

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.014

基于测量电压弗雷歇距离的柔性直流配电线路保护

金恩淑, 张双双, 胡晓晨, 王汝田

(东北电力大学(现代电力系统仿真控制与绿色电能
新技术教育部重点实验室), 吉林 吉林 132011)

摘要:多端柔性直流配电系统发展迅速,在新能源接入方面有明显优势,但故障的快速、可靠识别是其发展面临的难点之一。针对多端柔性直流配电线路高阻故障特征不明显、保护难以识别的问题,文中通过分析换流站闭锁前的暂态电压故障特性,提出一种基于测量电压弗雷歇距离的柔性直流配电线路单端量保护方案。首先,基于正、负极测量电压和电流暂态变化率构造保护启动判据;其次,通过正、负极测量电压变化率区分单、双极故障;最后,利用单、双极测量电压弗雷歇距离构造积分识别单、双极区内外故障,并根据正极测量电压变化率对单极故障进行选极。经PSCAD/EMTDC仿真结果表明,此方案能同时满足保护对速动性和灵敏性的要求,且具备良好的耐过渡电阻能力,不受线路分布电容的影响。

关键词:柔性直流配电系统;对称单极;弗雷歇距离;单端量保护;过渡电阻;测量电压

中图分类号:TM77

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0142-11

0 引言

柔性直流配电系统相比于传统直流系统电能质量较高,能高效消纳分布式能源,且控制灵活、供电可靠性高,所以通常用来接入海上风电、构建城市配电网及接入分布式能源等^[1-6]。柔性直流工程的换流站中采用了大量的电力电子器件,由于直流配电系统线路距离短、阻尼小,当线路发生短路故障时,故障电流增长迅速,设备中的电力电子全控器件受到电流冲击而损坏^[7-12]。为提高配电系统的供电可靠性,需要对换流站闭锁前的故障特性进行分析,提出相应的保护方案^[13-15]。

目前,柔性直流配电线路的保护主要分为单端量保护和多端量保护^[16-18]。多端量保护需要多端的电气量进行通信比较,但柔性直流配电网节点较多,难以敷设完备的通信设备。多端柔性直流配电线路的多端量保护有明显的保护边界,保护选择性高。国外的多端量保护已经提出基于单元保护、行波、非单元保护和频域方案的各种技术^[19-21],但无法检测具有显著噪声的故障和检测高阻故障时灵敏度较低的问题仍然存在。国内现有的波形相似度和方向纵联等单元保护也受限于通信的同步误差和时延抖动。

单端量保护不需要额外的通信设备,仅需一端的电气量即可进行保护判断,所以文中重点研究单端量保护。现阶段的单端量保护多以限流电抗器

为保护边界。文献[22]对限流电抗器的电压初始值进行求解,具有较强的抗过渡电阻能力,但对采样率要求过高。文献[23]采用正、负极限流电抗器的电压幅值比作为故障判据,保护动作迅速,但受限于两电平电压源换流器。文献[24]根据限流电抗器电压变化率来识别区内外故障,但高阻故障时电压特征量不明显。文献[25]根据电流相似度的多重判据识别单极接地故障,但耐过渡电阻能力不足。文献[26]根据线路暂态量的标准差来识别故障极,并在时域下对故障进行测距,但过渡电阻仅考虑到 $10\ \Omega$ 。文献[27]利用不同工况下的数据和不同聚类中心之间的欧氏距离识别故障,再将实时故障与其比对判断故障类别。与欧氏距离类似的如曼哈顿距离、切比雪夫距离等距离算法常被用来描述样本间的相似度,且这些距离算法由于抗干扰能力较强,在多端量保护中应用广泛。综上所述,目前时域中的单端量保护多以限流电抗器电压为保护判据,增加了测点数量,且仍存在高阻故障识别困难的问题。距离算法在单端量保护中有一定应用前景。

文中在研究直流线路故障特性的基础上,提出了一种基于测量电压弗雷歇距离的柔性直流配电网单端量保护方案。在构建多端柔性直流配电系统拓扑的基础上,对单、双极故障回路进行理论分析;提出一种基于测量电压弗雷歇距离的柔性直流配电线路的保护方案,通过PSCAD/EMTDC平台进行仿真,结果表明,此方案能同时满足保护的速动性和灵敏性,且具备良好的耐过渡电阻能力,不受

收稿日期:2024-04-04;修回日期:2024-06-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277170)

线路分布电容的影响。

1 直流配电网拓扑

图1为±10 kV的多端环状柔性配电系统,其中包括模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)、电压源型换流器(voltage source converter, VSC)和直流变压器(direct current transformer, DCT),其中,MMC为对称单极接线方式^[28]。与换流器相连的有风电、光伏及交直流负荷,与T1、T2、T4相连的联接变压器和与T3、T5相连的配电变压器均采用Y_Nd接线。蓄电池通过双向DC/DC变换器连接至系统,变换器通过控制开关管的开通和关断来实现蓄电池的充放电过程。光伏阵列电池板经Boost升压斩波电路接入低压直流母线,Boost升压斩波电路采用最大功率跟踪控制。风机通过典型的锁相同步型风机变流器获得稳定的电能,通过MMC连接至中压柔性直流配电系统。

目前已投运的柔性直流系统中,换流器一般采用直接电流控制,通过增加内环电流控制,以快速的电流反馈为控制特征进行直接的电流控制,获得高品质的电流响应。外环功率控制的输入反映了换流器的控制策略。文中采用主从控制,MMC1为定电压控制,作为主控站,MMC2、MMC4为定功率控制,MMC3、MMC5为孤岛控制。

2 多端柔性直流配电线路故障特性分析

多端柔性直流配电系统的线路故障发展迅速,保护须在换流站闭锁前检测到故障并进行隔离,因此文中只分析换流站闭锁前的阶段。换流站闭锁

前,流向故障点的电流主要由MMC中子模块的电容放电提供,MMC的基本结构如图2所示。

图2中, R_{arm} 、 L_{arm} 、 L_d 分别为桥臂电阻、桥臂电感和限流电抗器;SM为子模块。子模块中,VT1、VT2为绝缘栅双极晶体管;VD1、VD2为二极管; C_s 为子模块电容。MMC中每相子模块通过级联相接,稳态情况下,为了维持直流电压恒定,每个相单元中投入的子模块数为一固定值 N ^[29]。MMC中所有的子模块分为投入和切除2种状态,处于投入状态的子模块的电流经VD1流向电容,处于切除状态的子模块的电流通过VT2将电容旁路。

2.1 双极短路故障

图3为在距离测量点 x 处经过渡电阻 R_f 发生双极短路故障时的等值电路, x 为故障距离与线路全长的比值。

图3中, u_{mp} 、 u_{mn} 分别为正、负极测量电压; R_{line} 、 L_{line} 分别为线路电阻和电感; i_f 为故障电流。此时,仅近端换流站放电,与拓扑无关^[30]。由于电容并联大电阻 R_s 的钳位作用,此时回路中没有电流,可以将MMC中每相单元看作一个二阶放电回路,其进一步可等效为由等效电阻 R_{eq} 、等效电感 L_{eq} 、等效电容 C_{eq} 构成的RLC回路。

子模块中的放电电流经限流电抗器 L_d 、部分线路和过渡电阻 R_f 形成故障回路。 R_f 的大小决定了整个回路的阻尼状态,所以文中从金属性故障和经过渡电阻故障2个方面进行分析。

2.1.1 金属性故障

当发生金属性故障时,由于过渡电阻 R_f 约为0,由图3可得等值参数 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 分别为:

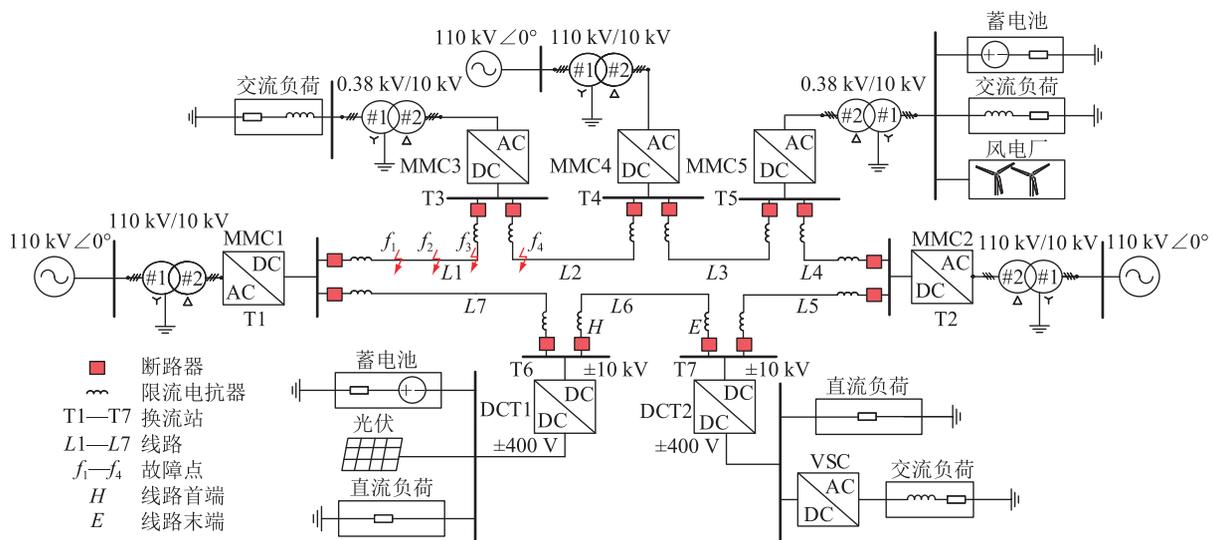


图1 多端柔性直流配电系统拓扑

Fig.1 Multi-terminal flexible DC distribution system topology

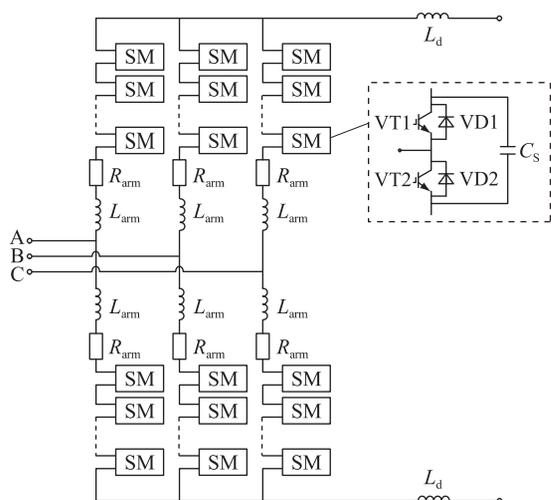


图2 MMC基本结构

Fig.2 Basic structure of MMC

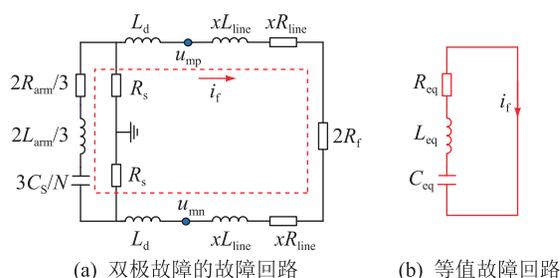


图3 双极故障的等值电路

Fig 3 Equivalent fault circuit of bipolar fault

$$\begin{cases} R_{eq} = 2R_{arm}/3 + 2xR_{line} \\ L_{eq} = 2L_{arm}/3 + 2L_d + 2xL_{line} \\ C_{eq} = 3C_s/N \end{cases} \quad (1)$$

故障电流 i_f 可表示为:

$$i_f = -\frac{3C_s}{N} \times \frac{du_{dc}}{dt} = -C_{eq} \frac{du_{dc}}{dt} \quad (2)$$

式中: u_{dc} 为桥臂子模块电容电压之和; t 为时间。

对图3中故障回路列写基尔霍夫电压方程^[31]:

$$L_{eq} C_{eq} \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} + R_{eq} C_{eq} \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = 0 \quad (3)$$

当回路发生金属性故障时, 整个故障回路处于欠阻尼状态, 对式(3)进行求解, 其特征方程为:

$$u_{dc} = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} \quad (4)$$

式中: C_1 、 C_2 为待定系数; r_1 、 r_2 为式(4)方程的特征根, 其值如式(5)所示。

$$\begin{cases} r_1 = -\sigma + j\omega \\ r_2 = -\sigma - j\omega \\ \sigma = R_{eq}/(2L_{eq}) \\ \omega_0 = 1/\sqrt{L_{eq} C_{eq}} \\ \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \sigma^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_0 为谐振角频率。

由于故障时刻的子模块电容电压之和 u_{dc} 和桥臂电感电流 i_{dc} 不会发生突变, 即 $u_{dc}(0^-) = u_{dc}(0^+) = U_0$, $i_{dc}(0^-) = i_{dc}(0^+) = I_0$, 将其代入式(4)可得式(6)。其中, U_0 为故障点初始电压; I_0 为故障点初始电流。

$$\begin{cases} C_1 + C_2 = U_0 \\ r_1 C_1 + r_2 C_2 = I_0/C_{eq} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)与式(4)联立, 可得:

$$\begin{cases} u_{dc} = \frac{U_0 e^{-\sigma t}}{\sin \theta} \sin(\omega t + \theta) \\ \theta = \arctan\left(\frac{2\omega L_{eq} C_{eq}}{R_{eq} C_{eq} + 2I_0 L_{eq}/U_0}\right) \end{cases} \quad (7)$$

正极测量电压 u_{mp} 为 u_{dc} 减去限流电抗器的电压, 因此利用式(7)和式(2)对 u_{mp} 进行求解, 可得:

$$\begin{cases} u_{mp} = u_{dc} + L_d C_{eq} \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} = \\ u_{dc} - K e^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta + 2\gamma) \\ K = L_d U_0 / (L_{eq} \sin \theta) \\ \gamma = \arctan(\sigma/\omega) \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, 不同位置故障时正极测量电压 u_{mp} 与线路等效电感 L_{eq} 有关。又由于桥臂电感 L_{arm} 和限流电抗器 L_d 为定值, 随着故障距离与线路全长的比值 x 增加, u_{mp} 的变化幅度减小, 且其角频率减小。

2.1.2 经过渡电阻故障

当发生双极经过渡电阻短路故障时, 若回路中的等效电阻满足 $R_{eq} < 2\sqrt{L_{eq}/C_{eq}}$, 则其分析过程与金属性故障相同; 若满足 $R_{eq} > 2\sqrt{L_{eq}/C_{eq}}$, 回路处于过阻尼状态, 此时直流侧电压如式(9)所示。

$$\begin{cases} u_{dc} = \\ \frac{U_0}{r_2 - r_1} (r_2 e^{r_1 t} - r_1 e^{r_2 t}) + \frac{I_0}{(r_2 - r_1) C_{eq}} (e^{r_2 t} - e^{r_1 t}) \\ r_1 = -\sigma_1 + \omega_1 \\ r_2 = -\sigma_1 - \omega_1 \\ \sigma_1 = R_{eq0}/(2L_{eq}) \\ \omega_1 = \sqrt{\sigma_1^2 - \omega_0^2} \\ R_{eq0} = 2R_{arm}/3 + 2xR_{line} + 2R_f \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_{eq0} 为经过渡电阻故障时的回路等效电阻。

此时等效电阻 R_{eq0} 比金属性故障时的等效电阻多 $2R_f$, 其测量电压如式(10)所示。

$$\begin{cases} u_{mp} = u_{dc} + L_d C_{eq} \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} = u_{dc} + M_1 e^{r_1 t} + M_2 e^{r_2 t} \\ M_1 = r_1^2 L_d C_{eq} (-r_2 U_0 + I_0/C_{eq}) / (2\omega_1) \\ M_2 = r_2^2 L_d C_{eq} (r_1 U_0 - I_0/C_{eq}) / (2\omega_1) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, M_1 为正值, 跌落速度慢, M_2 为负值, 跌落速度快, 且 M_1 的绝对值小于 M_2 的绝对值, 因此故障初始时刻, 测量电压下降。

为了更好地分析测量电压的变化情况, 对测量电压进行微分, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} \frac{du_{mp}}{dt} = \frac{du_{dc}}{dt} + P_1 e^{r_1 t} + P_2 e^{r_2 t} \\ P_1 = r_1^3 L_d C_{eq} (-r_2 U_0 + I_0 / C_{eq}) / (2\omega_1) \\ P_2 = r_2^3 L_d C_{eq} (r_1 U_0 - I_0 / C_{eq}) / (2\omega_1) \end{cases} \quad (11)$$

由于子模块电容的支撑作用, u_{dc} 的变化率不大, 可忽略不计。当经过渡电阻故障时, 过渡电阻 R_f 的变化会影响测量电压变化率。式(11)中 P_1 为负值, P_2 为正值, 且 P_1 的绝对值小于 P_2 的绝对值, 所以在故障初始时刻, 测量电压的变化率为负值, 随着时间的推移, 指数函数间的差值变大, 测量电压的变化率变为正值, 测量电压有一个回升过程。

由上述分析可知, 当发生金属性故障时, 正极测量电压的主要影响因素为线路等效电感, 线路等效电感与测量电压幅值呈正相关, 与电压角频率呈负相关; 当经过渡电阻故障时, 测量电压曲线呈现一个先下降后回升的趋势。

2.2 单极接地故障

图4为在距测量点 x 处经过渡电阻 R_f 发生正极单极接地故障时的等值电路, 其中 $l=1-x$; Δi_f 为故障电流增量。与双极短路故障类似, 由于电容并联大电阻 R_s 的钳位作用, R_s 与接地点的电流值约为0, 为开路状态, 此时故障回路为两端电容回路。

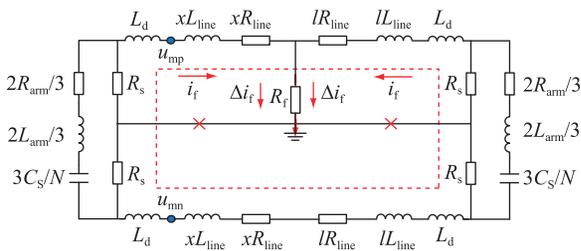


图4 单极故障的等值电路

Fig 4 Equivalent fault circuit of unipolar fault

图4中, 正、负极测量电压 u_{mp} 和 u_{mn} 分别为:

$$\begin{cases} u_{mp} = 2R_f \Delta i_f + xL_{line} \frac{di_f}{dt} + xR_{line} i_f \\ u_{mn} = 2L_d \frac{di_f}{dt} + u_{mp} - 2u_{dc} \\ \Delta u_m = u_{mp} - u_{mn} \\ i_f = i_{i_0} + \Delta i_f \end{cases} \quad (12)$$

式中: i_{i_0} 为正常运行电流; Δu_m 为正、负极极间电压。

单极接地故障时, 故障电流 i_f 与正常运行电流

i_{i_0} 相差不大, 即 Δi_f 很小, 所以式(12)可简化为:

$$\begin{cases} u_{mp} \approx xL_{line} \frac{di_f}{dt} + xR_{line} i_f \\ u_{mn} \approx (2L_d + xL_{line}) \frac{di_f}{dt} + xR_{line} i_f - 2u_{dc} \\ \Delta u_m \approx -2L_d \frac{di_f}{dt} + 2u_{dc} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 由于 i_f 较小, 正极测量电压 u_{mp} 很小, 即故障极测量电压迅速发生跌落, 同时电容的钳位作用使非故障极电压 u_{mn} 上升为原来2倍, 正、负极极间电压几乎不变。

3 基于测量电压弗雷歇距离的柔性直流配电路保护方案

稳态时测量电压始终为定值。发生双极短路故障时, 由式(8)可知, 测量电压迅速下降, 且故障距离与线路全长的比值 x 和正极测量电压呈正相关, 和电压角频率呈负相关; 经过渡电压故障时, 由式(11)可知, 由于过渡电阻的存在, 测量电压呈现一个先下降后回升的趋势。发生单极接地故障时, 由式(13)分析可知, 故障极测量电压迅速发生跌落。故障前后测量电压值出现明显变化, 因此, 可以根据不同工况下测量电压前后的相似度来构造保护判据。现有距离算法中, 欧式距离需要进行归一化处理, 且适用低维数据; 曼哈顿距离直观性较差; 切比雪夫距离仅适用于特定的用例, 不具备通用性; 而弗雷歇距离可以通过得到不同速度方案下同一时刻两点之间距离最大值的下确界来进行相似度度量^[32], 所以文中采取弗雷歇距离进行保护方案设计。

3.1 启动判据

设正极电流由母线流向故障点为正方向, 故障点流向母线为反方向, 负极则相反。由于正向故障时, 正极故障的测量电流由母线流向故障点, 负极故障的测量电流由故障点流向母线, 反向故障时相反, 因此正向故障时的电流变化率均为正值。为了有效区分正向故障和反向故障, 将电流变化率作为启动判据, 但在正常运行时容易发生误动。由2.2节可知, 对称单极结构在单极故障时电流变化率较小, 与正常运行状态相似, 仅靠电流变化率难以区分正常运行状态与单极故障。而故障前后测量电压存在显著差异, 为了将单极故障与正常运行状态区分开, 增加了测量电压的变化率, 并对数据进行单指数平滑的预处理, 启动判据为:

$$\begin{cases} di_m/dt > K_{set1} \\ du_m/dt > K_{set2} \end{cases} \quad (14)$$

式中： i_m 为正/负极测量电流； u_m 为正/负极测量电压； K_{set1} 、 K_{set2} 为保护启动的门槛值。

3.2 故障类别判据

保护启动后,为了区分双极短路故障和单极接地故障,提出故障类别判据。由于双极故障时正、负极测量电压的变化率为一正一负;单极故障时正、负极测量电压的变化率均为正值或均为负值。因此,对正、负极测量处的电压变化率求积,可得:

$$\frac{du_{mp}}{dt} \times \frac{du_{mn}}{dt} > K_{set3} \quad (15)$$

式中： K_{set3} 为故障类别判据的阈值,如果满足故障类别判据,则为单极接地故障,反之则为双极短路故障。

3.3 区内外判据

3.3.1 弗雷歇距离

弗雷歇距离是一种衡量 2 条曲线相似度的方法,是弗雷歇提出的一种路径空间相似形描述^[33-34],其本质为衡量 2 条曲线最大值的下确界^[35],其计算方法为:

$$F(A, B) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} \{d(A(\alpha(t)), B(\beta(t)))\} \quad (16)$$

式中： A 、 B 为度量空间上的曲线； α 、 β 为区间内的参数函数； d 为空间上的度量函数。

弗雷歇距离的计算流程如图 5 所示。

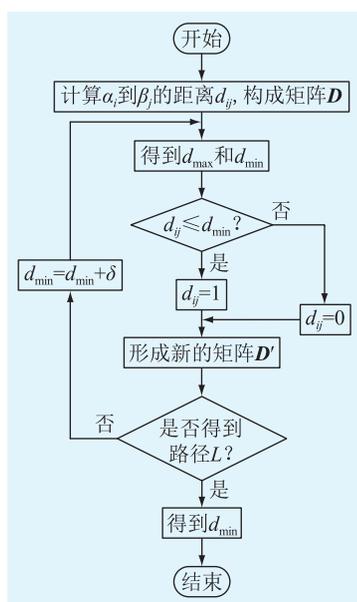


图 5 弗雷歇距离算法流程

Fig.5 Flow chart of Fréchet distance algorithm

图 5 中,两点的距离 d_{ij} 、增量 δ 和路径 L 分别为:

$$\begin{cases} d_{ij} = \sqrt{(t_i - t_j)^2 + (\alpha_i - \beta_j)^2} \\ \delta = (d_{max} - d_{min})/100 \\ L = \{d_{11}, \dots, d_{ij}, \dots, d_{nn}\} \quad d_{11} = d_{ij} = d_{nn} = 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中： t_i 、 t_j 分别为第 i 、 j 个样本点的横坐标， $i, j = 1, 2, \dots, n$, n 为采样点数； α_i 为曲线 A 第 i 个样本点的纵坐标； β_j 为曲线 B 第 j 个样本点的纵坐标； d_{max} 为曲线 A 到曲线 B 的最大距离； d_{min} 为曲线 A 到曲线 B 的最小距离。

求解测量电压的弗雷歇距离,可以反映出测量电压间的相似度,弗雷歇距离越小,测量电压相似度越高。为分析测量电压前后的波动性,将滑动时间窗内测量电压曲线分为等长的两段 $u_{mp}(t-2\Delta t)$ 、 $u_{mp}(t-\Delta t)$,使其通过弗雷歇距离进行相似度计算,弗雷歇距离越小,曲线前后相似度越高,曲线整体波动性就越小。

$$F_i = F(u_{mp}(t - 2\Delta t), u_{mp}(t - \Delta t)) \quad (18)$$

式中： F_i 为第 i 个样本点的弗雷歇距离； Δt 为采样间隔。

3.3.2 双极故障

由故障特性分析可知,故障距离与线路全长的比值 x 和测量电压呈正相关。区内双极故障时的故障距离比区外双极故障时的故障距离小,即故障后区内双极故障的测量电压较区外双极故障小,故障前后测量电压变化率更大。因此对各种工况下弗雷歇距离进行求解,其值存在显著的差异,但仅靠弗雷歇距离无法进行区分,所以文中采用弗雷歇距离各点斜率的平方作为区分量,并对其进行积分。

$$S_1 = \sum_{i=1}^n k_{F_i}^2 F_i \Delta t \quad (19)$$

式中： S_1 为双极故障判据； k_{F_i} 为第 i 个样本点弗雷歇距离的斜率。

当 $S_1 > M_{set1}$ 时,故障为区内双极故障,当 $S_1 \leq M_{set1}$ 时为区外双极故障。其中, M_{set1} 为区内外双极故障定值,其整定原则为躲过区外双极故障时的最大值,并用区内双极故障时的最小值除以设定的整定值校验保护的灵敏性,如式(20)、式(21)所示。

$$M_{set1} = k_{rel1} M_{set1_max} \quad (20)$$

$$k_{sen1} = M_{set1_min} / M_{set1} \quad (21)$$

式中： M_{set1_max} 为区外双极故障时的积分最大值； M_{set1_min} 为区内双极故障时的积分最小值； k_{rel1} 、 k_{sen1} 分别为双极故障时的保护可靠系数和灵敏度系数^[36], k_{rel1} 取 1.2~1.5, k_{sen1} 取 1.4~1.5。

3.3.3 单极故障

由 2.2 节可知,单极故障时回路中的故障电流

较双极故障时的小,电压幅值降落更快,故障前后测量电压变化率大,且不同工况下电压幅值差值小。为了突出不同工况下的差异,对弗雷歇距离的斜率进行选择,只考虑第一个时间窗内的斜率值,且忽略小于 R_{set1} 的斜率值 (R_{set1} 为区内外单极故障定值)。由于电压幅值下降幅度大,系数为电压斜率与电压绝对值的积,然后分别与弗雷歇距离计算得到放大后的电压值 N_i ,如式(22)所示。

$$N_i = \begin{cases} k_{Fi} |u_{mi}| F_i & k_{Fi} > R_{set1} \\ |u_{mi}| F_i & k_{Fi} \leq R_{set1} \end{cases} \quad (22)$$

式中: u_{mi} 为第 i 个样本点的正/负极测量电压。

对 N_i 进行积分,得到单极故障区内外判据为:

$$S_2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^n N_i \Delta t & n \leq 6 \\ 6 \sum_{i=1}^6 N_i \Delta t + \sum_{i=6}^n |u_{mi}| F_i \Delta t & n > 6 \end{cases} \quad (23)$$

当 $S_2 < M_{set2}$ 时,故障为区内单极故障,当 $S_2 \geq M_{set2}$ 时为区外单极故障。其中, M_{set2} 为区内外单极故障定值,其整定原则为躲过区外单极故障时的最大值,并用区内单极故障时的最小值除以设定的整定值校验保护的灵敏性,如式(24)、式(25)所示。

$$M_{set2} = k_{rel2} M_{set2_min} \quad (24)$$

$$k_{sen2} = M_{set2} / M_{set2_max} \quad (25)$$

式中: M_{set2_min} 为区外单极故障时的积分最小值; M_{set2_max} 为区内单极故障时的积分最大值; k_{rel2} 、 k_{sen2} 分别为单极故障时的保护可靠系数和灵敏度系数^[36], k_{rel2} 取 0.70~0.85, k_{sen2} 取 1.16~1.50。

最终,对单极故障进行选极,可得:

$$du_{mp}/dt < K_{set4} \quad (26)$$

式中: K_{set4} 为单极故障选极判据的阈值,若满足故障选极判据,则为区内正极故障,反之则为区内负极故障。

综上,整体保护原理流程如图 6 所示。

4 仿真实验

为验证所提保护方案的可行性,在 PSCAD 平台上搭建图 1 所示的多端柔性直流配电系统进行不同工况下的仿真分析。换流站及线路的参数见表 1,线路模型为依频模型,采样频率为 20 kHz,数据采样的滑动时间窗为 0.3 ms,故障发生时间为 0 s。

4.1 区内故障仿真

4.1.1 区内首端双极故障

在图 1 中的线路 $L1$ 、 $L2$ 上设置不同位置的故障,当区内线路首端 f_1 于 0 s 发生双极金属性故障

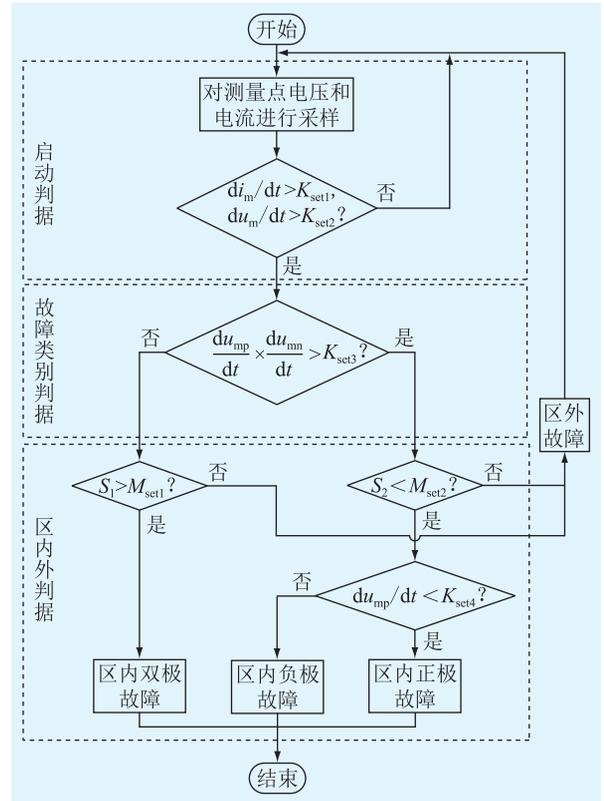


图 6 保护原理流程

Fig.6 Protection principle flow chart

表 1 系统仿真稳态参数

Table 1 System simulation steady-state parameters

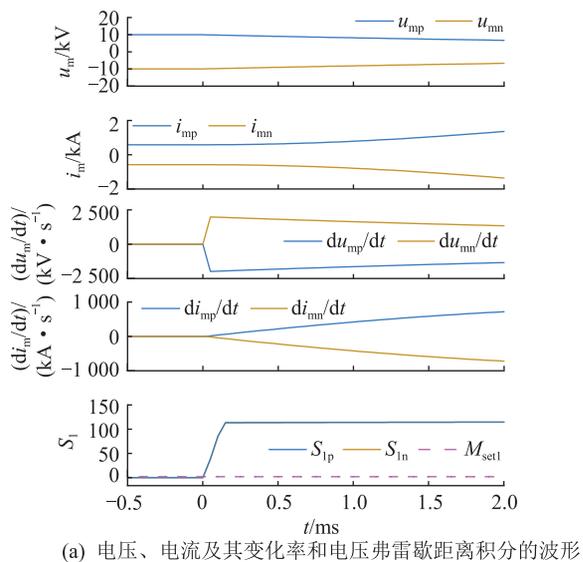
参数	数值	参数	数值
直流电压/kV	±10	线路长度/km	5
线路电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	0.012	线路电抗/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.19
L_d/mH	2	C_S/mF	10

时,故障后的线路电压存在波动,图 7 为测量电压、电流及其变化率、弗雷歇距离积分波形和保护动作信号。

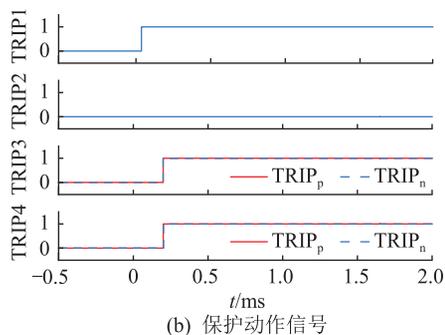
图 7 中, i_{mp} 、 i_{mn} 分别为正、负极测量电流; S_{1p} 、 S_{1n} 分别为双极故障时正、负极测量电压的弗雷歇距离积分; TRIP1—TRIP4 分别为启动判据、故障类别判据、区内外判据及断路器的动作信号; TRIP_p、TRIP_n 分别为故障时正、负极测量电压的动作信号。由图 7 可知,发生区内双极故障时,线路正、负极电压下降,保护启动。正、负极测量电压变化率朝相反方向变化,为双极短路故障。弗雷歇距离在故障发生初始时刻迅速上升,其正负极积分均超过整定值,为区内双极故障。

4.1.2 区内首端单极故障

以线路正极故障为例,当区内线路首端 f_1 于 0 s 发生正极金属性故障时,图 8 为保护各特征量的波形和保护动作信号。



(a) 电压、电流及其变化率和电压弗雷歇距离积分的波形

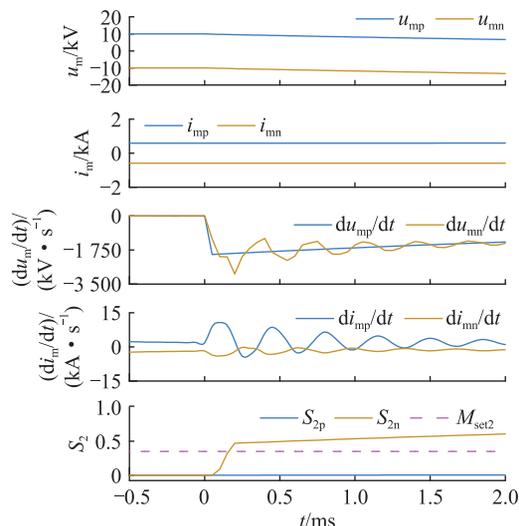


(b) 保护动作信号

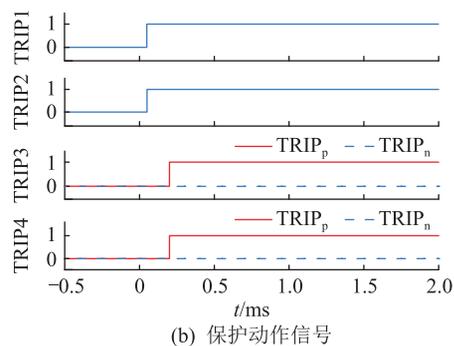
图7 首端双极故障动作特性

Fig.7 The action characteristics of bipolar electrode fault at the head of line

图8中, S_{2p} 、 S_{2n} 分别为单极故障时正、负极测量电压的弗雷歇距离积分。发生区内金属性故障时, 正极电压下降, 负极电压上升, 保护可靠动作。正、负极测量电压变化率朝相同方向变化, 为单极接地故障。弗雷歇距离在故障发生时迅速上升, 负极积分超过整定值, 正极积分未超过整定值, 为区内正极故障。



(a) 电压、电流及其变化率和电压弗雷歇距离积分的波形



(b) 保护动作信号

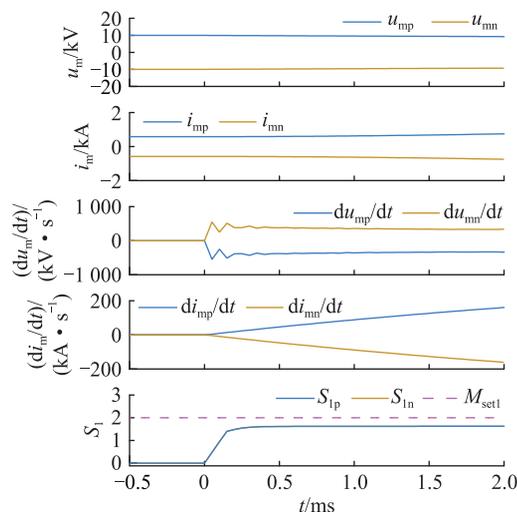
图8 首端正极故障动作特性

Fig.8 The action characteristics of positive electrode fault at the head of line

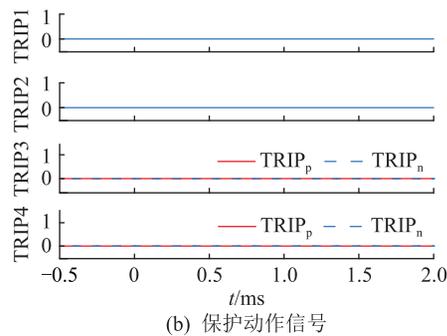
4.2 区内外故障识别仿真

4.2.1 区外双极故障

由图1可知, 当发生金属性故障时, 区外首端故障比区内末端故障多经过2个限流电抗器。根据第2章可知, 线路电感值越大, 线路测量电压的变化量越小。设置区外线路首端 f_4 于0s发生双极金属性故障, 此时保护各特征量的波形和保护动作信号如图9所示。



(a) 电压、电流及其变化率和电压弗雷歇距离积分的波形



(b) 保护动作信号

图9 区外双极故障动作特性

Fig.9 The action characteristics of external bipolar fault

由图9可知, 发生区外双极故障时, 线路正、负极电压下降幅度较小, 保护不启动。

4.2.2 区外单极故障

单极故障时区内外电压差值较小,弗雷歇距离主要受角频率的影响。为验证结果,0 s时在区外线路首端 f_4 处设置正极金属性故障,图10为保护各特征量的波形和保护动作信号。

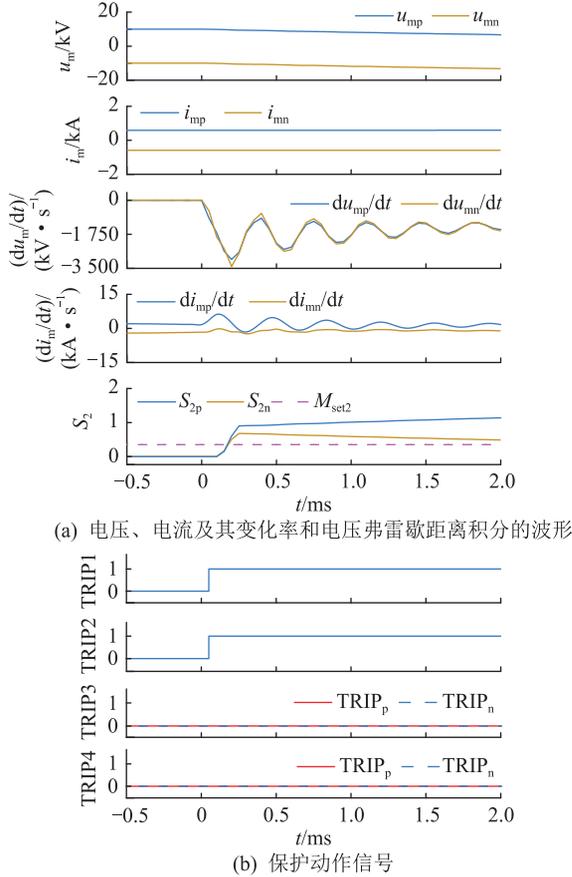


图10 区外正极故障动作特性

Fig.10 The action characteristics of external positive fault

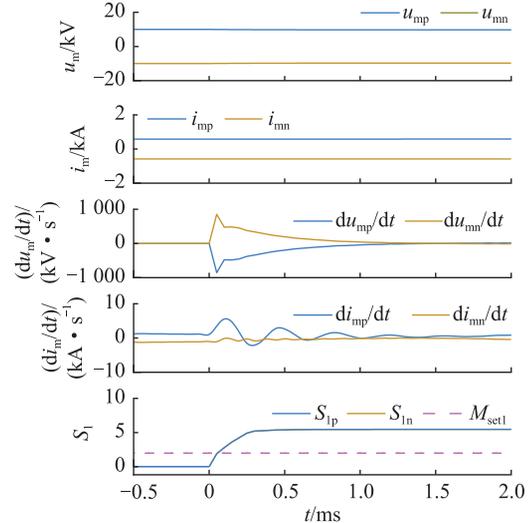
由图10可知,发生区外正极故障时,线路正极电压开始下降,负极电压上升,保护启动。正、负极测量电压变化率朝相同方向变化,检测为单极接地故障。弗雷歇距离在故障发生时迅速上升,其正、负极积分均超过整定值,为区外故障。

4.3 经过渡电阻故障仿真

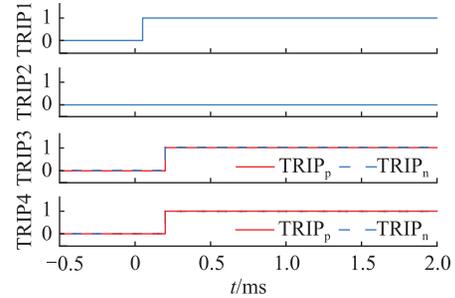
4.3.1 末端双极经过渡电阻故障

末端高阻故障的存在给单端量保护带来阈值整定困难的问题,通过对弗雷歇距离进行积分,保留故障时刻的暂态变化量。当区内线路末端 f_3 于0 s发生双极经过渡电阻故障时,保护各特征量的波形和保护动作信号如图11所示。

由图11可知,发生经 $20\ \Omega$ 过渡电阻双极故障时,正、负极电压均下降,保护成功启动。正、负极测量电压变化率朝相反方向变化,检测为双极短路故障。弗雷歇距离在故障发生初始时刻迅速上升,其正、负极积分均超过整定值,为区内双极故障。



(a) 电压、电流及其变化率和电压弗雷歇距离积分的波形



(b) 保护动作信号

图11 末端经过渡电阻双极故障动作特性

Fig.11 The action characteristics of terminal bipolar electrode fault through transition resistance

4.3.2 末端单极经过渡电阻故障

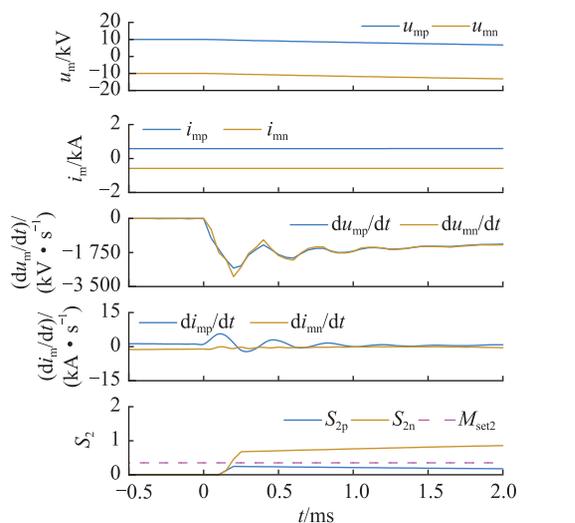
单极故障经过对弗雷歇距离斜率的筛选,放大了故障初始阶段的暂态特征,当区内线路末端 f_3 于0 s发生单极经过渡电阻故障时,保护各特征量的波形和保护动作信号如图12所示。

由图12可知,当末端经 $20\ \Omega$ 过渡电阻故障时,正极电压下降,负极电压上升,保护成功启动。正、负极测量电压变化率朝相反方向变化,检测为单极接地故障。弗雷歇距离在故障发生初始时刻迅速上升,负极积分超过整定值,为区内正极故障。

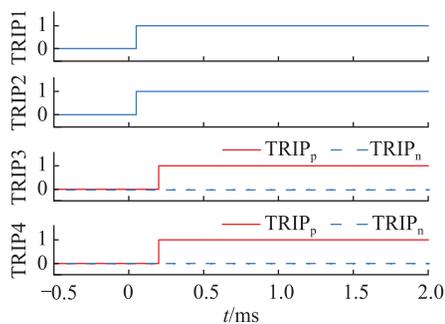
为证明该保护方案的普适性,文中采用文献[37]中两端开环式拓扑和文献[2]中的DCT-DCT线路进行仿真验证。分别对两端开环式拓扑在线路首端发生双极故障和单极故障进行仿真,并对DCT-DCT线路在线路首端发生双极故障和单极故障进行仿真,其仿真结果遵循文中保护逻辑。

4.4 分布电容的影响

以末端双极故障为例,取不同倍数的线路分布电容时,故障曲线的积分值有所变化,但整体变化不大,如图13所示,得到的弗雷歇距离仍满足双极故障时的区内外判据。



(a) 电压、电流及其变化率和电压弗雷歇距离积分的波形



(b) 保护动作信号

图 12 末端经过渡电阻正极故障动作特性

Fig.12 The action characteristics of terminal positive electrode fault through transition resistance

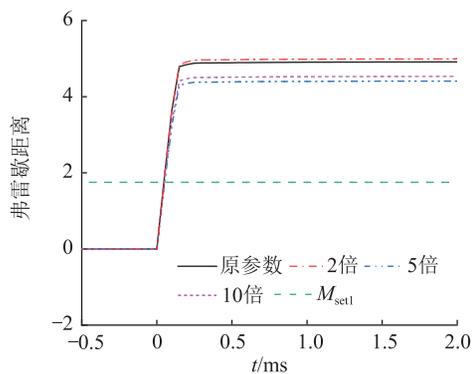


图 13 不同线路分布电容的弗雷歇距离

Fig.13 Fréchet distance of different line distributed capacitances

4.5 与其他方案对比

将文中保护分别与保护 1^[22]、保护 2^[38] 和保护 3^[26] 进行比较,从故障识别、耐高阻情况和采样频率三方面对比分析,所得结论如表 2 所示。

文中保护相较于故障识别全面和耐高阻的保护 1,降低了数据的采样频率;与耐高阻且采样频率低的保护 2 相比,故障识别更为全面;相较于保护 3,解决了保护不耐高阻和采样频率高的问题。

表 2 不同方案对比

Table 2 Comparison of different schemes

保护	故障识别	耐受高阻/ Ω	采样频率/kHz
文中保护	单双极均能识别	20	20
保护 1	单双极均能识别	20	50
保护 2	仅识别双极故障	20	20
保护 3	单双极均能识别	10	200

5 结论

文中在 PSCAD 中搭建多端柔性直流配电系统,分析了直流线路的故障情况,根据线路测量电压波形的差异性提出基于弗雷歇距离的保护方案。通过故障分析和仿真验证得到以下结论:

(1) 根据线路测量电压的故障特性,金属性故障时线路电感越小,电压幅值越小,电压角频率越大;经过渡电阻故障时测量电压呈现一个先下降后回升的趋势,由此提出一种单端量保护方案。

(2) 保护判据只需单端暂态特征量,不需要增设两端通信设备,可以快速切除故障,减小故障电流对电力电子器件的损害。

(3) 文中保护方案采样频率低、计算量小、耐受过渡电阻能力强,且不受线路分布电容的影响。

该保护方案不依赖于限流电抗器,对多端柔性直流配电系统具有普适性,接下来可对不同端口在不同接地方式下的运行状态进行进一步研究。

参考文献:

[1] 文卫兵,赵峥,李明,等. 海上风电柔性直流系统设计及工程应用[J]. 全球能源互联网,2023,6(1):1-9.
WEN Weibing,ZHAO Zheng,LI Ming, et al. Design and engineering application of offshore wind power VSC-HVDC system [J]. Journal of Global Energy Interconnection,2023,6(1):1-9.

[2] JIN E S,HU X C,WU X R, et al. Fault current improved grey slope relational analysis based unit protection scheme for DC distribution lines[J]. IEEE Access,2023,11:88795-88806.

[3] 朱琳,寇龙泽,范征,等. 柔性直流并入城市电网后对换流站近区短路电流的影响研究[J]. 全球能源互联网,2023,6(2):139-148.
ZHU Lin,KOU Longze,FAN Zheng, et al. Study on the influence of VSC-HVDC into urban power grid on short-circuit current of the adjacent area of converter station [J]. Journal of Global Energy Interconnection,2023,6(2):139-148.

[4] 耿世平,余敏,郭晓鹏,等. 基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):140-150.
GENG Shiping,YU Min,GUO Xiaopeng, et al. Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):140-150.

- [5] 张勇,季兰兰,袁艺嘉,等. 柔性直流变压器有载分接开关控制策略[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(4):35-45.
ZHANG Yong, JI Lanlan, YUAN Yijia, et al. On-load tap changer control strategy for VSC-HVDC transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 35-45.
- [6] 韩笑,刘建婷,张益伟,等. 柔性直流配网继电保护关键技术评述[J]. 电测与仪表,2022,59(3):1-9.
HAN Xiao, LIU Jianting, ZHANG Yiwei, et al. Summary of key technology of relay protection in flexible DC distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 1-9.
- [7] 刘一民,王书扬,李彬,等. 逆变型新能源场站柔性直流送出系统交流线路差动保护灵敏性优化方案[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 63-69.
LIU Yimin, WANG Shuyang, LI Bin, et al. Sensitivity optimization scheme of AC line differential protection in MMC-HVDC system of inverter new energy station [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 63-69.
- [8] 王振浩,李金伦,王欣铨,等. 风电接入真双极 MMC-MTDC 系统直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 26-36.
WANG Zhenhao, LI Jinlun, WANG Xinduo, et al. DC fault ride-through coordinated control strategies for bipolar MMC-MTDC system with wind power connected [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 26-36.
- [9] MA T X, HU Z Q, XU Y, et al. Fault location based on comprehensive grey correlation degree analysis for flexible DC distribution network [J]. Energies, 2022, 15(20): 7820.
- [10] 杨冬锋,李绍伟,刘晓军,等. 柔性直流配网中基于限流电抗电压的高灵敏纵联保护方案[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1545-1555.
YANG Dongfeng, LI Shaowei, LIU Xiaojun, et al. A high-sensitivity pilot protection scheme based on current-limiting reactance voltage for flexible DC distribution grid [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1545-1555.
- [11] 江守其,张林,李国庆,等. 基于改进型 MMC 的风电直联配网系统直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 27-35.
JIANG Shouqi, ZHANG Lin, LI Guoqing, et al. DC fault ride-through control strategy of wind power integrated DC transmission system based on modified MMC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 27-35.
- [12] 魏志文,罗煜,曾远方,等. 中压配电网柔性互联示范工程技术方案设计[J]. 电力建设, 2022, 43(3): 1-11.
WEI Zhiwen, LUO Yu, ZENG Yuanfang, et al. Technical scheme design of an MVAC distribution network project for demonstration with MVDC-flexible interconnection [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 1-11.
- [13] 单节杉,任敏,田鑫萃,等. MMC 换流站阀侧交流接地故障电流解析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 36-48.
SHAN Jieshan, REN Min, TIAN Xincui, et al. Analysis of grounding fault current at the AC valve side of an MMC converter station [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 36-48.
- [14] 邓丰,张振,钟航,等. 基于首行波主频分量的柔性直流输电线路单端量行波保护[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5797-5808.
DENG Feng, ZHANG Zhen, ZHONG Hang, et al. Single-ended traveling wave protection for flexible DC transmission lines based on the main frequency component of the initial traveling wave [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5797-5808.
- [15] 刘海金,靳鹤志,王金浩,等. 含高比例分布式电源的直流配电系统故障恢复过电压机理及其抑制[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 45-52.
LIU Haijin, JIN Hezhi, WANG Jinhao, et al. Fault recovery overvoltage mechanism and its suppression in DC distribution system with high-proportion DG penetration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 45-52.
- [16] 王国钰,范春菊,黄玥. 基于暂态电压比初始值和时域迭代的直流配电网单端测距方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 82-88.
WANG Guoyu, FAN Chunju, HUANG Yue. Single-terminal fault location method in DC distribution network based on initial ratio of transient voltage and time-domain iteration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 82-88.
- [17] 王泽乾,丛伟,胡选正,等. 基于参考电压二次积分值的柔性直流配电网纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 153-162.
WANG Zeqian, CONG Wei, HU Xuanzheng, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution network based on quadratic integration value of reference voltage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 153-162.
- [18] 杨隽豪,韦延方,王鹏,等. 基于 Swin Transformer 的柔性直流配电网单端量故障诊断[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 53-60.
YANG Junhao, WEI Yanfang, WANG Peng, et al. Single-ended fault diagnosis of flexible DC grid based on Swin Transformer [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 53-60.
- [19] PARK J D, CANDELARIA J, MA L Y, et al. DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2574-2584.
- [20] JIA K, XUAN Z W, FENG T, et al. Transient high-frequency impedance comparison-based protection for flexible DC distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 323-333.
- [21] MOHANTY R, PRADHAN A K. Protection of smart DC microgrid with ring configuration using parameter estimation approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6328-6337.
- [22] 戴志辉,黄敏,苏怀波,等. 环状柔配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.
- [23] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于单端暂态电压的含限流电抗器直流配电网保护方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 185-193.
CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Protection method based on single-terminal transient voltage for DC distribution network with current limiting reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 185-193.
- [24] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 440-447.
YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 440-447.
- [25] 张伟, 方永丽, 孙硕, 等. 基于多重综合判据的单端 MMC 直流配电网单极接地保护方法[J]. 广东电力, 2022, 35(5): 53-59.
ZHANG Wei, FANG Yongli, SUN Shuo, et al. Single pole grounding protection method for single-ended MMC DC distribution network based on multiple comprehensive criteria[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(5): 53-59.
- [26] 和敬涵, 周琳, 罗国敏, 等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [27] DAI Z H, LIU S S, CHEN S Q, et al. Flexible DC distribution line protection principle based on distance metric of clustering centres [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(18): 3661-3672.
- [28] 刘情新. 柔性直流换流站主接线形式选择分析[J]. 河北电力技术, 2022, 41(1): 28-30.
LIU Qingxin. Discussion about design of main wiring schemes for flexible DC converter station[J]. Hebei Electric Power, 2022, 41(1): 28-30.
- [29] 刘思奇, 胡鹏飞, 王栋, 等. 基于 MMC 主动限流的柔直输电系统双极短路故障控保协同策略[J/OL]. 电力系统自动化, 2023: 1-15 [2024-01-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231130.0839.002.html>.
LIU Siqi, HU Pengfei, WANG Dong, et al. Pole-to-pole DC fault protection scheme for HB-MMC-MTDC transmission system based on coordinated control and protection[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1-15 [2024-01-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20231130.0839.002.html>.
- [30] 张英敏, 张文馨, 李保宏, 等. 柔直电网拓扑对故障电流的影响机理分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 94-102.
ZHANG Yingmin, ZHANG Wenxin, LI Baohong, et al. Influence mechanism of MMC-HVDC grid topology on fault current [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 94-102.
- [31] 姜山, 范春菊, 黄宁, 等. 电力电子变压器直流端口极间短路故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1301-1309.
JIANG Shan, FAN Chunju, HUANG Ning, et al. Fault characteristic analysis of DC pole-to-pole fault in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1301-1309.
- [32] HOU S Z, HAN S Y. Fault location in distribution network based on discrete Fréchet distance algorithm [C]//2017 9th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). Chengdu, China. IEEE, 2017: 44-48.
- [33] ZHANG C, LIU K L, ZHANG S, et al. Discrete Fréchet distance algorithm-based faulty feeder selection method for flexible grounding system in distribution networks [C]//2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC). College Station, TX, USA. IEEE, 2021: 1-6.
- [34] FRÉCHET M M. Sur quelques points du calcul fonctionnel[J]. Rendiconti Del Circolo Matematico Di Palermo (1884-1940), 1906, 22(1): 1-72.
- [35] EITER T, MANNILA H. Computing discrete Fréchet distance [EB/OL]. [2023-08-30] <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16010565>.
- [36] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2010: 33-39.
HE Jiali. Principle of power system relay protection[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 33-39.
- [37] 王聪博, 贾科, 赵其娟, 等. 基于故障全电流相关性检验的柔性直流配电网线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1764-1775.
WANG Congbo, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Pilot protection for flexible-DC distribution line based on correlation test of DC current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1764-1775.
- [38] 王正茂, 梁英, 曹虹, 等. 基于时域加权特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1845-1856.
WANG Zhengmao, LIANG Ying, CAO Hong, et al. Flexible DC distribution line protection based on time-domain weighted features[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1845-1856.

作者简介:



金恩淑

金恩淑(1972),女,博士,教授,研究方向为电力系统继电保护及控制(E-mail: jinenshu@neepu.edu.cn);

张双双(2000),女,硕士在读,研究方向为柔性配电系统保护;

胡晓晨(1999),男,硕士在读,研究方向为直流配电网保护与控制。

AC contactor fault recognition based on ERF and BO-SVC

LIU Shuxin, QI Xinzhi, LYU Xianfeng

(Shenyang University of Technology (Ministry of Education Key Laboratory of Special Motors and High Voltage Electrical Apparatus), Shenyang 110870, China)

Abstract: In response to the challenges posed by imbalanced samples leading to low recognition accuracy and high feature redundancy in AC contactor, a novel composite recognition methodology which leverages embedded random forest (ERF) and Bayesian optimization-support vector classification (BO-SVC) is introduced. Firstly, the extraction of contactor state features from the full life testing platform designed for contactor is initiated. To counteract the low recognition accuracy caused by the imbalance among different state samples, a sample balancing strategy based on the weighted method is proposed. Subsequently, the ERF is employed to perform feature selection and reduction on the balanced samples. This process leads to the extraction of optimal features that represent the dynamic patterns of AC contactor state changes. Following the feature extraction step, the selected optimal features are fed into BO-SVC recognition model. A comprehensive evaluation of BO-SVC's fault recognition capabilities is undertaken, compared with two other representative models, the performance of each model is evaluated based on three indicators: accuracy, recall, and F1-score. The results of the proposed method reaches 95.22%, 98.91%, and 97.01%, respectively, all of which are higher than the comparison models. Using F1-score as an indicator, the performance of each model is tested on four sets of samples, and the results showed that the F1-score of the proposed method is on average 0.56% and 27.28% higher than the compared models, respectively. The research in the article effectively solves the problems of redundant characteristics and low fault recognition accuracy of AC contactors.

Keywords: AC contactor; fault recognition; imbalanced samples; feature selection; embedded random forest (ERF); Bayesian optimization-support vector classification (BO-SVC)

(编辑 吴昊)

(上接第 152 页)

Flexible DC distribution line protection based on measuring voltage Fréchet distance

JIN Enshu, ZHANG Shuangshuang, HU Xiaochen, WANG Rutian

(Northeast Electric Power University (Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control and Green Energy New Technology Ministry of Education), Jilin 132011, China)

Abstract: The multi-terminal flexible DC distribution system has developed rapidly and has obvious advantages in integrating new energy. However, rapid and reliable fault identification is one of the challenges in its development. To address the issue of the inconspicuous high-resistance fault characteristics of multi-terminal flexible DC distribution lines and the associated protection difficulties, this paper proposes a single-ended protection scheme for flexible DC distribution lines based on measuring voltage Fréchet distance by analyzing the transient voltage fault characteristics before the converter station blocking. Firstly, the protection start-up criterion is constructed based on the transient change rates of voltage and current measured by the positive and negative electrodes. Secondly, single-pole and bipolar faults are distinguished by the voltage change rate measured by the positive and negative electrodes. Finally, the internal and external faults in the unipolar and bipolar regions are identified by using the single and bipolar measurement voltage Fréchet distance to construct the integral, and the unipolar fault is selected according to the positive electrode voltage change rate. The PSCAD/EMTDC simulation results show that this scheme can simultaneously meet the requirements for rapidity and sensitivity in protection, and has good resistance to transition resistance, which is not affected by the distributed capacitance of the line.

Keywords: flexible DC distribution system; symmetric monopole; Fréchet distance; single-ended protection; transition resistance; measuring voltage

(编辑 陆海霞)