

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241397

基于动态时间规整重构序列修正贝杰龙模型的多端直流电网自适应重合方法

娄杰¹, 李俊², 武小梅², 童宁², 王裕², 孙凯祺¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 多端直流电网架空线路故障概率高、设备耐受过电流能力有限, 无选择性的重合将严重危害一次设备的安全性和电网的稳定性, 因此提出了一种基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)的重构序列重合方法, 实现重合前故障性质的预判。首先介绍了直流线路的贝杰龙时域等值建模方法, 在此基础上, 建立了各关键一次设备的贝杰龙等值模型, 分析了瞬时性、永久性故障工况下模型等效时域波过程的差异性。然后以瞬时性故障为基准, 对直流断路器注入信号所引发的电气分量暂态成分进行理论计算, 并借助 DTW 重构序列量化整定门槛、进一步消除色散误差, 最终以此为指标构造判据实现故障性质的识别。基于 PSCAD/EMTDC 平台的四端直流电网仿真算例显示, 所提出的自适应重合方法仅需要单端量, 不依赖通信, 能够消除死区, 且拥有 600 Ω 的灵敏性。

关键词: 多端直流电网; 贝杰龙法; 波过程; 重合闸

Adaptive reclosing method for multi-terminal DC grids based on modifying the Bergeron model through dynamic time warping reconstructed sequence correction

LOU Jie¹, LI Jun², WU Xiaomei², TONG Ning², WANG Yu², SUN Kaiqi¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Due to the high fault probability of overhead lines in multi-terminal DC grids and limited overcurrent tolerance of equipment, non-selective reclosing can severely compromise equipment safety and grid stability. To mitigate these risks, a reclosing strategy utilizing dynamic time warping (DTW)-based sequence reconstruction is developed to enable accurate fault nature identification before reclosing. First, the time-domain equivalent modeling of DC lines using the Bergeron method is introduced. On this basis, equivalent Bergeron models of key primary equipment are established, and differences in equivalent time-domain waveform processes under transient and permanent fault conditions are analyzed. Taking transient faults as the benchmark, the theoretical calculations of the transient electrical components induced by the injection signals of the DC circuit breakers are conducted. The DTW reconstruction sequence is then used to quantify the setting thresholds and eliminate dispersion errors. This forms the basis for constructing a criterion to identify the nature of the fault. Simulation case studies based on a four-terminal DC grid using PSCAD/EMTDC demonstrate that the proposed adaptive reclosing method requires only single-ended measurements, does not rely on communication, eliminates dead zones, and possesses a sensitivity of 600 Ω .

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907069).

Key words: MTDC; Bergeron method; wave process; reclosing

0 引言

目前基于模块化多电平换流器(modular multilevel

converter, MMC)的直流输电技术已经广泛应用于城市电网扩容、孤岛送电、背靠背联网以及弱电网连接等多个场景^[1-3]。其中, 由 MMC 换流器构建的多端直流电网(multi-terminal DC, MTDC)能够灵活控制电能的传输和分配, 通过控制换流器的输出电压和电流, 满足潮流的调节与不同区域的电力需求^[4-5];

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51907069); 广东省自然科学基金项目资助(2024A1515012720, 2023A1515240010)

其中, 直流断路器(DC circuit breakers, DCCB)成为了线路故障处理的关键主设备之一^[6-7]。

远距离高压直流输电一般采用架空线设计^[8], 其瞬时性故障率相对较高, 经去游离后的重合成功率能够达到 60%~90%, 且重合成功率随着电压等级升高而增加^[9]; 对于永久性故障, 直接重合 DCCB 后将重建短路电流, 使系统面临二次冲击^[10]; 为避免上述盲目重合的劣势, 多数现有研究均支持选择性的重合^[11-12], 可分为以下两大类。

第一类方法主要通过改进 DCCB 的拓扑结构, 依赖特定信号完成故障性质的识别。文献[13]提出了一种缓冲电路, 使混合式 DCCB 增加主动信号注入功能以实现自适应重合。文献[14]在混合式 DCCB 上额外增设充放电支路, 比较不同故障性质时充放电支路中电流幅值差异, 实现故障性质的识别。文献[15]设计了一种多端口混合式直流断路器, 降低避雷器耗散压力的同时为故障性质的判别提供了能量支持。文献[16]提出了一种基于磁饱和和电感型超导直流限流器的直流限流电路, 兼顾阻感限流和辅助快速故障隔离。文献[17]在混合型 DCCB 的辅助支路中增添了若干个与双向晶闸管并联的电容器, 通过投切特定个数的电容器向故障线路注入有源脉冲进行故障性质识别。

第二类自适应重合方法主要依赖换流器本身的控制。文献[18]通过切换换流器死区控制, 向故障线路注入一个低幅值的电压脉冲, 以反射波极性为判据确定故障性质。文献[19-20]利用全桥子模块(full bridge sub module, FBSM)的反向阻断能力, 实现在无 DCCB 的情况下清除线路故障。文献[21]提出一种基于实际测量值与理论计算值的单端故障性质判别方法, 考虑了换流器注入信号受架空线路分布参数与故障阻抗的影响。文献[22]根据故障电流、电压的时频特性, 设计了附加相位补偿环节与底层调制级控制系统相连接, 能够同时实现故障电流抑制与故障性质识别。

综上, 基于信号注入的主动判别法不依赖故障本身不易捕捉的暂态分量, 非常适合在去游离结束后用于故障性质的判断。作为具有 $N-1$ 自持能力的多端直流电网, 单条直流线路的断开一般不影响剩余主设备的运行, 因此采用第一类方法的优势在于其不需要对正常运行的换流器实施附加控制; 第二类方法无需对现有投运设备进行改造即可以更低成本实现故障性质的判别, 具有广阔的应用前景。

然而, 除成本外, 目前尚存的问题在于: 现有方法对故障性质的判别大多依赖反射信号的幅值与极性特征。一方面, 直流线路中电抗器等关键元件

的存在会使注入波形及反射波产生畸变; 另一方面, 近/远端故障时, 故障行波与对端或本地保护安装处的反射波高度混叠^[13], 加之过渡电阻的存在, 反射波的幅值与形态特征可能被严重破坏。文献[9]提出一种不依赖特定波形注入的自适应重合方法, 其基本原理是基于对侧测量对本地理论波形的推演与相互比较, 类似改进型单元式保护的思路, 一定程度上解决了上述问题, 但仍然未能摆脱对通信的依赖。

针对上述问题, 本文提出一种基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)重构序列的多端直流电网自适应重合方法, 其优势在于: 1) 在不对 DCCB 采取硬件更新的前提下, 仅基于单端量构造故障性质识别判据, 避免使用通信; 2) 对波形幅值与极性没有严格要求, 避免故障位置与过渡电阻的影响。

本文首先介绍了直流线路中的贝杰龙时域等值集中参数模型^[23], 建立了考虑线损的模型以初步贴近行波色散; 然后, 以瞬时性/永久性故障工况下贝杰龙模型的差异性为基础, 以瞬时性故障模型为基准对保护安装处的理论暂态特性进行计算; 通过 DTW 重构序列量化上述差异性, 进一步消除色散误差, 并以此为指标构造故障识别判据。仿真结果表明, 该方法能够可靠地识别线路全长范围内任意一点的故障性质, 抗过渡电阻能力可达 600 Ω 。

1 理论分析

图 1 展示了一种典型的多端柔直电网的拓扑结构。以 DC Line12 为例, CB_{12} 和 CB_{21} 收到控制指令动作于跳开线路区内故障, 经过一定的去游离时间后^[24], 换流器 MMC₁ 侧进行自动重合闭合 CB_{12} 。若保护测点 A 处的直流电压 U_A 在特定的时间窗内上升至整定值 U_{Aset} , 则判定该故障为瞬时性故障, CB_{21}

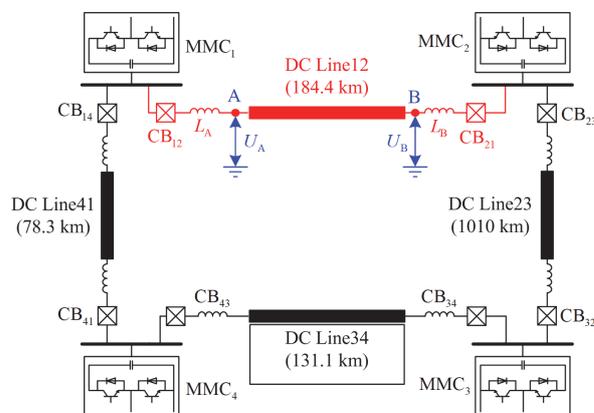


图 1 张北四端直流电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of Zhangbei four-terminal DC power grid

也进行重合；反之，则将该故障判定为永久性故障。

1.1 贝杰龙模型等值电路

贝杰龙法是一种应用混合波的概念对波的多次折、反射过程进行分析的方法^[25]。为考虑线损，将单段无损传输线路替换为3段考虑损耗的传输线路，并把线路的电阻 R 分成 $R/4$ 、 $R/2$ 、 $R/4$ 分别插入3段贝杰龙传输线等值模型中，假定其波阻抗为 Z_0 ，线路长度为 l ，波在导上传播一次的时间为 τ 。其等值计算电路如图2所示，其中M、K、N分别为有损线路的首、中、末端点； u_M 、 u_N 和 i_{MN} 、 i_{NM} 分别为首、末端的电压及电流； i_{KM} 、 i_{KN} 和 i_{MK} 、 i_{NK} 分别为中间节点K流向首、末端以及首、末端流向节点K的电流； U_{MK} 、 U_{KM} 、 U_{KN} 、 U_{NK} 分别为各段有损线路的贝杰龙等值历史电压源。

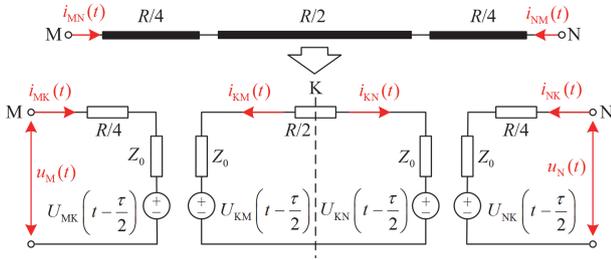


图2 考虑损耗时的传输线等值计算电路

Fig. 2 Equivalence calculation circuit of transmission line considering line losses

将三节点等效拓扑聚合成两端节点拓扑，得到考虑损耗下的历史电压源方程，如式(1)所示。

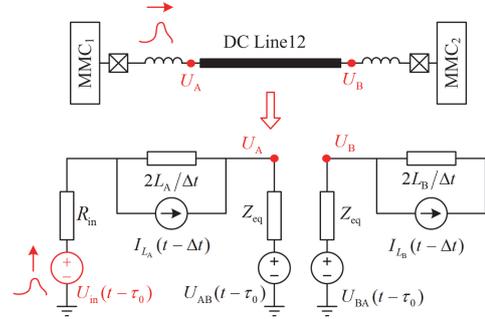
$$\begin{cases} Z_{eq} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} + \frac{R}{4} \\ H = \frac{Z_0 - R/4}{Z_0 + R/4} \\ U_{MN}(t - \tau) = \frac{1+H}{2}(2u_N(t - \tau) - U_{NM}(t - 2\tau)) + \frac{1-H}{2}(2u_M(t - \tau) - U_{MN}(t - 2\tau)) \\ U_{NM}(t - \tau) = \frac{1+H}{2}(2u_M(t - \tau) - U_{MN}(t - 2\tau)) + \frac{1-H}{2}(2u_N(t - \tau) - U_{NM}(t - 2\tau)) \end{cases} \quad (1)$$

式中： Z_{eq} 为传输线等值模型中的等值阻抗； L_0 、 C_0 分别为传输线在基频下的单位长度电感和电容； H 为中间变量； U_{MN} 、 U_{NM} 分别为聚合后M、N端的等效历史电压源。

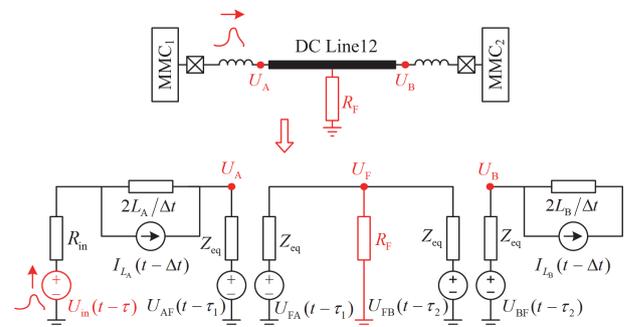
1.2 瞬时性/永久性故障下的贝杰龙数值计算电路

与线模分量相比，零模分量仅在接地故障时产

生，且在线路中的衰减也大于线模分量^[26]。以图1中DC Line12的A侧保护重合注入信号为例，可以得到瞬时性/永久性故障下的贝杰龙等值计算电路分别如图3(a)和图3(b)所示。



(a) 瞬时性故障



(b) 永久性故障

图3 不同故障性质下的贝杰龙线模等值网络

Fig. 3 Bergeron's line model equivalent network with different fault characteristics

图3中： L_A 、 L_B 分别为保护安装A、B侧所配置的限流电抗器；F为永久性故障端点； I_{L_A} 、 I_{L_B} 分别为 L_A 、 L_B 的贝杰龙历史等值电流源； U_A 、 U_B 、 U_F 为各端点处的线模电压； U_{AB} 、 U_{BA} 、 U_{AF} 、 U_{FA} 、 U_{FB} 、 U_{BF} 分别为各有损传输线端点之间的贝杰龙等值历史电压源； Δt 为贝杰龙计算的理论时间间隔； R_{in} 为换流器注入信号理论内阻； R_F 为永久性故障下的过渡电阻； U_{in} 为换流器注入电压波形； τ_0 为电压波从MMC₁侧传播至MMC₂侧的时间； τ_1 、 τ_2 分别为永久性故障下电压波从MMC₁、MMC₂侧传播至故障点所需时间。

1.3 重合主动注入信号方式

DCCB跳开故障线路后进入延时去游离状态，此时线路上的电压、电流均为0，无法提取有效电气量进行故障性质判别。因此，本文方法选择在去游离后短时间开放单侧支路，使电压信号有效注入

到故障线路中, 进而根据实测线模电压和理论线模电压判定所发生故障的性质。

常用的混合式 DCCB 拓扑结构如图 4 所示, 其主要由耗能支路、主支路以及转移支路 3 部分并联组合而成。其主支路由超快速机械开关(ultra fast disconnect, UFD)以及负载换流开关(load commutation switch, LCS)串联组合而成^[27-28]; 转移支路由绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)共发射-集电极串联型子模块组成; 耗能支路由金属氧化物限流器(metal oxide varistor, MOV)串并联构成^[29]。绘制注入信号的生成方式时序图, 如图 5 所示。

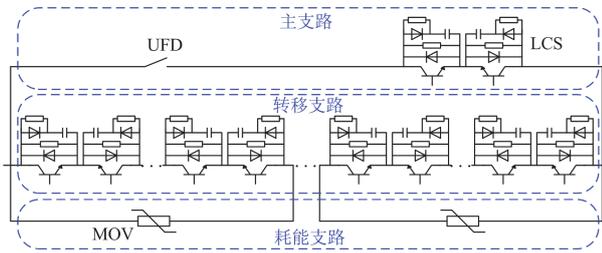


图 4 混合式 DCCB 拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of a hybrid DCCB

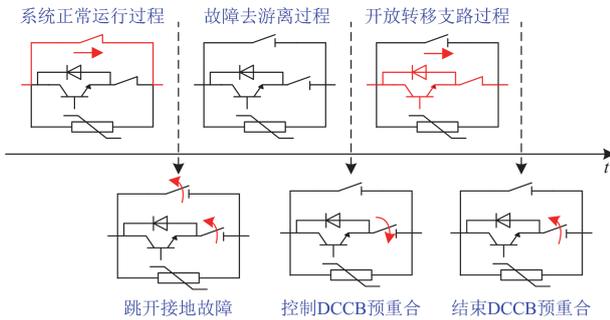


图 5 直流断路器注入电压信号时序图

Fig. 5 Timing chart of voltage signal injection for DCCB

当多端直流输电系统正常运行区内线路发生故障时, 线路主保护识别为区内故障, 线路两侧的混合式 DCCB 的主支路和转移支路在接收到动作信号后相继断开, 故障线路的能量由能量耗散支路中的 MOV 泄放, 并完成故障线路的隔离; 随后, DCCB 维持开断状态进入去游离阶段; 待故障去游离完成后, 短时开放单侧 DCCB 的转移支路以实现电压信号的注入; 此后, 经过预先设定的固定时间 t_{CB} 后立即关断转移支路。文献[30]论证了依赖混合式 DCCB 转移支路短时重合注入特征信号的可行性。由于本文方法并不依赖特定信号注入进行故障性质判别, 因此从防止重合闸导致系统遭受二次故障冲击的角度考虑, 需限制电压注入时长 t_{CB} 。根据文献[31]可

知, 柔性直流系统能够耐受故障的时间仅为几毫秒(通常为 6 ms), 而对于具有固有动作时间的直流断路器要求更为严格(通常为 3 ms)。因此, 为确保不因注入时间过长而导致注入侧换流器闭锁, 甚至影响剩余系统持续运行, 混合式 DCCB 的注入时长 t_{CB} 也不应该超过 3 ms。

2 自适应重合判据

2.1 DTW 算法

为改善传统度量算法在计算两段存在固有时差序列相似性过程中无意义的点对点运算问题, Berndt 和 Clifford 提出了基于两段序列波形形状的 DTW 方法^[32]。相较于欧氏距离等算法在同一时刻下点对点的总距离计算方法, DTW 方法允许在计算距离的过程中让某一个离散点对应非同一时刻的某个离散点, 使每个点尽可能找到距离最小的点。

设离散采样点的时间序列 P 、 Q 的长度分别为 n 、 m , 故有 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 、 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 。DTW 方法通过构造距离矩阵 D 实现两段时间序列的非线性对齐, 其中 D 为 $m \times n$ 阶的矩阵, 用于存放两个序列点对点之间的欧氏距离, 矩阵 D 的计算方式如式(2)和式(3)所示, 其中 $\|\cdot\|_2$ 表示 2 阶范数。

$$d(i, j) = \|p_i - q_j\|_2 \quad (2)$$

$$D = \begin{bmatrix} d(1,1) & d(1,2) & \dots & d(1,m) \\ d(2,1) & d(2,2) & \dots & d(2,m) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d(n,1) & d(n,2) & \dots & d(n,m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

DTW 的核心思想是将距离矩阵 D 看成一个网格, 以 $d(1,1)$ 为起点、 $d(n,m)$ 为终点, 寻找一条通过 D 矩阵网格的最优路径, 需要构造与距离矩阵 D 形状相同的累计距离矩阵 D_{cd} , 其组成元素 $r(i, j)$ 表示步进到位置 (i, j) 时的最小累加距离, 求取方式如式(4)、式(5)所示, 式(4)表示 D_{cd} 首行与首列的初始化过程, $\delta(i, j)$ 为步进方向因子, 式(5)表示矩阵其余位置采用动态规划搜寻方法。累计距离矩阵 D_{cd} 的终点 $r(n, m)$ 即代表两个序列之间的 DTW 最小距离。

$$\begin{cases} r(i, j) = \sum_{k=1}^i d(k, 1) & i \in [1, n] \\ r(i, j) = \sum_{k=1}^j d(1, k) & j \in [1, m] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \delta(i, j) = \min \begin{cases} r(i-1, j-1) \\ r(i-1, j) \\ r(i, j-1) \end{cases} & i \in [2, n], j \in [2, m] \\ r(i, j) = \delta(i, j) + d(i, j) \end{cases} \quad (5)$$

$$D_{cd} = \begin{bmatrix} r(1,1) & r(1,2) & \cdots & r(1,m) \\ r(2,1) & r(2,2) & \cdots & r(2,m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(n,1) & r(n,2) & \cdots & r(n,m) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 基于 DTW 算法重构延序列面积差的自适应重合判据

基于式(5)的3个约束,距离矩阵 D 中网格的步进方向被分为向右、向下和向右下,每次步进方向为向下和向右时,等效于对应原序列在当前离散点的复制拉伸,过程可由式(7)表示,其中 $p_{i,i+1}$ 表示在原序列 p_i 与 p_{i+1} 之间插入的数据, $q_{j,j+1}$ 同理。

$$\begin{cases} p_{i,i+1} = p_i, \delta(i, j) = r(i, j-1) \\ q_{j,j+1} = q_j, \delta(i, j) = r(i-1, j) \end{cases} \quad (7)$$

通过上述方法对原序列进行拉伸后,能够得到消除时差影响后的重构序列 $P^* = \{p_1^*, p_2^*, \dots, p_h^*\}$ 、 $Q^* = \{q_1^*, q_2^*, \dots, q_h^*\}$,其中 h 为动态规划搜寻总步长。为考察两段重构序列的相似情况,求取基于 DTW 重构延序列的面积差 S^* ,如式(8)所示。

$$S^* = \int_{t_1}^{t_2} |P^* - Q^*| dt \quad (8)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为序列对应的起始、终止时间。

为消除实测波形因线路波阻抗以及过渡电阻等因素对波形幅值所造成的影响,对实测线模电压值和理论线模电压值分别进行归一化处理,并记为 U_{lmrea} 和 U_{lmref} 。由于储存于本地保护安装处 m 的理论值 U_{lmref} 是根据瞬时性故障情况下的网络拓扑结构计算得出的,因此当发生瞬时性故障时,通过 DTW

算法重构后的序列 U_{lmrea}^* 与 U_{lmref}^* 应高度相同,则计算所得的重构延序列面积差 S_m^* 也应接近于0。

$$S_m^* = \int_{t_1}^{t_2} |U_{lmrea}^* - U_{lmref}^*| dt \approx 0 \quad (9)$$

当发生永久性故障时,由于线路模型的拓扑结构遭到破坏,归一化后实测值 U_{lmrea} 与基于瞬时性故障网络拓扑计算所得的 U_{lmref} 存在较大差异,即重构延序列面积差 S_m^* 应远大于0,即

$$S_m^* = \int_{t_1}^{t_2} |U_{lmrea}^* - U_{lmref}^*| dt \gg 0 \quad (10)$$

由此,可以构造式(11)所示的自适应重合判据。

$$S_m^* \geq S_{mset}^* \quad (11)$$

式中: S_{mset}^* 为保护安装 m 处的阈值,表示为

$$S_{mset}^* = k_{rel} \cdot S_{mtran}^* \quad (12)$$

式中: k_{rel} 为可靠系数,此处取 1.3; S_{mtran}^* 为保护范围内发生瞬时性故障时计算所得的重构延序列面积差。当满足式(11)所示的条件时,则故障仍未消失,将再次等待 200 ms 去游离后,短时开放 DCCB 转移支路注入换流器信号进行判断,当重复一定次数 N_{set} 后若仍满足式(11),则判断为永久性故障,停止重合闸;若存在不满足式(11)的情况,则判断该故障为瞬时性故障,加速重合闸。

综上,所提出的自适应重合方法的流程图如图 6 所示。其中, N_{rep} 为当次重合闸次数,总循环次数 N_{set} 可根据现场工况进行设定。单次判定故障仍然存在时,可再经 200 ms 的去游离后重复判断;只有线路经多次去游离仍判定为永久性故障时才启动隔离开关、停运故障线路。

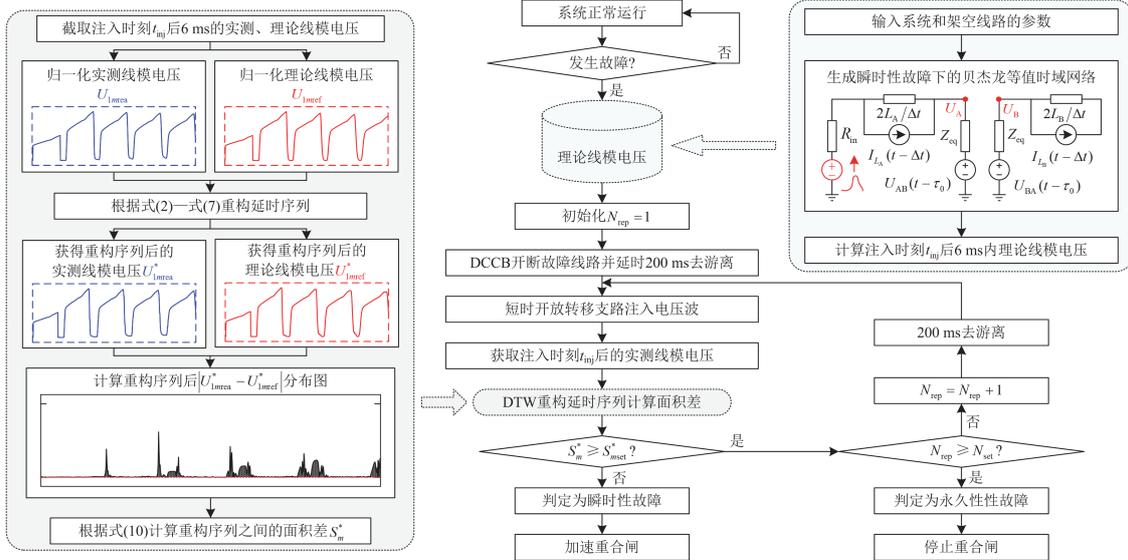


图 6 自适应重合方法流程图

Fig. 6 Flowchart of adaptive reclosing method

3 算例验证

为验证本文所提方法的可行性, 将基于图 1 所示的张北四端柔性直流电网在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建仿真模型^[33]。其中, MMC 子模块均采用半桥型结构, 传输线路采用频变模型, 线路参数、空间分布以及长度如附录 A 图 A1 所示; 每条直流线路两侧配备有限流电抗器(典型值为 100~200 mH, 本文取 100 mH)与混合式 DCCB; 保护装置采样频率为 100 kHz, 采样步长为 10 μ s。

根据 1.3 节所述的故障信号注入原理, 设置主动控制 DCCB 向故障线路注入信号时长为 $t_{CB} = 1$ ms, 并根据故障线路参数将贝杰龙法推导的理论波形储存于线路首端的保护安装处, 以 DCCB 主动注入信号开始后 6 ms 作为故障性质判断的时间窗。因篇幅限制, 本算例均以直流换流器 MMC₁ 与 MMC₂ 之间的直流传输线路 DC Line12 作为研究对象展开验证分析。为方便分析, 设置判别次数 $N_{set} = 1$ 。

3.1 整定计算

在 $t = 1.897$ s 时于线路 DC Line12 中点处设置一极间金属性短路故障来模拟线路发生瞬时性故障, 故障持续时间为 0.1 s。故障发生后, 经过 3 ms 的检测延时, 线路两侧的直流断路器 CB₁₂ 与 CB₂₁ 开始动作隔离故障。经过 200 ms 的去游离后, 在 $t_{inj} = 2.1$ s 时控制直流断路器 CB₁₂ 短时切换至转移支路, 使换流器 MMC₁ 向故障线路注入判断信号, 注入信号时长为 $t_{CB} = 1$ ms, 图 7 展示了 A 处的实际波形。

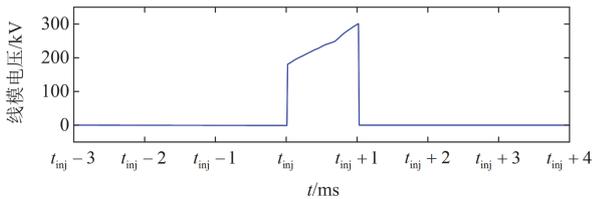


图 7 实际注入信号波形图

Fig. 7 Waveform diagram of actual injected signal

A 处所检测到的归一化实测线模电压波形 U_{1Area} 与储存于 A 处的贝杰龙法计算出的归一化理论线模电压波形 U_{1Aref} 如图 8 所示。

将 U_{1Area} 与 U_{1Aref} 送入故障性质判断流程, 为减小采样频率对理论波形造成的误差, 通过 DTW 算法重构后的新序列 U_{1Area}^* 与 U_{1Aref}^* , 如图 9 所示, 新序列间的差的绝对值 $|U_{1Area}^* - U_{1Aref}^*|$ 如图 10 所示。

因此, 可以计算出新序列之间差的绝对值 $|U_{1Area}^* - U_{1Aref}^*|$ 与坐标轴 $y = 0$ 所围成面积 $S_A^* \approx$

0.036。当可靠系数 k_{rel} 选为 1.3 时, 可以得到整定值 $S_{Aset}^* = 1.3 \times 0.036 \approx 0.047$ 。其余各条线路整定值见表 1。

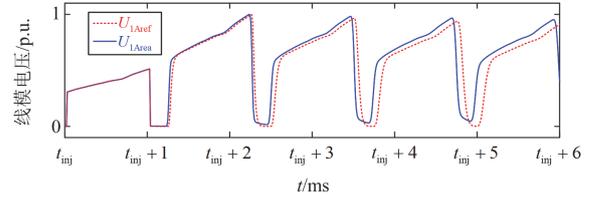


图 8 整定过程中保护安装处的线模电压波形图

Fig. 8 Waveform diagram of line-mode voltage at the protection installation location during setting process

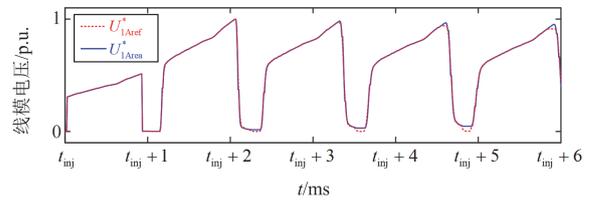


图 9 整定过程中保护安装处的重构线模电压波形图

Fig. 9 Waveform diagram of reconstructed line-mode voltage at the protection installation location during setting process

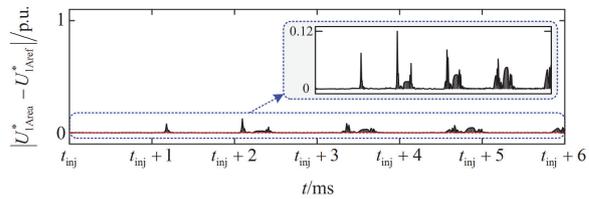


图 10 整定过程中重构波形差的绝对值分布图

Fig. 10 Distribution diagram of the absolute value of reconstructed waveform differences during the setting process

表 1 四端柔直电网各线路保护安装处的整定值

Table 1 Setting values at the protection installation locations for each line in the four-terminal flexible DC power grid

线路编号	线路长度/ km	可靠系数 选取	注入 时长/ms	动作 阈值
DC Line12	184.4	1.3	1.0	0.047
DC Line23	101.0	1.3	0.4	0.072
DC Line34	131.1	1.3	0.4	0.062
DC Line41	78.3	1.3	0.4	0.104

3.2 永久性故障仿真

3.2.1 极间永久性金属短路故障仿真

在 $t = 1.897$ s 时, 在线路 DC Line12 距离 A 处 80 km 处设置持续时间为 5 s 的金属性极间故障, 以模拟永久性故障拓扑下的暂态情况。故障发生后的

3 ms, 直流断路器 CB_{12} 与 CB_{21} 动作并切断故障线路 DC Line12, 经过 200 ms 的去游离时间后, 在 $t_{inj} = 2.1$ s 时控制断路器 CB_{12} 短时启用转移支路, 使 MMC_1 向故障线路注入信号, 注入持续时间 $t_{CB} = 1$ ms。将 A 处所检测到的归一化实际线模电压波形 U_{1Area} 与储存于 A 处通过贝杰龙法推导出的归一化理论线模电压波形 U_{1Aref} 送入故障性质判断流程。通过 DTW 算法得到重构后的新序列 U_{1Area}^* 与 U_{1Aref}^* , 如图 11(a)所示, 新序列间差的绝对值 $|U_{1Area}^* - U_{1Aref}^*|$ 如图 11(b)所示。

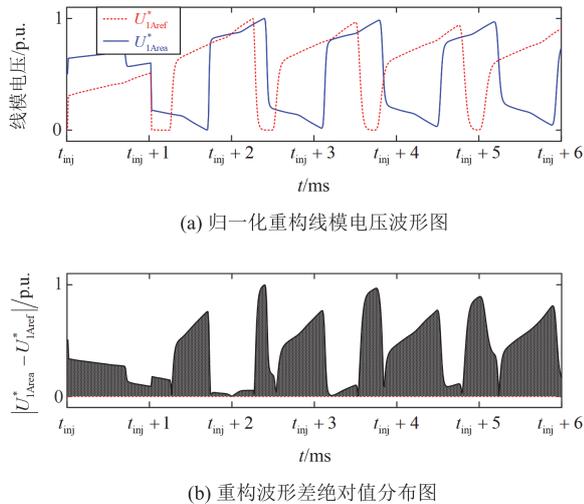


图 11 区内极间永久性金属故障

Fig. 11 Inner-area bipolar permanent metallic fault

由图 11(b)中阴影面积可以计算出 $S_A^* = 2.43$, 大于面积整定值 S_{Aset}^* , 因此将该次故障性质判定为永久性故障, 断路器 CB_{12} 与 CB_{21} 不重合。为检验本文方法在极间永久性故障情况下的适用性, 保持其他仿真设定参数不变, 在 DC Line12 上仿真了不同位置发生极间金属性故障时本保护方法的动作情况, 结果如表 2 所示。表中, “√”代表直流断路器重合, “×”代表直流断路器不重合。

表 2 极间永久性金属性短路故障仿真结果

Table 2 Simulation results of bipolar permanent metallic short-circuit fault

故障位置/km	S_A^*	断路器是否重合?
20	2.566	×
50	2.187	×
80	2.429	×
110	2.200	×
140	2.079	×
180	1.825	×

3.2.2 单极永久性金属性接地故障仿真

保持其他仿真设定参数不变, 仅将故障类型从极间金属性短路故障更改为线路负极金属性接地故障。向故障线路注入特征信号后, 保护装置 A 点的重构实测线模电压 U_{1Area}^* 与理论线模电压 U_{1Aref}^* 如图 12(a)所示, 重构波形差的绝对值分布如图 12(b)所示。

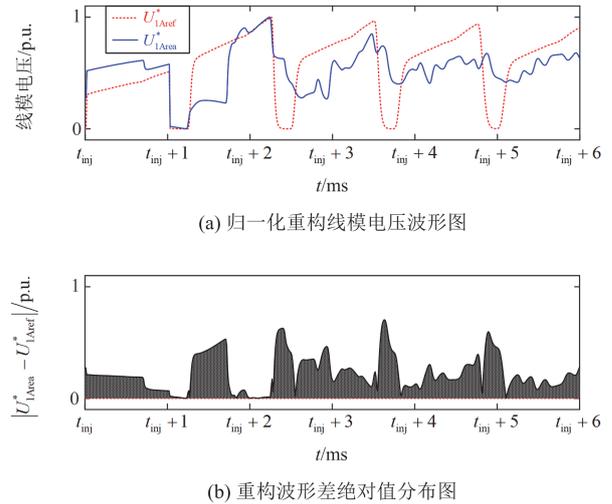


图 12 区内负极永久性金属接地故障

Fig. 12 Internal permanent negative pole metallic fault

计算图 12(b)中阴影面积可以得到 $S_A^* = 1.342$, 大于面积整定值 S_{Aset}^* , 因此将该次故障性质判定为永久性故障, 断路器 CB_{12} 与 CB_{21} 不重合。保持其他仿真设定参数不变, 在 DC Line12 的负极线路不同位置处仿真发生金属性接地故障时本保护方法的动作情况, 结果如表 3 所示。

表 3 单极永久性金属性接地故障仿真结果

Table 3 Results of unipolar permanent metallic grounding fault

故障位置/km	S_A^*	断路器是否重合?
20	1.412	×
50	1.504	×
80	1.342	×
110	1.468	×
140	1.125	×
170	1.825	×

3.3 瞬时性故障仿真

为考核瞬时性故障工况, $t = 1.897$ s 时, 在线路 DC Line12 的负极线路距离 A 测点 80 km 处设置单极金属性接地故障, 持续时间为 0.1 s。故障发生后 3 ms 系统检测到区内故障跳开 CB_{12} 与 CB_{21} 。经过 200 ms 去游离时间后, 在 $t_{inj} = 2.1$ s 时控制 CB_{12} 短时启用转移支路, 使 MMC_1 向故障线路注入信号, 注

入持续时间 $t_{CB} = 1 \text{ ms}$ 。保护安装处 A 点的重构实测线模电压 $U_{1\text{Area}}^*$ 与理论线模电压 $U_{1\text{Aref}}^*$ 如图 13(a) 所示, 新序列之差的绝对值分布如图 13(b) 所示。

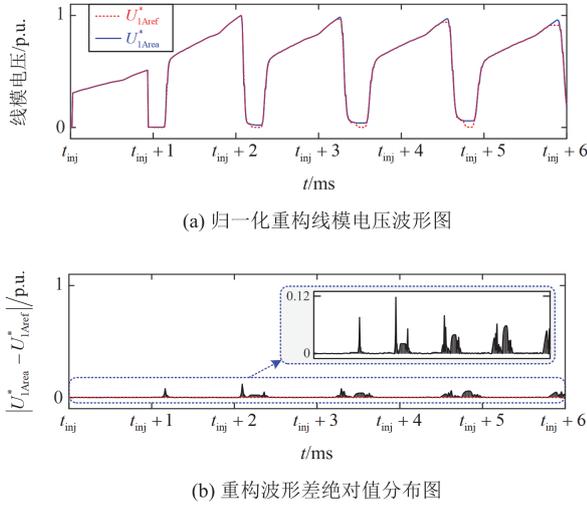


图 13 区内负极瞬时性金属接地故障

Fig. 13 Internal transient negative pole metallic grounding fault

计算图 13(b) 中阴影面积可以得到 $S_A^* = 0.041$, 小于面积整定值 S_{Aset}^* , 因此保护流程将该次故障性质判定为瞬时性故障, 断路器 CB_{12} 与 CB_{21} 重合。保持其他参数不变, 分别在 DC Line12 的负极线路/极间线路的不同位置处仿真瞬时性金属接地/短路故障, 结果如表 4 所示。可见, 由于 DTW 需要通过时间序列的弹性变换使波形扭曲最小化, 在解决两个时间序列之间相似度的度量方面有一定随机误差, 但基本维持在 ± 0.005 的偏差范围内。因此, 设置 $k_{\text{rel}} = 1.3$ 的可靠系数能够覆盖算法本身的随机误差, 从而保证所提重合方法的安全性。

表 4 单极/极间瞬时金属性故障仿真结果

Table 4 Simulation results of unipolar/bipolar transient metallic fault

故障位置/km	故障类型	S_A^*	断路器是否重合?
20	单极金属性接地	0.037	✓
	极间金属性短路	0.038	✓
50	单极金属性接地	0.034	✓
	极间金属性短路	0.032	✓
80	单极金属性接地	0.041	✓
	极间金属性短路	0.036	✓
110	单极金属性接地	0.036	✓
	极间金属性短路	0.037	✓
140	单极金属性接地	0.035	✓
	极间金属性短路	0.034	✓
170	单极金属性接地	0.038	✓
	极间金属性短路	0.037	✓

3.4 永久性故障情况下考虑过渡电阻的影响

保持其他仿真设定参数不变, 将故障类型从极间经过渡电阻短路故障更改为线路负极经过渡电阻接地故障, 过渡电阻大小为 300Ω 。向故障线路注入特征信号后, 保护安装处 A 点的重构实测线模电压 $U_{1\text{Area}}^*$ 与理论线模电压 $U_{1\text{Aref}}^*$ 如图 14(a) 所示, 新序列之差的绝对值如图 14(b) 所示。

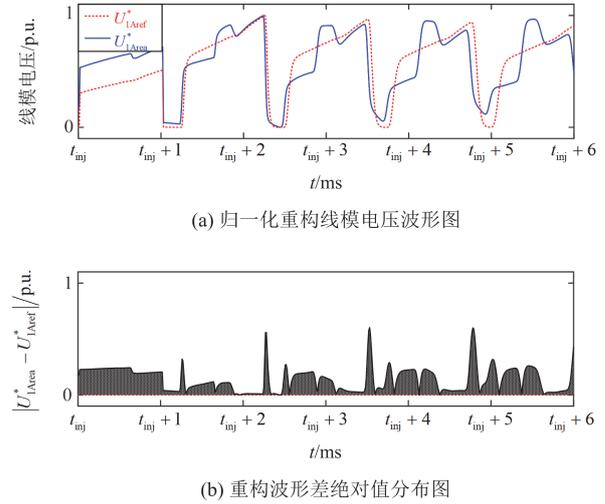


图 14 区内负极永久性高阻(300 Ω)接地故障

Fig. 14 Permanent high-impedance (300 Ω) negative pole grounding fault within the zone

计算图 14(b) 中阴影面积可得 $S_A^* = 0.829$, 大于面积整定值 S_{Aset}^* , 因此保护流程将该次故障性质判定为永久性故障, 断路器 CB_{12} 与 CB_{21} 不重合。在 DC Line12 的不同位置处设置负极经不同过渡电阻的单极接地故障, 仿真结果如表 5 所示。

表 5 单极经不同过渡电阻接地故障仿真结果

Table 5 Simulation results of unipolar grounding faults via different transition resistance

故障位置/km	故障过渡电阻/Ω	S_A^*	断路器是否重合?
20	300	0.986	×
	600	0.913	×
90	300	0.829	×
	600	0.746	×
160	300	0.892	×
	600	0.864	×

4 讨论

4.1 对比分析

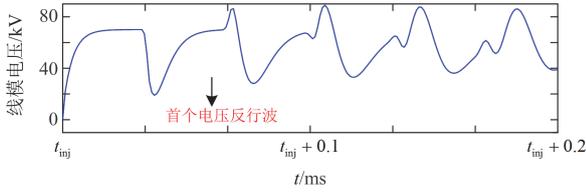
无选择性的重合方案^[34]的弊端已有诸多研究论证, 故在此仅对比基于主动信号注入的故障性质识别与重合闸方案, 包括通过换流器注入^[35-36]、通

过改进直流断路器结构注入^[10]以及通过附加设备注入^[37]。以文献[35-36]为例,根据所述方法,在200 ms的去游离过程后控制MMC换流器向直流故障线路注入一个电压脉冲 U_{inj} ,该脉冲的幅值为 $50\sqrt{2}$ kV,持续时间为0.2 ms,判据为

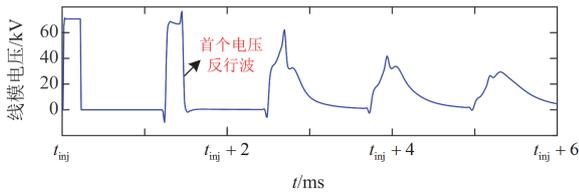
$$\begin{cases} u_{set} = -K_{REL} \frac{Z_1}{R_{fmax} + 0.5Z_1} U_{inj} \\ U_{reflect} \leq u_{set} \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_{set} 为传统注入法的阈值; K_{REL} 为取值0.6的可靠系数; R_{fmax} 为所考虑的最大过渡电阻,在本文中设置为600 Ω ; Z_1 为故障直流线路的线模波阻抗,经计算可以得到 $u_{set} = -13.15$ kV; $U_{reflect}$ 为第一个反射波的幅值。若 $U_{reflect} \leq u_{set}$ 成立,则判断直流线路故障性质为永久性。

在图1中DC Line12的区内近端(5 km)与远端(179.4 km)处设置永久性接地故障,仿真结果如图15(a)、图15(b)所示。由图15(a)可知,近端永久性故障场景下,行波波头在保护安装处与故障点之间来回折反射并相互叠加,与应有的负极性相悖,因此存在误判风险,图15(b)所示的远端故障也有类似问题。



(a) 近端永久性接地故障



(b) 远端永久性接地故障

图15 近/远端下传统注入法的电压波形

Fig. 15 Voltage waveform of conventional injection method under close/remote end fault

在图1中DC Line12的中点处设置永久性负极经不同过渡电阻(0 Ω 、300 Ω 、600 Ω)接地故障,仿真结果如图16所示。可见,随着过渡电阻的增大,首个反射波的负极性遭到削弱,并且在600 Ω 的过渡电阻下首个线模反射波 $U_{reflect} = -9.76$ kV $>$ $u_{set} = -13.15$ kV,不满足式(13),误判为瞬时性故障。

进一步设置多个永久性接地故障场景,如表6所示,其中“ \times ”表示将永久性故障错误识别为瞬

时性故障, x 表示线路故障位置距离本地保护安装处的位置系数。可见,传统注入法在面临600 Ω 高阻接地故障以及近端、远端金属性接地故障时均无法准确识别,而本文所提方法灵敏度较高。

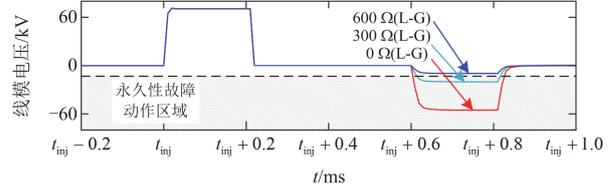


图16 不同过渡电阻下传统注入法的性能

Fig. 16 Performance of conventional injection method under different transition resistance

表6 对比结果

Table 6 Comparison results

故障位置系数	过渡电阻/ Ω	$U_{reflect}$ /kV	传统方法	本文方法
			动作是否正确?	S_A^* 动作是否正确?
$x = 0.03$	0	85.57	\times	1.33 \checkmark
	600	72.30	\times	0.96 \checkmark
$x = 0.10$	0	-90.42	\checkmark	1.44 \checkmark
	600	-8.31	\times	0.92 \checkmark
$x = 0.50$	0	-55.20	\checkmark	1.42 \checkmark
	600	-9.76	\times	1.23 \checkmark
$x = 0.90$	0	-60.56	\checkmark	1.75 \checkmark
	600	-11.86	\times	0.86 \checkmark
$x = 0.97$	0	76.54	\times	1.89 \checkmark
	600	97.89	\times	0.82 \checkmark

注:传统注入法所设定的阈值为 $u_{set} = -13.15$ kV;基于DTW重构序列方法所设定阈值为 $S_{Aset}^* = 0.047$ 。

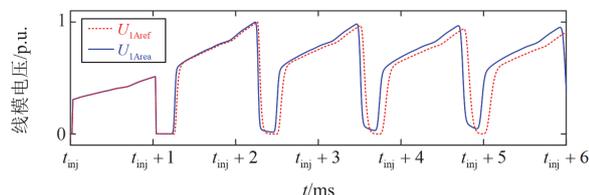
4.2 DTW 算法与灵敏性的关系

对于多端直流电网,无论是使用换流器还是直流断路器生成注入信号,其波形都是类脉冲性质的。由于贝杰龙法对特定频率的依赖,无法在计算理论波形过程中模拟线路的频变特性,因此理论与实际故障波形之间仍有误差。

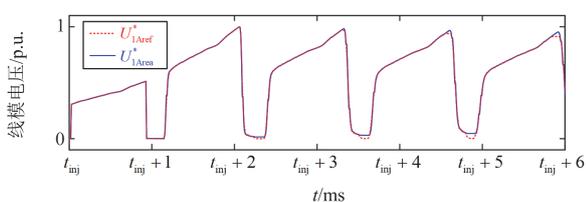
本文通过进一步引入DTW算法重构序列,以消除分段贝杰龙线路理论波形与实际波形之间存在的频变误差。图17(a)、图17(b)分别为使用DTW重构序列前、后的理论波形与实际波形比对图。

由图17(a)可得到未经过DTW算法重构序列的序列之差绝对值 $|U_{1Area}^* - U_{1Aref}^*|$ 与坐标轴 $y = 0$ 所围成面积,如图18所示,面积差 $S_A = 0.682$,动作阈值 $S_{Aset} = 1.3 \times 0.682 = 0.8866$;由图17(b)计算经过DTW算法重构序列的序列之差绝对值 $|U_{1Area}^* - U_{1Aref}^*|$ 与坐标轴 $y = 0$ 所围成的面积 S_A^* 为0.036, $S_{Aset}^* =$

$1.3 \times 0.036 = 0.047$ 。可见由于计算 S_A 过程中没有使用 DTW 方法重构序列, 理论波形与实际波形存在误差, 所计算阈值 S_A 约为 S_A^* 的 19 倍, 这将极大地劣化保护的灵敏性。



(a) 使用DTW算法重构序列前



(b) 使用DTW算法重构序列后

图 17 本地保护安装处的线模电压波形图

Fig. 17 Line-modal voltage waveform at installation of local protection

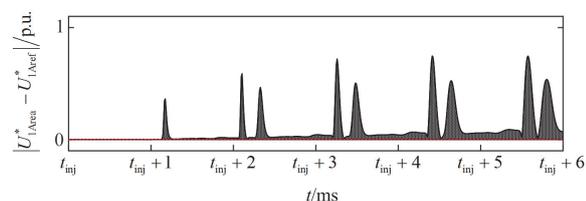
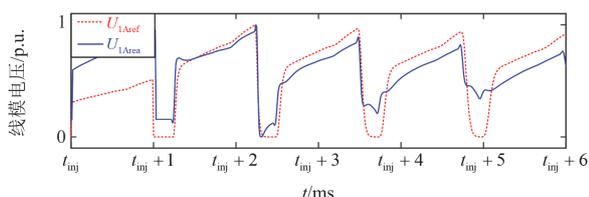


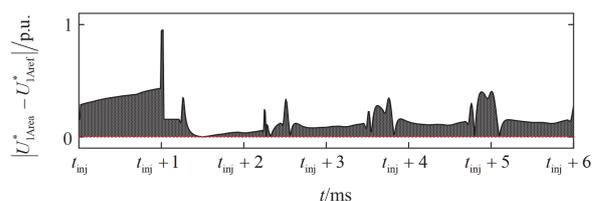
图 18 整定过程中的线模电压波形图(未使用 DTW)

Fig. 18 Waveform of setting line-modal voltage (without DTW)

以表 6 中 $x=0.97$ 处发生永久性单极经 600Ω 过渡电阻的接地故障为例进行说明, 图 19 为未使用 DTW 算法的线模电压波形图以及波形差绝对值分布图, 经计算 $S_A = 0.823 < S_{Aset} = 0.8866$, 将永久性故障错误识别为瞬时性; 图 20 为使用 DTW 重构序列的判断过程, 经计算 $S_A^* = 0.719 > S_{Aset}^* = 0.036$, 能够反映此时的远端高阻故障。可见, DTW 的引入增强了本文方法的灵敏性。不同故障位置下有无 DTW 的保护动作情况对比结果见附录 A 表 A1。



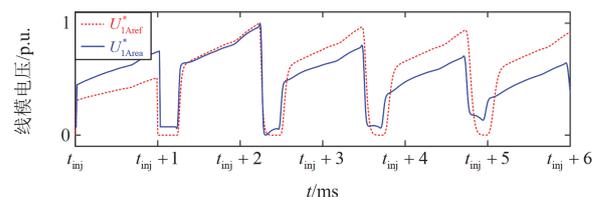
(a) 归一线模电压波形图



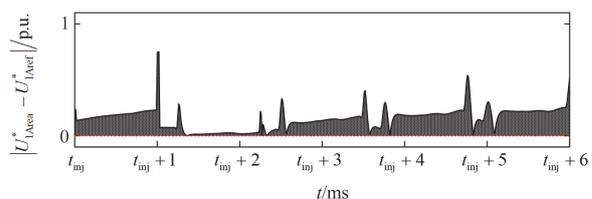
(b) 波形差绝对值分布图

图 19 远端永久性单极高阻接地故障(未使用 DTW)

Fig. 19 Remote-end permanent unipolar high-resistance grounding fault (without DTW)



(a) 归一线模电压波形图



(b) 重构波形差绝对值分布图

图 20 远端永久性单极高阻接地故障(使用 DTW)

Fig. 20 Remote-end permanent unipolar high-resistance grounding fault (with DTW)

4.3 限流电抗器变化的影响

为校验不同限流电抗器大小条件下本文所提方法的适应性, 保持其他条件不变, 改变限流电抗器的取值为 200 mH , 在线路 DC Line12 的 $x=0.97$ 处设置负极经 600Ω 过渡电阻永久性接地故障进行说明, 保护安装处 A 点的重构实测线模电压与理论线模电压如图 21(a)所示, 新序列之差的绝对值分布如图 21(b)所示。

由图 21(a)可见, 由于重构实测波形 U_{1Aarea}^* 在远端和高阻下, 首个线模电压反行波几乎完全呈现为正极性。计算图 21(b)中的阴影面积可得 $S_A^* = 0.927$, 大于面积整定值 S_{Aset}^* , 因此永久性故障判定结果正确。不同故障位置、不同限流电抗器下, 所提方法的动作情况见附录 A 表 A2。由附录 A 表 A2 与图 21 算例仿真结果可见, 本文所提方法能够适应工程约束范围内限流电抗器的取值 ($100 \sim 200 \text{ mH}$)。

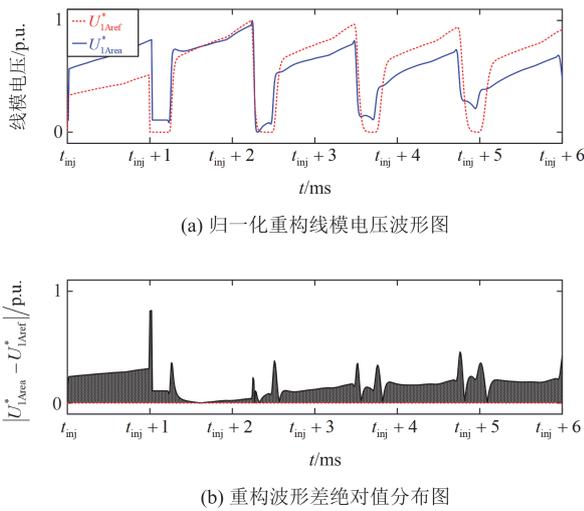


图 21 200 mH 限流电抗器下远端高阻接地故障

Fig. 21 Remote-end high-resistance grounding fault with 200 mH current limiting reactance

5 结论

本文提出了一种不依赖换流器特定波形注入的故障性质判别方法。在构建机理、抗过渡电阻能力、判别死区 3 个方面，得出如下结论：

1) 与基于网格法计算行波多次折反射叠加的方法相比，本文使用贝杰龙法构建等值时域网络，能够较为精确地计算预期电压行波的初始波过程，且能够在避免使用通信的前提下构造重合判据。

2) 为弥补分段贝杰龙法模拟架空线路时无法充分考虑线路频变特性的问题，采用了 DTW 重构序列消除残余误差后，理论波形与计算波形归一化后的波形差 S_A^* 仅为 0.036，在可接受范围内。

3) 在故障已熄弧的瞬时性故障工况下，由于待重合线路具有明确的单一拓扑结构，因此 DTW 重构序列之差的绝对值与可靠系数相乘构造的整定门槛，可覆盖算法本身的随机误差，从而维持瞬时性故障工况下自适应重合判据的选择性与安全性。

4) 在永久性故障的条件下，与基于反射波的传统故障性质判别方法相比，本文通过比对时间窗内的全时域波形局部特征构建判据，能够消除死区问题，实现线路全长范围内的故障性质判别，且具有较强的抗过渡电阻能力。

附录A

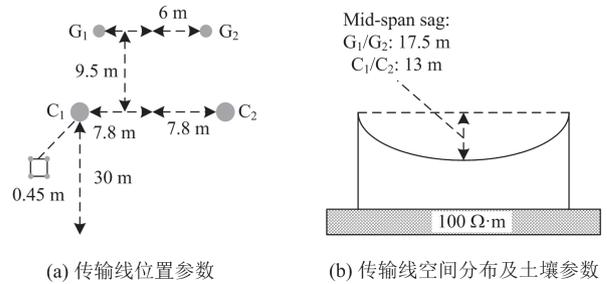


图 A1 线路模型参数

Fig. A1 Parameters of the transmission line model

表 A1 有/无 DTW 情况下的判据动作情况对比

Table A1 Criterion performance comparison of the proposed method with/without DTW

故障位置系数	过渡电阻 R_f/Ω	无 DTW 重构序列		有 DTW 重构序列	
		S_A	动作是否正确?	S_A^*	动作是否正确?
x = 0.03	0	1.95	✓	1.58	✓
	600	1.31	✓	0.73	✓
x = 0.10	0	1.63	✓	1.32	✓
	600	0.98	✓	0.75	✓
x = 0.30	0	1.97	✓	1.69	✓
	600	1.66	✓	1.42	✓
x = 0.50	0	1.73	✓	1.62	✓
	600	1.41	✓	1.17	✓
x = 0.70	0	1.67	✓	1.36	✓
	600	1.19	✓	0.86	✓
x = 0.90	0	1.79	✓	1.66	✓
	600	0.83	✗	0.71	✓
x = 0.97	0	1.62	✓	1.51	✓
	600	0.82	✗	0.72	✓

注：无 DTW 重构序列时所设定门槛值为 $S_{Aset} = 0.887$ ；有 DTW 重构序列时所设定门槛值为 $S_{Aset}^* = 0.047$ 。

表 A2 不同限流电抗器大小下的动作情况

Table A2 Performance under different fault-current-limiting reactance values

故障位置系数	过渡电阻 R_f/Ω	150 mH		200 mH	
		S_A^*	动作是否正确?	S_A^*	动作是否正确?
$x = 0.03$	0	1.47	✓	1.58	✓
	600	0.92	✓	0.73	✓
$x = 0.10$	0	1.56	✓	1.82	✓
	600	0.81	✓	0.75	✓
$x = 0.50$	0	1.51	✓	1.62	✓
	600	1.34	✓	1.17	✓
$x = 0.90$	0	1.87	✓	1.66	✓
	600	0.94	✓	0.71	✓
$x = 0.97$	0	1.73	✓	1.67	✓
	600	0.72	✓	0.93	✓

注: 限流电抗器为 150 mH 时所设定门槛值为 $S_{Aset}^* = 0.052$; 限流电抗器为 200 mH 时所设定门槛值为 $S_{Aset}^* = 0.069$ 。

参考文献

- [1] 陈田田, 赵振廷, 李银红. 不依赖边界元件的柔性直流电网反时限过流保护配置方案[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 48-58.
CHEN Tiantian, ZHAO Zhenting, LI Yinhong. Inverse time overcurrent protection configuration scheme for a flexible DC power grid independent of boundary components[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 48-58.
- [2] YANG Zhe, WANG Hongyi, LIAO Wenlong, et al. Protection challenges and solutions for AC systems with renewable energy sources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 10(1): 18-39.
- [3] 沈毅, 黄琛, 赵振廷, 等. 兼顾短路与断线故障识别的柔性直流电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 143-155.
SHEN Yi, HUANG Chen, ZHAO Zhenting, et al. A traveling wave protection scheme for flexible DC power grids considering both short-circuit and breakage fault identification[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 143-155.
- [4] 刘宇昂, 戴志辉, 杨明玉, 等. 柔性直流电网故障电流复合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 93-101.
LIU Yu'ang, DAI Zhihui, YANG Mingyu, et al. Composite fault-current suppression strategy for flexible DC grids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 93-101.
- [5] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J]. 智能电网, 2016, 4(2): 116-123.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy interconnection[J]. Smart Grid, 2016, 4(2): 116-123.
- [6] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [7] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [8] 高飘, 郑晓冬, 晁晨栩, 等. 基于边界暂态能量的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 171-179.
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on boundary transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 171-179.
- [9] 黎钊, 郑宇超, 林湘宁, 等. 基于波形相似度特征的多端柔直电网故障自适应重合闸方案[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1326-1339.
LI Zhao, ZHENG Yuchao, LIN Xiangning, et al. Adaptive reclosing scheme for VSC-MTDC line based on the transient current waveform similarity matching[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1326-1339.
- [10] ZHANG Shuo, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. A reclosing scheme of hybrid DC circuit breaker for MMC-HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7126-7137.
- [11] 张盛梅, 安婷, 裴翔羽, 等. 混合式直流断路器重合闸策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 129-136.
ZHANG Shengmei, AN Ting, PEI Xiangyu, et al. Reclosing strategy for hybrid DC circuit breakers[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2019, 43(6): 129-136.
- [12] 李再男, 贾科, 李俊涛, 等. 基于线路残余能量的柔直输电线路极间故障重合闸[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6562-6576.
LI Zainan, JIA Ke, LI Juntao, et al. Pole-to-pole fault reclosing for DC transmission line based on residual line energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6562-6576.
- [13] 张大海, 杨宇辰, 梁晨光, 等. 基于改进直流断路器注入信号的柔直电网自适应重合闸方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 123-132.
ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIANG Chenguang, et al. Adaptive reclosing scheme for flexible DC power grid based on improved DC circuit breaker injecting signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 123-132.
- [14] 陈晓龙, 周宁, 韩小文, 等. 一种具备自适应重合闸能力的混合式直流断路器[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4718-4731.
CHEN Xiaolong, ZHOU Ning, HAN Xiaowen, et al. A hybrid DC circuit breaker with adaptive reclosing ability[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4718-4731.
- [15] 陈晓龙, 冯永涛, 周宁, 等. 具备自适应重合闸能力的多端口混合式直流断路器[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2601-2613.
CHEN Xiaolong, FENG Yongtao, ZHOU Ning, et al. Multi-port hybrid DC circuit breaker with adaptive reclosing capability[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2601-2613.
- [16] 王常骐, 路佳宁, 洪玮, 等. 基于直流限流电路的直流单极接地故障自适应重合闸技术[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4877-4887.
WANG Changqi, LU Jianing, HONG Wei, et al. An adaptive reclosing technology for DC pole-to-ground fault based on DC current limiting circuit[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4877-4887.
- [17] KAMALINEJAD. K, IMAN-EINI H, SAMIMI M H. A modification in thyristor-based hybrid DC circuit breaker for DC-side fault identification in auto-reclosing of MMC-HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 4119-4126.
- [18] 杨赛昭, 向往, 杨睿璋, 等. 基于半桥型 MMC 和混合式 DCCB 的柔直系统直流故障自适应重合闸技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4440-4451.
YANG Saizhao, XIANG Wang, YANG Ruizhang, et al. Research on adaptive reclosing technology for the half-bridge MMC and hybrid DC circuit breaker based on HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4440-4451.
- [19] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用全桥 MMC 注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 149-156.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injection with FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 149-156.
- [20] WANG Ting, SONG Guobing, HUSSAIN K S T. Adaptive single-pole auto-reclosing scheme for hybrid MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2194-2203.
- [21] HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault property discrimination scheme in hybrid MTDC power system based on the amplitude distribution of injection signal[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138.
- [22] ZHANG Jingru, HE Baina, CUI Rongxi, et al. Novel adaptive reclosing scheme of MMC-HVDC transmission lines based on phase synchronization compensation control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(9): 1836-1848.
- [23] 王惠泽, 曹书豪, 冯谟可, 等. 考虑参数频变特性的电力电缆改进贝杰龙模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3722-3732.
WANG Huize, CAO Shuhao, FENG Moke, et al. Improved Bergeron model of power cable considering parameter frequency-dependent characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3722-3732.
- [24] GAO Xu, MA Yingxin, WEN Weijie, et al. Auto-reclosing strategy for mechanical DCCB with current commutation drive circuit[C] // 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference, November 21-23, 2019, Beijing, China: 1807-1811.
- [25] QUISPE J C, MORALES J, ORDUÑA E. Ultra-high-speed transmission line differential protection using an error index of Bergeron equation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2021, 19(7): 1182-1190.
- [26] 权文杰, 童晓阳, 张广骁. 基于 S 变换行波能谱矩阵相似度的柔性直流单端保护方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 178-186.
QUAN Wenjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Single-end flexible DC protection scheme based on similarity of S-transform energy spectrum matrix of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 178-186.
- [27] 李弼智, 周万迪, 王新颖, 等. 直流电网用混合式直流

- 断路器开断参数影响因素研究[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1377-1387.
 LI Pengzhi, ZHOU Wandi, WANG Xinying, et al. Breaking parameter influencing factors of hybrid DC circuit breaker applied to DC power grids[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1377-1387.
- [28] 杨田, 刘晓明, 吴其, 等. 单向直流断路器拓扑与保护策略分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 1): 259-266.
 YANG Tian, LIU Xiaoming, WU Qi, et al. Analysis on the unidirectional DC circuit breaker and protection strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 259-266.
- [29] LIU Siyuan, POPOV M, MIRHOSSEINI S S, et al. Modeling, experimental validation, and application of VARC HVDC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1515-1526.
- [30] 贾海鹏, 尹靖元, 李金科, 等. 基于晶闸管的混合式高压直流断路器重合闸控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 46-54.
 JIA Haipeng, YIN Jingyuan, LI Jinke, et al. Auto-reclosing control strategy of thyristors-based high voltage DC hybrid circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 46-54.
- [31] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3557.
 ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3557.
- [32] 李鑫, 高伟, 杨耿杰. 基于动态时间规整的光伏系统直流串联电弧故障特征提取[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 82-89.
 LI Xin, GAO Wei, YANG Gengjie. DC series arc fault feature extraction for photovoltaic system based on dynamic time warping[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(12): 82-89.
- [33] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.
 LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139.
- [34] 陈力绪, 袁帅, 严俊, 等. 考虑多端协同的柔性直流电网直流故障保护和恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8164-8177.
 CHEN Lixu, YUAN Shuai, YAN Jun, et al. DC fault protection and recovery strategy for VSC-HVDC grid considering multi-terminal cooperation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8164-8177.
- [35] YANG Saizhao, XIANG Wang, LU Xiaojun, et al. An adaptive reclosing strategy for MMC-HVDC systems with hybrid DC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1111-1123.
- [36] SONG Guobing, WANG Ting, HUSSAIN K. DC line fault identification based on pulse injection from hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 271-280.
- [37] MEI Jun, GE Rui, ZHU Pengfei, et al. An adaptive reclosing scheme for MMC-HVDC systems based on pulse injection from parallel energy absorption module[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1809-1818.

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-08-25

作者简介:

娄杰(1975—), 男, 副教授, 研究方向为高电压与绝缘、设备在线监测等; E-mail: loujie00@sdu.edu.cn

武小梅(1972—), 女, 通信作者, 副教授, 研究方向为综合能源与电力经济、电力系统运行与控制。E-mail: epxm_wu@gdut.edu.cn

(编辑 许威)