

一种利用暂态电流时域突变特征的 输电线路纵联保护方案

王柄然, 王增平, 王彤, 吕哲

(新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

A Pilot Protection Scheme for Transmission Lines Based on the Time Domain Mutation Characteristics of Transient Current

WANG Bingran, WANG Zengping, WANG Tong, LÜ Zhe

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

ABSTRACT: Fully extracting fault transient characteristics is crucial for enhancing the protection of renewable power systems. However, existing methods face challenges in setting action thresholds and computational demands. This paper proposes a pilot protection scheme for transmission lines using transient current time-domain mutations. First, the relative time-domain mutation characteristics of fault transient currents in bus outgoing lines are analyzed, leading to a method for determining the fault forward direction without fixed settings. Second, the sequential overlapping derivative transform amplifies high-frequency mutation differences and filters out low-frequency characteristics, simplifying calculations. Based on this, a transient directional pilot protection scheme is proposed. Finally, the scheme's feasibility is verified through PSCAD simulations and hardware tests, showing good applicability and practical engineering value across various transmission lines.

KEY WORDS: new power systems; transmission lines; directional pilot protection scheme

摘要: 充分挖掘故障暂态特征是提升新型电力系统保护性能的重要手段, 然而现有暂态量保护方法在实际应用中仍面临动作门槛值整定困难、算法计算量较大等挑战。针对上述问题, 提出了一种利用暂态电流时域突变特征的输电线路纵联保护方案。首先, 分析了母线各出线故障暂态电流在时域突变特征上的相对关系, 据此提出了不依赖于定值整定的故障正方向判别方法; 其次, 研究表明交叉重叠差分变换能够很好的放大高频突变差异, 滤除低频近似特征, 变换后的电流幅值相对关系明显, 运算简单符合暂态量保护快速计算的要求, 基于此提出了一种暂态方向纵联保护方案; 最后, 分别基于

PSCAD 仿真试验与硬件试验进行了验证, 该方案在不同的输电线路中均具有较好的普适性, 具备较好的工程实用价值。

关键词: 新型电力系统; 输电线路; 方向纵联保护

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1329

0 引言

我国新能源装机容量占比逐年升高^[1], 由于新能源通过变流器接入电力系统, 故障电流呈现弱馈特征与时变特征, 传统的依托源-径参数恒定的工频量保护灵敏度下降, 速动性难以满足需求, 系统安全问题更加突出^[2-4]。故障暂态阶段观测时间短, 受系统参数制约因素少, 并且蕴含着丰富的故障信息^[5], 成为当下的研究热点。基于行波信号的暂态量保护主要分为以下3类:

1) 利用故障首行波的极性^[6-7]、到达时刻^[8-10]、波头陡度^[11-13]构成行波保护方案, 方案对于采样装置提出了较高要求, 在工程实现的过程中需要解决噪声、离散脉冲信号对行波信号的干扰, 能够精确识别出波头是方案的关键。初始行波后续的折反射过程构成了暂态量保护, 其观测时窗更长, 不依赖初始波头的准确提取, 容错率得到了提升。

2) 利用人工智能强大的数据处理能力, 通过既往故障数据以及实验室仿真数据进行训练, 构建故障识别模型, 实现保护的功能^[14-15]。此类保护方案对故障数据的体量与真实性要求较高。

3) 利用交流线路母线电容对高频信号的边界效应构成的保护方案^[16], 母线边界在考虑电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)与金属氧化物避雷器(metal-oxide arrester, MOA)的高频阻抗特性后, 高频滤波特性得到了显著增强^[17], 这

基金项目: 国家自然科学基金集成项目(U22B6006)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Integration Project) (U22B6006).

为基于母线边界的保护方案提供了强有力的理论支撑。根据边界效应导致的频率分布差异构成基于单端暂态能量的保护方案^[18-19], 然而方案强依赖定值, 不同的故障类型下能量差异较大, 并且噪声、雷击、采样误差均会导致能量产生较大偏差。文献^[20-21]利用站域信息交互技术, 首次提出利用能量的相对关系判别故障方向, 构成纵联方向保护方案, 避免了此类保护对于定值的强依赖。

随着智能变电站技术的发展, 站域主机利用通信网络获取各回输电线路的暂态信息成为了可能, 通过多元信息比较进行故障识别, 将有效提升暂态量保护的可靠性。目前对此类保护的研究不够充分, 关于故障方向判别的理论推导部分有所欠缺, 单纯利用母线边界折反射系数的幅频特性无法说明电流高频量与故障方向的关系; 保护方案的测试场景有待增加, 暂态量保护的应用场景主要为新型电力系统; 结合算法实际以及装置采样的工程实用性尚未明晰, 例如能量熵的运算实际上将耗费装置较长的时间, 同时实际装置采样对于高频部分的失真也会对熵值产生较大影响。

因此, 本文提出了一种基于电流累积突变量的输电线路纵联保护方案, 首先分析了母线各出线暂态电流的突变量差异特征, 其次利用交叉重叠差分变换实现了突变量的精准提取, 最后利用累积突变能量的相对关系识别故障方向构成纵联保护方案。随后在逆变型电源送出线路中进行了仿真验证与硬件实验, 实验结果表明该保护方案具有灵敏度高、可靠性高的优点, 算法耗时短, 具备较好的工程可实现性。

1 暂态电流突变量特征分析

输电线路发生短路故障后, 行波在母线边界处的折反射过程蕴含着故障方向的信息, 本节首先推导了故障首行波在母线边界处的折反射效果, 随后将输电线路中行波的折反射全过程归纳为无数个规律相同的行波序列的叠加, 通过研究单个序列中电流突变量的大小关系, 推导出了母线两侧电流累积突变量的相对关系, 为利用该相对关系进行故障方向判别的方法奠定了理论基础。

1.1 首行波在母线处的折反射效果

输电线路短路故障后, 根据叠加定理可以将故障网络等效为故障前正常运行的网络与故障附加网络, 故障附加网络中的故障电源将产生电压行波, 其瞬时波形如图 1 所示。在波过程分析中, 任何波形都可以用单元无限长直角波叠加而得, 故从突变

信号中分离出阶跃行波与工频行波分别进行分析。

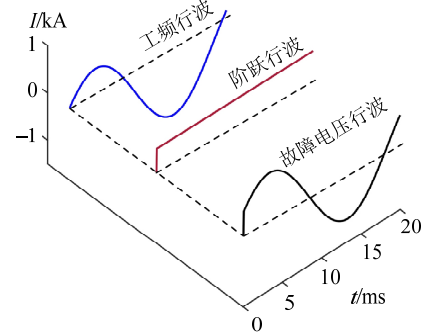


图 1 分解后的电压波

Fig. 1 Decomposed voltage wave

母线电容在低频段呈现高阻特性, 工频行波到达母线边界后将完全透射至相邻线路, 不会发生折反射效果, 故母线两侧的工频信号完全相同。母线电容在高频段呈现低阻特性, 阶跃行波到达母线边界后发生折反射, 造成母线两侧高频信号的差异。

故以阶跃行波为研究对象, 探讨母线两侧行波电流差异化的突变量特征。三相暂态电流之间存在耦合, 通过相模变换进行解耦, 线模通道上的行波波速相对稳定, 色散效应弱, 故以线模行波作为研究对象。初始行波经故障线路传输后将在母线处发生折反射, 如图 2 所示。

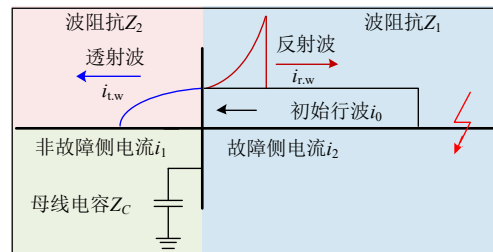


图 2 阶跃行波折反射过程

Fig. 2 Step traveling wave reflection process

故障发生后, 定义母线指向故障线路为正方向, 同一母线的各条出线中, 正方向存在故障的出线为故障侧线路, 反之则为非故障侧线路。根据彼得逊法则, 透射过母线的电压行波 $u_{t.w}$ 的拉氏域表达式可以表示为

$$\begin{cases} U_{t.w}(s) = \frac{2U_0(s)}{Z_1 + Z_2 // Z_c} \cdot (Z_2 // Z_c) \\ U_0(s) = \frac{u_0}{s} \cdot \frac{K_a}{1 + T_a s} \\ Z_c(s) = \frac{1}{sC} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_0(s)$ 为母线边界处故障电压首行波的频域表达式; u_0 表示线模通道上初始阶跃行波的幅值; K_a 为衰减系数, 数值小于 1, 表征行波从故障点传输到母线边界过程中的幅值衰减; T_a 为色散时间常

数, 表征行波在线路传输过程中的畸变程度, 两者均与线路长度呈线性关系。 Z_1 表示故障侧线路的波阻抗, Z_2 表示相邻线路的波阻抗, 当线路中母线有多条出线时, Z_2 代表多条出线波阻抗的并联, Z_C 表示母线电容。

代入 $U_0(s)$ 与 $Z_C(s)$ 后 $U_{t.w}(s)$ 的表达式如下:

$$U_{t.w}(s) = \frac{u_0}{s} \cdot \frac{K_a}{1 + T_a s} \cdot \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_1 Z_2 C s} \quad (2)$$

对式(2)进行一阶近似, 随后进行拉普拉斯逆变换, 得到透射波在时域上的表达式:

$$\begin{cases} u_{t.w}(t) = \frac{2K_a u_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{r}}) \\ r = \frac{Z_1 Z_2 C}{Z_1 + Z_2} + T_a \end{cases} \quad (3)$$

依据母线两侧电压相等, 得到电压的反射波 $u_{r.w}$, 在常数项的计算中近似认为 K_a 等于 1:

$$u_{r.w}(t) = u_{t.w}(t) - u_0 = -\frac{2K_a u_0 Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot e^{-\frac{t}{r}} + \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_0 \quad (4)$$

根据式(3)和(4), 得到电流的透射波与反射波的表达式:

$$i_{t.w}(t) = \frac{u_{t.w}(t)}{Z_2} = \frac{2K_a u_0}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{r}}) \quad (5)$$

$$i_{r.w}(t) = \frac{u_{r.w}(t)}{Z_1} = \frac{2K_a u_0 Z_2}{Z_1(Z_1 + Z_2)} \cdot e^{-\frac{t}{r}} + \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1(Z_1 + Z_2)} u_0 \quad (6)$$

那么母线非故障侧电流的时域表达式为

$$i_1(t) = i_{t.w}(t) = \frac{2K_a u_0}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{r}}) \quad (7)$$

母线故障侧电流为入射波与反射波之和, 时域表达式为

$$i_2(t) = \frac{u_0}{Z_1} + i_{r.w}(t) = \frac{2K_a u_0 Z_2}{Z_1(Z_1 + Z_2)} \cdot e^{-\frac{t}{r}} + \frac{2}{Z_1 + Z_2} u_0 \quad (8)$$

式(7)表示的电流从 $t=0$ 时刻依时间常数 r 缓慢增长, 故非故障侧电流表现为平缓变换的信号; 式(8)表示的电流从 $t=0$ 时刻发生突变, 随后依时间常数 r 衰减, 故障侧电流表现为突变的尖峰。从后文的故障电流仿真曲线可以看出, 初始的折反射行波变化规律满足理论推导, 表达式中 $Z_1=Z_2$ 时, t 趋向于无穷大时数值接近, 且母线两侧的低频信号没有差异, 故电流数值在下一个行波到达前趋于相等。

1.2 暂态电流累积突变量的相对关系

从 1.1 节的推导可以看出, 单次的阶跃行波在母线边界处的折反射效果有着明显的指向关系, 主要表现为故障侧线路信号的突变程度大于非故障

侧线路信号的突变程度。然而系统中行波的折反射全过程较为复杂, 穿过母线边界的方向并不单一, 以图 3(a)所示典型拓扑为例对 N 母线两侧累积的故障行波信号进行分析。将母线 N 两侧的行波分为以下序列: 由故障点射向母线 N 的入射波 a_n , 经母线 N 折反射作用的反射波 c_n 、透射波 b_n , b_n 经系统反射后的行波 a'_n , 以及该行波经 N 母线折反射作用产生的行波 b'_n 、 c'_n , 之后 c'_n 将在 MN 线路中来回折反射。后续任何以 fN 方向入射母线 N 的行波, 其行波折反射路径均依照 $a \rightarrow b \rightarrow a' \rightarrow c' \rightarrow a''$ 这一路径进行整理, 母线两侧的所有行波可拆解为这一序列的叠加。图 3(b)为该线路拓扑下的故障电流仿真曲线。

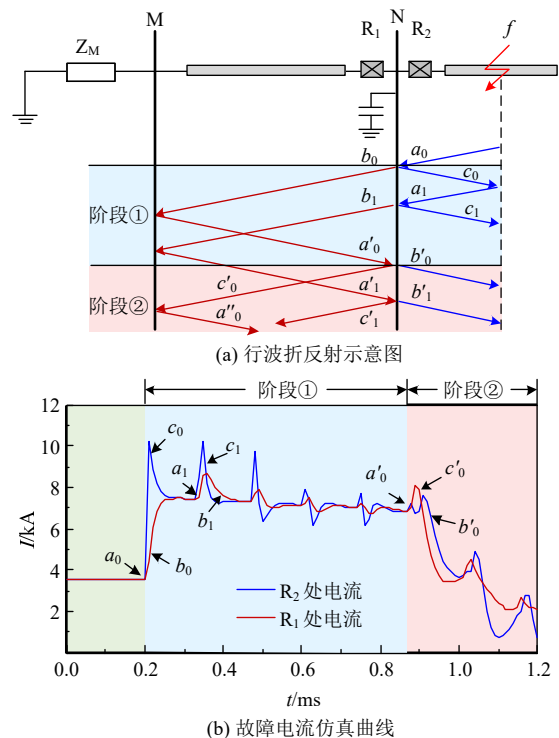


图 3 行波折反射全过程

Fig. 3 Whole process of traveling wave refraction and reflection

根据前文推导, 透射波在波形上的突变程度低于入射波, 如果用 Δx 评估两侧行波的突变量大小 (取绝对值), 存在下述关系:

$$\Delta x(a_n) > \Delta x(b_n) \quad (9)$$

反射波与入射波的叠加构成了故障侧电流, 二者极性相同且呈现突变特征, 使得突变量更大:

$$\Delta x(a_n + c_n) \gg \Delta x(b_n) \quad (10)$$

根据式(1), 信号在线路传输过程中的衰减与畸变同样有着降低突变量大小的效果; 反射系数取值范围在 $[-1, 1]$, 由此可得:

$$\Delta x(a_n) > \Delta x(b_n) > \Delta x(a'_n) \quad (11)$$

行波 a_n 与 a'_n 经过的是同一母线, 必然存在:

$$\Delta x(a_n + c_n) > \Delta x(a'_n + c'_n) \quad (12)$$

c'_n 经系统 M 反射后到达 N 母线的表达式为

$$a''_n = a_n \alpha_N \beta_N \beta_M \gamma_{MN}^4 \quad (13)$$

式中: α 、 β 表示折反射系数, γ 表示线路衰减系数。经计算认为 c'_n 后续的折反射行波突变量已十分微弱, 在电流累积突变量的比较中可以忽略。

那么整个折反射过程存在以下关系:

$$\sum \Delta x(a_n + c_n) + \sum \Delta x(b'_n) > \sum \Delta x(b_n) + \sum \Delta x(a'_n + c'_n) \quad (14)$$

不等式左侧表示 R_2 检测到的电流累积突变量, 不等式右侧表示 R_1 检测到的电流累积突变量。可见正方向存在故障的保护处的电流累积突变量相对较高。从能量的角度, 可以形象地理解为 a_n 作为路径中的初始入射波, 其能量被反射回故障侧线路一部分, 并且其后的折反射、线路传输均使透射波能量产生了损耗, 因此在非故障线路内折反射的波能量之和应低于初始波与反射波的能量之和。

当系统中存在广泛的新能源电源接入时, 行波的传输过程并不会受到影响, 其只与故障源、线路分布参数以及线路边界有关, 信号分析时选取合适的频段即可避免新能源电源特性对行波造成的影响^[22], 在后文中均有详细的分析。

2 保护方案设计

2.1 交叉重叠差分变换

交叉重叠差分(sequential overlapping derivative, SOD)变换属于一种差分运算, 其运算逻辑如式(15)所示, 该变换运算简单, 对信号进行循环的差分运算即可; 差分阶数越高, 得到的结果越能反映信号的突变特征^[23]。

$$S^{r+1}(n) = S^r(n+1) - S^r(n), \quad r \geq 0 \quad (15)$$

式中: r 表示变换的阶数, $r=0$ 时表示原信号。

图 4 展示了样本数据的 SOD 变换结果。对平缓变化的数据, SOD 变换得到的数值趋向于零; 对于突变的数据, SOD 变换得到的数值将放大。通过该算法对故障电流信号进行处理, 母线两侧信号中的工频分量、谐波分量等不存在差异的量将被滤除, 而阶跃行波折反射导致的突变量将被放大, 其变换结果能够直观地表现暂态电流累积突变量的大小。

对故障后含有噪声的电流信号进行 SOD 变换, 多阶 SOD 变换的效果对比如附录 A 图 A1 所示, 可以看到 4 阶变换已将行波信号放大到足够明显的程度, 低阶变换的效果欠佳; 而更高阶的变换则会将噪声效果过度增强, 综合考虑算力与变换的效果,

采用 4 阶 SOD 变换作为电流累积量的提取方法。

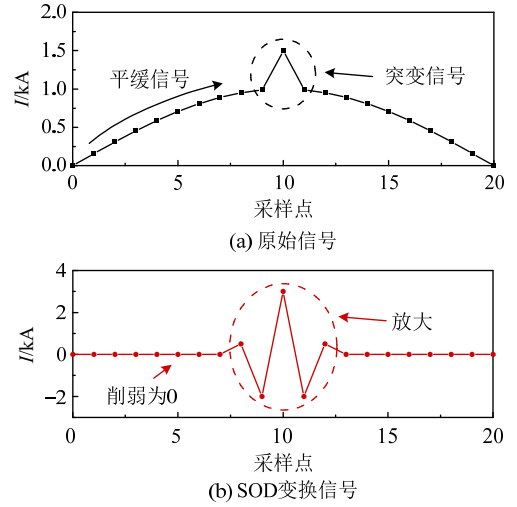


图 4 SOD 变换结果示意图

Fig. 4 SOD transformation result diagram

2.2 保护流程

根据前文的理论推导与 SOD 的变换效果, 构建基于电流累积突变能量的纵联保护方案。

信号的变换结果中存在负值, 通过计算变换结果的偶数次方和来表征电流累积突变量的能量, 定义为累积突变能量; 考虑到弱边界场景下(母线电容数值较小)信号差异较弱, 同时噪声变换后也会产生突变能量, 为提高累积突变能量中行波电流能量的占比, 选取变换结果的 4 次方和作为累积突变能量:

$$E_{\text{SOD}} = \sum_{n=1}^k S^4(n)^4 \quad (16)$$

式中: k 为采样窗内的电流信号经 SOD 变换后的样本个数。

根据 1.2 节的分析, 暂态电流累积突变量的相对关系是存在于整个波的折反射的过程的, 理论上故障时窗可以任意取值, 经大量的仿真测试, 突变能量主要集中在故障开始后的 2ms 内, 故选取 2ms 作为保护的采样窗长。

根据 1.1 节中推导, 电流在故障前后有明显的突变量差异, 选取电流突变量作为保护启动判据, 按照躲过正常运行时的最大电流突变量整定启动门槛, 本文设置为 0.1 倍的额定电流。

$$\begin{cases} |\Delta I| > \Delta I_{\text{set}} \\ \Delta I_{\text{set}} = 0.1 I_N \end{cases} \quad (17)$$

新能源侧故障电流由于逆变型电源的限流特性, 幅值变化较低, 区内高阻故障时更为严重, 存在保护启动延迟甚至无法启动的问题, 零序电压在高阻不对称故障时仍有较大突变特征, 选取零序电压突变量作为辅助保护启动判据能够解决不对称故障情形下的保护启动问题, 按照高阻故障时的最

小电压突变量整定启动门槛, 本文设置为 0.01 倍的额定电压。

$$\begin{cases} |\Delta U_0| > \Delta U_{0set} \\ \Delta U_{0set} = 0.01 \cdot U_N \end{cases} \quad (18)$$

保护元件启动后, 母线各出线计算累积突变能量 E_{SOD} , 将结果上传至站域主机。雷击干扰发生时, 幅值较大的雷电波同样会产生高额的累积突变能量, 设置雷击扰动能量判据能够识别此类雷击干扰, 当 E_{SOD} 超过雷电能量门槛 E_{Tset} 后闭锁保护, 整体的雷击干扰识别方案在后文有详细分析。

由站域主机选取各出线累积突变能量的最小值作为基准值, 计算其他出线累积突变能量 E_{SOD} 与基准值的比值 k_i 。

$$k_i = \frac{E_{SOD}^{(i)}}{\min\{E_{SOD}^{(1)}, E_{SOD}^{(2)}, \dots, E_{SOD}^{(n)}\}} \quad (19)$$

比较同一母线处各出线的 k_i , 选定 k_i 最大的出线, 将能量比值 k_{max} 与 k_{set} 进行比较。

k_{set} 为动作阈值设定, 主要是用以防止扰动导致的误动作, 仅当最大的比值高于阈值时, 才认为故障正方向存在故障。本文通过以下 3 种场景的测试进行数值整定: 无故障情形下引入噪声, 母线故障, 母线有多条出线时的故障。非故障线路的最大能量比值不会超过 2, 乘以可靠系数 $k_{rel}=1.5$ 后, 将阈值设置为 3。

当 $k_{max} > k_{set}$ 后, 判定线路的正方向发生了故障, 向对侧线路发送允许跳闸信号, 并开放本侧线路的保护动作。倘若保护本侧已开放, 同时收到对侧线路发来的允许跳闸信号, 保护动作。

图 5 为保护中故障判定的流程图。

该保护方案运算量小, 无需选取合适的基函数, 将更具普适性; 避免了对于定值的强依赖, 整定方式简单, 并且不需要获取系统参数; 对信号通信的要求不高, 仅需向对侧线路发送一个逻辑信号, 无需实时发送数据。

如果保护在运行的过程中发生了通信通道故障, 那么将无法收到对侧装置传递的允许跳闸信号, 保护将不具备动作能力; 此时的暂态量保护需要转变为单端量保护的辅助判据, 即利用暂态信息构成的故障方向元件独立运行。

3 仿真系统与验证

3.1 同步系统仿真验证

在 PSCAD 中搭建 500kV 系统仿真模型, 如附录 A 图 A2(a)所示, 保护装置采样频率为 100kHz, 线路选用附录 A 图 A2(b)所示的频域相关模型, 母

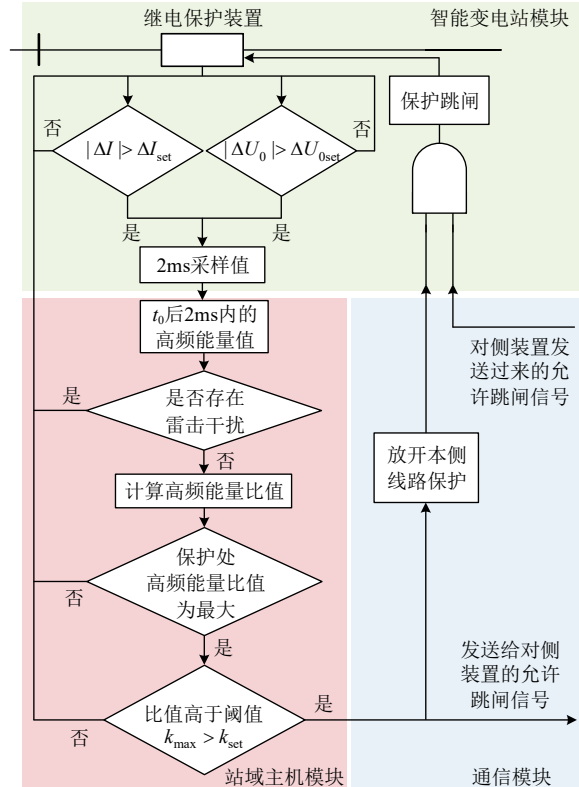


图 5 故障判定流程图

Fig. 5 Fault determination flow chart

线电容设为 $0.1\mu\text{F}$ 。使用 Clark 解耦变换进行相模变换, 分析 α 模分量, 即 $I_\alpha = 2I_a - I_b - I_c$ 。

对两侧的故障电流进行四阶 SOD 变换, 处理后的数据曲线如图 6(a)和 6(b)所示。故障侧电流的变换结果在数值上比非故障侧电流的变换结果要高, 该结果符合第 1 节的理论推导。

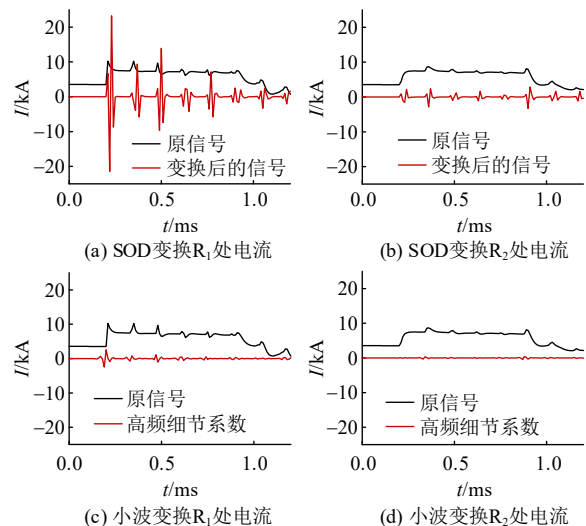


图 6 数据处理对比图

Fig. 6 Data processing comparison diagram

同样的, 小波变换也能够实现高频信号的提取。利用 db4 小波对信号进行变换后重构的高频细节曲线如图 6(c), 6(d)所示。其能量的相对关系也能够揭示故障正方向, 但对比 SOD 变换的结果,

小波变换提取出来的高频系数不是完整的行波，而是一个频段内(25~50kHz)的信号，故提取出的信号幅值低，其效果不如 SOD 变换明显，同频段的噪声能量将不可忽略，影响故障方向的判别；在信号处理复杂度方面，对 200 个采样点进行处理，四阶 SOD 变换仅需进行 800 次减法运算即可实现，而利用长度为 8 的 db4 小波提取第一层高频细节系数与重构需要进行 3200 次乘法，运算负担将大大增加。综上所述，SOD 变换更适用于本方案。

不同算法耗费的运算次数如表 1 所示，其中小波重构算法主要用于计算 2ms 故障时窗内电流的高低频能量比值；小波能量熵需要计算故障开始后，1ms 内每个采样点的熵值并求和，各采样点熵值的计算需要该采样时刻后 1ms 的数据，故需要的故障时窗仍为 2ms。可见本文所提算法显著减少了数据处理需要的算力。

表 1 不同算法消耗算力			
Table 1 Computational power consumption of different algorithms			
运算类型	SOD 变换	小波重构(四层)	小波能量熵
乘法	0	12 000	601 600
加减法	800	12 000	601 600

3.2 新能源送出线路故障电流暂态特性分析

相比于传统电网，新能源侧电流的故障特征发生了变化，从故障源与新能源电源两个角度分析方案能否适用于新能源场景。短路故障后，故障点电压瞬时跌落的故障特征并未发生变化，图 1 中的阶跃行波依然会从故障点传向线路两侧。

从行波折反射过程来看，由于逆变器端口外存在 LCL 滤波器，如图 7 所示，所以输出电流无法发生突变，因而不存在从新能源侧传向故障点的阶跃行波^[24]，并且系统边界同样有变压器等感性元件的存在，1.2 节中的行波折反射过程没有被破坏，结论仍然成立。

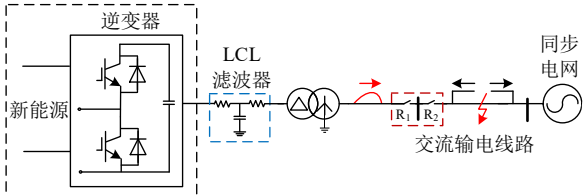


图 7 新能源交流送出线路故障情形

Fig. 7 Fault situation of new energy AC transmission lines

新能源电源流出的电流经滤波器流向保护装置，通过研究滤波器的幅频特性与算法的增益特性，分析可能对方案造成的影响。图 8 为典型参数的 LCL 滤波器的幅频特性 $G(f)$ 与 SOD 变换对不同频率信号的增益 $A(f)$ (100kHz 采样频率)。可以看

到 LCL 滤波器存在一个低于 10kHz 的谐振频率，高于该频率的信号将被抑制，而 SOD 变换将滤除 10kHz 以下的信号，那么新能源电源无论在控制策略的影响下发生了怎样的变化，故障电流经由滤波器传至保护装置处时，SOD 变换后的效果为 0，故源侧电流对于累积突变能量未产生影响。

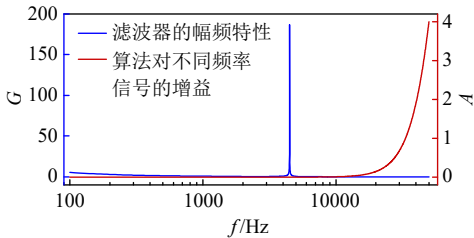


图 8 滤波器与算法的幅频特性

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristics of filter and algorithm

在 PSCAD 中搭建线路参数，电压等级完全相同的双馈风机送出系统与光伏送出系统，设置相同故障位置、故障初相角的故障，即故障后电压跌落相同，行波折反射路径相同，但新能源电源的控制策略存在差异，对两者故障后的新能源侧的电流数据进行 SOD 变换处理与频域分解，结果如图附录 A 图 A3 所示。原信号差异明显，利用小波变换对信号进行分解后，不难看出信号在 6.25~50kHz 频段几乎没有区别，差异主要体现在 0~6.25kHz 的频段内。经过 SOD 变换后，两者的变换结果几乎相似。据此，认为新能源电源导致的差异频段在经过 SOD 变换后会被滤除，同时行波行为没有受到新能源电源暂态特性的影响。

3.3 逆变型电源送出线路仿真验证

为进一步验证保护方案的可行性，在 PSCAD 中分别搭建双馈风机、光伏电站、柔性直流输电线路接入电网的模型，如图 9 所示。

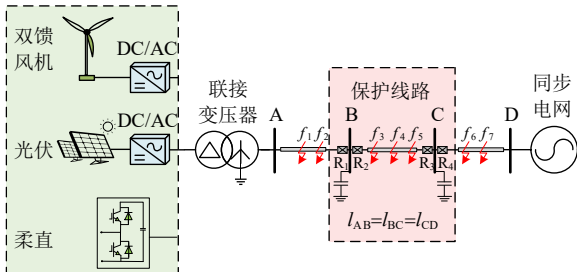


图 9 PSCAD 仿真模型示意图

Fig. 9 PSCAD simulation model diagram

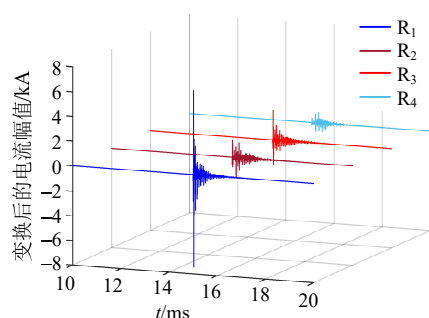
保护安装在 B、C 两条母线两侧，采样频率为 100kHz。故障位置为 f_1 — f_7 ，其中 f_1 、 f_4 、 f_7 为线路中点处的故障，剩余各点为距离母线边界 1km 处的故障。故障类型对于保护方案没有影响，均设置为单相接地故障，故障初相角为 90° ，过渡电阻为

0.01Ω。

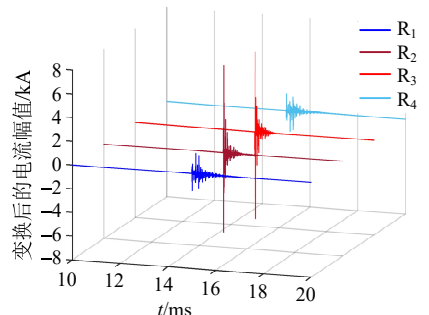
为充分说明保护方案在逆变型电源送出线路中的适用性,本文进行了以下两组对比实验。

对比实验一:将每段线路长度 l 固定为20km,变更逆变型电源模块,探究逆变型电源对于保护方案的影响。

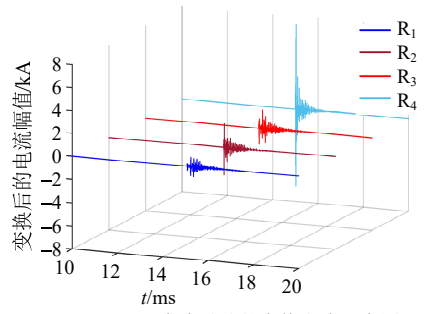
图10(a)、10(b)、10(c)为柔直送出线路在 f_1 、 f_4 、 f_7 处发生故障时, R_1 — R_4 的变换电流示意图。



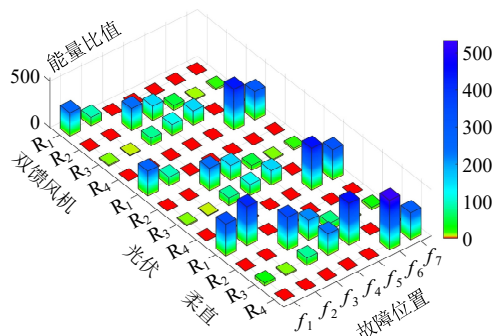
(a) f_1 处发生故障的变换电流示意图



(b) f_4 处发生故障的变换电流示意图



(c) f_7 处发生故障的变换电流示意图



(d) 各个位置下的仿真结果

图10 仿真测试结果示意图

Fig. 10 A schematic diagram of simulation test results

故障发生后,变换后的电流值发生了激增。从图10(a)中可以看到,当故障发生在AB线路上时,

R_1 处电流变换后的整体能量明显大于 R_2 处的电流变换后的整体能量,在这种情况下,母线会判定 R_2 的正方向不存在故障,闭锁 R_2 处的保护,也不会向对侧线路发送允许跳闸信号;从图10(b)中可以看到,当故障发生在被保护线路上时, R_2 处电流变换后的整体能量明显大于 R_1 处的电流变换后的整体能量, R_3 处电流变换后的整体能量明显大于 R_4 处的电流变换后的整体能量,在这种情况下,母线会判定 R_2 与 R_3 的正方向均存在故障,向对侧线路发送允许跳闸信号的同时放开本侧线路的保护。

图10(d)为所有的仿真测试结果,其中红色柱体表示装置处比值小于 k_{set} ,非红色柱体表示装置的正方向可能存在故障。经对比发现,双馈风机与光伏的故障数据处理结果几乎相似,柔直送出线路故障数据与两者存在差异,这主要与滤波器结构、等效阻抗相关,但这并没有影响故障判别,因此保护方案对不同的逆变型电源具有较强的适应性。

对比实验二:逆变型电源固定,探究不同线路长度下的动作性能。将逆变型电源固定为光伏电站,每段线路长度 l 更改为50,100km。

附录A表A1为测试结果。从表中可以看出,线路长度发生改变,并不影响各站域对于故障正方向的判别,保护方案对于不同长度的线路具有很好的适用性。设置的线路长度越长,能量比值越高,这是因为对于整个行波折反射过程来说,线路长度影响着图3(b)中②阶段开始的快慢,也决定着②阶段折反射的密集程度,线路越长,②阶段开始越慢,同时折反射的次数越少,母线两侧能量的相对关系就愈加明显。

4 保护性能分析

在本节的研究中,将仿真系统中光伏送出线路每段长度设定为100km,双馈风机送出线路每段长度设定为50km,柔直送出线路每段长度设定为20km。

4.1 故障初相角

基于阶跃行波的保护方案容易受到故障初相角的影响,故障初相角较小时,电压跌落的程度低,阶跃行波幅值低,故障电流信号中的累积突变能量较低,但考虑到行波行为没有发生改变,同一母线各出线累积突变能量高低的相对关系不会受到影响。选取 f_1 、 f_4 、 f_7 作为故障点,将故障角设置为接近 0° 的数值,测试保护方案的动作性能。测试结果如表2所示,可见方案对小故障初相角有较强的适应性,能够在接近 0° 初相角的故障条

件下正确动作。

表 2 0°故障初相角仿真测试结果 Table 2 0°fault initial phase angle simulation test results					
位置	系统	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
f ₁	光伏	1480.6	1	44.1	1
	双馈	782.5	1	122	1
	柔直	271.9	1	23.5	1
f ₄	光伏	1	1303.2	1428.6	1
	双馈	1	634.9	583.9	1
	柔直	1	197.8	214.4	1
f ₇	光伏	1	45.4	1	1443.9
	双馈	1	94.6	1	782.8
	柔直	1	23.6	1	345.1

4.2 过渡电阻

过渡电阻同样影响着行波的幅值、形态。选取 f₁、f₄、f₇ 作为故障点，将过渡电阻设置为 300Ω，测试该故障情形下保护方案的动作性能。测试结果如表 3 所示，可见方案对过渡电阻有较强的适应性，能够在高阻接地的故障条件下正确动作。

表 3 300Ω过渡电阻仿真测试结果 Table 3 300Ω transition resistance simulation test results					
位置	系统	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
f ₁	光伏	1122.8	1	36.1	1
	双馈	573.9	1	90.2	1
	柔直	231.6	1	15.6	1
f ₄	光伏	1	979.1	1053.5	1
	双馈	1	441.4	420.5	1
	柔直	1	140.9	127.7	1
f ₇	光伏	1	30.6	1	1057.9
	双馈	1	64.9	1	553.9
	柔直	1	14.1	1	213.2

4.3 母线电容

根据第 1 节中的推导可知，母线电容对行波折反射的影响颇高。母线电容减小，时间常数 τ 减小，使得透射波的变化幅度增大，降低了母线两侧电流的差异。表 4 给出了光伏送出线在不同母线电容的场景下，f₄ 处发生故障的累积突变能量比值。可以看出母线电容的大小对累积突变能量比值的影响较大，母线电容越小，累积突变能量值的相对关系就越弱。

表 4 不同母线电容仿真测试结果 Table 4 Different bus capacitance simulation test results				
母线电容/μF	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
0.05	1	220.2	272.1	1
0.01	1	16.92	25.14	1
0.006	1	4.21	4.59	1

4.4 噪声干扰

以柔直送出线路的故障电流为例，探究噪声干扰对保护性能的影响。附录 A 图 A4 为 R₁、R₂ 处电流分别添加 50、30dB 噪声后的变流变换对比图。

从图 A4 中可以看到，噪声环境下的保护装置依然能够依据能量的相对关系识别故障正方向。信号中存在噪声时，其形态也满足突变特征，故幅值会被放大；噪声的强度越大，对保护的影响越大。表 5 为不同噪声下该节所示故障电流的能量比值。

表 5 不同噪声仿真测试结果 Table 5 Different noise simulation test results	
噪声强度/dB	能量比值
50	227.6
30	73.1
25	9.1

噪声达到 25dB 时，其能量比值已经低至接近拒动门槛，本质原因是两侧的噪声能量过高，此时需要通过降噪算法进行滤波。采用小波变换滤除高频噪声，经一层小波变换提取 25~50kHz 频段的信号，用原始信号减去重构后的频段信号 D₁ 以滤除高频噪声。然而行波的波头，尤其是突变特征明显的波头，也蕴含着这一频段的分量，完全滤除将导致行波波头平缓，不利于行波折反射差异特征的比较。

行波波头在 D₁ 中的幅值高于噪声幅值，噪声幅值分布较为均匀，对此，本文提出了一种适配于保护方案的改进滤波算法，计算频段信号 D₁ 内所有信号幅值的绝对值之和，求取平均数 $\overline{|D_1|}$ ，以 2.5 倍的 $\overline{|D_1|}$ 作为门槛，保留 D₁ 中低于门槛值的采样点，将高于门槛值的采样点幅值置 0，原始信号在滤波时就能够有效保留行波的波头突变特征，如图 11 所示。经滤波算法后，能量比值由 9.1 提升至 31.2，增强了强噪声环境下保护的灵敏度。噪声强度过大，幅值大于行波波头时，累积突变能量比值接近于 1，故障方向判别失效，保护闭锁。

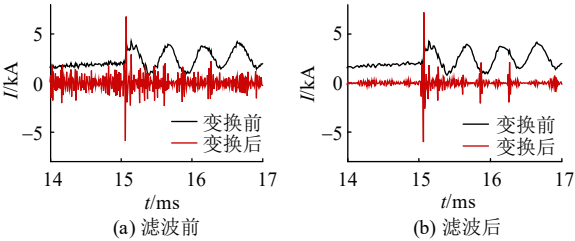


图 11 改进滤波算法前后效果对比图
Fig. 11 Comparison of effects before and after improved filtering algorithm

4.5 雷击干扰

对雷击干扰的情形进行仿真，雷电通道波阻抗设置为 300Ω，使用式(21)所示的标准 2.6/50μs 负极性双指数波模拟雷电流^[25]。

$$i_L(t) = -I_L(e^{-t/\lambda_1} - e^{-t/\lambda_2}) \quad (21)$$

雷击电流的平均幅值可以达到 20kA，分别在柔直送出线路与同步系统中的输电线路(线路分 3 段，每段 100km)的不同位置拟合雷击未发生闪络时的情形，雷电流的幅值设定为 5、10、20kA，在同样的位置设置故障，比对各情形下的最大累积突变能量(4 个保护设备中累积突变能量的最大值)，如图 12 所示。

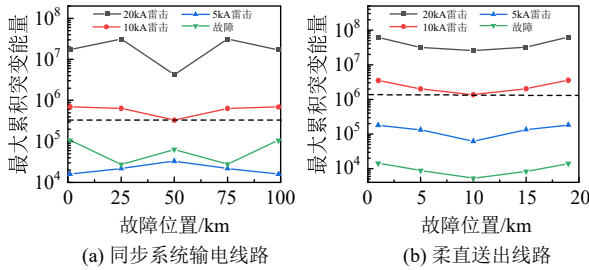


图 12 不同情形下的最大 E_{sod} 比较
Fig. 12 Comparison of maximum E_{sod} under different conditions

可以看到，线路中点发生 10kA 雷击干扰情形下的累积突变能量高于线路发生故障时的累积突变能量，将该能量设定为保护环节中的累积突变能量阈值 E_{Tset} ，构成防止雷击干扰误动的第一个环节；对于幅值更低的雷电信号，本文所提方案仍需现有的雷击干扰识别方法进行配合，例如通过波形一致性系数^[26]、拟合决定系数^[27]的大小来判断行波是故障行波还是雷击行波，从波形特性差异实现雷击故障的有效判别，构成防止雷击干扰误动的第二个环节。两个环节分别从能量和形态上对雷击干扰进行识别，能够大幅提升保护抗雷击干扰的能力。

4.6 电压波动

受端电网电压与送端电网电压的瞬步骤变均会给线路引入暂态量，此时突变的电源均相当于在区外，保护装置判别的故障方向均指向突变电源处。

以光伏送出线为例，设置某一时刻的同步电网电压波动，各保护装置启动后的能量比值计算结果如表 6 所示。线路两侧保护装置的故障方向识别均指向同步电网，因此保护不会误动作。

表 6 电压波动仿真测试结果 Table 6 Voltage fluctuation simulation test results	
保护位置	能量比值
R ₁	1
R ₂	5.87
R ₃	1
R ₄	63.90

4.7 母线有多回出线的情形

在母线处增加两回出线，如图 13 所示，测试不同方向下的故障，结果如表 7 所示。

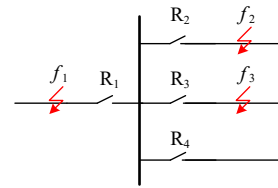


图 13 母线多回出线示意图
Fig. 13 Busbar multi-outlet diagram

表 7 能量比值 k 计算结果 Table 7 Energy ratio k calculation results				
故障位置	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
f_1	5679	1.03	1.01	1
f_2	1	3357	1.06	1.06
f_3	1	1.21	3989	1.64

可见母线有多回出线时，故障线路处的 k 值远大于非故障线路处的 k 值，方案能够准确识别出故障正方向。

4.8 故障位置

前文的故障位置设置较为单一，现对更多不同的故障位置进行测试，以验证方案不受故障位置的影响。区内每 1/20 线路长度的位置设置一个故障点位，区外每 1/4 线路长度的位置设置一个故障点位，20km 线路的测试结果如附录 A 表 A2 所示，表中位置为故障点到靠近逆变电源母线的距离。

由于线路折反射过程较为复杂，受制因素较多，其能量比值并未呈现线性规律，但母线两侧的能量相对关系始终能够正确表明故障方向，因此保护方案不受故障位置的影响。50、100km 线路的测试结果如附录 A 表 A3、A4 所示。

5 硬件实验

在先前的数据分析中，分析对象均为一次侧的故障数据，没有经过装置的实际采样。为验证方案在实际保护装置中的有效性，将仿真数据导入行波测试装置，由博电 PH05 型行波测试仪(图 14(a)中①处设备)将数字信号转化为等效电平输入保护装置 CSC-103A2-N (图 14(a)中②处设备)，来进行故障方向判别的测试，表 8 为测试结果。

图 14(b)、14(c)为柔直送出线中保护线路区内发生故障后，装置 R₁ 与 R₂ 输入的信号与采样得到的信号对比图。从图中可以看出，装置实际采集到的信号会存在噪声，同时对于高频部分的信号存在一定的失真，对于利用超高频信号进行故障判定的方案可能造成影响。

图 14(d)为装置内部数据处理后的对比图，可见 R₂ 处电流在变换后整体能量远大于 R₁ 处电流在变换后的整体能量，R₂ 处累积突变能量比值 k 等于 156.6，因此保护装置能够正确识别故障方向，证明

保护方案是可行的。装置仅用了 0.03ms 即完成了全部计算，故保护的判据时间小于 3ms。

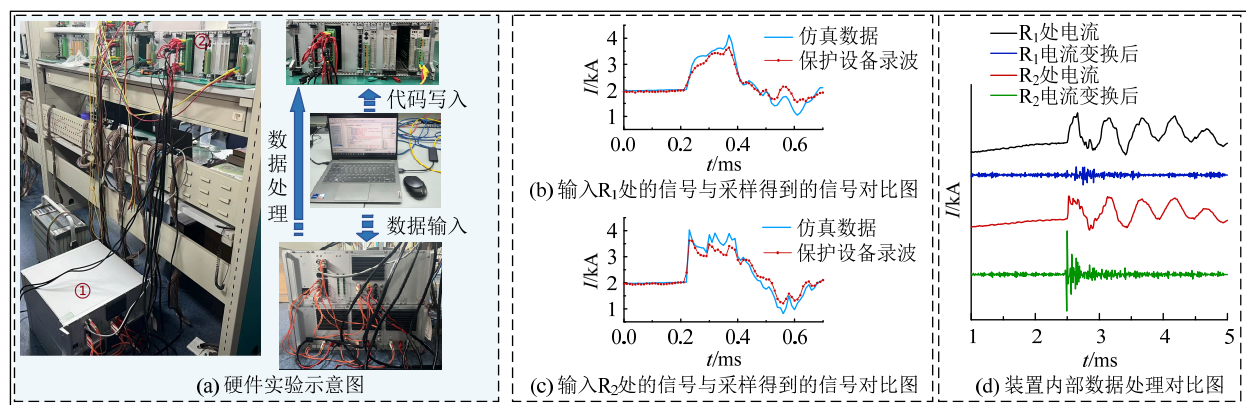


图 14 硬件实验示意图

Fig. 14 Hardware experiment diagram

表 8 硬件测试结果				
Table 8 Hardware Test Result				
位置	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
区外	76.6	1	1.96	1
区内	1	156.6	59.2	1

由此可见，保护方案能够利用二次侧电流识别故障方向，准确识别故障线路。

6 结论

本文基于阶跃行波在线路上的折反射过程，提出了一种基于电流累积突变能量的输电线路纵联保护方案，得到以下结论：

- 1) 母线各出线的电流累积突变量存在差异，借助这一差异可以实现故障正方向的判别。
- 2) 交叉重叠差分变换能够滤除母线各出线电流中含量相同的频率分量，放大行波电流导致的突变量差异特征，适用于累积突变能量的计算。
- 3) 依据电流累积突变能量比较构建的方向纵联保护方案，经过仿真测试、硬件测试，证明了其在新型电力系统中具有较强的适用性，同时具备很强的工程可实现性。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

[1] 郑博文, 王增平, 吕哲, 等. 基于暂态量的继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 18-25.
ZHENG Bowen, WANG Zengping, LÜ Zhe, et al. Research on transient-based relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 18-25(in Chinese).

[2] 彭放, 高厚磊, 郭一飞, 等. 构网逆变器电源故障穿越控制策略及其对保护影响的研究综述[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3673-3685.
PENG Fang, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. A review of fault ride-through control strategies of grid-forming inverter-based resources and the influence on protection[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3673-3685(in Chinese).

[3] 王兴国, 于溯, 周泽昕, 等. 新能源电源控制故障响应对交流线路距离保护影响分析[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3834-3843.
WANG Xingguo, YU Su, ZHOU Zexin, et al. Action analysis of AC line distance protection considering new energy power control response[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3834-3843(in Chinese).

[4] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3118.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3118(in Chinese).

[5] 罗四倍, 段建东, 张保会. 基于暂态量的 EHV/UHV 输电线路超高速保护研究现状与展望[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 32-41.
LUO Sibe, DUAN Jiandong, ZHANG Baohui. Present status and prospect of research and development of transient component based ultra-high-speed protection for EHV/UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 32-41(in Chinese).

[6] 和敬涵, 范瑜, 薄志谦, 等. 基于对称分量变换的暂态电流极性方向比较保护算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 116-120, 136.
HE Jinghan, FAN Yu, BO Zhiqian, et al. Current traveling wave polarity comparisonal protection algorithm based on the transformation of symmetrical component[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 116-120, 136(in Chinese).

[7] 郑涛, 宋祥艳. 适用于多端直流电网的电压极性比较式行波保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4690-4698.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Traveling wave protection scheme of voltage polarity comparison formula for multi-terminal DC power network[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4690-4698(in Chinese).

[8] 邢志杰, 田行军, 刘宇晰, 等. 电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3540-3546.
XING Zhijie, TIAN Xingjun, LIU Yuxi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3540-3546(in Chinese).

[9] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 不依赖双侧时钟同步的输电线路双端行波测距[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 199-209.
ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Double-ended travelling wave fault location independent of two side time synchronization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 199-209(in Chinese).

[10] 董新洲, 陈彬书, 董启环, 等. 应用分布式电压传感技术的配电

- 线路行波故障测距[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4837-4846.
DONG Xinzhou, CHEN Binshu, DONG Qihuan, et al. Traveling waves fault location of distribution lines based on distributed voltage sensing technology[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4837-4846(in Chinese).
- [11] 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): 2386-2392.
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): 2386-2392(in Chinese).
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 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 fitting residual of fault voltage reverse traveling wave[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5120-5128(in Chinese).
- [14] 邓丰, 史鸿飞, 冯思旭, 等. CNN-LSTM 全景故障特征挖掘的配电网单端定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 114-126.
DENG Feng, SHI Hongfei, FENG Sixu, et al. Single-ended traveling wave location method for distribution network based on CNN-LSTM panoramic fault feature mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 114-126(in Chinese).
- [15] 邓丰, 曾哲, 祖亚端, 等. 基于行波全景特征深度挖掘的单端故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1310-1321.
DENG Feng, ZENG Zhe, ZU Yarui, et al. Single-ended fault location method based on traveling wave panoramic fault characteristics deep mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1310-1321(in Chinese).
- [16] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-43.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, REN Jinfeng, et al. Single-ended transient-based protection for EHV transmission lines basic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 37-43(in Chinese).
- [17] 吴宇奇, 黎钊, 肖澍昱, 等. 超高压输电线路单端暂态量欠范围式保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(S1): 70-81.
WU Yuqi, LI Zhao, XIAO Shuyu, et al. The non-unit transient-based underreach protection for EHV Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 70-81(in Chinese).
- [18] 郑涛, 宋祥艳. 基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电线路快速保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4616-4624.
ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Fast protection scheme for AC transmission lines based on ratio of high and low frequency energy of transient traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4624(in Chinese).
- [19] 刘浩芳, 王增平, 徐岩, 等. 超高压输电线路波过程及暂态电流保护性能分析[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 71-75.
LIU Haofang, WANG Zengping, XU Yan, et al. Analysis of transmission process of fault-generated travelling wave along EHV transmission lines and performance of transient current protection [J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 71-75(in Chinese).
- [20] 吕哲, 王增平, 许琬昱, 等. 基于母线关联出线暂态频谱信息的 UPFC 线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 139-146.
LÜ Zhe, WANG Zengping, XU Wanyu, et al. Pilot protection of UPFC line based on transient spectrum information of busbar-connected outgoing lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 139-146(in Chinese).
- [21] WANG Bingran, WANG Zengping, WANG Zhaochen, et al. A novel transient directional pilot protection principle based on sequential overlapping derivative transform for AC transmission lines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(1): 128-145.
- [22] 吴宇奇, 黎钊, 肖澍昱, 等. 基于电子式电压互感器边界特性分析的 35 kV 配网输电线路单端暂态量保护方案及其整定[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4666-4681.
WU Yuqi, LI Zhao, XIAO Shuyu, et al. The non-unit transient-based protection and its settings for 35 kV distribution lines based on the line boundary characteristic of electronic voltage transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4666-4681(in Chinese).
- [23] 束洪春, 代月, 安娜, 等. 基于交叉重叠差分变换的 MMC-HVDC 线路故障识别方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 203-214, 226.
SHU Hongchun, DAI Yue, AN Na, et al. Fault identification method of MMC-HVDC line based on sequential overlapping derivative transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 203-214, 226(in Chinese).
- [24] 方煜. 含逆变电源的新能源电力系统故障特性分析与计算研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [25] 束洪春, 曹璞璘, 张广斌, 等. 雷电流波形参数检测视角下 ± 800 kV 直流输电线路导线绕击分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1203-1215.
SHU Hongchun, CAO Pulin, ZHANG Guangbin, et al. Electromagnetic analysis of shielding failure in ± 800 kV DC transmission line in the aspect of acquiring lightning parameters [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1203-1215(in Chinese).
- [26] 司大军, 束洪春, 陈学允, 等. 输电线路雷击的电磁暂态特征分析及其识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 64-69.
SI Dajun, SHU Hongchun, CHEN Xueyun, et al. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 64-69(in Chinese).
- [27] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 18-26.
LÜ Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26(in Chinese).



王柄然

在线出版日期: 2024-12-18。

收稿日期: 2024-07-16。

作者简介:

王柄然(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为暂态量保护, E-mail: 18091986292@189.cn;

王增平(1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化, 继电保护等, E-mail: wangzp1103@sina.com;

王彤(1985), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制, 暂态稳定分析与紧急控制等, E-mail: hdwangtong@126.com;

吕哲(1994), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新型电力系统电压安全, 继电保护等, E-mail: lvzhee@126.com。

(编辑 李健一)

附录 A

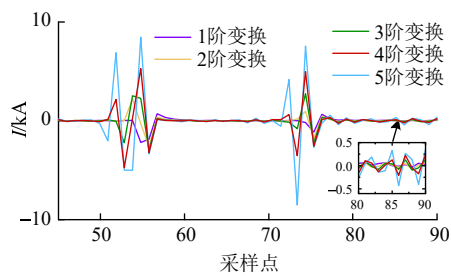


图 A1 多阶 SOD 变换对比图

Fig. A1 Comparison diagram of different order SOD transformation

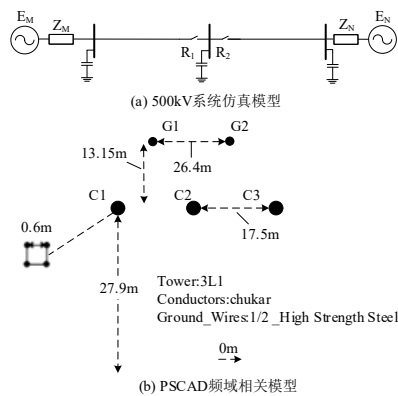


图 A2 PSCAD 仿真验证模型

Fig. A2 PSCAD simulation verification model

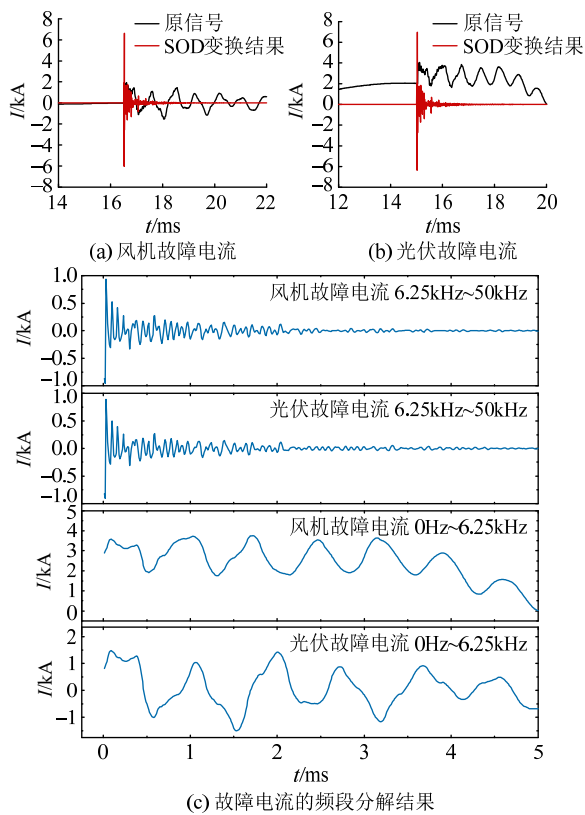


图 A3 不同系统故障变换结果图

Fig. A3 Fault transformation results of different systems

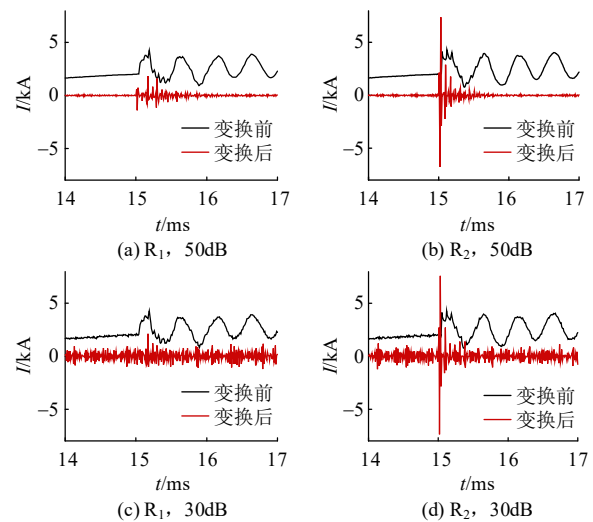


图 A4 噪声环境下的电流变换对比图

Fig. A4 The current transformation contrast diagram under the noise environment

表 A1 仿真测试结果

Table A1 Simulation test results

位置	l/km	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
f ₁	100	1590.1	1	43.8	1
	50	685.8	1	115.5	1
f ₂	100	2616.9	1	87.9	1
	50	841.6	1	27.5	1
f ₃	100	1	2207.9	1465.4	1
	50	1	758.2	312.8	1
f ₄	100	1	1312.9	1413.5	1
	50	1	594.9	525.3	1
f ₅	100	1	1470.8	1592.4	1
	50	1	283.3	513.5	1
f ₆	100	1	88.1	1	3102.3
	50	1	45.7	1	1243.9
f ₇	100	1	45.5	1	1463.1
	50	1	90.2	1	778.3

表 A2 20km 线路测试结果

Table A2 Test results of 20km transmission line

线路	位置/km	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
AB	5	64.2	1	9.4	1
	10	342.5	1	32.2	1
	15	183.7	1	15.6	1
BC	1	1	418.9	83.6	1
	2	1	124.1	36.4	1
	3	1	900.3	179.2	1
	4	1	153.7	203.5	1
	5	1	141.2	55.9	1
	6	1	353.8	209.5	1
	7	1	248.8	296.2	1
	8	1	255.7	118.1	1
	9	1	190.1	312.1	1
	10	1	221.9	242.4	1
	11	1	228.9	195.2	1
	12	1	113.5	252.9	1
	13	1	233.9	292.7	1
	14	1	177.9	379.1	1
	15	1	52.1	143.4	1
	16	1	202.3	163.2	1

	17	1	171.2	902.1	1
	18	1	36.5	135.6	1
	19	1	72.9	427.7	1
CD	5	1	11.0	1	171.8
	10	1	26.1	1	272.6
	15	1	9.0	1	63.3

表 A3 50km 线路测试结果

Table A3 Test results of 50km transmission line

线路	位置/km	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
AB	12.5	1812.5	1	27.2	1
	25	684.8	1	153.8	1
	37.5	243.1	1	108.2	1
BC	2.5	1	3760.3	61.3	1
	5	1	883.8	49.6	1
	7.5	1	714.7	402.9	1
	10	1	350.2	808.1	1
	12.5	1	220.7	1963.9	1
	15	1	123.1	2461.3	1
	17.5	1	1853.7	553.3	1
	20	1	2083.6	27.5	1
	22.5	1	1089.9	436.3	1
	25	1	619.2	664.0	1
	27.5	1	446.4	1452.9	1
	30	1	28.7	3056.1	1
	32.5	1	547.5	2189.4	1
	35	1	2022.8	120.9	1
	37.5	1	1604.4	216.8	1
	40	1	749.5	376.0	1
	42.5	1	408.9	910.7	1
	45	1	53.2	1255.1	1
	47.5	1	63.1	6108.4	1
CD	12.5	1	74.7	1	245.8
	25	1	83.6	1	651.3
	37.5	1	25.7	1	1901.5

表 A4 100km 线路测试结果

Table A4 Test results of 100km transmission line

线路	位置/km	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
AB	25	1027.2	1	234.5	1
	50	1498.1	1	39.9	1
	75	1886.6	1	330.1	1
BC	5	1	2014.6	23.5	1
	10	1	908.5	1439.0	1
	15	1	144.7	2645.9	1
	20	1	3928.7	121.5	1
	25	1	1625.3	1012.9	1
	30	1	18.9	3232.6	1
	35	1	3074.5	469.3	1
	40	1	2599.0	433.2	1
	45	1	117.9	2831.7	1
	50	1	1312.8	1422.2	1
	55	1	3276.2	116.7	1
	60	1	450.3	2235.9	1
	65	1	446.2	3262.4	1
	70	1	3616.3	19.1	1
	75	1	1137.4	1441.5	1
	80	1	119.7	3981.2	1
	85	1	2882.2	146.6	1
	90	1	1767.3	831.7	1

	95	1	23.9	2002.3	1
CD	25	1	275.3	1	1906.9
	50	1	35.6	1	1535.2
	75	1	245.4	1	1247.5