不同过渡电阻下区内故障的仿真结果

Fig.6 Simulative results of internal fault with different fault resistances

### 3.3 抗噪能力

图7为外界噪声影响下区内末端发生高阻故障(故障距离为120 km,过渡电阻为300 Ω)时的仿真结果。其中,加噪信号在原始电流信号基础上加入了信噪比(SNR)为35 dB的白噪声。由图7(a)可见,测量噪声使电流波形发生了明显的畸变。然而,在图7(b)中,加噪信号和原始信号的暂态均值非常

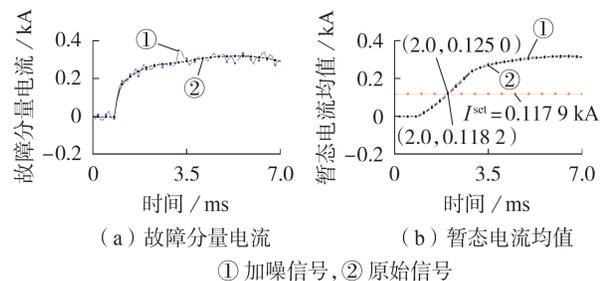


图7 噪声对故障检测方法的影响

Fig.7 Impact of outside noise on proposed fault detection method

接近,外界噪声被有效抑制。仿真结果说明本文所提的故障检测方法具有良好的抗噪能力。

#### 4 结论

本文首先提出了适用于辐射状多端直流系统直流故障分析的暂态等效模型,该模型针对故障初期的短路电流计算,仅保留原故障网络中的高频成分,极大地简化了故障分析电路。暂态等效模型证明了在直流故障初期,故障线路故障分量电流呈线性增长,健全线路故障分量电流呈3次方增长。然后,本文提出了基于暂态电流均值的直流故障检测方法。该方法可以实现单端速动,具有计算量小、抗噪能力强等优势。最后,数值仿真验证了暂态等效模型具有较高的准确度,本文所提的故障检测方法可以快速识别区内外故障,且有较高的耐过渡电阻能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 洪敏,辛焕海,徐晨博,等. 海上风电场与柔性直流输电系统的新颖协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):53-58.  
HONG Min,XIN Huanhai,XU Chenbo,et al. Coordinated control strategy of offshore wind farms and VSC-based HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(21):53-58.
- [ 2 ] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2016:338-375.
- [ 3 ] JOVICIC D,TAHERBANEH M,TAISNE J P,et al. Offshore DC grids as an interconnection of radial systems:rotection and control aspects[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(2):903-910.
- [ 4 ] BELDA N A,PLET C A,SMEETS R P. Analysis of faults in multiterminal HVDC grid for definition of test requirements of HVDC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(1):403-411.
- [ 5 ] 李斌,何佳伟,冯亚东,等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):2-12.  
LI Bin,HE Jiawei,FENG Yadong,et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(21):2-12.
- [ 6 ] 周嘉阳,李凤婷,陈伟伟,等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(8):48-54.  
ZHOU Jiayang,LI Fengting,CHEN Weiwei,et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control,2019,47(8):48-54.
- [ 7 ] 贾科,赵其娟,王聪博,等. 柔性直流配电系统线路保护与定值整定[J]. 电力系统自动化,2019,43(19):171-178.  
JIA Ke,ZHAO Qijuan,WANG Congbo,et al. Line protection and setting calculation for flexible DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(19):171-178.
- [ 8 ] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于MMC的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):72-78.  
SUN Jibo,WANG Yu,LIU Chongru,et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):72-78.
- [ 9 ] LI Chengyu,ZHAO Chengyong,XU Jianzhong,et al. A pole-to-pole short-circuit fault current calculation method for DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(6):4943-4953.
- [ 10 ] 宋国兵,王晨清,唐吉斯,等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. 电网技术,2016,40(11):3580-3585.  
SONG Guobing,WANG Chenqing,TANG Jisi,et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. Power System Technology,2016,40(11):3580-3585.
- [ 11 ] 侯俊杰,樊艳芳,晁勤,等. 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):89-96.  
HOU Junjie,FAN Yanfang,CHAO Qin,et al. Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):89-96.
- [ 12 ] ZHANG Chenhao,SONG Guobing,WANG Ting,et al. Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(5):2028-2038.
- [ 13 ] 汤兰西,董新洲,施慎行,等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术,2018,42(10):3176-3186.  
TANG Lanxi,DONG Xinzhou,SHI Shenxing,et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology,2018,42(10):3176-3186.
- [ 14 ] 戴志辉,刘宁宁,刘媛,等. 基于电压反行波的特高压直流输电单端量线路保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):80-87.  
DAI Zhihui,LIU Ningning,LIU Yuan,et al. Single-terminal line protection for UHVDC power transmission based on voltage backward traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):80-87.
- [ 15 ] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2010:14-117.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] SATPATHI K,YEAP Y M,UKIL A,et al. Short-time Fourier transform based transient analysis of VSC interfaced point-to-point DC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,65(5):4080-4091.
- [ 18 ] 段建东,李浩,雷阳,等. 利用同步挤压小波变换的高压交直流混联系统交流线路暂态方向保护[J]. 中国电机工程学报,2019,39(13):3833-3841.  
DUAN Jiandong,LI Hao,LEI Yang,et al. Transient-based directional protection using synchrosqueezing wavelet transforms for AC transmission lines in HVAC/DC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(13):3833-3841.
- [ 19 ] 束洪春,程春和,赵文渊,等. 形态学与HHT检测相结合的行波波头准确标定方法[J]. 电力自动化设备,2019,29(7):1-7,37.  
SHU Hongchun,CHENG Chunhe,ZHAO Wenyuan,et al. Accurate traveling-wave front detection based on morphology

and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 29 (7):1-7,37.

#### 作者简介:

李佳朋(1994—),男,河南南阳人,博士研究生,主要研究方向为直流电网故障分析与保护、人工智能在电力系统中的应用(E-mail:nyjp1994@163.com);

李宇骏(1990—),男,江西南昌人,副教授,博士,主要研



李佳朋

究方向为多端直流系统故障分析与故障检测、风电场对系统提供惯量和频率支撑的控制策略等(E-mail:yujunlizju@gmail.com);

宋国兵(1972—),男,河南信阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:song.gb@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC

LI Jiapeng<sup>1</sup>, LI Yujun<sup>1</sup>, YUAN Xiaotian<sup>1</sup>, JIA Ke<sup>2</sup>, SONG Guobing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Two-level VSC (Voltage Source Converter) and half-bridge MMC are lack of the ability to control fault DC current during DC fault. Therefore, in MTDC (Multi-Terminal DC) system, it is crucial to immediately identify and isolate the fault during the first period of DC fault, namely, capacitor discharging stage, otherwise the overall system might be out of operation due to the fast blocking of converter valves. The initial DC fault current analysis during capacitor discharging stage is the prior issue for fault detection in MTDC system. A transient equivalent model is proposed for fault analysis of MTDC system, in which only high-frequency components of the fault network are reserved, so the analysis in the failure period can be simplified. The analytical expression of fault current of faulty and healthy lines can be deduced based on the proposed model. Based on the current difference between fault lines and healthy lines, a fault detection method based on the average value of transient current is further proposed, which has the advantage of relatively low computation burden, high fault resistance tolerant ability, and relatively low sampling frequency. Numerical studies carried out in EMTPT verify the accuracy of the proposed transient equivalent model and the effectiveness of the proposed fault detection method.

**Key words:** multi-terminal DC system; DC fault analysis; transient equivalent model; average value of transient current; DC fault detection

(上接第118页 continued from page 118)

## Method of access point selection and capacity optimal configuration for VSC-HVDC line

LI Xiangqi<sup>1</sup>, ZHOU Yang<sup>2,3</sup>, ZHANG De<sup>1</sup>, LI Yunfeng<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2</sup>

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Institute of Energy Systems, Energy Efficiency and Energy Economics, TU Dortmund, Dortmund 44227, Germany)

**Abstract:** A new method of access point selection and capacity optimal configuration for VSC-HVDC line is proposed. With the consideration of multiple typical overload operation conditions, a comprehensive sensitivity factor is designed to evaluate all possible access points for VSC-HVDC line, so as to select the appropriate access points to form a set of candidate schemes. Taking the DC injected power as the decision variable and considering the line overload index and the capacity cost, the corresponding multi-objective optimization model is established for each candidate scheme under different operation conditions. In addition, related evaluation indexes are defined and introduced to measure the results under different candidate schemes, so as to determine the optimal scheme. Through the simulation of New England standard system, the simulative results show that the proposed method can effectively mitigate the overload problem under the  $N-1$  contingency and reduce the DC capacity cost as much as possible.

**Key words:** VSC-HVDC; access point selection; capacity configuration; comprehensive sensitivity factor; line overload; optimization

# 附录

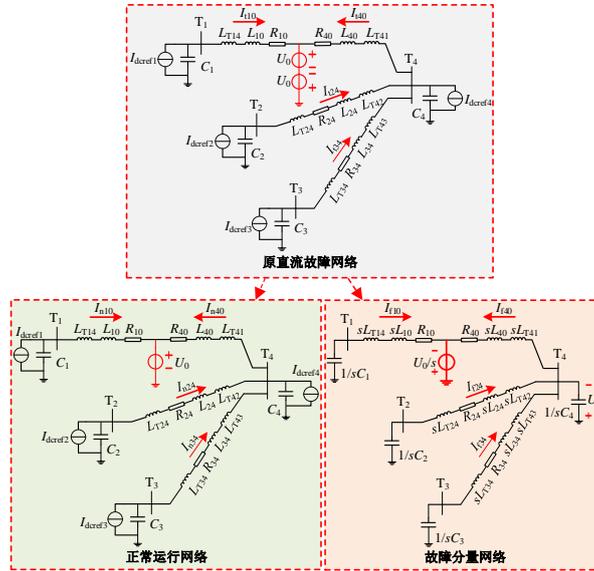


图 A1 四端直流系统故障分析电路图

Fig.A1 Fault analysis circuit for studied four-terminal DC network

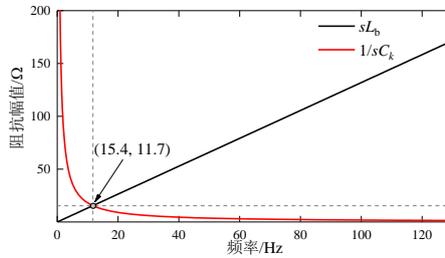


图 A2 线路等效电感与接地电容阻抗的幅频特性

Fig.A2 Amplitude frequency characteristics of impedance of equivalent inductance of DC cable and that of grounded capacitor

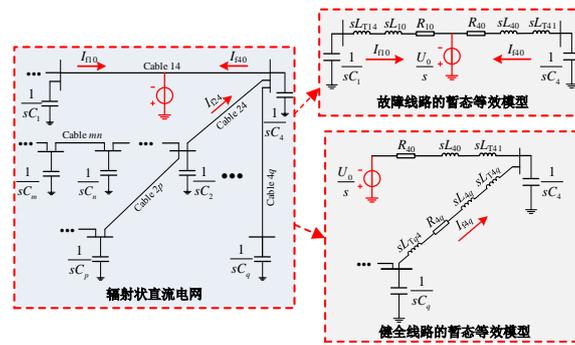


图 A3 一般辐射状多端直流系统的暂态等效模型

Fig.A3 Transient equivalent model of general radial MTDC system

表 A1 测试多端直流系统相关参数  
Table A1 Concerned parameters of studied MTDC system

参数	含义	数值
SCR	交流系统短路比	5.6
$f_s$	采样频率	10 kHz
$T$	采样时间窗长	2 ms
$L_T$	补偿电抗器电感	100 mH
$C_k$	接地电容	880 $\mu$ F
$R_0$	单位长度直流电缆电阻	0.083 $\Omega$ /km
$L_0$	单位长度直流电缆电感	0.01 mH/km