

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240258

基于波形匹配的柔性直流输电线路单端量保护研究

贾科, 刘可歆, 毕天姝, 姚昆鹏, 陈帅, 李再男

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 柔性直流输电技术是解决大规模新能源接入问题的有力抓手, 其线路保护是保障系统安全稳定的关键。线路单端量保护不需要借助通信, 能较好地满足柔性直流输电系统对时间的要求。然而现有柔性直流输电系统单端量保护性能受后续行波影响较大, 存在一定范围保护死区。对此, 在充分考虑后续行波对首行波影响的基础上, 深度挖掘区内外故障行波差异, 进而提出基于波形匹配的故障识别判据。该判据可通过匹配误差与匹配波形特征相结合衡量后续行波影响程度, 最终实现全线速动保护。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了四端柔性直流输电系统。仿真结果验证了所提方法的可行性, 且具有保护范围长、耐受过渡电阻能力强、抗噪声干扰能力强的优势。

关键词: 柔性直流输电; 后续行波; 波形匹配; 波形特征; 单端量保护

Research on single-ended protection of a flexible HVDC transmission line based on waveform matching

JIA Ke, LIU Kexin, BI Tianshu, YAO Kunpeng, CHEN Shuai, LI Zainan

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

Abstract: Flexible HVDC technology is powerful in addressing the integration of large-scale renewable energy, and its line protection is key to ensuring system safety and stability. Single-ended protection of the line does not require communication and can better meet the time requirements of flexible HVDC transmission systems. However, the performance of existing single-ended protection in flexible HVDC transmission systems is significantly affected by subsequent traveling waves, resulting in a certain range of protection dead zones. To address this, based on fully considering the impact of subsequent traveling waves on the initial traveling wave, the differences between internal and external fault traveling waves are explored, and a fault identification criterion based on waveform matching is proposed. This criterion can measure the impact of subsequent traveling waves by combining matching errors with matching waveform characteristics, ultimately achieving full-line rapid protection. A four-terminal flexible DC transmission system is built based on PSCAD/EMTDC. Simulation results verify the feasibility of the proposed method, which has the advantages of a long protection range, strong tolerance to transition resistance, and strong anti-noise interference capability.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-202199530A-0-5-ZN and No. 5211DS21N013).

Key words: flexible HVDC transmission; subsequent traveling wave; waveform matching; waveform characteristic; single-ended protection

0 引言

柔性直流输电技术因其可控能力强、功率调节速度快、运行方式灵活的技术特点和优势^[1-2], 在新

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“新能源电力系统协同控制保护系统及应用”资助(5100-202199530A-0-5-ZN, 5211DS21N013)

能源并网领域具有广阔的应用前景。然而架空线路工作环境较为恶劣, 发生故障的概率较高, 故障工况也较为复杂。在网状拓扑结构下发生直流线路短路故障, 所有换流站均向短路点馈入故障电流, 给直流系统一次设备造成严重威胁^[3-4]。现有柔性直流线路保护技术可靠性弱, 为柔性直流输电技术的发展带来挑战, 亟待研究高速可靠且具有优异性能的主保护^[5]。

现阶段直流线路保护按照测点数目可分为单端量保护和双端量保护,相较于双端量保护,单端量保护不依赖于通信,具有良好的速动性^[6]。现有工程中通常配置行波保护和微分欠压保护作为直流输电线路的主保护,其耐受过渡电阻能力及抗干扰能力差^[7-8]。为提高直流输电线路保护可靠性,国内外学者提出了各种单端量保护新原理。

为提高线路保护耐受过渡电阻的能力,许多学者将时频处理手段引入保护构造中。文献[9]采用Mallat变换进行高频分量提取,扩大区内外故障差异;文献[10]使用多分辨形态梯度对暂态信号进行分析,通过比较高频形态谱进行区内外故障识别;文献[11]利用希尔伯特黄变换提取高频分量,实现故障判别;文献[12-13]采用模态分解的方法实现对行波波头的有效提取。此类基于频域特征的保护主要利用了输电线路边界元件对高频分量的衰减特性,通过不同时频处理手段提取特定频段故障特征,从而实现故障判别,它在一定程度上提高了保护耐受过渡电阻的能力,然而存在算法过于复杂、抗噪声干扰能力弱等缺陷。

对此,不少学者提出了基于波形分析的改进式单端量保护方法。文献[14]利用故障极波线模和地模时差内的极波波头斜率和幅值变化量构造自适应保护判据,但未考虑后续行波带来的影响,保护可能误动;文献[15]根据区内外故障时首行波波头曲率的差异构成保护判据;文献[16-17]推导了故障行波指数项系数与故障距离的关系,通过对区内外故障指数项系数的比较,从而实现故障判别。上述方法提取了故障量的时域特征进行分析,保护原理简单且具有良好的耐受过渡电阻能力。文献[15-17]均采用模极大值标记法消除后续行波的影响,然而受制于采样频率,保护范围存在死区^[18]。文献[19]考虑了后续行波的影响,增添了辅助判据,然而增添的辅助判据整定困难。

因此,后续行波是影响波形特征保护的关键,现有研究主要侧重于消除后续行波的影响,无法保护线路全长。本文在充分考虑后续行波对首行波影响的基础上,充分挖掘区内外故障差异,将后续行波作为故障特征量进行分析,进而实现全线速动保护。仿真验证了所提出的保护方案能够快速可靠地保护全线线路,且具有较高耐受过渡电阻能力和抗干扰能力。

1 区内外故障保护安装处初始行波分析

1.1 四端柔性直流输电网络结构

本文根据张北四端柔性直流输电系统进行故

障分析,图1为系统简化图。输电线路采用架空线路,线路端口安装感值为0.1 H的限流电抗器(L_m),MMC_1—MMC_4为系统换流站,R、I分别为线路 l_1 两侧的保护装置。以保护R处为例进行分析, f_1 为非端口处区内故障; f_2 、 f_3 分别为保护R、I出口处(左右至少有一侧不为架空线路)故障; f_4 表示区外故障。本文规定电流参考方向由保护指向线路,对于保护正方向故障,初始行波为故障反行波。

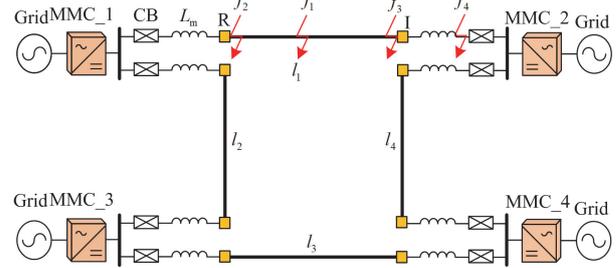


图1 四端柔性直流电网简化图

Fig. 1 Simplified diagram of four-terminal flexible DC power network

实际架空线路正负极之间存在电磁耦合,现有研究通常采用凯伦鲍尔极模变换对故障分量进行解耦,将其分解成独立的零模、线模分量^[20]。其解耦公式为

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ F_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: F_p 、 F_n 分别为正负极电气量; F_0 、 F_1 分别为零模、线模分量。

在行波传输的过程中,线模分量相比于零模分量具有更好的稳定性,因此选择线模电压为主体进行分析。

1.2 不同位置故障初始行波通式

初始行波尚未受到后续折、反射行波的影响,不存在零模、线模的交叉透射现象^[21]。本文采用复合模域等效图的方式^[22]对不同位置、不同故障类型的故障初始行波进行推导。推导过程如附录A和附录B所示。针对单极接地故障,可以得到不同位置故障时初始线模电压行波时域表达式如下。

1) 区内非端口故障(f_1 处)

$$f_1(t) = -\frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \quad (2)$$

式中: U_N 表示线路正常运行时的电压; Z_{c1} 、 Z_{c0} 分别为线路线模波阻抗和零模波阻抗; R_f 为接地电阻。

2) 区内对端故障(f_3 处)

$$f_3(t) = \frac{\sqrt{2}U_N(Z_{c0} - Z_{c1})/2}{Z_{c1} + Z_{c0} + 2R_f} e^{-\frac{t}{\tau_{b1}}} - \frac{\sqrt{2}U_N(Z_{c1} + (Z_{c0} - Z_{c1})/2)}{Z_{c1} + Z_{c0} + 2R_f} e^{-\frac{t}{\tau_{b2}}} \quad (3)$$

式中, τ_{b1} 、 τ_{b2} 为区内故障时间常数, 其表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} \tau_{b1} = \frac{(Z_{c1} + Z_{c0})L_n}{2Z_{c1}Z_{c0}} \\ \tau_{b2} = \frac{L_n(Z_{c1} + Z_{c0} + 2R_f)}{R_f(Z_{c1} + Z_{c0})} \\ L_n = \frac{L_m L_1 + L_m^2}{L_1 + 2L_m} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $L_n = (L_m + L_1) // L_m$, 其中 L_m 表示线路两端限流电抗器电感, L_1 表示 MMC 等效电感。

3) 区内近端故障(f_2 处)

$$f_2(t) = -\frac{b_1}{2} \left(\frac{\tau_{b1}Z_{c1} - L_n}{L_n} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{b1}}} + \frac{b_2}{2} \left(\frac{\tau_{b2}Z_{c1} - L_n}{L_n} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{b2}}} - \frac{b_0}{2} - \frac{b_1}{2} \frac{L_n - \tau_{b1}Z_{c1}}{L_n} + \frac{b_2}{2} \frac{L_n - \tau_{b2}Z_{c1}}{L_n} \quad (5)$$

式中, b_0 、 b_1 、 b_2 为区内近端故障待定系数, 其表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} b_0 = \frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c0} + Z_{c1} + 2R_f} \\ b_1 = \frac{\sqrt{2}U_N (Z_{c0} - Z_{c1})/2}{Z_{c0} + Z_{c1} + 2R_f} \\ b_2 = \frac{\sqrt{2}U_N (Z_{c1} + (Z_{c0} - Z_{c1})/2)}{Z_{c0} + Z_{c1} + 2R_f} \end{cases} \quad (6)$$

4) 区外故障(f_4 处)

$$f_4(t) = \frac{-\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{2(\tau_{c1} - \tau_{c2})} e^{-\frac{t}{\tau_{c1}}} + \frac{\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{2(\tau_{c1} - \tau_{c2})} e^{-\frac{t}{\tau_{c2}}} \quad (7)$$

式中, τ_{c1} 、 τ_{c2} 为区外故障时间常数, 其表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} \tau_{c1} = \frac{\frac{1}{2}L_m // L_1}{R_f} \\ \tau_{c2} = \frac{L_m}{Z_{c1}} \end{cases} \quad (8)$$

对不同位置故障电压初始行波时域表达式进行归纳, 可得到其通式, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 当输电线路 f_3 、 f_4 处故障时, 可

以统一用通式 $f(t) = me^{-at} + ne^{-bt}$ 表示, 其中 m 、 n 与 a 、 b 分别为常数项系数与指数项系数, 而 f_2 发生故障时, 其通式中存在附加的常数项。

表 1 不同位置故障初始行波通式

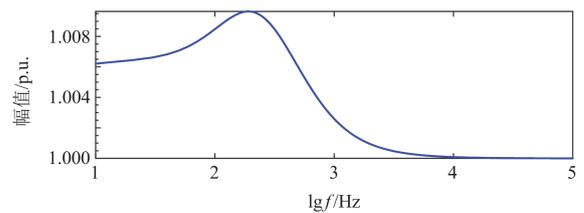
Table 1 Initial traveling wave expressions at different fault locations

故障位置	时域表达式通式
f_1	$f(t) = p$ (近似为一常数)
f_2	$f(t) = me^{-at} + ne^{-bt} + p$
f_3	$f(t) = me^{-at} + ne^{-bt}$
f_4	$f(t) = me^{-at} + ne^{-bt}$

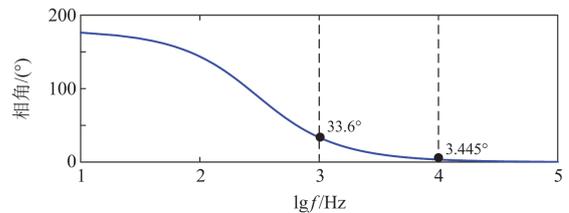
针对双极故障, 其推导过程与单极故障时类似, 其表达式如附录 B 所示, 在此不再赘述。

2 计及后续行波影响的行波差异分析

行波在线上传播时, 在故障点与线路边界处阻抗不连续, 会发生折、反射现象。针对故障点处的折、反射, 其主要对后续行波的极性与尺度产生影响; 针对线路边界处折、反射, 由于系统感性边界元件的存在, 在不同故障条件下后续行波波头形状存在较大差异。由于行波在感性边界元件处的反射存在极值特性^[23], 将后续行波到达时刻至首个极值点时刻波前定义为波前, 其余波头部分定义为波尾。波前仅受线路传变与表达式中幅值项的影响, 而波尾形状受边界条件以及不同故障条件影响较大, 对其进行分析比较困难。进一步对边界反射系数进行分析, 以线模分量边界反射系数 $K_{u,t}$ 为例进行分析, 其表达式如式(9)所示, 其频率特性如图 2 所示, 可见感性边界的反射系数会附加给后续行波



(a) 对端线路边界的反射系数幅频特性



(b) 对端线路边界的反射系数相频特性

图 2 反射系数的频率特性

Fig. 2 Frequency characteristics of the reflection coefficient

一定的相位偏移, 而对幅值影响较小。

$$K_{u,t} = \frac{s(L_m + L_l) - Z_{c1}}{s(L_m + L_l) + Z_{c1}} \quad (9)$$

综上所述, 本节主要关注后续行波波前幅值故障特征信息。

2.1 后续行波分类及特征分析

根据后续行波经历波阻抗不连续点的折、反射次数, 将后续行波分为两类, 如图 3 所示, u^{-21} 表示线模分量经故障点反射的线模电压行波, u^{-20} 表示零模分量经故障点透射到近端的线模电压行波, 它们仅经过一个阻抗不连续点发生折、反射, 将其定义为第一类后续行波; u^{-31} 表示线模分量经对端(I 端)反射后再经故障点折射的线模分量; u^{-30} 表示零模分量经对端反射后再经故障点透射到近端的线模分量, 它们皆经过了两个阻抗不连续点发生折、反射, 将其定义为第二类后续行波。

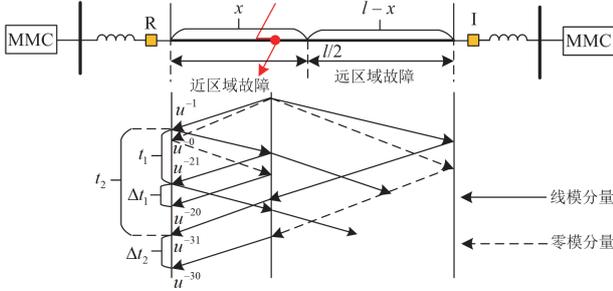


图 3 后续行波传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of subsequent traveling waves propagation

针对线路双极故障(对称故障), 此时仅存在线模分量, 不存在零模透射现象, 保护安装处对应的不同类别后续线模电压行波幅值公式为

$$u^{-21} = -\frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + 2R_f} \cdot u^{-1} = \frac{Z_{c1}^2}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)(Z_{c1} + 2R_f)} \cdot U_N \quad (10)$$

$$u^{-31} = \frac{2R_f}{Z_{c1} + 2R_f} \cdot u^{-1} = \frac{-2Z_{c1}R_f}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)(Z_{c1} + 2R_f)} \cdot U_N \quad (11)$$

线路发生不对称故障时(单极故障)存在零模分量, 零模分量对线模分量具有透射作用, 保护安装处对应的不同类别后续透射线模电压行波幅值公式如下。

第一类后续行波幅值公式为

$$u^{-21} = -\frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \cdot u^{-1} = \frac{Z_{c1}^2}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)^2} \cdot U_N \quad (12)$$

$$u^{-20} = -\frac{Z_{c0}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \cdot u^{-0} = \frac{Z_{c1}Z_{c0}}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)^2} \cdot U_N \quad (13)$$

其中

$$u^{-1} = -\frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} U_N \quad (14)$$

$$u^{-0} = -\frac{Z_{c0}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} U_N \quad (15)$$

式中: u^{-1} 表示初始线模电压行波; u^{-0} 表示初始零模电压行波。

由式(12)~式(15)可知, 两种第一类后续行波在每次反射过程中具有相同的极性, 此外, 第一类后续行波过渡电阻仅存在于幅值表达式的分母项, 因此第一类后续行波受过渡电阻影响大, 随着过渡电阻的增大, 幅值显著下降。

第二类后续行波幅值公式为

$$u^{-31} = \frac{Z_{c0} + 4R_f}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \cdot u^{-1} = \frac{-Z_{c1}(Z_{c0} + 4R_f)}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)^2} \cdot U_N \quad (16)$$

$$u^{-30} = \frac{-Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \cdot u^{-0} = \frac{Z_{c1}^2}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f)^2} \cdot U_N \quad (17)$$

由式(16)、式(17)可知, 两种第二类后续行波在每次反射过程中具有相反的极性, 两种行波呈反向相消态, 且受模量波速差异的影响, 故障距离越远幅值相消效应越明显^[24], 而过渡电阻增大则会使得反向相消效果减弱。此外, 针对线模分量产生的后续线模行波, 过渡电阻在幅值表达式的分子与分母项中都有表达, 故此种后续行波受过渡电阻影响较小; 针对零模分量产生的后续线模行波, 过渡电阻仅在分母项中表达, 故此种后续行波受过渡电阻影响较大。

2.2 给定时间不同位置故障后续行波分析

由 2.1 节分析可得, 后续行波随着折、反射次数的增加幅值随之减小, 因此主要关注保护安装处检测到的首个后续行波的大小; 仅在线路发生不对称故障时, 存在零模分量到线模分量的透射现象, 因此重点对线路不同位置单极接地故障进行分析。以保护 R 为例, 针对近区域故障, 其后续行波传播过程如图 3 所示, 其余故障位置后续行波传播过程如附录 C 所示。分别对不同位置后续行波到达时间进行分析, 可得表达式如下。

第一类后续行波到达时间为

$$\begin{cases} t_{11} = \frac{2x}{v_1}, t_{10} = \frac{2x}{v_0} \\ \Delta t_1 = t_{11} - t_{10} \end{cases} \quad (18)$$

第二类后续行波到达时间为

$$\begin{cases} t_{21} = \frac{2(l-x)}{v_1}, t_{20} = \frac{2(l-x)}{v_0} \\ \Delta t_2 = t_{21} - t_{20} \end{cases} \quad (19)$$

式中: l 为线路长度; x 表示故障点与保护安装处之间的距离; t_{11} 表示初始行波与首个第一类后续线模行波之间的时间差; t_{10} 表示初始行波与首个第一类后续零模行波之间的时间差; t_{21} 表示初始行波与首个第二类后续线模行波之间的时间差; t_{20} 表示初始行波与首个第二类后续零模行波之间的时间差; Δt_1 表示第一类后续行波中反射分量与透射分量之间的时间差; Δt_2 表示第二类后续行波中折射分量与透射分量之间的时间差。当故障点位于线路中点时, $t_{11} = t_{21}$ 且 $\Delta t_1 = \Delta t_2$; 当故障点不位于线路中点时, 有

1) 区内近区域故障 ($x < l/2$)

$$\begin{cases} t_{11} < t_{21}, t_1 = t_{11} = \frac{2x}{v_1} \\ \Delta t_1 < \Delta t_2 \end{cases} \quad (20)$$

式中: t_1 为区内近区域故障首个后续行波到达时间, 到达保护安装处的首个后续行波为第一类后续行波; v_1 为线模波速度。

2) 区内远区域故障 ($l/2 < x < l$)

$$\begin{cases} t_{11} > t_{21}, t_2 = t_{21} = \frac{2(l-x)}{v_1} \\ \Delta t_1 > \Delta t_2 \end{cases} \quad (21)$$

式中, t_2 为区内远区域故障首个后续行波到达时间, 到达保护安装处的首个后续行波为第二类后续行波。

3) 区内端口故障与区外故障 ($x \geq l$)

当发生区外故障或者区内端口故障时, 其初始行波幅值表达式与区内故障时不同, 此 3 种故障情况彼此之间的初始行波幅值也不相同, 然而它们都具有一个共同的特征, 即输电线路仅在故障点的一端, 另一端为边界元件。从后续行波的类别进行分析, 可得区外故障与区内端口故障感受到的后续行波全部为第二类后续行波, 且首个第二类后续行波到达时间 t_3 为

$$t_3 = 2l/v_1 \quad (22)$$

根据以上对不同故障位置后续行波的分析可知, 区内故障与区内端口故障、区外故障保护处感受到的首个后续行波时间存在差异, 且恒满足式(23)。

$$\begin{cases} t_1 < t_3 \\ t_2 < t_3 \end{cases} \quad (23)$$

因此, 一定存在时间窗长 $t_n < 2l/v_1$, 使得区内故障受到后续行波的影响, 而区外故障和区内端口故障不受后续行波的影响。设 $t_n = K \cdot 2l/v_1$ (其中 K 为常数, 且 $K < 1$, 此时区内故障受后续行波影响情况如图 4 所示。

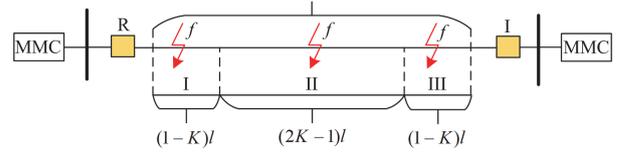


图 4 区内故障受后续行波影响示意图

Fig. 4 Schematic diagram of faults affected by subsequent travelling waves in case of internal faults

将区内故障进一步细分为 I、II、III 三个区域的故障。当故障发生在区域 I 时, 在给定时间窗内仅受到第一类后续行波的影响, 当故障发生在区域 III 时, 在给定时间窗内仅受到第二类后续行波的影响, 而当故障发生在区域 II 时, 在给定时间窗内会同时受到第一类与第二类后续行波的影响。结合式(18)、式(19)与时间窗表达式, 可以求出每个区域对应的范围, 如图 4 所示。

2.3 区外故障与端口故障行波差异分析

由 2.2 节的分析可以得出, 区外故障与区内端口故障时首个后续行波到达时间相同, 与区内故障存在差异, 本节从区外故障与端口故障初始行波时域表达式入手, 寻找它们之间的差异。

1) 区外故障与近端端口故障差异分析

由式(5)和式(7)对比可得, 区外故障与近端端口故障具有不同的通式, 区外故障时域表达式由双指数函数组成, 而对于区内端口故障, 其表达式除了包含双指数函数项, 还存在常数项。

2) 区外故障与对端端口故障差异分析

由式(3)和式(7)对比可得, 区外故障与对端端口故障具有相同的通式, 因此进一步按照金属性故障与非金属性故障对二者波形特征分别进行分析。

(1) 金属性故障

对端口故障时表达式如式(3)、式(4)所示, 当 $R_f = 0$ 时, 式(4)中 $\tau_{b2} \rightarrow \infty$, 此时由式(3)可得

$$\begin{cases} t \rightarrow 0 \text{ 时, } f_{31}(t) \rightarrow \frac{-\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0}} \\ t \rightarrow \infty \text{ 时, } f_{32}(t) \rightarrow \frac{-\sqrt{2}U_N (Z_{c1} + (Z_{c0} - Z_{c1})/2)}{Z_{c1} + Z_{c0}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $f_{31}(t)$ 为对端端口金属性故障初始线模电压起始值; $f_{32}(t)$ 为对端端口金属性故障初始线模电压稳定值。

对式(24)两项进行求差可得

$$\Delta f_3(t) = f_{32}(t) - f_{31}(t) = \frac{\sqrt{2}U_N(Z_{c0} - Z_{c1})/2}{Z_{c1} + Z_{c0}} \quad (25)$$

区外故障时表达式如式(7)、式(8)所示, 当 $R_f = 0$ 时, 式(8)中 $\tau_{c1} \rightarrow \infty$, 此时由式(7)可得

$$\begin{cases} t \rightarrow 0 \text{ 时, } f_{41}(t) \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty \text{ 时, } f_{42}(t) \rightarrow \frac{-\sqrt{2}U_N}{2} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $f_{41}(t)$ 为区外金属性故障初始线模电压起始值; $f_{42}(t)$ 为区外金属性故障初始线模电压稳定值。

对式(26)两项进行求差可得

$$\Delta f_4(t) = f_{42}(t) - f_{41}(t) = \frac{\sqrt{2}U_N}{2} \quad (27)$$

对式(25)和式(27)进行比较可得, $\Delta f_3(t) < \Delta f_4(t)$, 因此对端端口与区外金属性故障时, 波形皆呈现下降趋势, 而区外故障时波形陡度较大。

(2) 非金属性故障

当发生非金属性故障时, 即 $R_f \neq 0$, 由式(3)和式(7)可以看出, 对端端口故障与区外故障都能写成两个指数函数叠加的形式, 将其写成如式(28)通式。

$$p(t) = K_1 \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - K_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (28)$$

式中: τ_1 表示与过渡电阻无关的时间常数项; τ_2 表示随过渡电阻变化的时间常数项; K_1 为两个指数项的幅值公因数; K_2 表示权重系数。针对函数极值时间, K_1 对极值时间没有影响; 而 K_2 越大、 τ_2 越小对应的极值时间越小; 此外, τ_2 值越小, 对应的项衰减越快; K_2 越大, 对应的项影响程度越大。下面分别对两种故障情况进行分析。

针对区内端口故障可得

$$K_2 = \frac{Z_{c1} + (Z_{c0} - Z_{c1})/2}{(Z_{c0} - Z_{c1})/2} \quad (29)$$

取 $Z_{c1} = 251 \Omega$, $Z_{c0} = 380 \Omega$, 可得 $K_2 = 4.85$, 可见区内端口故障具有较大的权重系数。当 R_f 较大时, τ_2 较小, 此时初始行波具有极小的极值时间; 而当 R_f 较小时, τ_2 较大, $K_2 e^{-t/\tau_2}$ 作为主导项, 其衰减缓慢, 导致初始行波的波形很平缓。

针对区外故障可得

$$K_2 = \frac{\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{2(\tau_{c1} - \tau_{c2})} \bigg/ \frac{\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{2(\tau_{c1} - \tau_{c2})} = 1 \quad (30)$$

可见区外故障时, 双指数函数的两个指数项具有相同的权重。由于其权重系数较小, 当 τ_2 较大时, 初始行波波形的对端端口故障陡峭; 随着 τ_2 减小, 初始行波极值时间逐渐减小, 但区外故障初始行波的极值时间与对端端口故障仍存在较大差异。

3 基于波形匹配的单端量保护原理

本文第 1 节对不同位置、不同故障类型初始线模电压行波表达式进行推导, 得出了故障线模电压的通式; 第 2 节详细分析了不同故障位置受到后续行波的影响, 定量对后续行波波前进行了分析, 由分析可得, 在一定的时间窗口内, 区内故障会受到第一类与第二类后续行波的影响, 而区外故障不受影响。当后续行波到来时, 原有的波形特征将发生变化, 因此本节根据故障通式生成匹配基准波形, 通过比较基准波形与实际波形差异程度以及基准波形特征实现全线速动保护。

3.1 启动判据与故障选极判据

本文故障启动判据以及故障选极判据沿用文献[21]的方法, 利用改进电压梯度算法实现故障启动, 利用零模电压的极性进行故障选极, 在此不再赘述。

3.2 自适应窗长匹配误差和故障识别判据

3.2.1 时间窗长选取

根据第 2 节的分析可知, 当 $t > 2l/v_1$ 时, 区内故障与区外故障受到后续行波的影响程度具有明显差异, 设启动时刻为 t_q , 启动前 1 个采样周期对应时间为 t_0 , 时间窗长从 t_0 时刻开始计时, 时间窗长 t_{n1} 为

$$t_{n1} = K \cdot 2l/v_1 \quad (31)$$

式中, K 为小于 1 的常数, 本文取为 0.9。

3.2.2 匹配基准波形生成

由第 1 节的分析可知, 线模电压故障初始行波为非线性方程形式, 采用 SQP(序列二次规划)算法生成匹配基准波形, 它的原理是在每次迭代中构建并求解一个二次规划的子问题来近似原始非线性优化问题, 具有对初值要求低、灵活度高、收敛性强的优势。

1) 基函数选取

$$f(x_n) = m e^{-ax_n} + n e^{-bx_n} \quad (32)$$

2) 目标函数选取

$$F(x) = \min \left[\sum_{n=1}^r X_n - f(x_n) \right]^2 \quad (33)$$

式中: X_n 为匹配结果; x_n 为基函数对应的采样点; r 为 3.2.1 节选定时间窗长采样点个数; 其优化目标为使匹配波形尽可能逼近初始故障行波波形。

3.2.3 自适应窗长匹配误差和判据构造

将时间窗长 t_{n1} 内匹配基准波形与实际值的差值进行自适应时窗求和, 对于区内近端端口故障, 由于其故障电压行波通式与基函数表达式不同, 和值较大; 对于区内故障, 在给定时间窗长内会受到后续行波的影响, 和值较大; 对于区外故障, 基准波形与实际波形匹配程度高, 和值较小。定义自适应窗长误差和为 S_n , 其表达式如式(34)所示。

$$S_n = \sum_i |\varepsilon_i|, i \in \{i \text{ to } i+4 \mid \sum_i^{i+4} \text{sgn}(\varepsilon_i) = \pm 5\} \quad (34)$$

式中: ε_i 表示基准波形与实际波形之间的误差; i 表示连续 5 个 ε_i 取同号时对应的采样点。区外故障时, 理论上不受后续行波的影响, S_n 值极小, 设判据整定值为 $S_{n.set}$, $S_{n.set}$ 按照信噪比 30 dB 条件下区外金属性故障进行整定, 当 $S_n > S_{n.set}$ 时, 判定为区内故障。

3.3 匹配波形特征故障识别判据

3.2 节所述的保护判据放大了后续行波的影响差异, 具有较高的灵敏度, 采用了自适应时窗同号误差绝对值求和的方式, 一定程度上消除了噪声的影响。而后续行波幅值的极性交替变化, 当在极近端与极远端发生金属性故障时, 可能出现无法满足连续 5 个及以上 ε_i 同号的情况, 可求出误动范围为

$$\begin{cases} x \leq 2T_s v_1 (\text{近端误动范围}) \\ x \geq l - 2T_s v_1 (\text{近对端误动范围}) \end{cases} \quad (35)$$

式中, T_s 为采样周期。

针对近对端及对端端口故障, 由 2.3 节分析可知, 当过渡电阻较小时, 对端端口故障在故障启动后较短时间匹配波形趋于平缓, 近对端故障波形随着过渡电阻减小、故障距离增大, 后续行波影响逐渐减弱, 逐渐趋近于端口故障; 当过渡电阻较大时, 对端端口故障在故障启动后的匹配波形极值时间迅速减小至一个远小于区外故障极值时间的值, 近对端故障波形随着故障距离的增加, 极值时间逐渐减小。在 t_{n1} 内匹配波形的基础上进行分析, 设置基于匹配波形电压损失与极小值时间的辅助判据。

3.3.1 电压损失识别判据

设置判据波形窗口起始时间在故障启动时间 t_q 的基础上增加一个 t_p 的延时, 从而避免行波传输过程中波形畸变带来的影响。取 $t_p = 2T_s$, 设电压损失判据启动时刻实际波形对应的电压值为 u_{00} , 实际波形在判据启动后 3 个采样点对应的电压值分别为

u_{01} 、 u_{02} 、 u_{03} ; 设电压损失判据启动时刻匹配波形对应的电压值为 u_{10} , 匹配波形在判据启动后 3 个采样点对应的电压值分别为 u_{11} 、 u_{12} 、 u_{13} , 同时对实际波形与匹配波形求取判据启动后 3 个采样点的电压损失, 对其求和后取绝对值, 取二者中较小值 P_n 进行判据整定, 其公式如式(36)所示。

$$\begin{cases} p_{0j} = \frac{u_{0j+1} - u_{0j}}{u_{0j}}, p_{1j} = \frac{u_{1j+1} - u_{1j}}{u_{1j}} (j = 0, 1, 2) \\ P_n = \min \left\{ \left| \sum_{j=0}^2 p_{0j} \right|, \left| \sum_{j=0}^2 p_{1j} \right| \right\} \end{cases} \quad (36)$$

式中, p_{0j} 、 p_{1j} 分别表示实际波形与匹配波形在给定时间窗内的电压损失值, 以区外经高阻接地时的电压损失进行故障整定。为增强保护的耐受高阻故障的能力, 取过渡电阻为 500Ω 短路故障情况的电压损失最小值进行整定, 设其值为 P_{n0} , 则可得整定值 $P_{n.set} = K_{rel} P_{n0}$ ($K_{rel} < 1$), 可得判据如式(37)所示。

$$\begin{cases} P_n > P_{n.set} \rightarrow \text{区外故障} \\ P_n < P_{n.set} \rightarrow \text{区内故障} \end{cases} \quad (37)$$

3.3.2 极小值时间识别判据

对实际波形与匹配波形同时求取极小值时间, 取二者之间较小值进行判据整定, 取故障距离 $x = l - 2T_s v_1$ 处高阻故障进行判据的整定, 为增强保护耐受过渡电阻的能力, 将过渡电阻取为 500Ω , 设此时对应的极小值时间为 t_r , 可设置整定时间 $t_{set} = t_r + NT_s$ (NT_s 为一定的时间裕度), 相应的判据公式为

$$\begin{cases} t_i < t_{set} \rightarrow \text{区内故障} \\ t_i > t_{set} \rightarrow \text{区外故障} \end{cases} \quad (38)$$

式中, t_i 为匹配波形的首个极小值点对应的时刻。

3.3.3 凹凸性识别判据

针对近端故障, 由式(12)可得, 其首个后续行波幅值为正, 因此在故障启动到首个后续行波表达完全时间窗长中匹配波形呈现上凸趋势, 而区外故障匹配波形在故障启动后的较短时间首先呈现凹陷趋势, 由此构造基于匹配波形凹凸性的辅助判据。

首先对时间窗长度进行选取, 设启动时刻为 t_q , 首个极大值时刻为 t_m , 对应的采样点数为 m , 时间窗长从 t_q 时刻开始计时, 时间窗长 t_{n2} 为

$$t_{n2} = (2m - 2)T_s \quad (39)$$

接着对 t_{n2} 内匹配波形凹凸性进行判断, 即利用匹配波形二阶导数 $f''(t_k)$ 大小进行判断, 可得判据如式(40)所示。

$$\begin{cases} f''(t_k) > 0 (k=1,2) \rightarrow \text{区外故障} \\ f''(t_k) < 0 (k=1,2) \rightarrow \text{区内故障} \end{cases} \quad (40)$$

故障识别流程图如附录 D 图 D1 所示。

4 仿真验证

为验证所提行波差异性方向纵联保护的正确性，在 PSCAD/EMTDC 上搭建结构如图 1 所示的 ± 500 kV 的真双极四端柔性直流输电系统。整流侧采用定直流电压控制，逆变侧采用定有功功率控制；直流线路长度为 300 km；柔直系统参数、架空线路的频变参数参见附录 E。通过计算得到线模波阻抗 $Z_{cl} = 251 \Omega$ 、零模波阻抗 $Z_{c0} = 380 \Omega$ ；换流器等效电感 $L_l = 0.033$ H；限流电抗器感值 $L_m = 0.1$ H；保护采样频率为 50 kHz，即 $T_s = 20 \mu s$ 。以保护 R 为例，对所提判据进行仿真验证，各个保护判据整定值如表 2 所示。

表 2 故障判别判据整定值

Table 2 Setting values of fault identification criteria

$S_{n.set}$	$f''(t_k)$	$P_{n.set}$	t_{set}
80	< 0	0.25	$5T_s$

4.1 不同故障类型判据有效性验证

1) 不同故障位置匹配波形仿真图如图 5 所示。

由仿真结果可得，区内故障与区内近端口故障时实际值与匹配值之间存在较大的误差；区外故障时与区内对端端口故障时，实际值与匹配值高度重合；区内近端与近对端发生金属性故障时，实际

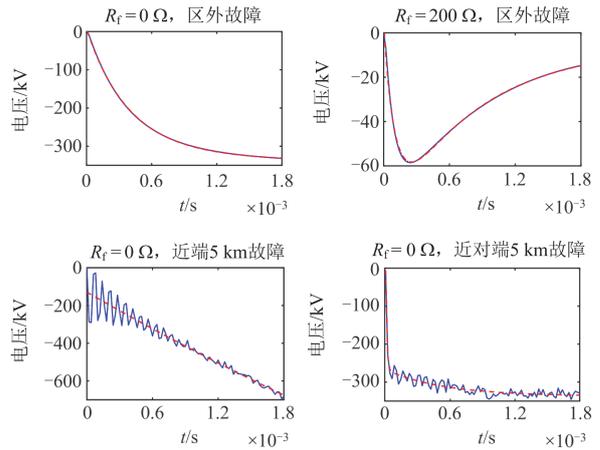
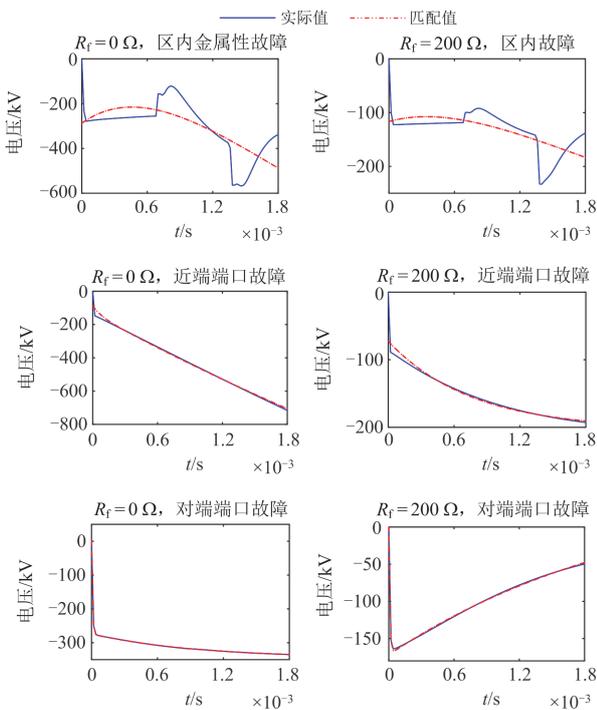


图 5 不同故障位置匹配波形仿真图

Fig. 5 Simulation waveform matching at different fault locations

值波形呈现波动的特征，与前文理论分析一致。

2) 不同故障条件下保护动作情况

对不同故障位置、故障类型进行仿真验证，可得结果如表 3 和表 4 所示。

4.2 抗干扰能力分析

本文提出的保护判据具有较强的抗干扰能力，首先，自适应窗长匹配误差和判据选取连续 5 个同号误差进行求和，而噪声具有随机波动的特性，因此此种判据方法可以很大程度上抑制噪声的干扰；对于基于波形特征的判据，其利用了匹配波形的特征进行判断，在匹配波形的过程中就消除了噪声的影响，因此具有很强的抗噪声干扰能力。经数次仿真验证，本文所提保护判据在加入信噪比为 30 dB 的噪声后，保护依然能够可靠动作。

4.3 与现有保护原理对比

本文提出的保护原理简单且能够对线路全线进行保护，与文献[9-13]相比，本文保护判据仅基于故障量的时域分量进行保护判据的构造，不需要引入频域进行分析，数据处理简单，且本文保护判据利用了后续行波的特征进行构造，不存在保护死区。文献[18]利用了归一化拟合残差进行判据构造，它的整定需要遍历所有故障类型，且在近端故障时保护灵敏度不足。表 5 为本文保护方法与文献[18]保护方法灵敏度对比，可以看出本文保护方法在所有故障位置都具有更高的灵敏度。

5 结论

为了解决目前柔性直流输电线路单端量保护在近端、近对端以及端口故障时保护存在死区以及灵敏度不足的问题，本文对故障初始电压行波表达式

表3 区内故障识别判据动作情况

Table 3 Performance of identification criterions in case of internal faults

故障位置	故障距离/km	过渡电阻/ Ω	自适应窗长匹配 误差判据				匹配波形特征				保护动作情况
			S_n	(Y/N)	$f''(t_k)$	(Y/N)	P_n	(Y/N)	t_i	(Y/N)	
正极	0	0	300.17	Y	—	—	—	—	—	—	区内正极故障
		100	220.99	Y	—	—	—	—	—	—	区内正极故障
		500	140.02	Y	—	—	—	—	—	—	区内正极故障
	300	0	23.71	N	>0	N	0.015	Y	—	—	区内正极故障
		100	73.47	N	>0	N	0.009	Y	$2T_s$	Y	区内正极故障
		500	35.04	N	>0	N	0.061	Y	T_s	Y	区内正极故障
负极	10	0	0	N	<0	Y	0.06	Y	—	—	区内负极故障
		100	83.71	Y	<0	Y	0.063	Y	—	—	区内负极故障
		500	40.92	N	<0	Y	0.02	Y	—	—	区内负极故障
	290	0	20.83	N	>0	N	0.040	Y	—	—	区内负极故障
		100	93.62	Y	>0	N	0.109	Y	$4T_s$	Y	区内负极故障
		500	48.71	N	>0	N	0.204	Y	$4T_s$	Y	区内负极故障
双极	100	0	19 942.43	Y	—	—	—	—	—	—	区内极间故障
		100	9283.12	Y	—	—	—	—	—	—	区内极间故障
		500	2875.07	Y	—	—	—	—	—	—	区内极间故障
	200	0	8684.97	Y	—	—	—	—	—	—	区内极间故障
		100	6527.59	Y	—	—	—	—	—	—	区内极间故障
		500	3122.01	Y	—	—	—	—	—	—	区内极间故障

表4 区外故障识别判据动作情况

Table 4 Performance of identification criterions in case of external faults

故障位置	过渡电阻/ Ω	自适应窗长匹配 误差判据				匹配波形特征				保护动作情况
		S_n	(Y/N)	$f''(t_k)$	(Y/N)	P_n	(Y/N)	t_i	(Y/N)	
单极 区外	0	25.26	N	>0	N	0.625	N	—	N	区外正极故障
	100	16.86	N	>0	N	0.493	N	$16T_s$	N	区外正极故障
	500	4.70	N	>0	N	0.325	N	$6T_s$	N	区外正极故障
双极 区外	0	40.91	N	>0	N	0.685	N	—	N	区外负极故障
	100	39.40	N	>0	N	0.550	N	$24T_s$	N	区外负极故障
	500	40.24	N	>0	N	0.310	N	$6T_s$	N	区外负极故障

表5 故障识别判据灵敏度对比

Table 5 Comparison of sensitivity of fault identification criterions

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	文献[18]方法 灵敏度	本文方法 灵敏度
0	0	1.10	3.75
	200	1.47	2.50
	500	1.02	1.75
200	0	4.63	32.94
	200	3.79	18.00
	500	3.58	10.85
300	0	8.84	16.66
	200	4.76	27.78
	500	2.98	8.00

进行了解析。在定量分析了不同类型后续行波的基础上, 利用区内外故障受后续行波影响差异构造保护判据, 通过理论分析及仿真验证可得如下结论:

1) 所提保护采用了自适应窗长匹配误差和判据, 具有较强的抗噪声干扰的能力, 此外, 此判据采用同号求和的方法, 放大了区内外故障差异, 保护具有很高的灵敏度。

2) 本文利用匹配波形的波形特征构造辅助判据, 使得该保护能够准确识别对端、近对端以及端口故障, 保护不存在死区, 保护可靠性强。

3) 该保护所有判据均基于故障波形的时域量进行判断, 方法易实现, 具有较好的工程应用价值。

附录 A

1) 单极接地故障边界条件

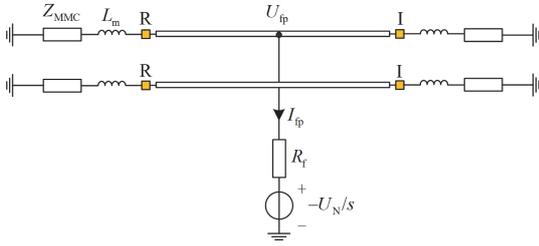


图 A1 单极接地故障示意图

Fig. A1 Schematic diagram of single-pole grounding fault

相域边界条件为

$$\begin{cases} U_{fp} = -\frac{U_N}{s} + I_{fp} R_f \\ I_{fp} = 0 \end{cases} \quad (A1)$$

模域边界条件为

$$\begin{cases} U_{f1} + U_{f0} = -\frac{\sqrt{2}U_N}{s} + I_{f1} \cdot 2R_f \\ I_{f1} = I_{f0} \end{cases} \quad (A2)$$

式中： U_{f1} 、 U_{f0} 分别表示线模、零模故障电压分量； I_{f1} 、 I_{f0} 分别表示线模、零模故障电流分量。

由式(A1)、式(A2)可得，当线路发生单极接地故障时，其零模故障分量等效网络与线模故障分量等效网络为串联的关系。

2) 双极接地故障边界条件

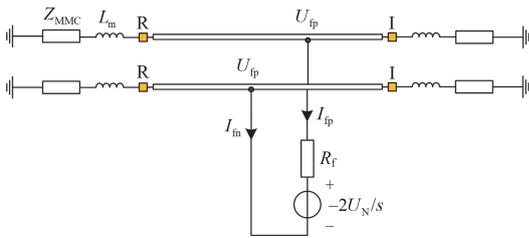


图 A2 双极故障示意图

Fig. A2 Schematic diagram of bipolar fault

相域边界条件为

$$\begin{cases} U_{fp} = U_{fn} - \frac{2U_N}{s} + I_{fp} \cdot R_f \\ I_{fp} = -I_{fn} \end{cases} \quad (A3)$$

模域边界条件为

$$\begin{cases} U_{f1} = -\frac{2U_N}{\sqrt{2}s} + I_{f1} \cdot \frac{1}{2} R_f \\ I_{f0} = 0 \end{cases} \quad (A4)$$

式中： U_{fp} 、 U_{fn} 分别表示正极、负极故障电压分量；

I_{fp} 、 I_{fn} 分别表示正极、负极故障电流分量。

由式(A3)、式(A4)可得，当线路发生双极故障时，其零模故障分量等效网络不存在。

附录 B

1) f_1 单极接地故障

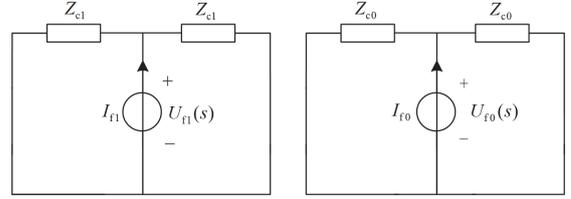


图 B1 区内故障模量等效网络图

Fig. B1 Fault modulus equivalent network diagram in the region

结合式(A2)和图 B1 所示等效网络图可得 f_1 故障时线模故障电压表达式为

$$U_{f1}(s) = -\frac{\sqrt{2}U_N}{s} \frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \quad (B1)$$

对其进行拉氏反变换，可得其近似为一常数，即

$$f_1(t) = -\frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \quad (B2)$$

2) f_3 单极接地故障

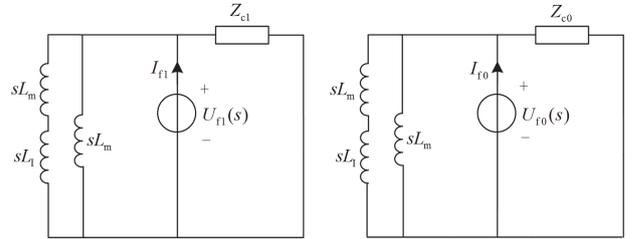


图 B2 区内对端口故障模量等效网络图

Fig. B2 Peer port fault modulus equivalent network diagram

结合式(A2)和图 B2 所示等效网络图可得 f_3 故障时线模故障电压初始行波表达式为

$$U_{f1}(s) = -\frac{\sqrt{2}U_N}{s} \frac{Z_{c1} // sL_n}{Z_{c1} // sL_n + Z_{c0} // sL_n + 2R_f} \quad (B3)$$

将表达式进行一阶近似^[19]并进行拉氏反变换，可得时域表达式为

$$f_3(t) = \frac{\sqrt{2}U_N (Z_{c0} - Z_{c1}) / 2}{Z_{c1} + Z_{c0} + 2R_f} e^{-\frac{t}{\tau_{b1}}} - \frac{\sqrt{2}U_N (Z_{c1} + (Z_{c0} - Z_{c1}) / 2)}{Z_{c1} + Z_{c0} + 2R_f} e^{-\frac{t}{\tau_{b2}}} \quad (B4)$$

其中

$$\begin{cases} \tau_{b1} = \frac{(Z_{c1} + Z_{c0})L_n}{2Z_{c1}Z_{c0}} \\ \tau_{b2} = \frac{L_n(Z_{c1} + Z_{c0} + 2R_f)}{R_f(Z_{c1} + Z_{c0})} \end{cases} \quad (\text{B5})$$

3) f_2 单极接地故障

当发生近端端口故障时, 其等效故障模量网络图与对端端口故障时相同, 此时理论上已经不存在行波, 保护装置仅根据行波提取公式得到伪故障电压行波 U_{f11} , 其表达式如式(B6)。

$$\begin{cases} U_{f11}(s) = \frac{1}{2}(U_{f1} - I_{f1}Z_{c1}) \\ I_{f1} = -\frac{U_{f1}}{sL_n} \end{cases} \quad (\text{B6})$$

其中 U_{f1} 表达式与式(B3)相同, 对其进行拉氏反变换可以得到时域表达式如式(B7)。

$$f_2(t) = -\frac{b_1}{2} \left(\frac{\tau_{b1}Z_{c1} - L_n}{L_n} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{b1}}} + \frac{b_2}{2} \left(\frac{\tau_{b2}Z_{c1} - L_n}{L_n} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{b2}}} - \frac{b_0}{2} - \frac{b_1}{2} \frac{L_n - \tau_{b1}Z_{c1}}{L_n} + \frac{b_2}{2} \frac{L_n - \tau_{b2}Z_{c1}}{L_n} \quad (\text{B7})$$

其中

$$\begin{cases} b_0 = \frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c0} + Z_{c1} + 2R_f} \\ b_1 = \frac{\sqrt{2}U_N (Z_{c0} - Z_{c1})/2}{Z_{c0} + Z_{c1} + 2R_f} \\ b_2 = \frac{\sqrt{2}U_N (Z_{c1} + (Z_{c0} - Z_{c1})/2)}{Z_{c0} + Z_{c1} + 2R_f} \end{cases} \quad (\text{B8})$$

4) f_4 单极接地故障

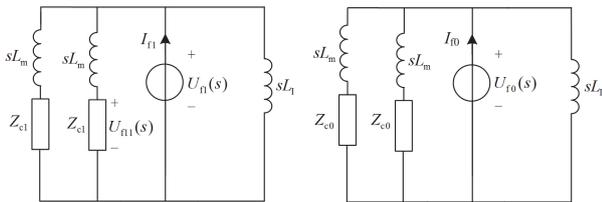


图 B3 区外故障模量等效网络图

Fig. B3 External fault modulus equivalent network diagram

结合式(A2)与图 B3 所示等效网络图可得 f_4 故障时线模故障电压初始行波表达式为

$$U_{f11}(s) = U_n(s) \cdot \frac{Z_{c1}}{Z_{c1} + sL_m} \quad (\text{B9})$$

由于在行波暂态期间串联电路中电感起主要作用, 因此可得

$$U_{f1}(s) = -\frac{\sqrt{2}U_N}{s} \frac{s \left(L_1 // \frac{1}{2} L_m \right)}{2s \left(L_1 // \frac{1}{2} L_m \right) + 2R_f} \quad (\text{B10})$$

将式(B10)进行一阶近似并进行拉氏反变换可得时域表达式如式(B11)。

$$f_4(t) = \frac{-\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{2(\tau_{c1} - \tau_{c2})} e^{-\frac{t}{\tau_{c1}}} + \frac{\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{2(\tau_{c1} - \tau_{c2})} e^{-\frac{t}{\tau_{c2}}} \quad (\text{B11})$$

其中

$$\begin{cases} \tau_{c1} = \frac{\frac{1}{2} L_m // L_1}{R_f} \\ \tau_{c2} = \frac{L_m}{Z_{c1}} \end{cases} \quad (\text{B12})$$

以上表达式推导皆基于单极接地故障情况, 当输电线路发生双极故障时, 故障边界条件与单极接地故障不同, 其表达式如式(A3)、式(A4)所示, 而对于不同故障位置, 其零模等效网络图不存在, 线模等效网络图与对应故障位置的单极接地故障的相同, 因此可得

$$f_1(t) = -\frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + R_f} \quad (\text{B13})$$

$$f_2(t) = -\frac{U_N Z_{c1} (\tau_f \tau_d - \tau_d^2)}{\sqrt{2} \tau_f \tau_d \left(\frac{R_f}{2} + Z_{c1} \right)} e^{-\frac{t}{\tau_d}} - \frac{U_N Z_{c1} \tau_d}{\sqrt{2} \tau_f \left(\frac{R_f}{2} + Z_{c1} \right)} \quad (\text{B14})$$

$$f_3(t) = -\frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + R_f/2} e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (\text{B15})$$

$$f_4(t) = \frac{2\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{\tau_{c2} - 2\tau_{c1}} e^{-\frac{t}{2\tau_{c1}}} - \frac{2\sqrt{2}U_N \tau_{c1}}{\tau_{c2} - 2\tau_{c1}} e^{-\frac{t}{\tau_{c2}}} \quad (\text{B16})$$

式中: $\tau_d = \frac{L_n}{Z_{c1} // (R_f/2)}$; $\tau_f = \frac{L_n}{Z_{c1}}$ 。

1) $f_2(t)$ 与 $f_4(t)$ 对比

当 $R_f = 0$ 时可得

$$\begin{cases} t \rightarrow 0 \text{ 时, } f_{41}(t) \rightarrow 0 \\ t \rightarrow \infty \text{ 时, } f_{42}(t) \rightarrow -\sqrt{2}U_N \end{cases} \quad (\text{B17})$$

$$\Delta f_4(t) = f_{42}(t) - f_{41}(t) = \sqrt{2}U_N \quad (\text{B18})$$

同时可得

$$\begin{cases} \tau_d \rightarrow 0 \\ f_2(t) \rightarrow -\frac{U_N Z_{c1}}{\sqrt{2}(R_f/2 + Z_{c1})} \end{cases} \quad (\text{B19})$$

由此可得, 发生双极金属性故障时, 区外故障时故障电压行波衰减快, 波形陡峭; 而保护启动后区内近端故障波形近似为一条直线, 波形平缓。

当 $R_f \neq 0$ 时可得

$$\tau_d = \frac{L_n}{Z_{c1} // (R_f / 2)} > \frac{1}{2} \frac{L_m}{Z_{c1} // (R_f / 2)} \quad (B20)$$

当 $R_f < 2Z_{c1}$ 时, $\tau_d > \tau_{c2}$; 当 $R_f > 2Z_{c1}$ 时, $\tau_d > \tau_{c1}$, 由此可得发生双极非金属性故障时, 区内近端故障波形衰减速率小于区外故障, 波形较平缓。

2) $f_3(t)$ 与 $f_4(t)$ 对比

当 $R_f = 0$ 时可得

$$f_3(t) = -\frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + R_f / 2} \quad (B21)$$

当 $R_f \neq 0$ 时可得

$$f_3'(t) = -\frac{\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{Z_{c1} + R_f / 2} \cdot \left(-\frac{1}{\tau_d}\right) > 0 \quad (B22)$$

此时可得 $f_3(t)$ 波形单调递增, 理论上在零点处取极小值。

因此, 当发生金属性故障时, 保护启动后区内对端故障波形近似为一条直线, 波形较区外故障平缓; 而当发生非金属性故障时, 区内对端故障在启动时刻即为极小值点, 其极值时间远小于区外故障。

附录 C

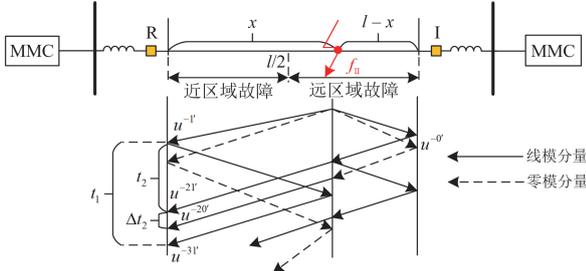


图 C1 区域故障电压行波传播示意图

Fig. C1 Schematic diagram of regional fault voltage traveling wave propagation

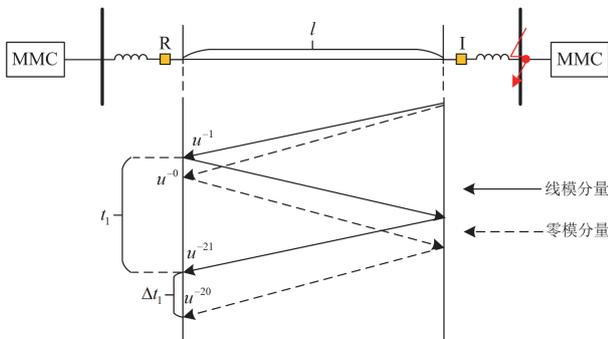


图 C2 区外故障电压行波传播示意图

Fig. C2 Schematic diagram of external fault voltage traveling wave propagation

附录 D

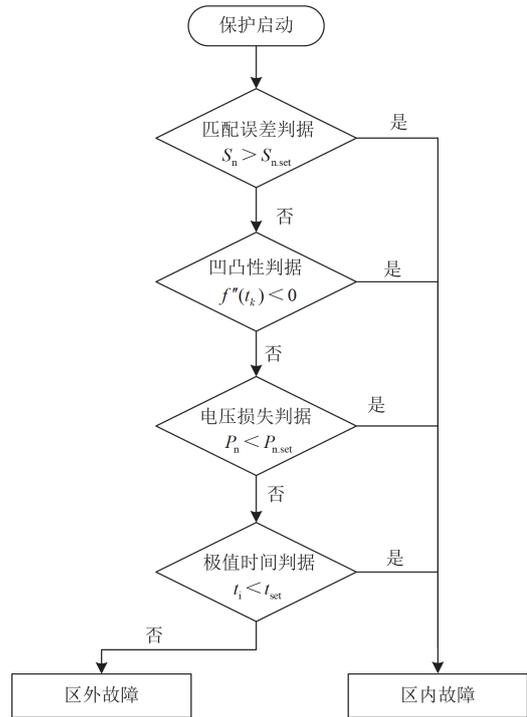


图 D1 保护故障识别流程图

Fig. D1 Protection fault identification flow chart

附录 E

表 E1 柔性直流系统参数

Table E1 Flexible HVDC system parameters

系统参数	数值
MMC 额定容量	750 MVA
交流额定电压	230 kV
连接变压器额定电压	230 kV/175 kV
绕组联结组别标号	Yn/D
联结变压器短路阻抗	10%
桥臂子模块数	238
桥臂电感值	50 mH
子模块电容值	5.1 mF
线路长度	500 km

表 E2 直流输电线路参数

Table E2 DC transmission line parameters

线型	参数	数值
导线	导线半径/m	0.020 345 4
	直流电阻/(Ω/km)	0.022 75
地线	地线半径/m	0.005 524 5
	直流电阻/(Ω/km)	2.8645

参考文献

[1] 杨赛昭, 向往, 文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护

- 综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6600-6617.
- YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6600-6617.
- [2] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
- LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [3] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.
- LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [4] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 柔性直流配电系统故障后快速恢复方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2738-2744.
- WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Research on fast recovery method after fault for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2738-2744.
- [5] 张冰, 赵书强, 甄永赞. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 58-63.
- ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 58-63.
- [6] 王渝红, 傅云涛, 曾琦, 等. 柔性直流电网故障保护关键技术综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2362-2374.
- WANG Yuhong, FU Yuntao, ZENG Qi, et al. Review on key techniques for fault protection of flexible DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2362-2374.
- [7] 贾科, 姚昆鹏, 刘子奕, 等. 基于故障行波差异性的柔性直流输电线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2616-2627.
- JIA Ke, YAO Kunpeng, LIU Ziyi, et al. Pilot protection for flexible HVDC transmission lines based on the difference of fault traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2616-2627.
- [8] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 31-42.
- GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 31-42.
- [9] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multiterminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
- [10] 陈仕龙, 曹蕊蕊, 毕贵红, 等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 67-72.
- CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, et al. Single-end current direction transient protection based on morphology for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 67-72.
- [11] 薛士敏, 陈硕, 顾诚, 等. 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 45-53.
- XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 45-53.
- [12] 张成, 王昕, 郑益慧, 等. 基于聚类经验模态分解和差分熵的输电线路故障测距研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 86-92.
- ZHANG Cheng, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Study on fault location for transmission lines based on EEMD and DE[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21): 86-92.
- [13] 曾哲, 邓丰, 张振, 等. 基于 VMD-WVD 的故障行波全波形时-频分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 49-57.
- ZENG Zhe, DENG Feng, ZHANG Zhen, et al. Time frequency analysis of a traveling wave based on VMD and WVD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 49-57.
- [14] 杨明杰, 童晓阳, 张广骁. 基于极波模量时差的高压直流输电线路自适应单端保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 117-124.
- YANG Mingjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Adaptive single-end protection for HVDC transmission line based on time difference of pole wave mode components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 117-124.
- [15] 戴志辉, 刘自强, 刘雪燕, 等. 基于首行波曲率的柔性直流输电线路单端量保护[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1831-1841.

- DAI Zhihui, LIU Ziqiang, LIU Xueyan, et al. Single-ended protection for flexible DC transmission line based on curvature of initial traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1831-1841.
- [16] 张晨浩, 宋国兵, 李洋, 等. 基于故障电压行波传播项指数系数的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8424-8436.
- ZHANG Chenhao, SONG Guobing, LI Yang, et al. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC grids based on index of fault voltage traveling wave propagation term[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8424-8436.
- [17] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 利用故障电流首行波拟合的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2651-2660.
- ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC transmission line using fault current initial traveling wave fitting[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2651-2660.
- [18] 李海锋, 蒋慧敏, 梁远升, 等. 基于故障电压反行波拟合残差的柔性直流线路单端行波保护[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5120-5128.
- LI Haifeng, JIANG Huimin, LIANG Yuansheng, et al. Non-unit traveling wave protection for flexible DC lines based on the fitting residual of fault voltage reverse traveling wave[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5120-5128.
- [19] 陈淼, 贾科, 姚昆鹏, 等. 基于故障前行波极值时间的柔性直流线路单端量保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3742-3758.
- CHEN Miao, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. Single-ended protection method of flexible DC line based on extremum time of fault forward traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3742-3758.
- [20] 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.
- [21] 贾科, 姚昆鹏, 刘子奕, 等. 基于模量行波差异的柔性直流输电线路单端量保护方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 112-120.
- JIA Ke, YAO Kunpeng, LIU Ziyi, et al. Non-unit protection method for flexible DC transmission line based on traveling wave difference of mode component[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 112-120.
- [22] 戴志辉, 牛宝仪, 邱宏逸, 等. 基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 649-659.
- DAI Zhihui, NIU Baoyi, QIU Hongyi, et al. Single-ended protection scheme for multi-terminal hybrid DC lines based on initial current travelling wave phase[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 649-659.
- [23] 陈淼, 贾科, 王康达, 等. 基于前行波波形特征的柔性直流输电线路单端行波保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2386-2393.
- CHEN Miao, JIA Ke, WANG Kangda, et al. Single terminal traveling wave protection for flexible HVDC transmission lines based on forward wave shape information[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2386-2393.
- [24] 王洪彬, 周念成, 王伟, 等. 基于行波模态分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 109-120.
- WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 109-120.

收稿日期: 2024-03-06; 修回日期: 2024-07-24

作者简介:

贾科(1986—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制, 新型配电网保护与故障定位;

E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn

刘可歆(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电线路保护。E-mail: Lkx1289016464@163.com

(编辑 魏小丽)