

[直流输电线路]

基于故障电压标准差系数的混合直流输电线路保护新原理

文/蔡博

国网江苏省电力有限公司超高压分公司

现有的直流输电线路故障识别方法可能在混合直流输电系统中存在保护适用性问题。在此背景下，推导出不同故障场景下线路线模故障分量电压（FCV）的时域表达式，并提出一种基于线模故障电压标准差系数的线路保护新原理。在分析线模故障分量电压时域表达式的基础上，定义了比较电压，理论推导得到，对于直流线路区内故障，线模故障电压与比较电压成正比，二者电压比为恒定值，不随时间变化。而对于区外故障，线模故障电压与比较电压不成正比，两者电压比是一个随时间变化的量。因此，采用标准偏差系数来表征电压比的波动情况，以辨识直流线路区内外故障。大量仿真验证该方法的有效性，该方法能够正确、可靠识别区内外故障，且具有较高的抗过渡电阻能力。

基于电网换相换流器的高压直流（Line Commutated Converter-based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC）输电以其传输容量大、功率损耗低的优点得到广泛的应用^[1-2]，但其依赖于交流系统，交流故障易引起直流侧换相失败的发生^[2-5]。模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC）作为电压源型换流器（Voltage Source Converter, VSC）的一种，可以有效避免直流换相失败。此外，基于MMC的柔性直流输电可控性强，谐波含量低，功率解耦控制，在新能源发电、异步电网互联等方面应用前景广阔^[3-5]。混合级联直流输电系统是一种典型的混合直流输电系统，它综合了LCC-HVDC和MMC-HVDC的优点^[6-10]，其送端采用LCC换流站，受端由LCC换流站和MMC换流站级联而成。该拓扑结构提供更灵活的输电方式，不仅提高逆变侧交流系统电压的稳定性，还降低直流换相失败的概率。同时，实现向多个负荷中心供电，促进能源消耗^[6-10]。

直流线路保护的可靠性是保证直流系统安全运

行的前提。然而，混合多端直流系统的拓扑结构和运行方式与传统的LCC-HVDC和VSC-HVDC输电系统不同，线路故障特征存在较大差异^[7-9]。因此，传统的LCC或VSC输电线路保护不适用于混合多端直流系统，亟需研究性能良好的混合多端直流输电线路保护^[7-9]。

HVDC线路保护可分为单端量保护和双端量保护^[11-13]。作为线路主保护的行波保护基于线路首端的电压行波变化量和变化率来判别区内外故障，动作速度快，但其可靠性受过渡电阻和外界干扰的影响^[12-13]。文献[13]提出一种基于电压反行波高频小波能量的单端量线路保护，耐过渡电阻能力强，但保护门槛值的整定依赖于仿真。文献[14-15]基于特定频带单端电压或电流识别线路故障，速动性好，但无法灵敏地反映长线路末端高阻接地故障。

双端量保护需利用线路两端的电气量来判别故障。如文献[16]提出基于小波能量相对熵的纵联保护，该保护计算量大，速动性较差。文献[17]基于特定频率电流构成保护，保护选择性强，但对线路

两端数据同步性要求高。文献[18]提出基于电流突变特征的双端量保护，无须两端数据同步，但耐过渡电阻能力差。文献[19]提出一种基于特征电流谐波的线路保护，但其保护判据门槛值的整定缺乏理论依据。

在混合级联多端直流输电系统中为分散传输功率，降低对MMC传输能力的要求，逆变侧的低压阀组常采用多个MMC换流站并联运行的方式^[8-9]。相应地，有多条直流线路连接高压阀组LCC换流站和低压阀组MMC换流站。当其中任意一条线路发生故障时，均需快速准确识别故障线路。然而，目前混合级联多端直流输电线路保护的相关研究较少^[8]。

鉴于上述问题，本文提出一种基于线模故障电压标准差系数的混合直流输电线路保护新原理。对LCC/MMC混合多端直流输电系统进行暂态行波故障分析建模，定量推导不同故障场景下线路线模故障电压解析表达式，并基于对电压解析表达式的分析，提出采用标准差系数来表征线模电压比值的波动程度，构造区内故障判别元件。理论分析和仿真实验表明，提出的保护方案能够快速、可靠地判别区内和区外故障，耐过渡电阻能力强，可靠性高。

混合直流输电系统

图1给出混合直流输电系统的拓扑。混合直流输电的送端一般位于能源资源丰富的地区，采用LCC换流器。受端位于用电负荷相对集中的地区，由高压阀组LCC换流站与低压阀组MMC换流站级联而成。由于用地限制，在混合直流输电的受端，LCC换流站与MMC换流站分站建设^[7-10]。在受端经济发达地区的边缘建设一个LCC换流站，将部分直流功率转换为交流功率，再通过直流线路将LCC换流站与MMC换流站相连，将剩余电力深入传送到发达地区各个角落^[7-10]。其中，受端常采用三个MMC换流站并联运行的方式来分散传输功率，降低对MMC传输能力的要求^[8-10]。该拓扑能实现向多个负荷中心馈入电能，此外充分利用直流输电走廊利用率高、传输功率大的优点^[8]。

如图1所示，送端LCC换流站和受端LCC换流站通过直流线路 L_0 相连。受端高压阀组LCC换流站与

低压阀组MMC换流站通过直流线路 $L_1 \sim L_3$ 连接。限流电抗器可以抑制故障电流的上升，配合直流断路器切断故障线路，因此通常在直流线路两端配置限流电抗器^[7-9]。图1中， L_{dc1} 表示直流线路 L_0 两端的限流电抗器， L_{dc} 表示直流线路 $L_1 \sim L_3$ 两端的限流电抗器。 $m_1 \sim m_3$ 为测量点。 $f_0 \sim f_7$ 表示故障点。

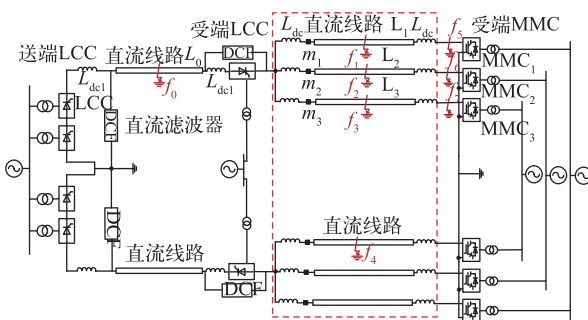


图1 混合直流输电系统结构示意图

当直流线路 L_0 发生单极接地故障时（图1中的 f_0 ），由于晶闸管的单向导电性，受端低压阀组MMC子模块中存储的能量无法通过高压阀组LCC向故障点馈入电流，此时放电等效电路与传统LCC-HVDC相似^[7,19]。常规行波保护和突变量保护仍适用于直流线路 L_0 ，直流线路 L_0 两端无须配置直流断路器^{[7], [9]}。当直流线路 L_1 、 L_2 或 L_3 发生单极接地故障时（图1中的 f_1 、 f_2 或 f_3 ），如 f_1 故障后，不仅MMC₁子模块电容向故障点放电，高压阀组LCC以及另外两个换流阀MMC₂和MMC₃也会向故障点注入故障电流，此时故障电流的上升速度远大于传统的LCC-HVDC或VSC-HVDC^{[7]-[9]}，对线路保护动作性能要求更高，故障分析更为复杂。因此，本文主要针对直流线路 L_1 、 L_2 和 L_3 的线路保护进行研究。

故障特征分析

1. 区内故障分析

以直流线路 L_1 发生单极接地故障为例，进行详细故障特性分析（图1中 f_1 故障）。如图2所示，当发生 f_1 故障后，故障行波从故障点沿线路传至线路边界时会发生反射和折射。图2中， U_{bm11} 和 U_{fm11} 分别为测点 m_1 处线模故障电压反行波和前行波， U_{m11} 为测点 m_1 处线模故障电压分量， Z_{C1} 为直流线路线模波阻抗， Z_{LCC} 为LCC支路等值阻抗。

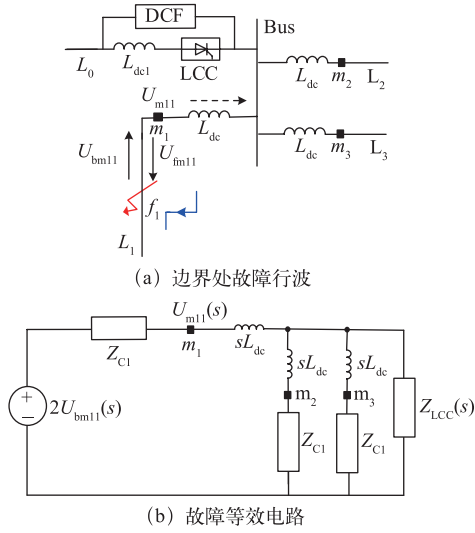


图2 直流线路L1故障示意图

$$U_{bm11}(s) = U_{f1}(s) \times A_{m1}(s) \quad (1)$$

式中, U_{f1} 为故障点线模故障电压行波。

$$U_{f1}(s) = \frac{-\sqrt{2}U_d Z_{C1}}{s(Z_{C0} + Z_{C1} + 4R_f)} \quad (2)$$

式中, U_d 为故障前故障点电压; R_f 为过渡电阻; Z_{C0} 为直流线路地模波阻抗。

在式 (1) 中, A_{m1} 为故障行波从故障点传至测点 m_1 时的传递函数, 如式 (3) 所示。

$$A_{m1}(s) = \frac{1 - k_a l_{m1}}{1 + s\tau_a l_{m1}} e^{-s l_{m1} / v_1} \quad (3)$$

式中, k_a 和 τ_a 分别为线模分量衰减系数和色散时间常数; l_{m1} 为故障点到测点 m_1 的距离; v_1 为线模故障行波传播速度。

由图2可知, 测点 m_1 处线模电压故障分量 U_{m11} 可表示为

$$U_{m11}(s) = 2U_{bm11}(s) \frac{sL_{dc} + Z_{equ}(s)}{sL_{dc} + Z_{equ}(s) + Z_{C1}} \quad (4)$$

$$Z_{equ}(s) = \frac{(sL_{dc} + Z_{C1}) \times Z_{LCC}(s)}{sL_{dc} + Z_{C1} + 2Z_{LCC}(s)} \quad (5)$$

$$Z_{LCC}(s) = \frac{(sL_{dc1} + Z_{con}(s)) \times Z_{DCF}(s)}{sL_{dc1} + Z_{con}(s) + Z_{DCF}(s)} + Z_{C21} \quad (6)$$

式中, Z_{con} 和 Z_{DCF} 分别为 LCC 换流器和直流滤波器的等效阻抗; Z_{C21} 为直流线路 L_0 线模波阻抗。

考虑到直流滤波器高频频带等效电感值 sL_D 远小于平波电抗器电感与 LCC 换流器高频等效电感之和, 即 $sL_D \ll sL_{dc1} + sL_{con}$, 故可将式 (6) 中 $Z_{LCC}(s)$ 等效为 $sL_D + Z_{C21}$ 。

可得到区内故障时, 测点 m_1 处线模电压故障分量 U_{m11} 可表示为

$$U_{m11}(s) = \frac{2}{s} \frac{sL_{dc} + Z_{eq}(s)}{sL_{dc} + Z_{eq}(s) + Z_{C1}} \frac{1 - k_a l_{m1}}{1 + s\tau_a l_{m1}} e^{-s l_{m1} / v_1} \Delta u_{f1} \quad (7)$$

$$Z_{eq}(s) = \frac{(sL_{dc} + Z_{C1}) \times (sL_D + Z_{C21})}{(sL_{dc} + Z_{C1}) + 2(sL_D + Z_{C21})} \quad (8)$$

$$\Delta u_{f1} = \frac{-\sqrt{2}U_d Z_{C1}}{Z_{C0} + Z_{C1} + 4R_f} \quad (9)$$

对式 (7) 进行拉普拉斯反变换, 求出电压 U_{m11} 的时域解析表达式为

$$u_{m11}(t) = A_1 e^{-Z_{C1} t / L_{dk}} + B_1 e^{-(Z_{C1} + 3Z_{C21}) t / (L_{dk} + 3L_D)} + C_1 e^{-t / (\tau_a l_{m1})} + D_1 \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{4\Delta u_{f1} L_{dk} (1 - k_a l_{m1})}{3(L_{dc} - \tau_a l_{m1} Z_{C1})} \quad (11)$$

$$B_1 = \frac{2\Delta u_{f1} Z_{C1} (L_{dc} + 3L_D) (1 - k_a l_{m1})}{3(Z_{C1} + 3Z_{C21}) (L_{dc} + 3L_D - \tau_a l_{m1} Z_{C1} - 3\tau_a l_{m1} Z_{C21})} \quad (12)$$

$$C_{11} = L_D \tau_a l_{m1}^2 Z_{C1} + \tau_a^2 l_{m1}^2 Z_{C1} Z_{C21} \quad (13)$$

$$D_1 = -\frac{2Z_{C21} \Delta u_{f1} (k_a l_{m1} - 1)}{Z_{C1} + 3Z_{C21}} \quad (14)$$

式 (10) 中, 故障电压 u_{m11} 由行波传播项 $C_1 e^{-t / (\tau_a l_{m1})}$ 、行波边界项 $A_1 e^{-Z_{C1} t / L_{dk}} + B_1 e^{-(Z_{C1} + 3Z_{C21}) t / (L_{dk} + 3L_D)}$ 以及常数项 D_1 构成。线模色散时间常数 τ_a 常较小 ($10^{-11} \sim 10^{-8} / \text{km}$), 因此, $1 / (\tau_a l_{m1})$ 通常是一个很大的值。结合高压直流工程中, 平波电抗器的电感值一般为 75 ~ 400 mH, 直流滤波器等效电感一般为 5 ~ 20 mH, 线路线模波阻抗一般为 200 ~ 500 Ω ^[20-22], 则推出上述物理量满足式 (15)。

$$\frac{1}{\tau_a l_{m1}} > \frac{1}{\tau_a l_s} \gg \frac{Z_{C1}}{L_{dc}}, \quad \frac{1}{\tau_a l_{m1}} > \frac{1}{\tau_a l_s} \gg \frac{Z_{C1} + 3Z_{C21}}{L_{dc} + 3L_D} \quad (15)$$

因此, 与行波传播项相比, 行波边界项占主导地位, 行波传播项 $C_1 e^{-t / (\tau_a l_{m1})}$ 会迅速下降至 0。另外, 由于线模衰减系数 k_a 较小 ($10^{-10} \sim 10^{-5} / \text{km}$), 因此, u_{m11} 的表达式可由式 (10) 化简为式 (16)。

$$u_{m11}(t) = A_{11} e^{-Z_{C1} t / L_{dk}} + B_{11} e^{-(Z_{C1} + 3Z_{C21}) t / (L_{dk} + 3L_D)} + D_{11} \quad (16)$$

$$A_{11} = \frac{4\Delta u_{f1}}{3} \quad (17)$$

$$B_{11} = \frac{2\Delta u_{f1} Z_{C1}}{3(Z_{C1} + 3Z_{C21})} \quad (18)$$

$$D_{11} = \frac{2\Delta u_{f1} Z_{C21}}{Z_{C1} + 3Z_{C21}} \quad (19)$$

由式 (16) ~ 式 (19) 可知, u_{m11} 的各项幅值系数 A_{11} 、 B_{11} 以及 D_{11} 均含公因数 Δu_{f1} , 且过渡电阻 R_f

只出现在幅值系数中, 而不存在于指数系数中(如指数系数 $-Z_{C1}/L_{dc}$), 表明区内故障时过渡电阻仅影响电压波形的幅值, 而不改变电压波形的其他特性。定义电压比 V_{ratio} 为电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 的比值, 如式(20)所示。

$$V_{\text{ratio}}(t) = \frac{u_{m11}(t)}{u_{\text{com}}(t)} \quad (20)$$

式中, u_{com} 为典型故障情况下(线路中点金属性接地故障)线路首端测点 m_1 处线模故障电压。

可推导出直流线路区内故障时, 电压比 V_{ratio} 满足式(21)。

$$V_{\text{ratio}}(t) = \frac{u_{\text{m11}}(t)}{u_{\text{com}}(t)} = \frac{\Delta u_{\text{f1}}}{\Delta u_{\text{f1com}}} = \frac{Z_{\text{C0}} + Z_{\text{C1}}}{Z_{\text{C0}} + Z_{\text{C1}} + 4R_{\text{f}}} \quad (21)$$

$$\Delta u_{\text{flcom}} = \frac{-\sqrt{2}U_d Z_{C1}}{Z_{C0} + Z_{C1}} \quad (22)$$

由式(21)可以推断,当故障情境确定时,过渡电阻 R_f 可确定,另外线路波阻抗 Z_{C0} 和 Z_{C1} 可视为定值。因此,式(21)所示的电压比 V_{ratio} 为定值,即当区内故障时,测点 m_1 处线模故障电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 成正比,二者电压之比 V_{ratio} 为恒定值,不随时间 t 而变化。

2. 区外故障分析

对于直流线路 L_1 来说,发生在直流线路 L_2 上的故障为区外故障(图1中的故障 f_2)。图3为此故障情境下的故障分析等效电路图。

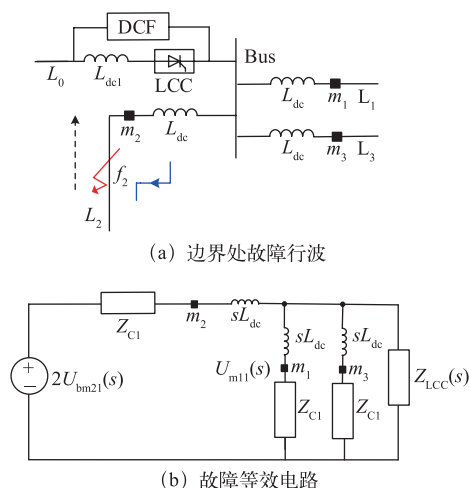
图3 区外 f_2 故障时故障等效模型

图3中, 电压 $U_{bm21}(s)$ 如式(23)所示。

$$U_{\text{bm}21}(s) = U_{\text{fl}}(s) \times \frac{1 - k_a l_{m2}}{1 + s \tau_a l_{m2}} e^{-s l_{m2} / v_1} \quad (23)$$

式中, l_{m_2} 为故障点到测点 m_2 的距离。

由图3可知,测点 m_1 处线模电压故障分量 U_{m11} 可表示为

$$U_{m11}(s) = 2U_{bm21}(s) \frac{Z_{eq}(s)}{sL_{dc} + Z_{eq}(s) + Z_{C1}} \frac{Z_{C1}}{sL_{dc} + Z_{C1}} \quad (24)$$

联立式 (2) 和式 (23), 则 U_{m11} 可化为

$$U_{m11}(s) = \frac{2}{s} \frac{Z_{eq}(s)}{sL_{dc} + Z_{eq}(s) + Z_{C1}} \frac{Z_{C1}}{sL_{dc} + Z_{C1}} \frac{1 - k_a l_{m2}}{1 + s\tau_a l_{m2}} e^{-s l_{m2} / v_1} \Delta u_{fl} \quad (25)$$

对式 (25) 进行拉普拉斯反变换, 求出电压 U_{m11} 的时域解析表达式, 如式 (26) 所示。

$$u_{m11}(t) = A_2 e^{-Z_{C1} t / L_{dc}} + B_2 e^{-(Z_{C1} + 3Z_{C21}) t / (L_{dc} + 3L_D)} + C_2 e^{-t / (\tau_s l_{m2})} + D_2 \quad (26)$$

$$A_2 = \frac{2\Delta u_{\text{fl}} L_{\text{dc}} (k_a l_{m2} - 1)}{3(L_{\text{dc}} - \tau_a l_{m2} Z_{C1})} \quad (27)$$

$$B_2 = \frac{2\Delta u_{\text{fl}} Z_{\text{Cl}} (L_{\text{dc}} + 3L_{\text{D}})(1 - k_{\text{a}} l_{m_2})}{3(Z_{\text{Cl}} + 3Z_{\text{C}21})(L_{\text{dc}} + 3L_{\text{D}} - \tau_{\text{a}} l_{m_2} Z_{\text{Cl}} - 3\tau_{\text{a}} l_{m_2} Z_{\text{C}21})} \quad (28)$$

$$C_2 = \frac{-2\Delta u_{fl}\tau_a l_{m2}Z_{C1}(k_a l_{m2} - 1)(L_D - \tau_a l_{m2}Z_{C21})}{(L_D - \tau_a l_{m2}Z_{C1})(L_{dc} + 3L_D - \tau_a l_{m2}Z_{C1} - 3\tau_a l_{m2}Z_{C21})} \quad (29)$$

$$D_2 = -\frac{2Z_{\text{C21}}\Delta u_{\text{fl}}(k_{\text{a}}l_{m2}-1)}{Z_{\text{Cl}}+3Z_{\text{C21}}} \quad (30)$$

类似地, u_{m11} 可化简为

$$u_{m/1}(t) = A_{21}e^{-Z_{C1}t/L_{dc}} + B_{21}e^{-(Z_{C1}+3Z_{C21})t/(L_{dc}+3L_D)} + D_{21} \quad (31)$$

$$A_{21} = -\frac{2\Delta u_{\text{fl}}}{3} \quad (32)$$

$$B_{21} = \frac{2\Delta u_{\text{fl}} Z_{\text{Cl}}}{3(Z_{\text{Cl}} + 3Z_{\text{C}21})} \quad (33)$$

$$D_{21} = \frac{2\Delta u_{\text{fl}} Z_{\text{C21}}}{Z_{\text{C1}} + 3Z_{\text{C21}}} \quad (34)$$

在此故障情况下,电压比 V_{ratio} 计算公式为

$$V_{\text{ratio}}(t) = \frac{u_{m11}(t)}{u_{\text{com}}(t)} = \frac{\Delta u_{f1} E_1(t)}{\Delta u_{f1\text{com}} E_2(t)} = \frac{(Z_{C0} + Z_{C1}) E_1(t)}{(Z_{C0} + Z_{C1} + 4R_f) E_2(t)} \quad (35)$$

$$E_1(t) = -\frac{2}{3}e^{-Z_{C1}t/L_{dk}} + \frac{2Z_{C1}}{3(Z_{C1} + 3Z_{C21})}e^{-(Z_{C1} + 3Z_{C21})t/(L_{dk} + 3L_0)} + \frac{2Z_{C21}}{Z_{C1} + 3Z_{C21}} \quad (36)$$

$$E_2(t) = \frac{4}{3} e^{-Z_{C1} t / I_{dk}} + \frac{2Z_{C1}}{3(Z_{C1} + 3Z_{C21})} e^{-(Z_{C1} + 3Z_{C21}) t / (I_{dk} + 3I_{Lo})} + \frac{2Z_{C21}}{Z_{C1} + 3Z_{C21}} \quad (37)$$

由式(35)~式(37)可知, 区外故障时, $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 为关于时间 t 的函数。因此, 电压比 $V_{\text{ratio}}(t)$ 是随时间 t 变化的量, 而非恒定值, 即此时测

点 m_1 处线模故障电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 之比不为定值。

综上所述,当区内故障时,测点 m_1 处线模故障电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 成正比,两者电压比 $V_{ratio}(t)$ 近似为恒定值而不随时间 t 变化;当区外故障时,线模故障电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 之比不为定值,即电压比 $V_{ratio}(t)$ 是一个随时间变化的量。由此,可以利用此故障特征的差异来进行区内外故障识别。

保护方案

1. 区内外故障识别判据

采用标准差系数来表征电压比 V_{ratio} 的波动程度,如式(38)所示。

$$V_{\sigma R} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (V_{ratio}(j) - \bar{V}_{ratio})^2}}{\bar{V}_{ratio}} \quad (38)$$

式中, $V_{\sigma R}$ 为电压比的标准差系数; $\bar{V}_{ratio}$ 为电压比 V_{ratio} 的均值; N 为数据窗内采样点个数。

当区内故障时, V_{ratio} 近似为一个恒定值,不随时间变化;而对于区外故障, V_{ratio} 是一个随时间变化的量。因此,区内故障时电压比标准差系数小于区外故障时的标准差系数。构建式(39)所示的故障识别判据。

$$V_{\sigma R} < V_{\sigma set} \quad (39)$$

式中, $V_{\sigma set}$ 为保护阈值,此值应大于区内故障时可能出现的最大电压比标准差系数,文中设 $V_{\sigma set}$ 为0.1。如果 $V_{\sigma R}$ 满足式(39),则判为区内故障;否则,判为区外故障。

利用小波变换模极大值法标定故障初始行波的到达时刻 t_1 ,并对 t_1 之后 T_d 时长内的故障电压进行采集。若在 T_d 时间内未检测到后续故障行波,则保护判据所利用的电压就取该 T_d 时间窗内的采样数据;若在 T_d 时间内检测到后续故障行波,则将后续故障行波传至测点的时刻记为 t_2 ,此时自适应地将数据窗调整为 T'_d ($T'_d = t_2 - t_1$)。文中, $T_d = 0.5$ ms。

2. 故障选极判据

故障电压地模故障分量仅在单极故障时存在,且在正、负极故障时地模故障电压极性相反。因此,利用地模故障电压构成故障选极元件,如式(40)和式(41)所示。

$$Q_{h0} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_{mh0}(j) \quad (40)$$

$$\begin{cases} Q_{h0} \geq Q_s & \text{负极故障} \\ Q_{h0} \leq -Q_s & \text{正极故障} \\ -Q_s < Q_{h0} < Q_s & \text{双极故障} \end{cases} \quad (41)$$

式中, u_{mh0} 为测点 m_h 处地模故障电压(m_h 可为 $m_1 \sim m_3$), J 为0.5 ms内采样点个数。考虑双极故障下最大不平衡电压,将 Q_s 设定为10 kV。

3. 保护方案

本保护方案逻辑示意图如图4所示,利用式(38)计算电压标准差系数 $V_{\sigma R}$,如果 $V_{\sigma R}$ 满足式(39),则判为区内故障;否则,判为区外故障。若判为区内故障,则基于式(41)来选择故障极。

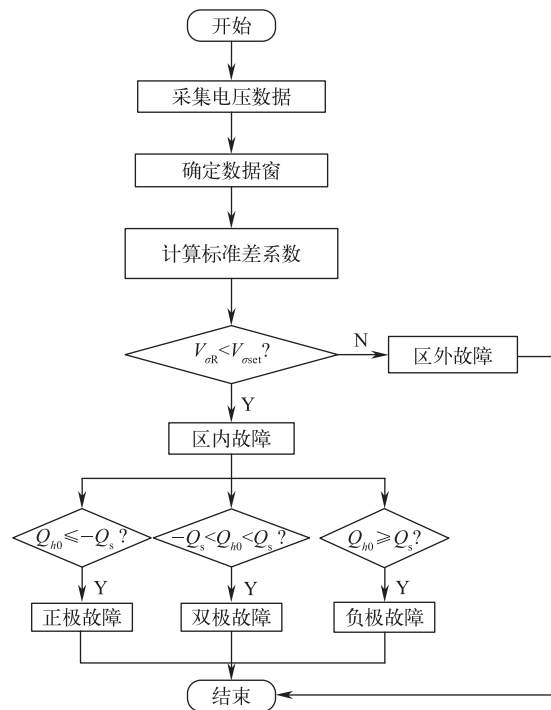


图4 保护方案的流程图

仿真实验

在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示的混合直流输电系统,整流侧额定直流电压和传输功率分别为 ± 800 kV和8 000 MW。逆变侧LCC与MMC换流站均为400 kV电压,MMC1~MMC3的额定直流电流均为1.67 kA。MMC采用半桥子模块结构,MMC桥臂电感为100 mH,子模块电容为15 mF,子模块个数为218。直流线路 $L_1 \sim L_3$ 的长度均为300 km,采用频变参数线路模型,如图5所示。 $Z_{C1}=245 \Omega$, $Z_{C0}=386 \Omega$, $Z_{C21}=236 \Omega$, $Z_{C20}=384 \Omega$ 。 L_{dc1} 和 L_{dc} 分别为300 mH和75 mH。采样频率为50 kHz。

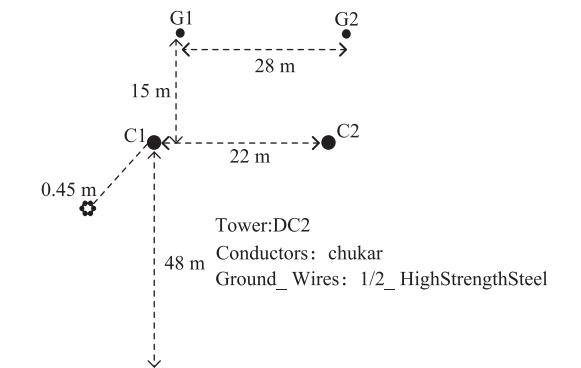


图5 直流线路结构

1. 故障电压时域表达式的验证

为验证所推导的电压时域解析表达式的有效性，以线路 L_1 中点故障为例进行详细分析。图6绘制出在不同过渡电阻情况下，线路测点 m_1 处线模故障电压解析表达式的计算值以及相应仿真实验波形图。

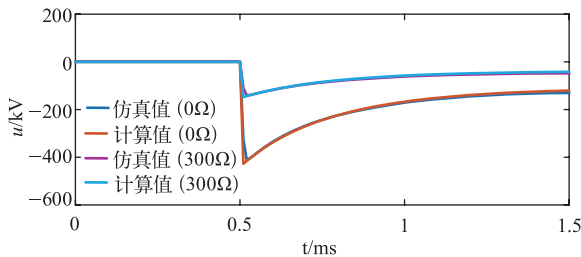


图6 不同故障条件下电压解析计算值与仿真值

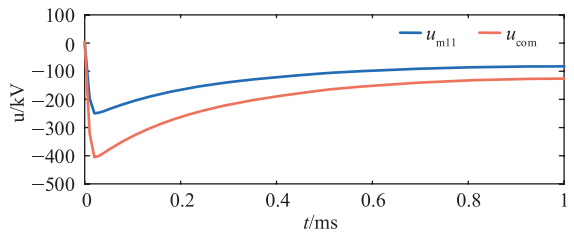
由图6可知，在过渡电阻取 $0\ \Omega$ 和 $300\ \Omega$ 时，线模故障电压的解析计算值均与仿真波形吻合程度较高。大量仿真验证了电压解析表达式的正确性与有效性。

2. 区内故障

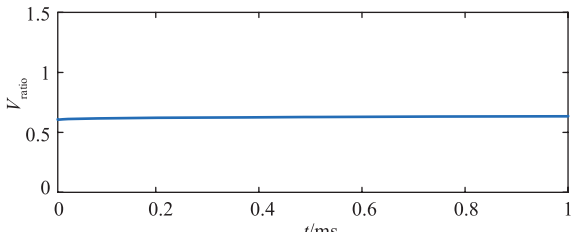
直流线路 L_1 中点发生正极接地故障时的仿真波形如图7所示（过渡电阻 $R_f=100\ \Omega$ ）。如图7所示，故障后测点 m_1 处线模故障电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 近似成正比，如图7b所示，两者电压比 V_{ratio} 近似为恒定值而不随时间 t 变化，此时计算得到电压比标准差系数 $V_{\sigma R}=0.0063$ ，满足 $V_{\sigma R}<V_{\sigma set}$ （ $V_{\sigma set}=0.1$ ），因此，保护能可靠识别区内故障。

表1以直流线路 L_1 为例，给出不同区内故障场景下（不同故障位置、过渡电阻 R_f 以及故障类型）实验仿真结果。 x_L 表示从故障点到测点 m_1 的距离。从表1的测试结果可以看出，在不同区内故障情况下，电压比标准差系数总满足 $V_{\sigma R}<V_{\sigma set}$ ，表明所提

出的保护方法能够准确识别各种区内故障。该保护耐受过渡电阻能力强，能可靠识别 $300\ \Omega$ 高阻故障。此外，在正极接地故障时， $Q_{h0}<-Q_s$ ；在双极故障时， $-Q_s<Q_{h0}<Q_s$ 。因此，保护能可靠地选择故障极。



(a) 电压 u_{m11} 和 u_{com}



(b) 电压比值 V_{ratio}

图7 区内故障仿真波形图

表1 不同区内故障保护性能测试

故障极	x_L/km	R_f/Ω	$V_{\sigma R}$	Q_{h0}/kV	识别结果	选极结果
线路 L_1 , 正极	60	0	0.0047	-293.95	区内故障	正极
		50	0.0033	-233.96	区内故障	正极
		300	0.0088	-114.66	区内故障	正极
	150	0	0.0000	-310.39	区内故障	正极
		50	0.0051	-237.77	区内故障	正极
		300	0.0138	-109.48	区内故障	正极
	240	0	0.0074	-274.01	区内故障	正极
		50	0.0113	-212.48	区内故障	正极
		300	0.0162	-99.81	区内故障	正极
线路 L_1 , 双极	60	0	0.0137	0.055	区内故障	双极
	150	0	0.0135	0.171	区内故障	双极
	240	0	0.0143	0.378	区内故障	双极

3. 区外故障

直流线路 L_2 中点发生接地故障时的实验仿真波形如图8所示（即故障 f_2 ，过渡电阻 $R_f=100\ \Omega$ ）。如图8所示，故障后测点 m_1 处线模故障电压 u_{m11} 与比较电压 u_{com} 之比不为定值，两者电压比 V_{ratio} 是随时间 t 变化的量。此时计算得到标准差系数 $V_{\sigma R}=0.7265$ ，满足 $V_{\sigma R}>V_{\sigma set}$ ，因此，该故障被正确地判为直流线路 L_1 的区外故障。

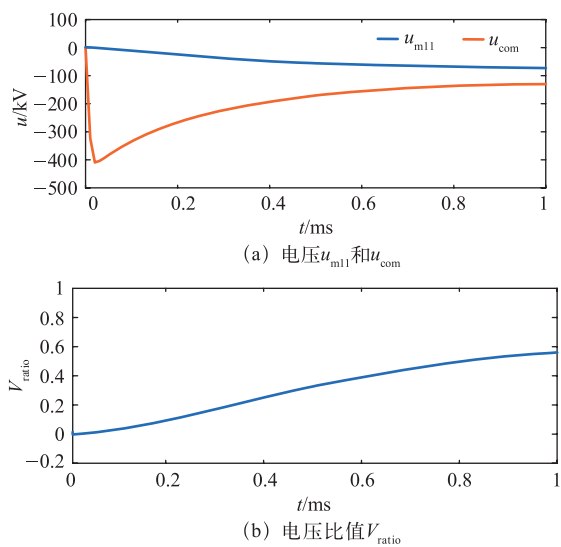


图8 区外故障仿真波形图

表2给出了不同区外故障情境下保护的動作情况。以线路 L_1 为例，故障 f_5 、 f_2 和 f_3 均为线路 L_1 的区外故障。由表2可知，在各种区外故障情况下，标准差系数满足 $V_{\sigma R} > V_{\sigma set}$ ，证明了所提保护方法能够准确识别区外故障。

表2 不同区外故障保护性能测试

直流线路	故障位置	R_f/Ω	$V_{\sigma R}$	识别结果
线路 L_1	故障 f_5	0	0.4826	区外故障
		50	0.4396	区外故障
		300	0.3846	区外故障
	故障 f_2	0	0.7172	区外故障
		50	0.7221	区外故障
		300	0.7318	区外故障
	故障 f_3	0	0.7169	区外故障
		50	0.7219	区外故障

结束语

本文提出一种基于线模故障电压标准差系数的混合直流输电线路保护新原理，定量推导了不同故障场景下线路线模故障电压解析表达式，并基于对电压解析表达式的分析，提出采用标准差系数来表征线模电压比值的波动程度，构造区内外故障判别元件。此外，设计故障选极元件，构成完备保护配置方案。大量仿真结果表明，所提的保护方案能准确识别区内、区外故障。此外，本文所提保护耐过渡电阻能力强，可靠性高。EA

(收稿日期：2025-01-13)

参考文献

- [1] Zhang Yunke, Li Yongli, Song Jinzhao, et al. A new protection scheme for HVDC transmission lines based on the specific frequency current of DC filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 420-429.
- [2] Zhang Yunke, Li Yongli, Song Jinzhao, et al. Pearson correlation coefficient of current derivatives based pilot protection scheme for long-distance LCC-HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116(1): 1-8.
- [3] 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): 8424-8437.
- [4] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6593.
- [5] 李斌, 李晔, 何佳伟. 基于模块化多电平换流器的直流系统故障处理方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1944-1950.
- [6] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 一种基于直流断路器两端电压的混合级联多端直流输电断路器自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2623-2631.
- [7] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 混合多端直流输电系统线路保护方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2617-2622.
- [8] 武传健, 张大海. 受端混联型LCC-VSC直流输电线路快速后备保护[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 541-553.
- [9] Zhan Qingqing, Hao Liangliang, Chen Zhengguang, et al. Research on line protection configuration scheme of hybrid multi-terminal HVDC transmission system[C]. IEEE International Electrical and Energy Conference, Beijing, China, 2019.
- [10] Li Meng, Chen Keao, He Jinghan, et al. Analysis of fault characteristics of hybrid multiterminal HVDC transmission system[C]. International

- Conference on Smart Power & Internet Energy Systems, Bangkok, Thailand, 2020.
- [11] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3873-3885.
- [12] 贾科, 陈淼, 施志明, 等. 基于限流电抗器电压积分凹凸性的柔性直流输电线路单端量保护方案[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4498-4505.
- [13] 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.
- [14] Gao Shuping, Chu Xu, Shen Quanyu, et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end voltage[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 65: 262-270.
- [15] Song Guobing, Chu Xu, Gao Shuping, et al. A new whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 599-607.
- [16] Lin Sheng, Gao Shan, He Zhengyou. A pilot directional protection for HVDC transmission line based on relative entropy of wavelet energy[J]. Entropy, 2015, 17(8): 5257-5273.
- [17] Liu Jian, Fan Chunju, Tai Nengling. A novel pilot directional protection scheme for HVDC transmission line based on specific frequency current[C]. International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, 2014.
- [18] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 52-56.
- [19] Zheng Xiaodong, Tai Nengling, Wu Zhongyu, et al. Harmonic current protection scheme for voltage source converter-based high-voltage direct current transmission system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(9): 1509-1515.
- [20] 曹虹, 周泽昕, 吕鹏飞, 等. 高压直流输电线路故障初始阶段解析方法研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 137-147.
- [21] Wood A R and Arrillaga J. The frequency dependent impedance of an HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1635-1641.
- [22] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用电压相关性的 ± 800 kV直流输电线路区内外故障判断方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 151-160.

